



## SİRKÜLASYONLU AKIŞKAN YATAKTA GAZ-KATI AKIŞ HİDRODİNAMİĞİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Özgür BAYSAL, M. Fevzi KÖSEOĞLU, Hüseyin TOPAL ve Şenol BAŞKAYA

Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 06570 Maltepe/ANKARA

(Geliş Tarihi: 01. 10. 2007)

**Özet:** Akışkan yataklarda, yanma ve emisyon davranışları en başta yatak hidrodinamiği tarafından belirlenmektedir. Akışkan yatakların hidrodinamiği, gaz-katı iki fazlı akış modelini ve etkileşimlerini açıklayan bir mekanizmadır. Bu çalışmada, soğuk model bir akışkan yatak içerisindeki, gaz-katı iki fazlı akışın hidrodinamiği PHOENICS sayısal akışkanlar dinamiği (SAD) paket programı kullanılarak incelenmiştir. Modelde partikül yoğunluğunun, boş kolon gaz hızının ve partikül çapının akış hidrodinamiğine etkileri incelenmiştir. Simülasyonlarda gaz olarak hava, yatak malzemesi olarak küresel cam boncuk kullanılmıştır. Partikül yoğunluk değişimi, boş kolon gaz hızı değişimi ve partikül çapı değişimi ile akışkan yatak içerisindeki katı dolaşım oranının oldukça fazla etkilendiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Akışkan yatak, Gaz-katı iki fazlı akış, Hidrodinamik, Sayısal akışkanlar dinamiği.

## NUMERICAL INVESTIGATION OF GAS-SOLID FLOW HYDRODYNAMICS IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED

**Abstract:** Combustion and emission characteristic of fluidized beds are mainly determined by bed hydrodynamics. Fluidized bed hydrodynamics is a mechanism that explains gas-solid two phase flow and their interactions in fluidized beds. In this study, gas-solid two phase flow hydrodynamics in a cold model fluidized bed was numerically investigated by using PHOENICS computational fluids dynamics (CFD) code. In the model, the effects of particle density, superficial velocity and particle diameter on flow hydrodynamics were investigated. In the simulations, air was used as a gas phase, and spherical glass bead was taken as solid phase. It has been determined that solid circulation rate was influenced by the changes in particle density, superficial gas velocity and particle diameter.

**Keywords:** Fluidized bed, Gas-solid two-phase flow, Hydrodynamics, Computational fluid dynamics.

### SEMBOLLER

$C_D$	Sürüklenme katsayısı [-]
$C_\mu$	Deneysel Sabit [-]
$D$	Yatak çapı, [m]
$d_p$	Ortalama partikül çapı [m]
$g$	Yerçekimi ivmesi [ $m/s^2$ ]
$G_{av}$	Katı dolaşım oranı [kg/h]
$k_p$	Katı fazının türbülans kinetik enerjisi [ $m^2/s^2$ ]
$Re_p$	Partikül Reynolds sayısı ( $=\alpha_g \rho_g d_p (u_p - u_g) / \mu_{gl}$ )
$U_o$	Boş kolon gaz hızı [m/s]
$U_t$	Katı partiküllerin terminal hızı [m/s]
$u_g$	Gaz hızı [m/s]
$u_p$	Partikül hızı [m/s]
$V_g$	Birim hacimdeki gaz hacmi [ $m^3$ ]
$V_p$	Birim hacimdeki partiküllerin hacmi [ $m^3$ ]
$V$	Toplam birim hacim [ $m^3$ ]
$w_p$	Eksenel partikül hızı [m/s]
$x, y, z$	Kartezyen koordinatlardaki eksen takımı
$\alpha_g$	Gaz fazı hacimsel oranı [-]
$\alpha_p$	Katı fazı hacimsel oranı [-]
$\beta_i$	Gaz-katı momentum değişim katsayısı [ $kg/m^3s$ ]
$P$	Basınç [Pa]
$\delta x, \delta y, \delta z$	Hücre genişlikleri [m]
$\epsilon$	Türbülans kinetik enerjisinin emilimi [ $m^2/s^3$ ]
$\Theta$	Granular temperature [ $m^2/s^2$ ]

$\mu_{gl}$	Gaz fazı laminar (moleküler) viskozitesi [kg/m.s]
$\mu_{gt}$	Gaz fazı türbülans (eddy) viskozitesi [kg/m.s]
$\mu_{ge}$	Gaz fazı efektif viskozitesi [kg/m.s]
$\mu_{pl}$	Katı fazı laminar (moleküler) viskozitesi [kg/m.s]
$\mu_{pt}$	Katı fazı türbülans (eddy) viskozitesi [kg/m.s]
$\mu_{pe}$	Katı fazı efektif viskozitesi [kg/m.s]
$\rho_g$	Gaz yoğunluğu [ $kg/m^3$ ]
$\rho_p$	Partikül yoğunluğu [ $kg/m^3$ ]

### GİRİŞ

Çevre yönetmelikleri ve insan sağlığının korunması, kömürü yakmak için temiz kömür teknolojileri gerektirmektedir. Şu ana kadar sanayinin kullandığı hareketli ızgaralı kömür kazanları ve elektrik üretiminde kullanılan pulverize kömürlü kazanların belli başlı problemleri vardır. Düşük kaliteli linyitlerden temiz ve verimli enerji eldesi için en uygun teknoloji ise, şu an için 250 MW<sub>e</sub> kapasitesine kadar işletmede olan ve halen gelişimi sürdürülmekte olan akışkan yatak teknolojisidir. Linyit kömürünün, ülkemizdeki bilinen rezervinin 8 milyar ton olduğu göz önüne alındığında

akışkan yatak teknolojisi, üzerinde durulması gereken bir teknolojidir.

Bir Sirkülasyonlu Akışkan Yatağı (SAY) uygun bir biçimde dizayn etmek ve çalışma şartlarını belirlemek için kolon hidrodinamiğinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Bir SAY'nin hidrodinamiği, gaz-katı iki fazlı akış modelini ve etkileşimlerini açıklayan bir mekanizmadır. SAY çok fazlı bir akış sistemidir ve çok fazlı sistemlerdeki denklemler, tek fazlı akışlar için kullanılan denklemlerden daha karmaşıktır ve simülasyonlarının yapılabilmesi için daha komplike matematiksel modeller gerektirir. SAY içerisindeki gaz ve katı partiküllerin hidrodinamiği, SAY'ın dizaynını ve sistemin performansını belirler. Çok fazlı sistemleri çözmek için yeni deneysel korelasyonlar, denklemler ve matematiksel modeller gerekmektedir. Son 20 yılda çok fazlı analiz, sanayinin birçok branşında yeni teknolojiler üretmek için başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

Literatürde, akışkan yatakların hidrodinamiği ile ilgili birçok deneysel ve sayısal çalışma mevcuttur. Sayısal çalışmalarda akışkanlar mekaniğinin temel denklemleri kullanılır ve genellikle akışkan yatağın kolon kısmının hidrodinamik davranışı incelenir. S. Benyahia ve ark. (2000) bir SAY'nin kolon bölümündeki gaz-partikül akışın simülasyonunu, ticari bir Sayısal Akışkanlar Dinamiği (SAD) kodu kullanarak gerçekleştirdiler. Yaptıkları çalışmada, iki boyutlu, zamana bağımlı ve izotermal gaz-katı akışın simülasyonunu gerçekleştirdiler. Bu çalışmada katı fazı gerilmelerini, kinetik teori yaklaşımı kullanarak kapalı hale getirdiler. Simülasyonda katı ve hava girişli giriş koşulu uygulanarak, kolonun yoğun bölgelerinde core-annulus akış yapısının oluştuğunu belirlediler. Hız, hacimsel oran, basınç ve türbülans parametreleri için gaz ve katı akış profilleri çıkardılar. Y. P. Tsuo ve D. Gidaspow (1990) yaptıkları çalışmada bir SAY'nin iki boyutlu simülasyonunu gerçekleştirerek kümelenme (cluster) oluşumunu ve core-annulus akış rejimini gösterdiler. Simülasyonlarında Eulerian-Eulerian modelini kullandılar ve katı viskozitesini sabit olarak kullanarak elde ettikleri hacimsel oran dağılımlarının ve hız profillerinin deneysel veriler ile uyumlu olduklarını gösterdiler. Y. Zheng ve ark. (2001) yaptıkları çalışmada, bir SAY'nin kolon bölümündeki, gaz-katı, türbülanslı akışın simülasyonu için bir  $k-\epsilon-k_p-\epsilon_p-\Theta$  iki akışkan modeli kurdular. Bu çalışmada bir reaktör kolonu, iki boyutlu ve izotermal olarak çözüldü. Kullanılan model, gaz ve partiküller arasındaki türbülans etkileşimini hesaba katan düşük Reynolds sayılı türbülans modeli ile hem gaz ve hem de katı partiküllerin simülasyonunu yapan taneli akışın kinetik teorisine dayanıyor. Y. Zheng ve ark. yaptıkları çalışmada partikül fazı türbülansının ihmal edildiği  $k-\epsilon-\Theta$  modeli, gaz ve katı fazları arasındaki türbülans etkileşiminde türbülans kinetik enerjisi yutumunun olmadığı  $k-\epsilon-k_p-\epsilon_p-\Theta$  modeli ve türbülans kinetik enerjisi yutumunun olduğu  $k-\epsilon-k_p-\epsilon_p-\Theta$  modeli olmak üzere 3 modelin simülasyonunu yürüttüler. Onlar çalışmalarında en iyi sonucu, türbülans kinetik enerjisi yutumunun olduğu  $k-\epsilon-k_p-\epsilon_p-\Theta$  modelinde elde ettiler.

L. Cabezas-Gómez ve F.E. Milioli (2003) bir SAY'nin kolonundaki gaz-katı iki fazlı akışın hidrodinamiğini incelemek için bir nümerik, parametrik çalışma yaptılar. Simülasyonlarda iki boyutlu silindirik ve kartezyen koordinatlar kullanıldı. Her iki fazın laminer ve izotermal olduğunu kabul ederek, her bir faza Eulerian-Eulerian formülasyonunu uyguladılar. Katı fazı viskozitesini  $\mu_k=0,0\text{kg/ms}$ ,  $\mu_k=0,250\text{kg/ms}$ ,  $\mu_k=0,509\text{kg/ms}$ ,  $\mu_k=0,750\text{kg/ms}$ ,  $\mu_k=1,0\text{kg/ms}$  değerlerinde ayrı ayrı alarak simülasyon gerçekleştirdiler. Katı viskozitesinin yüksek olduğu durumlarda, çıkışa yakın yerlerde kümelenmenin olduğu partikül hızının ve hacimsel oranın değişmediğini ve kümelenmenin hiç olmadığı gösterdiler. Araştırmacılar ayrıca fazlar arası momentum değişim katsayısı için Wen-Yu, Ergun, Gidaspow, Gibilaro ve Di Felice fonksiyonlarını kullanarak parametrik bir çalışmada yaptılar. B. Sajjakulnukit (1999), doktora tezinde bir sirkülasyonlu akışkan yatağın hidrodinamiğini ve ısı transferini, deneysel ve sayısal olarak inceledi. B. Sajjakulnukit, SAY'nin kolonunun simülasyonu için iki boyutlu bir model kullandı ve PHOENICS sayısal akışkanlar dinamiği programı kullanarak belli koşullar altında kolonda core-annulus yapının oluşabileceğini gösterdi. B. Sajjakulnukit çalışmasında Eulerian-Eulerian modelini kullandı ve akışı Stokes rejim olarak fazlar arasındaki momentum değişim katsayısını hesaplanması için bu rejimin korelasyonunu kullandı. H. Topal (1997), doktora tezi çalışmasında farklı işletme koşulları altında Tunçbilek linyiti ve absorptent olarak Göynük kireçtaşı kullanılarak akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri, yanma ve emisyon davranışını deneysel olarak incelemiştir. 0,125m iç çapında, 1,80m yüksekliğinde bir sıcak ve aynı geometriye sahip bir soğuk modelde yerel gaz akış hızları, yerel sıcaklık dağılımları katı kütle ve yerel gaz konsantrasyon dağılımları fiziksel benzeşime yönelik olarak incelenmiştir. En uygun deney koşullarında yanma verimi %98, Ca/S=2,5 oranı, SO<sub>2</sub> tutma verimi ise %92 (SO<sub>2</sub>=272mg/Nm<sup>3</sup>) olarak bulunmuştur.

F. Taghipour ve ark. (2005), iki boyutlu, gaz-katı akışkan yatak reaktörlerinin içindeki akış davranışını bir ticari SAD programı kullanarak incelediler ve momentum değişim katsayısını, Syamlal-O'Brien, Gidaspow ve Wen-Yu'nun sürüklenme fonksiyonlarını uygulayarak hesaplamışlardır. M. Chiesa ve ark. (2005), yaptıkları çalışmada bir laboratuvar ölçekli akışkan yatağın davranışını, Eulerian-Eulerian ve Eulerian-Lagrangian metotlarını kullanarak sayısal olarak incelediler. S. Benyahia ve ark. (2000), bir SAY'nin kolon bölümündeki gaz-katı akış davranışını, SAD paket programı olan Fluent kullanılarak incelemişlerdir. Herbir faz için hız, hacimsel oran, basınç ve türbülans parametreleri için gaz ve partikül akış profillerini elde etmişlerdir. L. Huilin ve ark. (2003), 6 m. yüksekliğindeki kolon içerisindeki gaz-katı akışın dinamik davranışını, taneli akışın kinetik teorisine dayanan, zamana bağımlı, 2 boyutlu bir hidrodinamik model kullanımı ile çözmüşlerdir. Çalışmalarında anlık ve yerel gaz-partikül hızlarını, hacimsel oranları ve

türbülans parametrelerini elde etmişlerdir. İlk koşulların, kolon giriş geometrisinin, kolon çapının ve kolon dikey eğiminin etkisini incelemişlerdir. J. R. Grace ve F. Taghipour (2004), akışkan yatakların nümerik modellenmesi ve doğrulanması ile ilgili yazdıkları makalede doğru bir analiz yapabilmek için nümerik hataların hesaba katılması gerektiğini, ayrıca model verileri ile deneysel sonuçların çok geniş bir aralıkta karşılaştırılması gerektiğini söylemişlerdir.

### Problemin Tanımı ve Matematiksel Formülasyon

Bu çalışmada tek siklonlu bir akışkan yataktaki, gaz-katı çift fazlı akışın hidrodinamiği, sürekli rejimde ve 3 boyutlu bir model kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, her iki fazın korunum denklemlerinin ayrı ayrı çözüldüğü Eulerian-Eulerian modeli (iki akışkan modeli) kullanılmıştır. Bu metotta, her bir faz akış alanı içerisinde kendi özellikleri sahip ancak akış alanında ortak basınca sahiptir. Gaz-katı fazları arasındaki momentum transferi için yalnızca sürüklenme ile olan momentum transferi göz önüne alınmış ve Gidaspow modelini kullanılmıştır. Gaz ve katı fazlarının türbülanslı akışı ise standart k-ε türbülans modeli kullanılarak modellenmiştir. Simülasyonlarda kullanılan matematiksel model denklemleri aşağıda verilmiştir.

#### 1. Süreklilik Denklemleri

Gaz Fazı :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_g \rho_g u_{g,j}) = 0 \quad (1)$$

Katı Fazı :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_p \rho_p u_{p,j}) = 0 \quad (2)$$

#### 2. Momentum Denklemleri

Gaz Fazı :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_g \rho_g u_{g,j} u_{g,i}) &= -\alpha_g \frac{\partial P}{\partial x_i} + \alpha_g \rho_g g_i \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_g \mu_{ge} \left( \frac{\partial u_{g,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{g,j}}{\partial x_i} \right) \right] + \beta_i (u_{g,i} - u_{p,i}) \end{aligned} \quad (3)$$

Katı Fazı:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_p \rho_p u_{p,j} u_{p,i}) &= -\alpha_p \frac{\partial P}{\partial x_i} + \alpha_p \rho_p g_i \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_p \mu_{pe} \left( \frac{\partial u_{p,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{p,j}}{\partial x_i} \right) \right] - \beta_i (u_{g,i} - u_{p,i}) \end{aligned} \quad (4)$$

#### 3. Fazların Hacimsel Oranı

$$\alpha_g = \frac{(V_g)_v}{V}, \quad \alpha_p = \frac{(V_p)_v}{V} \quad (5)$$

$$\alpha_g + \alpha_p = 1 \quad (6)$$

4. Fazlar Arası Momentum Transferi,  $\beta$ , Gidaspow Modeli:

$$\alpha_g > 0,8 \Rightarrow \beta_i = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_p \alpha_g \rho_g |u_{p,i} - u_{g,i}|}{d_p} \alpha_g^{-2,65} \quad (7)$$

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g \text{Re}_p} \left[ 1 + 0,15 (\alpha_g \text{Re}_p)^{0,687} \right] \quad (8)$$

$$\text{Re}_p = \frac{\alpha_g |u_{p,i} - u_{g,i}| d_p \rho_g}{\mu_{g,i}} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \alpha_g \leq 0,8 \Rightarrow \beta_i &= 150 \frac{\alpha_p (1 - \alpha_g) \mu_{g,i}}{\alpha_g d_p^2} \\ &+ 1,75 \frac{\rho_g \alpha_p |u_{p,i} - u_{g,i}|}{d_p} \end{aligned} \quad (10)$$

### Katı Viskozitesi

Katı viskozitesi aslında yapay bir kavramdır. Bu ifade katı partiküller arasındaki etkileşimi hesaba katmak için ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmada katı viskozitesi, katı laminer viskozitesi ve katı türbülans viskozitesinin toplamı olarak göz önüne alınmıştır. Katı laminer viskozitesi sabit olarak kabul edilmiş, katı türbülans viskozitesi için ise aşağıdaki ifade kullanılmıştır:

$$\mu_{pt} = \rho_p C_\mu \frac{k_g^2}{\varepsilon_g} \quad (11)$$

Burada  $C_\mu$  deneysel bir sabit olup 0,09 olarak alınmıştır. Katı viskozitesi ayrıca, taneli akışın kinetik teoris ile de modellenebilir.

### Model Geometrisi, Simülasyon Verileri, Nümerik ve Sınır Koşulları

Simülasyonlarda kullanılan geometri Şekil 1'de, simülasyon verileri, nümerik ve sınır koşulları Tablo 1'de verilmiştir. Çalışmalarda gaz olarak hava, katı olarak da küresel cam boncuklar kullanılmıştır. Sisteme hava, kolon girişi ve ikincil hava bağlantı noktası olmak üzere iki noktadan verilmektedir. Sisteme katı ise deneme çalışmalarının dışında verilmemiş sadece kolon içerisinde ilk katı miktarının 5kg olduğu varsayılmıştır. Duvarlarda her iki faz içinde kaymama sınır koşulu uygulanmış, çıkışta ise tam gelişmiş akış sınır şartı ve atmosferik basınç sınır şartı uygulanmıştır. Simülasyonlarda kartezyen koordinatlar kullanılmış olup, 3 boyutlu ve üniform hücre yapısı (55x35x180=346500) göz önüne alınmıştır.



**Tablo 1.** Simülasyon verileri, nümerik koşullar ve sınır şartları.

Koşul	Büyüklik	Değer
Giriş Koşulları	Birincil hava hızı (14 adet) ( $U_{g,b}$ )	1,587-15,873m/s
	İkincil hava hızı ( $U_{g,i}$ )	0,296-2,958m/s
	Katı giriş hızı (14 adet) ( $U_{p,b}$ )	0-8,928m/s
	Girişteki gaz hacimsel oranı ( $\alpha_g$ )	0,99999476-1,0
	Girişteki katı hacimsel oranı ( $\alpha_p$ )	0-5,24x10 <sup>-6</sup>
	Birincil hava türbülans kinetik enerjisi (k)	0,005171-0,517m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
	İkincil hava türbülans kinetik enerjisi (k)	1,799x10 <sup>-4</sup> -1,796x10 <sup>-2</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Giriş Koşulları	Birincil hava türbülans kinetik enerjisi yutumu ( $\epsilon$ )	0,0826-82,70m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
	İkincil hava türbülans kinetik enerjisi yutumu ( $\epsilon$ )	1,237x10 <sup>-4</sup> -1,228x10 <sup>-2</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
Duvar Koşulları	Duvarda kaymama sınır koşulu	( $u_g=v_g=w_g=u_p=v_p=w_p=0$ )
Çıkış Koşulları	Tam gelişmiş akış, çıkışta sabit atmosferik basınç	$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \Rightarrow \left( \begin{array}{l} \phi = u_g, v_g, w_g, \\ u_p, v_p, w_p, k, \epsilon \end{array} \right)$ P=1atm
Simülasyon Verileri	Partikül çapı ( $d_p$ )	50-400 $\mu$ m
	Partikül yoğunluğu ( $\rho_p$ )	1500-5100kg/m <sup>3</sup>
	Gaz fazı laminer viskozitesi ( $\mu_{gl}$ )	1,791x10 <sup>-5</sup> kg/m.s
	Katı fazı laminer viskozitesi ( $\mu_{pl}$ )	5,0kg/m.s
	Havanın yoğunluğu ( $\rho_g$ )	1,16kg/m <sup>3</sup>
Nümerik Koşullar	İterasyon sayısı	min. 14000
	Hücre genişlikleri	$\delta_x=0,00809m, \delta_y=0,00796m, \delta_z=0,01022m$
Momentum kaynağı	Geri dolaşım yatağı gaz hızı ( $w_{sg}$ )	-0,4, -0,6, -0,8, -1,0m/s

## SAYISAL SONUÇLAR

Bu çalışmada, partikül yoğunluğunun, boş kolon gaz hızının ve partikül çapının akışkan yatak içerisindeki akışa etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Bu değişkenlerin katı dolaşım oranlarına etkilerinin yanı sıra, katı hacimsel oranları ve partikül hızlarının kolon içerisindeki radyal dağılımları verilmiştir. Aynı zamanda belirlenen kesitler için gaz hızı vektör dağılımları ve katı hacimsel oran konturları da gösterilmiştir. Belirlenen kesitler Tablo 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.

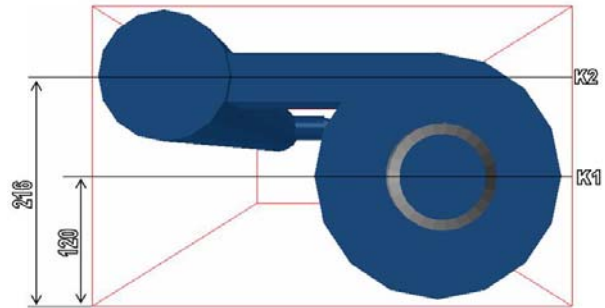
**Tablo 2.** Akışkan yatak modelinde belirlenen kesitlerin boyutları.

Kesit No	x (mm)	y (mm)	z (mm)
K1	0-445	120,0	0-1840
K2	0-445	216,0	0-1840
K3	0-445	0-278,5	232,5
K4	0-445	0-278,5	1750

### Partikül Yoğunluk Değişiminin Akışa Etkisi

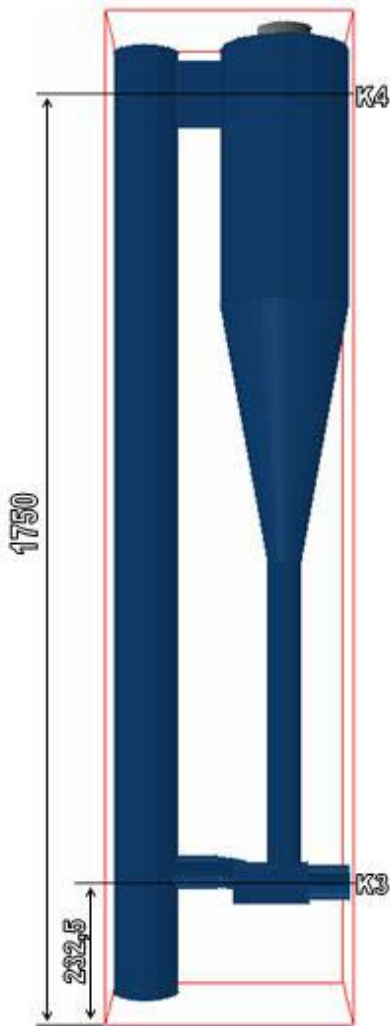
Partikül yoğunluklarının, akışkan yatak içerisindeki gaz-katı çift fazlı akışa olan etkisini incelemek için 4 farklı yoğunlukta partiküller kullanılmıştır. Partikül yoğunlukları 1500, 2700, 3900 ve 5100kg/m<sup>3</sup> olarak seçilmiş ve diğer çalışma şartları sabit tutularak partikül yoğunluk değişiminin kolon içerisindeki akışa olan etkisi incelenmiştir. Partikül çapları 100 $\mu$ m olarak seçilmiş,

boş kolon gaz hızı en yüksek yoğunluklu partikülün terminal hızını sağlayacak şekilde seçilmiştir (1,1m/s) ve ikincil hava debisinin, birincil hava debisine oranı 0,25 olacak şekilde ayarlanmıştır. Partikül yoğunluk değişimi ile katı dolaşım oranının değişimi Şekil 5'te verilmiştir.

**Şekil 3.** Akışkan yatak modeli için belirlenen kesitler, (K1,K2, Üst Görünüş).

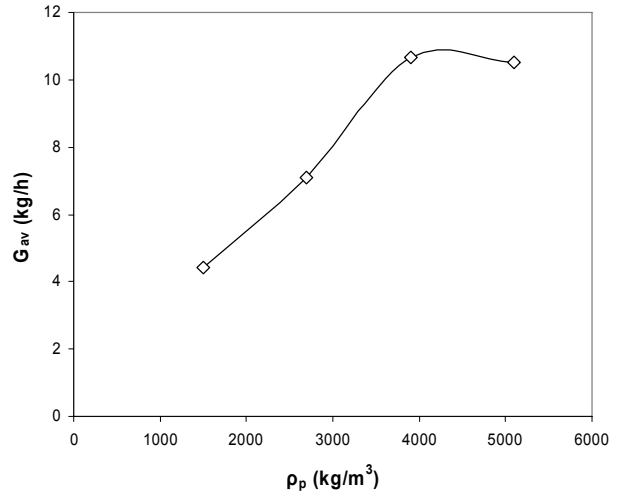
Şekil 5'te görüldüğü gibi partikül yoğunluğunun değişmesi ile katı dolaşım oranlarının değiştiği görülmektedir. En düşük katı dolaşım oranı, en düşük yoğunluklu partikülde (1500kg/m<sup>3</sup>) elde edilmiştir. En yüksek katı dolaşım oranları 3900kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu partikülde elde edilmiştir. İlk önce artan partikül yoğunluğu ile katı dolaşım oranı artmış, daha sonra bir miktar düşmüştür. Bunun nedeni, partikül yoğunluğunun akışa etkisinin yanı sıra, farklı partikül

yoğunluklarının terminal hızlarının farklı olması nedeni ile boş kolon gaz hızının terminal hıza oranının da ( $U_o/U_t$ ) akışı etkilemesidir.

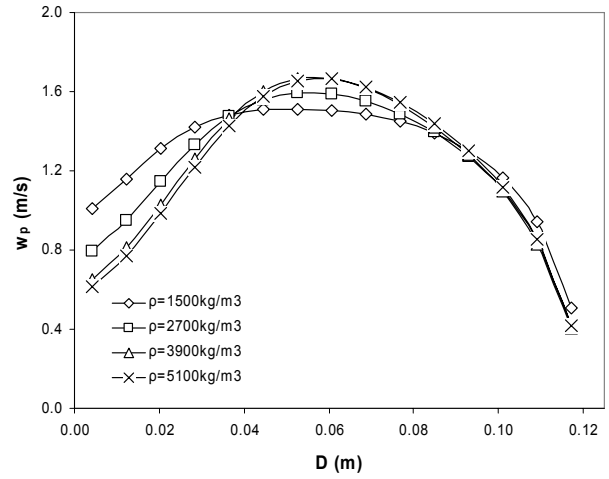


Şekil 4. Akışkan yatak modeli için belirlenen kesitler, (K3,K4).

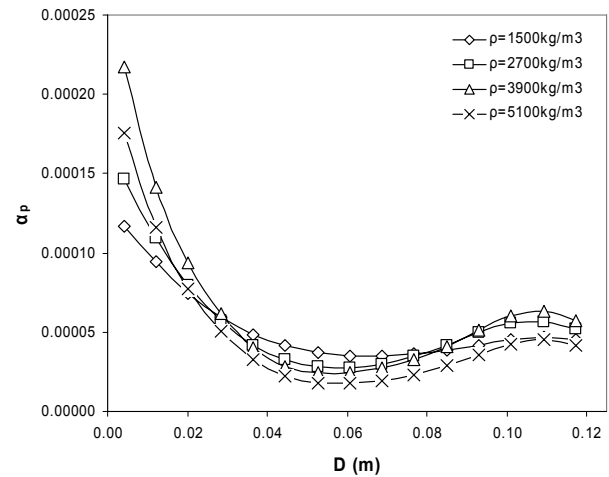
Baysal Ö.'nün Yüksek Lisans çalışmasında 0,5-1,0 ve 1,6m. yüksekliğindeki sonuçlar verilmiştir ancak burada sadece 1,0m. yüksekliğindeki sonuçlar verilmiştir. Kolon içerisinde 1,0m yükseklikteki, eksenel partikül hızının ve katı hacimsel oranının radyal dağılımlarının 4 farklı yoğunluk için karşılaştırılması Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Eksenel partikül hızlarının radyal dağılımlarına bakıldığında kolon merkezindeki eksenel partikül hızlarının boş kolon gaz hızından daha yüksek olduğu, kolon duvar kısımlarında ise daha düşük olduğu görülmektedir. Artan partikül yoğunluğu ile eksenel partikül hızının radyal dağılım eğrisinin konikleşme eğiliminde olduğu görülmektedir. Kolon duvarlarında, artan partikül yoğunluğu ile partikül eksenel hızlarının bir miktar düştüğü kolon merkezinde ise yüksek yoğunluklu partiküllerin hızlarının yüksek olduğu görülmektedir. Bunun ana nedeni ise bu bölgede yüksek yoğunluklu partiküllerin katı hacimsel oranının bir miktar düşük olmasıdır.



Şekil 5. Partikül yoğunluk değişimi ile katı dolaşım oranının ( $G_{av}$ ) değişimi.



Şekil 6. 4 farklı yoğunluktaki partiküllerin z=1,0m yüksekliğindeki eksenel partikül hızlarının karşılaştırılması.



Şekil 7. 4 farklı yoğunluktaki partiküllerin z=1,0m yüksekliğindeki katı hacimsel oranının karşılaştırılması.

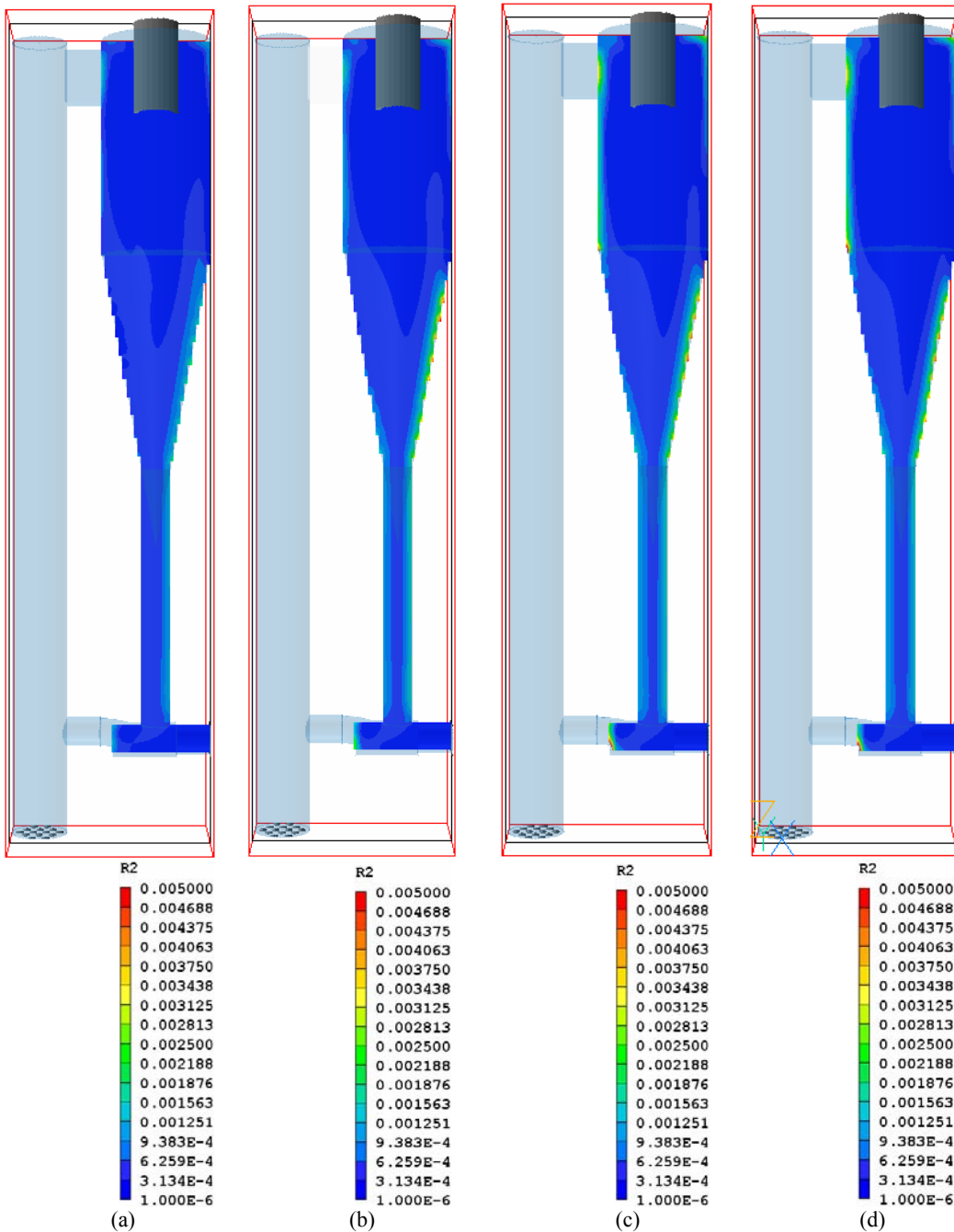
Katı hacimsel oranının radyal dağılımına bakıldığında, kolon bağlantı borusunun konumundan dolayı, kolon bağlantı borusunun karşı tarafındaki duvar bölgesinde katı hacimsel oranının daha fazla olduğu, kolon merkezinde ve kolon bağlantı borusunun bulunduğu

duvar bölgesinde ise birbirlerine daha yakın olduğu görülmektedir. Kolon bağlantı borusunun konumuna rağmen, kolon merkezinde nispeten daha düşük katı hacimsel oranları oluşmakta, kolon duvar bölgelerinde ise daha yüksek katı hacimsel oranları oluşmaktadır. Diğerlerine göre yüksek katı dolaşım oranlarından dolayı, 3900kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu partikülün kullanıldığı durumda, kolon bağlantı borusunun karşı tarafındaki katı hacimsel oranları daha yüksek çıkmıştır. En düşük katı hacimsel oranı ise, düşük katı dolaşımından dolayı 1500kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu partikülün kullanıldığı durumda oluşmuştur.

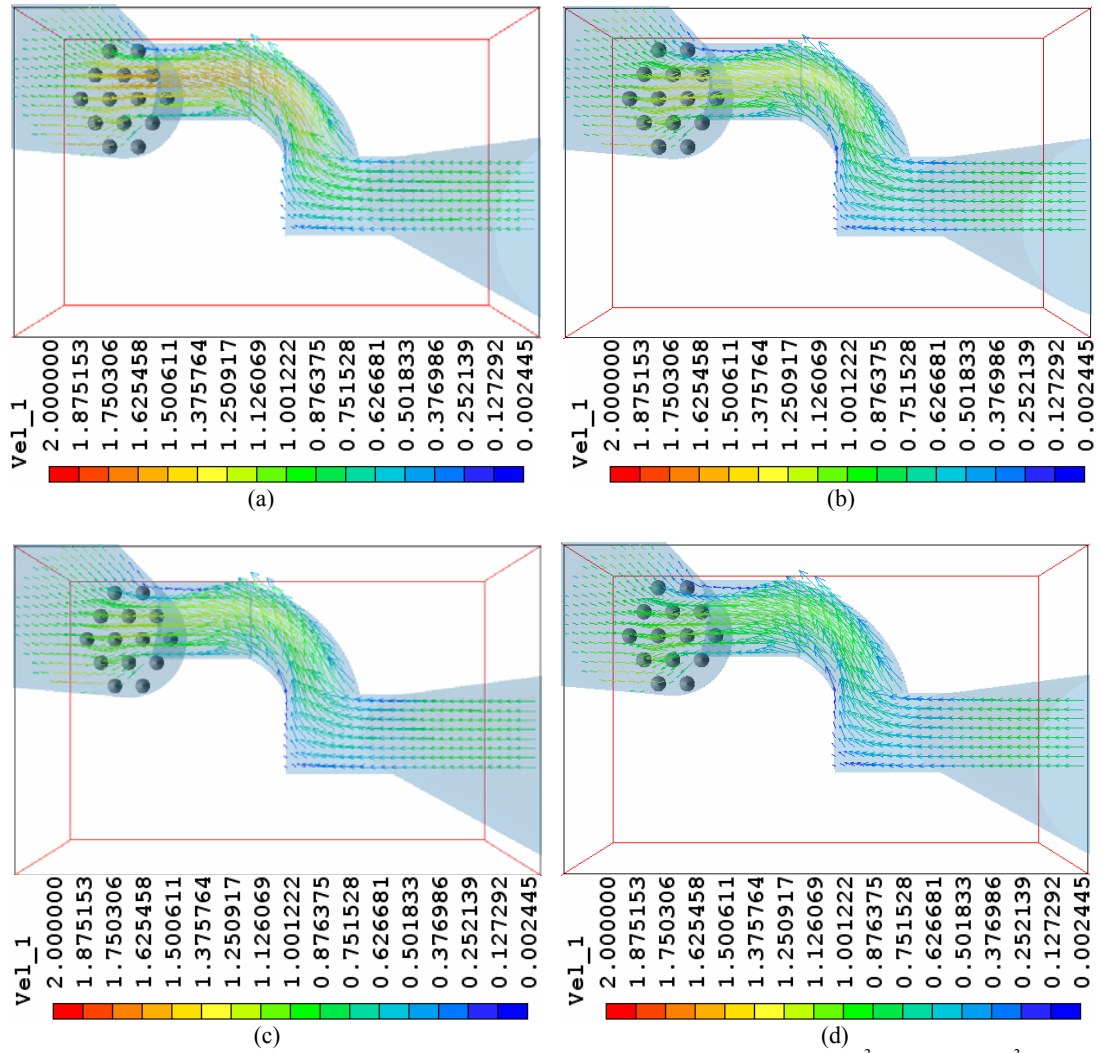
Şekil 8 ve Şekil 9'da katı hacimsel oran konturları ve gaz hızı vektör dağılımlarının yoğunluk ile değişimleri

gösterilmiştir. Şekil 8'e bakıldığında 3900kg/m<sup>3</sup> ve 5100kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu partiküllerin kullanıldığı durumlarda, katı dolaşım oranlarının yüksekliğinden dolayı akışkan yatağın siklon bölümünde daha fazla katı konsantrasyonu oluşmaktadır ve en düşük katı hacimsel oranı ise 1500kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu partiküllerin kullanıldığı durumda oluşmaktadır. Katı partiküller siklonun duvar bölgesinde toplanmakta olduğu ve en yüksek katı konsantrasyonları geri dolaşım hattında olduğu görülmektedir.

Şekil 9'a bakıldığında ise kolon bağlantı borusunun kesitinde (K3), düşük yoğunluklu partiküllerin kullanıldığı durumda, gaz hızlarının yüksek olduğu ve artan yoğunluk ile gaz hızlarının düştüğü görülmektedir.



Şekil 8. Farklı partikül yoğunlukları için K1 kesitindeki katı hacimsel oranı kontur dağılımları, (a) 1500kg/m<sup>3</sup>, (b) 2700kg/m<sup>3</sup>, (c) 3900kg/m<sup>3</sup>, (d) 5100kg/m<sup>3</sup>.



Şekil 9. Farklı partikül yoğunlukları için K3 kesitindeki gaz hızı vektör dağılımları, (a) 1500kg/m<sup>3</sup>, (b) 2700kg/m<sup>3</sup>, (c) 3900kg/m<sup>3</sup>, (d) 5100kg/m<sup>3</sup> (L-vana Üst Görünüş).

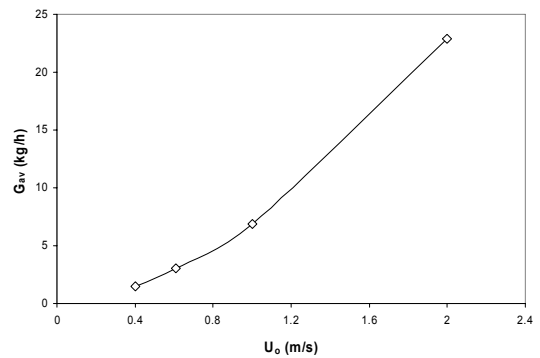
### Boş Kolon Gaz Hızı Değişiminin Akışa Etkisi

Boş kolon gaz hızının akışkan yatak içerisindeki gaz-katı çift fazlı akışa olan etkisini incelemek için 2700kg/m<sup>3</sup> yoğunluğunda ve 100µm çapında partiküller kullanılmış ve 4 farklı boş kolon gaz hızları uygulanarak simülasyonlar yapılmıştır. Boş kolon hızları, 2700kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu ve 100µm çaplı partiküllerin terminal hızı (0,611m/s) dikkate alınarak 0,4-0,611-1,0 ve 2,0m/s olarak belirlenmiştir. Boş kolon gaz hızı ile katı dolaşım oranının değişimi Şekil 10'da verilmiştir.

Şekil 10'a bakıldığında en düşük katı dolaşım oranı, terminal hızın altındaki bir değer olan 0,4m/s boş kolon gaz hızında oluşmakta, en yüksek katı dolaşım oranı da 2,0m/s boş kolon gaz hızlı durumda oluşmaktadır ve artan boş kolon gaz hızı ile katı dolaşım oranının arttığı görülmektedir.

Kolon içerisinde 1,0m yükseklikteki, katı hacimsel oranının radyal dağılımların 4 farklı boş kolon gaz hızı için karşılaştırılması Şekil 11'de gösterilmiştir. Kolon içerisinde en yüksek katı hacimsel oranı, katı dolaşım oranına paralel olarak 2,0m/s boş kolon hızlı durumda oluşmakta en düşük katı hacimsel oranı ise 0,4m/s boş

kolon gaz hızlı durumda oluşmaktadır.

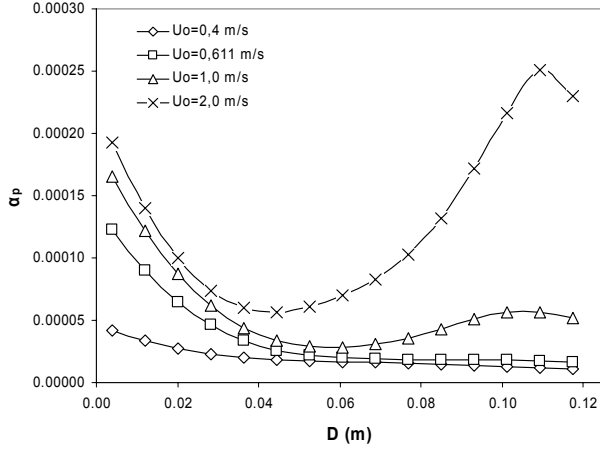


Şekil 10. Boş kolon gaz hızı değişimi ile katı dolaşım oranının değişimi.

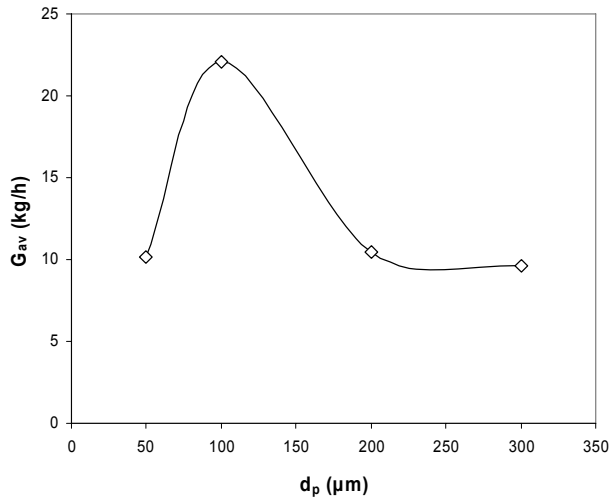
### Partikül Çapı Değişiminin Akışa Etkisi

Partikül çapı değişiminin, akışa etkisini incelemek 2700kg/m<sup>3</sup> yoğunluğunda, 50, 100, 200 ve 300µm çaplarında partiküller kullanılmıştır. Boş kolon gaz hızı, bütün partiküllerin terminal hızını (2,8m/s) sağlayacak şekilde seçilmiştir. Partikül çapı değişimi ile katı dolaşım oranının değişimi Şekil 12'de gösterilmiştir.





Şekil 11. 4 farklı boş kolon gaz hızları için  $z=1,0m$  yüksekliğindeki katı hacimsel oranlarının karşılaştırılması.

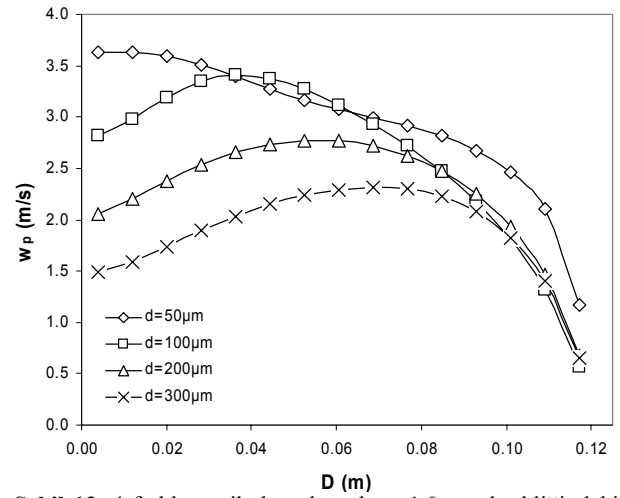


Şekil 12. Partikül çapı değişimi ile katı dolaşım oranının değişimi.

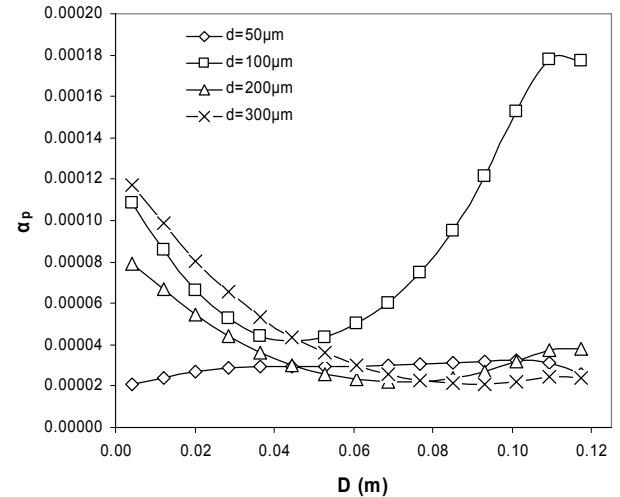
Şekil 12'de görüldüğü gibi  $100\mu m$  çaplı durumdaki katı dolaşım oranı diğer üçünden oldukça fazla çıkmıştır. Çap değişiminin akışa etkisinin yanı sıra, farklı çaplı partiküllerin terminal hızlarının farklı olması nedeni ile boş kolon gaz hızının terminal hıza oranının da ( $U_0/U_t$ ) etkili olduğu görülmektedir. Büyük çaplı partiküllerin terminal hızı yüksek olmasından dolayı  $U_0/U_t$  oranı düşüktür. Bu nedenden dolayı katı dolaşım oranı artan çap ile ilk önce artmış daha sonra daha sonra azalmıştır. En yüksek katı dolaşım oranı  $100\mu m$  çaplı durumda oluşmakta ve  $50, 200$  ve  $300\mu m$  çaplı durumlarda katı dolaşım oranları birbirlerine yakın değerler almıştır. Ancak  $100\mu m$  çaplı durumda, katı dolaşım oranı diğerlerinden oldukça fazla çıkmasının nedeni sayısal çalışmadaki yapılan kabullerden kaynaklanıyor olabilir.

Kolon içerisinde  $1,0m$  yükseklikteki, aksel partikül hızının ve katı hacimsel oranının radyal dağılımlarının 4 farklı partikül çapı için karşılaştırılması Şekil 13 ve Şekil 14'de gösterilmiştir. Şekil 13'e bakıldığında kolon bağlantı borusunun karşı taraftaki duvar kısmında partikül hızları çap ile oldukça fazla değişmektedir. Kolon bağlantı borusunun karşı tarafındaki duvar kısmında, partikül hızları artan çap ile azalmaktadır. Bu

bölgede  $100$  ve  $300\mu m$  çaplı durumlarda hemen hemen aynı katı hacimsel oranları oluşmasına rağmen  $100\mu m$  çaplı durumda partikül hızı daha fazladır. Özellikle  $100, 200$  ve  $300\mu m$  çaplı durumlarda aksel partikül hızlarının radyal dağılımı parabolige yakınken  $50\mu m$  çaplı durumda aksel partikül hızlarının radyal dağılımı nispeten daha yassıdır. Şekil 14'e bakıldığında, katı dolaşım oranı diğerlerinden oldukça yüksek olan  $100\mu m$  çaplı durumdaki radyal dağılımın oldukça farklı olduğu görülmektedir.  $50\mu m$  çaplı durumdaki dağılım yassı olmasına rağmen diğer 3 durumdaki radyal dağılım üniform değildir. Kolon bağlantı borusunun karşı tarafındaki duvar bölgesinde minimum katı hacimsel oranları  $50\mu m$  çaplı durumda oluşurken, maksimum katı hacimsel oranları ise  $100$  ve  $300\mu m$  çaplı durumlarda oluşmaktadır.



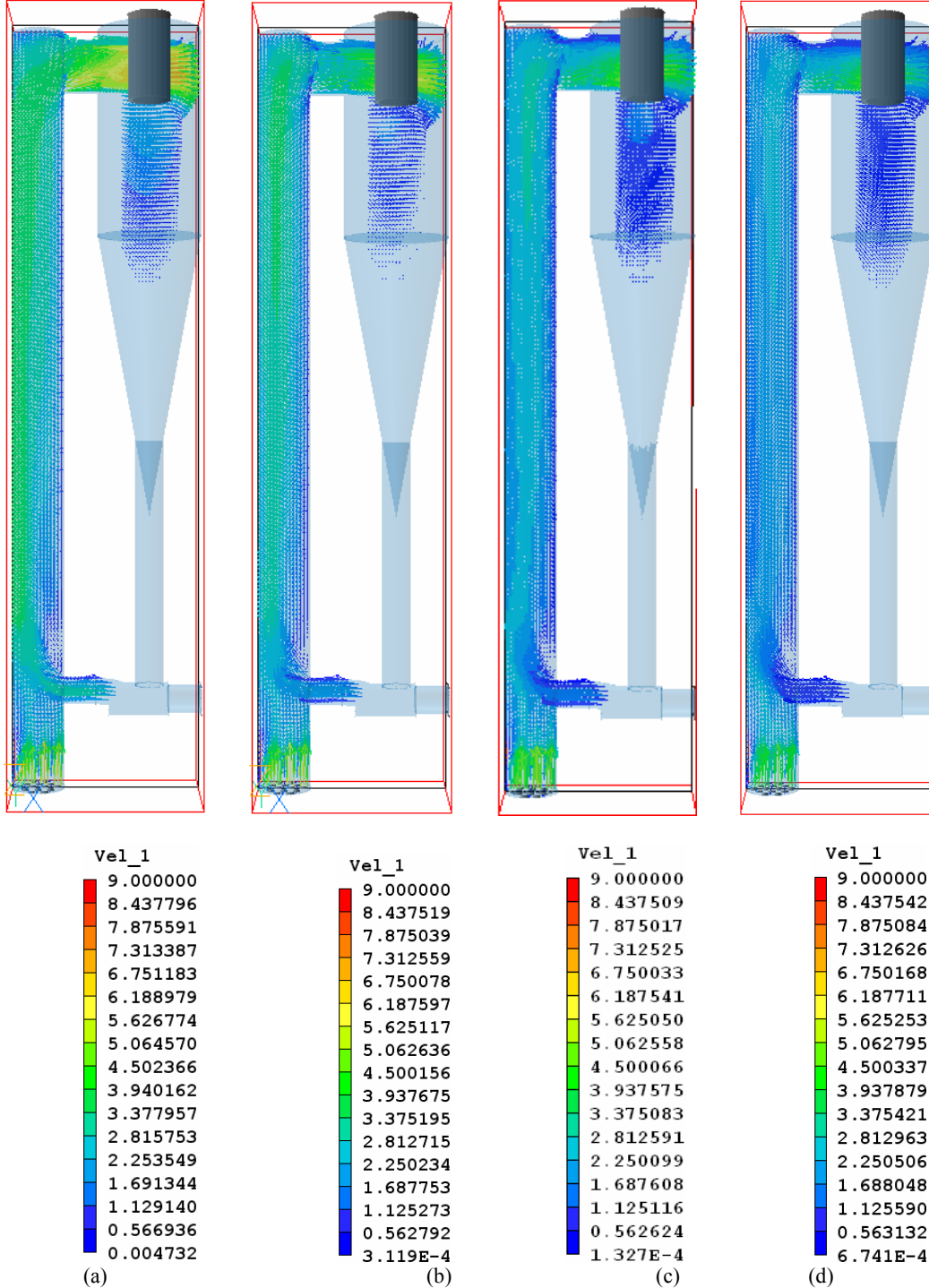
Şekil 13. 4 farklı partikül çaplarında  $z=1,0m$  yüksekliğindeki aksel katı hızlarının karşılaştırılması.



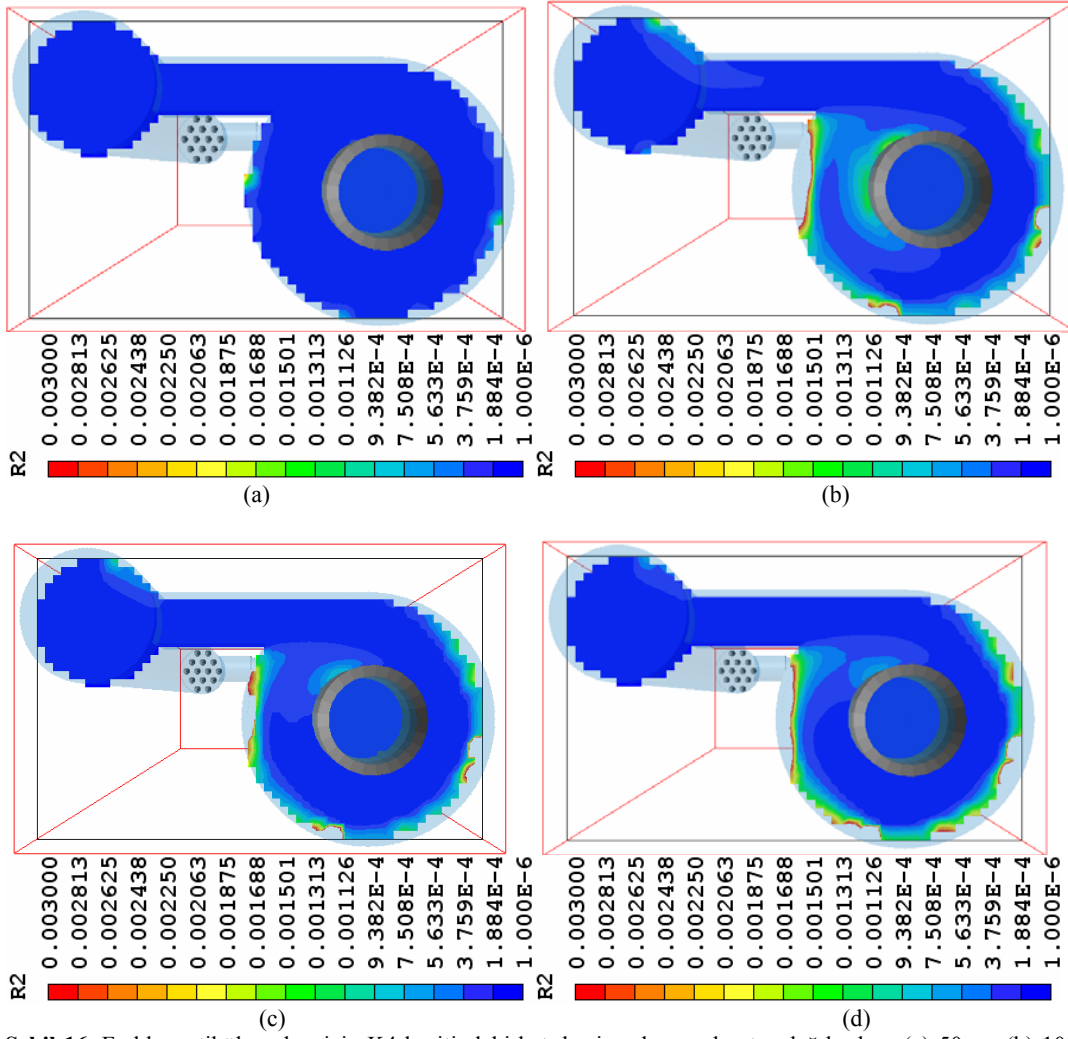
Şekil 14. 4 farklı partikül çaplarında  $z=1,0m$  yüksekliğindeki katı hacimsel oranının karşılaştırılması.

Şekil 15 ve Şekil 16'da katı hacimsel oran konturları ve gaz hızı vektör dağılımlarının çap ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 15'e bakıldığında, kolon girişinde gaz hızlarının artan partikül çapı ile düştüğü görülmektedir. Şekil 16'da ise siklon bölümünde en düşük katı konsantrasyonları  $50\mu m$  çaplı durumda

oluşmakta ve 100, 200 ve 300µm çaplı durumlarda birbirlerine yakın değerler aldıkları görülmektedir. Ayrıca bütün durumlarda, merkezkaç kuvveti nedeni ile partiküllerin siklon duvarlarında toplandıkları görülmektedir.



Şekil 15. Farklı partikül çapları için K2 kesitindeki gaz hızı vektör dağılımları, (a) 50µm, (b) 100µm, (c) 200µm, (d) 300µm.



Şekil 16. Farklı partikül çapları için K4 kesitindeki katı hacimsel oranı kontur dağılımları, (a) 50µm, (b) 100µm, (c) 200µm, (d) 300µm (Üst Görünüş).

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, soğuk model akışkan yatak içerisindeki gaz-katı iki fazlı akışın hidrodinamiği sayısal olarak incelenmiştir. Akışkan yatakların hidrodinamiği, gaz-katı iki fazlı akış modelini ve etkileşimlerini açıklayan bir mekanizmadır. Çok fazlı sistemlerdeki denklemler, tek fazlı akışlar için kullanılan denklemlerden daha karmaşık ve simülasyonlarının yapılabilmesi için daha komplike matematiksel modeller gerektirir. Gaz-katı iki fazlı akışın hidrodinamiğini çözmek için bu çalışmada kullanılan sayısal model, hem gaz fazı hem de katı fazlarının sürekli ortam olarak kabul edildiği iki-akışkan (Eulerian-Eulerian) modelidir. Gaz ve katı fazı momentum denklemlerindeki fazlar arası momentum transferini temsil eden terim ( $\beta$ ) ise Gidaspow Modeli kullanılarak modellenmiştir. Yukarıda bahsedilen modellerin probleme uygulanması, geometrinin oluşturulması, ilk ve sınır şartlarının probleme uygulanması, gaz ve katı fazlarının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ve nümerik koşulların uygulanması bir sayısal akışkanlar dinamiği (SAD) paket programı olan PHOENICS kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmalarda partikül yoğunluk değişiminin akışa etkisi, boş kolon gaz hızları değişiminin akışa etkisi ve partikül çapı değişiminin akışa etkisi incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarından, partikül yoğunluk değişiminin, boş kolon gaz hızı değişiminin ve partikül çapı değişiminin katı dolaşım oranını ( $G_{av}$ ) oldukça etkilediği görülmüştür. Partikül yoğunluk değişiminin incelendiği durumda, artan partikül yoğunluğu ile katı dolaşım oranı artma eğilimi göstermektedir. Ancak artan yoğunluk ile terminal hız artığından dolayı, sadece partikül yoğunluğu değiştirildiğinde, boş kolon gaz hızının, terminal hıza oranı da ( $U_o/U_t$ ) değişmektedir.  $U_o/U_t$  oranı da akışı etkileyen bir faktör olup hem  $U_o/U_t$  hem de yoğunluk değişimi akışı etkilemektedir. Bu etkiden dolayı 3900 ve 5100kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu durumlarda katı dolaşım oranları birbirlerine yakın çıkmıştır. En düşük katı dolaşım oranı ise en düşük yoğunluk olan 1500kg/m<sup>3</sup> yoğunlukta oluşmuştur.

Diğer değişkenler sabit tutularak, belirli bir partikül çapı ve partikül yoğunluğu için terminal hız belirlenmiş ve boş kolon gaz hızları, terminal hızın altında ve üzerinde seçilerek boş kolon gaz hızlarının değişimi ile katı dolaşım oranının değişimi incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarından boş kolon gaz hızının katı dolaşım

oranını oldukça fazla etkilediği görülmüştür. En düşük katı dolaşım oranı terminal hızın altında bir değer olan 0,4m/s boş kolon gaz hızında oluşmuş ve 1,49kg/h olarak elde edilmiştir. En yüksek katı dolaşım oranı ise en yüksek boş kolon gaz hızında oluşmuş ve 22,90kg/h olarak elde edilmiştir. Artan boş kolon gaz hızı ile katı dolaşım oranının arttığı görülmüştür.

Partikül çapının değişiminin incelendiği durumda da çap değişiminin akışı etkilediği görülmüştür. Çap değişimi ile de terminal hız değiştiğinden dolayı  $U_o/U_t$  oranı bu durumda da akışla etkisini göstermektedir.  $U_o/U_t$  oranının da etkisi ile 100µm partikül çaplı durumda en yüksek katı dolaşım oranı elde edilmiş 50, 200 ve 300µm partikül çaplı durumda ise katı dolaşım oranları birbirlerine yakın çıkmıştır.

## KAYNAKLAR

- Baysal, Ö., Dolaşımli Akışkan Yatak İçerisindeki Gaz-Katı İki Fazlı Akışın Hidrodinamiğinin Sayısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2007.
- Benyahia, S., Analysis of Solid Flow Patterns and Mixing in Gas/Solid flow Systems, Ph.D. Dissertation, *Illinois Institute of Technology*, Chicago, 35-74, 1999.
- Benyahia, S., Arastoopour, H., Knowlton, T. H., Massah, H., Simulation of Particles and Gas Flow Behaviour in the Riser Section of a Circulating Fluidized Bed using Kinetic Theory Approach for the Particulate Phase, *Powder Technology*, 112: 24-33, 2000.
- Cabezas-Gómez, L., 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.
- Chiesa, M., Mathiesen, V., Melheim, J. A., Halvorsen, B., Numerical Simulation of the Particulate Flow by the Eulerian-Lagrangian and the Eulerian-Eulerian Approach with Application to a Fluidized Bed, *Computer & Chemical Engineering*, 29: 291-304, 2005.
- Grace J.R., and Taghipour F., Verification and Validation of CFD Models and Dynamic Similarity for Fluidized Beds, *Powder Technology*, 139: 99-110, 2004.
- Hansen, K. G., and Madsen, J., A Computational and Experimental Study of a Gas- Particle Flow in a Scale Circulating Fluidized Bed, 9<sup>th</sup> Semester Project, *Aalborg University Esbjerg*, Esbjerg, 33-38, 49-97, 2001.
- Huilin, L., Gidaspow, D., Bouillard, J., Wentie, L., Hydrodynamics Simulation of Gas Solid Flow in a Riser using Kinetic Theory of Granular Flow, *Chemical Engineering Journal*, 95: 1-13, 2003.
- Köksal, M., Gas Mixing and Flow Dynamics in Circulating Fluidized Beds with Secondary Air Injection, Ph.D. Dissertation, *Dalhousie University*, Nova Scotia, 124-152, 2001.
- Kunii, D., Levenspiel, O., Circulating Fluidized-Bed Reactors, *Chemical Engineering Science*, 52(15): 2471-2482, 1997.
- Kunii, D., and Levenspiel, O., Fluidization Engineering, *Butterworth Heinemann*, Stoneham MA, 64-71, 1991.
- Li, Y., The Finite Analytic Method Applied to Gas-Solid Two-Phase Flows, M.Sc. Thesis, *Dalhousie University*, Nova Scotia, 19-29, 1999.
- Mahmood, A., Simulation of Hydrodynamics and Heat Transfer in Bubbling Fluidized Beds, M.Sc. Thesis, *Dalhousie University*, Nova Scotia, 17-19, 2004.
- Mostafa, A. A., and Mongia, H. C., On the Interaction of Particles and Turbulent Fluid Flow, *International Journal Heat Mass Transfer*, 31(10): 2063-2075, 1988.
- Neri, A., Gidaspow, D., Riser Hydrodynamics: Simulations Using Kinetic Theory, *AIChE Journal*, 46(1): 52-67, 2000.
- Pärssinen, J. H., Zhu, J. X., Axial and Radial Solids Distribution in a Long and High flux CFB Riser, *AIChE Journal*, 47(10): 2197-2205, 2001a.
- Sajjakulnikit, B., Hydrodynamics and Heat Transfer in a Circulating Fluidized Bed, Ph.D. Dissertation, *The University of New Brunswick*, New Brunswick, 120-130, 1999.
- Selçuk, N., Akışkan Yatakta Yanma Teknolojileri, *Akışkan Yataklı Kazan Teknolojilerine Dayalı Buhar-Elektrik Üretimi Paneli*, Ankara, 6-12, 2001.
- Sinclair, J. L., Jackson, R., Gas-Particle Flow in a Vertical Pipe with Particle-Particle Interactions, *AIChE Journal*, 35(9): 1473-1486, 1989.
- Taghipour, F., Ellis, N., Wong, C., Experimental and Computational Study of Gas-Solid Fluidized Bed Hydrodynamics, *Chemical Engineering Science* 60: 6857-6867, 2005.
- Topal, H., Dolaşımli Akışkan Yatağın Hidrodinamik Yanma ve Emisyon Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 56-66, 1997.
- Torres, E. A. C., Modelling of a Circulating Fluidized Bed using Computational Fluid Dynamics Software, M.Sc. Thesis, *The University of New Brunswick*, New Brunswick, 22-30, 1999.
- Tsuo, Y. P., and Gidaspow, D., Computation of Flow Patterns in Circulating Fluidized Beds, *AIChE Journal*, 36(6): 885-896, 1990.

Versteeg, H. K., and Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics, *Longman*, Harlow, 41-84, 103-155, 1996.

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.