

علمی - پژوهشی

## تحلیل عددی و مطالعه عوامل مؤثر بر رفتار هیدرودینامیک بسترسیال حبابی گاز-جامد با رفتار دانه‌های ذرات

رضا کریمی احمدی<sup>۱</sup> حمیدرضا نظیف<sup>۲\*</sup>

دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۸، انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223278.1401.11.1.8.0>

چکیده

در سال‌های اخیر رآکتورهای بسترسیال به دلیل خصوصیات چون توزیع دمایی یکنواخت، اختلاط مناسب فازها و نرخ انتقال حرارت بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. نرخ انتقال حرارت بالا در بسترسیال به عوامل هیدرودینامیکی بستر وابسته است. از این رو در این پژوهش، اثرات تغییر اندازه قطر ذرات، تغییر سرعت هوای ورودی و تغییر مدل پسا بر روی عملکرد ذرات گروه گلدات B در بسترسیال حبابی به وسیله مطالعه توزیع متوسط زمانی سرعت محوری ذرات و توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات در بسترسیال بررسی شده است. در این تحقیق، از رویکرد جریان دوفازی اویلرین و تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای استفاده شده است. ذرات با قطرهای (۵۰۰، ۵۳۰، ۵۷۰، ۶۰۰) در نظر گرفته شده است. در نتیجه این مطالعه، با افزایش اندازه قطر ذرات جامد از ۵۰۰ تا ۶۰۰ متوسط سرعت ذرات جامد در حوالی هسته بستر حدود ۴۵ درصد کاهش می‌یابد. با افزایش اندازه قطر ذرات از ۵۰۰ تا ۶۰۰، ۱۴ درصد تجمع ذرات جامد در کف بستر افزایش می‌یابد. با افزایش اندازه قطر ذرات، دمای دانه‌ای نیز به طور تقریبی افزایش می‌یابد. همچنین سه مدل مختلف پسا مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل پسا شمال-آبراین کمترین سرعت رو به پایین (سرعت منفی) در نزدیکی دیوارها و کمترین سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) را در حوالی هسته بستر نسبت به سایر مدل‌های پسا پیش‌بینی می‌کند. همچنین مدل پسا شمال-آبراین بیشترین متوسط کسر حجمی ذرات جامد را نسبت به سایر مدل‌های پسا پیش‌بینی می‌کند. در ادامه، اثر تغییر سرعت هوای ورودی بررسی گردید. در نتیجه این مطالعه، با افزایش سرعت از ۰/۵۵۰ به ۰/۵۸۷، متوسط سرعت ذرات در حوالی هسته بستر حدود ۴۰ درصد افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** بسترسیال حبابی، جریان دوفازی، اویلرین، هیدرودینامیک، مدل پسا، قطر ذرات جامد، سرعت هوای ورودی

### Numerical Analysis and Study of Factors Affecting the Hydrodynamic Behavior of a Gas-Solid Bubbling Fluidized Bed with Particle Granular Behavior

Karimi Ahmadi, R.

Nazif, H. R.

Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

(Received: 2022/02/04, Revised: 2022/06/16, Accepted: 2022/07/19, Published: 2022/08/23)

#### ABSTRACT

In recent years, fluidized bed reactors have attracted much attention due to a number of features such as uniform temperature distribution, proper mixing phases, and high heat transfer rates. The high heat transfer rate in the fluidized bed depends on the hydrodynamic factors of the bubbling bed. Therefore, in this study, the effects of particle diameter variations, the inlet air velocity change, and the drag model alteration on the performance of Geldart Group B particles in a bubbling fluidized bed are examined by studying the mean axial velocity distribution of particles and the mean volume fraction distribution of particles in the bubbling fluidized bed. Thus, the Eulerian multiphase flow approach and the kinetic theory of granular flow are employed in this study. In this regard, particles with the diameters of 500  $\mu\text{m}$ , 530  $\mu\text{m}$ , 570  $\mu\text{m}$ , and 600  $\mu\text{m}$  are considered. As can be seen in the results, increasing the diameter of solid particles from 500  $\mu\text{m}$  to 600  $\mu\text{m}$  decreases the average velocity of the solid particles around the bed core by approximately 45% and increases the accumulation of solid particles in the bed bottom by 14%. Moreover, as the particle diameters increase, an approximate increase in the granular temperature is

۱- کارشناسی ارشد: rezakarimi0000@yahoo.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): nazif@eng.ikiu.ac.ir

witnessed. In addition, three different drag models have been studied in this paper. Compared to other drag models, the Syamlal-O'Brien model predicts the lowest downward velocity (negative velocity) near the walls, the lowest upward velocity (positive velocity) near the bed core, and the highest average volume fraction of solid particles. Furthermore, this study has investigated the effect of change in the inlet air velocity. As can be seen in the result of this study, increasing the velocity from 0.550 m/s to 0.587 m/s increases the average velocity of particles around the bed core by approximately 40%.

**Keywords:** Bubbling Fluidized Bed, Eulerian, Two-phase flow, Hydrodynamic, Drag model, Diameter of solid particles, Air inlet velocity



## فهرست علائم و اختصارات

$C_D$	ضریب پسا
$d$	قطر ذرات، m
$e$	ضریب برخورد
$F$	نیرو، N
$\bar{g}$	جاذبه، N/kg
$g_0$	تابع توزیع شعاعی
$\bar{I}$	تانسور تنش واحد
$K$	ضریب مبادله ممنتم بین فازها
$k_\theta \nabla \theta$	ضریب انتشار، kg/m.s
$P$	فشار، Pa
$Re$	عدد رینولدز
$\bar{v}$	سرعت، m/s
$v_{r,s}$	سرعت نهایی ذرات جامد، m/s
$\alpha$	علائم یونانی کسر حجمی
$\gamma \theta$	اضمحلال انرژی ناشی از برخورد ذرات، J
$\theta$	دمای دانه‌ای، $m^2/s^2$
$\lambda$	لزجت توده‌ای، kg/m.s
$\mu$	لزجت، kg/m.s
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\tau$	تانسور تنش، Pa
$\varphi_{gs}$	مبادله انرژی بین دو فاز گاز و جامد

## زیرنویس

coll	برخورد
g	گاز
kin	جنبشی
s	جامد

## ۱- مقدمه

سیستم‌های بسترسیال گاز-جامد در بسیاری از صنایع، مانند صنایع شیمیایی، نفت، متالورژی، داروسازی، پتروشیمی، کشاورزی، تولید برق، احتراق و تولید گاز و خشک کردن ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کنار تحقیقات آزمایشگاهی بسیاری که در مورد بسترسیال انجام شده است، شبیه‌سازی عددی یک ابزار قدرتمند و مفید برای بررسی رفتار جریان گاز-جامد بسترسیال حبایی

می‌باشد. یکی از روش‌های عددی، دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد. دینامیک سیالات محاسباتی به حل معادلات حاکم بر جریان سیال که به شکل معادلات مشتق جزئی می‌باشد می‌پردازد. دو رویکرد رایج در زمینه شبیه‌سازی بسترسیال حبایی، رویکرد اویلر-اویلری<sup>۱</sup> و اویلر-لاگرانژی<sup>۲</sup> می‌باشد. در رویکرد اویلر-اویلری هر دو فاز گاز و جامد، پیوسته در نظر گرفته می‌شوند و به‌طور پیوسته در هم نفوذ می‌کنند. در این رویکرد، معادلات بقای جرم و ممنتم به‌طور جداگانه برای هر فاز حل می‌شوند ولی در رویکرد اویلر-لاگرانژی فاز گاز به‌عنوان فاز پیوسته و فاز جامد به‌عنوان فاز گسسته در نظر گرفته می‌شوند. در رویکرد اویلر-اویلری برای بیان تنش‌های عمودی و مماسی، فشار جامد<sup>۳</sup>، تنش برشی<sup>۴</sup> و لزجت ذرات جامد از تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای<sup>۵</sup> استفاده می‌شود؛ بنابراین ترکیب رویکرد اویلر-اویلری و انرژی جنبشی دانه‌ای برای بیان رفتار هیدرودینامیک جریان بسترسیال بسیار مناسب می‌باشد. در ادامه، به پژوهش‌های آزمایشگاهی و محاسباتی در زمینه بسترسیال حبایی پرداخته می‌شود. واتچم و همکاران [۱] با استفاده از تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای ذرات، به بررسی اثر تغییر سرعت هوای ورودی بر روی خواص دینامیکی بسترسیال گاز-جامد پرداختند. نتایج مدل‌سازی آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی همخوانی داشت؛ همچنین بهجت و همکاران [۲] در پژوهش دیگری به بررسی اثر سرعت هوای ورودی به بستر بر روی دمای ذرات جامد در بسترسیال پرداختند. مارمو و همکاران [۳] به بررسی اثر تنش اصطکاکی<sup>۶</sup> میان ذرات جامد بر روی رفتار دینامیکی بسترسیال-جامد گاز پرداختند. آن‌ها در این پژوهش سه مدل تنش اصطکاکی جانسون و جکسون، شمال-ابراین<sup>۷</sup> و سریواستاوا را بر روی اندازه قطر حباب‌های بستر با نتایج آزمایشگاهی گیداسپاو<sup>۸</sup> مقایسه کردند. مشاهده شد که در این پژوهش مدل تنش اصطکاکی سریواستاوا از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی گیداسپاو برخوردار است.

<sup>1</sup> Euler-Euler<sup>2</sup> Euler-Lagrange<sup>3</sup> Solid Pressure<sup>4</sup> Shear Stress<sup>5</sup> Kinetic Theory of Granular Flow<sup>6</sup> Friction Stress<sup>7</sup> Syamlal-Obrien<sup>8</sup> Gidaspow

در بسترسیتال حبابی گاز- جامد انجام شده است. لیندبورگ و همکاران [۹] در پژوهشی، به بررسی مدل آشفتگی کا-اپسیلون بر روی ذرات گروه گلدارت A در بسترسیتال گاز- جامد پرداختند. در نتیجه این پژوهش مشاهده شد که بین رژیم جریان آرام و آشفته اختلافی مشاهده نمی‌شود. بنیاهیا و همکاران [۱۰] در پژوهشی، به بررسی اثر جریان آشفته بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیتال گاز- جامد پرداختند. گاو و همکاران [۱۱] در پژوهشی، به بررسی انواع مدل‌های رژیم جریان آشفتگی بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی و سرعت محوری ذرات در بسترسیتال گاز- جامد پرداختند. آن‌ها دریافتند مدل آشفته کا-اپسیلون آر-ان-جی<sup>۶</sup> در مقایسه با سایر مدل‌های آشفتگی از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. لوها و همکاران [۴] همچنین به بررسی و مقایسه رژیم جریان آشفته و آرام بر روی نتایج پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که تغییر رژیم از جریان آرام به جریان آشفته تأثیر اندکی بر روی نتایج دارد. خزری و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ای به بررسی انواع مدل‌های رژیم جریان آشفته بر روی هیدرودینامیک راکتور گازی ساز بسترسیتال حبابی پرداختند. این پژوهش نشان داد که مدل آشفتگی کا-اپسیلون آر-ان-جی از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. همچنین مشاهده شد که الگوی توزیع افت فشار در بستر در رژیم جریان آشفته متفاوت از رژیم جریان آرام است. همچنین وارگسه و واکامالا [۷] در تحقیقی به بررسی انواع مدل‌های آشفتگی بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیتال حبابی سه‌بعدی پرداختند. نتایج نشان داد که انتخاب رژیم جریان آشفته کا-اپسیلون به همراه مدل پسا کمینه‌سازی انرژی چند مقیاسی از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. همچنین بسیاری از پژوهش‌هایی که در زمینه مطالعه برخورد بین ذرات و ضریب برخورد بین ذرات و دیواره پرداخته‌اند. لوها و همکاران [۱۳] مطالعه‌ای در جهت بررسی اثر ضریب برخورد آینه‌ای<sup>۷</sup> بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیتال گاز- جامد انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش شش ضریب برخورد آینه‌ای<sup>۸</sup> را بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی و سرعت محوری ذرات در

پژوهش‌های بسیاری به بررسی و مقایسه مدل‌های پسا<sup>۱</sup> در بسترسیتال حبابی گاز- جامد پرداختند. لوها و همکاران [۴] در پژوهشی، به بررسی و مقایسه چهار مدل پسا گیداسپاو، شملال-ابراین، کمینه‌سازی انرژی چندمقیاسی<sup>۲</sup> (ای-ام-ام-اس) و مک‌کین بر روی توزیع متوسط زمانی دمای دانه‌ای و سرعت محوری ذرات جامد در بسترسیتال گاز- جامد پرداختند. زینانی و همکاران [۵] پژوهشی در جهت بررسی اثر مدل پسا بر روی خواص سیالیت بسترسیتال گاز- جامد انجام دادند. آن‌ها از این پژوهش دریافتند مدل پسا گیداسپاو و هیل-کوچ-لند<sup>۳</sup> در پیش‌بینی شکل حباب‌ها از اعتبار خوبی برخوردار می‌باشند. همچنین وانگ و همکاران [۶] در تحقیقی به مقایسه مدل‌های پسا بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیتال حبابی سه‌بعدی پرداختند. در این پژوهش سه مدل پسا گیداسپاو، شملال-ابراین و ون-یو<sup>۴</sup> بررسی شد. این پژوهش نشان داد که مدل پسا گیداسپاو به خوبی رفتار هیدرودینامیک بسترسیتال را پیش‌بینی می‌کند. در تحقیق دیگری وارگسه و واکامالا [۷] به بررسی انواع مدل‌های پسا بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیتال حبابی سه‌بعدی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش سه مدل پسا گیداسپاو، شملال-ابراین و کمینه‌سازی انرژی چند مقیاسی (ای-ام-ام-اس) را بررسی کردند. نصرافهانی و همکاران [۸] در پژوهشی، به بررسی و مقایسه مدل‌های پسا گیداسپاو، شملال-ابراین و ون-یو با استفاده از توزیع رنگی سرعت هوا و کسر حجمی ذرات جامد در زمان‌های مختلف به صورت لحظه‌ای با نتایج آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش از ضرایب برخورد بین ذرات<sup>۵</sup> ۰/۹ و ۰/۹۹ استفاده نمودند. این پژوهش نشان داد که با افزایش ضریب برخورد، افزایش و بالا رفتن شدت و قدرت حباب‌ها و انبساط بستر درون راکتور صورت گرفته است. همچنین مقایسه مدل‌های پسا مختلف نشان داد که برای ذرات از نوع گلدارت B، سیالیت بستر تابع ضعیفی از مدل به‌کاررفته برای پیش‌گویی پسا بوده و نتایج استفاده از مدل‌های متفاوت با یکدیگر تفاوت قابل ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهد؛ همچنین پژوهش‌هایی در زمینه بررسی رژیم جریان آشفته

<sup>1</sup> Drag Models

<sup>2</sup> The Energy Minimization Multi-Scale

<sup>3</sup> Hill-Koch-Land

<sup>4</sup> Wen-Yu

<sup>5</sup> Restitution Coefficient

<sup>6</sup> K-e RNG

<sup>7</sup> Specularity Coefficient

<sup>8</sup> Specularity Coefficient

بخش‌های مختلف ناحیه سیالیت به‌وضوح مشاهده می‌شود. همچنین اثر تغییر سرعت سیال ورودی، بالاتر از سرعت سیالیت حبابی به‌ویژه بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی و سرعت فاز جامد در بخش‌های مختلف ناحیه بستر به تفصیل مورد بحث قرار نگرفته است؛ بنابراین، هدف کار حاضر، بررسی اثرات اندازه قطر ذرات، سرعت هوای ورودی و مدل‌های پسا بر روی عملکرد ذرات گروه گلدات B در نواحی مختلف بسترسیال حبابی به‌وسیله مطالعه توزیع متوسط زمانی سرعت محوری ذرات، کسر حجمی ذرات، دمای دانه‌ای ذرات و توزیع رنگی کسر حجمی و سرعت ذرات در بسترسیال می‌باشد. برای بررسی اثر تغییر اندازه قطر ذرات بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال، چهار ذره با قطرهای (  $600 \mu\text{m}$ ،  $570 \mu\text{m}$ ،  $500 \mu\text{m}$ ،  $500 \mu\text{m}$  ) در نظر گرفته شده است. همچنین در جهت مطالعه اثر سرعت هوای ورودی بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال، سه سرعت (  $0/575 \text{ m/s}$ ،  $0/587 \text{ m/s}$ ،  $0/550 \text{ m/s}$  ) در نظر گرفته شده است. برای بررسی اثر مدل پسا بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال، سه مدل پسا (گیداسپاو، شمال-آبراین و ون-یو) انتخاب شده است. برای انجام این پژوهش، معادلات حاکم بر رویکرد جریان دوفازی اوپلرین به همراه تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای ذرات جامد در جریان هوای آرام با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به روش حجم محدود حل شده است.

## ۲- مدل‌سازی بسترسیال حبابی گاز-جامد

طرح‌واره بسترسیال حبابی دوبعدی با عرض  $0/155 \text{ m}$  و ارتفاع  $0/4 \text{ m}$  در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. قطر ذرات جامد (  $600 \mu\text{m}$ ،  $570 \mu\text{m}$ ،  $500 \mu\text{m}$ ،  $500 \mu\text{m}$  ) و چگالی ذرات جامد  $2500 \text{ kg/m}^3$  انتخاب شده است. ذرات جامد از نوع شن سیلیس و از گروه گلدات B انتخاب شده است، به این دلیل که به محض اینکه سرعت گاز از سرعت حداقل سیالیت بیشتر شود این ذرات به راحتی دچار سیالیت شده و در بستر، حباب‌های گازی تشکیل می‌شود. هوا به عنوان عامل سیال‌ساز از کف رآکتور با سرعت یکنواخت وارد بستر می‌شود. بسترسیال ابتدا تا ارتفاع  $0/2 \text{ m}$  و با کسر حجمی  $0/4$  با ذرات جامد شن سیلیس پر شده است. گزلبوم و همکاران [۱۸] در مطالعه‌ای نشان دادند، اگر

ارتفاعات مختلف نسبت به کف بستر بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش دریافتند، ضریب برخورد آینه‌ای برابر با یک از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. همچنین لوها و همکاران [۱۴] در پژوهش دیگری به بررسی اثر ضریب برخورد بین ذرات پرداختند. آن‌ها در این پژوهش دریافتند، ضریب برخورد بین ذرات برابر با  $0/95$  و  $0/99$  از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. کشریمایوم و همکاران [۱۵] در پژوهشی، به بررسی اثر ضریب برخورد بین ذرات بر روی انبساط بسترسیال حبابی پرداختند. این پژوهش نشان داد که با افزایش ضریب برخورد بین ذرات از  $0/9$  تا  $0/99$  انبساط بستر افزایش می‌یابد. ورما و همکاران [۱۶] در پژوهشی به بررسی اثر اندازه قطر بستر بر روی حرکت ذرات جامد و حباب‌ها به کمک رویکرد جریان دوفازی اوپلرین و تئوری انرژی جنبشی دانه‌ای در بسترسیال سه‌بعدی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش ۵ اندازه قطر بستر را بررسی کردند. در این پژوهش مشاهده شد که با افزایش اندازه قطر بستر، کسر حجمی ذرات در نزدیکی دیوارها افزایش می‌یابد. اندازه و سرعت حباب‌ها نیز با افزایش اندازه قطر بستر افزایش می‌یابد. قاسمی و همکاران [۱۷] در پژوهشی، به بررسی اختلاط ذرات جامد در یک بسترسیال با استفاده از روش پردازش تصاویر پرداختند. در این مطالعه، اثر چگالی در اختلاط ذرات جامد در یک بسترسیال، به‌صورت تجربی بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که چگالی ذرات شن (ماده بستر) نقش مهمی در کیفیت اختلاط ذرات بستر دارد.

تجزیه و تحلیل کامل مطالعات قبلی نشان می‌دهد که در بسیاری از پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده به بررسی عوامل مختلفی مانند قطر و ارتفاع بستر، ضریب برخورد آینه‌ای، ضریب برخورد ذرات با یکدیگر، تغییر رژیم جریان، تنش اصطکاکی و مقایسه مدل‌های پسا مختلف بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال گاز-جامد پرداخته شده است. پیشینه مطالعات نشان می‌دهد که تعداد بسیار کمی از مطالعات موجود به موضوع درک جنبه‌های دقیق تغییرات قطر ذرات گروه گلدات B بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال حبابی گاز-جامد متمرکز شده‌اند. به‌ویژه، وجود خلأ مطالعاتی در مطالعه اثر قطر ذره بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی، دمای دانه‌ای و سرعت فاز جامد در

### ۳- معادلات حاکم بر بسترسیال حبایی گاز-جامد

در این پژوهش، از رویکرد اویلر-اویلری برای بررسی رفتار هیدرودینامیک بسترسیال گاز-جامد استفاده شده است. فازهای گاز و جامد پیوسته در نظر گرفته شده‌اند و دائماً در هم نفوذ می‌کنند. در این رویکرد، معادلات بقای جرم و ممنتوم جداگانه برای هر فاز حل می‌شوند.

کسر حجمی نشان دهنده میزان حجمی از فضا است که هر فاز اشغال می‌کند. کسر حجمی تابعی پیوسته از فضا و زمان است. جمع کسر حجمی فازها برابر با یک می‌باشد. معادلات حاکم هر فاز به‌طور جداگانه بیان می‌شود.

$$\alpha_g + \alpha_s = 1 \quad (1)$$

$\alpha_g$  کسر حجمی فاز گاز و  $\alpha_s$  کسر حجمی فاز جامد می‌باشد.

### ۳-۱- معادلات بقای جرم

معادلات پیوستگی برای فاز گاز و فاز جامد به شکل زیر بیان می‌شوند:

برای فاز گاز:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \quad (2)$$

برای فاز جامد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (3)$$

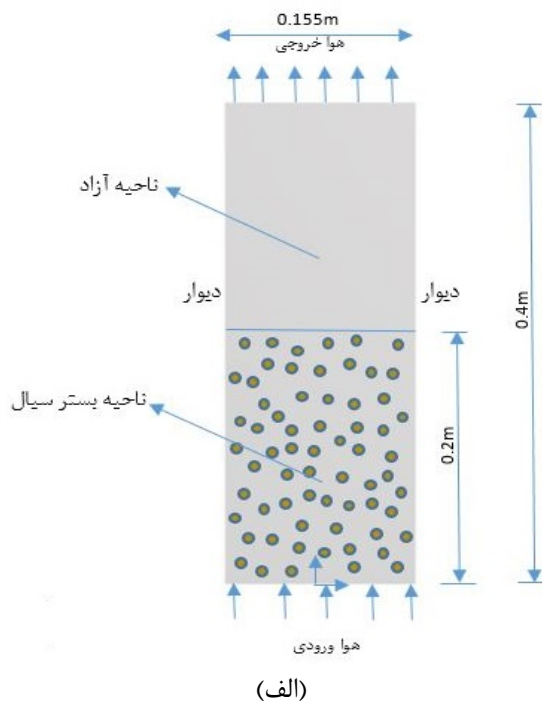
$\vec{v}_g$  سرعت فاز گاز،  $\rho_g$  چگالی فاز گاز،  $\rho_s$  چگالی فاز جامد و  $\vec{v}_s$  سرعت فاز جامد می‌باشند.

### ۳-۲- معادلات ممنتوم

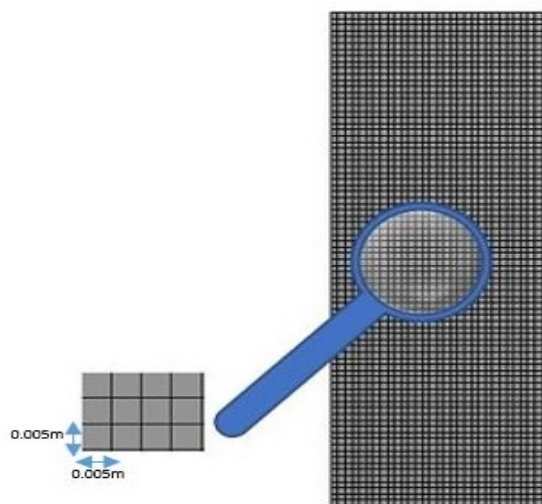
معادله ممنتوم برای فاز گاز:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = \\ -\alpha_g \nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \vec{g} + \\ K_{gs} (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \end{aligned} \quad (4)$$

اندازه سلول ۱۰ برابر قطر ذره باشد، در این صورت نتایج حل عددی از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است. در این تحقیق، اندازه شبکه یکنواخت و برابر ۰/۰۰۵ m می‌باشد. در شکل (۱-ب) شبکه محاسباتی بسترسیال حبایی مورد مطالعه نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۱). (الف) طرحواره رآکتور بسترسیالی حبایی (ب) شبکه محاسباتی بسترسیال حبایی مورد مطالعه در ادامه، معادلات حاکم بر بسترسیال مورد مطالعه قرار گرفته است. رویکرد مورد استفاده برای حل معادلات حاکم بر بسترسیال، رویکرد اویلری می‌باشد.

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g Re_s} \left[ 1 + 0.15(\alpha_g Re_s)^{0.687} \right] \quad (9)$$

در رابطه بالا عدد رینولدز فاز جامد به شکل زیر

تعریف می‌شود:

$$Re_s = \frac{\rho_g d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\mu_g} \quad (10)$$

با توجه به معادله ذکر شده در رابطه ۱۰، عدد رینولدز برای ذرات جامد با اندازه ۵۰۰ μm، ۱۹/۸۶ محاسبه شده است. با توجه به این که عدد رینولدز محاسبه شده برای ذرات جامد بسیار پایین می‌باشد؛ لذا جریان در راکتور آرام می‌باشد.

همچنین اگر  $\alpha_g < 0.8$  باشد، ضریب مبادله ممنتم بین دو فاز گاز-جامد به شکل زیر بیان می‌شود:

$$K_{gs} = 150 \frac{\alpha_s \mu_g (1 - \alpha_g)}{\alpha_g d_s^2} + \quad (11)$$

$$1.75 \frac{\rho_g \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s}$$

### ۳-۳-۲- ضریب پسا مدل شمال-اُبراین

ضریب مبادله ممنتم بین دو فاز گاز-جامد در مدل پسا شمال-اُبراین به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۰]:

$$K_{gs} = \frac{3}{4} \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g}{d_s v_{r,s}^2} C_d \left( \frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) |\vec{v}_s - \vec{v}_g| \quad (12)$$

در رابطه فوق  $v_{r,s}$  سرعت نهایی ذرات فاز جامد می‌باشد و به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$v_{r,s} = 0.5 \left( \frac{A - 0.06 Re_s + \sqrt{(0.06 Re_s)^2 + 0.12 Re_s}}{\sqrt{(2B - A) A^2}} \right) \quad (13)$$

$$A = \alpha_g^{4.14} \quad (14)$$

$$\begin{cases} B = 0.8 \alpha_g^{1.28} \text{ for } \alpha_g \leq 0.85 \\ B = 0.8 \alpha_g^{2.65} \text{ for } \alpha_g > 0.85 \end{cases} \quad (15)$$

معادله ممنتم برای فاز جامد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = \\ -\alpha_s \nabla P - \nabla P_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \bar{g} + \\ K_{sg} (\vec{v}_s - \vec{v}_g) \end{aligned} \quad (5)$$

که در عبارت فوق فشار مشترک بین دو فاز،  $\tau_g$  تانسور تنش فاز گاز،  $\tau_s$  تانسور تنش فاز جامد،  $\bar{g}$  شتاب جاذبه زمین،  $K_{gs}$  ضریب مبادله ممنتم بین دو فاز و  $P_s$  فشار فاز جامد می‌باشند.

$$\bar{\tau}_g = \alpha_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T) + \alpha_g \left( \lambda_g - \frac{2}{3} \mu_g \right) \nabla \cdot \vec{v}_g \bar{I} \quad (6)$$

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \alpha_s \left( \lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (7)$$

$\lambda_g$  لزجت توده‌ای فاز گاز،  $\mu_g$  لزجت برشی فاز گاز،  $\lambda_s$  لزجت توده‌ای فاز جامد و  $\mu_s$  لزجت برشی فاز جامد می‌باشند.

### ۳-۳-۳- مدل‌های پسا گاز-جامد

این بخش به بررسی روابط و معادلات سه مدل پسا مورد استفاده در این پژوهش می‌پردازد.

#### ۳-۳-۱- ضریب پسا مدل گیداسپاو

یکی از مدل‌های پسا که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، مدل پسا گیداسپاو می‌باشد. این پسا از ترکیب معادلات ون-یو و ارگان<sup>۱</sup> به دست می‌آید [۱۹].

در این مدل اگر  $\alpha_g > 0.8$  باشد، ضریب مبادله ممنتم بین دو فاز گاز-جامد را به شکل زیر می‌توان نوشت:

$$K_{gs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \alpha_g^{-2.65} \quad (8)$$

در رابطه فوق،  $C_D$  ضریب پسا و  $d_s$  قطر ذرات فاز جامد می‌باشند.

<sup>1</sup> Ergun



برشی نیز شامل لزجت برخورد<sup>۴</sup> و لزجت جنبشی<sup>۵</sup> ذرات است.

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} \quad (20)$$

### ۳-۶-۱- لزجت برخورد

لزجت برخورد توسط رابطه زیر بیان می‌شود [۱۹ و ۲۳]:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \alpha_s \quad (21)$$

### ۳-۶-۲- لزجت جنبشی

لزجت جنبشی توسط رابطه زیر بیان می‌شود [۲۳]:

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (\theta_s \pi)^{\frac{1}{2}}}{6(3 - e_{ss})} \begin{bmatrix} 1 + \frac{2}{5}(1 + e_{ss}) \\ (3e_{ss} - 1) \\ \alpha_s g_{0,ss} \end{bmatrix} \quad (22)$$

### ۳-۷- لزجت توده‌ای

لزجت توده‌ای نشان دهنده مقاومت ذرات جامد دانه‌ای در برابر انقباض و انبساط است [۲۴]:

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

### ۳-۸- دمای دانه‌ای ذرات

دمای دانه‌ای  $\theta_s$  فاز جامد با انرژی جنبشی ذرات رابطه دارد. معادله انتقال از تئوری جنبشی به دست می‌آید و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \theta_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = \left( -P_s \bar{I} + \bar{\tau}_s \right) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma \theta_s + \varphi_{gs} \quad (24)$$

### ۳-۳- ضریب پسا مدل ون-یو

ضریب مبادله ممنتم بین دو فاز گاز-جامد در مدل ون-یو به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$K_{gs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \alpha_g^{-2.65} \quad (16)$$

که:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g Re_s} \left[ 1 + 0.15 (\alpha_g Re_s)^{0.687} \right] \quad (17)$$

### ۳-۴- فشار جامد

فشار جامد در معادله انتقال ممنتم فاز جامد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (18)$$

در رابطه فوق،  $e_{ss}$  ضریب برخورد بین ذرات را نشان می‌دهد، وقتی این ضریب برابر با یک باشد برخورد به‌طور کامل الاستیک است. ولی وقتی این ضریب برابر با صفر باشد برخورد پلاستیک است.  $g_{0,ss}$  تابع توزیع شعاعی<sup>۱</sup> و  $\theta_s$  دمای دانه‌ای متناسب با انرژی جنبشی نوسانی حرکت ذرات می‌باشد.

### ۳-۵- تابع توزیع شعاعی

این تابع زمانی که فاز جامد دانه‌ای باشد، احتمال برخورد بین ذرات را تصحیح می‌کند [۲۲].

$$g_{0,ss} = \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^3 \right]^{-1} \quad (19)$$

در رابطه بالا مقدار  $\alpha_{s,max} = 0.63$

### ۳-۶- تنش برشی جامد

تانسور تنش ذرات جامد بر اثر تبادل ممنتم بین ذرات بر اثر چرخش یا برخورد ذرات به وجود می‌آید. تانسور تنش ذرات جامد شامل لزجت برشی<sup>۲</sup> و لزجت توده‌ای<sup>۳</sup> می‌باشد. لزجت

<sup>4</sup> Collisional Viscosity

<sup>5</sup> Kinematic Viscosity

<sup>1</sup> Radial Distribution Function

<sup>2</sup> Shear Viscosity

<sup>3</sup> Bulk Viscosity

است. در خروجی رآکتور از شرط مرزی فشار خروجی (فشار اتمسفر) استفاده شده است. نیروهای بین دو فاز گاز-جامد شامل نیروهای پسا، برا<sup>۲</sup> و جرم مجازی<sup>۳</sup> می‌باشند. در بسیاری از مقالات، اشاره شده است که نیروی برا برای ذرات با قطر بزرگ غالب می‌باشد؛ اما هنگامی که قطر ذرات بسیار کوچک‌تر از فاصله بین ذرات باشد، در نظر گرفتن نیروی برا مناسب نیست؛ بنابراین اثر نیروی برا برای بسترسیال پر شده با ذرات بسیار کوچک صرف‌نظر می‌شود. همچنین در مقالات اشاره شده است که با توجه به این که در بسترسیال حبابی ذرات جامد با یکدیگر برخورد/ تماس پیدا می‌کنند و مسیر آزاد یک‌ذره بسیار کوتاه است، از اثر نیرو برا صرف‌نظر می‌شود [۲۹، ۲۸، ۲۷ و ۳۰]. همچنین با توجه به این که چگالی فاز جامد بسیار بزرگ‌تر از چگالی فاز گاز می‌باشد از نیروی جرم مجازی نیز صرف‌نظر شده است [۲۷ و ۳۰]؛ بنابراین تنها نیروی تأثیرگذار بین دو فاز که نقش مهمی را ایفا می‌کند نیروی پسا می‌باشد.

#### ۵- روش حل معادلات حاکم بر بسترسیال حبابی گاز-جامد

در این تحقیق برای هم‌بسته کردن<sup>۴</sup> سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل<sup>۵</sup> و برای فرموله کردن جریان ناپایا از مرتبه دوم ضمنی<sup>۶</sup> استفاده شده است. جهت گسسته‌سازی کسر حجمی و ممنتوم، الگوریتم کوپیک<sup>۷</sup> به کار برده شده است. مدت‌زمان شبیه‌سازی ۳۰ s و مدت‌زمان متوسط گیری زمانی در این پژوهش ۲۵ s (۵ s تا ۳۰ s) می‌باشد. در این پژوهش برای همگرایی و پایداری بهتر از گام زمانی ۰/۰۰۰۲ استفاده شده است. معیار همگرایی برای حداکثر باقیمانده‌ها بین دو تکرار روی ۰/۰۰۰۱ تنظیم شده است. تمام شبیه‌سازی‌های این پژوهش در حالت موازی با پردازنده هشت هسته‌ای اینتل زئون ایکس ۵۵۷۰ با فرکانس ۲٫۹۳ گیگاهرتز<sup>۸</sup> و با رم ۸ گیگ انجام شده است. مدت‌زمان هر شبیه‌سازی، در جدول ۱ مشخص شده است.

<sup>2</sup> Lift Force

<sup>3</sup> Virtual Mass

<sup>4</sup> Coupling

<sup>5</sup> Simple

<sup>6</sup> Second Order Implicit Scheme

<sup>7</sup> Quick

<sup>8</sup> Intel Xeon X5570 2.93GHz

در رابطه (۲۴)،  $(-P_s \bar{I} + \bar{\tau}_s): \nabla \bar{v}_s$  انرژی تولیدی توسط تانسور تنش جسم جامد،  $k_{\theta_s} \nabla \theta_s$  نفوذ،  $\gamma \theta_s$  اضمحلال انرژی ناشی از برخورد و  $\varphi_{gs}$  مبادله انرژی بین دو فاز گاز و جامد می‌باشند.

برای بسترسیال آرام و متراکم می‌توان از جمله‌های نفوذ و جابه‌جایی صرف‌نظر کرد:

$$(-P_s \bar{I} + \bar{\tau}_s): \nabla \bar{v}_s - \gamma \theta_s + \varphi_{gs} = 0 \quad (25)$$

همچنین دو جمله سمت راست معادله بالا را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\gamma \theta_s = \frac{12(1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \pi^2} \alpha_s^2 \rho_s \theta_s^2 \quad (26)$$

$$\varphi_{gs} = -3K_{gs} \theta_s \quad (27)$$

#### ۴- شرایط مرزی بسترسیال حبابی گاز-جامد

در مرز ورودی رآکتور بسترسیال، هوا بدون ذرات با سرعت یکنواخت (۰/۵۵۵۰ m/s، ۰/۵۷۵ m/s، ۰/۵۸۷ m/s) در بازه ۲/۲ برابر حداقل سرعت سیالیت تا ۲/۴ حداقل سرعت سیالیت که از رابطه سن خوزه و همکاران [۲۵] محاسبه شده است از کف رآکتور وارد بستر می‌شود، بنابراین در ورودی، کسر حجمی فاز جامد برابر با صفر می‌باشد. در دیوارها برای فاز گاز از شرط مرزی بدون لغزش<sup>۱</sup> و برای فاز جامد از شرط مرزی لغزش جانسون و جکسون [۲۶] استفاده شده است که رابطه آن را به شکل زیر می‌توان نوشت:

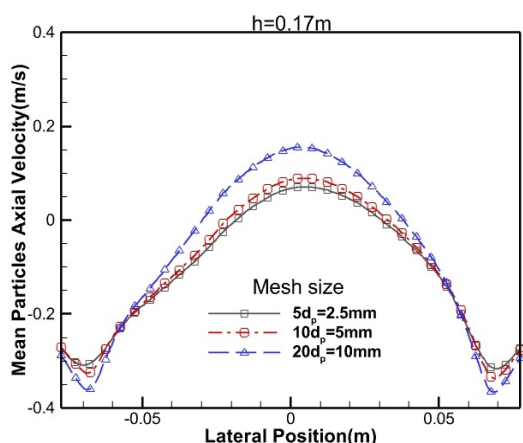
$$v_{sw} = -A \frac{\partial v}{\partial n} \quad (28)$$

ضریب لغزش A تابعی از ضریب برخورد آئینه‌ای به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$A = \frac{6\mu_s \alpha_{s,max}}{\sqrt{3\pi\varphi\rho_s \varepsilon_s g_{0,ss}} \sqrt{\theta}} \quad (29)$$

در این پژوهش از ضریب برخورد آئینه‌ای برابر با یک مطابق با پژوهش لوها و همکاران [۶] استفاده شده است. ضریب برخورد بین ذرات جامد نیز ۰/۸۵ در نظر گرفته شده

<sup>1</sup> No Slip



شکل (۲). متوسط زمانی سرعت محوری ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۷ m نسبت به کف بستر برای سه شبکه مختلف مورد مطالعه

### ۷- اعتبارسنجی پژوهش

پیش از پرداختن به مطالعه اثر اندازه قطر ذرات، مدل‌های مختلف پسا و اندازه سرعت هوای ورودی، لازم است اعتبارسنجی نسبت به کارهای قبلی صورت پذیرد. بدین منظور، از نتایج ارائه شده توسط لوها و همکاران<sup>۱</sup> [۱۴] استفاده گردیده است. در شکل (۳-الف) و (۳-ب)، جهت اعتبارسنجی نتایج این پژوهش، متوسط زمانی سرعت ذرات جامد در ارتفاع ۰/۱۴ m و ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر با نتایج لوها و همکاران [۱۴] مورد مقایسه قرار گرفته است. هندسه و شرایط مرزی مسئله مشابه شرایط پژوهش [۱۴] است. حداکثر اختلاف بین نتایج در نواحی دیوارهای بستر دیده می‌شود. حداکثر اختلاف بین نتایج حدود ۸/۱٪ می‌باشد.

### ۸- نتایج مطالعه بسترسیال حبابی گاز-جامد

#### ۸-۱- بررسی اثر تغییر اندازه قطر ذرات جامد بر روی توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات جامد

در این بخش از تحقیق، اثر تغییر اندازه قطر ذرات بر روی توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات جامد مطالعه شده است. برای بررسی این ویژگی، هوا با سرعت یکنواخت  $0.587 \mu\text{m}$  وارد بستر می‌شود. مدل پسا مورد استفاده در این قسمت، مدل پسا گیداسپاو می‌باشد. چهار نوع قطر ذره با اندازه‌های ( $600 \mu\text{m}$ ،  $570 \mu\text{m}$ ،  $500 \mu\text{m}$ ،  $500 \mu\text{m}$ ) انتخاب شده است. شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) توزیع

جدول (۱). مدت زمان هر اجرای پژوهش حاضر

شماره اجرا	نوع اجرا			زمان اجرا
	سرعت هوا ( $m/s$ )	مدل پسا	قطر ذرات ( $\mu m$ )	
۱	۰/۵۸۷	گیداسپاو	۵۰۰	۵۰ ساعت و ۱۰ دقیقه
۲			۵۳۰	۴۸ ساعت و ۱۵ دقیقه
۳			۵۷۰	۵۶ ساعت و ۴۰ دقیقه
۴			۶۰۰	۵۴ ساعت و ۵ دقیقه
۵	شمال-ابراین	ون-یو	۵۳۰	۴۹ ساعت و ۴۰ دقیقه
۶				۵۲ ساعت و ۳۰ دقیقه
۷	گیداسپاو	۰/۵۷۵	۵۳۰	۵۷ ساعت و ۵ دقیقه
۸				۵۸ ساعت و ۲۰ دقیقه

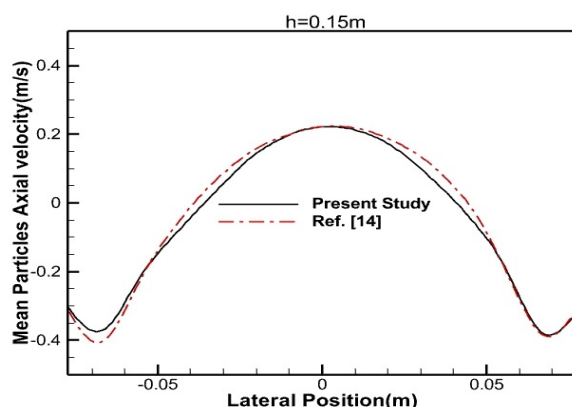
### ۶- مطالعه استقلال از شبکه

در جهت مطالعه استقلال جواب‌های حل عددی از تعداد و اندازه شبکه، از سه شبکه با اندازه‌های مختلف استفاده شده است. یک شبکه درشت با اندازه ۲۰ برابر قطر ذره، یک شبکه متوسط با اندازه ۱۰ برابر قطر ذره و یک شبکه ریز با اندازه ۵ برابر قطر ذره مورد مطالعه قرار گرفته است. متوسط زمانی سرعت ذرات جامد در ارتفاع ۰/۱۷ m نسبت به کف بستر برای سه شبکه در شکل ۲ رسم شده است. شکل نشان می‌دهد، میزان اختلاف متوسط زمانی سرعت ذرات شن سیلیس در دو شبکه ریز و درشت حدود ۲۲ درصد می‌باشد. درحالی‌که با ریزتر کردن شبکه و استفاده از شبکه محاسباتی متوسط، این اختلاف به کمتر از ۵ درصد می‌رسد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف قابل توجهی بین دو شبکه ریز و متوسط مورد مطالعه وجود ندارد؛ بنابراین در این پژوهش از شبکه متوسط با اندازه ۱۰ برابر قطر ذره استفاده می‌شود. همچنین بسیاری از محققین از اندازه شبکه مشابهی در پژوهش‌های مرتبط با بسترسیال استفاده کرده‌اند.

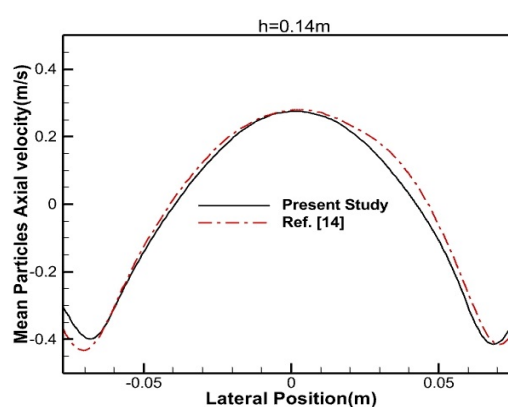
<sup>1</sup> Loha et.al

منفی) ذرات جامد در دیوارها کاهش می‌یابد. شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) نشان می‌دهند حداکثر سرعت ذرات جامد در نزدیکی هسته بستر و حداقل سرعت نیز در حوالی دیوارهای بستر رخ می‌دهد. سرعت در نزدیکی دیوارهای بستر به دلیل تجمع ذرات کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد، ذرات جامد در حوالی دیوارها به سمت پایین و در هسته بستر به سمت بالا حرکت می‌کنند و در نتیجه جریان گردابی به وجود می‌آید. حداقل و حداکثر سرعت ذرات جامد در ارتفاع‌های ۰/۱ m و ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر برای مقادیر مختلف قطر ذرات در جدول ۲ نشان داده شده است.

متوسط زمانی سرعت ذرات جامد را در ارتفاع‌های ۰/۱ m و ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات جامد برای هر چهار قطر با اندازه‌های مختلف مشابه می‌باشد. همچنین، ذرات با قطر ۵۰۰  $\mu\text{m}$  بیشترین و ذرات با قطر ۶۰۰  $\mu\text{m}$  کمترین متوسط سرعت را در هسته بستر دارا می‌باشند؛ بنابراین با افزایش اندازه قطر ذرات، به تدریج متوسط زمانی سرعت ذرات کاهش می‌یابد. به این دلیل که هر چه اندازه قطر ذرات کوچک‌تر باشد، بیشتر تحت تأثیر انتقال منتم بین دو فاز گاز-جامد و سرعت هوا قرار می‌گیرند. هر چه ارتفاع نسبت به کف بستر کمتر شود، متوسط زمانی سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) ذرات جامد به‌طور تقریبی در هسته بستر افزایش و متوسط سرعت رو به پایین (سرعت

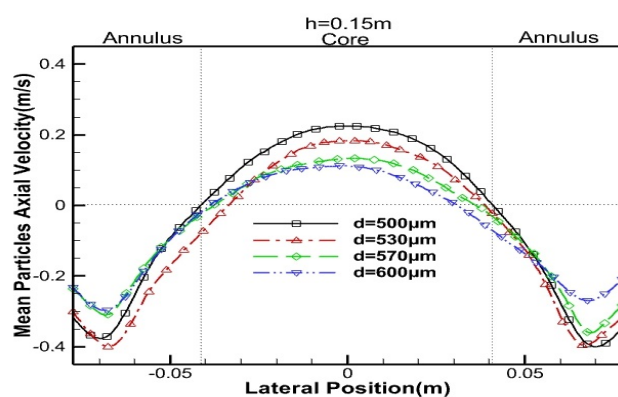


(ب)

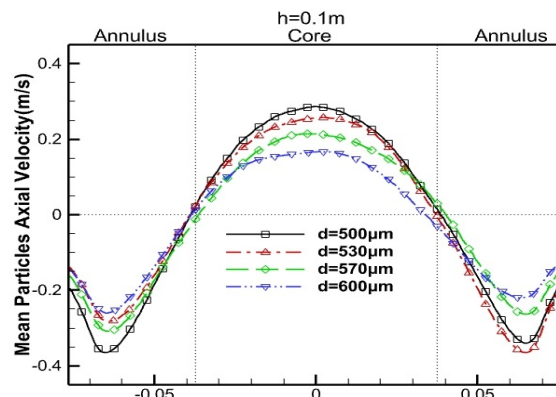


(الف)

شکل (۳). الف) متوسط زمانی سرعت محوری ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۴ m نسبت به کف بستر، ب) متوسط زمانی سرعت محوری ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر در مطالعه حاضر



(ب)



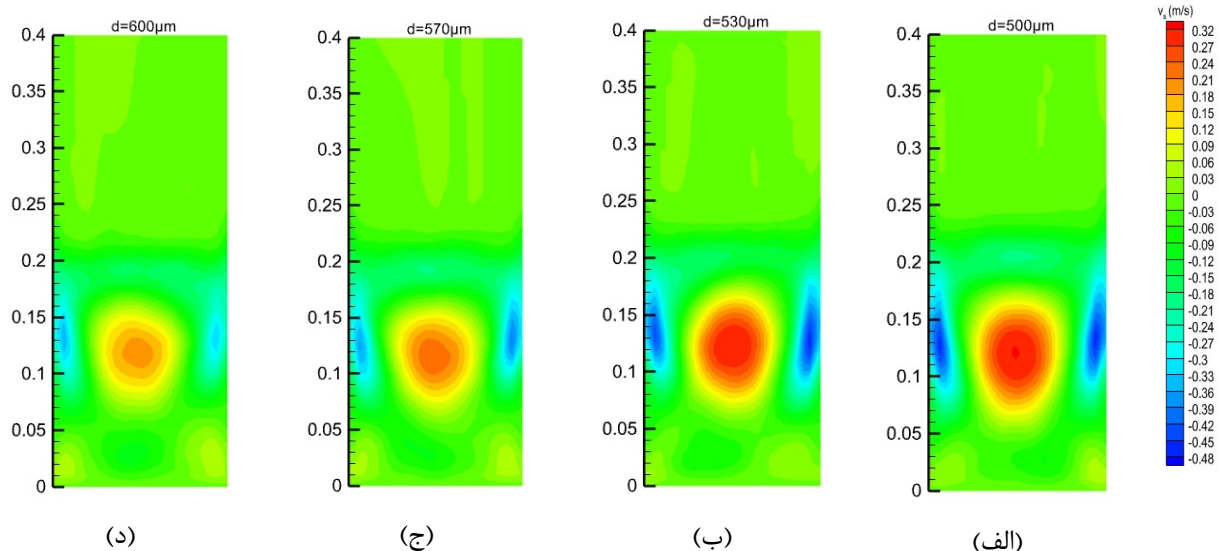
(الف)

شکل (۴): الف) اثر تغییر قطر ذرات بر روی متوسط زمانی سرعت محوری ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱ m نسبت به کف بستر ب) اثر تغییر قطر ذرات بر روی متوسط زمانی سرعت محوری ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر در مطالعه حاضر

شکل ۵ توزیع رنگی متوسط زمانی سرعت ذرات جامد را برای چهار قطر (  $600 \mu\text{m}$ ،  $570 \mu\text{m}$ ،  $500 \mu\text{m}$ ،  $500 \mu\text{m}$  ) نشان می‌دهد. توزیع رنگی متوسط زمانی سرعت ذرات جامد برای هر چهار قطر با اندازه‌های مختلف تقریباً مشابه می‌باشد. حداکثر سرعت ذرات در مرکز بستر به دلیل تجمع کمتر ذرات و حداقل سرعت در دیوارها به دلیل تجمع بیشتر ذرات رخ می‌دهد. هر چه قطر ذره کوچک‌تر باشد، تمایل به تجمع در دیوارهای بستر افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش قطر ذرات، سرعت رو به پایین (سرعت منفی) و سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) ذرات افزایش می‌یابد.

جدول (۲). حداقل و حداکثر سرعت ذرات جامد

قطر ذرات ( $\mu\text{m}$ )	حداقل سرعت ذرات (m/s)		حداکثر سرعت ذرات (m/s)	
	h=0.1m	h=0.15m	h=0.1m	h=0.15m
۵۰۰	-۰/۳۵۵۴	-۰/۳۹۱۸	۰/۲۸۴۱	۰/۲۲۴۱
۵۳۰	-۰/۳۵۷۰	-۰/۳۹۶۴	۰/۲۵۷۰	۰/۱۸۳۶
۵۷۰	-۰/۳۰۴۵	-۰/۳۵۸۸	۰/۲۱۴۱	۰/۱۳۲۵
۶۰۰	-۰/۲۵۳۴	-۰/۲۹۵۷	۰/۱۶۷۰	۰/۱۱۱



شکل (۵). الف) توزیع رنگی متوسط زمانی سرعت ذرات با قطر  $500 \mu\text{m}$  ب) توزیع رنگی متوسط زمانی سرعت ذرات با قطر  $530 \mu\text{m}$  ج) توزیع رنگی متوسط زمانی سرعت ذرات با قطر  $570 \mu\text{m}$  د) توزیع رنگی متوسط زمانی سرعت ذرات با قطر  $600 \mu\text{m}$  در مطالعه حاضر

در کف بستر دارا می‌باشند. با افزایش اندازه قطر ذرات، ذرات بیشتر تحت تأثیر نیروی گرانش و لختی قرار می‌گیرند و به طبع آن کسر حجمی ذرات در نزدیکی کف بستر افزایش می‌یابد. با افزایش اندازه قطر ذرات از  $500 \mu\text{m}$  تا  $600 \mu\text{m}$ ، ۱۴ درصد تجمع ذرات جامد در کف بستر افزایش می‌یابد. همچنین با گذشت زمان، ذرات با قطر بزرگ‌تر تمایلشان نسبت به رسوب و چسبیدن به کف بستر نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش اندازه قطر ذرات،

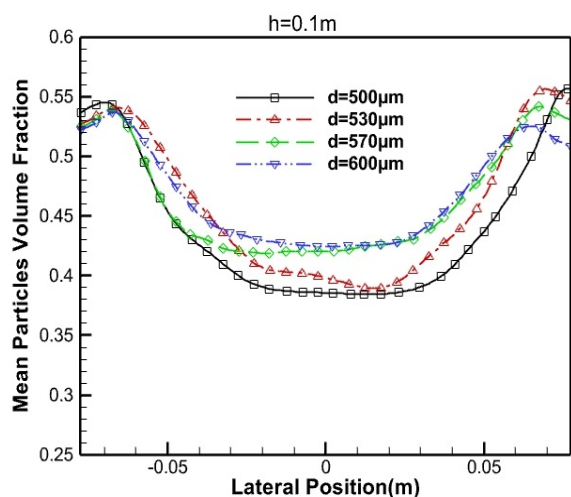
## ۸-۲- بررسی اثر تغییر اندازه قطر ذرات جامد بر روی

### توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد

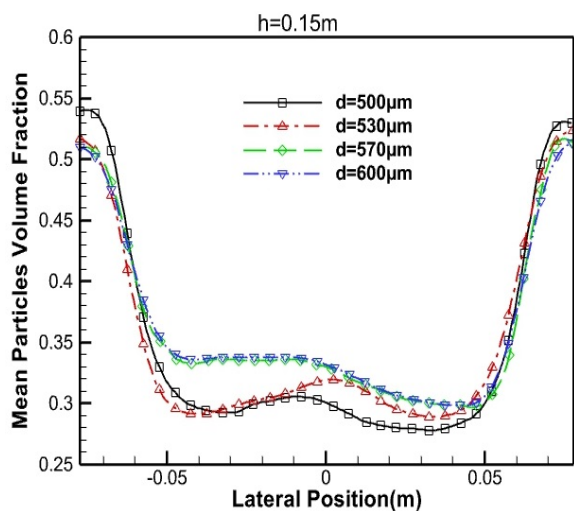
در شکل ۶ توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد برای چهار نوع قطر مختلف ( $600 \mu\text{m}$ ،  $570 \mu\text{m}$ ،  $500 \mu\text{m}$ ) نشان داده شده است. با تغییر اندازه قطر ذرات، تغییرات چشم‌گیری بر روی متوسط کسر حجمی ذرات جامد مشاهده می‌شود. ذرات با قطر  $600 \mu\text{m}$  بیشترین و ذرات با قطر  $500 \mu\text{m}$  کمترین کسر حجمی را

ارتفاع بستر کاهش می‌یابد؛ به این دلیل که ذرات با قطر بزرگ‌تر به نیروی پسا بیشتری برای انبساط بسترسیال نیاز دارند. با افزایش اندازه قطر ذرات از  $500 \mu\text{m}$  تا  $600 \mu\text{m}$ ،  $9/5\%$  ارتفاع بستر کاهش می‌یابد.

هسته بستر افزایش و در نزدیکی دیوارها کاهش پیدا می‌کند؛ زیرا هر چه اندازه قطر ذرات افزایش پیدا کند، سرعت ذرات در هسته بستر کاهش و در دیوارها افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود با نزدیک شدن به کف بستر، متوسط کسر حجمی ذرات جامد نیز افزایش پیدا می‌کند، زیرا که بیشترین تجمع ذرات در کف بستر اتفاق می‌افتد.

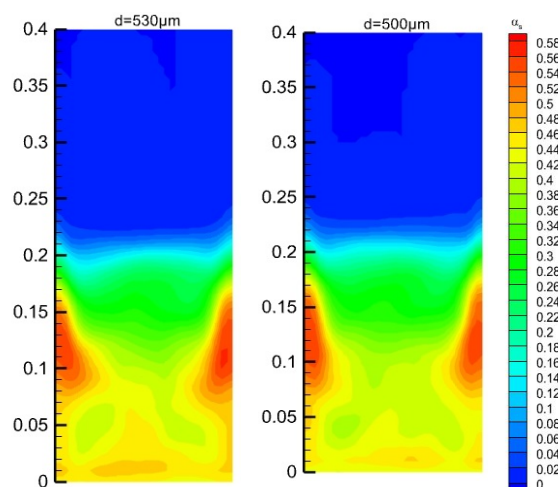


(الف)



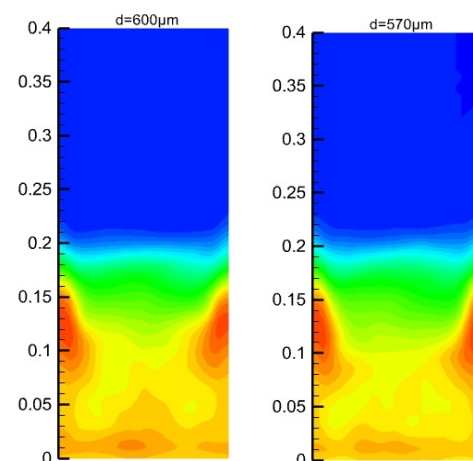
(ب)

شکل (۷). (الف) اثر تغییر قطر ذرات بر روی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱ m نسبت به کف بستر، (ب) اثر تغییر قطر ذرات بر روی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر در مطالعه حاضر



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

شکل (۶). (الف) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات با قطر  $500 \mu\text{m}$  (ب) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات با قطر  $530 \mu\text{m}$  (ج) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات با قطر  $570 \mu\text{m}$  (د) توزیع رنگی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات با قطر  $600 \mu\text{m}$  در مطالعه حاضر

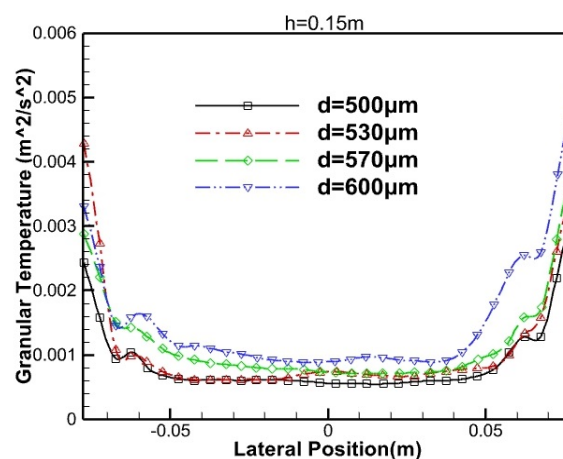
شکل ۷ توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد را در ارتفاع‌های ۰/۱ m و ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر برای چهار قطر مختلف ( $500 \mu\text{m}$ ،  $530 \mu\text{m}$ ،  $570 \mu\text{m}$ ،  $600 \mu\text{m}$ ) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در هسته بستر ذرات با قطر  $600 \mu\text{m}$  و در دیوارها ذرات با قطر  $500 \mu\text{m}$  بیشترین کسر حجمی را دارا می‌باشند؛ بنابراین، هر چه اندازه قطر ذرات جامد افزایش پیدا کند، متوسط کسر حجمی ذرات جامد در



مدل‌های پسا (گیداسپاو، شمال-آبراین و ون-یو) بر روی توزیع متوسط زمانی سرعت و کسر حجمی ذرات جامد در بسترسیال حبایی گاز-جامد پرداخته می‌شود. شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات جامد را در ارتفاع‌های ۰/۱۴ m و ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر برای سه مدل پسا (گیداسپاو، شمال-آبراین و ون-یو) نشان می‌دهند. این مطالعه نشان می‌دهد، مدل پسا شمال-آبراین از تطابق خوبی با نتایج پژوهش [۳۱] برخوردار است. در هسته بستر، مدل پسا گیداسپاو حداکثر سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) ذرات را نسبت به سایر مدل‌های پسا پیش‌بینی می‌کند. همچنین در نزدیکی دیوارهای بستر، مدل پسا ون-یو حداکثر سرعت رو به پایین (سرعت منفی) ذرات را نسبت به سایر مدل‌های پسا پیش‌بینی می‌کند. توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات جامد در مدل پسا شمال-آبراین در حوالی هسته بستر تقریباً به صورت تخت ولی در مدل‌های پسا گیداسپاو و ون-یو به صورت سهمی می‌باشد. ذرات جامد در هسته بستر دارای سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) و در دیوارها دارای سرعت رو به پایین (سرعت منفی) می‌باشند؛ بنابراین در بسترسیال حبایی جریان گردابی پدید می‌آید. در شکل (۹-الف) در مدل پسا گیداسپاو در فواصل ۰/۰۳۸ m و ۰/۰۴۲ m نسبت به مرکز بستر (x=0)، در مدل پسا شمال-آبراین در فواصل ۰/۰۴۰ m و ۰/۰۴۲ m نسبت به مرکز بستر (x=0) و در مدل پسا ون-یو در فواصل ۰/۰۴۱ m و ۰/۰۴۱ m نسبت به مرکز بستر (x=0) جریان برگشتی رخ می‌دهد و ذرات دارای سرعت رو به پایین (سرعت منفی) می‌باشند. همچنین در شکل (۹-ب) در مدل پسا گیداسپاو در فواصل ۰/۰۳۶ m و ۰/۰۴۰ m نسبت به مرکز بستر (x=0)، در مدل پسا شمال-آبراین در فواصل ۰/۰۳۸ m و ۰/۰۳۹ m نسبت به مرکز بستر (x=0) و در مدل پسا ون-یو در فواصل ۰/۰۴۰ m و ۰/۰۴۰ m نسبت به مرکز بستر (x=0) جریان برگشتی رخ می‌دهد و ذرات دارای سرعت رو به پایین (سرعت منفی) می‌باشند. مدل پسا شمال-آبراین متوسط سرعت ذرات جامد را در نزدیکی دیوارها حدود ۱۵ درصد بیشتر نسبت به سایر مدل‌های پسا پیش‌بینی می‌کند.

### ۸-۳- بررسی اثر تغییر اندازه قطر ذرات جامد بر روی توزیع متوسط زمانی دمای دانه‌های ذرات جامد

شکل ۸ توزیع متوسط زمانی دمای دانه‌های ذرات جامد را در ارتفاع ۱۵ m / نسبت به کف بستر برای چهار قطر مختلف (۵۰۰ μm، ۵۳۰ μm، ۵۷۰ μm، ۶۰۰ μm) نشان می‌دهد. توزیع دمای دانه‌های برای هر چهار قطر با اندازه‌های (۵۰۰ μm، ۵۳۰ μm، ۵۷۰ μm، ۶۰۰ μm) تقریباً مشابه می‌باشد. مشاهده می‌شود، متوسط زمانی دمای دانه‌های ذرات جامد در حوالی دیوارها نسبت به هسته بستر بیشتر می‌باشد و هر چه از هسته بستر به سمت دیوارها پیش می‌رویم دمای دانه‌های افزایش می‌یابد. توزیع دمای دانه‌های ذرات در حوالی هسته بستر تقریباً به صورت تخت می‌باشد. ذرات با قطر ۶۰۰ μm بیشترین و ذرات با قطر ۵۰۰ μm کمترین دمای دانه‌ای را دارا می‌باشند؛ بنابراین با افزایش اندازه قطر ذرات، دمای دانه‌ای نیز به طور تقریبی افزایش می‌یابد. با افزایش دمای دانه‌های ذرات جامد، سرعت ذرات جامد نیز کاهش می‌یابد؛ بنابراین سرعت ذرات با دمای دانه‌های رابطه عکس دارد.



شکل ۸). اثر تغییر قطر ذرات بر روی متوسط زمانی دمای دانه‌های ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر در مطالعه حاضر

### ۸-۴- بررسی اثر مدل پسا بر روی توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات جامد

نیروی پسا بر روی رفتار هیدرودینامیک جریان بسترسیال نقش مهمی را ایفا می‌کند. در این بخش به بررسی اثر

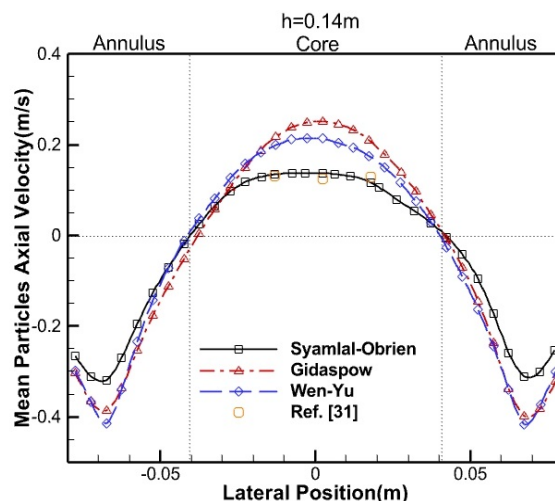


### ۸-۵- بررسی اثر مدل پسا بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد

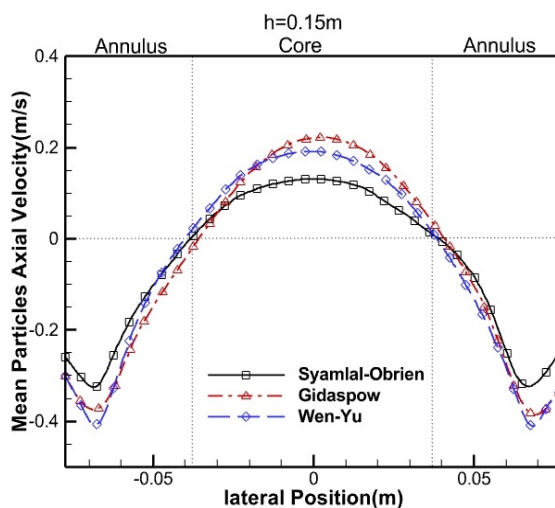
شکل های (الف-۱۰) و (ب-۱۰) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد را در ارتفاع های ۰/۱۵ m و ۰/۱۷ m نسبت به کف بستر برای سه مدل پسا (گیداسپاو، شمال-اُبراین و ون-یو) نشان می دهند. توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد در هر سه مدل پسا (گیداسپاو، شمال-اُبراین و ون-یو) تقریباً مشابه می باشد. مدل پسا شمال-اُبراین بیشترین متوسط کسر حجمی ذرات جامد و مدل پسا ون-یو کمترین متوسط کسر حجمی ذرات جامد را در حوالی هسته بستر پیش بینی می کنند. همچنین مدل پسا ون-یو متوسط کسر حجمی ذرات جامد را در دیوارهای بستر نسبت به سایر مدل های پسا کمتر پیش بینی می کند. همچنین شکل (ج-۱۰) توزیع کسر حجمی ذرات جامد را در ارتفاع ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر در ثانیه ۳۰ برای سه مدل پسا (گیداسپاو، شمال-اُبراین و ون-یو) نشان می دهد. مشاهده می شود، بیشترین کسر حجمی ذرات جامد در مرکز بستر توسط مدل پسا شمال-اُبراین و کمترین کسر حجمی توسط مدل پسا گیداسپاو پیش بینی می شود.

شکل ۱۱ توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد را برای سه مدل پسا (گیداسپاو، شمال-اُبراین و ون-یو) در امتداد ارتفاع مرکز بستر نشان می دهد. بیشترین تجمع کسر حجمی ذرات در کف بستر رخ می دهد و بافاصله گرفتن از کف بستر، کسر حجمی ذرات کاهش می یابد. به این دلیل که بیشترین تجمع و رسوب ذرات در کف بستر اتفاق می افتد. مدل پسا شمال-اُبراین بیشترین تجمع ذرات و مدل پسا ون-یو کمترین تجمع ذرات را در کف بستر پیش بینی می کنند. کسر حجمی ذرات جامد در مدل پسا ون-یو در ارتفاع بالاتری نسبت به کف بستر در مقایسه با دو مدل پسا دیگر به صفر می رسد؛ بنابراین در مدل پسا ون-یو انبساط بستر نسبت به سایر مدل های پسا بیشتر می باشد.

همچنین مدل پسا شمال-اُبراین متوسط سرعت ذرات جامد را در حوالی هسته بستر حدود ۳۷ درصد نسبت به مدل پسا ون-یو و حدود ۴۲ درصد نسبت به مدل پسا گیداسپاو کمتر پیش بینی می کند.

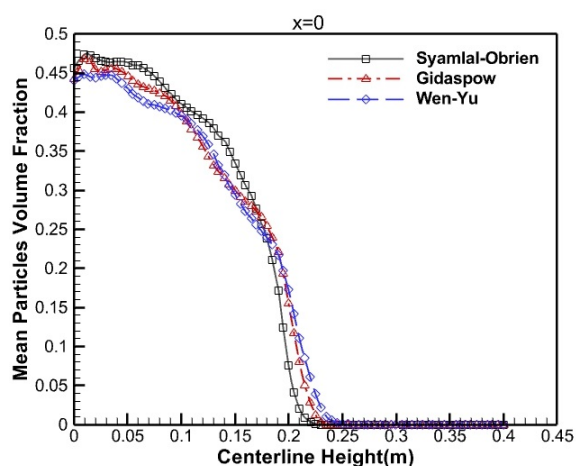


(الف)



(ب)

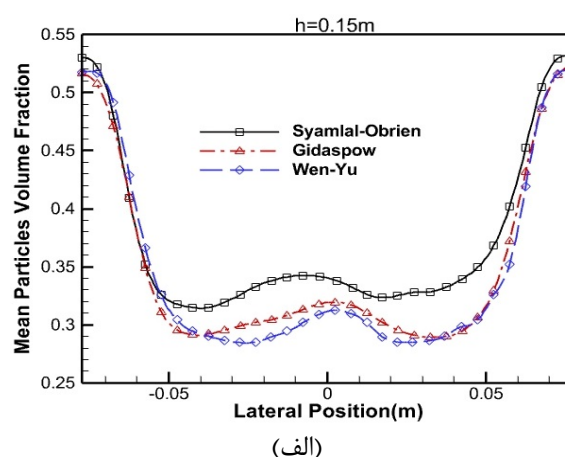
شکل (۹). (الف) اثر مدل پسا بر روی متوسط زمانی سرعت محوری ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۴ m نسبت به کف بستر، (ب) اثر مدل پسا بر روی متوسط زمانی سرعت محوری ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر در مطالعه حاضر



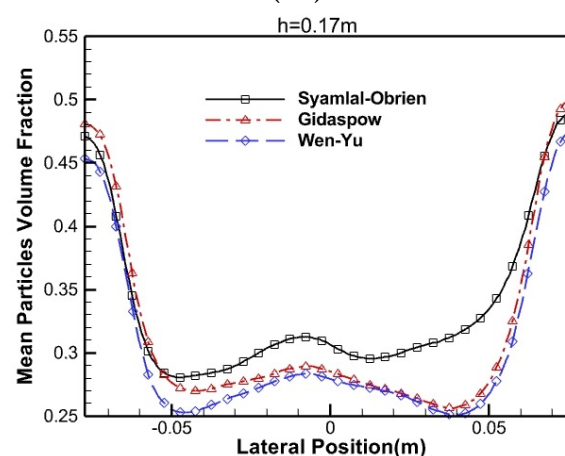
شکل (۱۱). اثر مدل پسا بر روی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد در امتداد ارتفاع مرکز بستر در مطالعه حاضر

#### ۸-۶- بررسی اثر تغییر سرعت هوای ورودی به بستر بر روی توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات جامد

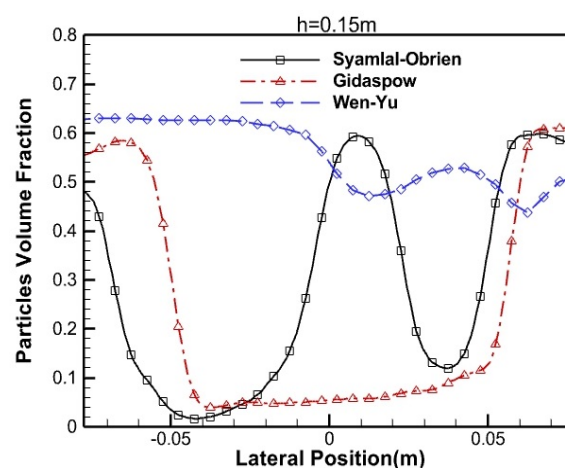
شکل‌های (۱۲-الف) و (۱۲-ب) توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات جامد را در ارتفاع‌های  $0.12\text{ m}$  و  $0.15\text{ m}$  نسبت به کف بستر برای سه سرعت هوای ورودی  $(0.550\text{ m/s}, 0.575\text{ m/s}, 0.587\text{ m/s})$  نشان می‌دهند. توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات جامد برای هر سه سرعت هوای ورودی مشابه می‌باشد. افزایش سرعت هوا اثر قابل توجهی بر روی متوسط سرعت ذرات جامد دارد. هر چه سرعت هوای ورودی به بستر بیشتر شود، ذرات جامد با سرعت بیشتری به سمت بالای بستر حمل می‌شوند و در نتیجه متوسط سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) در حوالی هسته بستر و سرعت رو به پایین (سرعت منفی) ذرات جامد در دیوارها افزایش می‌یابد؛ بنابراین، هنگامی که سرعت هوای ورودی برابر با  $0.587\text{ m/s}$  باشد، ذرات جامد از بیشترین سرعت مثبت در مرکز بستر و بیشترین سرعت منفی در دیوارها برخوردار می‌باشند؛ به این دلیل که هر چه سرعت هوای ورودی بیشتر باشد، ذرات جامد بیشتر تحت تأثیر انتقال ممنتم بین دو فاز گاز-جامد قرار می‌گیرند. ذرات جامد در هر سه سرعت هوای ورودی  $(0.587\text{ m/s}, 0.575\text{ m/s}, 0.550\text{ m/s})$  در هسته بستر دارای سرعت رو به بالا (سرعت مثبت) و در حوالی دیوارها دارای سرعت رو به پایین (سرعت منفی) می‌باشند و در نتیجه جریان گردابی به وجود می‌آید. با افزایش سرعت هوا از



(الف)



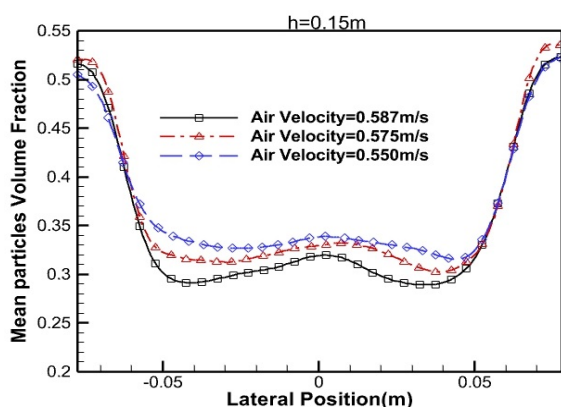
(ب)



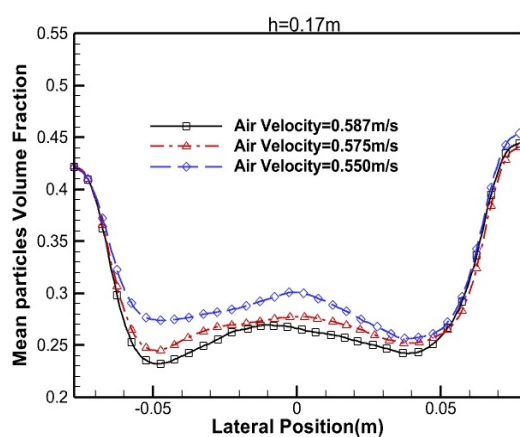
(ج)

شکل (۱۰). الف) اثر مدل پسا بر روی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع  $0.15\text{ m}$  نسبت به کف بستر، ب) اثر مدل پسا بر روی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع  $0.17\text{ m}$  نسبت به کف بستر، ج) اثر مدل پسا بر روی توزیع کسر حجمی ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع  $0.15\text{ m}$  نسبت به کف بستر در ثانیه ۳۰

نسبت به کف بستر برای سه سرعت هوای ورودی (۰/۵۵۰ m/s، ۰/۵۷۵ m/s، ۰/۵۸۷ m/s) نشان می‌دهند. توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد برای هر سه سرعت هوای ورودی مشابه می‌باشد. مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت هوای ورودی، متوسط کسر حجمی ذرات جامد کاهش می‌یابد؛ به این دلیل که با افزایش سرعت هوا، متوسط سرعت ذرات جامد افزایش می‌یابد و با افزایش سرعت ذرات جامد تراکم و تجمع ذرات کاهش می‌یابد.



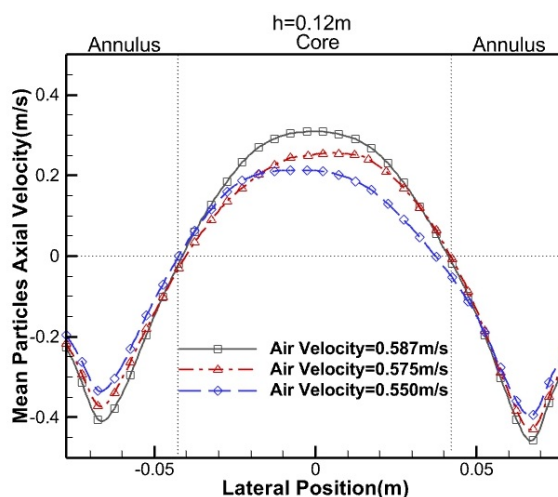
(الف)



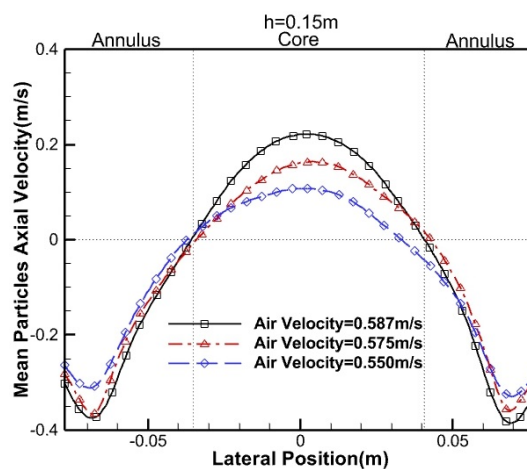
(ب)

شکل (۱۳). اثر سرعت هوای ورودی بر روی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر، (ب) اثر سرعت هوای ورودی بر روی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۷ m نسبت به کف بستر در مطالعه حاضر

۰/۵۵۰ m/s به ۰/۵۸۷ m/s، متوسط زمانی سرعت ذرات در حوالی هسته بستر حدود ۴۰ درصد افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل (۱۲). (الف) اثر سرعت هوای ورودی بر روی متوسط زمانی سرعت محوری ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۲ m نسبت به کف بستر، (ب) اثر سرعت هوای ورودی بر روی متوسط زمانی سرعت محوری ذرات جامد در امتداد شعاعی در ارتفاع ۰/۱۵ m نسبت به کف بستر در مطالعه حاضر

۷-۸- بررسی اثر تغییر سرعت هوای ورودی بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد

شکل‌های (۱۳-الف) و (۱۳-ب) توزیع متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد را در ارتفاع‌های ۰/۱۵ m و ۰/۱۷ m

## ۹- نتیجه‌گیری

افزایش می‌یابد. این مطالعه نشان داد، با افزایش سرعت هوا از  $0.550 \text{ m/s}$  به  $0.587 \text{ m/s}$ ، متوسط زمانی سرعت ذرات در حوالی هسته بستر حدود ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت هوای ورودی متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد کاهش می‌یابد.

## ۱۰- مراجع

1. Van Wachem, B.G.M., Schouten, J.C., Van den Bleek, C.M., Krishna, R., and Sinclair, J.L. "Comparative Analysis of CFD Models of Dense Gas-Solid Systems", *AIChE J.* Vol. 47, No. 5, pp. 1035-1051, 2001.
2. Behjat, Y., Shahhosseini, S., and Hashemabadi, S.H. "CFD Modeling of Hydrodynamic and Heat Transfer in Fluidized Bed Reactors", *Int. Commun. Heat Mass Transf.* Vol. 35, No. 3, pp. 357-368, 2008.
3. Passalacqua, A., and Marmo, L. "A Critical Comparison of Frictional Stress Models Applied to the Simulation of Bubbling Fluidized Beds", *Chem. Eng. Sci.* Vol. 64, No. 12, pp. 2795-2806, 2009.
4. Loha, C., Chattopadhyay, H., and Chatterjee, P.K. "Assessment of Drag Models in Simulating Bubbling Fluidized Bed Hydrodynamics", *Chem. Eng. Sci.* Vol. 75, pp. 400-407, 2012.
5. Zinani, F., Philippsen, C.G., and Indrusiak, M.L.S. "Numerical Study of Gas-Solid Drag Models in a Bubbling Fluidized Bed", *Part. Sci. Technol.* Vol. 36, No. 1, pp. 1-10, 2018.
6. Wang, L., Xie, X., Wei, G., and Li, R. "Numerical Simulation of Hydrodynamic Characteristics in a Gas-Solid Fluidized Bed", *Part. Sci. Technol.* Vol. 35, No. 2, pp. 177-182, 2017.
7. Varghese, M.M., and Vakamalla, T.R. "Effect of Turbulence Model on the Hydrodynamics of Gas-Solid Fluidized Bed", *RTFDR.* pp. 47-61, 2022.
8. Nasr.Esfahani, M., Rahimi, R., and Hosseini, S.H. "Investigation of Fluidized Bed Hydrodynamics Using CFD", NICEC11. Tehran, Iran, 1385. (In Persian)
9. Lindborg, H., Lysberg, M., and Jakobsen, H.A. "Practical Validation of the Two-Fluid Model Applied to Dense Gas-Solid Flows in Fluidized Beds", *Chem. Eng. Sci.* Vol. 62, No. 21, pp. 5854-5869, 2007.

در این تحقیق به اثر تغییر اندازه قطر ذرات، مدل‌های پسا و سرعت هوای ورودی بر روی عملکرد ذرات گروه گلدات B در بسترسپال حبیبی گاز-جامد با استفاده از روش حجم محدود و رویکرد جریان دوفازی اویلرین در ترکیب با انرژی جنبشی دانه‌ای ذرات پرداخته شد. اثر تغییر اندازه قطر ذرات بر روی توزیع متوسط زمانی کسر حجمی و توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات جامد بررسی شد. نتایج نشان داد، قطر ذرات اثر قابل توجهی بر روی رفتار هیدرودینامیک بسترسپال دارد. با افزایش اندازه قطر ذرات، متوسط سرعت روبه‌بالا (سرعت مثبت) در هسته بستر و متوسط سرعت رو به پایین (سرعت منفی) در دیوارها کاهش می‌یابد، به این دلیل که هر چه قطر ذرات کوچک‌تر باشد بیشتر تحت تأثیر تبادل ممنتیم بین دو فاز گاز-جامد قرار می‌گیرند. همچنین بزرگی متوسط سرعت ذرات جامد در ارتفاعات پایین‌تر (نزدیک به کف بستر) افزایش می‌یابد. با افزایش اندازه قطر ذرات از  $500 \mu\text{m}$  تا  $600 \mu\text{m}$ ، ۱۴ درصد تجمع ذرات جامد در کف بستر افزایش می‌یابد. با افزایش اندازه قطر ذرات از  $500 \mu\text{m}$  تا  $600 \mu\text{m}$ ، ۹/۵٪ ارتفاع بستر کاهش می‌یابد. توزیع متوسط زمانی سرعت و کسر حجمی ذرات جامد با استفاده از سه مدل پسا (گیداسپاو، شمال-اُبراین و ون-یو) محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. در نتیجه این مقایسه، پسا شمال-اُبراین به‌خوبی نتایج آزمایشگاهی را پیش‌بینی می‌کند. مدل پسا شمال-اُبراین متوسط سرعت ذرات جامد را در نزدیکی دیوارها حدود ۱۵ درصد بیشتر نسبت به سایر مدل‌های پسا پیش‌بینی می‌کند. همچنین مدل پسا شمال-اُبراین متوسط سرعت ذرات جامد را در حوالی هسته بستر حدود ۳۷ درصد نسبت به مدل پسا ون-یو و حدود ۴۲ درصد نسبت به مدل پسا گیداسپاو کمتر پیش‌بینی می‌کند. توزیع متوسط زمانی سرعت ذرات جامد در پسا شمال-اُبراین در حوالی هسته بستر تقریباً به‌صورت تخت ولی در مدل‌های پسا گیداسپاو و ون-یو به‌صورت سهمی می‌باشد. متوسط زمانی کسر حجمی ذرات جامد در مدل پسا شمال-اُبراین بیشتر از سایر مدل‌های پسا پیش‌بینی می‌شود. افزایش سرعت هوا اثر قابل توجهی بر روی متوسط سرعت ذرات جامد دارد، با افزایش سرعت هوای ورودی، متوسط سرعت ذرات جامد در هسته بستر

20. Syamlal, M., and O'Brien, T.J. "Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed", *AICHE Symp. Ser. Vol. 85, No. 1*, pp. 22-31, 1989.
21. Wen, C.Y. "Mechanics of Fluidization", *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. Vol. 62*, pp. 100-111, 1966.
22. Ogawa, S., Umemura, A., and Oshima, N. "On the Equations of Fully Fluidized Granular Materials", *ZAMP. Vol. 31, No. 4*, pp. 483-493, 1980.
23. Syamlal, M., Rogers, W., and O'Brien, T.J. "MFIX Documentation Theory", United States, 1993.
24. Lun, C.K.K., Savage, S.B., Jeffrey, D.J., and Chepurniy, N. "Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field", *J. Fluid Mech. Vol. 140*, pp. 223-256, 1984.
25. San Jose, M. J., Olazar, M., Benito, P. L., and Bolbao, J. "Hydrodynamics and Expansion of Fluidized Beds of Coarse Particles", *Trans. Inst. Chem. Eng. vol. 73A*, pp. 473-479, 1995.
26. Johnson, P.C., and Jackson, R. "Frictional-Collisional Constitutive Relations for Granular Materials, with Application to Plane Shearing", *J. Fluid Mech. Vol. 176*, pp. 67-93, 1987.
27. Inc, ANSYS. "ANSYS FLUENT 12.0 (theory Guide)", United States, 2009.
28. Kuwagi, K., Utsunomiya, H., Shimoyama, Y., Hirano, H., and Takami, T. "Direct Numerical Simulation of Fluidized bed with Immersed Boundary Method"; *The 13<sup>th</sup> Int. Conf. fluidization eng. Gyeong-ju, Korea*, 2010.
29. Hoomans, B. P. B. "Granular Dynamics of Gas-Solid Two-Phase Flows", *Universiteit Twente, Netherlands*, 2000.
30. Peltola, J. "Dynamics in a Circulating Fluidized Bed: Experimental and Numerical Study", MS thesis, Tampere University of Technology, Faculty of Automation, Mechanical and Material Technology, 2009.
31. Jung, J., Gidaspow, D., and Gamwo, I.K. "Measurement of Two Kinds of Granular Temperatures, Stresses, and Dispersion in Bubbling Beds", *Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 44, No. 5*, pp. 1329-1341, 2005.
10. Benyahia, S., Syamlal, M., and O'Brien, T.J. "Study of the Ability of Multiphase Continuum Models to Predict Core-Annulus Flow", *AICHE J. Vol. 53, No. 10*, pp. 2549-2568, 2007.
11. Guo, Y., Deng, B., Ge, D., and Shen, X. "CFD Simulation on Hydrodynamics in Fluidized Beds: Assessment of Gradient Approximations and Turbulence Models", *Heat Mass Transfer. Vol. 51, No. 8*, pp. 1067-1074, 2015.
12. Khezri, R., Wan Ab Karim Ghani, W. A., Masoudi Soltani, S., Awang Biak, D. R., Yunus, R., Silas, K., and Rezaei Motlagh, S. "Computational Fluid Dynamics Simulation of Gas-Solid Hydrodynamics in a Bubbling Fluidized-Bed Reactor: Effects of Air Distributor, Viscous and Drag Models", *Processes. Vol. 7, No. 8*, 2019.
13. Loha, C., Chattopadhyay, H., and Chatterjee, P.K. "Euler-Euler CFD Modeling of Fluidized Bed: Influence of Specularity Coefficient on Hydrodynamic Behavior", *Particuology. Vol. 11, No. 6*, pp. 673-680, 2013.
14. Loha, C., Chattopadhyay, H., and Chatterjee, P.K. "Effect of Coefficient of Restitution in Euler-Euler CFD Simulation of Fluidized-Bed Hydrodynamics", *Particuology. Vol. 15*, pp. 170-177, 2014.
15. Kshetrimayum, K.S., Park, S., Han, C., and Lee, C.J. "EMMS Drag Model for Simulating a Gas-Solid Fluidized Bed of Geldart B Particles: Effect of Bed Model Parameters and Polydispersity", *Particuology. Vol. 51*, pp. 142-154, 2020.
16. Verma, V., Padding, J.T., Deen, N.G., and Kuipers, J.A.M. "Effect of Bed Size on Hydrodynamics in 3-D Gas-Solid Fluidized Beds", *AICHE J. Vol. 61, No. 5*, pp. 1492-1506, 2015.
17. Ghasemi, H., Amini, Hassan., and Khayat, Morteza. "Experimental Study of Solid Particle Mixing in a Fluidized Bed Using Image Processing Method", *Fluid Mech Aero J. Vol. 3, No. 1*, 1393. (In Persian)
18. Gelderbloom, S.J., Gidaspow, D., and Lyczkowski, R.W. "CFD Simulations of Bubbling/Collapsing Fluidized Beds for Three Geldart Groups", *AICHE J. Vol. 49, No. 4*, pp. 844-858, 2003.
19. Gidaspow, D., Bezburuah, R., and Ding, J. "Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds: Kinetic Theory Approach", *Illinois Inst of Tech. Chicago, USA*, 1991.