

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**AKIŞKAN YATAK ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Bahaddin KOCATAŞ

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

EKİM 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**AKIŞKAN YATAK ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELLEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Muhammed Bahaddin KOCATAŞ
(301181026)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Üner ÇOLAK

EKİM 2020

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301181026 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi MUHAMMED BAHADDİN KOCATAŞ ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “AKIŞKAN YATAK ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELLEMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Üner ÇOLAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Sevan KARABETOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Barış YILMAZ
Marmara Üniversitesi

Teslim Tarihi : 2 Ekim 2020
Savunma Tarihi : 19 Ekim 2020





Aileme,



ÖNSÖZ

Çalışmanın hazırlanma sürecinin her aşamasında bilgilerini, tecrübelerini ve değerli zamanını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Üner ÇOLAK’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan sevgili aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ekim 2020

M. Bahaddin KOCATAŞ
(Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. AKIŞKANLAŞMA.....	3
2.1 Akışkanlaşma Rejimleri	3
2.2 Akışkanlaşmanın Matematiksel İfadeleri.....	4
3. GAZ-KATI AKIŞLI AKIŞKAN YATAKLAR.....	7
3.1 Kabarcıklı Akışkan Yatağın Gelişim Tarihi.....	8
3.2 Kabarcık Formasyonu	9
3.3 Akışkan Kabarcıkların Akış Düzeni	13
3.4 Kabarcıklı Akışkan Yatakta Isı Transfer Sabiti	14
3.5 Katı Parçacıkların Isıtılması	15
4. ÇOK FAZLI AKIŞ MODELLEMESİ.....	17
4.1 Sıvı Hacmi Yaklaşımı (VOF).....	17
4.2 Eulerian-Lagrangian Yaklaşımı	17
4.3 Eulerian-Eulerian Yaklaşımı	18
5. TERMAL ENERJİ DEPOLAMA	23
5.1 Termal Enerji Depolama Kapasitesi ve Tank Büyüklüğü.....	24
5.2 Tanecikli Termal Enerji Depolama Sisteminde Malzeme Seçimi	25
6. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ.....	25
7. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	29
7.1 Solar Alıcı Olarak Kullanılan Akışkan Yatağın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonu	29
7.2 Akışkan Yatak Teknolojisinin Isı Depolama Potansiyeli : Hidrodinamik ve Termal Analiz	31
8. HİPOTEZ	37
8.1 Model Tanımlaması.....	37
8.2 Başlangıç ve Sınır Koşulları.....	39
8.3 Simülasyon Parametreleri	41
8.4 Simülasyon Sonuçları ve Tartışma.....	42
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ.....	61



KISALTMALAR

CFD	: Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
DEM	: Discrete Element Method (Ayrık Eleman Yöntemi)
TED	: Termal Enerji Depolama
VOF	: Volume of Fluid (Sıvı Hacmi Yaklaşımı)





SEMBOLLER

A	: Yüzey Alanı
Ar	: Archimedes Sayısı
C_o	: Sanal kütle katsayısını
C_D	: Sürüklenme Katsayısı
D	: Çap
d_p	: Ortalama Tanecik Boyutu
E	: Enerji
e_{ss}	: Restitüsyon Katsayısı
H	: Entalpi
$\vec{g}$	: Yerçekimi İvmesi
K	: Fazlar Arası Değişim Katsayısı
N	: Frekans
P	: Basınç
Re	: Reynolds Sayısı
S	: Kabarcık Merkezi Mesafesi
T	: Zaman
$\vec{u}$	: Hız Vektörü
U_o	: Yüzeysel Gaz Hızı
U_{mf}	: Minimum Akışkanlaşma Hızı
V	: Hacim
Y	: Kabarcık içindeki gazın sürtünmesi
Q	: Hacimsel Gaz Akışı
Ω	: İntegral Gaz Sızıntısı
μ	: Dinamik Viskozite
ρ	: Yoğunluk
Δ	: Yatak Kalınlığı
$\bar{\tau}$	: Gerilim Tensörü
$\vartheta_{r,s}$	: Terminal Hızı
η	: Verim
ϵ	: Gaz fazının sıvı içerisinde kapladığı hacim
$\alpha_{s,maks}$	: Maksimum Doluluk Limiti



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Kullanılabilecek katı taneciklerin karşılaştırmaları.....	25
Çizelge 7.1 : Katı ve gaz fazındaki malzemelerin özellikleri.....	29
Çizelge 7.2 : Katı ve gaz fazındaki malzemelerin özellikleri.....	33
Çizelge 7.3 : Kullanılan simülasyon parametreleri.....	33
Çizelge 8.1 : Katı ve gaz fazındaki malzemelerin özellikleri.....	41
Çizelge 8.2 : Kullanılan simülasyon parametreleri.....	42





ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Akışkanlaşma rejimleri.....	4
Şekil 3.1: Taneciklerin akış rejimlerinin sınıflandırılması.	8
Şekil 3.2: Gaz kanalları (solda) ve Yatakta oluşan çatlaklar (sağda)	8
Şekil 3.3: Akışkan yatakta tek bir ağızdan kabarcık oluşumu için iki farklı geometrik kurulum.	10
Şekil 3.4: Kabarcık oluşumu.	14
Şekil 4.1: Lagrange tanımlamasında her bir parçacığın konum ve zamanlarının izlenmesi gerekir.	18
Şekil 4.2 : Eulerian yaklaşımında değişkenler herhangi bir konumda ve zamanda tanımlanır.	19
Şekil 7.1: (a) Yatağın sınır koşulları (b) Kullanılan ağ yapısı.	30
Şekil 7.2: İlk 5 saniye için kum hacim fraksiyonu.	31
Şekil 7.3: İlk 5 saniye için kumun sıcaklık değişimi.	31
Şekil 7.4: Akışkanlaştırılmış yatağın fiziksel alanı.	32
Şekil 7.5: Simülasyon alanının sınır koşullarına sahip ağı.	32
Şekil 7.6: Yatağın 0-5 saniye arasındaki hacim fraksiyonu grafiği.....	34
Şekil 7.7: 15 cm yükseklikteki dağılmış fazın hacim fraksiyonu.....	35
Şekil 7.8: 15 cm yükseklikteki dağılmış fazın ortalama sıcaklığının zaman göre değişimi.	35
Şekil 7.9: 15 cm yükseklikteki dağılmış fazın ortalama sıcaklığının 1 saat boyunca değişimi.	36
Şekil 8.1: Akışkan yatağın ağ yapısı ve sınır koşulları.....	37
Şekil 8.2 : En sık ağ yapısı (15000 element, 15351 düğüm).	38
Şekil 8.3 : En geniş ağ yapısı (3750 element, 3926 düğüm).	38
Şekil 8.4 : Kullandığım ağ yapısı (9600 element, 9881 düğüm).	39
Şekil 8.5 : Silisyum Dioksit için hacim fraksiyonu.	43
Şekil 8.6: Alüminyum Oksit için hacim fraksiyonu.	44
Şekil 8.7: Zirkonyum Dioksit için hacim fraksiyonu.	44
Şekil 8.8: Silisyum Dioksit için sıcaklık değişim profili.	45
Şekil 8.9: Silisyum Dioksit için enerji değişim profili.	45
Şekil 8.10: Alüminyum Oksit için sıcaklık değişim profili.	46
Şekil 8.11: Alüminyum Oksit için enerji değişim profili.	46
Şekil 8.12: Zirkonyum Dioksit için sıcaklık değişim profili.	47
Şekil 8.13: Zirkonyum Dioksit için enerji değişim profili.	47
Şekil 8.14 : Alüminyum Oksit için 1 dakikalık sıcaklık değişim profili.	48
Şekil 8.15 : Alüminyum Oksit için 1 dakikalık enerji değişim profili.	49
Şekil 8.16 : Malzemelerin sıcaklık değişimlerinin kıyaslanması.	49
Şekil 8.17 : Zirkonyum Dioksit ve Silisyum Dioksit'in sıcaklık değişimlerinin kıyaslanması.	50
Şekil 8.18 : Malzemelerin enerji değişimlerinin kıyaslanması.....	50
Şekil 8.19 : Zirkonyum Dioksit ve Silisyum Dioksit'in enerji değişimlerinin kıyaslanması.	51



AKIŞKAN YATAK ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELLEMESİ

ÖZET

Akışkan yatak, yatak içerisinde bulunan katı taneciklerin verilen gaz etkisiyle akışkan gibi davrandıkları duruma verilen isimdir. Bu olay basınçlı bir gazın, ortamı oluşturan katı tanecikler arasından geçmesiyle oluşur. Bu durumda katılar akışkan karakteristiği göstermeye başlar. Verilen gaz akışının hızı artırıldıkça taneciklere uygulanan kaldırma kuvveti de artırılmış olur. Bu gaz akışının artırılmasına taneciklere uygulanan kaldırma kuvveti ile yerçekimi arasında denge oluncaya kadar devam edilir. Denge durumunda ise yukarı doğru akış halindeki havanın içerisinde parçacıklar asılı kalırlar ve akışın özelliklerini sergilemeye başlarlar. Bu noktadan sonra akışkanlaşma başlamış olur. Daha sonra hızın artırılmasına bağlı olarak kabarcıklar ortaya çıkar ve bu çalışmada analizi yapılan kabarcıklı akışkan yatak modeli ortaya çıkmış olur.

Bu tez çalışması akışkan yatağın enerji depolama özelliklerini belirlemek için yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarından elde edilen, akışkan yataklı bir enerji depolama sisteminde yatak malzemelerinin hidrodinamik ve termal davranışlarını sunmaktadır. Bu amaçla hazırlanan modelde, Euler laminer akış modeli benimsenmiştir. Katı ve gaz fazları için sürekliliği, momentumu ve enerji denklemleri de bu modelde dikkate alınmıştır. Sürüklenme katsayısı için Syamlal-O'Brien modeli kullanılmıştır. Yatağın ağ yapısı yine kullanılan paket program ANSYS Mesh içinde oluşturulduktan sonra hesaplamalı akışkan dinamiği analizine (ANSYS Fluent 19.3) geçerek, önceden belirlediğimiz yatak malzemelerinin de özellikleri ve birbirleri arasındaki etkileşimler de göz önünde bulundurularak, simülasyon sonuçlarına ulaşıldı.

Enerji depolamada kıyaslanacak yatak malzemeleri olarak, kullanılan diğer yatak malzemelerine göre, yoğunluğu daha yüksek olan Zirkonyum Dioksit, özgül ısısı daha yüksek olan Silisyum Dioksit ve ısıl iletkenliği daha yüksek olan Alüminyum Oksit kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarında her bir akışkan yatak modelinin katı hacim fraksiyonlarındaki 5 saniyelik değişimleri gösterilmiştir. Termal performansa baktığımızda simülasyonlar yapılarak enerji ve sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Sonuç olarak en kısa sürede en fazla sıcaklık değişimi gözlenen ve ısı transferi imkanı sağlayan malzeme, yoğunluğu ve özgül ısısı kullanılan diğer malzemelere düşük ancak ısıl iletkenliği kullanılan diğer malzemelere göre yüksek olan, Alüminyum Oksit olmuştur.



FLUIDIZED BED ENERGY STORAGE SYSTEM COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODELING

SUMMARY

Fluidized bed is the name given to the situation where the solid particles in the bed behave like a fluid with the effect of the given gas. This event occurs when a pressurized gas passes through the solid particles forming the bed. In this case, the solids begin to show fluid characteristics. As the speed of the gas flow given is increased, the buoyant force applied to the particles is increased. Increasing this gas flow continues until there is a balance between the buoyant force applied to the particles and gravity. In the case of equilibrium, particles remain suspended in the upstream air and begin to exhibit the properties of the flow. After this point, fluidization begins. Then, bubbles appear due to the increase in speed, and the bubbling fluidized bed model analyzed in this study is revealed.

The formation of gas bubbles is one of the prominent features of fluidized beds and studies have been conducted about it for a long time. Many unique properties of fluidized beds can be directly related to the presence of bubbles. And these properties may vary with the behavior of the bubbles. For this reason, estimating the bubble properties such as size distribution and the distribution of the rising speed of the bubble by regions makes our job greatly easier. However, these distributions are dependent on the properties of the first bubble produced at the place where the gas is produced. The formation of bubbles significantly affects mass and heat transfer processes.

Heat energy occurs as a result of atomic or molecular vibrations in materials. It is stored as sensible heat, latent heat, reaction heat or a combination of all of these with the change in the internal energy of the material. In sensible heat storage, sensible heat resulting from the change in the temperature of the material from which the heat is stored is used. Heat storage can be done in materials where liquid, solid and liquid and solid are together. In latent heat storage, phase changing materials are used. In the temperature range suitable for storage, the latent heat caused by the phase change of the material from which the heat will be stored is determined. In this method, the volume of the energy storage unit is smaller than in the sensible heat. In thermochemical storage, heat energy is stored as bond energy in the compound and this stored energy is released by reversible reactions.

Heat energy storage systems can be divided into two as short-term storage and long-term storage, depending on their duration of use. Short-term ones are divided into day-night and long-term ones as summer-winter seasonally. In addition, these systems are divided into hot storage, cold storage or hot and cold storage depending on the purpose of use. With long-term storage, it is possible to store the heat of summer and use it in winter or store it in winter and use it in summer.

Due to the high heat transfer rate caused by the increased interaction area of the two phases in the gas-solid fluidized beds, it is a better option in thermal heat storage applications than other types of fluidized beds (eg liquid-gas). Thanks to its prominent

mass and heat transfer characteristics, its use in industry is wide. Some prominent application areas are coating, drying, granulation and fuel synthesis.

Multiphase flows show different regimes depending on the geometry of the equipment used, the ambient conditions during operation and the properties of the gas and solid phases. Industrial-scale fluidized beds operating in the bubble regime have gas bubbles formed and rising in solid-gas insoluble in each other. Many such gas bubbles affect the heat and mass transfer rate. Depending on whether the reactions are exothermic or endothermic, the heat exchange of the fluidized particles varies from the emulsion phase to the bubble phase or vice versa.

As an alternative in energy storage systems, we encounter many systems. When fluidized beds used for different purposes are used as energy storage system, the properties of the material to be stored in the fluidized bed investigated.

Various materials are found in the use of fluidized beds as energy storage systems. By classifying these materials according to their various properties, materials having different values according to the selected properties were investigated.

The aim of the study is to obtain the most efficient result by selecting the materials with the desired properties after modeling the fluidized bed.

With the use of technology in the modeling of multiphase flow regimes, the multiphase flow is modeled with ANSYS Fluent software, which is one of the computational fluid dynamics programs. Based on similar studies to reach a numerical solution, the results have been reached by using appropriate methods.

This thesis study presents the hydrodynamic and thermal behavior of bedding materials in a fluidized bed energy storage system obtained from computational fluid dynamics simulations to determine the energy storage properties of the fluidized bed. In the model prepared for this purpose, Euler laminar flow model has been adopted. Continuity, momentum and energy equations for solid and gas phases are also taken into account in this model. Syamlal-O'Brien drag model was used for the drag coefficient. After the mesh structure of the bed was created in the ANSYS Mesh software, the simulation results were reached by the computational fluid dynamics analysis (ANSYS Fluent 19.3), taking into account the properties of the bedding materials we previously determined and the interactions between each other.

The mesh structure was created by preparing a 2D model of the fluidized bed. The width of the bed is 0.2 meters and the height is 1.2 meters. Silicon Dioxide, Aluminum Oxide and Zirconium Dioxide were determined as bearing materials. The height of these materials in the bed was determined as 0.24 meters. In addition, the created mesh structure consists of 9600 elements.

The reason for comparing these materials is because of the differences in these values between the properties shown in the list. It will be determined which types of materials are suitable for the purpose by considering these parameters.

Zirconium Dioxide, Silicon Dioxide and Aluminum are used as bedding materials to be compared in energy storage. Simulation results show the 5-second changes of each fluidized bed model in the solid volume fractions.

As a result, the material with the highest temperature variation and heat transfer in the shortest period of time was Aluminium Oxide, which is low in density and specific heat capacity, but high in thermal conductivity in comparison with other materials.

The thermal conductivity of Aluminium Oxide, which is the material with which we get the highest performance in the shortest time in the temperature increase and heat transfer rate, is significantly higher than other materials.

As a result, the types of materials that we can reach the thermal equilibrium in energy storage systems and get the fastest results in energy transfer are prominent as Aluminium Oxide type materials.





1. GİRİŞ

Enerji depolama sistemlerinde alternatif olarak karşımıza birçok sistem çıkmaktadır. Farklı amaçlarla kullanılan akışkan yatakların, enerji depolama sistemi olarak kullanıldığında yatak içinde enerji depolanacak malzemenin hangi özelliklere sahip olması gerektiği açıklanmıştır.

Akışkan yatakların enerji depolama sistemi olarak kullanılmasında karşımıza çeşitli malzemeler çıkmaktadır. Bu malzemeleri çeşitli özelliklerine göre sınıflandırarak, seçilen özelliklere göre farklı değerlere sahip olan malzemeler gösterilmiştir.

Çalışmanın amacı akışkan yatağı modelledikten sonra istenilen özellikteki malzemeleri seçerek en verimli sonucu elde etmektir.

Çift fazlı rejimlerin modellemesinde teknolojiden faydalanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği programlarından biri olan ANSYS Fluent paket programıyla çift fazlı akışın modellemesi yapılmıştır. Sayısal çözüme ulaşmak için yapılan benzer çalışmalar baz alınarak ve uygun metodlar kullanılarak sonuca ulaşılmıştır.



2. AKIŞKANLAŞMA

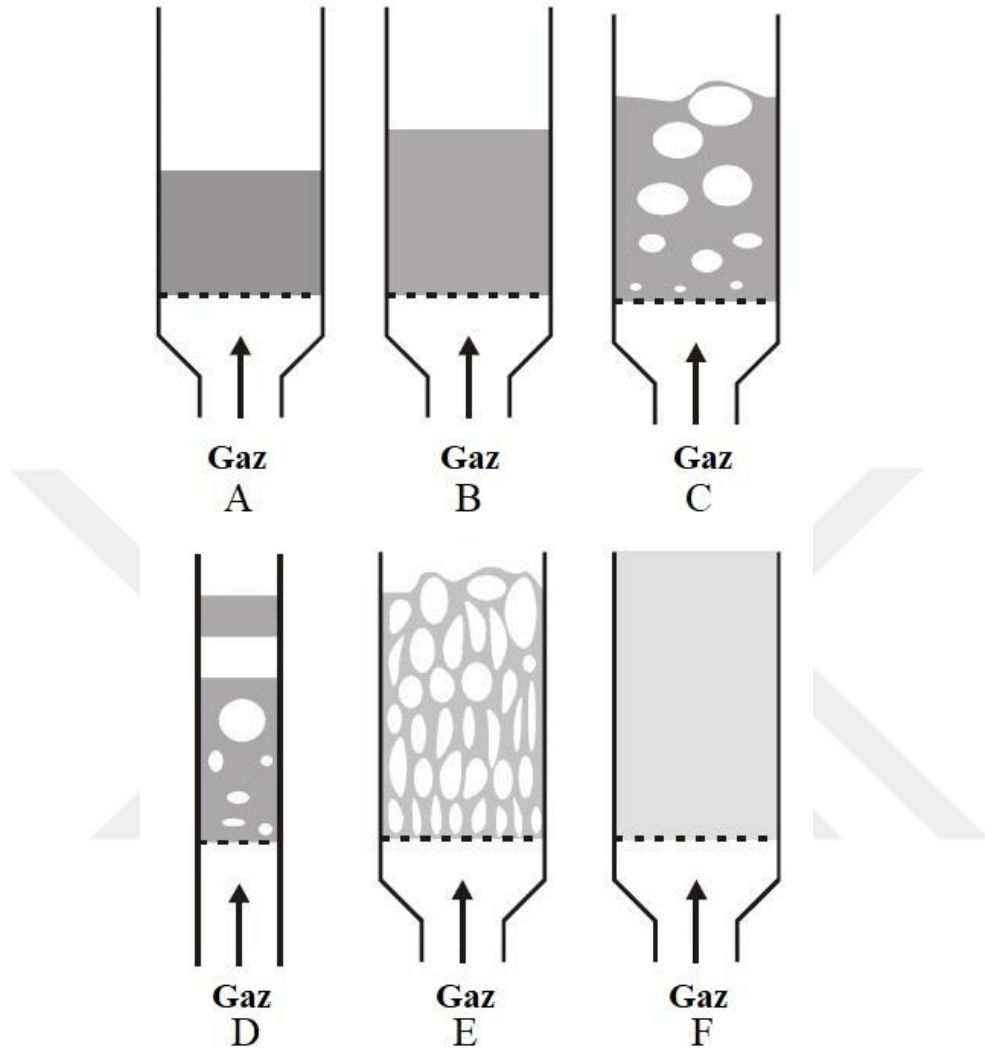
Akışkanlaşma, katı dolu bir yatakta yukarı doğru gaz veya sıvı verilerek katıların bir akışkan gibi davranması işlemidir. İçinde katı tanecikler olan bir yatakta, bir akışkan yeterli bir hızda tanecikler arasından yukarıya doğru verildiğinde katı tanecikler yukarıya doğru itilir yatak genişler ve bu sayede katı tanecikler akışkanlaşmış olur. Akışkanlaşma ticari işlemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır; uygulamalar kabaca iki kategoriye ayrılabilir;

- Taşıma, ısıtma, emilim, ince tozun karıştırılması gibi fiziksel işlemler ve
- Katı katalizörler üzerindeki gazların reaksiyonları ve katıların gazlarla reaksiyonları gibi kimyasal işlemler.

2.1 Akışkanlaşma Rejimleri

Katı tanecikler akışkanlaştırıldığında, akışkan yatağın özellikleri değiştikçe farklı şekilde davranmaya başlarlar. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi akışkanlaşmanın birçok rejimi vardır. Yataktan geçen gaz akışı sürekli olarak arttığında, birkaç taneciğin titreşmesine rağmen yine de yatak ilk durumdaki hareketsiz yatak ile aynı yükseklikte olur. Buna sabit yatak denir (Şekil 2.1A). Artan gaz hızı ile, yukarı doğru hareket eden gaz tarafından verilen sürüklenme kuvvetini taneciklerin ağırlığına eşit olur. Bu olay akışkanlaşma başlangıcıdır ve buna minimum akışkanlaşma denir (Şekil 2.1B). Gaz akışını daha da arttırsak kabarcıkların oluşumu başlar. Bu noktada, Şekil 2.1C’de gösterildiği gibi bir kabarcıklı akışkan yatak meydana gelir. Hız daha da arttıkça kabarcıklı akışkan yataktaki kabarcıklar yükselerek birleşir ve büyür. Yüksekliğin yatağın çapına oranı yeterince yüksekse, kabarcıkların boyutu yatağın çapı ile hemen hemen aynı olabilir. Buna yığılma denir (Şekil 2.1D). Eğer tanecikler yeterince yüksek bir gaz akış hızında akışkanlaştırılmışsa, yatağın üst yüzeyi kaybolur ve kabarcıklar yerine çeşitli boyutlarda ve şekillerde katı kümelerin ve gaz boşluklarının çalkantılı bir hareketi gözlemlenir. Bu yataklara Şekil 2.1E’de gösterildiği gibi çalkantılı yataklar denir. Gaz hızının daha da artmasıyla yatak içinde katılar pnömomatik taşınma

ile taşınır ve yalın fazlı akışkanlaştırılmış yatağa sahip olduğumuz sürüklenmiş bir yatak meydana gelir (Şekil 2.1F).



Şekil 2.1 : Akışkanlaşma rejimleri.

2.2 Akışkanlaşmanın Matematiksel İfadeleri

Yatağa verilen akışkanın hızı artırıldıkça, akışkan taneciklere daha fazla kuvvet uygular ve bu kuvvet taneciklerin üzerine etki eden yerçekimi kuvvetine eşit olduğunda tanecikler hareket etmeye başlar. Bu olay minimum akışkanlaşmanın başladığı yerdir. Minimum akışkanlaşma hızı, U_{mf} , küresel tanecikler için ilk önce Archimedes sayısını, Ar , denklem 2.1'den hesaplayarak belirlenir:

$$Ar = \frac{\rho_g d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2.1)$$

Burada d_p ortalama tanecik boyutu ve μ ise akışkanın viskozitesidir. Wen ve Yu denklemi (denklem 2.3), minimum akışkanlaşma hızında hesaplanan Reynolds sayısına ($Re_{p,mf}$) göre ikinci dereceden bir polinomdur ve denklem 2.2'den elde edilir:

$$Ar = 1,650 Re_{p,mf} + 24,5 Re_{p,mf}^2 \quad (2.2)$$

Archimedes sayısını hesapladıktan sonra, Reynold sayısı denklemlerden çekilerek bulunabilir. Reynold sayısını da elde ettikten sonra minimum akışkanlaşma hızı denklem 2.3'ten elde edilir:

$$Re_{p,mf} = \frac{\rho_g u_{mf} d_p}{\mu} \quad (2.3)$$

Gaz hızı minimum akışkanlaşma hızının üzerine çıktığında kabarcıklar oluşabilir. Bunun gerçekleştiği yer taneciklerin boyutuna ve yoğunluğuna bağlıdır. Daha küçük veya daha hafif tanecikler kabarcıklar ortaya çıkmadan düzgün bir akışkanlaşma eğilimindedir. Daha büyük veya daha ağır tanecikler minimum akışkanlaşma noktasında kabarcıklanmaya başlar. Akışkan yataktaki bir gazın hareketi iki faz teorisi kullanılarak açıklanabilir. Bu teoriye göre, gaz yatakta kabarcık halinde veya bir emülsiyon fazın bir parçası olarak hareket eder. İki faz teorisi denklem 2.4 ile aşağıdaki gibi gösterilir:

$$Q_{yatak} = Q_{emülsiyon} + Q_{kabarcık} = A_{yatak} U_{mf} + A_{yatak} (U_o - U_{mf}) \quad (2.4)$$

Q_{yatak} yatak boyunca toplam hacimsel gaz akış hızı, $Q_{emülsiyon}$ yoğun faz boyunca hacimsel gaz akış hızı, $Q_{kabarcık}$ kabarcıklar boyunca hacimsel gaz akış hızı, A_{yatak} yatağın kesit alanı ve U_o yüzeysel gaz hızıdır.

Minimum akışkanlaşma noktasına kadar, tüm gaz emülsiyon fazıyla beraber yatak boyunca hareket eder. Minimum akışkanlaşma noktasını geçtikten sonra ilave edilen gaz yataktan kabarcıklar halinde geçer. Daha büyük kabarcıklar daha küçük kabarcıklardan daha hızlı hareket eder. Bu nedenle kabarcık boyutunu yönetmek önemli bir tasarım kriteridir.

Gerçek uygulamalarda iki faz teorisi (denklem 2.4) tamamen doğru değildir. İlk olarak, küçük tanecikler kabarcıklar oluşmadan yani minimum akışkanlaşma ve minimum kabarcıklanma hızları arasındaki bölgede düzgün bir akışkanlaşma yaşayabilir. Öte yandan kabarcıkların içine az miktar da olsa gaz sızar. Bu yüzden denklemin daha doğru hali olarak denklem 2.5'i kullanabiliriz:

$$\begin{aligned}
 Q_{yatak} &= (1-Y)Q_{emülsiyon} + YQ_{kabarcık} \\
 &= (1-Y)A_{yatak}U_{mb} + YA_{yatak}(U_o - U_{mb})
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

U_{mb} kabarcık oluşumunun başlaması için minimum kabarcık hızıdır ve Y ise kabarcık içindeki gazın sürtünmesidir.

3. GAZ-KATI AKIŞLI AKIŞKAN YATAKLAR

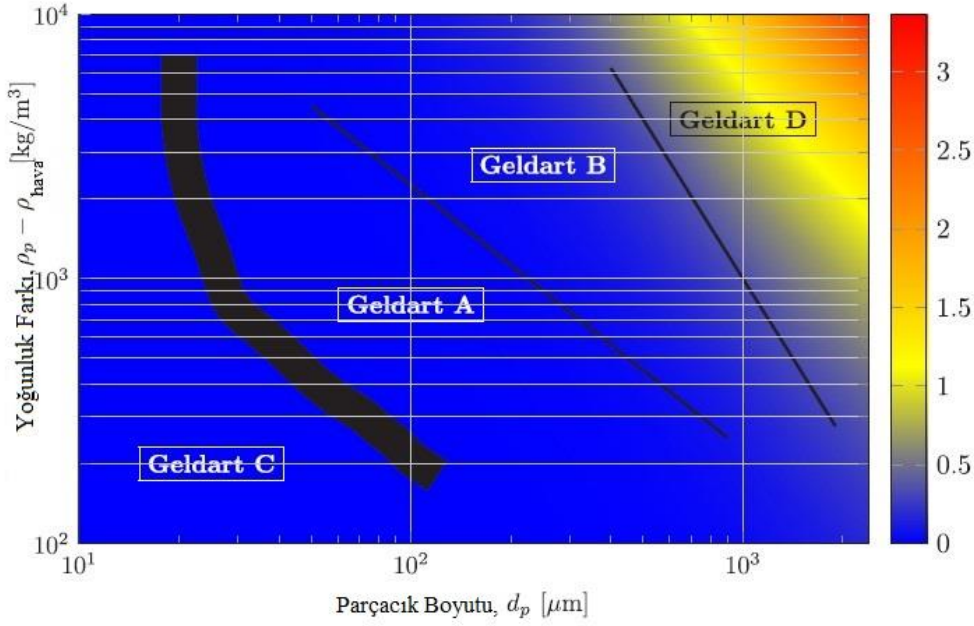
Gaz-katı akışlı akışkan yataklarda iki fazın birbiriyle etkileşim alanının artmasının neden olduğu ısı transfer oranının fazla olmasından dolayı diğer tip akışkan yataklara göre (örn. sıvı-gaz) termal ısı depolama uygulamalarında daha iyi bir seçenek olarak karşımıza çıkar. Öne çıkan kütle ve ısı transfer karakteristikleri sayesinde endüstride kullanım alanı geniştir. Öne çıkan bazı uygulama alanları kaplama, kurutma, granülasyon ve yakıt sentezidir.

Çok fazlı akışlar, kullanılan ekipmaların geometrisine, operasyon sırasındaki ortam şartlarına ve gaz ve katı fazların özelliklerine bağlı olarak farklı rejimler gösterir. Kabarcık rejiminde çalışan sanayi ölçekli akışkan yataklarda, birbiri içinde çözünmeyen katı-gaz içinde oluşan ve yükselen gaz kabarcıkları vardır. Böyle bir çok gaz kabarcığı, ısı ve kütle transfer hızını etkiler. Tepkimelerin ekzotermik veya endotermik olmasına bağlı olarak, akışkanlaşmış taneciklerin ısı değişimi emülsiyon fazından kabarcık fazına veya tam tersi yönde olur.

Buhar ve hava gibi sıcak gazlar, yapılacak işlemler için akışkan yataklardaki musluklar kullanılarak aktarım sağlanır. Girişteki gaz sıcaklığı, akışkan yataktaki yatak malzemesinin sıcaklığından farklı olduğunda, kabarcık fazının sıcaklığı katı-gaz emülsiyonunun sıcaklığına göre farklı bir sıcaklıkta olur.

Çapı 1mm'den küçük olan tanecikleri çok yüksek gaz akış hızına gerek duymadan kolayca akışkanlaşabilirler. Bu bize düşük denilebilecek bir pompalama maliyeti sağlar. Katı taneciklerin akışkanlaşma işlemi büyük ölçüde taneciğin yoğunluğuna ve boyutuna bağlıdır. Geldart Şekil 3.1'de gösterilen akışkanlaşma rejimlerini sınıflandırdı.

Geldart tanecikleri dört ana gruba ayırarak tanımlama yaptı. Figürün sol alt tarafında bulunan yaklaşık 50 μm 'den küçük tanecikleri C tipi tanecikleri gösterir. Bu taneciklerin kohezyonu yüksektir ve bu nedenden dolayı akışkanlaştırması zordur. Bu küçük boyutlu C tipi tanecikleri küçük çaplı yataklarda tıkaç akışıyla (plug flow) beraber yukarı doğru gitme eğilimindedirler. Büyük çaplı yataklarda ise dağıtıciadan yatak yüzeyine doğru kanallar oluştururlar.



Şekil 3.1: Taneciklerin akış rejimlerinin sınıflandırılması.

Böylece gaz, taneciklerle minimum etkileşime girerek yatağı atlayabilir. Bu kanallar ve çatlaklar Şekil 3.2’de görsel olarak da ayrıca tanımlandı. A tipi tanecikler ise düşük hızlı gazlarla kolayca akışkanlaşabilirler. Yüksek gaz hızlarında küçük boyutta kabarcıklar oluşturabilirler.



Şekil 3.2: Gaz kanalları (solda) ve Yatakta oluşan çatlaklar (sağda)

3.1 Kabarcıklı Akışkan Yatağın Gelişim Tarihi

Direk temas yoluyla olan transfer modellerine kıyasla akışkan yataklar, içlerindeki fazlar arasında yüksek ısı ve kütle transferlerine imkan sağlarlar. Bu nedenden

dolayısıdır ki, bu teknolojinin enerji, kimya, metacurji gibi sektörlerde kullanılması büyük fayda sağlar.

Bu yatakların sağladığı imkanların içindeki kabarcıklardan sağlandığı kabul edilir. Bu kabarcıkların karakteristiklerinin yatakta oluşan ve üretilen ilk kabarcığa bağlı olduğu belirlenmiştir. Öte yandan ısı ve kütle transfer süreçlerinin, kabarcık oluşum mekanizmasından etkilendiği belirtilmiştir. Harrison ve Leung 1961’de akışkanlaştırılmış bir yataktaki tek ağızdan gaz kabarcığı oluşumu için bir model geliştirmişlerdir. Ancak geliştirdikleri bu modelde kabarcıkların yüzeyinden emülsiyon fazına herhangi bir gaz sızıntısı olmadığını varsayarak ilerledir. Ama bu daha sonra Nguyen ve Leung tarafından 1972’de aksi kanıtlandı. Bunlardan sonra Yang ve çalışma arkadaşları (1984) ve Caram ve K. Hsu (1986) tarafından tek ağızdan gaz ve kabarcık oluşumu açıklayan modeller de üretildi. Yang ve çalışma arkadaşlarının modeli, kabarcık-emülsiyon fazı arasındaki yüzeysel gaz sızıntısının minimum akışkanlaşma hızına eşit olduğunu bize açıklar. Caram ve K.Hsu ise yüzeysel değişim hızının basınç gradyanına bağlı olduğunu belirtir. Buradaki bu tarihsel ilerlemeler, bir dahaki bölümde detaylı olarak ayrıca ele alınmıştır.

3.2 Kabarcık Formasyonu

Gaz kabarcıklarının oluşumu, akışkan yatakların belirgin özelliklerinden biridir ve uzun bir süre boyunca hakkında çalışmalar yapılmıştır. Akışkan yatakların birçok kendine has özelliği direk olarak kabarcıkların varlığıyla bağlantılı olabilir ve bu özellikler kabarcıkların davranışıyla değişkenlik gösterebilir. Bu sebepten dolayı boyut dağılımı ve kabarcığın yatak içinde yükselme hızının bölgelere göre dağılımı gibi kabarcık özelliklerini önceden doğru bir şekilde tahmin etmek işimizi büyük ölçüde kolaylaştırır. Ancak bu dağılımlar, kabarcıkların oluştuğu gaz üretilen yerdeki ilk üretilen kabarcığın özelliklerine bağlıdır. Kabarcıkların oluşum şekli, kütle ve ısı transfer süreçlerini ciddi şekilde etkiler.

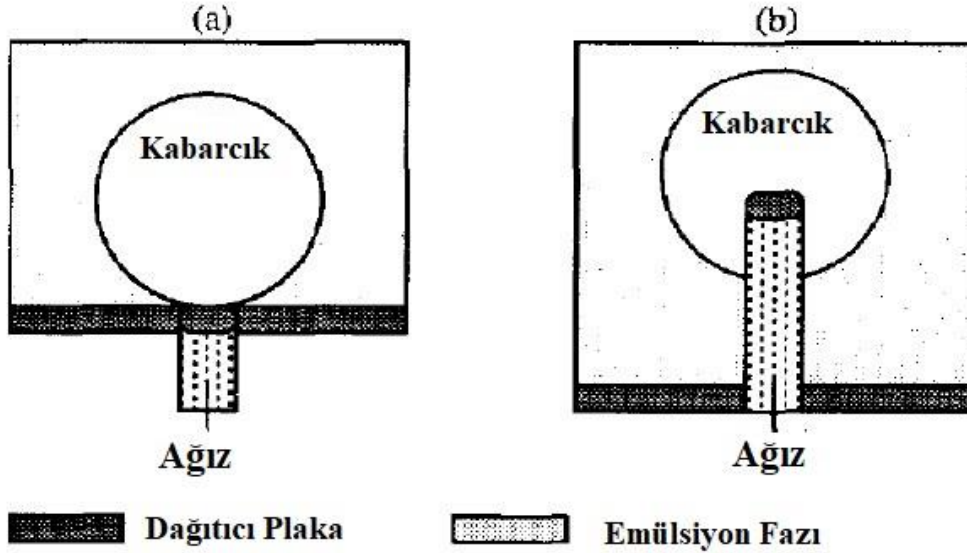
Akışkan yataklar, bir takım sıvı fazına benzer özelliklere sahiptir. Bu özellikler Harrison ve Leung’in, Davidson ve Schüller (1960) modelini benimsemesine yol açtı. Bu model en başta, benzer şartlarda bulunan viskoz olmayan bir sıvı içinde küresel kabarcık oluşumunu tanımlamak için yazılmıştı. Davidson ve Schüller’in modeline göre, baştaki ayrılımda kabarcık hacmi V_b ve kabarcık oluşumu için karşılık gelen süre

t_b , denklem 3.1 ve denklem 3.2 ile elde edilir:

$$V_b = 1,725 C_o^{0.6} \left(\frac{Q^{1.2}}{g^{0.6}} \right) \quad (3.1)$$

$$t_b = \frac{V_b}{Q} \quad (3.2)$$

burada C_o , sanal kütle katsayısını belirtir. g , yerçekimi ivmesi ve Q , delikten geçen sabit gaz akış debisini temsil eder. Sanal kütle katsayısı C_o 'nin değeri geometriye bağlıdır. Tip geometrik kurulumlar şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Akışkan yatakta tek bir ağızdan kabarcık oluşumu için iki farklı geometrik kurulum.

Önceki bölümde de söylendiği üzere, Harrison ve Leung tarafından hazırlanan modelde kabarcık yüzeyinden emülsiyon fazına gaz sızıntısı meydana gelmediği varsayıldı. Nguyen ve Leung, bir ağızdan yeni akışkanlaştırılmış katı faz olarak alümina taneciği bulunan iki boyutlu bir akışkan yatağa hava enjekte etti. Gözlemlenen kabarcık hacimlerini ağızdan gelen gaz akış hızı ile ilişkilendirdiler.

Kabarcık oluşumu sıklığı, n_b , alınırsa; gazdan emülsiyon fazına olan sızıntı denklem 3.3 ile gösterilir:

$$V_b = 0.53 \frac{Q}{n_b} \quad (3.3)$$

kabarcık oluşturma sırasında içeriye verilen gazın emülsiyon fazına % 47 oranında sızdığını gösterir.

Yang ve çalışma arkadaşları benzer bir kurulumla 0.4 metre çaplı bir jet ile donatılmış 3 metre çaplı yarı silindirik bir yatakta kabarcık oluşum formasyonu üzerine çalışmışlardır. Şeffaf pleksiglas tabakalarla ve saydam pencerelerle bir düzenek kurarak, direkt olarak dışarıdan kabarcıkların hareketi gözlemlenebilen bir düzenek hazırlamış oldular. Jet tarafından içeriye verilen gazın, özellikle yatağın başlangıçta akışkanlaşma hızının altında çalıştırıldığında, kabarcıktan emülsiyon fazına sızdığını bu düzenekle bulmuşlardır. Deneysel veriler, çalışma ortamına ve şartlara bağlı olarak, denklemin sağ tarafındaki katsayının, sırasıyla % 69.7 ve % 88.2'lik bir sızıntıyı gösteren katsayının, 0.303 veya 0.118 değerleriyle denklem 3.3 benzer şekilde ilişkilendirildi. Ayrıca, Zenz'in (1968) varsayımına benzer şekilde ağızda yarım küre şeklinde bir kabarcığın ortaya çıktığını varsayarak bu olayı tanımlamak için bir model üzerinde çalışmışlardır. Bu modelde kabarcık, yüzeysel minimum akışkanlaşma hızına eşdeğer bir yüzeysel hızda kabarcık sınırından dışarı sızar. Kabarcık hacminin (V_b), t zamanına göre değişim hızını belirten diferansiyel denklemler; denklem 3.4 ve denklem 3.5 ile ifade edilebilir:

$$\frac{d}{dt}(V_b) = Q - U_{mf} \left(\frac{\pi}{2} D_b^2 \right) \quad (3.4)$$

Ve

$$V_b = \frac{\pi}{12} D_b^3 \quad (3.5)$$

Denklem 3.4 ve 3.5 birleştirilerek, kabarcık çapı D_b 'nin değişimini belirlemek için,

$D_b = 0$ ve $t = 0$ başlangıç koşullarında bir diferansiyel denklem elde edilir. Kabarcık oluşumu zamanı t_b ve karşılık gelen kabarcık çapı D_b ile ilgili denklemler; denklem 3.6 ve 3.7 ile ifade edilir :

$$t_b = \frac{1}{2U_{mf}} \left[D_{b,max} \ln \left(\frac{D_{b,max} + D_b}{D_{b,max} - D_b} \right) \right] - D_b \quad (3.6)$$

$$D_{b,maks} = \sqrt{\frac{2Q}{\pi U_{mf}}} \quad (3.7)$$

Burada $D_{b,maks}$, kabarcık sınırı boyunca toplam gaz sızıntısının ağızdan çıkan toplam içeri akışa eşit olduğu maksimum kabarcık çapını simgeler. Denklem 3.6 ve 3.7. denklemlerle; deneylerden elde edilip belirlenen kabarcık frekansı $n_b=1/t_b$, kabarcık çapı D_b ve integral gaz sızıntısı Ω 'ı hesaplamak için gereken ilişkiler denklem 3.8 ile sağlanır:

$$\Omega = Qt_b - V_b = Qt_b - \frac{\pi}{12} D_b^3 \quad (3.8)$$

Modeli kurarken yapılan sonuç tahminleriyle ile deneylerden elde edilen veriler arasında çok yakın değerler elde edilmiştir. Ancak Yang ve çalışma arkadaşları tarafından öne sürülen modelin büyük bir dezavantajı vardır. Bu dezavantaj ise deneysel çalışmalarda elde edilen kabarcık frekansının girdi olarak kullanılması gerekliliğidir. Bu değer gereklidir çünkü Yang ve çalışma arkadaşları kabarcık modeli için bir momentum dengesi kullanmamışlardır. Teorik olarak hem başlangıçtaki kabarcık çapını hem de buna karşılık gelen kabarcık frekansını öngörmek için, oluşacak kabarcığın kütle ve momentum dengesi denklemleri aynı anda çözülmelidir. Yang ve arkadaşlarının yaptığı bu yaklaşımdan sonra gelen Caram ve Hsu'nun 1986'da yaptıkları model, akışkan yatakta küresel bir kabarcık oluşumunu tanımlayan bir model oldu.

Deneylere ve teorik bilgilere dayanarak ideal kabarcık formasyonuna göre hazırlanan ilk yaklaşık model aslında Harrison ve Leung oluşturdukları modelin (1961) bir değiştirilmiş modelidir ve iki boyutlu bir yatakta tek bir ağızdan oluşan dairesel kabarcığı tarif eder. Harrison ve Leung modelinde olduğu gibi, kabarcık yüzey sınırından emülsiyon fazına doğru gaz sızıntısının olmadığı varsayılmıştır.

İkinci yaklaşık model ise Zenz (1968) varsayımının bir modifikasyonu olarak hazırlanmıştır ve kabarcık sınırındaki gazın yüzeyel sızıntı hızıyla, yüzeyel minimum akışkanlaşma hızı eşit olarak kabul edilmiştir. Yaklaşık modeller açısından kabarcıkların oluşum süreci ve gaz kütle dengesi kabarcık hareket denklemi kombine edilerek denklem 3.9 ve denklem 3.10 ile genel formda gösterilir :

$$\frac{d}{dt}(V_b) = Q - U_{mf} A_b \quad (3.9)$$

$$\frac{d}{dt} \left[C_o \rho_e V_b \left(\frac{dS}{dt} \right) \right] = \rho_e V_b g \quad (3.10)$$

Burada ρ_e emülsiyon fazının yoğunluğunu, S kabarcığın merkeziyle ağız arasındaki mesafeyi, A kabarcığın yüzey alanını ve V kabarcık hacmini simgeler. İki boyutlu bir akışkan yatakta dairesel kabarcık oluşumu durumunda, denklem 3.9 ve 3.10 aşağıdaki şekilde denklem 3.11 ve denklem 3.12 ile düzenlenebilir :

$$\frac{d}{dt} (R_b^2) = \frac{Q}{\pi \delta_b} - 2U_{mf} R_b \quad (3.11)$$

Ve

$$\frac{d}{dt} \left[C_o R_b^2 \left(\frac{dS}{dt} \right) \right] = \rho_e V_b g \quad (3.12)$$

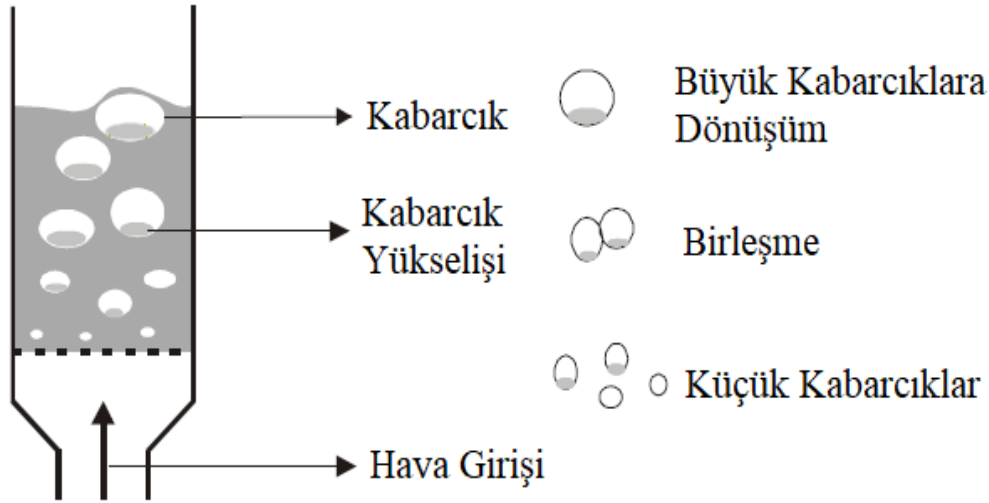
burada δ , iki boyutlu akışkan yatağın yatak kalınlığını simgeler. Denklem 3.11 ve 3.12 için kabarcık yarıçapı R ve kabarcık merkezi S olmak üzere, uygun başlangıç koşulları seçimi yapılarak çözüme ulaşılabılır. S = R olduğunda kabarcık ayrışması meydana gelir. $U_{mf} = 0$ durumu haricinde, denklem 3.11 ve denklem 3.12'nin analitik bir çözümü elde edilemez. Bunlar mutlaka sayısal olarak entegre edilmelidir.

3.3 Akışkan Kabarcıkların Akış Düzeni

Kabarcıklar yatak boyunca yükseldikçe, daha büyük kabarcıklar oluşturmak için birleşirler ve çok büyük olduklarında bölünürler (Şekil 3.4). Ortalama kabarcık boyutu kararlı hale geçildiğinde dengelenir. Yatakta denge durumuna ulaşılan yer taneciklerin türüne bağlıdır.

Kabarcıkların birleşimi, bir kabarcığı direk birleşip bir araya getirerek ya da yanındaki kabarcığın hizasına geçtikten sonra onunla birleşerek iki şekilde olabilir. Yatağın duvarındaki kabarcıklar sadece içe doğru hareket ederken, diğer kabarcıklar herhangi bir yatay yönde hareket edebilir. Katı tanecikler kabarcıklar tarafından sürüklenir ve düşük kabarcık yoğunlukları olan bölgelerde aşağı doğru hareket eder.

Daha az kabarcığın duvara yakın olmasının bir sonucu olarak, duvarın yanında bir kez oluşturulduktan sonra kabarcıkların içe doğru hareket etme eğilimini koruyan ağırlıklı olarak aşağı doğru tanecik akışı vardır. Genel sirkülasyon yönü yüksek bölgelerde eksene yakın kısımlarda yukarı, duvara yakın kısımlarda aşağı doğrudur. Alt bölgelerde ise bunun tam tersidir.



Şekil 3.4: Kabarcık oluşumu.

3.4 Kabarcıklı Akışkan Yatakta Isı Transfer Sabiti

Ranz ve Marshall (1952), belirli bir hızla küre şeklindeki parçacığın arasından geçen gazlar için denklem 3.12'yi sundu:

$$Nu_p = 2 + 0.6Re_p^{0.5} Pr^{0.33} \quad (3.12)$$

Çok sayıda parçacığın bulunduğu sabit bir yataktan U hızıyla geçen bir gaz için, Ranz ve Marshall (1952) yukarıdaki denklem değiştirilerek denklem 3.3 öne sürüldü:

$$Nu_p = 2 + 0.6Re_p^{0.5} Pr^{0.33} \quad (3.13)$$

Kothari (1967), gaz-parçacık için yukarıdaki verileri denklem 3.14'te ilişki kurarak gösterdi:

$$Nu_{yatak} = \frac{h_{gp} d_p}{K_g} = 0.033Re_p^{1.3} \quad (3.14)$$

3.5 Katı Parçacıkların Isıtılması

Akışkan bir yatakta tipik bir parçacık için Biot sayısı çok küçüktür. Bu nedenle parçacığın içindeki sıcaklık gradyanı ihmal edilebilir. Bir gazdan partiküle ısı transfer katsayısı değeri h_{gp} , kullanarak ısıtma süresi denklem 3.15 ile elde edilir:

$$t = \frac{c_p \rho_p d_p}{6h_{gp}} \ln \left[\frac{(T_g - T_{p0})}{(T_g - T_p)} \right] \quad (3.15)$$

T_g ve T_p sırasıyla gaz ve parçacığın anlık sıcaklıklarıdır. T_{p0} , parçacığın başlangıç sıcaklığıdır.

Bu ifade Lumped Methodu'ndan gelir. Bu metodta bir katı parçacığı T_o sıcaklığından T sıcaklığına getirmek için gereken t zamanı denklem 3.16 ile hesaplanır:

$$t = \frac{\rho c_p V}{h A_s} \ln \left[\frac{(T_\infty - T_o)}{(T_\infty - T)} \right] \quad (3.16)$$

Burada parçacık küre olduğu için $A_s = \pi d^2$ ve $V = \pi d^3 / 6$ yerine yazıldığında baştaki denklem elde edilir.

Bir sistem kurulumunun dizaynı için önceden bu değeri elde etmek amacıyla t süresini, parçacığın gazın sıcaklığının %99'una ulaşması için gereken süre kullanılabilir. Bu değer denklem 3.17'den hesaplanabilir :

$$t_{\%99} = \frac{0.768 c_p \rho_p d_p}{h_{gp}} \quad (3.17)$$



4. ÇOK FAZLI AKIŞ MODELLEMESİ

Çok fazlı akışların modellenmesinde kullanılan 3 ana yaklaşım:

- Sıvı Hacmi Yaklaşımı (VOF)
- Eulerian-Lagrangian Yaklaşımı
- Eulerian-Eulerian Yaklaşımı

4.1 Sıvı Hacmi Yaklaşımı (VOF)

VOF modelinin tercih sebebi, birbiri ile karışmayan iki veya daha fazla akışkan arasındaki fazlar arası arayüzey pozisyonu, şekli ve oluşumu incelenmek içindir. VOF modeli diğer Eulerian modellerine benzerdir fakat nümerik olarak uygulanışı farklılık gösterir. Bu yaklaşımda tüm akışkanlar için sadece bir momentum denklem seti çözülür. Tüm sayısal çözüm ağı içerisinde fazların hacimsel fraksiyonları ayrı ayrı izlenir.

4.2 Eulerian-Lagrangian Yaklaşımı

Eulerian-Lagrangian yaklaşımı, akışkan fazını sürekli bir faz olarak değerlendirerek Navier-Stokes denklemlerini çözer. Sürekli faz içinde hareket eden partiküller ve kabarcıklar hesaplanmış akış alanı içerisinde izlenir. Bu partiküller ve kabarcıklar sürekli faz ile momentum, kütle veya enerji alışverişinde bulunabilir. Bu modeldeki temel varsayım taşınan ikincil fazın toplam kütlesi taşıyıcı akışkandan fazla olsa bile taşınan fazın hacimsel fraksiyonunun taşıyıcı fazdan düşük olduğudur. İkincil fazın hacimsel fraksiyonunun ihmal edilemeyeceği sıvı-sıvı karışımları ve akışkan yataklarda olduğu gibi durumlarda bu metod kullanılamaz.

Özetleyecek olursak akış alanı içindeki her taneciğin konumları incelenmektedir. Bu yaklaşım, ayrık faz için korunum denklemlerini hesaplanan akış alanı boyunca çok sayıda parçacık için ayrı olarak çözerken, sürekli olarak kabul edilen akışkan fazın akış denklemleri zamandan bağımsız olarak çözülebilir.

Bu yaklaşımda en temel kabul ayırık ikinci fazın kütleli debisi akışkan fazdan çok fazla olsa bile düşük hacim oranında olmalıdır.

Lagrangian yaklaşımında akış alanındaki her bir parçacığın bir zaman başlangıcındaki yer koordinatları (x_0, y_0, z_0) belirlenir ve parçacıkların yörünge, yoğunluk, hız ve diğer karakteristik özellikleri başlangıç koordinatları ve zamanın fonksiyonu olarak ifade edilir.

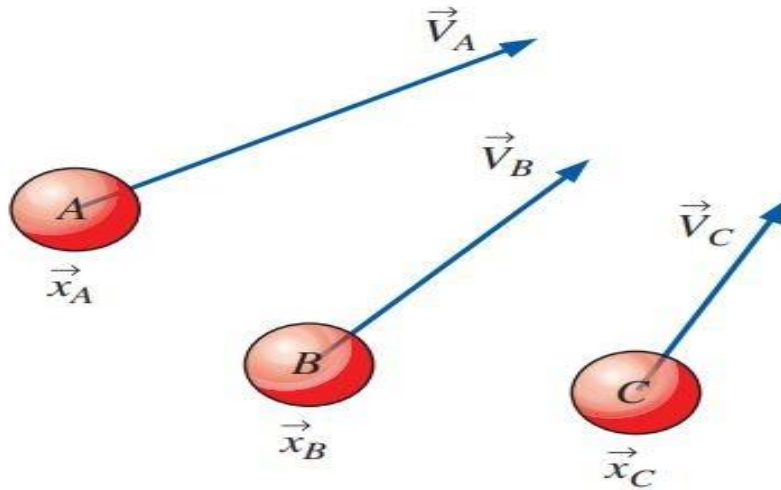
t_0 zamanında bir parçacığın başlangıç koordinatı (x_0, y_0, z_0) olsun. Buna göre parçacığın herhangi bir t zamanındaki koordinatları:

$$x = x(x_0, y_0, z_0, t)$$

$$y = y(x_0, y_0, z_0, t)$$

$$z = z(x_0, y_0, z_0, t)$$

Şekil 4.1’de Lagrange tanımlamasının şematik hali görülür:



Şekil 4.1: Lagrange tanımlamasında her bir parçacığın konum ve zamanlarının izlenmesi gerekir.

4.3 Eulerian-Eulerian Yaklaşımı

Eulerian-Eulerian yaklaşımı iki veya daha fazla birbiri ile karışan akışkan için hazırlanmıştır. Her bir faz için n adet momentum ve süreklilik denklemini çözer. İncelenen akışkanlar sıvı, katı veya gaz formlarının karışımı şeklinde bulunabilir. Lagrangian yaklaşım ikincil fazın hacimsel fraksiyonu yüzden 10’dan düşükken iyi

sonuç vermesine karşılık Eulerian modelde bununla ilgili bir sınır yoktur. Her bir akışkan için enerji ve momentum denklemleri ayrı ayrı çözülür.

Eulerian yaklaşımında bir fazın kapladığı hacmi diğer faz dolduramayacağı için, diğer bir söylemle akış alanında her fazın ayrı ayrı hacimleri olduğu için ortaya hacim oranı kavramı çıkar. Akış alanındaki fazların hacim oranları toplamı 1' e eşit olmak zorundadır.

Eulerian yaklaşımına göre akış alanında hız, ivme ve diğer değişkenler, konum ve zamanın fonksiyonu olarak ifade edilir:

$P = P(x, y, z, t)$ - Basınç Alanı

$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$ - Hız Alanı

$\vec{a} = \vec{a}(x, y, z, t)$ - İvme Alanı

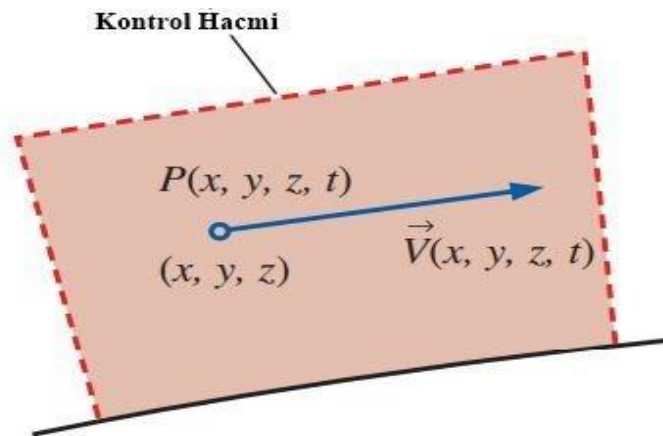
Örnek olarak hız alanının bileşenleri aşağıdaki gibi yazılır:

$u = u(x, y, z, t)$

$v = v(x, y, z, t)$

$w = w(x, y, z, t)$

Benzer açılımları diğer değişkenler için de yapabiliriz. Eulerian yaklaşımında belirttiğimiz alan değişkenlerinin hepsi belirli bir kontrol hacmi içerisinde (x, y, z) konumunda ve herhangi bir t zamanında tanımlanır. Özet olarak akışkan parçacığının zamanda ve konumdaki hızı, ivmesi ve basıncının ne olduğu ile ilgilenilir. Şekil 4.2'de Eulerian yaklaşımının şematik hali görülür:



Şekil 4.2 : Eulerian yaklaşımında değişkenler herhangi bir konumda ve zamanda tanımlanır.

Kısaca aralarındaki farka bakacak olursak; Lagrangian yaklaşımında akışkan parçacıkların tek başına hareketleri inceleniyor. Eulerian yaklaşımında ise akışkan parçacığın akış alanının her noktasında hızın, basıncın yere ve zamana göre değişimi inceleniyor. Lagrangian yaklaşımında ikincil fazın hacimsel fraksiyonu yüzden 10'dan düşük olduğunda iyi sonuç veriyorken Eulerian modelde bununla ilgili bir sınır yoktur. Her bir akışkan için enerji ve momentum denklemleri ayrı ayrı çözülür.

Bu çalışmada kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli, her bir fazın kütle, enerji ve momentum dengesi için simülasyon paketinde yerleşik modüllere sahip olan ANSYS-Fluent 19.3 kullanılarak uygulanmıştır ve Eulerian-Eulerian yaklaşımı kullanılmıştır.

Bir akışkan yatak modelindeki gaz akışı ve tanecikler için kullanılan denklemler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Kütlenin Korunumu:

Gaz akışı için denklem 4.1 ile hesaplanır:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{u}_g) \quad (4.1)$$

Katı Tanecikler için denklem 4.2 ile hesaplanır:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{u}_s) \quad (4.2)$$

Burada: α , t ve $\vec{u}$ sırasıyla hacim fraksiyonu, zaman ve hız vektörüdür. g (gas) gaz akışını ve s (solid) tanecikleri ayırt etmek için kullanılır.

Momentum denklemleri:

Gaz akışı için denklem 4.3 ile hesaplanır :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{u}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{u}_g \vec{u}_g) \\ & = -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot \tau_g + \alpha_g \rho_g \vec{g} + K_{gs} (\vec{u}_g - \vec{u}_s) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Katı Tanecikler için denklem 4.4 ile hesaplanır :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{u}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{u}_s \vec{u}_s) \\ & = -\alpha_s \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + K_{gs} (\vec{u}_s - \vec{u}_g) - \nabla p_s \end{aligned} \quad (4.4)$$

Burada P basınç ve $\vec{g}$ yerçekimi ivmesini gösterir. $\vec{\tau}$, gerilim tensörüdür ve K, fazlar arası değişim katsayısını temsil eder.

Denklem 4.3 ve 4.4 için eşitliğin sağ tarafındaki terimler; gaz ve katı tanecikler arasındaki fazlar arası sürükleme kuvveti, basınç düşüşü, ek kuvvet ve yerçekimi olarak dört gruba ayrılabilir

Fazlar arası değişim katsayısı K, birkaç sürükleme modeli ile açıklanabilen sürükleme kuvveti için önemli bir etkidir. En yaygın olarak kullanılan sürtünme modelleri, her ikisi de benzer şekilde öngörülen yatak genişlemesi, akış düzeni ve benzeri özellikleri sağlayabilen Syamlal-O'Brein ve Gidaspow'dur. Bu çalışmada Syamlal-O'Brein sürükleme yasası kullanılmıştır.

Denklem 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10 ile fazlar arası momentum transferi gösterilir :

$$K_{gs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g}{g_{r,s}^2 d_s} \left(\frac{Re_s}{g_{r,s}} \right) (\vec{u}_s - \vec{u}_g) \quad (4.5)$$

$$C_D = \left[0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_s / g_{r,s}}} \right]^2 (\vec{u}_s - \vec{u}_g) \quad (4.6)$$

$$g_{r,s} = 0.5 \left(A - 0.06 Re_s + \sqrt{(0.06 Re_s)^2 + 0.12 Re_s (2B - A) + A^2} \right) \quad (4.7)$$

$$A = \alpha_g^{4.14} \quad (4.8)$$

$$B = \begin{cases} 0.8 \alpha_g^{1.28}, & \text{eğer } \alpha_g \leq 0.85 \text{ ise} \\ \alpha_g^{2.65}, & \text{eğer } \alpha_g > 0.85 \text{ ise} \end{cases} \quad (4.9)$$

$$Re_s = \frac{\rho_g d_s |\vec{u}_s - \vec{u}_g|}{\mu_g} \quad (4.10)$$

Burada: d partikül çapını, C_D sürüklenme katsayısını ve Re Reynolds sayısını ve $\vartheta_{r,s}$ terminal hızını temsil eder.

Gazlar için termal enerji korunumu denklemi denklem 4.11 ile gösterilir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g H_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g u_g H_g) = -\nabla \cdot \alpha_g k_g \nabla T_g + h_{sg}(T_g - T_s) \quad (4.11)$$

Katı tanecikler için denklem 4.12 kullanılır:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s H_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s u_s H_s) = -\nabla \cdot \alpha_s k_s \nabla T_s + h_{sg}(T_g - T_s) \quad (4.12)$$

Burada H entalpi ve k termal iletkenliği temsil eder.

5. TERMAL ENERJİ DEPOLAMA

Isı enerjisi maddelerde atomik veya moleküler titreşimler sonucu oluşur. Maddenin iç enerjisindeki değişme ile duyulur ısı, gizli ısı, tepkime ısısı ya da tüm bunların birleşimi olarak depolanır. Duyulur ısı depolamada, ısının depolanacağı malzemenin sıcaklığındaki değişim sonucunda ortaya çıkan duyulur ısıdan yararlanılır. Isı depolama sıvı, katı ve sıvı ile katının beraber olduğu malzemelerde yapılabilir. Gizli ısı depolamada, faz değiştiren maddeler kullanılır. Depolama yapmak için uygun sıcaklık aralığında, ısının depolanacağı malzemenin faz değiştirmesiyle ortaya çıkan gizli ısı belirlenir. Bu yöntemde enerji depolama ünitesinin hacmi duyulur ısıdakine göre daha küçüktür. Termokimyasal depolamada ise ısı enerjisi bileşikte bağ enerjisi olarak depolanır ve depolanan bu enerji tersinir tepkimelerle serbest bırakılır.

Isı enerjisi depolama sistemleri kullanım sürelerine göre kısa süreli depolama ve uzun süreli depolama olarak ikiye ayrılabilir. Kısa süreli olanlar gece-gündüz ve uzun süreli olanlar yaz-kış olarak mevsimsel şekilde ayrılır. Ayrıca bu sistemler kullanım amacına göre sıcak depolama, soğuk depolama veya sıcak ve soğuk depolama şeklinde de ayrılır. Uzun süreli depolama ile yazın sıcaklığını depolayıp kışın kullanmak veya kışın soğukunu depolayıp yazın kullanmak mümkündür.

Termal enerji depolama sistemleriyle ozon tabakasına zarar veren kloroflorokarbonlara gereksinim duymadan doğrudan soğutma ve ısıtma yapılabilmektedir. Elektrik enerjisine duyulan gereksinim azalmakta ve elektriğe en çok ihtiyaç duyulan zamanlarda elektriğe aşırı yüklenme engellenebilmektedir. Böylece enerji santrallerine duyulan gereksinmeyi ve fosil yakıt kullanımını azaltarak çevreyi daha az kirleten çözümler sunmaktadır.

Özellikle güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerjilerin kullanımında, enerjinin ulaşılabilirliği ve rahat kullanılabilirliği ayrıca tüketimiyle arasındaki uyumsuzluğu gidermek ve dengede tutmak için bir depolama sistemine ihtiyaç duyulur. Güneş enerjisini sıcaklığa, depolanacak enerjinin büyüklüğüne, depolama süresine ve enerjinin son kullanım alanına bağlı olarak depolamanın çeşitli yolları vardır. Düşük

sıcaklıktaki güneş enerjisi binalarda kullanım sıcak suyu olarak, ısıtma alanında ve havalandırma uygulamalarında olmak üzere çeşitli uygulama alanları vardır.

Termal enerji depolama sisteminde kullanılan tanecik teknolojisine bağlı olarak enerji depolama sistemleri için farklı seçenekler vardır. Sıcaklığın düşük veya yüksek olmasına yada depolanan enerjinin türüne ve formuna bakılmaksızın, tanecikleri enerji depolamada bir araç olarak kullanılıyorsa akışkan yataklar kullanılır. Bir yatakta, tanecik yüzeyi ve sıvı arasındaki ısı transferini ve sıcaklık farklarını ölçmek zordur. Bundan dolayı denklemlerdeki katsayıların değerleri genellikle yataktaki sıcaklığın deneyler yapılarak elde edilen ölçümlerden bulunan değerlerini, akışkan yatakta ısı transfer sürecini açıklayan diferansiyel denklemlerle karşılaştırarak belirlenir.

5.1 Termal Enerji Depolama Kapasitesi ve Tank Büyüklüğü

Kullanılabilir termal enerji depolama (TED) kapasitesi, güç döngüsü termal yükünün termal depolama süresi ile çarpılmasıyla elde edilir. Toplam termal enerji depolama kapasitesi denklem 5.1 ile ifade edilebilir:

$$\Delta Q_{TED} = \frac{W_P \Delta t_{TED}}{\eta_P \eta_{TED,II}} \quad (5.1)$$

Burada η_P güç çevriminin verimi ve $\eta_{TED,II}$ ise termal enerji depolama sisteminin ekserji kaybını simgeler.

Termal enerji depolama kapasitesi oranını depolama sisteminin fiziksel boyutlarını belirlemek amacıyla kullanmak için, sistemde bulunan tüm depolama malzemelerinin ısı kapasitesini, yoğunluğunu ve dağılımını hesaplamak gerekir. 5.1 ve 5.4. denklemler enerji depolama için kullanılan sıvı ve katı depolama malzemesi için gereken malzeme miktarını hesaplamak için kullanılabilir.

Sıvı ve katı depolama maddelerinin özelliklerinden yola çıkarak ortalama bir ısı kapasitesi elde edilirse, depolama malzemesinin sistemdeki sıvı hacminin gaz fazı tarafından kaplanan kısmına oranla ortalama ısı kapasitesi denklem 5.2 ile ifade edilir:

$$(\overline{\rho c})_{ort} = \epsilon \rho_f c_{p,f} + (1 - \epsilon) \rho_s c_s \quad (5.2)$$

Burada ϵ , sistemin sıvı hacminin katı dolgu maddesi bulunan sistemde kapladığı kısmı simgeler. Bu ise denklem 5.3 ile hesaplanır;

$$\epsilon = \frac{V_f}{V} = \frac{V_f}{V_f + V_s} \quad (5.3)$$

Aralığı 0'dan 1'e düşünersek, $\epsilon = 0$ tamamen katı maddeden oluşan bir sistemi ve $\epsilon = 1$ ise tüm sistemin sıvıdan oluştuğunu gösterir. Belirli miktarda enerjiyi, ΔE_{TED} , depolamak için gerekli tank hacmi denklem 5.4 ile hesaplanır;

$$\bar{V}_{TED, tank} = \frac{\Delta Q_{TED}}{(\overline{\rho c})_{ort} (T_{TED, h} - T_{TED, c}) \eta_{TED, I} \eta_{eff}} \quad (5.4)$$

Burada $\bar{V}_{TED, tank}$, termal enerji depolama sisteminin hacmini simgeler.

5.2 Tanecikli Termal Enerji Depolama Sisteminde Malzeme Seçimi

Tanecikli termal enerji depolama sistemi için iyi akışkanlaştırma kabiliyetine sahip çoğu stabil malzeme kullanılabilir. Çizelge 5.1'de bazı malzemelerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Çizelge 5.1 : Kullanılabilecek katı taneciklerin karşılaştırmaları.

Malzeme	Bileşim	Maliyet	Fayda	Etki
Silica Kum	SiO_2	Düşük	Stabil	Düşük Termal İletkenlik
Quartz Kum	SiO_2	Orta	Saf	Quartz Dönüşümü
Alumina Tozu	Al_2O_3	Yüksek	Stabil	Yüksek Maliyet
Uçucu Kül	$SiO_2 + Al_2O_3$	Düşük	Genel Bilinen	Aşındırıcı Mineraller İçerir
Silisyum Karbür	SiC	Yüksek	Yüksek k	Yüzeyler İçin Sert
Grafit	C	Yüksek	Yüksek c	Çabuk Paslanır ve Kolay Yıpranır

Malzemelerin seçiminde kararlılık, maliyet ve akışkanlaşma performansı gibi özelliklerin dikkate alınması gerekmektedir. Ek olarak sistem için katı malzemelerin seçiminde termal sistem performansı ve enerji yoğunluğu ile ilgili faktörlere dikkat

edilir. Ayrıca uygun tanecik boyutları seçilmelidir. Partikül boyutu ısı transferini etkiler. Küçük tanecikler genellikle daha büyük bir ısı transfer katsayısına sahiptir.



6. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Artan bilgisayar kapasiteleri ve kurulum tutarlarındaki düşüş, çok fazlı sistemlerin modellenmesinin ve simülasyonlarının hazırlanmasında hesaplamalı akışkan dinamiğinin (CFD) kullanımının önünü açmıştır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin sunduğu büyük olanaklara rağmen, sıvıdan katı faza ısı transferi konusunda yapılan çalışmalar çok azdır. Bunun nedeni, elde edilen simülasyon sonuçlarının deneysel düzeneklerden aldığımız sonuçlarıyla kıyaslamasının ve doğrulanmasının zor olmasıdır. Taneciklerin ve gaz sıcaklıklarının ölçülmesindeki tutarsızlıklar, ısı transfer katsayılarının belirlenmesini güçleştirmiştir. Ayrıca akışkan yataklardaki karmaşık akış düzeninden dolayı, literatürdeki akışkandan taneciğe olan ısı transfer katsayısı kabul edilen akış varsayımına bağlı olarak genellikle değişiklik gösterir. Akışkan yataklardaki akış yapısı, katı hacim oran dağılımı, gaz hacim oran dağılımı ve laminar granüler sıcaklık gibi özellikler CFD ile detaylı olarak tarif edilebilir. Araştırma yaparken veya endüstriyel amaçlar için kullanılırken gerçek bir düzenek kurmadan simülasyon yaparak sonuçları alabildiğimiz yararlı bir araçtır. Kompleks denklemlerin sayısal çözümü sayesinde, farklı disiplinlerin ve bunların düzeneklerinin sonuçlarını ayrıntılı bir şekilde elde etmeyi sağlar.

Basınç ve viskozite terimleri gerilimin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu katı basınç ve viskozite, tanecik-tanecik etkileşimleri nedeniyle üretilir. Bu özellikleri hesaplarken iki önemli hususu göz önünde bulundurmak gerekir. Birincisi sürtünmeden dolayı oluşan gerilimin etkisidir. Akışkan yataklar için bu ek sürtünme gerilimi katı hacim oranının çok yüksek olduğu bölgelerde önemli etkiler yaratabilir. İkincisi, sözde akışkanın yani burada katı fazın özelliklerinin uygunluğunun değerlendirmesidir. Maksimum doluluk limiti, $\alpha_{s,maks}$, granüler fazın maksimum hacim olan kısmını belirtir. Genelde bu değer az dağılmış küre biçimli tanecikler için yaklaşık 0.63'tür. Bununla birlikte dağılımı çok olan sistemlerle karşılaştığımızda daha büyük bir maksimum doluluk limiti değeri elde edilir. Restitüsyon katsayısı, e_{ss} , ise iki tanecik arasında gerçekleşen çarpışmanın elastisitesinin bir ölçüsüdür ve çarpışmadan sonra ne kadar kinetik enerji kaldığını

gösterir. Mükemmel bir elastik bir çarpışmanın restitüsyon katsayısı 1'dir. Tam tersi olarak, mükemmel elastik olmayan bir çarpışmanın restitüsyon katsayısı 0'dır. Restitüsyon katsayısını formüle edersek denklem 6.1 ile aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$e_{ss} = \frac{\text{ayrılma hızı}}{\text{yaklaşma hızı}} \quad (6.1)$$

Bugüne kadar yapılan deneyler, restitüsyon katsayısının sabit olmadığını göstermektedir. Hussainova ve çalışma arkadaşları (1999) restitüsyon katsayısının; kullanılan malzemelerin özelliklerinin, çarpışma hızının ve sertlik oranının bir fonksiyonu olduğunu belirlemiştir.

Akışkan yataklarda katı hacim oranı sıfırdan maksimum doluluk sınırına kadar değişebilir. Farklı bölgelerde bulunan tanecikler farklı durumlarda bulunduklarından tanecikler arası çarpışmalar büyük ölçüde farklı enerji kayıplarına maruz kalır. Bu olay, $\alpha_{s,maks}$ ve e_{ss} 'in yatak hidrodinamik davranışı üzerindeki etkilerini daha da karmaşık bir hale getirir. Öte yandan, yüksek katı hacim oranlarında sürtünmeden dolayı oluşan gerilim de dikkate alınmalıdır.

7. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

7.1 Solar Alıcı Olarak Kullanılan Akışkan Yatağın Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonu

Güneş alıcısı olarak kullanılan bir akışkan yatağın 3D modeli hazırlanarak simülasyonu yapılmıştır. Yatağın çapı 1,2 metre ve yüksekliği 3,2 metredir. Simülasyonda katı faz olarak kum ve gaz fazı olarak hava kullanılmıştır. Havayı ideal gaz olarak kabul edip buna göre yoğunluğu ideal gaz yasasına göre hesaplanmıştır. Çalışmada modeli basit hale getirmek ve hesaplama yükünü azaltmak için malzemelerin özgül ısısı sabit kabul edilmiştir. Kum ve havanın temel özellikleri Çizelge 7.1'de listelenmiştir.

Çizelge 7.1 : Katı ve gaz fazındaki malzemelerin özellikleri.

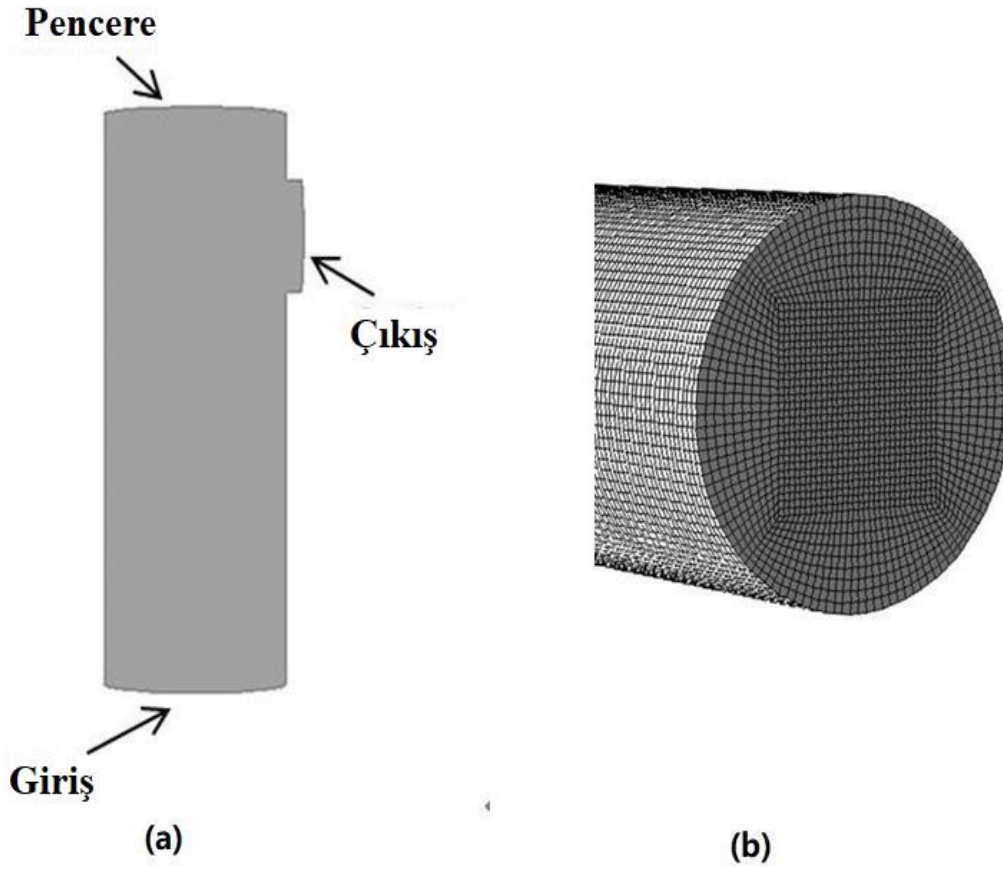
Özellik	Hava	Kum
Çap (μm)	-	500
Yoğunluk (kg/m^3)	1,225	2640
Özgül Isı ($\text{J}/\text{kg.K}$)	1006	830

Kum akışkanlaşma işlemi için yatak malzemesi olarak önceden hazırlanıp yerleştirilmiştir. Simülasyonu basit hale getirmek amacıyla önceden yüklenmiş kumun 1073K'ya ısıtıldığı varsayılmıştır. İşlem esnasında yukarı doğru hareket eden hava akımı katı tanecikleri akışkanlaştırmıştır ve içerideki kumun bir kısmını dışarı çıkmasına neden olmuştur.

Özetle, bu çalışmada önceden yüklenmiş sıcak kumun iki işlevi vardır:

- 1) Akışkanlaştırma için yatak malzemesi olarak kullanılması,
- 2) Güneş ışınları için geniş emme yüzeyi sağlaması.

Bu modelde yatağın sınır koşulları Şekil 7.1a'da gösterilmiştir. Maksimum yüz büyüklüğü 25mm ve 181610 ağ elemanına sahiptir. (Şekil 7.1b)



Şekil 7.1: (a) Yatağın sınır koşulları (b) Kullanılan ağ yapısı.

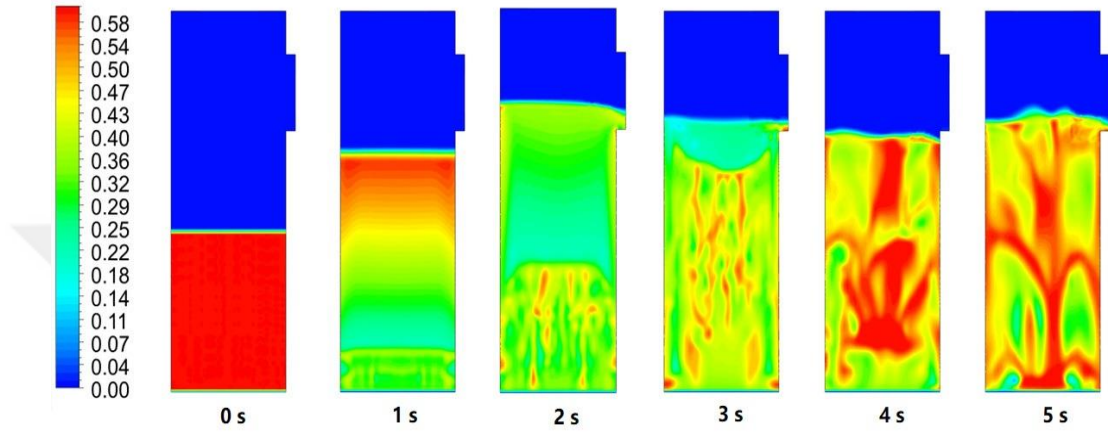
Gaz ve katı etkileşimi için Euler Çok Fazlı Akış Modeli uygulandı. Girişte kütle akış girişi ve çıkışta basınç çıkış sınır koşulları uygulanmıştır. Pencerenin aşırı ısınmamasını sağlamak için emiciliği 0 ve geçirgenliği 1 kabul edilmiştir. Atmosfere sınır olan diğer sınırların hareketsiz ve adyabatik bir duvar olduğu varsayılmıştır.

Sonuç olarak zamana bağlı simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu modelin normal şartlardaki özellikleri göz önüne alındığında, minimum akışkanlaştırma hızı 0.22 m/s olarak hesaplanmıştır. Aşağıda kum hacmi fraksiyonunu şekil 7.2'de ve kum sıcaklığının zamana bağlı sonuçları şekil 7.3'te gösterilmiştir.

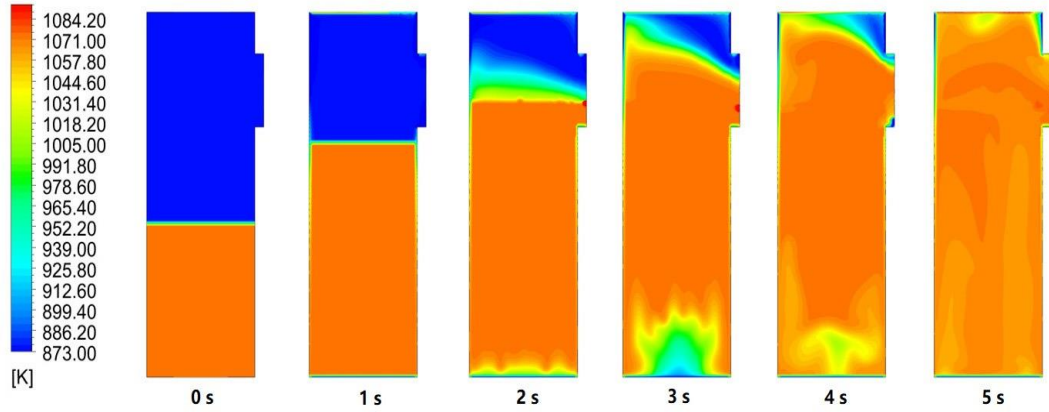
Şekil 7.2'de taneciklerin yatağın içindeki genişlemesinin yaklaşık % 44 veya daha fazla olduğuna dikkat edilmelidir. Ayrıca davranış olarak bu yatak bir kabarcıklı akışkan yataktır. Kabarcıklar, yani şekilde düşük kum hacmi fraksiyonu olan bölgeler,

5 saniye sonra belirgin hale gelmiştir. Ayrıca şekilde görüldüğü üzere gaz tanecik karışımı 2 saniye sonra yataktan dışarı çıkmıştır.

Şekil 7.3'te gösterildiği gibi soğuk hava girişi başladıktan sonra kum sıcaklık dağılımı etkilenmiştir. Ancak dışarıdan gelen güneş ışınlarının emilmesi ve boşluktaki güçlü ısı transfer yoğunluğundan dolayı kum sıcaklığı az miktarda azalmıştır. Sonuç olarak çıkıştaki kum sıcaklığı neredeyse sabit kalmıştır.



Şekil 7.2: İlk 5 saniye için kum hacim fraksiyonu.



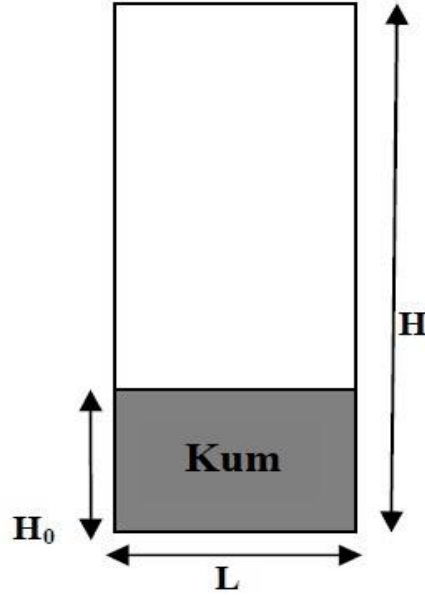
Şekil 7.3: İlk 5 saniye için kumun sıcaklık değişimi.

7.2 Akışkan Yatak Teknolojisinin Isı Depolama Potansiyeli : Hidrodinamik ve Termal Analiz

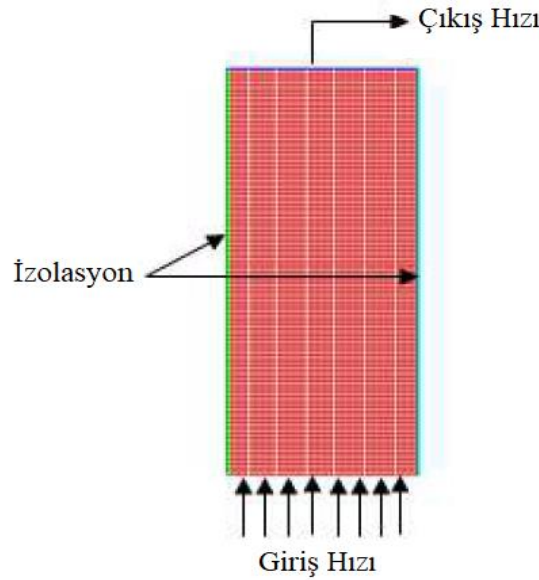
Simülasyon için hazırlanan akışkan yatağın geometrisi Şekil 7.4'te gösterilmiştir. Genişliği L , yüksekliği H ve katı faz yüksekliği H_0 olan 2 boyutlu bir yataktır.

Gaz fazının akışı, yatağın altında bulunan girişten gelir. Buradan hiçbir katı madde yatağa giremez. Yatağın üstünün sınır koşulu bir basınç sınırır. Diğer sınırlar, hem

gaz hem de katı fazlar için hareketsiz ve yalıtım sınırı olarak belirlenmiştir. Katı fazın başlangıç hızı sıfır olarak belirlenmiştir. Simülasyon alanının sınır koşullarına sahip ağ yapısı Şekil 7.5'te gösterilmiştir.



Şekil 7.4: Akışkanlaştırılmış yatağın fiziksel alanı.



Şekil 7.5: Simülasyon alanının sınır koşullarına sahip ağı.

Burada diferansiyel denklemler, sonlu hacimli bir yaklaşım kullanılarak çözülmüştür. Çözüm için ticari paket program Fluent 6.6.26 kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan malzemelerin özellikleri ve simülasyon parametreleri Çizelge 7.2 ve 7.3'te gösterilmiştir:

Çizelge 7.2 : Katı ve gaz fazındaki malzemelerin özellikleri.

Malzeme	Özgül Isı	Yoğunluk	Viskozite	Tanecik Çapı
	J/kg.K	kg/ m ³	Pa.s	m
Hava	994	1,2	1.78E-05	-
Kum	830	2650	-	162E-06

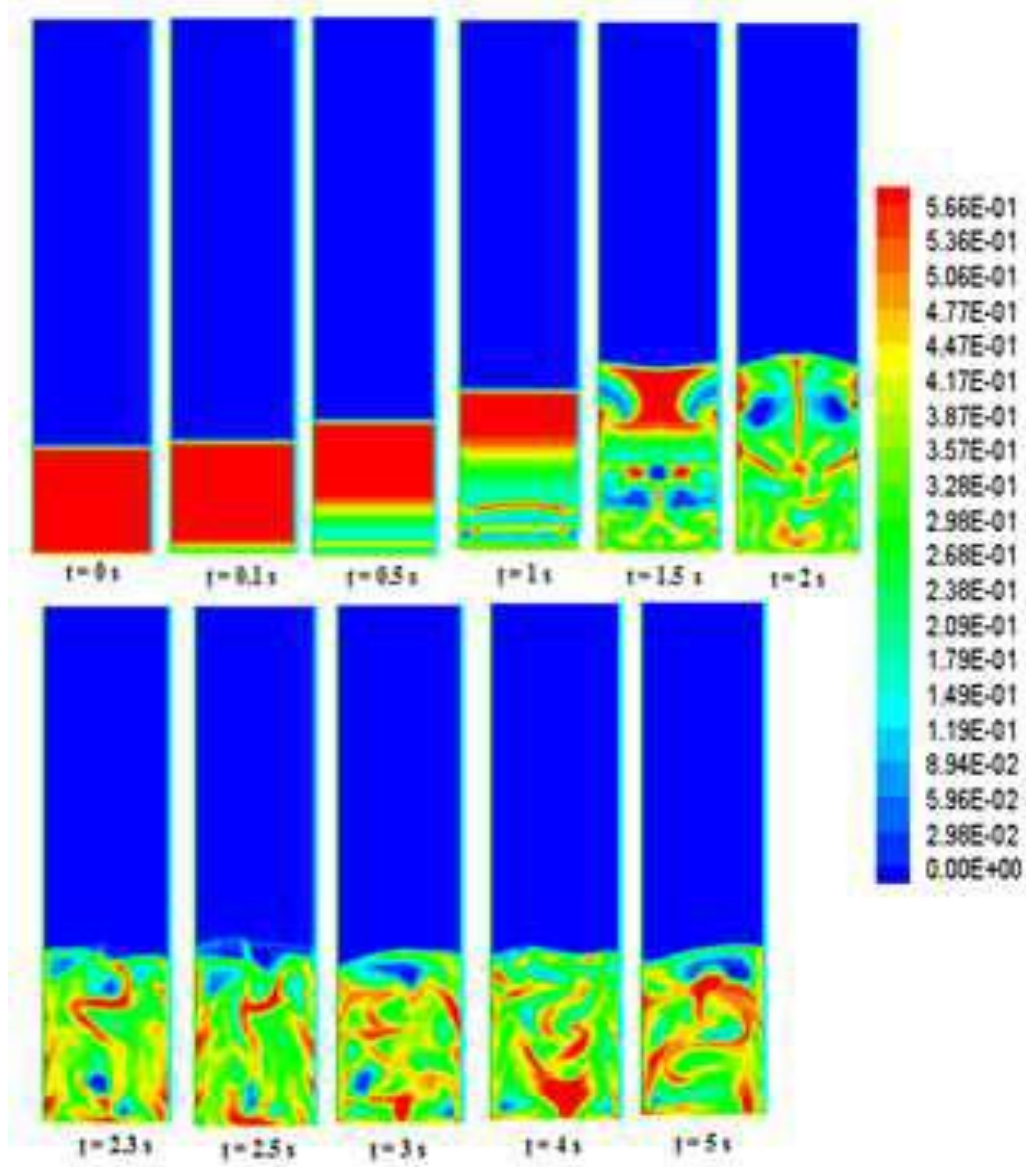
Çizelge 7.3 : Kullanılan simülasyon parametreleri.

Akış Tipi	Laminer
Akış Modeli	Euler – Euler
Zaman Adımı Kullanımı	10E-3
Yakınsama Kriteri	10E-3
Gaz Hızı	0,25 m/s
Maksimum Katı Faz Hacim Fraksiyonu	0,60
Havanın Giriş Sıcaklığı	473 K
Kumun Giriş Sıcaklığı	300 K
Kum Yüksekliği	40 cm

Şekil 7.6’te, akışkan hale gelmiş yataktaki katı hacim fraksiyonunun 5 saniye içindeki simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Yatak içindeki katı taneciklerin hacim olarak genişlemesindeki artış açıkça gözlenmiştir.

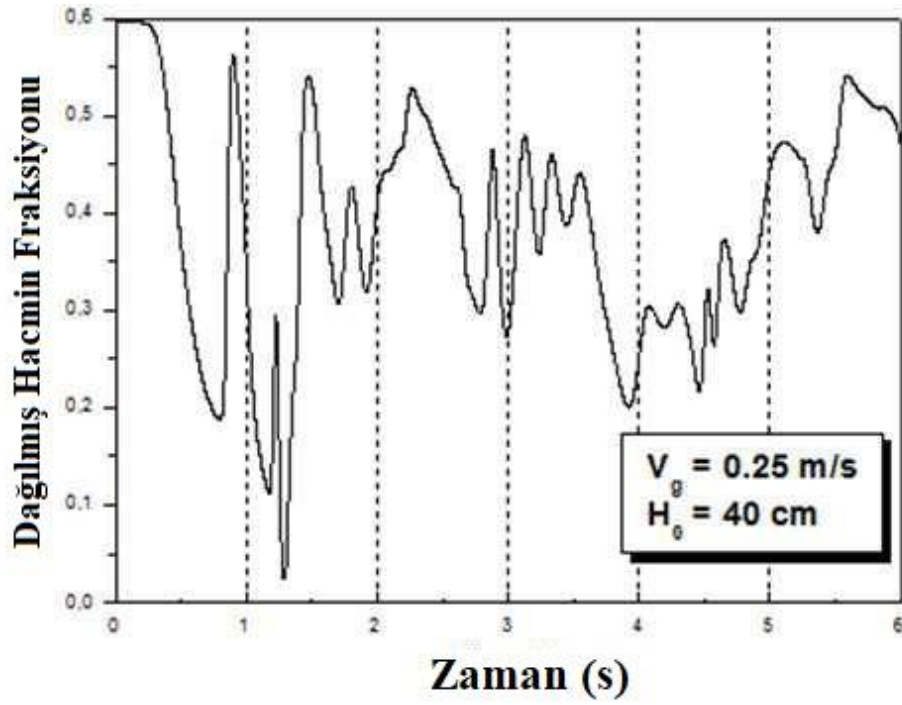
Başlangıçta yatak, yatağa akan gazla birlikte genişlemeye başlar ve katı hacim fraksiyonuna da bakarsak yatağın alt kısımlarında azalmaya başlamıştır. Yaklaşık 0,5 saniyelere geldiğinde, büyük kabarcıklar oluşup ve yüzeye doğru yükselmeye başlamıştır.

Daha sonra kabarcıklar yukarı doğru hareket ettikçe ve diğer kabarcıklarla etkileşime geçtikçe daha büyük kabarcıklar üreterek birleşmişlerdir. 2 saniye sonra kaotik şekilde kabarcık oluşumuna yol açan bir simetri kırılması gözlenmiştir.



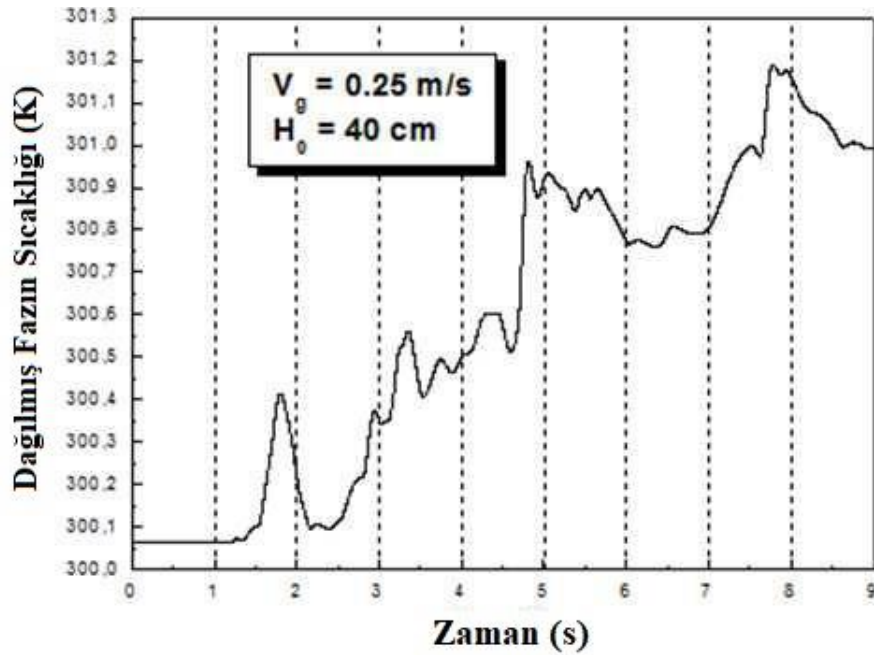
Şekil 7.6: Yatağın 0-5 saniye arasındaki hacim fraksiyonu grafiği.

Yatağın yükseklik olarak 15 cm'deki katı hacim fraksiyonunun profili Şekil 7.7'de gösterilmektedir. Başlangıçta katı hacim fraksiyonu maksimum değerdedir (0.6). Akışkanlaşma başladığında yatağın alt kısımlarında katı hacim fraksiyonu azalmıştır. 1. saniyeden sonra kabarcıklar oluşur ve yatak boyunca hareket ederek katı hacim fraksiyonunda bir artışa yol açar. Bu süreden sonra kabarcıklar sürekli olarak yukarı doğru hareket ettiği için grafikte dalgalanmalar gözlenir.

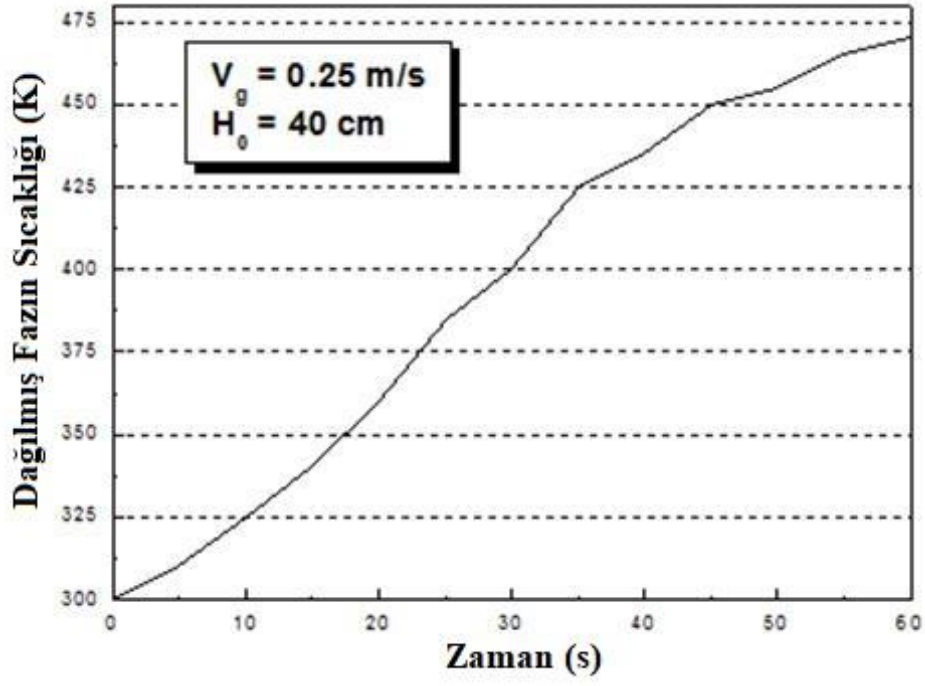


Şekil 7.7: 15 cm yükseklikteki dağılmış fazın hacim fraksiyonu.

Şekil 7.8, yatağın 15 cm yükseklikteki ortalama dağılık faz sıcaklığının zaman göre değişimini göstermektedir. Yaklaşık 9 saniyelik bir sürede katı sıcaklığı kademeli olarak artarak 1 K yükselir. 60 dakika sonra, kum taneciklerinin ortalama sıcaklığı 473 K gaz yüzeysel sıcaklığına ulaşır (Şekil 7.9).



Şekil 7.8: 15 cm yükseklikteki dağılmış fazın ortalama sıcaklığının zaman göre değişimi.



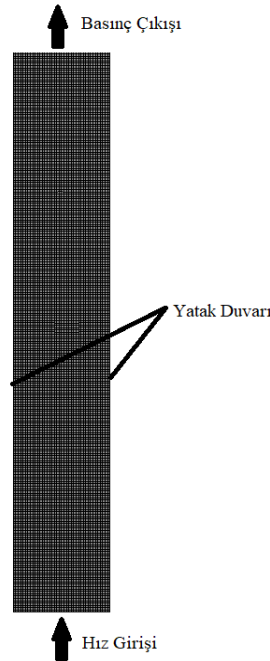
Şekil 7.9: 15 cm yükseklikteki dağılmış fazın ortalama sıcaklığının 1 saat boyunca değişimi.

8. HİPOTEZ

Bu çalışmada üç farklı yatak malzemesinin akışkan yataktaki davranışını simüle edilecektir. Simülasyon sonuçlarına göre hangi tür malzemelerin enerji depolama sistemlerinde kullanılmak için daha uygun olduğunu belirlenecektir. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda bu modellerin simülasyonlarını kendim de yaparak aynı sonuçlar alınıp, daha sonra bu sonuçları baz alıp kendi parametrelerimi uygulayarak teze devam edildi.

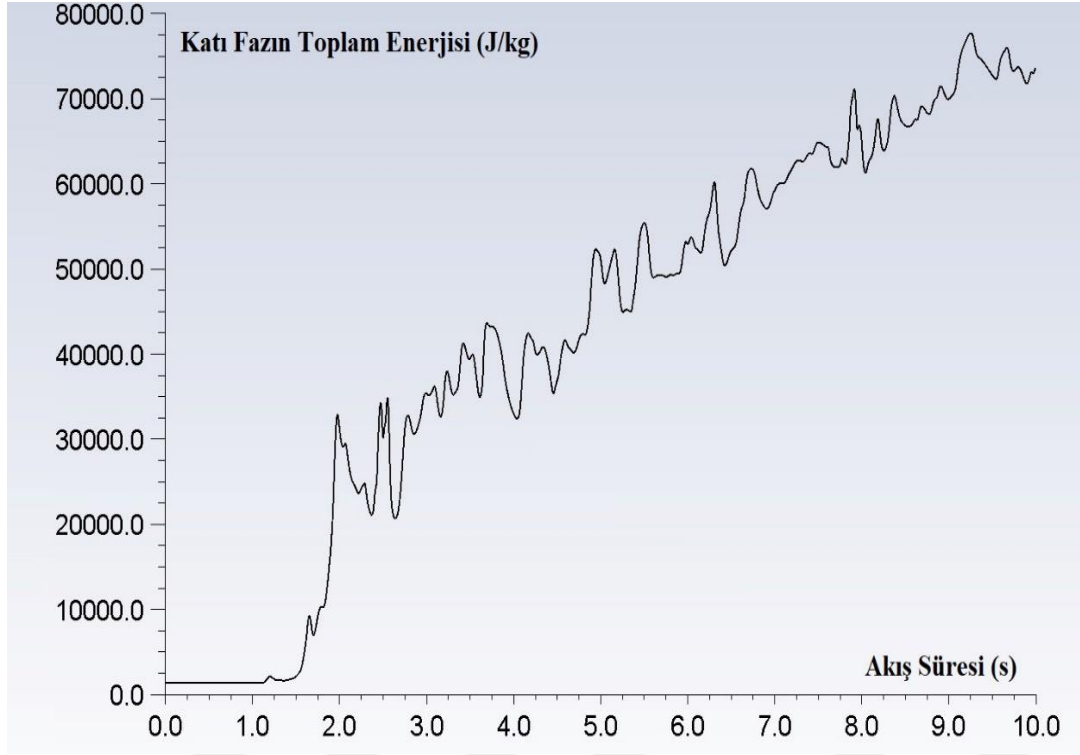
8.1 Model Tanımlaması

Akışkan yatağın 2 boyutlu modeli hazırlanarak ağ yapısı oluşturuldu. Yatağın genişliği 0.2 metre ve yüksekliği 1.2 metredir. Yatak malzemeleri olarak Silisyum Dioksit, Alüminyum Oksit ve Zirkonyum Dioksit belirlendi. Bu malzemelerin yatak içerisindeki yüksekliği ise 0.24 metre olarak belirlendi. Ayrıca, oluşturulan ağ yapısı 9600 elementten meydana gelmektedir. Şekil 8.1’de ağ yapısı ve sınır koşulları gösterilmiştir.

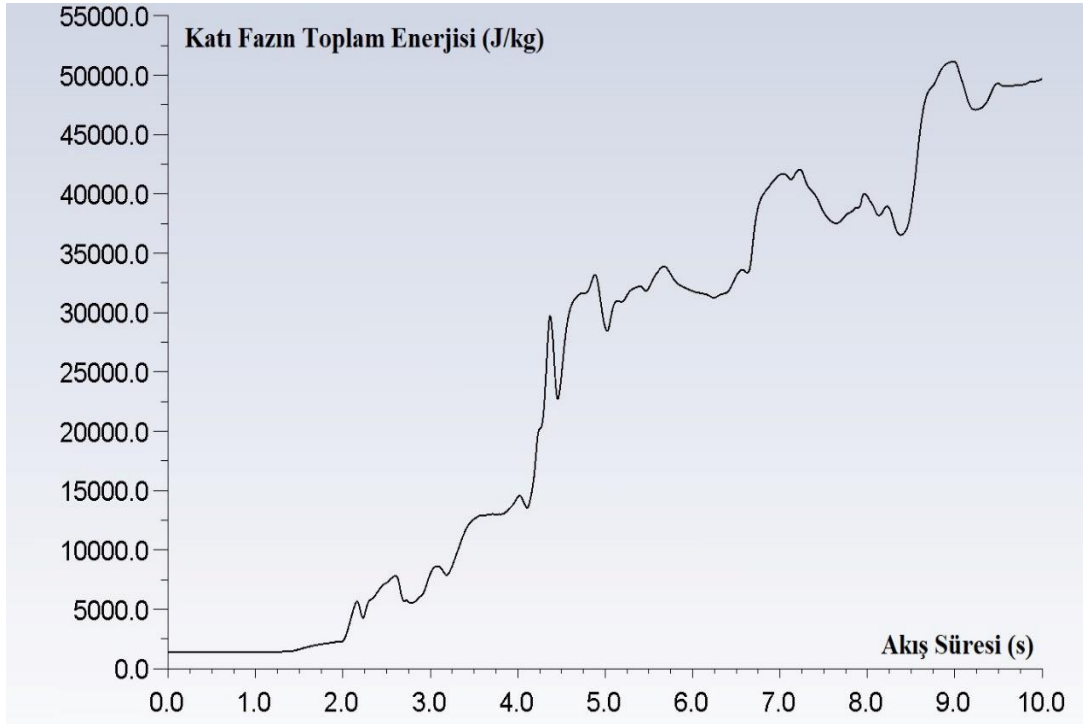


Şekil 8.1: Akışkan yatağın ağ yapısı ve sınır koşulları.

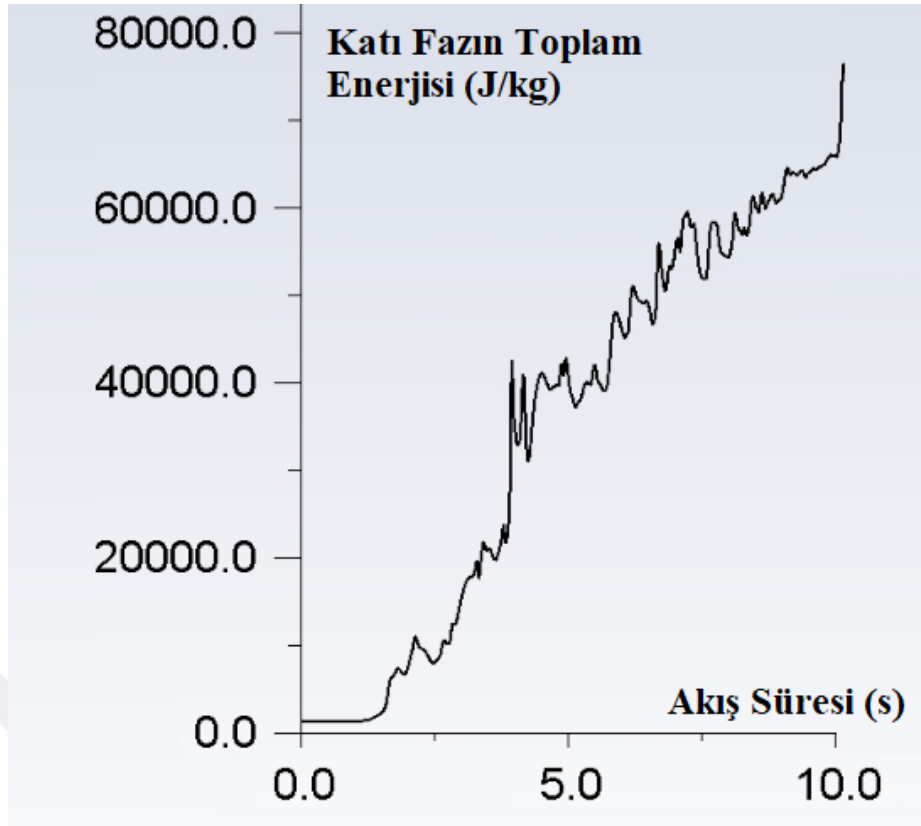
Bu ağ yapısına ulaşmak için sonucun ağ yapısından bağımsız bir çözüm olması için gerekli çalışmalar yapıldı. 3 malzeme içinden Alüminyum Oksit'i seçip buna göre kıyas yapıldı. Ağ yapıları Şekil 8.2, Şekil 8.3 ve Şekil 8.4'te gösterilmiştir.



Şekil 8.2 : En sık ağ yapısı (15000 element, 15351 düğüm).



Şekil 8.3 : En geniş ağ yapısı (3750 element, 3926 düğüm).



Şekil 8.4 : Kullandığım ağ yapısı (9600 element, 9881 düğüm).

Görüldüğü üzere enerji değişimlerdeki 10 saniye için yapılan simülasyonda enerji değerlerindeki geniş ağ yapısı 4000-5000 J/kg aralığında ilerlerken sık ağ yapısı 6000-8000 J/kg aralığında ilerliyor. Kullanılan ağ yapısı ise 5.saniyede 4000 ve 10. saniyeye yaklaştığında 6000-8000 J/kg aralığında ilerliyor. Buradan anlaşılıyor ki fazla sık ağ yapısı kullanıp süreyi uzatmaktansa kullanılan ağ yapısını seçerek daha kısa sürede yaklaşık doğru sonuçlar elde edilebilir.

8.2 Başlangıç ve Sınır Koşulları

Gaz fazının girişi yatağın alt tarafında verilecek şekilde tanımlandı. Katı fazın burada girişi olmayacak şekilde ayarlandı. Yatağın üst kısmı basınç çıkışı olarak tanımlandı. Diğer sınır koşulları hareketsiz olarak tanımlandı. Ayrıca duvarlar izolasyon olarak değil, dışarı ısı transferine izin verilecek şekilde tanımlandı. Öte yandan, katı fazın başlangıç hızı sıfır olarak ve önceden yüklenerek ısıtılmış halde olacağı kabul edildi.

Üç farklı malzeme kullanıldığından akış tipi ve her üç malzeme içinde ortak bir minimum akışkanlaşma hızı belirlemek için gerekli işlemler yapıldı. Önce minimum akışkanlaşma hızını, U_{mf} , bulmak için Archimedes sayısını, Ar , hesaplandı.

Archimedes sayısı hesaplandıktan sonra Reynold sayısını, Re , denklemlerden çekerek bulundu. Reynold sayısı da elde edildikten sonra minimum akışkanlaşma hızı elde edildi.

Silisyum Dioksit İçin

$$Ar = \frac{1.225 * 0.000162^3 (2640 - 1.225) * 9.81}{(1,78 * 10^{-5})^2} = 425.51$$

$$Ar = 1,650 Re_{p,mf} + 24,5 Re_{p,mf}^2 = 425.51$$

$$Re_{p,mf} = 4.13$$

$$Re_{p,mf} = \frac{\rho_g u_{mf} d_p}{\mu} = 4.13 = \frac{1.225 * u_{mf} * 0.000162}{1,78 * 10^{-5}}$$

$$u_{mf} = 0.22 \text{ m / s}$$

Alüminyum Oksit İçin

$$Ar = \frac{1.225 * 0.000162^3 (3960 - 1.225) * 9.81}{(1,78 * 10^{-5})^2} = 638.37$$

$$Ar = 1,650 Re_{p,mf} + 24,5 Re_{p,mf}^2 = 638.37$$

$$Re_{p,mf} = 5.07$$

$$Re_{p,mf} = \frac{\rho_g u_{mf} d_p}{\mu} = 5.07 = \frac{1.225 * u_{mf} * 0.000162}{1,78 * 10^{-5}}$$

$$u_{mf} = 0.27 \text{ m / s}$$

Zirkonyum Dioksit İçin

$$Ar = \frac{1.225 * 0.000162^3 (5560 - 1.225) * 9.81}{(1,78 * 10^{-5})^2} = 896.37$$

$$Ar = 1,650 Re_{p,mf} + 24,5 Re_{p,mf}^2 = 896.37$$

$$Re_{p,mf} = 6.02$$

$$Re_{p,mf} = \frac{\rho_g u_{mf} d_p}{\mu} = 6.02 = \frac{1.225 * u_{mf} * 0.000162}{1,78 * 10^{-5}}$$

$$u_{mf} = 0.32 \text{ m / s}$$

Burada elde edilen sonuçlarla akış tipinin laminar akış ($Re < 2300$) olduğu görülmüştür. Ayrıca her üç malzemeye de uyması için minimum akışkanlaşma hızı 0.33 m/s alınmış ve bunlara göre simülasyon yapılmıştır.

Parçacıkları akış rejimine göre sınıflandıracak olursak, burada kullandığım parçacıklar Geldart B grubuna girmektedir. Grup B partikülleri düzgün akışkanlaşmaya uğramama eğilimindedir. Akışkanlaşmanın başlangıcında kabarcıklar oluşur. Bu nedenle, minimum akışkanlaşma hızı ve minimum kabarcıklanma hızı benzerdir. Birçok akışkan yataklı yakıcılarda Grup B özelliklerine sahip kömür tozları kullanılır. Grup B parçacıkları çok büyük kabarcıkların oluşumuna izin verme eğilimindedir ve bu yüksek yataklarda metre mertebesinde kabarcıklar oluşabilir.

8.3 Simülasyon Parametreleri

Çok fazlı akışın çözümünde Eulerian modeli kullanıldı. Katı ve gaz fazlarının birbirlerine arasındaki sürükleme modelinin çözümünde ise Syamlal O'Brien sürükleme modeli kullanıldı. Simülasyonun çözümünde ise ticari paket yazılım olan ANSYS Fluent 19.3 tercih edildi. Simülasyonlarda hem birim sıcaklık değişimleri hem de uzun sürede sıcaklık ve enerji değişimleri incelendi. Kullanılan üç farklı katı ve malzemenin ve gaz fazının özellikleri aşağıda bulunan Çizelge 8.1'de verilmiştir.

Çizelge 8.1 : Katı ve gaz fazındaki malzemelerin özellikleri.

Özellik	Hava	Silisyum Dioksit (SiO_2)	Alüminyum Oksit (Al_2O_3)	Zirkonyum Dioksit (ZrO_2)
Yoğunluk (kg/m^3)	1,225	2640	3960	5560
Özgül Isı ($J/kg.K$)	1006	830	753	460
Isıl İletkenlik ($W/m.K$)	0.0242	0.67	46	2.1
Parçaçık Çapı (m)	-	0.000162	0.000162	0.000162
Isıl Yayınım (m^2/s)	-	$3,06 \cdot 10^{-7}$	$1,54 \cdot 10^{-5}$	$8,21 \cdot 10^{-7}$
Dinamik Viskozite ($kg/m.s$)	$1,78 \cdot 10^{-5}$	-	-	-

Burada yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletkenliği parametrelerine baktığımızda; en yüksek yoğunluğa sahip malzeme Zirkonyum Dioksit, en yüksek özgül ısıya sahip malzeme Silisyum Dioksit ve en yüksek ısı iletkenliğe sahip malzeme ise Alüminyum Oksit'tir.

Bu malzemelerin kıyas sebebi listede belirtilen özelliklerin malzemelerin sahip olduğu değerler arasındaki bu farklardır. Bu parametreler göz önüne alınarak sonuçta hangi tür malzemelerin amaca yönelik olduğu belirlenecektir. Kullanılan parametreler Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.2 : Kullanılan simülasyon parametreleri.

Akış Tipi	Laminer
Akış Modeli	Eulerian
Zaman Adımı Kullanımı	10E-3
Yakınsama Kriteri	10E-3
Gaz Hızı	0,33 m/s
Maksimum Katı Faz Hacim Fraksiyonu	0,60
Gaz Fazının Giriş Sıcaklığı	473 K
Katı Fazın Giriş Sıcaklığı	300 K
Katı Faz Yüksekliği	0.24 m

8.4 Simülasyon Sonuçları ve Tartışma

Simülasyona başlamadan önce hangi malzemede enerji depolamanın fazla olacağını tahmin etmek için bazı işlemler yaptım. Tahminde ana denklem olarak;

$$Q = m.c.\Delta t$$

denklemini baz aldım. Burada Q, alınan veya verilen ısı (J), m, maddenin kütlesi (kg), c, özgül ısı (J/kg.K), Δt , Sıcaklık farkı (K) simgelemektedir. Benim sistemimde her malzemenin sıcaklık değişimi aynı ve 300K'den 473K'e olan değişim olarak biliniyor.

Ayrıca parçacık çapları ve yataktaki malzeme yükseklikleri eşit olduğundan hacimler eşit olur. Bu yüzden hacim ve sıcaklık değişimini sadeleştirerek :

$$\text{Yoğunluk (kg/m}^3\text{)} * \text{Özgül Isı (J/kg * K)} = \rho * c \quad [\text{J/m}^3 * \text{K}]$$

denklemine ulaşırız. Daha sonra elimizdeki verileri denklemden yerine yazdığımızda :

Silisyum Dioksit : $2191200 \text{ J/m}^3 \cdot K$

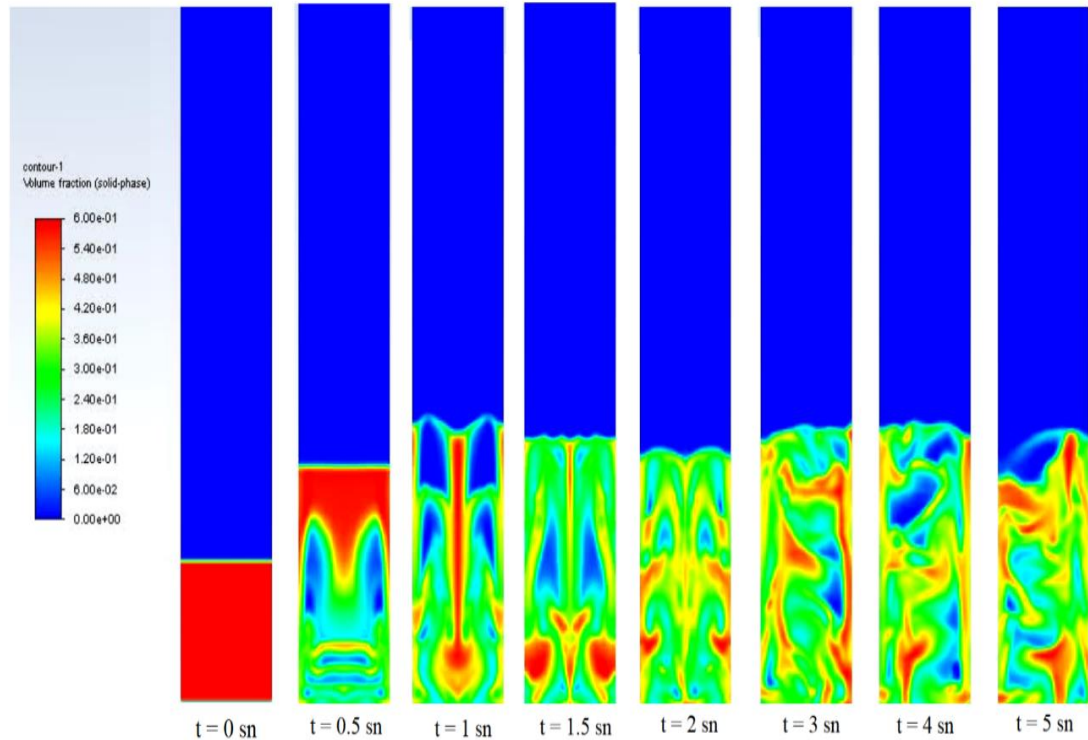
Alüminyum Oksit : $2981880 \text{ J/m}^3 \cdot K$

Zirkonyum Dioksit : $2557600 \text{ J/m}^3 \cdot K$

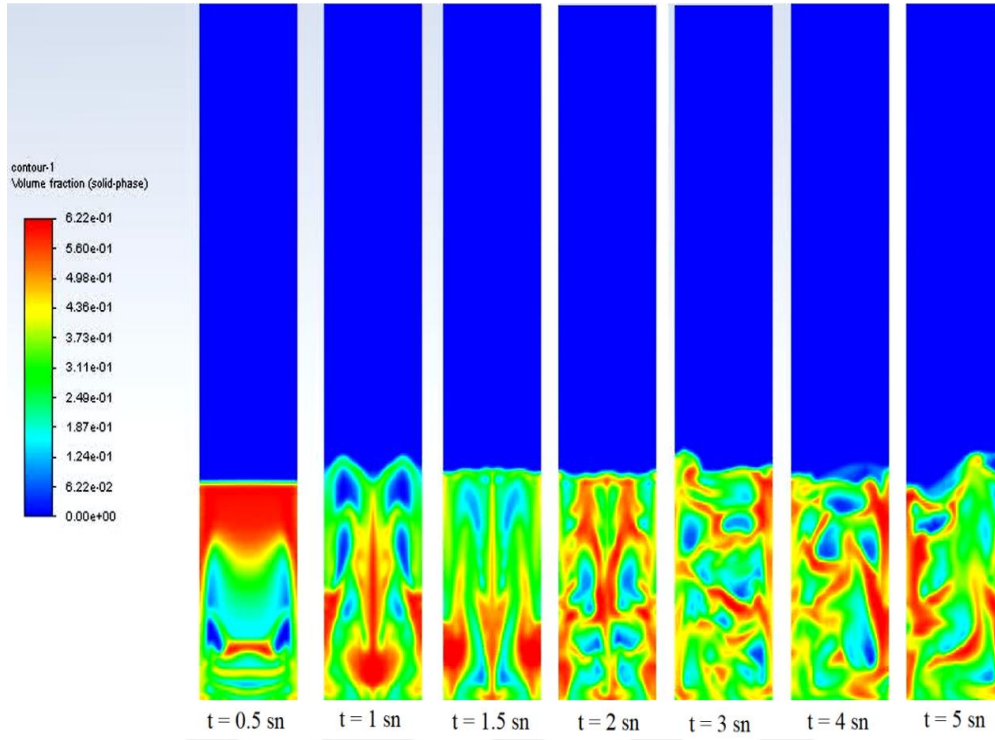
sonuçlarına ulaşılır. Burada görülüyor ki ısı transferi bittiğinde en yüksek ısı depolayamayı Alüminyum Oksit yapacaktır. Ayrıca ısı yayılım değerlerine bakıldığında da Alüminyum Oksit'in diğer malzemelere göre daha hızlı bir sıcaklık değişimi ve ısı transferi yapacağı görülmektedir.

İlk önce yatak içindeki tanecik ve kabarcıkların hareketlerini gözlemlemek amacıyla ilk 5 saniye için katı hacim fraksiyonları Şekil 8.5, 8.6 ve 8.7'de verilmiştir.

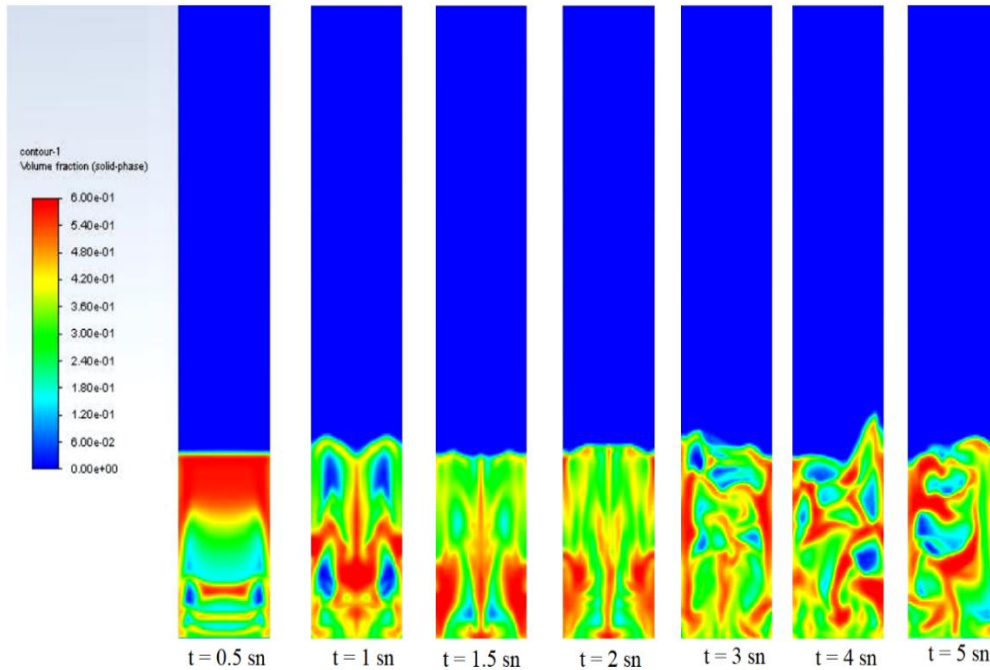
Şekillerde görüldüğü üzere başlangıçta katı hacim fraksiyonu maksimum değer olan 0.6 değerindedir. Akışkanlaşma başladıktan sonra yatağın alt kısımlarındaki katı hacim fraksiyonu azalmaya başlamıştır. 0.5. saniyeden sonra kabarcıklar oluşur ve daha sonrasında kabarcıklar sürekli olarak yukarı doğru hareket eder. 1.5 saniyeden sonra 2. Saniyeye doğru simetri kırılması görünür. Ve bu kırılmadan sonra yatakta kaotik kabarcık oluşumu meydana gelerek bu şekilde kabarcık hareketleri devam eder.



Şekil 8.5 : Silisyum Dioksit için hacim fraksiyonu.



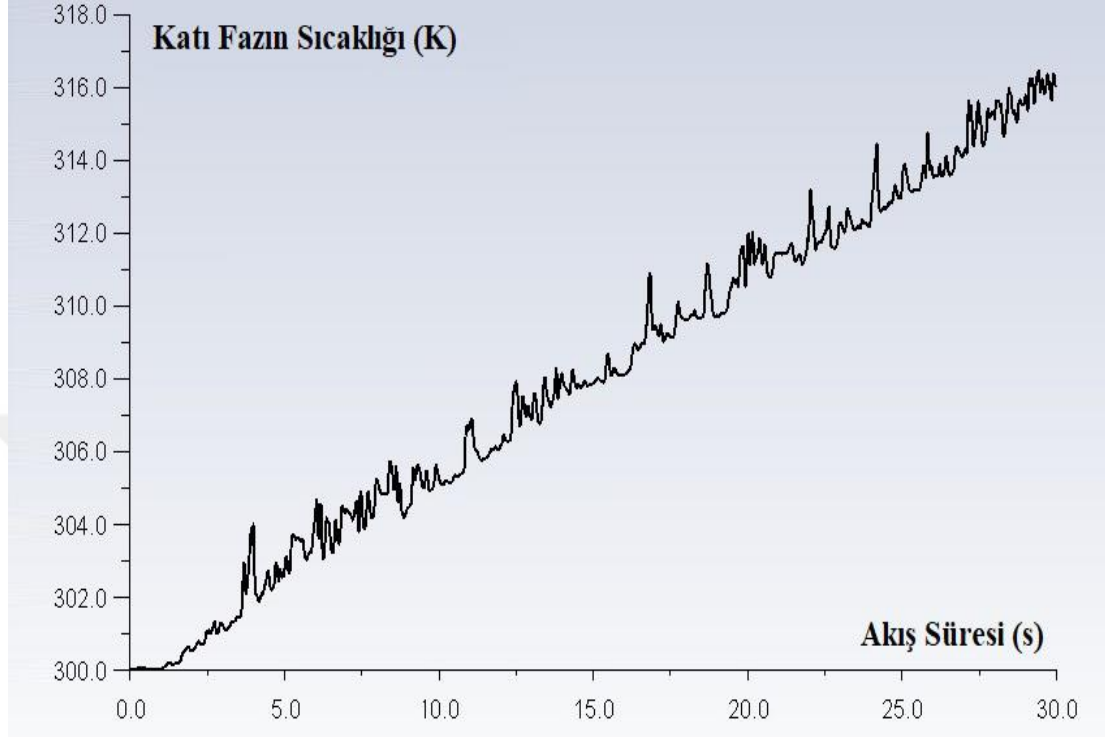
Şekil 8.6: Alüminyum Oksit için hacim fraksiyonu.



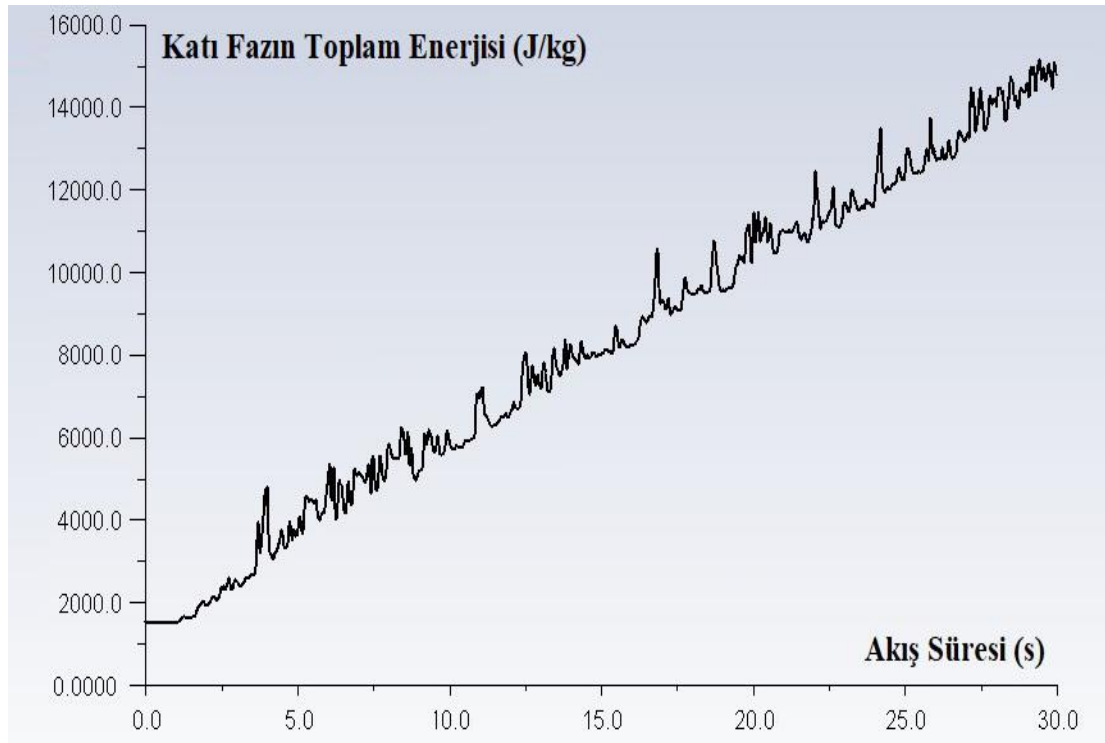
Şekil 8.7: Zirkonyum Dioksit için hacim fraksiyonu.

Yatak genişlemesine bakacak olursak Silisyum Dioksit'te yükseklik olarak en yüksekte kabarcık yatak durumu görülür ve kabarcıklar daha büyüktür. Ters olarak Zirkonyum Dioksit'te yatak daha yoğun bir şekilde ve yükseklik olarak daha alçak olarak oluştu.

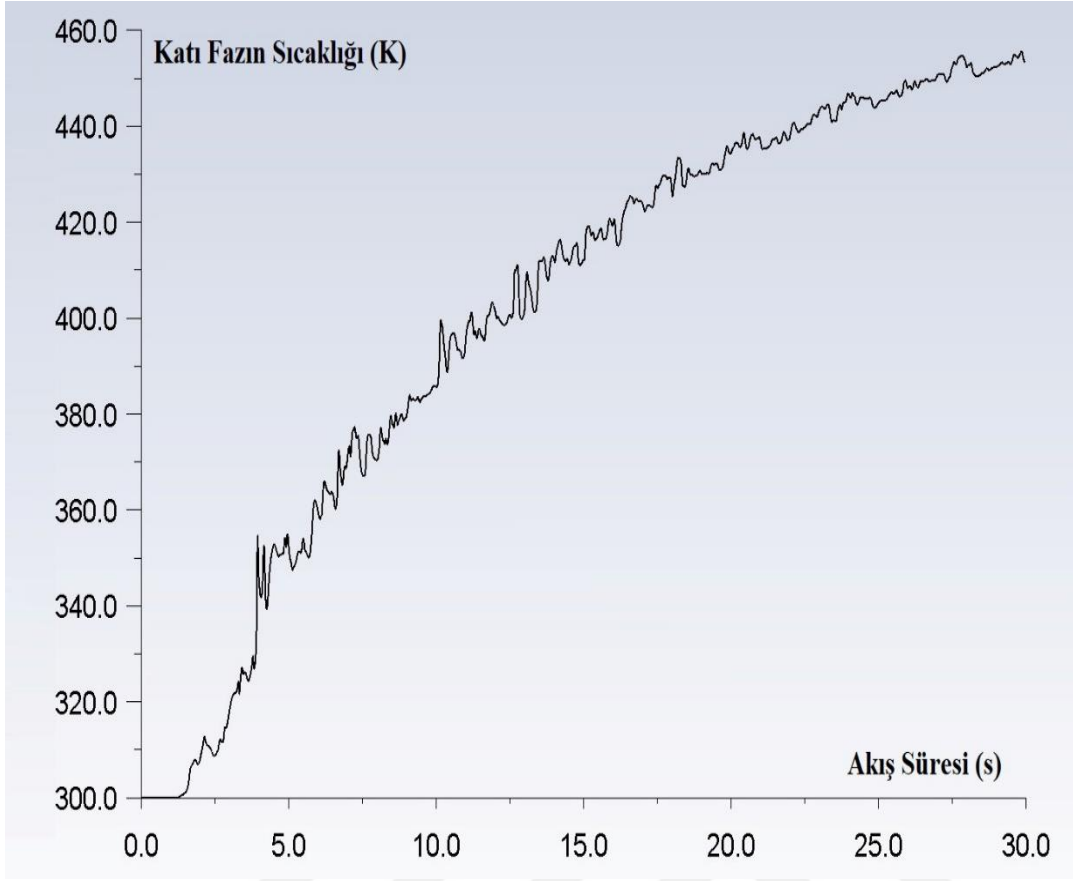
Daha uzun sürelerdeki davranışlarını belirlemek ve hem sıcaklık hem de enerji değerlerindeki değişimi görmek amacıyla simülasyon süreleri uzatılarak aşağıdaki sonuçlar elde edildi (Şekil 8.8-8.13) :



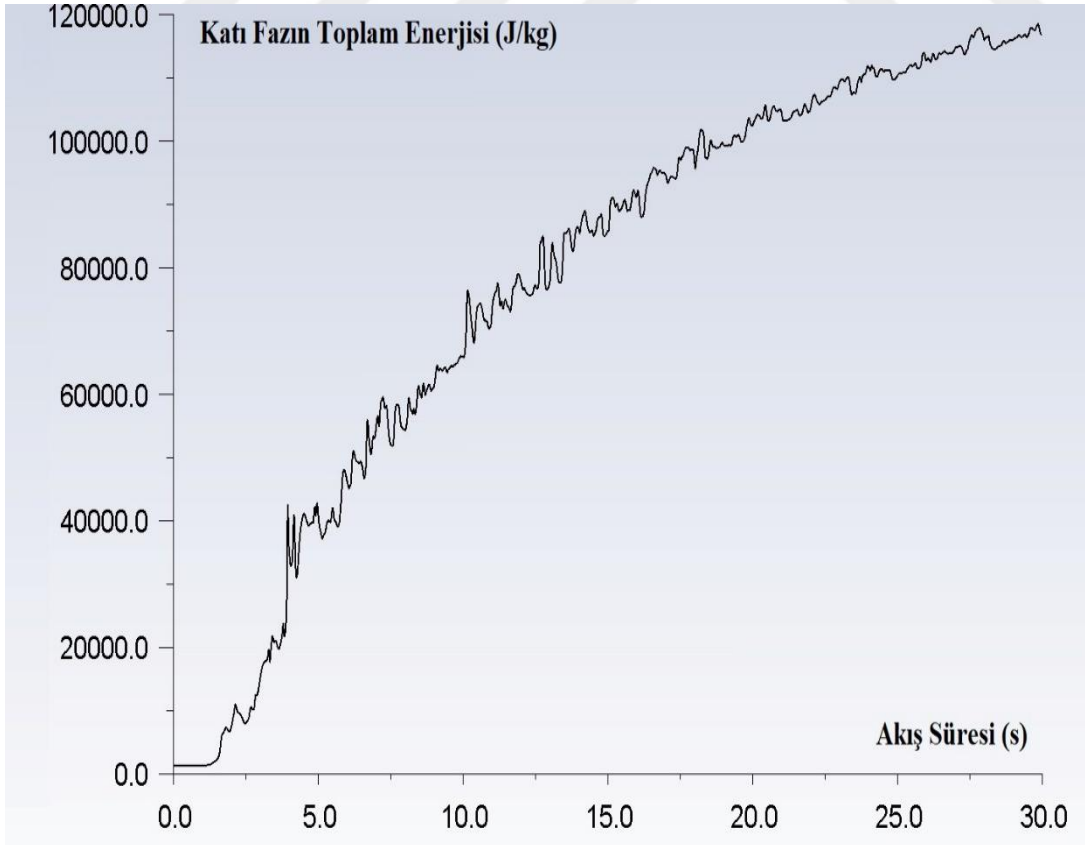
Şekil 8.8: Silisyum Dioksit için sıcaklık değişim profili.



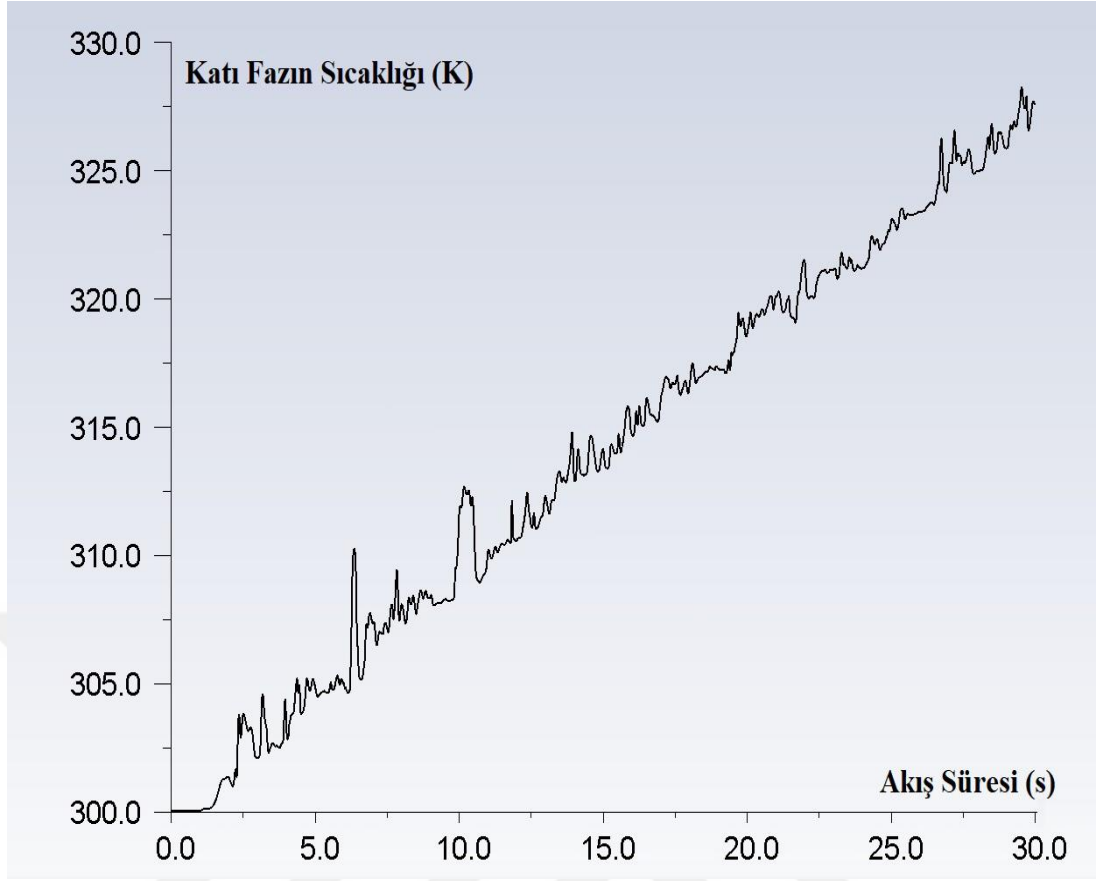
Şekil 8.9: Silisyum Dioksit için enerji değişim profili.



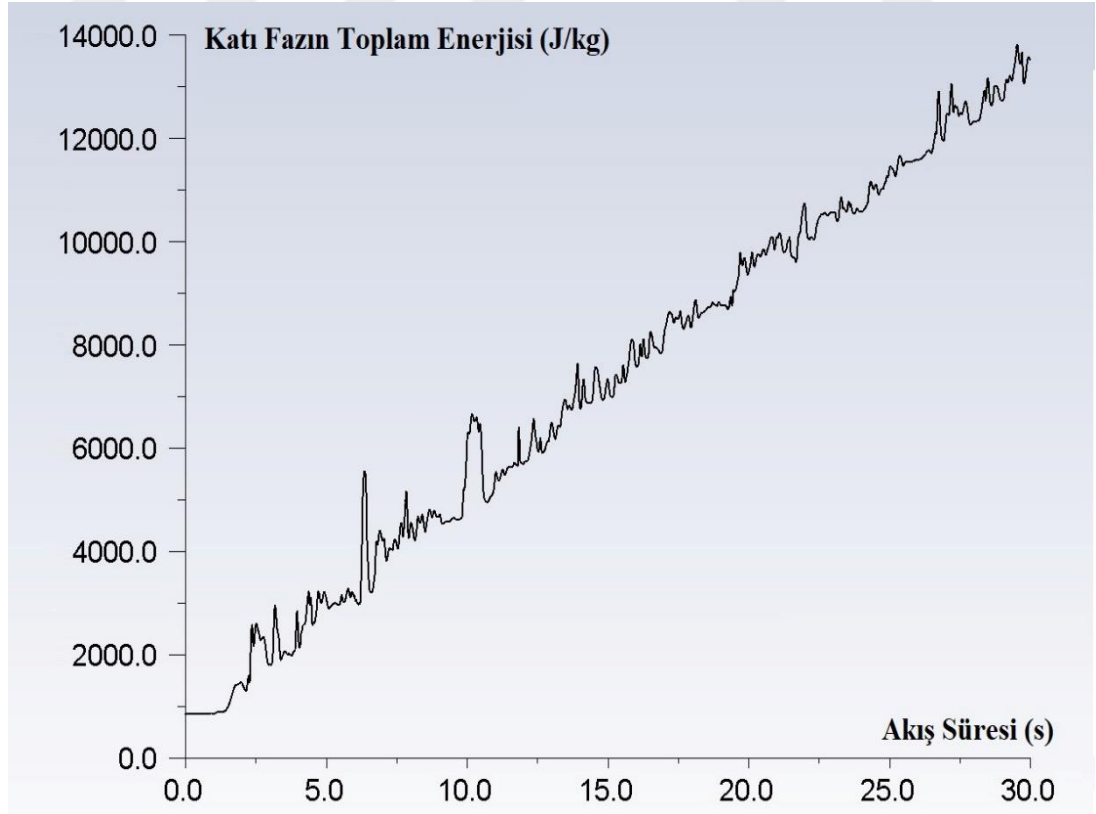
Şekil 8.10: Alüminyum Oksit için sıcaklık değişim profili.



Şekil 8.11: Alüminyum Oksit için enerji değişim profili.



Şekil 8.12: Zirkonyum Dioksit için sıcaklık değişim profili.



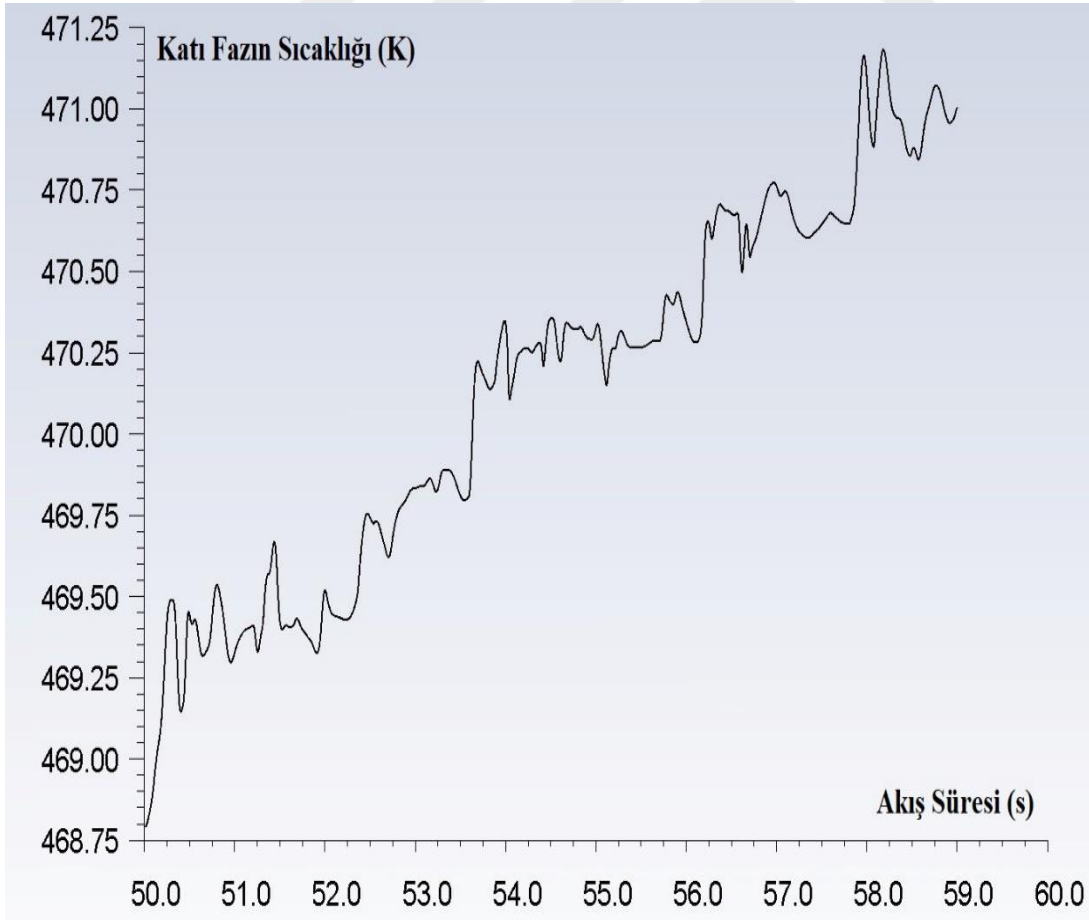
Şekil 8.13: Zirkonyum Dioksit için enerji değişim profili.

Görüldüğü üzere yukarıda yapılan tahmin alınan sonuçlar tarafından sağlanıyor. Isı transferi hızı ve enerji depolama hacmi açısından Alüminyum Oksit bariz şekilde daha etkilidir.

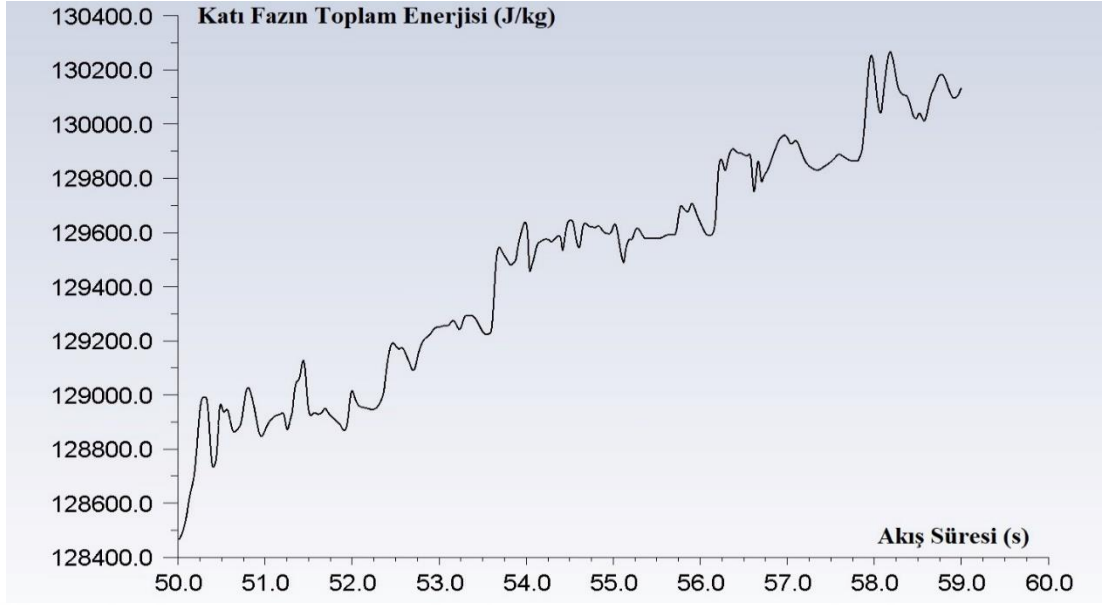
Sıcaklık artışı ve ısı transfer hızında en kısa sürede en yüksek performans aldığımız malzeme olan Alüminyum Oksit'in ısı iletkenliği en yüksek ancak özgül ısı ve yoğunluğu kıyaslandığı alanlarda en yüksek olan malzemelere göre düşüktür. Yoğunluk ve özgül ısı olarak ortalama bir değere sahiptir ancak ısı iletkenlik bakımından diğer malzemelere göre bu değer bir hayli yüksektir.

Sonuç olarak, enerji depolama sistemlerinde ısı dengeye en hızlı ulaşım enerji transferinde en hızlı sonuç alabileceğimiz malzeme çeşitleri Alüminyum Oksit tipi malzemeler olarak öne çıkmaktadır.

Ulaşılmak istenilen final sıcaklık olan 473K'e Alüminyum Oksit'in ne kadar sürede gidebileceğini görmek için simülasyon süresini 1 dakika uzatarak devam edildi (Şekil 8.14 ve Şekil 8.15):



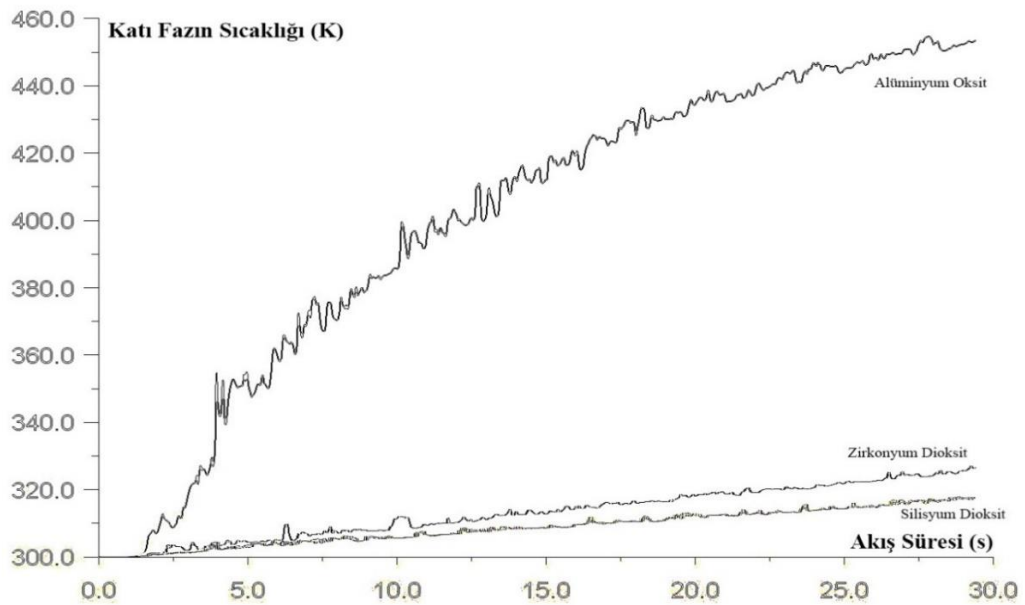
Şekil 8.14 : Alüminyum Oksit için 1 dakikalık sıcaklık değişim profili.



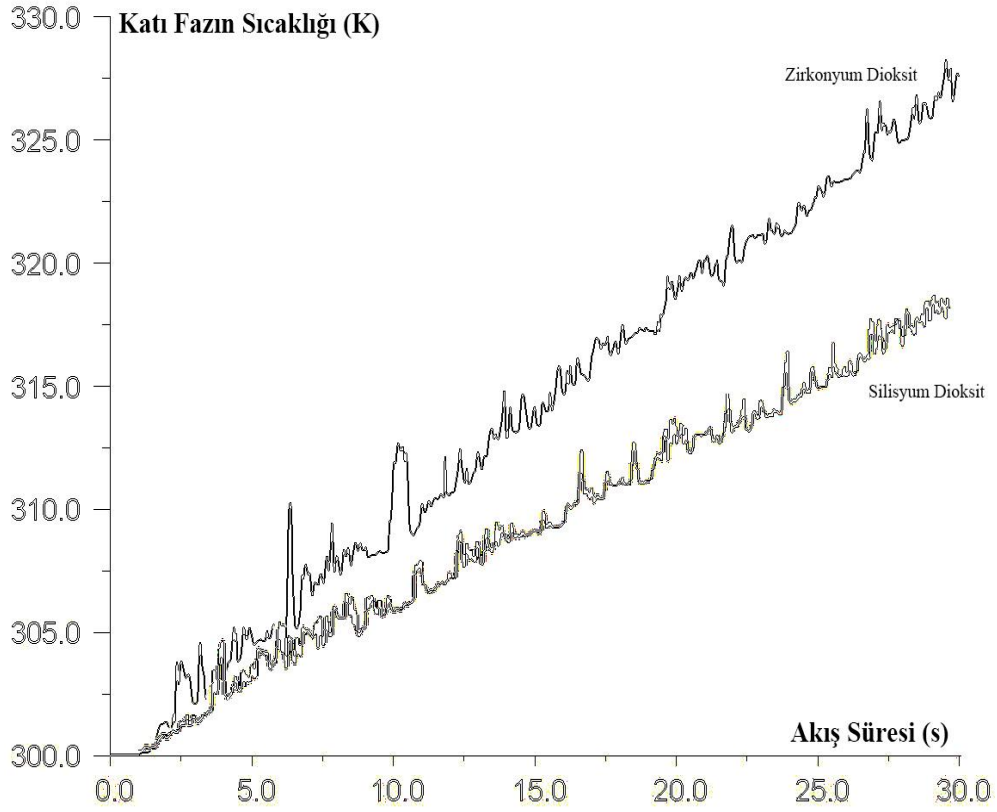
Şekil 8.15 : Alüminyum Oksit için 1 dakikalık enerji değişim profili.

Bu sonuçların daha ayrıntılı görülmesi için sadece 50. Saniyeden sonrası alındı. Alüminyum Oksit'in yaklaşık 1 dakikalık sürede hedef sıcaklık değerine ulaşacağı görülebiliyor.

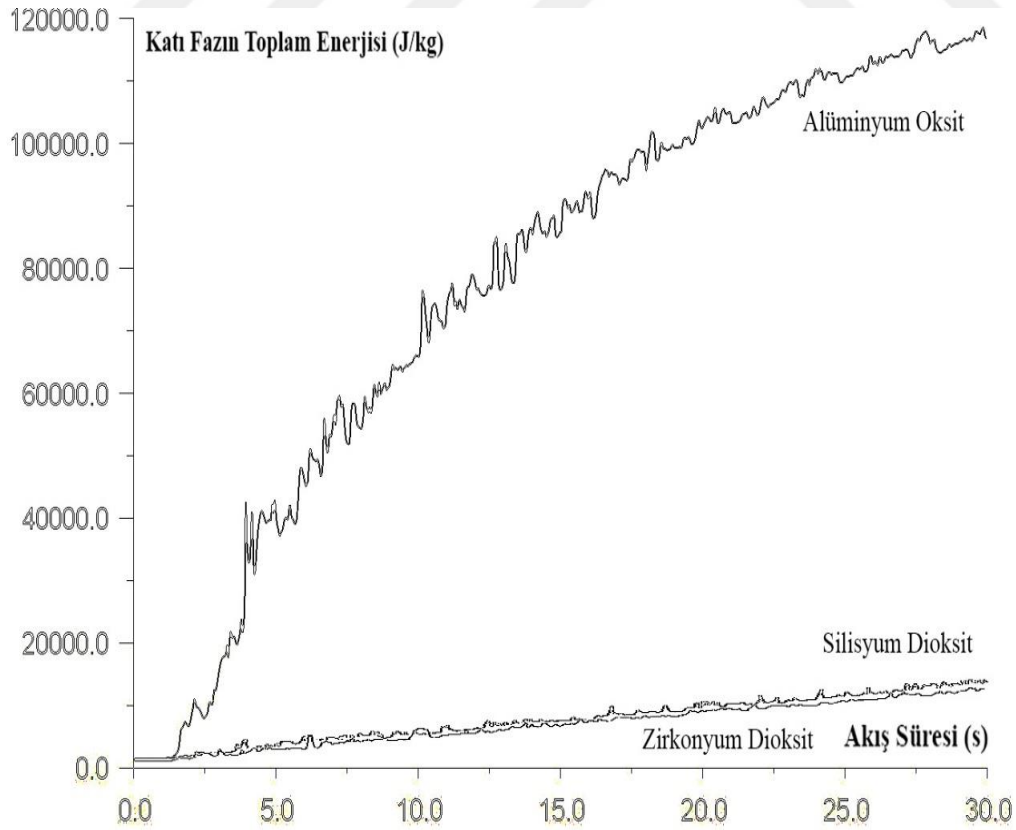
Öte yandan her malzemenin sıcaklık ve enerji değişimleri tek grafik üzerinden birleştirilerek bulunan sonuçlar daha ayrıntılı bir şekilde görülebilir. Aralarında fark fazla olduğu için hem tüm malzemeler kıyaslandı hem de birbirine yakın olan Zirkonyum Dioksit ve Silisyum Dioksit'in sıcaklık ve enerji değişimleri kıyaslandı (Şekil 8.16-8.19) :



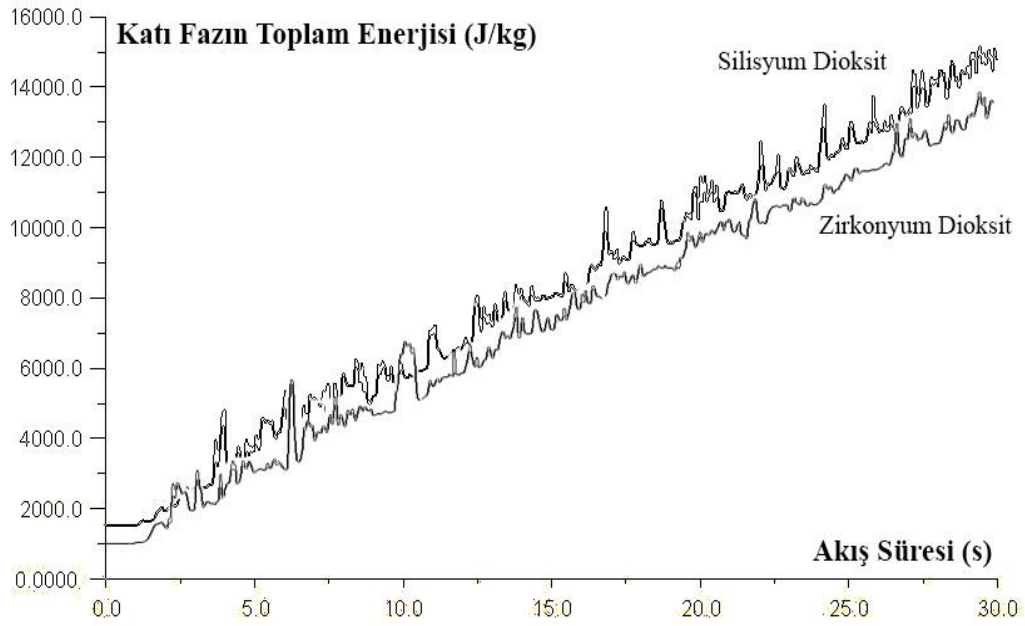
Şekil 8.16 : Malzemelerin sıcaklık değişimlerinin kıyaslanması.



Şekil 8.17 : Zirkonyum Dioksit ve Silisyum Dioksit'in sıcaklık değişimlerinin kıyaslanması.



Şekil 8.18 : Malzemelerin enerji değişimlerinin kıyaslanması.



Şekil 8.19 : Zirkonyum Dioksit ve Silisyum Dioksit'in enerji değişimlerinin kıyaslanması.

Silisyum Dioksit ve Zirkonyum Dioksit için hedef sıcaklık olan 473K'e ulaşması için gereken süreyi hesaplamak için denklem 3.14, 3.15 ve 3.17 kullanılır. Akışkanlaşma işleminde katı ve gaz karışım halinde olduğundan bu hesaplama iki parçacık için ortak Reynolds Sayısı bulunur ve buna göre gazdan katı parçacığa ısı transfer katsayısı hesaplanır. Reynolds sayısındaki $U - U_p$ 'de bu iki hızın hipotezde çok yakın olmasından dolayı $U - U_p$ için 10^{-5} mertebesinde değerler kullanılacaktır ve bu değerlerin doğruluğunun sağlandığı test etmek için simülasyon sonuçlarıyla kıyaslama yapılacaktır.

Önce en uzun süreli simülasyonu yapılan Alüminyum Oksit için denklemler kullanılarak hesaplama yapılacaktır. Bu sayede denklemlerden alınan sonuçlarla simülasyon sonuçlarının doğruluğu kıyaslanıp daha sonra diğer malzemelere uygulanacaktır.

Alüminyum Oksit için:

$$Re_{gp} = \frac{(U - U_p) \rho_p d_p}{\mu} = 0.304$$

$$h_{gp} = \frac{0.033 Re_p^{1.3} K_g}{d_p} = 1.05 W / m^2 K$$

Önce simülasyondan 15. ve 30. saniyelerdeki 420K ve 455K yaklaşık değerlerinde elde edilen sıcaklıklara göre kıyaslama yapılır:

$$t = \frac{c_p \rho_p d_p}{6h_{gp}} \ln \left[\frac{(473 - 300)}{(473 - 420)} \right] = 15.12 \text{ s}$$

$$t = \frac{c_p \rho_p d_p}{6h_{gp}} \ln \left[\frac{(473 - 300)}{(473 - 455)} \right] = 27.54 \text{ s}$$

Bu değerlerin simülasyondaki değerlerle birbirine yakın olduğu görülür. Ve simülasyonda en son 58. Saniyede hesaplanan 471.25K değerine ulaşması için denklemlerle elde edilen süre aşağıdaki gibi bulunur:

$$t = \frac{c_p \rho_p d_p}{6h_{gp}} \ln \left[\frac{(473 - 300)}{(473 - 471.25)} \right] = 58.7 \text{ s}$$

Denklemlerden ve simülasyondan elde edilen değerler birbirini sağlamaktadır. Böylelikle diğer malzemeler için hedef sıcaklığa ulaşılması için gereken yaklaşık süreler hesaplanabilir.

Silisyum Dioksit için:

$$Re_{gp} = \frac{(U - U_p) \rho_p d_p}{\mu} = 0.08$$

$$h_{gp} = \frac{0.033 Re_p^{1.3} K_g}{d_p} = 0.18 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

Önce simülasyondan 10. ve 20. saniyelerdeki 305K ve 311K yaklaşık değerlerinde elde edilen sıcaklıklara göre kıyaslama yapılır:

$$t = \frac{c_p \rho_p d_p}{6h_{gp}} \ln \left[\frac{(473 - 300)}{(473 - 305)} \right] = 9.4 \text{ s}$$

$$t = \frac{c_p \rho_p d_p}{6h_{gp}} \ln \left[\frac{(473 - 300)}{(473 - 311)} \right] = 21.1 \text{ s}$$

Bu değerlerin simülasyondaki değerlerle birbirine yakın olduğu görülür. Ve hedeflenen sıcaklığa ulaşması için gereken süre aşağıdaki gibi bulunur:

$$t_{\%99} = \frac{0.768 c_p \rho_p d_p}{h_{gp}} = 1476.5 \text{ s} = 24.61 \text{ dk} = 0.41 \text{ saat}$$

Zirkonyum Dioksit için:

$$Re_{gp} = \frac{(U - U_p) \rho_p d_p}{\mu} = 0.16$$

$$h_{gp} = \frac{0.033 Re_p^{1.3} K_g}{d_p} = 0.46 W / m^2 K$$

Bir önceki malzemede olduğu gibi önce simülasyondan 10. ve 20. saniyelerdeki 312K ve 320K yaklaşık değerlerinde elde edilen sıcaklıklara göre kıyaslama yapılır:

$$t = \frac{c_p \rho_p d_p}{6h_{gp}} \ln \left[\frac{(473 - 300)}{(473 - 312)} \right] = 10,8 s$$

$$t = \frac{c_p \rho_p d_p}{6h_{gp}} \ln \left[\frac{(473 - 300)}{(473 - 320)} \right] = 18.44 s$$

Bu değerlerin de simülasyondaki değerlerle birbirine yakın olduğu görülür. Ve hedeflenen sıcaklığa ulaşması için gereken süre aşağıdaki gibi bulunur:

$$t_{\%99} = \frac{0.768 c_p \rho_p d_p}{h_{gp}} = 948,99 s = 15,82 dk = 0,26 saat$$



SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, gaz-katı akışkan yatakta enerji depolama amacıyla kullanılabilecek çeşitli malzemelerin termal davranışı araştırılmıştır. ANSYS Fluent 19.3 paket programı aracılığıyla 2D laminar Eulerian akış modeli çok fazlı akışlı akışkan yatağın modellenmesinde kullanılmıştır. Hazırlanan model süreklilik ve momentum denklemlerinin yanı sıra her iki faz için enerji denklemlerini de içerir. Ayrıca, Syamlal-O'brien sürüklenme ifadesi kullanılarak akışkanlaştırılmış yatağın hidrodinamiği ve ısı transferi dikkate alınarak yataktaki gaz ve katı fazların sıcaklık dağılımları hesaplanmıştır.

Teze ilk olarak daha önce benzer olarak akışkan yataktaki sıcaklık değişimlerini ve hacim fraksiyon değişimleri araştıran çalışmalar incelenerek başlanmıştır. Daha sonra bu çalışmalardaki sonuçlar ışığında yaptığım teze benzer yönlerinden yola çıkarak bilgiler verilmiştir. Çalışmaların çözüm yöntemleri baz alınarak tezime uygulanacak yönleri incelenmiştir. Sonrasında araştırdığım farklı özelliklerdeki malzemelerin ısı performanslarını görmek ve değerlendirmek için simüle ederek bir kıyaslama ortaya çıkarılmıştır.

Simülasyonlardan alınan sonuçlar bize gösteriyor ki kıyaslandığı diğer malzemelere göre yoğunluk bakımından düşük olan ve aynı şekilde özgül ısısı düşük olan ancak ısı iletkenliği ve ısı yayılımı yüksek olan malzeme çeşidi en hızlı şekilde sıcaklık değişimine ve yüksek ısı transferine izin vermiştir. Denklemlerden elde edilen verilerle sağlama yapılarak diğer malzemeler için de süreler hesaplanmıştır. Hem denklemlerde hem de simülasyonda ortak olarak ısı yayılımı yüksek olan malzeme tipinin daha hızlı ısı transferine olanak sağladığı gösterilmiştir.



KAYNAKLAR

- Basu, P.** (2015). *Circulating Fluidized Bed Boilers: Design, Operation and Maintenance*, Springer
- Basu, P.** (2006). *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*, Taylor & Francis Group, LLC
- Belmonte, J.F., Izquierdo-Barrientos, M.A., Molina, A.E., Almendros-Ibáñez, J.A.** (2016).
Air-based solar systems for building heating with pcm fluidized bed energy storage, *Energy Build.* 130, 150–165.
- Bir, G.** (2012). *Yangın Monitörlerinde Jet ve Su Şemsiyesi Akışının VOF Metodu ile Sayısal Çözümü* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Brems, A., Caceres G., Dewil, R., Baeyens, J., Pitie, F.** (2013). Heat transfer to the riser-wall of a circulating fluidised bed (CFB), *Energy*, (50), 493-500.
- Caram, H.S., Hsu, K.K.** (1986). Bubble formation and gas leakage in fluidized beds, *Chem. Eng. Sci.* 41,1445–1453.
- Cocco, R., Reddy Karri S. B., Knowlton T.** (2014). Introduction to Fluidization, *CEP Magazine*, 21-29.
- Çengel, Y.** (2002). *Heat transfer: a practical approach 2nd Edition*, McGraw-Hill Science
- Dechsiri, C.** (2004). Particle Transport in Fluidized Beds: Experiments and Stochastic Models, *University of Groningen*, 6-28.
- Du, W., Bao, X., Xu, J., Wei, W.** (2006). Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Influence of frictional stress, maximum packing limit and coefficient of restitution of particles, *Chemical Engineering Science* 61, 4558 – 4570.
- Duomarco, J. L.** (2015). Figure of merit for solar domestic hot water systems, *Solar Energy* 111, 151–156.
- Geldart, D.** (1973). Types of gas fluidization, *Powder Technology* 7 (5), 285–292.
- Gunn D. J.** (1978). Transfer of heat or mass to particles in fixed and fluidised beds, *Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 21*, 461-476.
- Harrison, D., Leung, L.** (1961). Bubble Formation at an Orifice in a Fluidized Bed, *Nature volume* 190, 433–434.
- Hussainova, I., Kubarsepp, J., Shcheglov, I.** (1999). Investigation of impact of solid particles against hardmetal and cement targets. *Tribology International* 32 (6), 337–344.

- Johnson, P.C., Jackson, R.** (1987). Frictional-collisional constitutive relations for granular materials with application to plane shearing, *Journal of Fluid Mechanics* 176, 67–93.
- Koparan, İ.B.,** (2011). Boru İçi Akışta Mili Boyutlu Taneciklerin Isı Taşımına Etkisinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Kozak M., Kozak Ş.** (2012). Enerji Depolama Yöntemleri, *SDU International Technologic Science*, Vol. 4, No 2, 17-29.
- Kuipers, J., Prins, W., Van Swaaij, W.** (1991). Theoretical and experimental bubble formation at a single orifice in a two-dimensional gas-fluidized bed, *Chem. Eng. Sci.* 46, 2881–2894.
- Kunii, D., Levenspiel, O.** (2013). *Fluidization Engineering 2nd Edition*, Butterworth-Heinemann, Boston.
- Lu, H., He, Y., Liu, W., Ding, J., Gidaspow, D., Bouillard, J.** (2004). Computer simulations of gas–solid flow in spouted beds using kinetic–frictional stress model of granular flow, *Chemical Engineering Science* 59 (4), 865–878.
- Ma, Z., Glatzmaier, G., Mehos, M.** (2014). Fluidized Bed Technology for Concentrating Solar Power With Thermal Energy Storage, *Journal of Solar Energy Engineering* 136(3):031014, 1-9.
- Mahdoudi, N., El Ganaoui, M., Moummi, A.** (2015) Heat storage potential of the fluidized bed technology : Hydrodynamics and thermal analysis, *International conference on MATERIALS & ENERGY, At Tetouan, Morocco*.
- Marchelli, F., Moliner, C., Bosio, B., Arato E.** (2019). A CFD-DEM sensitivity analysis: The case of a pseudo-2D spouted bed, *Powder Technology Volume* 35315, 409-425.
- Muren, R., Arias, D., Chapman, D., Erickson, L., Gavilan, A.** (2011). Coupled Transient System Analysis: A New Method of Passive Thermal Energy Storage Modeling for High Temperature Concentrated Solar Power Systems, *ASME Energy Sustainability Fuel Cell 2011*, Washington DC.
- Nieuwland, J., Veenendaal, M., Kuipers, J., Van Swaaij, W.** (1996). Bubble formation at a single orifice in gas-fluidised beds, *Chem. Eng. Sci.* 51, 4087–4102.
- Nguyen, X., Leung, L.** (1972). A note on bubble formation at an orifice in a fluidised bed, *Chem. Eng. Sci.* 27, 1748–1750.
- Pacheco, J. E., Showalter, S. K., Kolb, W. J.** (2002), Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants, *ASME J. Solar Energy Eng.*, 124(2), 153–159.
- Patil, A.V., Peters, E.A.J.F., Kolkman, T.** (2014). Modeling Bubble Heat Transfer in Gas–Solid Fluidized Beds Using DEM, *Chemical Engineering Science, Volume* 10524, 121-131.

- Ranade V.V.** (2002) *Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering*, Academic Press, San Diego, CA, USA
- Schaeffer, D.G.** (1987). Instability in the evolution equations describing incompressible granular flow, *Journal of Differential Equations* 66 (1), 19–50.
- Shen, J., Liu, X., Ho W.H.** (2019). CFD simulation of a fluidized bed as a solar receiver, *SOLARPACES 2018: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*, 030055, 1-7.
- Silve, G. G., Jiménez, N.P., Salazar, O.F.** (2012). Fluid Dynamics of Gas – Solid Fluidized Beds, *Advanced Fluid Dynamics, Intech*, 39-58.
- Yang, W.C., Revay, D., Anderson, R.G., Chelen, E., Keairns, D., Cicero, D.** (1984). *Fluidization Phenomena in a Large Scale Cold-Flow Model*, Engineering Foundation, New York, 77
- Zhang, D.Z., Rauenzahn, R.M.** (1997). A viscoelastic model for dense granular flows, *Journal of Rheology* 41 (6), 1275–1297.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Muhammed Bahaddin KOCATAŞ

E-posta : bahaddinkocatas@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

- **Lise** : 2013, E.C.A Elginkan Anadolu Lisesi
- **Lisans** : 2017, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM

- İlk stajını Haziran 2015 ve Ağustos 2015 arası Erdemler Makine Mühendislik Fikstür İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti'nde tamamladı.
- İkinci stajını ise Haziran 2016 ve Temmuz 2016 arası stajını Uğur Mühendislik'te tamamladı.
- Ağustos 2017 ve Mart 2019 arası Uğur Mühendislik firmasında çalıştı. Mekanik tesisat alanında uygulamalar yaptı.