



T.C.  
NIĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SİRKÜLASYONLU AKIŞKAN YATAKTA ÜST BÖLGEDE GAZ KATI İKİ  
FAZLI AKIŞIN ZAMANA BAĞLI SAYISAL ÇÖZÜMLEMESİ

UĞUR YILDIRIM

Ocak 2012



T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SİRKÜLASYONLU AKIŞKAN YATAKTA ÜST BÖLGEDE GAZ KATI İKİ  
FAZLI AKIŞIN ZAMANA BAĞLI SAYISAL ÇÖZÜMLEMESİ

UĞUR YILDIRIM

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Afşin GÜNGÖR

Ocak 2012

Doç. Dr. Afşin GÜNGÖR danışmanlığında Uğur YILDIRIM tarafından hazırlanan “Sirkülasyonlu Akışkan Yatakta Üst Bölgede Gaz Katı İki Fazlı Akışın Zamana Bağlı Sayısal Çözümlemesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Afşin GÜNGÖR (Niğde Üniversitesi)



Üye : Doç. Dr. Ünal AKDAĞ (Aksaray Üniversitesi)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Fuat KAYA (Niğde Üniversitesi)



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından 19/01/2012 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun ....../...../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA  
Enstitü Müdürü

## ÖZET

### SİRKÜLASYONLU AKIŞKAN YATAKTA ÜST BÖLGEDE GAZ KATI İKİ FAZLI AKIŞIN ZAMANA BAĞLI SAYISAL ÇÖZÜMLEMESİ

YILDIRIM, Uğur

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Afşin GÜNGÖR

Ocak 2012, 40 sayfa

Sirkülasyonlu akışkan yatakların sahip olduğu özel hidrodinamik yapının iyi anlaşılması, bu yatakların tasarım ve etkenliğini arttırmakta önemli bir rol oynamaktadır. Bununla beraber, sirkülasyonlu akışkan yatakların optimum tasarım ve işletme parametrelerinin tespitinde, gerçek boyuttaki akışkan yataklarla çalışmanın gerek zaman ve ekonomiklik, gerekse uygulama açısından pratik olmayacağı açıktır. Bu nedenle, yatak içerisindeki gaz-katı akış yapısını doğru bir şekilde tahmin edebilecek modellerin geliştirilmesi gerekmektedir. Buradan hareketle, bu çalışma kapsamında; akışkan yatağın hidrodinamik yapısını karakterize etmek amacıyla yatağın üst bölgesindeki gaz katı iki fazlı akışın radyal ve eksenel yönde zamana bağlı iki boyutlu sayısal çözümü yapılmıştır. Modelin geçerliliğinin sağlanması için, geliştirilen hidrodinamik model sonuçlarının; farklı ölçekli yataklar kullanılarak yapılmış ve literatürde yayınlanmış deneysel verilerle karşılaştırılması yapılmıştır. Model tahminlerinin, farklı ölçekli ve farklı işletme şartlarına sahip yataklarla gerek radyal ve gerekse eksenel yönde göstermiş olduğu uyum, geliştirilen hidrodinamik modelin geçerliliğini kanıtlamaktadır.

Anahtar sözcükler: Sayısal model, akışkan yatak, hidrodinamik.

## SUMMARY

### NUMERICAL COMPUTATION OF TIME-DEPENDENT GAS SOLID TWO-PHASE FLOW IN THE UPPER ZONE OF A CIRCULATING FLUIDIZED BED

YILDIRIM, Ugur

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Associate Professor Dr. Afsin GUNGOR

January 2012, 40 pages

Hydrodynamics plays a crucial role in defining the performance of circulating fluidized beds (CFB). The numerical simulation of CFBs is very important in the prediction of its flow behavior. From this point of view, in the present study a dynamic two dimensional model is developed considering the hydrodynamic behavior of CFB. In the modeling, the CFB riser is analyzed in two regions: The bottom zone in turbulent fluidization regime is modeled in detail as two-phase flow which is subdivided into a solid-free bubble phase and a solid-laden emulsion phase. In the upper zone core-annulus solids flow structure is established. Simulation model takes into account the axial and radial distribution of voidage, velocity and pressure drop for gas and solid phase, and solids volume fraction and particle size distribution for solid phase. The model results are compared with and validated against atmospheric cold bed CFB units' experimental data given in the literature for axial and radial distribution of void fraction, solids volume fraction and particle velocity, total pressure drop along the bed height and radial solids flux.

Keywords: Numerical model, fluidized bed, hydrodynamics.

## ÖNSÖZ

Sirkülasyonlu akışkan yatakların dizaynında yatağın hidrodinamik yapısının iyi belirlenmesi gerekmektedir. Bununla beraber, sirkülasyonlu akışkan yatakların optimum tasarım ve işletme parametrelerinin tespitinde, gerçek boyuttaki yakıcılarla çalışmanın gerek zaman ve ekonomiklik, gerekse uygulama açısından pratik olmayacağı açıktır. Sirkülasyonlu akışkan yataklarında etkin olan tasarım ve işletme parametrelerinin tespiti ve sistemin optimum çalışmasını sağlayacak gerekli parametrelerin belirlenmesi amacıyla bu çalışmada yatak hidrodinamiğinin en önemli kısmı olan üst bölge için dinamik iki boyutlu bir model geliştirilmiştir. Modelin geçerliliği, farklı ölçekli ve farklı işletme şartlarına sahip yataklardan elde edilen verilerle sağlanmış ve daha sonra etkin olan tasarım ve işletme parametrelerinin tespiti ve sistemin optimum çalışmasını sağlayacak gerekli parametreler irdelenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca sürekli ilgi ve desteğini esirgemeyen ve her konuda kendimi geliştirmemde katkıları olan sayın hocam Doç. Dr. Afşin GÜNGÖR'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmalarım sırasında, her zaman yanımda olan ve gerekli tüm manevi desteği sağlayan aileme de teşekkür ederim.

Yüksek lisans bursiyeri olarak görev aldığım ve Doç. Dr. Afşin GÜNGÖR'ün yürütücüsü olduğu 109M167 nolu "Biyokütle Yakan Sirkülasyonlu Akışkan Yataklı Yakıcıların Modellenmesi" isimli TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında hocam Doç. Dr. Afşin GÜNGÖR ile birlikte yapmış olduğumuz çalışmaların bir ürünü olarak ortaya çıkan bu çalışmaya katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iii
SUMMARY .....	iv
ÖNSÖZ .....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
TABLO LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
KISALTMA VE SİMGELER .....	x
BÖLÜM I GİRİŞ .....	1
BÖLÜM II SİRKÜLASYONLU AKIŞKAN YATAKLARIN MODELLENMESİ.....	3
2.1 Sirkülasyonlu Akışkan Yatak Modeli .....	3
2.2 Hidrodinamik Model.....	6
2.2.1 Alt bölgenin modellenmesi.....	8
2.2.2 Üst bölgenin modellenmesi .....	8
2.2.3 Üst bölge denklemleri.....	12
2.3 Çözüm Metodu.....	19
BÖLÜM III ZAMANA BAĞLI HİDRODİNAMİK MODEL SONUÇLARI.....	23
3.1 Zamana Bağlı Hidrodinamik Model Sonuçları ve Tartışma .....	23
BÖLÜM IV SONUÇLAR .....	34
KAYNAKLAR .....	36

## TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Yoğun faz kalınlığı $\delta$ için literatürde önerilen korelasyonlar .....	9
Tablo 2.2 Üst bölgede yatak boşluk oranı için literatürde önerilen korelasyonlar .....	9
Tablo 2.3 Boşluk oranının radyal değişimi için literatürde önerilen korelasyonlar .....	10
Tablo 2.4 Üst bölge hidrodinamik model ve bünye denklemleri .....	19
Tablo 3.1 Tanelerin hidrodinamik özellikleri .....	25
Tablo 3.2 Karşılaştırmaların yapıldığı deneysel verilere ait bilgiler .....	27

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Sirkülasyonlu akışkan yatağın şematik gösterimi .....	4
Şekil 2.2 Kontrol hacmi boyunca kütle giriş-çıkışı .....	12
Şekil 2.3 Kontrol hacmine r doğrultusunda etkiyen ivmelenme kuvvetleri .....	13
Şekil 2.4 Kontrol hacmine $\theta$ doğrultusunda etkiyen ivmelenme kuvvetleri .....	14
Şekil 2.5 Kontrol hacmine z doğrultusunda etkiyen ivmelenme kuvvetleri.....	14
Şekil 2.6 Kontrol hacmine r doğrultusunda etkiyen viskoz kuvvetler.....	15
Şekil 2.7 Kontrol hacmine $\theta$ doğrultusunda etkiyen viskoz kuvvetler .....	15
Şekil 2.8 Kontrol hacmine z doğrultusunda etkiyen viskoz kuvvetler .....	16
Şekil 2.9 Kontrol hacimleri şematik resmi .....	20
Şekil 2.10 Hidrodinamik model sayısal çözüm akış diyagramı.....	22
Şekil 3.1 Karkamar ve Datta [52]'nin deneysel seti ve şematik görünüşü.....	23
Şekil 3.2 Farklı yatak işletme hızları için model katı kütle akısı tahminlerinin Karkamar ve Datta [52]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılması .....	24
Şekil 3.3 Farklı katı kütle akıları için model tanecik boşluk oranı tahminlerinin Lee ve diğ. [53]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılması .....	25
Şekil 3.4 Model sonuçlarının Andreux ve diğ. [54]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılması.....	26
Şekil 3.5 Model sonuçlarının Issangya ve diğ. [55]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılması.....	28
Şekil 3.6. Model boşluk oranı tahminlerinin zamana bağlı değişimleri: a) 5.23 m'de, b) 3.40 m 'de .....	28
Şekil 3.7 Model katı boşluk oranı profili tahminlerinin Zhang ve diğ. [27]'in deneysel verileri ile karşılaştırılması .....	29
Şekil 3.8 Model katı tanecik hız profili tahminlerinin Zhang ve diğ. [27]'in deneysel verileri ile karşılaştırılması .....	29
Şekil 3.9 Model katı boşluk oranı tahminlerinin Zhang ve diğ. [27]'nin deneysel şartlarında zamana bağlı değişimleri: a) 14.08 m 'de, b) 12.28 m'de, c) 8.160 m 'de, d) 0.950 m'de .....	31
Şekil 3.10 Model katı tanecik hızı tahminlerinin Zhang ve diğ. [27]'nin deneysel şartlarında zamana bağlı değişimleri: a) 14.08 m 'de, b) 12.28 m'de, c) 8.160 m 'de, d) 0.950 m'de .....	32

## KISALTMA VE SİMGELER

<b>A</b>	: Kesit alanı, (m <sup>2</sup> )
<b>C</b>	: Konsantrasyon (kmol/m <sup>3</sup> ), (kg/m <sup>3</sup> )
<b>D</b>	: Yatak çapı, (m)
<b>d</b>	: Tane çapı, (m)
<b><math>\bar{d}_p</math></b>	: Ortalama tane çapı, (m)
<b>D<sub>b</sub></b>	: Kabarcık çapı, (m)
<b>d<sub>p</sub></b>	: Tane çapı, (m)
<b>Fr</b>	: Froude sayısı, (-)
<b>g</b>	: Yerçekimi ivmesi, (m/s <sup>2</sup> )
<b>G[ε]</b>	: Katı gerilme modülü, (N/m <sup>2</sup> )
<b>G<sub>p</sub></b>	: Kütle akısı, (kg/m <sup>2</sup> s)
<b>H</b>	: Yatak yüksekliği, (m)
<b>h<sub>g</sub></b>	: Gaz fazı için ısı taşınım katsayısı, (W/m <sup>2</sup> K)
<b>h<sub>p</sub></b>	: Katı fazı için ısı taşınım katsayısı, (W/m <sup>2</sup> K)
<b>h<sub>r</sub></b>	: Işınım ile ısı geçiş katsayısı, (W/m <sup>2</sup> K)
<b>P</b>	: Basınç, (kPa)
<b>P<sub>0</sub></b>	: Yatak girişindeki basınç, (kPa)
<b>R</b>	: Yatak yarıçapı, (m)
<b>r</b>	: Yatak merkezinden olan uzaklık, (m)
<b>R<sub>a</sub></b>	: Tane ufalanma hızı, (kg/s)
<b>Re</b>	: Reynolds sayısı, (-)
<b>R<sub>u</sub></b>	: Üniversal gaz sabiti, (8.315 kJ/kmolK)
<b>u</b>	: Gaz hızı, (m/s)
<b>U<sub>ma</sub></b>	: Minimum akışkanlaşma hızı, (m/s)
<b>v</b>	: Katı hızı, (m/s)
<b>V<sub>g</sub></b>	: Kontrol hacmindeki gaz hacmi, (m <sup>3</sup> )
<b>V<sub>kh</sub></b>	: Kontrol hacmi, (m <sup>3</sup> )
<b>z</b>	: Yatağın üst kısmından uzaklık, (m)

## Alt İndisler

<b>çık</b>	: Çıkan
<b>g</b>	: Gaz
<b>gir</b>	: Giren
<b>i</b>	: Seyrek/yoğun faz [core/annulus]
<b>j</b>	: Gaz türü
<b>k</b>	: Katı
<b>ma</b>	: Minimum akışkanlaşma
<b>p</b>	: Tanecik
<b>t</b>	: Toplam

## Yunan Harfleri

$\bar{\epsilon}$	: Ortalama boşluk oranı, (-)
$\beta$	: Gaz-katı sürüklenme katsayısı, (kg/m <sup>3</sup> s)
$\epsilon$	: Boşluk oranı, (-)
$\mu$	: Dinamik viskozite, (kg/ms)
$\nu$	: Kinematik viskozite, (m <sup>2</sup> /s)
$\rho$	: Yoğunluk, (kg/m <sup>3</sup> )
$\tau$	: Katı gerilmesi, (N/m <sup>2</sup> )
$\delta$	: Yoğun faz kalınlığı, (m)
$\phi$	: Eşitlik (2.4)'in sabiti, (-)

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Sirkülasyonlu akışkan yataklarda katı tanecikler, yataktan tek bir taneciğin taşınmasını sağlayacak gaz hızlarının biraz altında çalışırlar. Bu nedenle havalı taşıma sistemlerinde olduğu gibi tanecikler yataktan hemen dışarı atılamazlar. Tam tersine, yatak içinde farklı çaptaki tanecikler yukarı ve/veya aşağı hareket ederek bir araya gelirler, topaklar oluştururlar ve büyük oranda geri dönüşümü sağlarlar. Bu uzun parçalar halindeki katı tanecik kümeleri yukarı-aşağı ve yatay yönde hareketleri sırasında da parçalanır tekrar birleşir ve sürekli bir hareketlilik sağlarlar. Genelde hızlı akışkanlaşma (fast-fludization) rejiminde çalışan sirkülasyonlu akışkan yataklarda, kabarcıklı akışkan yatak olarak alınan alt bölge ve halkasal akış yapısında olan seyrek fazlı bir üst bölge bulunmaktadır. Sirkülasyonlu akışkan yatakların sahip olduğu bu özel hidrodinamik yapının iyi anlaşılması, bu yatakların tasarım ve etkenliğini arttırmakta önemli bir rol oynamaktadır. Bununla beraber, sirkülasyonlu akışkan yatakların optimum tasarım ve işletme parametrelerinin tespitinde, gerçek boyuttaki akışkan yataklarla çalışmanın gerek zaman ve ekonomiklik, gerekse uygulama açısından pratik olmayacağı açıktır. Bu nedenle, yatak içerisindeki gaz-katı akış yapısını doğru bir şekilde tahmin edebilecek modellerin geliştirilmesi gerekmektedir. Geliştirilecek iyi bir hidrodinamik model ile yatak içerisinde; gaz ve katılar için boşluk oranı, konuma bağlı gaz ve katı hızları, katı kütle akışı ve yatak basıncının eksenel ve radyal yöndeki dağılımlarının bilinmesi, sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcılar için optimum tasarım ve işletme parametrelerinin tespit edilmesini sağlayacaktır.

Sirkülasyonlu akışkan yataklar alt bölge v üst bölge olmak üzere iki bölgeye ayrılmıştır. Alt bölge ile yatak çıkışı arasında yer alan üst bölge, yatak hidrodinamiğinin en önemli kısmını oluşturmaktadır. Buradan hareketle, bu çalışma kapsamında; akışkan yatağın hidrodinamik yapısını karakterize etmek amacıyla yatağın üst bölgesindeki gaz katı iki fazlı akışın radyal ve eksenel yönde zamana bağlı iki boyutlu sayısal çözümlemesi yapılmıştır.

Modelin geçerliliğinin sağlanması için, geliştirilen hidrodinamik model simülasyon sonuçlarının; farklı ölçekli yataklar kullanılarak yapılmış ve literatürde yayınlanmış deneysel verilerle karşılaştırılması yapılmıştır. Model tahminlerinin, farklı ölçekli ve

farklı işletme şartlarına sahip yataklarla gerek radyal ve gerekse aksenel yönde göstermiş olduğu uyum, geliştirilen hidrodinamik modelin geçerliliğini kanıtlamaktadır. Bunun yanı sıra, model tahminlerinin aynı yataklar için farklı işletme şartları ve farklı yatak yüksekliklerinde deneysel verilerle göstermiş olduğu uyum ise modelin esnekliğini çok net bir şekilde ortaya koymuştur.

## BÖLÜM II

### SİRKÜLASYONLU AKIŞKAN YATAKLARIN MODELLENMESİ

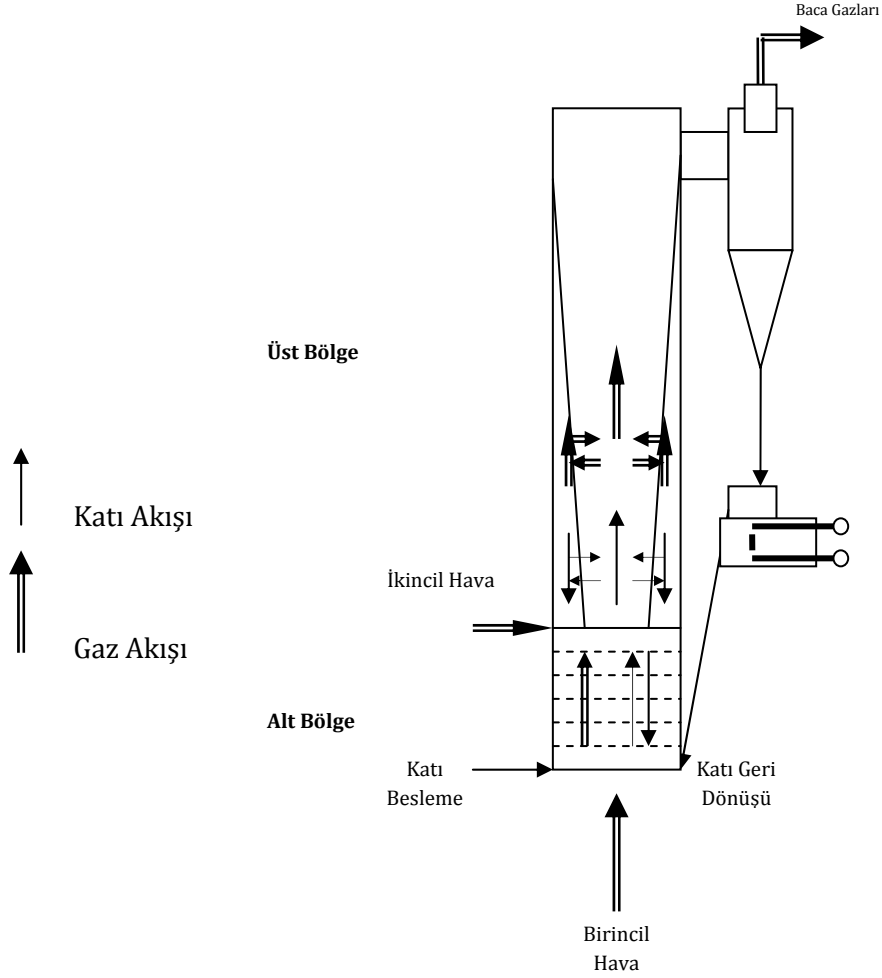
#### 2.1 Sirkülasyonlu Akışkan Yatak Modeli

Sirkülasyonlu akışkan yataklarda katı tanecikler, yataktan tek bir taneciğin taşınmasını sağlayacak gaz hızlarının biraz altında çalışırlar. Bu nedenle havalı taşıma sistemlerinde olduğu gibi tanecikler yataktan hemen dışarı atılamazlar. Tam tersine, yatak içinde farklı çaptaki tanecikler yukarı ve/veya aşağı hareket ederek bir araya gelirler, topaklar oluştururlar ve büyük oranda geri dönüşümü sağlarlar. Bu uzun parçalar halindeki katı tanecik kümeleri yukarı-aşağı ve yatay yönde hareketleri sırasında da parçalanır tekrar birleşir ve sürekli bir hareketlilik sağlarlar. Genelde hızlı akışkanlaşma rejiminde çalışan sirkülasyonlu akışkan yataklarda, kabarcıklı akışkan yatak olarak alınan alt bölge ve halkasal akış yapısında olan seyrek fazlı bir üst bölge bulunmaktadır.

Sirkülasyonlu akışkan yatakların sahip olduğu bu özel hidrodinamik yapının iyi anlaşılması, bu yatakların tasarım ve etkenliğini arttırmakta önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, yatak içerisindeki gaz-katı akış yapısını doğru bir şekilde tahmin edebilecek modellerin geliştirilmesi gerekmektedir. Geliştirilecek iyi bir hidrodinamik model ile yatak içerisinde; gaz ve katılar için boşluk oranı, konuma bağlı gaz ve katı hızları, katı kütle akısı ve yatak basıncının aksenel ve radyal yöndeki dağılımlarının bilinmesi, sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcılar için optimum tasarım ve işletme parametrelerinin tespit edilmesini sağlayacaktır. Şekil 2.1’de sirkülasyonlu bir akışkan yataklı yakıcının şematik resmi verilmiştir.

Literatürde hidrodinamik yapı ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Literatürde mevcut teorik çalışmalar Hartge ve diğ. [1] tarafından yapılan detaylı bir gözden geçirme çalışması ile özetlenmektedir. Teorik çalışmalar dikkatle incelendiğinde, Harris ve Davidson [2]’un da belirttiği gibi hidrodinamik modeller üç ana grupta sınıflandırılabilir;





Şekil 2.1 Sirkülayonlu akışkan yatağın şematik gösterimi

**Grup I:** Bu gruptaki modeller yatak içerisindeki katı dağılımının aksnel profilini tahmin etmekte fakat radyal yöndeki değişimlerini dikkate almamaktadır (Basit aksnel katı dağılım modelleri) [3].

**Grup II:** Bu modeller katı dağılımının aksnel ve radyal profillerini, yatak içerisinde halkasal akış veya tane kümeleri yaklaşımı gibi iki fazlı akış kabulü ile tahmin etmektedir (Halkasal akış modelleri) [4].

**Grup III:** Bu gruptaki çalışmalar akışkanlar mekaniğinin temel denklemlerini iki fazlı gaz-katı akış modeline uygulamaktadır. Bu modeller gaz ve katı fazı için süreklilik denklemi, momentum dengesi ve uygun bünye denklemlerinden oluşmaktadır. (CFD modelleri) [5,6].

Birinci grup modeller genellikle ampirik denklemlere dayanmaktadır, bunun yanında gereken giriş parametreleri, yatak tasarımından önce bilinmemektedir. Halkasal akış

yapısını kullanan ikinci grup modeller ise daha detaylı olmasına rağmen akış bölgelerinin momentum ve süreklilik denklemlerinin tanımlanabilmesi için deneysel verilere ihtiyaç duymaktadır. Birinci ve ikinci grup hidrodinamik modeller, yığın kütle modeli (lumped model) olup sirkülasyonlu akışkan yatakların benzeşiminde reaksiyon ve ısı geçişi modellerine yaklaşık çözümler bulmaktadır. Bu tip modellerde parametrelerin ortalama değerleri alındığı için emisyonların, sıcaklığın ve diğer çıktılarının sonuçlarının alt yatak boyunca değişimi gözlenememektedir. Sirkülasyonlu akışkan yatağın üst bölgesinde bu değerlerin giriş değeri olarak kullanılmasıyla çözümler yapıldığı için deneysel değerlerle yapılan karşılaştırmalarda büyük sapmalar göstermektedir. Üçüncü grup modeller, sayısal çözümleri karmaşık olduğu için sirkülasyonlu akışkan yatakların benzeşiminde uygulanması zor olan modellerdir. Van Wachem ve diğ. [7] üçüncü grup hidrodinamik modellerin karşılaştırmalı analizlerini yapmışlardır. Ancak bu çalışmalarda da, ortalama boşluk oranı, sabit gaz hızı veya sabit kütle akısı alınarak çözümler elde edilmeye çalışılmış, yine bu modellerde yatak içerisindeki basınç değişimi göz önüne alınmamıştır.

Yukarıdaki sınıflandırmanın yanısıra literatürdeki hidrodinamik modelleri: Euler (Sürekli) Modeller ve Lagrange (Ayrık) Modeller olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Lagrange modeller; her bir katı tanecik üzerine etkiyen kuvvetleri ve taneciklerin birbirleriyle yatak içerisindeki hareketlerinden dolayı olan etkileşimlerini dikkate alarak, katı tanecik için süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini çözer [8-10]. Euler modeller ise tüm fazları sürekli ve tamamen karışmış (homojen) olarak dikkate almaktadır. Bu etkileşimli ortam için genelleştirilmiş Navier-Stokes eşitlikleri kullanılmaktadır. Katıların sürekliliği göz önüne alındığında; Euler modeller, taneciklerin yatak içerisindeki akışı ve deformasyonları için ek denklemlere ihtiyaç duymaktadır. Son yıllardaki çalışmalarda denge denklemleri, tanecikli akışın kinetiğine göre oluşturulmaktadır. Euler modeller kabarcıklı akışkan yataklarda, kabarcık oluşumu ve ortalama katı konsantrasyonu dağılımını, sirkülasyonlu akışkan yataklarda ise tane kümelerinin oluşumu, ortalama katı konsantrasyonu ve kütle akısı dağılımlarını oldukça iyi tahmin etmektedir [11-13].

## 2.2 Hidrodinamik Model

Sirkülasyonlu akışkan yataklarda katı tanecikler, yataktan tek bir taneciğin taşınmasını sağlayacak gaz hızlarının biraz altında çalışırlar. Bu nedenle havalı taşıma sistemlerinde olduğu gibi tanecikler yataktan hemen dışarı atılamazlar. Tam tersine, yatak içinde farklı çaptaki tanecikler yukarı ve/veya aşağı hareket ederek bir araya gelirler, topaklar oluştururlar ve büyük oranda geri dönüşümü sağlarlar. Bu uzun parçalar halindeki katı tanecik kümeleri yukarı-aşağı ve yatay yönde hareketleri sırasında da parçalanır tekrar birleşir ve sürekli bir hareketlilik sağlarlar. Genelde hızlı akışkanlaşma rejiminde çalışan sirkülasyonlu akışkan yataklarda, kabarcıklı akışkan yatak olarak alınan alt bölge ve halkasal akış yapısında olan seyrek fazlı bir üst bölge bulunmaktadır.

Sirkülasyonlu akışkan yatakların sahip olduğu bu özel hidrodinamik yapının iyi anlaşılması, bu yatakların tasarım ve etkenliğini arttırmakta önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, yatak içerisindeki gaz-katı akış yapısını doğru bir şekilde tahmin edebilecek modellerin geliştirilmesi gerekmektedir. Geliştirilecek iyi bir hidrodinamik model ile yatak içerisinde; gaz ve katılar için boşluk oranı, konuma bağlı gaz ve katı hızları, katı kütle akısı ve yatak basıncının eksenel ve radyal yöndeki dağılımlarının bilinmesi, sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcılar için optimum tasarım ve işletme parametrelerinin tespit edilmesini sağlayacaktır.

Literatürde hidrodinamik yapı ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Sirkülasyonlu akışkan yataklarda hidrodinamik yapı ile ilgili deneysel çalışmalar genellikle soğuk yataklar üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalar, yatak içerisindeki gaz ve katılar için boşluk oranı, gaz ve katı hızları, katı kütle akısı ve yatak basıncının eksenel ve radyal profillerinin belirlenmesi ve bununla beraber yatak geometrisi, tane özellikleri ve işletme parametrelerinin bu profiller üzerindeki etkisini incelemektedir [14-22]. Bu çalışmalarda, üst bölgenin halkasal akış yapısında olduğu ve merkezden yatak duvarına doğru oldukça belirgin radyal yoğunluk dağılımlarının var olduğu ortaya konmuştur. Deneyler genellikle çapı 5 cm ~ 42 cm arasında, yüksekliği ise 5 m ~ 20 m arasında değişen ince uzun borular içerisinde tane yoğunluğu yüksek olan silis kumu, demir veya cam küreciklerinin farklı işletme hızlarında akışkanlaştırılması ile gerçekleştirilmektedir [23-28].

Cui ve Grace [29], son yıllarda biyokütle taneciklerinin akışkanlaşma özellikleri ile ilgili yapılan çalışmaları detaylı şekilde irdelemiştir. Yapmış oldukları çalışmada, biyokütle taneciklerinin hidrodinamik davranımı ile ilgili yapılan çalışmaların oldukça sınırlı olduğunu vurgulamışlardır. Bunun en büyük nedeninin yukarıda bahsedildiği gibi biyokütle yakıtların köken, yapı ve özellik olarak heterojen yapıya sahip olmasıdır. Kozanoğlu ve diğ. [17] yapmış oldukları deneysel çalışmalarda büyük biyokütle taneciklerinin (2250-7730  $\mu\text{m}$ ) hidrodinamik davranımını çalışmışlar, bu taneciklerin minimum boşluk oranlarını tespit etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada, mutlak basıncın düşmesi ile minimum akışkanlaşma hızının arttığını fakat minimum boşluk oranının bundan etkilenmediğini gözlemlemişlerdir.

Sirkülasyonlu akışkan yatakların akış yapısının aksel düzensizlikler gösterdiği bilinmektedir [9]. Genelde hızlı akışkanlaşma rejiminde çalışan sirkülasyonlu akışkan yataklarda, yatağın alt kısımlarında yoğun fazlı, üst kısımlarında ise seyrek fazlı bir bölge bulunmaktadır. Yoğun fazlı bölge türbülanslı yatak karakteri göstermekte, seyrek bölge ise çeperlerde merkeze göre katı madde açısından daha yoğun olan ince bir bölge ile çevrilmektedir.

Huang ve diğ. [30] yaptıkları çalışmada, sirkülasyonlu akışkan yatak üst bölgesinin hidrodinamik yapısını tahmin eden modelleri iki ana kategoriye ayırmıştır. İlk kategori modeller halkasal akış yapısına sahip iki bölgeli yapıya sahiptir. İkinci kategori modeller ise homojen olarak yukarı akan seyrek gaz-katı karışımı içerisindeki tane kümelerini dikkate almaktadır. Bu kategori modeller yatak içerisindeki aksel doğrultudaki etkileşimleri dikkate almamaktadır.

Literatürde yapılan modelleme çalışmalarında paket programların da kullanılmakta olduğu görülmüştür [1,31]. Hartge ve diğ. [1] yaptıkları teorik çalışmada FLUENT paket programından yararlanarak sirkülasyonlu akışkan yatağın üst bölgesini iki boyutlu modellemiştir. Modelde k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Breault [31] ise sirkülasyonlu akışkan yataklarda gaz-katı saçılma katsayısı ve kütle transfer katsayısı korelasyonları ile ilgili yapmış olduğu gözden geçirme çalışmasında, modellemede MFIX paket programının da kullanıldığını rapor etmiştir.

Yerli ve yabancı araştırmacılar tarafından yapılan modelleme ve deneysel çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların genel olarak yatağın üst bölgesi üzerinde yoğunlaştığı

görülür. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki sirkülasyonlu akışkan yataklarda, yatağın üst bölgesi yatak hidrodinamiğinin en önemli kısmını oluşturmaktadır.

### **2.2.1 Alt bölgenin modellenmesi**

Alt bölgenin yığın kütle olarak ele alınması parametrelerin ortalama değerleri ile çözüm yapılmasına sebep olmakta, bu durum sadece yaklaşık çözümler bulunmasını sağladığı gibi alt bölge boyunca parametrelerin değişimleri gözlenememekte, bununla beraber üst bölge sonuçlarını da olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, alt bölgenin kabarcıklı, hızlı bir akışkan yatak olarak ele alınması gerekmektedir [32,33].

Bu çalışmada, yatağın üst bölgesi için geliştirilen hidrodinamik modelde sirkülasyonlu akışkan yatakların alt bölgesi için Gungor ve Eskin [34] tarafından geliştirilen hidrodinamik model kullanılmış ve alt bölge için elde edilen sonuçlar üst bölge için giriş değerleri olarak kullanılmıştır.

### **2.2.2 Üst bölgenin modellenmesi**

Alt bölge ile yatak çıkışı arasında yer alan üst bölge, yatak hidrodinamiğinin en önemli kısmını oluşturmaktadır. Sirkülasyonlu akışkan yatakların hidrodinamiği üzerine yapılan çalışmalar, üst bölgenin halkasal akış yapısında olduğu ve merkezden yatak duvarına doğru oldukça belirgin radyal yoğunluk dağılımlarının var olduğunu ortaya koymuştur [35-37]. Bu nedenle modelde üst bölge için halkasal akış yapısı kullanılmıştır. Yatak yüksekliğinin büyük bir kısmı, yukarı doğru hareket eden seyrek faz ve onu çevreleyen ve aşağı doğru hareket eden tane kümelerinin bulunduğu yoğun fazdan oluşan karşı akışlı bu bölge ile kaplanmaktadır. Üst bölge için yapılan kabuller aşağıdaki gibidir :

- Üst bölgede açısız doğrultuda ( $\theta$  doğrultusunda) parametrelerin değişimlerinin ihmal edilebilir seviyede olduğu, Gayan ve diğ. [38] tarafından belirtildiği için bu yöndeki değişim ihmal edilmiştir.
- Seyrek fazın, kolon boyunca merkezden yatak duvarlarına doğru genişleyen bir yapı gösterdiği ve bu fazda geri dönüş olmadığı kabul edilmiştir.
- Gaz ve katı akışlarının yatak içerisinde radyal yönde, türbülans etkisiyle merkezden yatak duvarına doğru olduğu kabul edilmiştir.

- Katı taneciklerinin yataktaki hareketi esnasında, birbirleriyle çarpışmalarının etkisiyle yüzeylerindeki aşınma nedeniyle ufalanması dikkate alınmıştır. Bu nedenle tanecik çap dağılımı alt ve üst bölgede hesaplanmıştır.
- Gaz hareketinin alt bölgede olduğu gibi sadece yukarı doğru olduğu kabul edilmiş ve gazın aksenal geri dönüşü ihmal edilmiştir [39].

### 2.2.2.1 Yoğun faz kalınlığı, boşluk oranlarının bulunması

Seyrek fazın, kolon boyunca merkezden yatak duvarlarına doğru genişleyen bir yapı gösterdiği bilinmektedir ve literatürde yoğun fazın kalınlığı,  $\delta$  için çeşitli korelasyonlar mevcuttur (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Yoğun faz kalınlığı  $\delta$  için literatürde önerilen korelasyonlar

Araştırmacı	Korelasyon	
Patience ve Chaouki [40]	$\frac{\delta}{D} = 0,5 \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 1,1 \cdot Fr \left( \frac{G_p}{\rho_p u} \right)^{0,083 \cdot Fr}}} \right]$	(2.1)
Werther ve Wein [41]	$\frac{\delta}{D} = 0,55 \cdot Re^{-0,22} \left( \frac{H}{D} \right)^{0,21} \left( \frac{H-h}{H} \right)^{0,73}$	(2.2)
Wei ve diğ. [42]	$\frac{\delta}{D} = 0,5 \cdot \left[ 1 - 0,21 \cdot Re^{0,133} \cdot \bar{\varepsilon}_p(z)^{0,127} \right]$	(2.3)

Farklı ölçekli yatakların kullanıldığı deneysel verilerle göstermiş olduğu uyum dikkate alınarak, modelde üst bölgede herhangi bir  $h$  yatak yüksekliğinde yoğun fazın kalınlığı,  $\delta$  için Tablo 2.1’de Werther ve Wein [41] tarafından önerilen Denklem 2.2 kullanılmıştır.

Tablo 2.2 Üst bölgede yatak boşluk oranı için literatürde önerilen korelasyonlar

Araştırmacı	Korelasyon			
Patience ve diğ. [40]	$\phi = \frac{u}{\varepsilon(z) \cdot v}$	$\phi = 2$ $\phi = 1 + \frac{5,6}{Fr} + 0,47 \cdot Fr^{0,41}$	$u < 6 \text{ m/s}$ $u > 6 \text{ m/s}$	(2.4)
Smolders ve Baeyens [3]	$\frac{\varepsilon(z) - \varepsilon_{mf}}{1 - \varepsilon(z)} = \exp\left(\frac{z - z_i}{H}\right)$			(2.5)

Literatürde üst bölgede boşluk oranının tespitinde kullanılan korelasyonlar Tablo 2.2’de verilmiştir. Deneysel verilerle modelin mukayese sonucu Smolders ve Baeyens [3] tarafından önerilen ve literatürde de genel bir kabul görmüş olan ve Denklem 2.5 ile verilen korelasyon, modelde üst bölge için yatak boşluk oranı hesabında kullanılmıştır.

Sirkülasyonlu akışkan yataklarda, yatak yüksekliği ile azalan tanecik boşluk oranı profilleri benzerlikler göstermekte ve yaklaşık olarak parabolik bir forma sahip oldukları bilinmektedir. Literatürde lokal boşluk oranı değerleri için çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen korelasyonlar Tablo 2.3’de verilmiştir. Modelde lokal tanecik boşluk oranı  $\varepsilon_p$  için Tablo 2.3’de Rhodes ve diğ. [44] tarafından önerilen (2.7) eşitliği ile verilmiş olan korelasyon kullanılmıştır.

Tablo 2.3 Boşluk oranının radyal değişimi için literatürde önerilen korelasyonlar

Araştırmacı	Korelasyon	
Zhang ve diğ. [43]	$\varepsilon(r, z) = \bar{\varepsilon}(z)^{-3} \left( \frac{r}{R} \right)^{11} + \left( \frac{r}{R} \right)^{2.5} + 0,191$	(2.6)
Rhodes ve diğ. [44]	$\frac{\varepsilon_p(r, z)}{\bar{\varepsilon}_p(z)} = 1 - \frac{\beta'}{2} + \beta' \left( \frac{r}{R} \right)^2$	(2.7)
Patience ve Chaouki [45], Godfroy ve diğ. [46]	$\frac{\bar{\varepsilon}(z)^{0,4} - \varepsilon(r, z)}{\bar{\varepsilon}(z)^{0,4} - \bar{\varepsilon}(z)} = 4 \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^6$	(2.8)
Kim ve diğ. [47]	$(1 - \varepsilon(r, z)) = (1 - \varepsilon(r, z))_{\text{merkez}} + \left( \frac{r}{R} \right)^n + k \cdot \left( \frac{r}{R} \right)^4$ $0 \leq r/R \leq 0,94$ $(1 - \varepsilon(r, z))_{\text{merkez}} = 10 \cdot 10^{-5} \cdot U_0 + 4,97 \cdot 10^{-5} \cdot G_p + 4,39 \cdot 10^{-3}$ $n = 1,31 \cdot U_0 - 0,187 \cdot G_p + 82,7$ $k = -5,67 \cdot 10^{-4} \cdot U_0 + 4,54 \cdot 10^{-6} \cdot G_p + 6,93 \cdot 10^{-3}$	(2.9)
Pugsley ve Berruti [48]	$\varepsilon(r) = 1 - \frac{G_p(r)}{\rho_p \cdot v(r)}$	(2.10)
Wei ve diğ. [49]	$\frac{1 - \varepsilon(z, r)}{1 - \bar{\varepsilon}(z)} = 2,3 - \frac{2,1}{1 + \exp(10r - 7,665)}$	(2.11)

Önerilen korelasyonun yatak içerisindeki lokal tane boşluk oranı değerlerini büyük bir doğrulukla hesaplayabildiği, literatürden açıkça görülmektedir [32]. Rhodes ve diğ. [44];  $\beta'$  değerinin  $1,3 \leq \beta' \leq 1,9$  aralığında değiştiğini, bununla beraber yatak çapı küçüldükçe ve artan yatak işletme hızı ile  $\beta'$  değerinin arttığını belirtmişlerdir.

### 2.2.2.2 Basınç kaybının hesabı

Kabarcıklı akışkan yataklarda basınç düşüşü, yatak ağırlığından hesaplanmaktadır. Modelde yatak ağırlığı nedeniyle basınç düşüşü yatak boyunca aksel yönde dikkate alınırken, bunun yanında yatak içerisindeki katı taneciklerin aksel ve radyal yöndeki ivmelenmelerinden kaynaklanan basınç düşüşü ise aksel ve radyal doğrultuların her ikisinde de dikkate alınmaktadır. Modelde her bir düğüm noktasındaki ivmelenmeden dolayı basınç düşüşü değeri; katı hızı  $v$  ve boşluk oranı  $\varepsilon$ 'un hesap edilen lokal değerlerinden aşağıdaki gibi hesap edilmektedir:

$$\nabla P_{ivmelenme} = \frac{1}{2} \rho_p \nabla [v^2 (1 - \varepsilon(r, z))] \quad (2.12)$$

Modelde herbir düğüm noktasındaki toplam basınç düşüşü değeri ise aşağıdaki gibi dikkate alınmaktadır;

$$\nabla P_{toplam} = \nabla P_{yatak\ ağırlığı} + \nabla P_{ivmelenme} \quad (2.13)$$

Modelde yatak duvarında gaz ve katı taneciklerin kısmi temasları dikkate alınmıştır. Gazlar için yatak duvarındaki sürtünme katsayısı geliştirilmiş Hagen-Poiseuille eşitliği kullanılarak aşağıdaki gibi hesap edilmiştir [50];

$$f_g = \begin{cases} \frac{16}{Re_g} & Re_g \leq 2100 \\ \frac{0.0791}{Re_g^{0.25}} & 2100 < Re_g \leq 100000 \end{cases} \quad (2.14)$$

burada  $Re_g$ , gaz fazı için Reynolds sayısı olup

$$Re_g = \frac{DuC\varepsilon}{\mu} \quad (2.15)$$

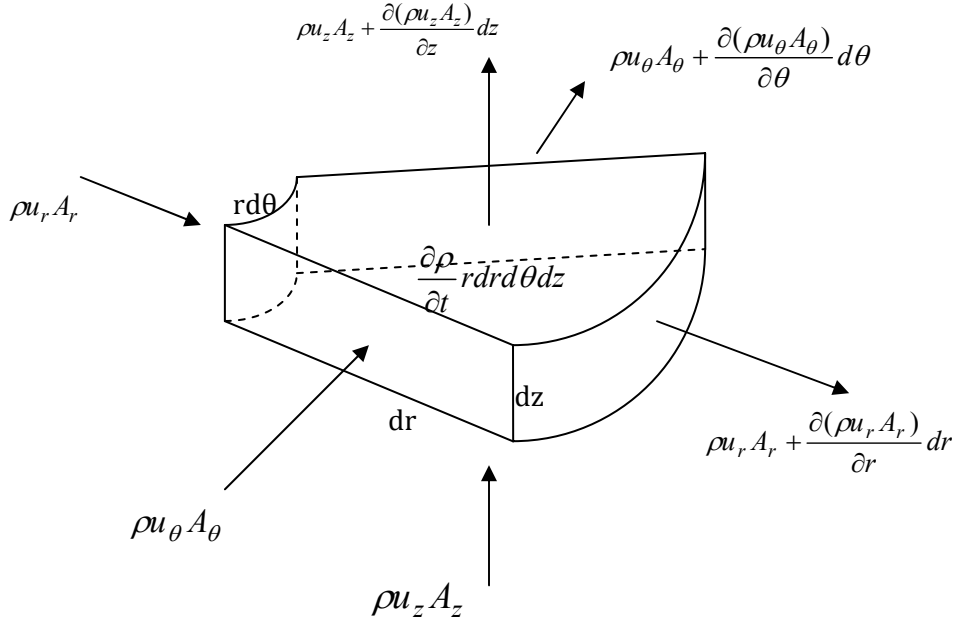
şeklinde hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte gaz konsantrasyonu  $C$ 'nin birimi  $kg/m^3$  olarak dikkate alınmaktadır. Yatak duvarında katı tanecikler için sürtünme katsayısının hesaplanmasında Konno bağıntısı kullanılmıştır [50];

$$f_s = 0.0025 \cdot v^{-1} \quad (2.16)$$



### 2.2.3 Üst bölge denklemleri

Seçilen bir kontrol hacmine göre süreklilik ve momentum denklemlerinin temel halleri aşağıda verilmiş ve buradan hareketle modelde kullanılacak temel denklemler çıkarılmıştır.



Şekil 2.2 Kontrol hacmi boyunca kütle giriş-çıkışı

Süreklilik denklemi, difüzyonla olan kütle transferi, fazlar arası etkileşimle olan kütle transferi ve kimyasal reaksiyonla artan/azalan kütle miktarı ifadeleri ihmal edildiğinde en temel halde aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} r dr d\theta dz + \rho u_r A_r - \rho u_r A_r - \frac{\partial(\rho u_r A_r)}{\partial r} dr + \rho u_\theta A_\theta - \rho u_\theta A_\theta - \frac{\partial(\rho u_\theta A_\theta)}{\partial \theta} d\theta \\ \rho u_z A_z - \rho u_z A_z - \frac{\partial(\rho u_z A_z)}{\partial z} dz = 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

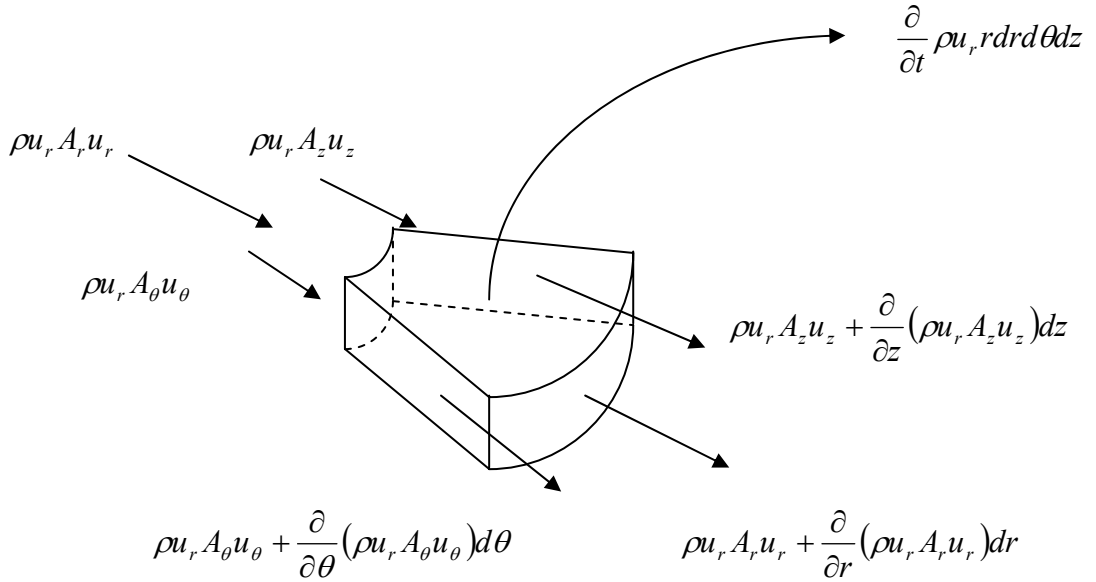
burada;

$$\begin{aligned} A_r &= rd\theta dz \\ A_\theta &= dr dz \\ A_z &= r dr d\theta \end{aligned} \quad (2.18)$$

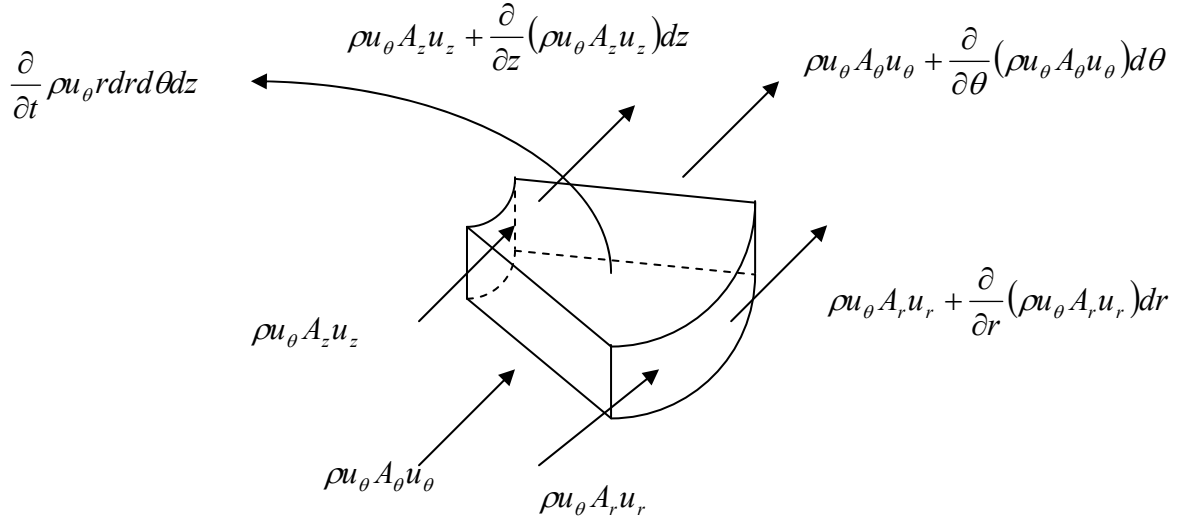
şeklinde dir. Gerekli sadeleştirmeler yapıldığında

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{\partial(\rho u_r)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u_\theta)}{\partial \theta} - \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.19)$$

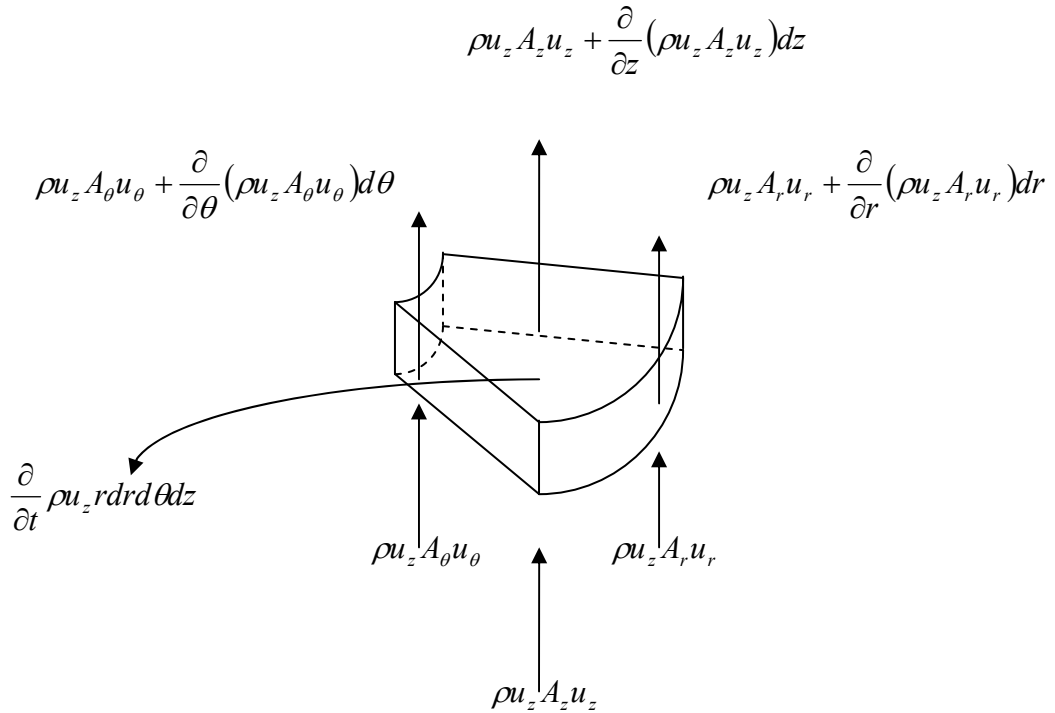
elde edilir, modelde hidrodinamik parametrelerin  $\theta$  doğrultusunda sabit oldukları kabul edilmiştir. Difüzyonla olan kütle transferi, fazlararası etkileşimle olan kütle transferi ve kimyasal reaksiyonla artan/azalan kütle miktarı ifadeleri gözönüne alınmış, ayrıca gazlar için yoğunluk ifadesi ( $\rho$ ) yerine toplam gaz konsantrasyonu ifadesi ( $C$ ) ifadesi kullanılmıştır. Kontrol hacmi üzerindeki ivmelenme ve viskoz kuvvetlerin değişimleri aşağıda gösterilmiştir.



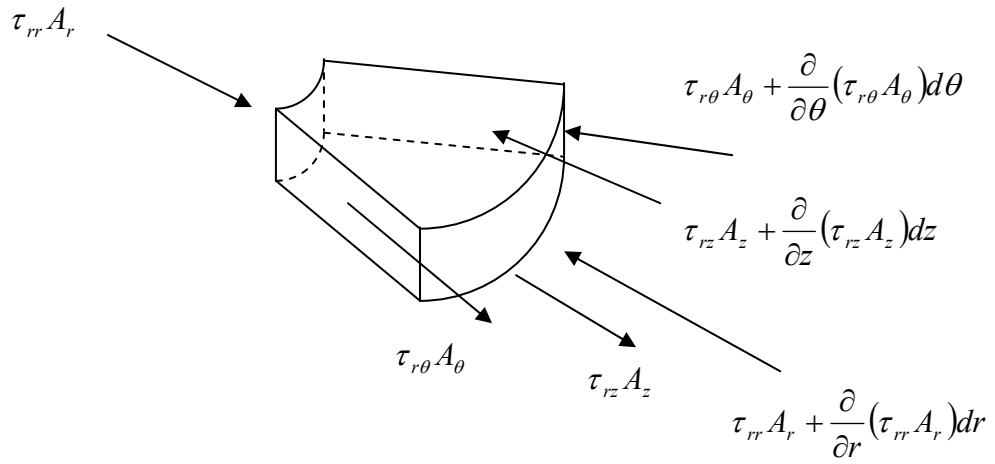
Şekil 2.3 Kontrol hacmine r doğrultusunda etkiyen ivmelenme kuvvetleri



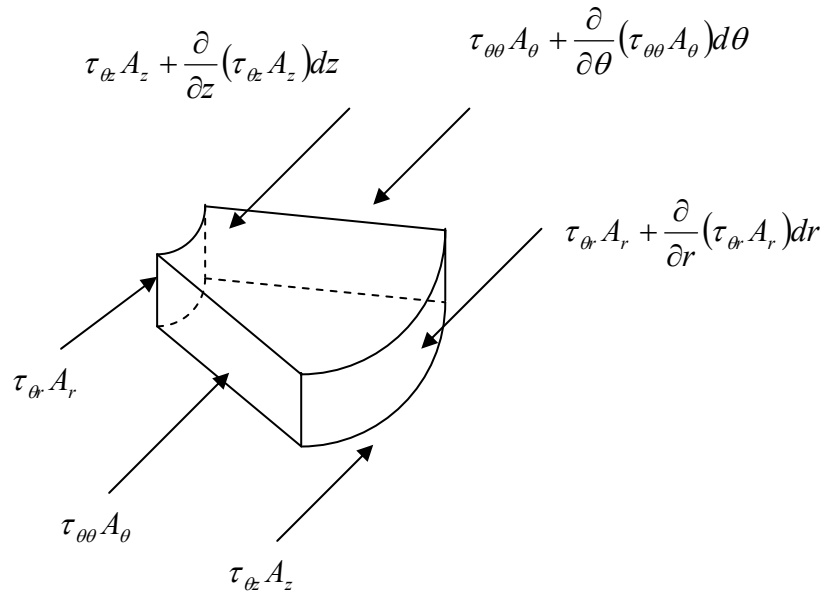
Şekil 2.4 Kontrol hacmine  $\theta$  doğrultusunda etkiyen ivmelenme kuvvetleri



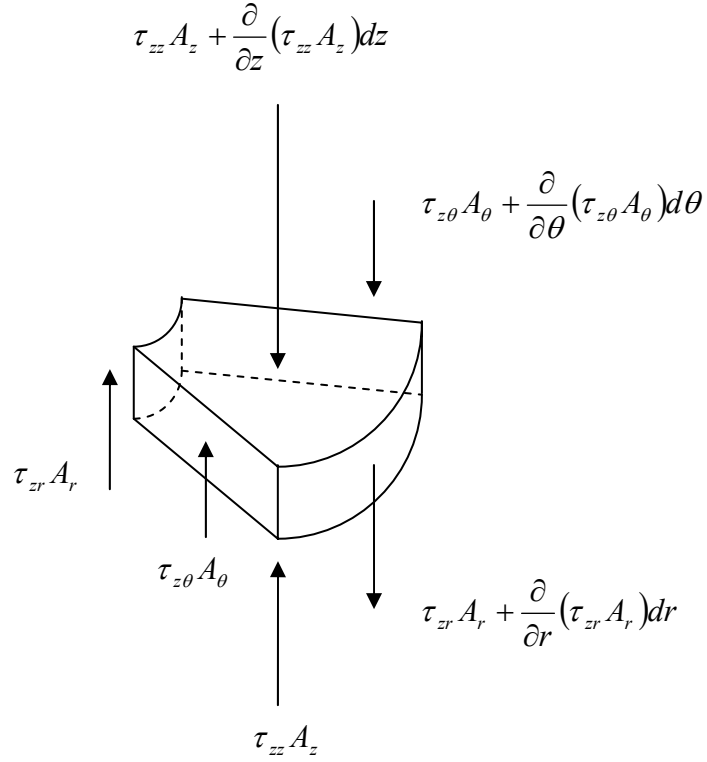
Şekil 2.5 Kontrol hacmine  $z$  doğrultusunda etkiyen ivmelenme kuvvetleri



Şekil 2.6 Kontrol hacmine r doğrultusunda etkiyen viskoz kuvvetler



Şekil 2.7 Kontrol hacmine  $\theta$  doğrultusunda etkiyen viskoz kuvvetler



Şekil 2.8 Kontrol hacmine z doğrultusunda etkiyen viskoz kuvvetler

Modelde hidrodinamik parametrelerin  $\theta$  doğrultusunda sabit olduklarının kabul edildiği yukarıda belirtilmişti. Katı tanecikler ve gazlar arasındaki sürüklenme kuvvetinin dikkate alınmadığı durum için momentum denklemi en temel halde aşağıdaki gibi yazılabilir;

r doğrultusunda;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_r) - \frac{\partial}{\partial r}(\rho u_r)u_r - \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_r)u_z = -\frac{\partial P_r}{\partial r} - \left( \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g \quad (2.20)$$

z doğrultusunda;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_z) - \frac{\partial}{\partial r}(\rho u_z)u_r - \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z)u_z = -\frac{\partial P_z}{\partial z} - \left( \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g \quad (2.21)$$

Katı tanecikler ve gazlar arasındaki sürüklenme kuvvetinin de gözönüne alındığı durumda, gazlar için momentum denklemini yazacak olursak (gazlar için yoğunluk ifadesi ( $\rho$ ) yerine toplam gaz konsantrasyonu ifadesi ( $C$ ) ifadesi kullanılmıştır);

$r$  doğrultusunda;

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(C_T u(r, z) \varepsilon) - \frac{\varepsilon}{R_u} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \left( \frac{P(r, z)}{T(r, z)} u(r, z) \right) u(r, z) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \left( \frac{P(r, z)}{T(r, z)} u(r, z) \right) u(r, z) \right] \right\} = \\ - \frac{\partial P(r, z)}{\partial r} - \varepsilon \frac{\partial}{\partial r} \left[ -2\mu \frac{\partial u(r, z)}{\partial r} + \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial u(r, z)}{\partial z} \right) \right] \\ - \varepsilon \frac{\partial}{\partial z} \left[ -\mu \left( \frac{\partial u(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial u(r, z)}{\partial z} \right) \right] + C \varepsilon g + \beta [u(r, z) - v(r, z)] \end{aligned} \quad (2.22)$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitlikteki sağ taraftaki en son terim sürüklenme kuvvetini göstermektedir.

Momentum denklemi tekrar düzenlenecek olursa;

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{R_u} \left\{ \frac{u^2(r, z)}{T(r, z)} \frac{\partial P(r, z)}{\partial r} + u^2(r, z) P(r, z) \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{T(r, z)} \right) + 2 \frac{P(r, z)}{T(r, z)} u(r, z) \frac{\partial u(r, z)}{\partial r} \right\} = \\ \frac{\varepsilon}{R_u} \left\{ \frac{u^2(r, z)}{T(r, z)} \frac{\partial P(r, z)}{\partial z} + u^2(r, z) P(r, z) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{T(r, z)} \right) + 2 \frac{P(r, z)}{T(r, z)} u(r, z) \frac{\partial u(r, z)}{\partial z} \right\} = \\ - \frac{\partial P(r, z)}{\partial r} - \frac{4}{2} \mu \varepsilon \frac{\partial^2 u(r, z)}{\partial r^2} - \frac{2}{3} \mu \varepsilon \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial u(r, z)}{\partial z} \right) + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 u(r, z)}{\partial z^2} + \mu \varepsilon \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u(r, z)}{\partial r} \right) \\ + C \varepsilon g + \beta [u(r, z) - v(r, z)] \end{aligned} \quad (2.23)$$

elde edilir, gerekli sadeleştirmeler yapılarak  $r$  doğrultusunda momentum denklemi;

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon u^2(r, z) + R_u T(r, z) \frac{\partial P(r, z)}{\partial r}}{R_u T(r, z)} + \frac{\varepsilon u^2(r, z) \frac{\partial P(r, z)}{\partial z}}{R_u T(r, z)} \\ - \frac{\varepsilon u^2(r, z) P(r, z) \left( \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \right)}{R_u T^2(r, z)} - \frac{1}{3} \mu \varepsilon \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial u(r, z)}{\partial z} \right) \\ + 2 \frac{\varepsilon u(r, z) P(r, z) \left( \frac{\partial u(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial u(r, z)}{\partial z} \right)}{R_u T(r, z)} - \frac{4}{3} \mu \varepsilon \frac{\partial^2 u(r, z)}{\partial r^2} \\ - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 u(r, z)}{\partial z^2} - C \varepsilon g - \beta [u(r, z) - v(r, z)] = 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

benzer şekilde  $z$  doğrultusunda momentum denklemi de aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$\begin{aligned}
& \frac{\varepsilon u^2(r, z) + R_u T(r, z) \frac{\partial P(r, z)}{\partial z}}{R_u T(r, z)} + \frac{\varepsilon u^2(r, z) \frac{\partial P(r, z)}{\partial r}}{R_u T(r, z)} \\
& - \frac{\varepsilon u^2(r, z) P(r, z)}{R_u T^2(r, z)} \left( \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} \right) - \frac{1}{3} \mu \varepsilon \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial u(r, z)}{\partial z} \right) \\
& + 2 \frac{\varepsilon u(r, z) P(r, z)}{R_u T(r, z)} \left( \frac{\partial u(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial u(r, z)}{\partial z} \right) - \frac{4}{3} \mu \varepsilon \frac{\partial^2 u(r, z)}{\partial z^2} \\
& - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 u(r, z)}{\partial r^2} - C \varepsilon g - \beta [u(r, z) - v(r, z)] = 0
\end{aligned} \tag{2.25}$$

Katı tanecikler ve gazlar arasındaki sürüklenme kuvvetinin dikkate alındığı ve zamandan bağımsız durum için gaz ve katı tanecikler için modelde kullanılan momentum denklemi ve bünye denklemleri Tablo 2.4’de verilmiştir.

Yukarıda daha önce de bahsedildiği gibi, yatak içerisindeki katı kütle dağılımının bilinmesi sirkülasyonlu akışkan yatakların tasarım ve işletilmesi için en önemli parametrelerden biridir. Gaz ve katıların yataktaki kalış süreleri, ısı geçiş akısı gibi parametreler katı kütle akısının yatak içerisindeki dağılımına bağlıdır. Katı sirkülasyon oranları, gaz hızının 5-9 m/s aralığında değiştiği yataklarda, genellikle 100 kg/m<sup>2</sup>s’den daha küçük olup, gelişmiş üst bölge için bu değer %1’den daha küçük olmaktadır. Katalitik ufalama (FCC) ünitelerinde ise katı kütle akıları 250 kg/m<sup>2</sup>s’nin üzerinde olup, yatak işletme hızı 20 m/s gibi yüksek değerleri bulmakta, ortalama katı akısı ise %10’u geçmektedir [51].

İşletme parametreleri, yatak geometrisi, gaz ve tane karakteristiklerinin yatak içerisindeki katı dağılım profilini etkilediği bilinmektedir. Örneğin katı akısının sabit tutulduğu bir yatakta artan gaz hızı alt bölge yüksekliğini düşürmektedir. Yine uygun gaz hızları için katı akısındaki artış, net kütle akısını artırarak alt bölgenin genişlemesine sebep olmaktadır. Katı sirkülasyon akısının daha da artırıldığı durumlarda alt bölge boşluk oranının 0.75 ile 0.85 arasında değiştiği, üst bölgedeki boşluk oranı değerinin ise 0.95’in üzerinde ve genellikle sabit kaldığı bilinmektedir [51]. Modelde radyal ve aksenal doğrultudaki katı kütle akısı değeri;

$$G_p(r, z) = \rho \cdot v(r, z) \cdot A \cdot \varepsilon_p(r, z) \tag{2.26}$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır.

Tablo 2.4 Üst bölge hidrodinamik model ve bünye denklemleri

<b>Süreklilik Denklemi</b>	
<b>Gazlar için</b>	<b>Katılar için</b>
<b>Seyrek bölgede;</b>	
$\frac{\partial C}{\partial t} \varepsilon_c + \frac{\partial (Cu\varepsilon_c)}{\partial r} + \frac{\partial (Cu\varepsilon_c)}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \rho}{\partial t} (1-\varepsilon_c) + \frac{\partial (\rho v(1-\varepsilon_c))}{\partial r} + \frac{\partial (\rho v(1-\varepsilon_c))}{\partial z} = 0$
<b>Yoğun bölgede;</b>	
$\frac{\partial C}{\partial t} \varepsilon_a + \frac{\partial (Cu\varepsilon_a)}{\partial r} + \frac{\partial (Cu\varepsilon_a)}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \rho}{\partial t} (1-\varepsilon_a) + \frac{\partial (\rho v(1-\varepsilon_a))}{\partial r} - \frac{\partial (\rho v(1-\varepsilon_a))}{\partial z} = 0$
<b>Momentum Denklemi</b>	
<b>Gazlar için</b>	<b>Katılar için</b>
<b>Seyrek bölgede;</b>	
<b>r doğrultusu</b>	
$\frac{\partial (Cu)}{\partial t} \varepsilon_c + \frac{\partial (Cu\varepsilon_c u)}{\partial r} = -\frac{\partial (\tau_{rr}\varepsilon_c)}{\partial r} - \frac{\partial (\tau_{rz}\varepsilon_c)}{\partial z} - \beta(u-v)$	$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} (1-\varepsilon_c) + \frac{\partial (\rho v(1-\varepsilon_c)v)}{\partial r} = -\frac{\partial (\tau_{rr}(1-\varepsilon_c))}{\partial r} - \frac{\partial (\tau_{rz}(1-\varepsilon_c))}{\partial z} + \beta(u-v) - G \frac{\partial (1-\varepsilon_c)}{\partial r}$
<b>z doğrultusu</b>	
$\frac{\partial (Cu)}{\partial t} \varepsilon_c + \frac{\partial (Cu\varepsilon_c u)}{\partial z} = -\frac{\partial (\tau_{zz}\varepsilon_c)}{\partial z} - \frac{\partial (\tau_{rz}\varepsilon_c)}{\partial r} - \beta(u-v)$	$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} (1-\varepsilon_c) + \frac{\partial (\rho v(1-\varepsilon_c)v)}{\partial z} = -\frac{\partial (\tau_{zz}(1-\varepsilon_c))}{\partial z} - \frac{\partial (\tau_{rz}(1-\varepsilon_c))}{\partial r} + \beta(u-v) - G \frac{\partial (1-\varepsilon_c)}{\partial z}$
<b>Yoğun bölgede;</b>	
<b>r doğrultusu</b>	
$\frac{\partial (Cu)}{\partial t} \varepsilon_a + \frac{\partial (Cu\varepsilon_a u)}{\partial r} = -\frac{\partial (\tau_{rr}\varepsilon_a)}{\partial r} - \frac{\partial (\tau_{rz}\varepsilon_a)}{\partial z} - \beta(u-v)$	$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} (1-\varepsilon_a) + \frac{\partial (\rho v(1-\varepsilon_a)v)}{\partial r} = -\frac{\partial (\tau_{rr}(1-\varepsilon_a))}{\partial r} - \frac{\partial (\tau_{rz}(1-\varepsilon_a))}{\partial z} + \beta(u-v) - G \frac{\partial (1-\varepsilon_a)}{\partial r}$
<b>z doğrultusu</b>	
$\frac{\partial (Cu)}{\partial t} \varepsilon_a + \frac{\partial (Cu\varepsilon_a u)}{\partial z} = -\frac{\partial (\tau_{zz}\varepsilon_a)}{\partial z} - \frac{\partial (\tau_{rz}\varepsilon_a)}{\partial r} - \beta(u-v)$	$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} (1-\varepsilon_a) + \frac{\partial (\rho v(1-\varepsilon_a)v)}{\partial z} = -\frac{\partial (\tau_{zz}(1-\varepsilon_a))}{\partial z} - \frac{\partial (\tau_{rz}(1-\varepsilon_a))}{\partial r} + \beta(u-v) - G \frac{\partial (1-\varepsilon_a)}{\partial z}$
$\tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$	$\tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$
$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right)$	$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right)$
$\tau_{rz} = \tau_{rz} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right)$	$\tau_{rz} = \tau_{rz} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right)$
<b>İdeal gaz denklemi</b>	<b>Katı Gerilme Modülü</b>
$C = \frac{1}{R_u} \frac{P}{T}$	$G(\varepsilon) = \frac{\partial \tau}{\partial (1-\varepsilon)} = 10^{-8.76\varepsilon+5.43} \text{ N/m}^2$
<b>Gaz-katı sürüklenme katsayısı</b>	
$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{C\varepsilon_c(1-\varepsilon_c)}{\varepsilon_c^{2.65}} \frac{1}{d_p}  u-v $	$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} (1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}) \quad \text{Re}_p < 1000$
	$C_D = 0.44 \quad \text{Re}_p \geq 1000$

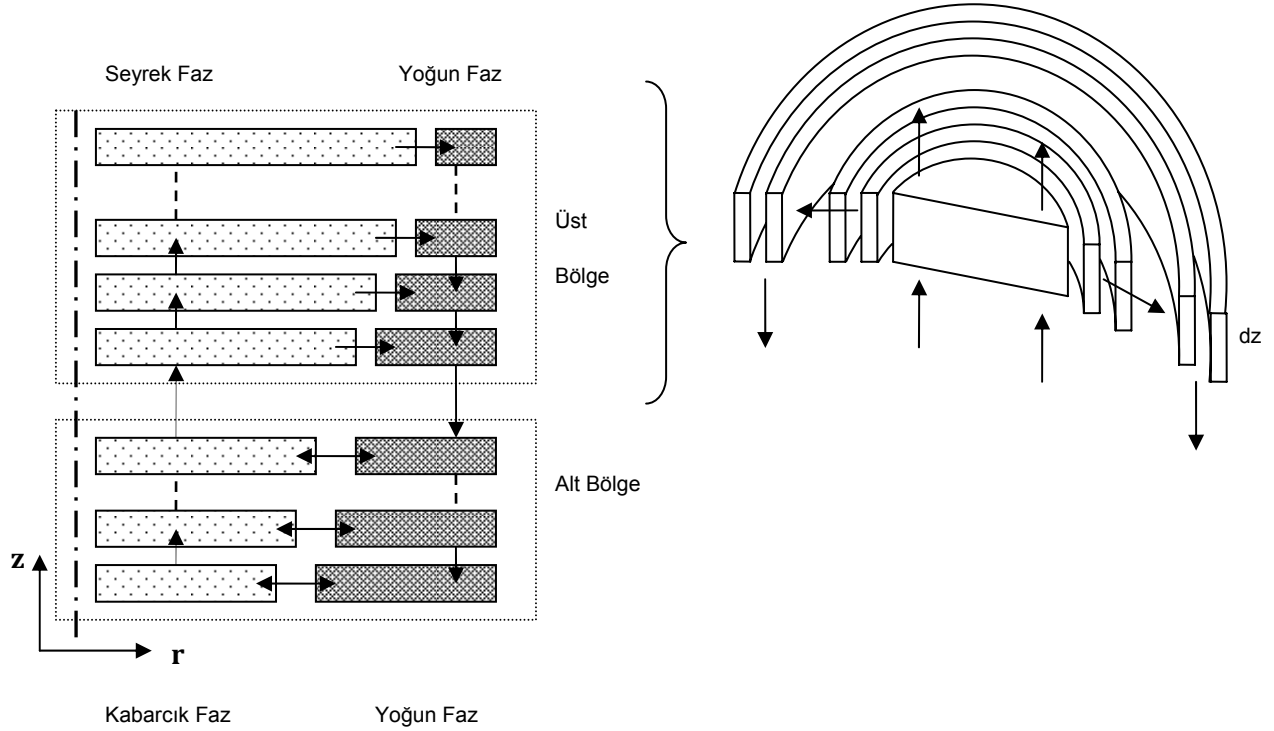
### 2.3 Çözüm Metodu

Gomez ve Milioli [16] yaptıkları iki boyutlu modelde, silindirik ve kartezyen koordinat sistemlerinin her ikisini de kullanmış ve aralarında büyük farklılıklar olmadığını tespit etmişlerdir. Modelde silindirik koordinat sistemi kullanılmış ve yatağın eksenal simetrik



olduğu kabul edilmiştir. Katı taneciklerin küresel oldukları, yatak içerisinde hareketleri göz önüne alınırken yukarı yön pozitif, aşağı yön negatif alınarak çözüm yapılmıştır.

Modelde alt bölge yüksekliği ikincil havanın yatağa beslendiği noktaya kadar alınmıştır [34]. Alt bölge çıkışındaki tane çap dağılımı, katı kütle akısı, yatak basıncı değişimi, yatak boşluk oranı ve katı ve gaz hızı üst bölge çözümünde giriş parametreleri olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 2.9 Kontrol hacimleri şematik resmi

Modelde yatak için geliştirilen süreklilik ve momentum denklemleri, geriye ayırıklaştırma (backward-difference) metodu kullanılarak aşağıdaki gibi ayırıklaştırılmıştır;

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} = \frac{1}{\Delta r^2} [u(i, j) - 2u(i-1, j) + u(i-2, j)] \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r \partial z} = \frac{1}{\Delta r \Delta z} [u(i, j) - u(i, j-1) - u(i-1, j) + u(i-1, j-1)] \quad (2.28)$$

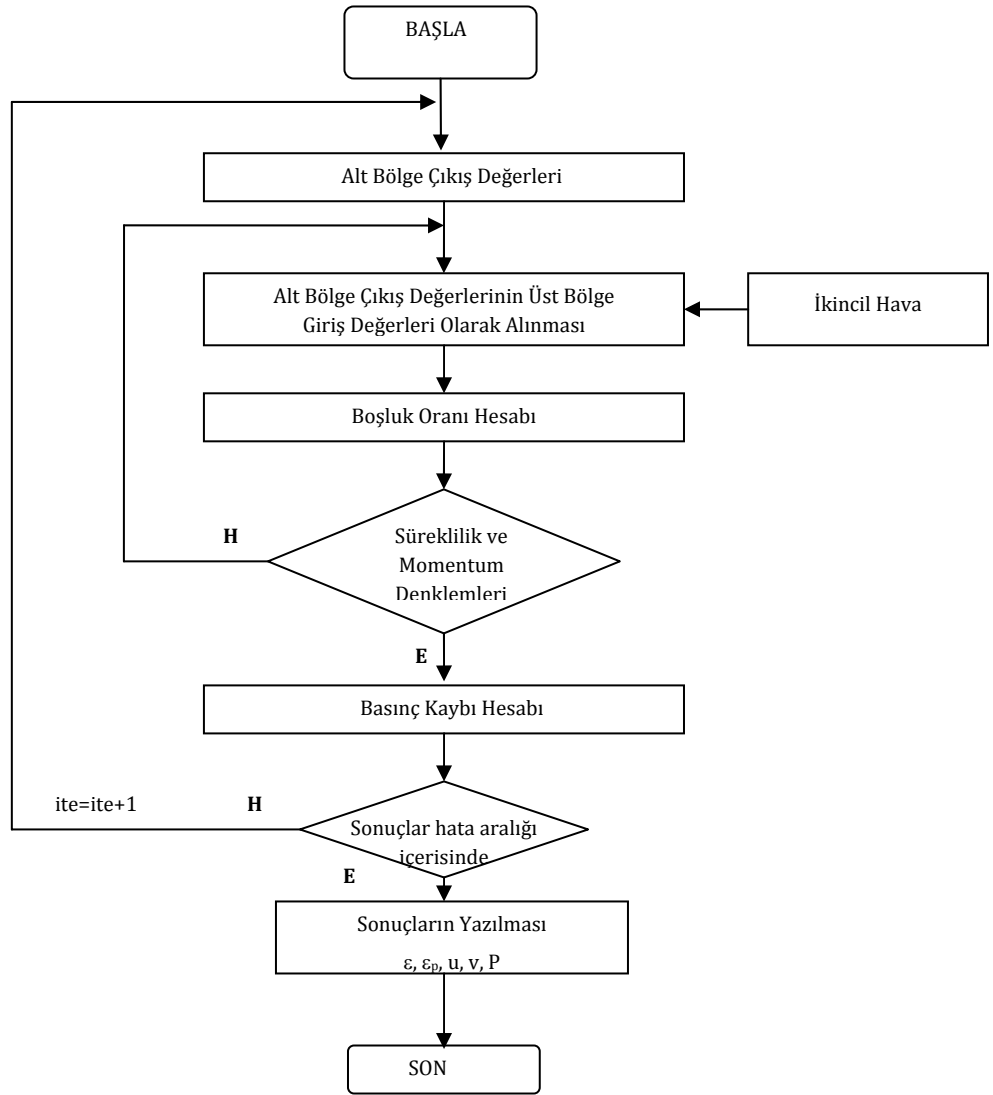
$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{\Delta z^2} [u(i, j) - 2u(i, j-1) + u(i, j-2)] \quad (2.29)$$

Denklemler ayrıklaştırıldıktan sonra sayısal çözüm için alt bölgede olduğu gibi iteratif Gauss-Seidel metodundan yararlanılmış ve F90 Fortran Programlama dili kullanılmıştır. Yatağın üst kısmı seyrek faz ve yoğun faz için ayrı ayrı  $m \times n$  üniform kontrol hacmine bölünmüştür (Şekil 2.9). Seyrek fazın, kolon boyunca merkezden yatak duvarlarına doğru genişleyen bir yapı gösterdiği dikkate alındığından, kontrol hacmi genişlikleri seyrek faz için çok daha geniş, yoğun faz için ise seyrek faza göre çok daha dar kalmaktadır. Üst bölge için yatak boyunca boşluk oranı Denklem (2.2)'ten bulunmakta, bulunan bu değerden her bir yatak yüksekliğindeki ortalama tane boşluk oranına geçilmekte ve Denklem (2.7) kullanılarak, boşluk oranının  $r$  doğrultusundaki değişimi elde edilmektedir. Yatak merkezindeki ilk kontrol hacimlerinde gaz ve katı hızı değerleri  $z$  doğrultusundaki momentum denklemi kullanılarak bulunmakta, merkezden yatak duvarına kadar olan diğer kontrol hacimlerinde ise  $r$  doğrultusundaki momentum denkleminde yararlanılmaktadır.

Zamana bağlı olarak geliştirilen modelin çözümü için yapılan kabuller, aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Modelde silindirik koordinatlar kullanılmıştır,
- Yatağın ekstenel simetrik olduğu kabul edilmiştir,
- Yatağın üst üniform kompartımana bölünmüştür,
- Katı ve gaz hareketleri, zamana,  $r$  ve  $z$  yönünde dikkate alınmakla beraber;
  - dikey doğrultuda; gaz hareketinin, seyrek faz ve yoğun fazın her ikisinde de yukarı doğru olduğu kabul edilmiş ve gazın geri dönüşü ihmal edilmiştir,
  - katı hareketi seyrek fazda yukarı, yoğun fazda ise aşağı doğru alınmıştır.

Hız değerlerinin elde edilmesi esnasında yapılan iterasyon işleminde succesful relaxation metodu ve  $\pm 0,000001$  hata aralığı kullanılmaktadır. Modelde giriş verisi olarak giriş gaz hızı ve katı kütle akısı değerleri kullanılmaktadır. Hidrodinamik model sayısal çözümü için kullanılan akış diyagramı Şekil 2.10'da verilmiştir.



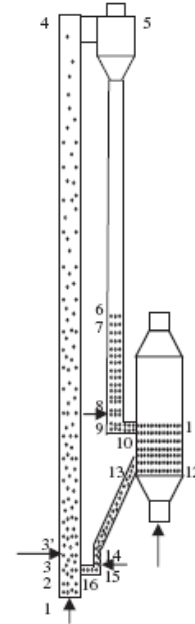
Şekil 2.10 Hidrodinamik model sayısal çözüm akış diyagramı

## BÖLÜM III

### ZAMANA BAĞLI HİDRODİNAMİK MODEL SONUÇLARI

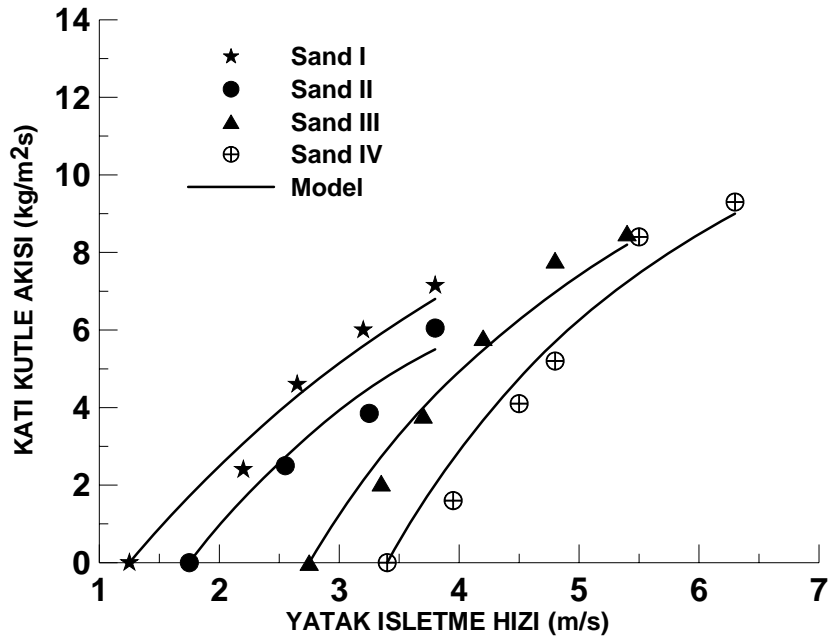
Bu çalışma kapsamında geliştirilen zamana bağlı modelin geçerliliğinin irdelenmesi için, geliştirilen hidrodinamik model sonuçlarının; farklı ölçekli yataklar kullanılarak yapılmış ve literatürde yayınlanmış deneysel verilerle karşılaştırılması yapılmıştır. Model gaz ve katılar için boşluk oranı, gaz ve katı tane hızları, basınç kaybı, katı kütle akısı ve tane çap dağılımı değerlerini zamana bağlı olarak yatak içerisinde aksel ve radyal yönde tahmin edebilmekle beraber, henüz literatürde bu verilerle ilgili detaylı çalışmalar mevcut değildir. Bu nedenle öncelikle, zamana bağlı olarak geliştirilen modelden elde edilen sonuçların ortalama değerlerinin, literatürden elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılması yapılarak, model tahminlerinin doğruluğu ispatlanmış, daha sonra yapılan karşılaştırmalardan gaz ve katı boşluk oranı değerleri ve katı tanecik hızı değerlerinin zamana bağlı değişimleri grafikler halinde verilmiştir.

#### 3.1 Zamana Bağlı Hidrodinamik Model Sonuçları ve Tartışma



Şekil 3.1 Karkamar ve Datta [52]'nin deneysel seti ve şematik görünüşü

İlk olarak, farklı özelliklerdeki yatak malzemeleri için model katı kütle akısı tahminlerinin yatak işletme hızına göre değişiminin Karkamar ve Datta [52]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Deneysel veriler, 0.050 m çapında ve 5.95 m yüksekliğindeki soğuk sirkülasyonlu akışkan yatakta yapılmış olup, deney setinin şematik resmi Şekil 3.1'de verilmiştir. Deneysel veriler çevre basıncı ve sıcaklığı için elde edilmiştir. Karşılaştırmaların yapıldığı deneysel verilere ait bilgiler Tablo 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.2 Farklı yatak işletme hızları için model katı kütle akısı tahminlerinin Karkamar ve Datta [52]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılması

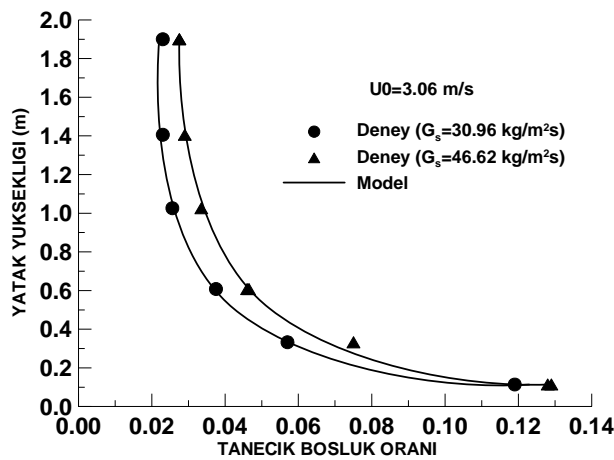
Şekil 3.2.'de Farklı yatak işletme hızları için model katı kütle akısı tahminlerinin Karkamar ve Datta [52]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılması verilmiştir. Şekilden de açıkça görülebileceği gibi katı kütle akısı, yatak işletme hızı ile artış göstermektedir. Bu durum, artan işletme hızı ile yukarı sürüklenme kuvvetlerinin artması ile açıklanabilir.

Böylece yatak kesiti boyunca daha fazla katı tanecik sürüklenmiş olacaktır. Model sonuçlarının farklı yatak işletme hızları ve farklı işletme şartlarında deneysel veriler ile göstermiş olduğu uyum, gerek modelin geçerliliğini göstermesi ve gerekse modelin esnekliğini göstermesi açısından oldukça önemlidir.

Tablo 3.1 Tanelerin hidrodinamik özellikleri

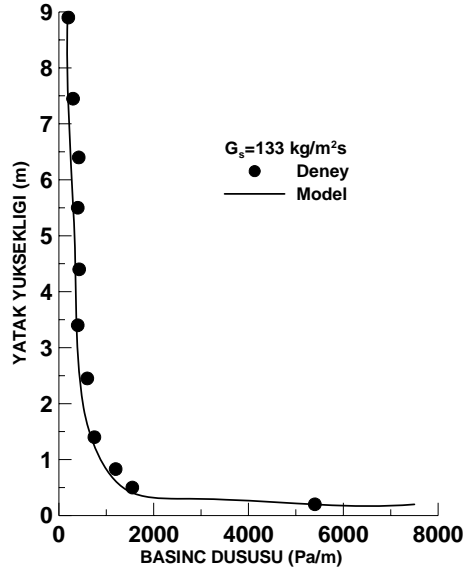
	Sand I	Sand II	Sand III	Sand IV
Boyut aralığı ( $\mu\text{m}$ )	50-300	75-425	106-500	150-600
Sauter ortalama çapı ( $\mu\text{m}$ )	147	211	334	416
Küresellik	0.86	0.86	0.86	0.86
Tane yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )	2650	2650	2650	2650
Yığın yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ )	1696	1696	1710	1722
$\epsilon_{\text{ma}}$	0.46	0.44	0.41	0.40
$U_0$ (27°C'de) (m/s)	0.018	0.037	0.091	0.138
Arşimed sayısı	281	835	3292	6347
Geldart sınıfı	B	B	B	B

Model tanecik boşluk oranı profili tahminlerinin, yatak yüksekliği boyunca Lee ve diğ. [53]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılması Şekil 3.3'de verilmiştir. Deneysel, 9mm çapında ve 1.9 m yüksekliğindeki soğuk sirkülasyonlu akışkan yatakta, yatak işletme hızının 2.2-3.9 m/s aralığında FCC tanecikleri için yapılmıştır. Bu tanecikler Geldart A sınıfı tanecikler olup, ortalama çapları; 82.4  $\mu\text{m}$ , yoğunlukları; 2436  $\text{kg/m}^3$  ve minimum akışkanlaşma hızları 0.005 m/s'dir. Şekil 3.3'den de açıkça görülebileceği gibi, model tahminleri deneysel verilerle uyum içerisindedir. Sirkülasyonlu akışkan yatakların hidrodinamik yapısı nedeniyle, beklendiği gibi tanecik boşluk oranı yatak yüksekliği boyunca azalan bir trend göstermekte olup, model tahminleri, bu profili farklı katı kütle akısı değerleri için oldukça hassas şekilde hesap edebilmektedir. Bu durum, farklı çalışma şartları için modelin esnekliğini göstermesi açısından önemlidir.



Şekil 3.3 Farklı katı kütle akıları için model tanecik boşluk oranı tahminlerinin Lee ve diğ. [53]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılması

Model sonuçları daha sonra literatürde mevcut olan ve 11 cm x 11 cm kare kesitli, 9 m boyundaki pilot ölçekli soğuk sirkülasyonlu akışkan yatakta; 70 µm ortalama çaplı FCC tanecikleri için (tane yoğunluğu 1400 kg/m<sup>3</sup>) yatak boyunca basınç düşüşünü veren deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. (Şekil 3.4). Deneysel veriler çevre basıncı ve sıcaklığı için elde edilmiştir.



Şekil 3.4 Model sonuçlarının Andreux ve diğ. [54]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılması

Modelde yataktaki basınç düşüşü hesabı yukarıda daha önce bahsedildiği gibi, yatak ağırlığı ve ivmelenmeden dolayı basınç kayıpları göz önüne alınarak yapılmaktadır. Bununla birlikte basınç düşüşü hesabında alt bölgede yatak girişindeki dağıtıcı elek basınç kaybı da modelde dikkate alınmaktadır. Yatak yüksekliği boyunca basınç düşüşü profili dikkate alındığında, hidrodinamik karakteri nedeniyle üst bölgeden çok daha yoğun olan alt bölgede basınç düşüşünün asıl nedeni yatak ağırlığıdır. Bu bölgede basınç kaybının yatağın diğer bölgelerine göre çok yüksek olmasının diğer bir nedeni de gaz ve katı hızları arasındaki farkın alt bölgede yüksek olmasıdır. Üst bölgede ise sirkülasyonlu akışkan yatağın hidrodinamik karakteri nedeniyle yatak yoğunluğunun düşük olması ve gaz ve katı hızları arasındaki farkın da azalması nedeniyle basınç düşüşünün alt bölgeye göre oldukça düşük seviyelerde kalmasına sebep olmaktadır. Şekil 3.4'de bu durum açıkça görülmektedir. Genel olarak bakıldığında model sonuçları ile deneysel verilerin çok iyi bir uyum gösterdiği görülmektedir. Burada yapılan

karşılaştırmalarda, zamana bağlı model sonuçlarının ortalama değerlerinin alındığını belirtmek yerinde olacaktır. Bu durum modelin zamana bağlı olarak da doğru sonuçlar verdiğini göstermesi açısından ayrıca önemlidir. Modelin aynı yatak için farklı işletme şartlarında deneysel verilerle göstermiş olduğu uyum, modelin esnekliğinin bir kanıtıdır.

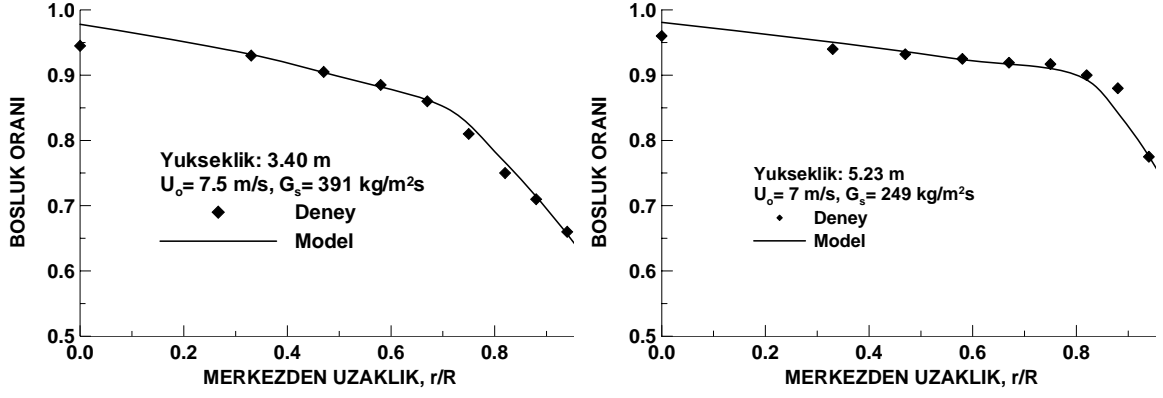
Model sonuçları ayrıca Issangya ve diğ. [55] tarafında yapılan, literatürde mevcut olan 6.1 m yüksekliğinde bir yatakta gazlar için boşluk oranını, yatağın 3.40 m ve 5.23 m yüksekliğinde veren deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaların yapıldığı deneysel verilere ait bilgiler Tablo 3.2'de verilmiştir. Model sonuçlarının, deneysel verilerle karşılaştırması Şekil 3.5'de verilmiştir. Gerek deney sonuçları, gerekse model tahminleri sirkülasyonlu akışkan yatakların hidrodinamik davranımının bir özelliği olan halkasal akış yapısını açık bir şekilde göstermektedir. Boşluk oranı artan yatak yüksekliği ile merkezden yatak duvarına doğru bir genişleme göstermektedir. Diğer bir ifade ile yatağın alt kısımlarında yoğun fazın yatak duvarından merkeze doğru daha geniş hacim kaplamasına rağmen, yatak yüksekliğinin artması ile yoğun faz kalınlığının da ciddi bir düşüş gösterdiği şekilden açıkça görülmektedir. Boşluk oranının radyal yöndeki değişiminin, yatağın orta ve üst kısmında model sonuçları ile neredeyse birebir uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 3.2 Karşılaştırmaların yapıldığı deneysel verilere ait bilgiler

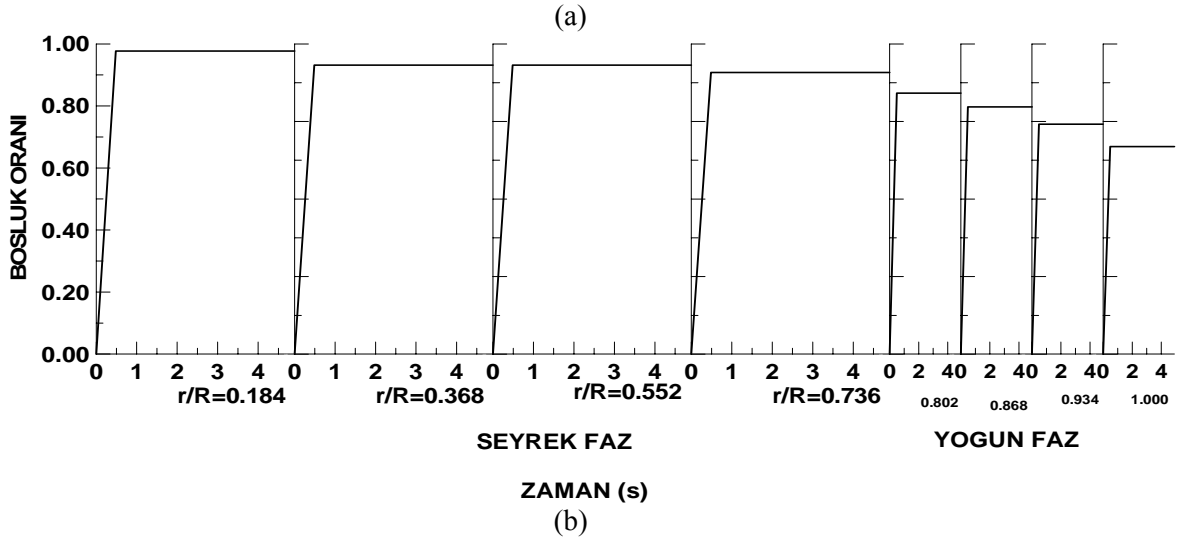
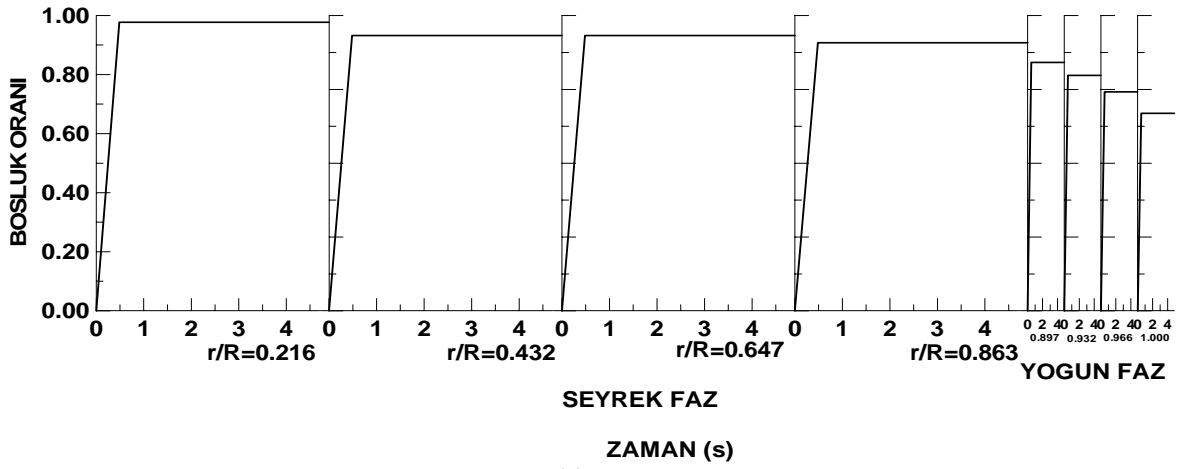
	Yatak Sıcaklığı T(°C)	Yatak Çapı D(m)	Yatak Yüksekliği H(m)	İşletme Hızı U <sub>0</sub> (m/s)	Tane Çapı d <sub>p</sub> (µm)	Yoğunluk ρ(kg/m <sup>3</sup> )	Kütle Akısı G <sub>s</sub> (kg/m <sup>2</sup> s)
Issangya ve diğ. [55]	25	0.0762	6.1	7-7.5	70	1600	249-391
Zhang ve diğ. [27]	25	0.1	15.1	5.5	67	1500	108

Modelin aynı deneysel işletme şartları için, gaz boşluk oranı değerlerinin zamana bağlı tahminleri Şekil 3.6'da verilmiştir. Model sonuçları elde edilirken yatak, yoğun faz ve seyrek fazda dörder kontrol hacmine bölünmüş ve her bir kontrol hacmi içerisinde boşluk oranının zamana göre değişimi şekilde verilmiştir. Yoğun faz kalınlığının yatak yüksekliği ile değişimi şekilde açıkça görülmektedir. Boşluk oranının zamana göre profiline bakıldığında, yatak işletme hızına ve yatak yüksekliğine bağlı olarak belli bir değere ulaştıktan sonra, daha sonra sabit değerlerde seyrettiği gözlemlenmektedir.



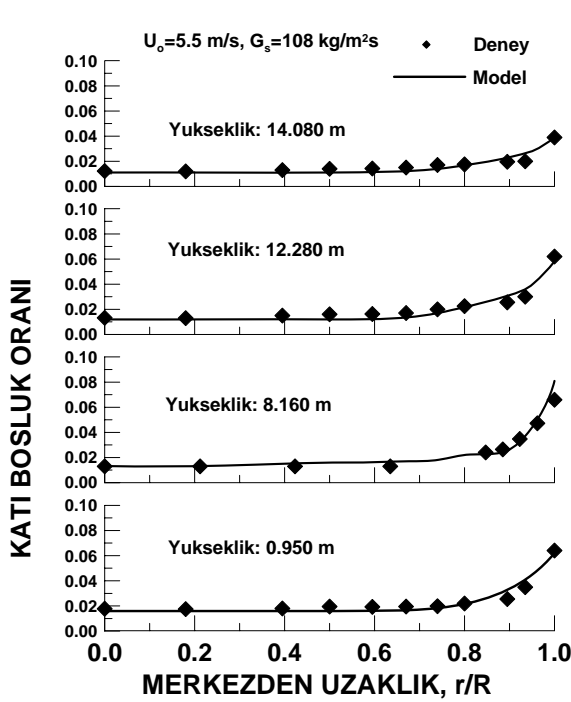


Şekil 3.5 Model sonuçlarının Issangya ve diğ. [55]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılması

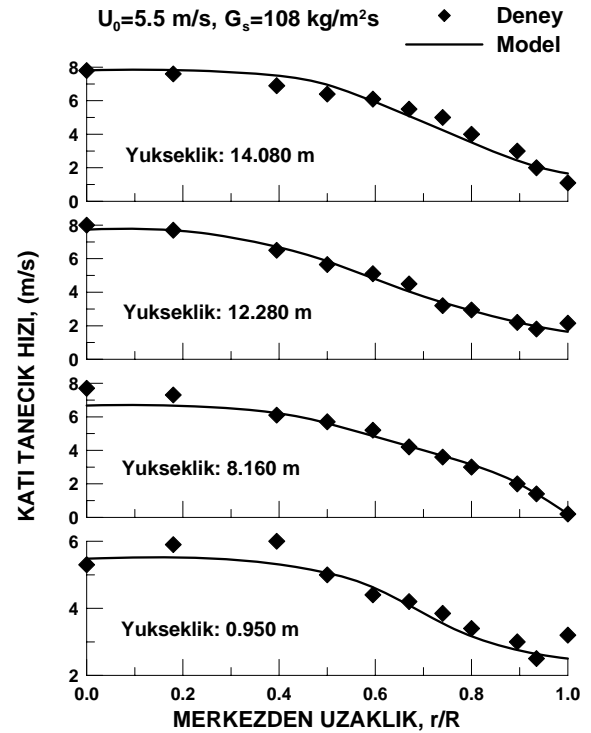


Şekil 3.6. Model boşluk oranı tahminlerinin zamana bağlı değişimleri: a) 5.23 m'de, b) 3.40 m 'de

Model sonuçları son olarak 15.1 m yüksekliğindeki soğuk sirkülasyonlu akışkan yatakta, FCC tanecikleri ile yapılmış olan Zhang ve diğ. [27]'nin deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Deneyler yatak işletme hızının 5.5 m/s ve katı kütle akısının 108 kg/m<sup>2</sup>s değerinde yapılmış olup, deneysel veriler çevre basıncı ve sıcaklığı için elde edilmiştir. Farklı yatak yüksekliklerinde katı tanecik hızlarının ve katı boşluk oranlarının radyal doğrultudaki değişimleri için model tahminlerinin Zhang ve diğ. [27]'in deneysel verileri ile karşılaştırılması Şekil 3.7 ve 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.7 Model katı boşluk oranı profili tahminlerinin Zhang ve diğ. [27]'in deneysel verileri ile karşılaştırılması



Şekil 3.8 Model katı tanecik hız profili tahminlerinin Zhang ve diğ. [27]'in deneysel verileri ile karşılaştırılması

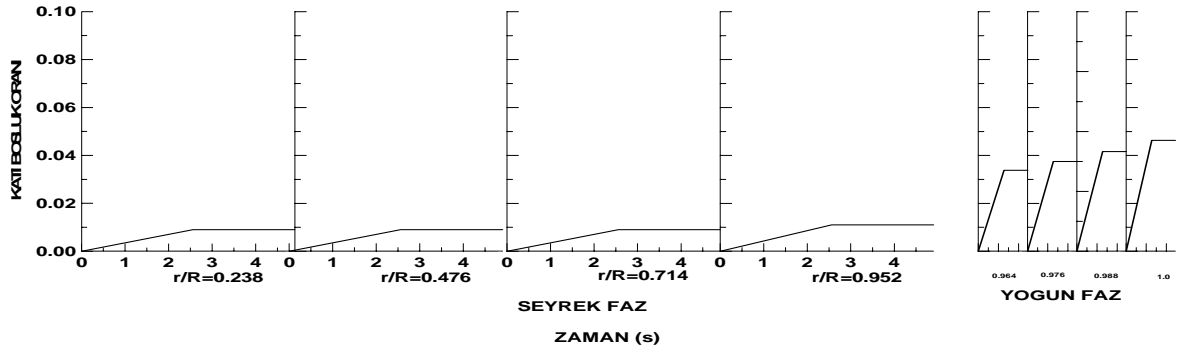
Şekil 3.7'de yataktaki lokal tanecik boşluk oranının Zhang ve diğ. [27]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılması verilmiştir. Model tahminleri ve deneysel sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu karşılaştırmada, yatağın en üst kısmındaki tane boşluk oranının radyal yöndeki değişimi göz önüne alındığında; seyrek fazın genişliğinin oldukça arttığı ve radyal dağılımdaki düzensizliklerin azaldığı net bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu durum, seyrek fazın kolon boyunca merkezden yatak duvarlarına doğru genişleyen bir yapı göstermesinden kaynaklanmaktadır. Model tanecik boşluk oranı profillerinin farklı

yatak yükseklikleri için elde edilen Zhang ve diğ. [27]'nin deneysel verileri ile göstermiş olduğu uyum, geliştirilen modelin eksenel yönde de geçerli olduğunun iyi bir göstergesidir.

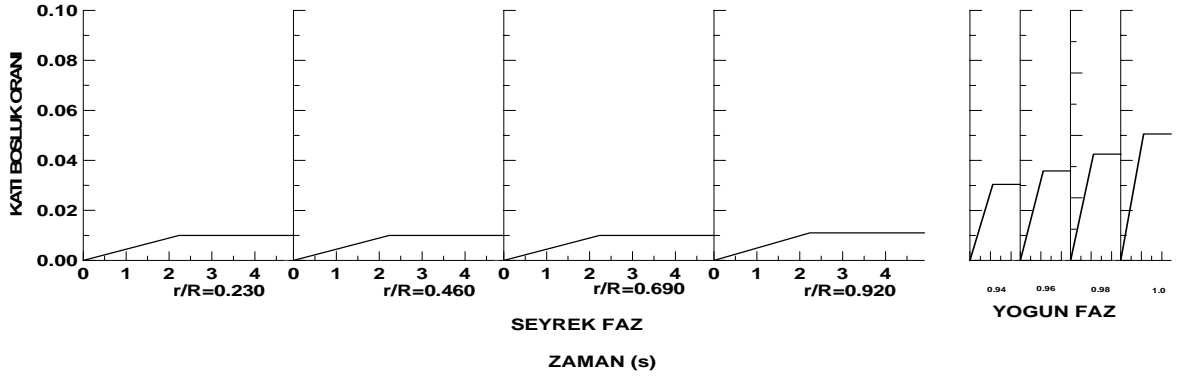
Şekil 3.8'den de görülebileceği gibi, katı tanecik hız profili yatak merkezinden, yatak duvarına doğru azalan bir profil göstermekle beraber, sirkülasyonlu yatakların hidrodinamik davranımı nedeniyle hız profili yatak merkezinde en yüksek değerini almakta ve halkasal akış yapısına uygun olarak yatak duvarında ise minimum değere gelmektedir.

Model, radyal yönde katı tanecik hız profillerini büyük bir doğrulukla tahmin edebildiği gibi, yatak içerisinde farklı yüksekliklerde de hız profilini hassas bir şekilde tahmin edebilmektedir. Zamana bağlı modelin, ortalama değerleri alınarak elde edilen tahminlerinin deneysel verilerle hem radyal yönde, hem de eksenel yönde göstermiş olduğu uyum, geliştirilen modelin doğruluğunu kanıtlaması açısından önemlidir.

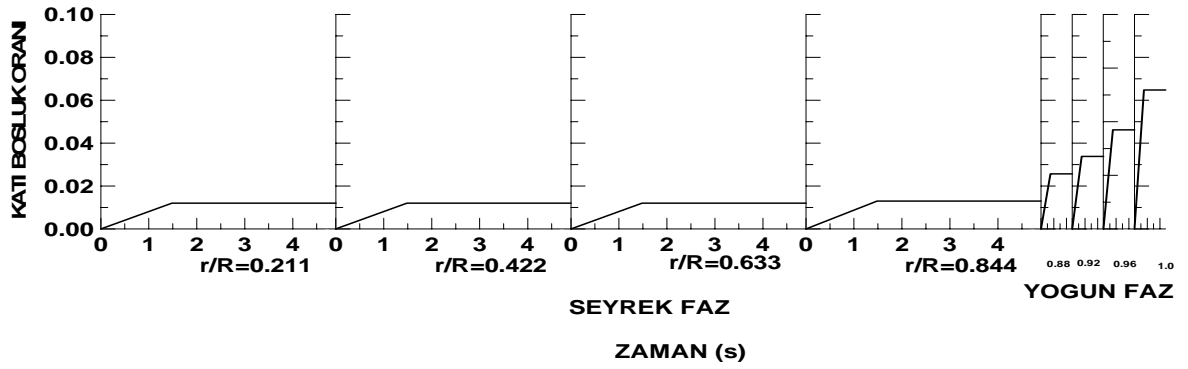
Şekil 3.9'da model katı boşluk oranı tahminlerinin Zhang ve diğ. [27]'nin deneysel sonuçlarını verdiği şartlardaki (Şekil 3.7) değişimi verilmiştir. Şekil 3.9 a ve b'de yoğun fazdaki değişim daha iyi gözlemlenebilmesi için seyrek fazdan ayrılarak ve büyütülerek çizilmiştir. Şekil 3.9 c ve d'ye bakıldığında yoğun fazın yatağın 8.160 m'sinde oldukça daraldığı, yatağın 12.28 m ve 14.08 m'lerinde ise oldukça küçüldüğünden şekillerde böyle bir gösterim seçilmiştir. Katı boşluk oranı değerlerinin merkezden yatak duvarına doğru her bir kontrol hacmi içerisindeki zamana bağlı değişim şekilde açıkça görülmektedir. Bu değişimi gözlemek için yatak seyrek faz ve yoğun fazda dörder eş kontrol hacmine ayrılmıştır. Boşluk oranının zamana bağlı değişim profilinin yatak yüksekliği boyunca belirgin bir fark göstermemekle beraber, kontrol hacmi içerisinde belli bir zamandan sonra sabit değerlerde seyrettiği gözlemlenmiştir.



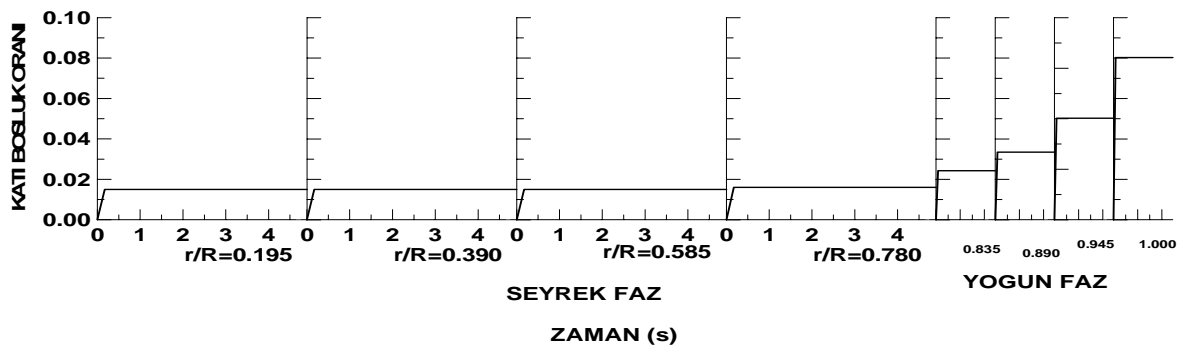
Şekil 3.9 (a)



Şekil 3.9 (b)

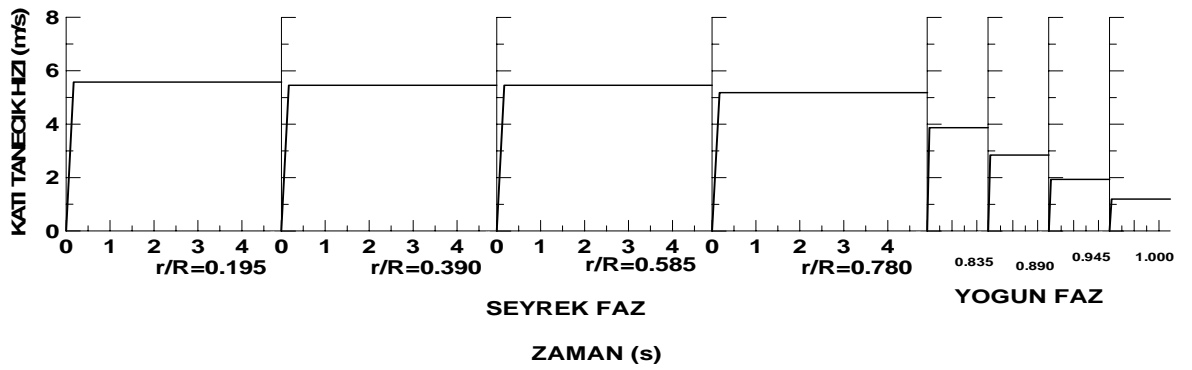
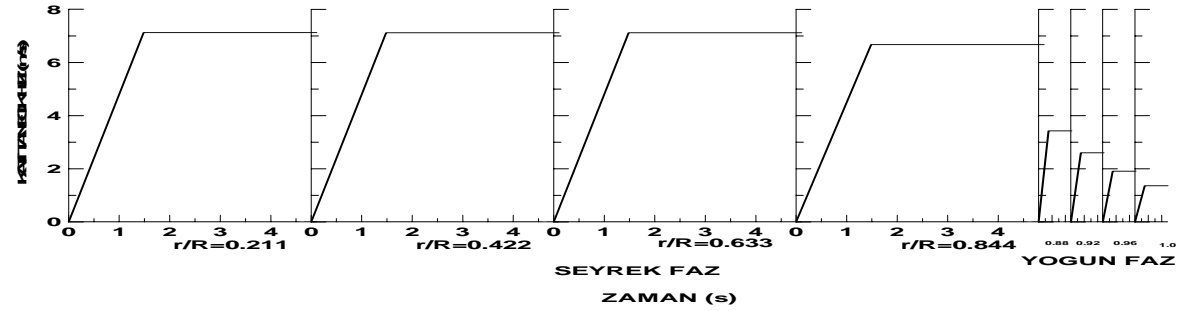
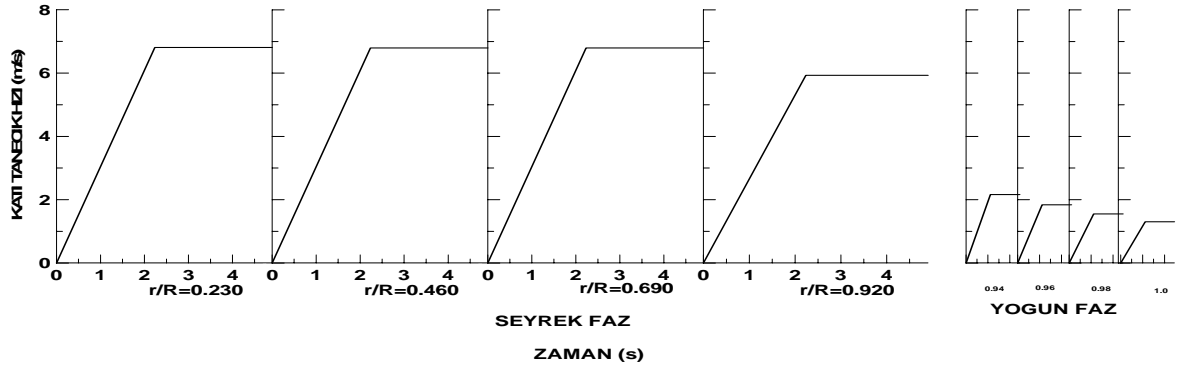
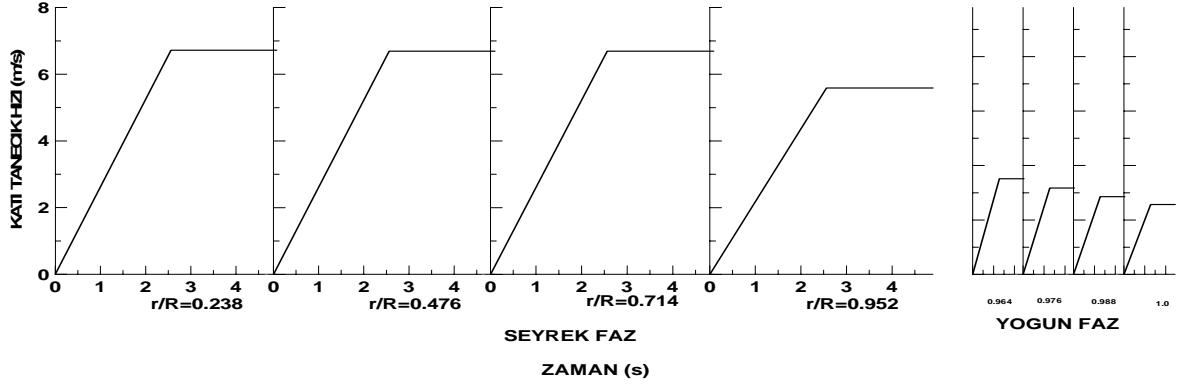


Şekil 3.9 (c)



Şekil 3.9 (d)

Şekil 3.9 Model katı boşluk oranı tahminlerinin Zhang ve diğ. [27]'nin deneysel şartlarında zamana bağlı değişimleri: a) 14.08 m 'de, b) 12.28 m'de, c) 8.160 m 'de, d) 0.950 m'de



Şekil 3.10 Model katı tanecik hızı tahminlerinin Zhang ve diğ. [27]'nin deneysel şartlarında zamana bağlı değişimleri: a) 14.08 m 'de, b) 12.28 m'de, c) 8.160 m 'de, d) 0.950 m'de

Şekil 3.10'da model katı tanecik hızı tahminlerinin Zhang ve diğ. [27]'nin deneysel sonuçlarını verdiği şartlardaki (Şekil 3.8) değişimi verilmiştir. Katı tanecik hızı değerlerinin merkezden yatak duvarına doğru her bir kontrol hacmi içerisindeki zamana bağlı değişim şekilde açıkça görülmektedir. Bu değişimi gözlemlemek için yatak seyrek faz ve yoğun fazda dörder eş kontrol hacmine ayrılmıştır. Katı tanecik hızının kontrol hacmi içerisinde belli bir zamandan sonra sabit değerlerde seyrettiği gözlemlenmiştir. Katı tanecik hızının deneylerdeki ortalama değerlere ulaşması için gereken zaman yatak yüksekliği arttıkça artmaktadır. Bu beklenen bir sonuç olup, yatak yüksekliğinin zamana bağlı parametreler için büyük bir öneme sahip olduğunu göstermesi açısından da önemlidir. Gerek katı tanecik hızının, gerekse katı boşlu oranı değerlerinin zamanla büyük değişiklikler göstermemesi yatağın henüz soğuk olarak çalıştırılmasından kaynaklanmaktadır. Modele yanma reaksiyonlarının eklenmesi ile zamana bağlı değişimlerin profillerinin daha farklı olabileceği beklenmektedir.

Genel olarak bakıldığında, model sonuçları deneysel verilerle iyi bir uyum göstermekte ve sirkülasyonlu akışkan yatağın hidrodinamik davranımını, farklı çalışma şartları ve yatak boyutları için hassas bir şekilde tahmin edebilmektedir. Bununla beraber, bu çalışma ile literatürde özellikle biyokütle ile yapılan deneylerin yetersizliği bir kez daha ortaya çıkmakla beraber, mevcut hali ile model yanma reaksiyonlarının eklenebileceği hale gelmiştir.

## BÖLÜM IV

### SONUÇLAR

Sirkülasyonlu akışkan yatağın üst kısmı için zamana bağlı dinamik iki boyutlu bir model geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan zamana bağlı hidrodinamik model sorunsuz olarak çalışmış fakat literatürde zamana bağlı hidrodinamik verilerin bulunduğu detaylı bir deneysel çalışma olmadığından, deneysel verilerle doğruluğu kapsamlı olarak sağlanamamıştır. Bununla beraber, zamana bağlı modelden elde edilen sonuçların ortalama değerlerinin, literatürden elde edilen deneysel verilerle uyumu modelin geçerliliğini ispat etmiştir. Bu kapsamda, geliştirilen hidrodinamik model sonuçları; ilk olarak, farklı özelliklerdeki yatak malzemeleri için model katı kütle akısı tahminlerinin yatak işletme hızına göre değişiminin Karkamar ve Datta [52]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır. Model tanecik boşluk oranı profili tahminleri, yatak yüksekliği boyunca Lee ve diğ. [53]'nin deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, 9mm çapında ve 1.9 m yüksekliğindeki soğuk sirkülasyonlu akışkan yatakta, yatak işletme hızının 2.2-3.9 m/s aralığında olduğu FCC tanecikleri için yapılmıştır. Model sonuçları ayrıca literatürde mevcut olan ve 11 cm x 11 cm kare kesitli, 9 m boyundaki pilot ölçekli soğuk sirkülasyonlu akışkan yatakta; 70 µm ortalama çaplı FCC tanecikleri için (tane yoğunluğu 1400 kg/m<sup>3</sup>) yatak boyunca basınç düşüşünü veren ve Andreux ve diğ. [54] tarafından elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Model sonuçları daha sonra Issangya ve diğ. [55] tarafında yapılan, literatürde mevcut olan 6.1 m yüksekliğinde bir yatakta gazlar için boşluk oranını, yatağın 3.40 m ve 5.23 m yüksekliğinde veren deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Model sonuçları son olarak farklı yatak yüksekliklerinde katı tanecik hızlarının ve katı boşluk oranlarının radyal doğrultudaki değişimleri için, 15.1 m yüksekliğindeki soğuk sirkülasyonlu akışkan yatakta, FCC tanecikleri ile yapılmış olan Zhang ve diğ. [27]'nin deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Farklı büyüklüklerde ve farklı işletme şartlarında gerçekleştirilen deneyler ile yapılan karşılaştırmalar, zamana bağlı hidrodinamik modelin, geçerliliğini ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, model tahminlerinin aynı yataklar için farklı işletme şartları ve farklı yatak yüksekliklerinde deneysel verilerle göstermiş olduğu uyum ise modelin esnekliğini çok net bir şekilde ortaya koymuştur. Ayrıca, modelin zamana bağlı gaz ve katı boşluk oranı ve katı tanecik hızının zamana bağlı değişimleri grafikler halinde verilmiştir.

Yapılan bu çalışma sonucunda zamana bağlı model sonuçlarının olayın kinetiği hakkında detaylı bilgi verdiği fakat yatak dizaynı ve işletme şartlarının tespitinde zamana bağlı olmayan modelin kullanılabilceği ortaya çıkmaktadır. Zamana bağlı detaylı kinetik modeller, yatak hidrodinamiğinde kullanılabilcek ampirik bağıntuların geliştirilmesinde kullanılabilirler. Bununla beraber, bu modellerin gerek geliştirilmeleri, gerekse uygun bilgisayar koşullarında çalıştırılmaları oldukça zordur. Ayrıca bu modellerin, geçerliliklerini kanıtlamak amacıyla yapılacak deneylerin oldukça detaylı ve hassas olmaları gerekmektedir. Mevcut literatürde, henüz bu amaçla kullanılabilcek kalitede bir deneye rastlanamamaktadır.



## KAYNAKLAR

- [1] Hartge, E.U., Ratschow, L., Wischniewski, R. and Werther, J., CFD-simulation of a circulating fluidized bed riser, *Particuology*, 7 (4), 283-296, 2009.
- [2] Haris, B.J. and Davidson, J.F., Modelling Options for Circulating Fluidized Beds: A Core/Annulus Depositions Model, *Proceedings of the Circulating Fluidized Bed Technology IV*, New York, NY, 1994, 32-39, 1994.
- [3] Smolders, K. and Baeyens, J., Hydrodynamic Modelling of the Axial Density Profile in the Riser of a Low-Density Circulating Fluidized Bed, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 79, 422-429, 2001.
- [4] Hyre, M.R. and Glicksman, L.R., Axial and Lateral Solids Distribution Modeling in the Upper Region of Circulating Fluidized Beds, *Powder Technology*, 110, 28-109, 2000.
- [5] Mathiesen, V., Solberg, T. and Hjertager, B.H., Predictions of Gas/Particle Flow with an Eulerian Model Including a Realistic Particle Size Distribution, *Powder Technology*, 112, 34-45, 2000.
- [6] Ibsen, C.H., Solberg, T. and Hjertager, B.H., Evaluation of a Three-Dimensional Numerical Model of a Scaled Circulating Fluidized Bed, *Industrial and Engineering Chemical Research*, 40, 5081-5086, 2001.
- [7] Van Wachem, B.G., Schouten, J.C., Van den Bleek, C.M., Krishna, R. and Sinclair, J.L., Comparative Analysis of CFD Models of Dense Gas-Solid Systems, *A.I.Ch.E. Journal*, 47, 1035-1051, 2001.
- [8] Yuu, S., Umekage, T. and Johno, Y., Numerical Simulation of Air and Particle Motions in Bubbling Fluidized Bed of Small particles, *Powder Technology*, 110, 158-168, 2000.
- [9] Rhodes, M.J., Wang, X.S., Nguyen, M., Stewart, P. and Liffman, K., Use of Discrete Element Method Simulation in Studying Fluidization Characteristics: Influence of Interparticle Force, *Chemical Engineering Science*, 56, 69-76, 2001.
- [10] Helland, E., Occelli, R. and Tadrist, L., Numerical Study of Cluster Formation in a Gas-Particle Circulating Fluidized Bed, *Powder Technology*, 110, 210-221, 2000.
- [11] Benyahia, S., Arastoopour, H., Knowlton, T.M. and Massah, H., Simulation of Particles and Gas Flow Behavior in the Riser Section of a Circulating Fluidized Bed

Using the Kinetic Theory Approach for the Particulate Phase, *Powder Technology*, 112, 24-33, 2000.

[12] Neri, A. and Gidaspow, D., Riser Hydrodynamics: Simulation Using Kinetic Theory, *A.I.Ch.E. Journal*, 46, 52-67, 2000.

[13] Huilin, L. and Gidaspow, D., Hydrodynamics of Binary Fluidization in a Riser: CFD Simulation Using Two Granular Temperatures, *Chemical Engineering Science*, 58, 3777-3792, 2003.

[14] Liu, X. and Glasser, B.J., A Parametric Investigation of Gas-Particle Flow in a Vertical Duct, *AIChE Journal*, 52 (3), 940-956, 2006.

[15] Grieco, E. and Marmo, L., Predicting the Pressure Drop across the Solids Flow Rate Control Device of a Circulating Fluidized Bed, *Powder Technology*, 161 (2), 89-97, 2006.

[16] Gomez, L.C. and Milioli, F.E., Numerical Study on the Influence of Various Physical Parameters Over the Gas-Solid Two-Phase Flow in the 2D Riser of a Circulating Fluidized Bed, *Powder Technology*, 132, 216-225, 2003.

[17] Kozanoglu, B.U., Welti Chanes, J., García Cuautle, D. and Santos Jean, J.P., Hydrodynamics of large particle fluidization in reduced pressure operations: an experimental study, *Powder Technology*, 125, 55-60, 2002.

[18] Lu, H.L., Sun, Q.Q. and He, Y.R., Numerical Study of Particle Cluster Flow in Risers with Cluster-Based Approach, *Chemical Engineering Science*, 60(23), 6757-6767, 2005.

[19] Wang, Q., Luo, Z., Ni, M. and Cen, K., Particle Population Balance Model for a Circulating Fluidized Bed Boiler, *Chemical Engineering Journal*, 93, 121-133, 2003.

[20] Monazam, E.R., Shadle, L.J. and Mei, J.S., Identification and Characteristics of Different Flow Regimes in a Circulating Fluidized Bed, *Powder Technology*, 155 (1), 17-25, 2005.

[21] Vijay, G.N. and Reddy, B.N., Effect of Dilute and Dense Phase Operating Conditions on Bed-to-Wall Heat Transfer Mechanism in a Circulating Fluidized Bed Combustor, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (16), 3276-3283, 2005.

[22] Koksai, M. and Hamdullahpur, F., CFD Simulation of the Gas-Solid Flow in the Riser of a Circulating Fluidized Bed with Secondary Air Injection, *Chemical Engineering Communications*, 192 (9), 1151-1179, 2005.

[23] Malcus, S. and Pugsley, T., Lateral Flux and Velocity of FCC Particles in a CFB Riser, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 79, 548-556, 2001.

- [24] Pärssinen, J.H. and Zhu, J., Axial and Radial Solids Distribution in a Long and High-Flux CFB Riser, A.I.Ch.E. Journal, 47 (10), 2197-2205, 2001.
- [25] Pärssinen, J.H. and Zhu, J., Particle Velocity and Flow Development in a Long and High-Flux Circulating Fluidized Bed Risers, Chemical Engineering Science, 56, 5295-5303, 2001.
- [26] Wei, F., Wan, X., Hu, Y., Wang, Z., Yang, Y. and Jin, Y., A Pilot Plant Study and 2-D Dispersion-Reactor Model for a High-Density Riser Reactor, Chemical Engineering Science, 56, 613-620, 2001.
- [27] Zhang, H., Huang, W.X. and Zhu, J., Gas-Solids Flow Behavior: CFB Riser vs. Downer, A.I.Ch.E. Journal, 47 (9), 2000-2011, 2001.
- [28] Zheng, Y., Wan, X., Qian, Z., Wei, F. and Jin, Y., Numerical Simulation of the Gas-Particle Turbulent Flow in Riser Reactor Based on  $k-\varepsilon-k_p-\varepsilon_p-\Theta$  Two Fluid Model, Chemical Engineering Science, 56, 6813-6822, 2001.
- [29] Cui, H. and Grace J.R., Fluidization of biomass particles: A review of experimental multiphase flow aspects, Chemical Engineering Science 62, 45-55, 2007.
- [30] Huang Y., Turton R., Park J., Famouri P. and Boyle E.J., Dynamic model of the riser in circulating fluidized bed, Powder Technol, 163 (1/2), 23-31, 2006.
- [31] Breault, R.W., A review of gas-solid dispersion and mass transfer coefficient correlations in circulating fluidized beds, Powder Technology 163, 9-17, 2006.
- [32] Gungor, A. and Eskin N., Hydrodynamic modelling of a circulating fluidized bed, Powder Technology 172, 1-13, 2007.
- [33] Gungor, A., Two-dimensional biomass combustion modeling of CFB, Fuel, 87, 1453-1468, 2008.
- [34] Gungor, A. and Eskin, N., Two-Dimensional Coal Combustion Modeling of CFB, International Journal of Thermal Sciences, 47, 157-174, 2008.
- [35] Zhou, W., Zhao, C.S., Duan, L.B., Chen, X.P. and Liang, C., Two-dimensional computational fluid dynamics simulation of nitrogen and sulfur oxides emissions in a circulating fluidized bed combustor, Chemical Engineering Journal, 173, 564-573, 2011.
- [36] Li, X., Luo, Z., Ni, M. and Cen, K., Modeling Sulfur Retention in Circulating Fluidized Bed Combustors, Chemical Engineering Science, 50(14), 2235-2242, 1993.

- [37] Brereton, C., Combustion Performance in Circulating Fluidized Beds, pp. 388, Eds. Avidan, A., Grace, J.R. and Knowlton, T., London, Blackie Academic & Professional, 1997.
- [38] Gayán, P., de Diego, L.F. and Adanez, J., Radial Gas Mixing in a Fast Fluidized Bed, Powder Technology, 94, 163-171, 1997.
- [39] Gungor, A., Sirkülasyonlu akışkan yataklı yakıcıların iki boyutlu modellenmesi: 1 ve 2 boyutlu modeller, Mühendis ve Makina, 586(49), 1-8, 2008.
- [40] Patience, G.S. and Chaouki, J., Gas Phase Hydrodynamics in the Riser of a Circulating Fluidized-Bed, Chemical Engineering Science, 48, 3195-3205, 1993.
- [41] Werther, J. and Wein, J., Expansion Behavior of Gas Fluidized Beds in the Turbulent Regime, A.I.Ch.E. Symposium Series; 90/301, 31-44, 1994.
- [42] WEI, F., Fangbin, L., Yong, J. and Zhiqing, Y., Mass Flux Profiles in a High Density Circulating Fluidized-Bed, Powder Technology, 91, 189-195, 1997.
- [43] Zhang, W., Tung, Y. and Johnsson, F., Radial Voidage Profiles in Fast Fluidized Beds of Different Diameters, Chemical Engineering Science, 46, 3045-3052, 1991.
- [44] Rhodes, M.J., Wang, X.S., Cheng, H. and Hirama, T., Similar Profiles of Solids Flux in Circulating Fluidized Bed Risers, Chemical Engineering Science, 47 (7), 1635-1643, 1992.
- [45] Patience, G.S. and Chaouki, J., Solids Hydrodynamics in the Fully Developed Region of CFB Risers, Proceedings of the Fluidization VIII, 1995, 33-40, 1995.
- [46] Godfroy, L., Patience, G.S. and Chaouki, J., Radial Hydrodynamics in Risers, International Engineering Chemistry Research, 36, 4504-4515, 1999.
- [47] Kimm, N.K., Berruti, F. and Pugsley, T.S., Modeling the Hydrodynamics of Downflow Gas-Solids Reactors, Chemical Engineering Science, 51(11), 2661-2666, 1996.
- [48] Pugsley, T. and Berruti, F., A Predictive Hydrodynamic Model for Circulating Fluidized Bed Risers, Powder Technology, 89, 57-69, 1996.
- [49] Wei, F., Hongfei, L., Yi, C., Zhanwen, W. and Yong, J., Profiles of Particle Velocity and Solids Fraction in a High Density Riser, Powder Technology, 100 (2-3), 183-189, 1998.
- [50] Tsuo, Y.P. and Gidaspow, D., Computation of Flow Patterns in Circulating Fluidized Beds, A.I.Ch.E. Journal, 36 (6), 885-896, 1990.

- [51] Issangya, A.S., Bai, D., Bi, H.T., Lim, K.S., Zhu, J. and Grace, J.R., Suspension Densities in a Circulating Fluidized Bed Riser, *Chemical Engineering Science*, 54, 5451-5460, 1999.
- [52] Karmakar, M.K. and Datta, A.B., Hydrodynamics of a dual fluidized bed gasifier, *Advanced Powder Technology*, 21, 521-528, 2010.
- [53] Lee, H.S., Lee, Y., Park, S.S., Chae, H.J., Jeong, S.Y. and Lee, D.H., Hydrodynamic characteristics of cold-bed circulating fluidized beds for the methanol to olefins process, *Korean J. Chem. Eng.*, 27(4), 1328-1332, 2010.
- [54] Andreux, R., Petit, G., Hemati, M. and Simonin, O., Hydrodynamic And Solid Residence Time Distribution In A Circulating Fluidized Bed: Experimental And 3D Computational Study, *Chemical Engineering and Processing*, 47, 463-473, 2008.
- [55] Issangya, A.S., Grace, J.R., Bai, D. and Zhu, J., Radial voidage variation in CFB risers, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 79, 279-286, 2001.