ISSN: 2476-6909; Modares. Mech. Eng. *2026;26(05):293-305.*

Modares Mechanical Engineering

DOI: 10.48311/mme.2026.118839.82944
journal homepage: mme.modares.ac.ir

Numerical study of the effect of specularity coefficient in Eulerian–Eulerian simulation of spouted fluidized beds

Hamed Khosravi-Bizhaem*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical and Materials Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: January 11, 2026
Revised: February 06, 2026
Accepted: February 16, 2026
ePublished: March 04, 2026

ABSTRACT

The hydrodynamics of gas–solid two-phase flow in a spouted fluidized bed was numerically investigated using the Eulerian–Eulerian model. In this study, the effect of the specularity coefficient, which represents the degree of tangential momentum transfer during particle–wall collisions, was examined. Two-dimensional simulations were carried out using the kinetic theory of granular flow for the solid phase, and the obtained results were compared with available experimental data as well as numerical results based on the Eulerian–Lagrangian approach. Different values of the specularity coefficient (0.005, 0.01, 0.05, and 0.5) were considered, and their effects on the hydrodynamics of gas–solid flow at different bed heights were analyzed. By comparing the present results with previous Eulerian–Lagrangian simulations, the maximum deviation in the time-averaged vertical particle mass flux was found to be 6.5% at the bed center and 18.1% near the wall. In addition, the differences in the time-averaged vertical air velocity at the bed center ranged from 5.7% to 20.4% at different heights. These discrepancies can be attributed to factors such as the drag correlation, solid restitution coefficients, and solid pressure and viscosity models, which were not examined in the present study. The results indicate that increasing the specularity coefficient enhances particle–wall friction, leading to a reduction in the solid volume fraction and solid velocity near the wall. Based on the obtained data, specularity coefficients of 0.05 and 0.5 show the best agreement with experimental measurements and Eulerian–Lagrangian model predictions.

Keywords: spouted fluidized bed, specularity coefficient, gas–solid flow, Eulerian–Eulerian

How to cite this article
Khosravi-Bizhaem H, Numerical study of the effect of specularity coefficient in Eulerian-Eulerian simulation of spouted fluidized beds. Modares Mechanical Engineering; *2026;26(04):293-305.*

*Corresponding author's email: hkhosravi@birjandut.ac.ir
*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-6879-5741

شاپا: ۶۹۰۹-۲۴۷۶؛ مهندسی مکانیک مدرس. ۳۰۵-۲۹۳:(۰۵)۲۶;۱۴۰۵

مهندسی مکانیک مدرس

DOI: 10.48311/mme.2026.118839.82944

صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir

مطالعه عددی اثر ضریب انعکاسی در شبیه‌سازی اویلری-اویلری هیدرودینامیک بستر سیال فورانی

حامد خسروی بیژائم*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله
دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۱
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۷
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۲/۱۳

چکیده

هیدرودینامیک جریان دوفازی گاز-جامد در بستر سیال فورانی به صورت عددی با مدل اویلری-اویلری بررسی شده است. در این پژوهش اثر ضریب انعکاسی مورد مطالعه قرار گرفته که بیانگر میزان انتقال تکانه مماسی برخورد ذره - دیوار است. شبیه‌سازی به صورت دوبعدی با استفاده از تئوری جنبشی جریان دانه‌ای برای فاز جامد انجام و نتایج حاصل با داده‌های تجربی و عددی دیدگاه اویلری-لاگرانژی مقایسه شده است. مقادیر مختلف ضریب انعکاسی (۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۵) در نظر گرفته شده و اثر آن روی هیدرودینامیک جریان دوفازی گاز-جامد در ارتفاع‌های مختلف بستر بررسی شده است. با مقایسه نتایج روش حاضر با شبیه‌سازی اویلری-لاگرانژی مطالعات پیشین، بیشترین اختلاف برای متوسط زمانی شار جرمی عمودی ذرات در مرکز بستر ۶/۵٪ و در نزدیکی دیوار ۱۸/۱٪ مشاهده شد. اختلاف بین نتایج متوسط زمانی سرعت عمودی هوا در مرکز بستر از ۵/۷٪ تا ۲۰/۴٪ برای ارتفاع‌های مختلف بدست آمد. از مهمترین دلایل تفاوت بین نتایج می‌توان به تأثیر کمیت‌هایی مانند تابع پسا، ضرایب بازگشت جامد، مدلهای فشار و لزجت جامد اشاره کرد که در این پژوهش بررسی نشده است. یافته‌ها نشان می‌دهد افزایش ضریب انعکاسی سبب افزایش اصطکاک بین ذره و دیوار و در نتیجه کاهش کسر حجمی فاز جامد و کاهش سرعت جامد در نزدیکی دیوار می‌شود. با توجه به داده‌های بدست آمده، مقدار ضریب انعکاسی ۰/۰۵ و ۰/۵ بهترین انطباق را با نتایج آزمایشگاهی و مدل اویلری-لاگرانژی نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: بستر سیال فورانی، ضریب انعکاسی، جریان گاز-جامد، اویلری-اویلری

نحوه ارجاع به این مقاله

خسروی بیژائم حامد، مطالعه عددی ضریب انعکاسی در شبیه سازی اویلری-اویلری هیدرودینامیک بستر سیال فورانی، مهندسی مکانیک مدرس. ۳۰۵-۲۹۳:(۰۵)۲۶;۱۴۰۵

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hkhosravi@birjandut.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: 0000-0001-6879-5741

۱- مقدمه

بسترهای سیال فورانی گاز-جامد در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند خشک کردن، گازی سازی، پوشش دهی و سایر فرایندهای صنعتی استفاده می‌شود. در عمل، رفتار فورانی بستر کاملاً تحت تأثیر شرایط عملکردی مانند هندسه، خواص فیزیکی ذرات، سرعت فورانی و سرعت یکنواخت قرار دارد [۱]. طراحی و توسعه بسترهای گاز-جامد به دلیل طبیعت پیچیده جریان وابستگی شدیدی به داده‌های تجربی دارد. از این رو توسعه مدل‌هایی که برای محدوده وسیعی از کاربردهای صنعتی قابل استفاده باشد و بهتر بتواند نتایج تجربی را پیش بینی نماید، بسیار ضروری به نظر می‌رسد [۲]. روش‌های عددی مورد استفاده برای جریان حاوی ذرات در بستر سیال فورانی عموماً به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شود: مدل المان مجزا (DEM) با دیدگاه اویلری-لاگرانژی و مدل دوسیاله (TFM) با دیدگاه اویلری-اویلری [۳]. پژوهش‌های فراوانی با استفاده از روش‌های فوق به بررسی جریان گاز-جامد در بسترهای سیال فورانی پرداخته‌اند. یو و همکاران [٤] هیدرودینامیک بستر فورانی با دو جریان جت گاز ورودی با مدل اویلری-لاگرانژی بررسی کردند و نشان دادند اختلاط گاز و جامد با دو جریان فورانی نسبت به حالت رایج بهبود می‌یابد. هوریجانی و همکاران [٥] اختلاط ذرات جامد در سه رژیم مختلف بستر سیال فورانی به صورت سه بعدی و با استفاده از دیدگاه اویلری-لاگرانژی به روش المان مجزا مطالعه نمودند. آنها دریافتند هنگامی که جریان جت گاز در بستر سیال وجود دارد، بیشترین نرخ اختلاط جامد روی می‌دهد. ژو و همکاران [٦] اثر فشار بر هیدرودینامیک جریان گاز-جامد در بستر سیال حبابی را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها برای شبیه سازی عددی شبه دو بعدی بستر سیال از روش اویلری-لاگرانژی استفاده نمودند و دریافتند افزایش فشار سبب کاهش قطر حباب‌ها و افزایش تعداد آنها می‌شود و در نتیجه توزیع ذرات در پایین بستر یکنواخت‌تر می‌گردد.

با توجه به اینکه در دیدگاه اویلری-لاگرانژی مسیر حرکت ذرات دنبال می‌شود، با افزایش تعداد ذرات هزینه محاسبات رایانه‌ای به شدت افزایش می‌یابد. لذا در مسائلی که تعداد ذرات جامد بسیار زیادی وجود دارد، قابل استفاده نیست. از این رو، اگرچه دیدگاه اویلری-اویلری خواص ماکروسکوپی سیستم را می‌دهد و قادر به تعیین مسیر دقیق تک تک ذرات نیست، اما با توجه به هزینه محاسبات پایین تر و دقت قابل قبول در مسائل مهندسی، بسیار پرکاربرد است [۸،۷]. زارع پور و همکاران [۹] با تحلیل عددی بستر سیال حبابی به روش اویلری-اویلری دوسیاله، اثر کمیت‌های برخوردی از جمله ضریب بازگشت ذره-ذره، ذره-دیوار و ضریب انعکاسی ذره-دیوار را روی هیدرودینامیک جریان مطالعه نمودند. آنها دریافتند ضریب بازگشت ذره-دیوار تأثیر اندکی بر هیدرودینامیک جریان دارد، در حالی که افزایش ضریب انعکاسی زمان گردش ذرات در بستر را افزایش می‌دهد. گو و همکاران [۱۰] از ضریب بازگشت دینامیک در شبیه سازی اویلری-اویلری بستر سیال برای اصطکاک جامد، سرعت برخورد و تأثیر دمایی جامد استفاده نمودند و نشان دادند این مدل جدید تطابق بهتری را در توزیع ذرات و دینامیک حباب‌ها با داده آزمایشگاهی نسبت به مدل‌های ثابت رایج نشان می‌دهد. فوکادا و همکاران [۱۱] اثر مدل پسا و تنش اصطکاکی را در تحلیل عددی اختلاط ذرات نوع بی (Type B) گلدارت به روش اویلری-اویلری بررسی نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد مدل تنش اصطکاکی روی پیش بینی میزان اختلاط ذرات به شدت تأثیر گذار است و در حالتی که مدل تنش اصطکاکی استفاده نشود، شدت اختلاط بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌گردد.

موفقیت مدلسازی اویلری-اویلری بسیار وابسته به تعیین صحیح تمام تعامل‌های بین فازهای گاز و ذره، مدل‌های اصطکاکی و فشار فاز جامد، شرایط مرزی گاز و ذره و دیگر کمیت‌ها است. پژوهش‌های فراوانی به بررسی تأثیر عوامل مختلف در الگوی جریان و دقت روش دوسیاله در بستر سیال و بستر فورانی پرداخته‌اند. عدنان و همکاران [۸،۷] تحلیل حساسیت دیدگاه اویلری-اویلری به مدل نیروی پسا در تعامل گاز-جامد، توابع فشار جامد، تانسور تنش جامد، ویسکوزیته جامد و تابع توزیع شعاعی و کمیت‌های دیگر را انجام دادند. آنها دریافتند مدل نیروی پسا تأثیرگذارترین عامل در دقت شبیه سازی است و مقدار ضریب بازگشت ذره-ذره و ضریب انعکاسی ذره-دیوار به ترتیب ۰/۹ و ۰/٦ بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. مولینر و همکاران [۱۲] در شبیه‌سازی اویلری-اویلری بستر فورانی اثر تابع پسا، حد تراکم اصطکاکی، فشار جامد، ضریب بازگشت ذره-ذره و ضریب انعکاسی را بررسی کردند و دریافتند ضریب انعکاسی تأثیر بیشتری نسبت به ضریب بازگشت ذره-ذره در دقت شبیه‌سازی دارد. ژائو و همکاران [۱۳] هیدرودینامیک بستر سیال فورانی را با مدلسازی سه بعدی برای محدوده وسیعی از شرایط عملکردی انجام و با نتایج آزمایشگاهی و عددی لینک و همکاران [۱۵،۱٤] مقایسه نمودند. آنها نشان دادند استفاده از مقدار مناسب ضریب برخورد عمودی ذرات، دقت شبیه‌سازی را به شدت افزایش می‌دهد و مدل پسای هیل-کوچ-لد (Hill-Koch-Ladd) بیشترین تطابق را نسبت به سایر مدلها با داده‌های تجربی نشان می‌دهد.

مطالعات قبلی نشان می‌دهد در کنار مدلسازی، تعیین صحیح شرایط مرزی دیوار برای گاز و ذره تأثیر بسیاری در پیش‌بینی دقیق هیدرودینامیک جریان دارد. برای فاز گاز معمولاً شرط مرزی دیوار عدم لغزش و برای فاز جامد رابطه جانسون و جکسون استفاده می‌شود. ضریب انعکاسی در شرط مرزی دیوار جانسون و جکسون، بیان کننده نسبت متوسط انتقال تکانه مماسی در برخورد ذره با دیوار است. این ضریب از صفر تا یک متغیر است. مقدار φ=۰ نشان دهنده برخورد با دیوار صاف کاملاً آینه‌ای (لغزش آزاد) و مقدار φ=۱

بیانگر برخورد کاملاً پخشی با دیوار زبر (عدم لغزش) است. به عبارت دیگر، در مقدار ضریب انعکاسی صفر، اصطکاکی بین ذره ودیوار وجود ندارد، لذا سرعت مماسی ذرات هنگام برخورد ذره با دیوار تغییر نمی‌کند. اما در ضرایب انعکاسی بزرگتر از صفر، اصطکاک بین ذره و دیوار سبب کاهش سرعت مماسی ذرات هنگام برخورد می‌شود [۱۶،۱۲،۷]. مقدار ضریب انعکاسی به عوامل متعددی مانند نوع ذره، جنس ذره و دیوار، هندسه (شیب) دیواره‌ها وابسته است و روش مشخصی برای محاسبه آن وجود ندارد [۱۲]. مطالعاتی که در این خصوص انجام شده صرفاً با مطالعه پارامتری و مقایسه با داده‌های تجربی، مقداری تقریبی برای ضریب انعکاسی پیشنهاد داده‌اند [۱۷].

ژوانگ و همکاران [۱۸] اثر ضریب انعکاسی تک و دوگانه را برای شبیه‌سازی شبه سه بعدی اویلری-اویلری بستر سیال انجام دادند. با توجه به جنس متفاوت دیوارهای بستر، ضریب انعکاسی متفاوت برای دیوارها در نظر گرفتند و نشان دادند در صورت تنظیم صحیح این مقادیر، می‌توان به نتایج دقیق‌تری دست یافت. همچنین دریافتند با افزایش ضریب انعکاسی بیشتر از ۰/۵، اثر آن به شدت کاهش می‌یابد و رفتار هیدرودینامیکی بستر از حبابی به لخته‌ای تغییر می‌یابد. لوها و همکاران [۱۹] نشان دادند برای ضریب برخورد ذره-ذره یکسان، شرط مرزی لغزش نسبی جامد (φ=۰/٦) و عدم لغزش (φ=۱) روی دیوار تأثیر چندانی در هیدرودینامیک جریان گاز-ذره ندارد. شی و همکاران [۲۰] با شبیه‌سازی عددی دوبعدی و سه بعدی بستر سیال و مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی نشان دادند ضریب انعکاسی تأثیر چندانی روی تخلخل بستر ندارد، ولی با کاهش مقدار آن به ۰/۰۱، الگوی متفاوتی از کسر حجمی گاز مشاهده می‌شود. همچنین تغییرات سرعت متوسط حجمی جامد با زمان شدیداً به مقدار ضریب انعکاسی وابسته است و با افزایش ضریب انعکاسی، سرعت متوسط حجمی ذرات کاهش می‌یابد. آلتانزیس و همکاران [۲۱] با شبیه‌سازی عددی دوبعدی و سه بعدی بستر سیال نشان دادند با کاهش ضریب انعکاسی، قطر و سرعت حباب‌ها افزایش و رژیم جریان به سمت لخته‌ای میل می‌کند. آنها دریافتند در سرعت‌های ورودی زیاد، مقدار ضریب انعکاسی ۰/۰۵ بهترین تطابق را با داده‌های تجربی نشان می‌دهد، در حالیکه در سرعت ورودی کم، مقدار ۰/۸ تقریب بهتری نشان می‌دهد که بیان کننده وابستگی ضریب انعکاسی به سرعت لغزشی فاز جامد می‌باشد.

تعیین ضریب انعکاسی به صورت آزمایشگاهی امکان پذیر نیست و هنوز روشی برای برآورد دقیق آن ارائه نشده است، لذا تنها راه حل موجود تخمین آن از مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی است [۱۸،۷]. با توجه به مطالعات انجام شده تاکنون پژوهشی در خصوص تأثیر ضریب انعکاسی بر هیدرودینامیک جریان گاز-جامد بستر سیال فورانی گزارش نشده است، از این رو در پژوهش حاضر اثر این کمیت بر حل عددی جریان دو فازی بستر سیال فورانی به روش اویلری-اویلری مورد مطالعه قرار گرفته و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. مدل هندسی و خواص فیزیکی گاز و ذره بر اساس داده‌های آزمایشگاهی لینک و همکاران [۱۵] تنظیم شده است. علاوه بر این، از نتایج حل عددی مدل المان مجزای سعیدی و همکاران [۲۲] و لی و همکاران [۱۷] برای مقایسه نتایج مدل اویلری-اویلری با اویلری-لاگرانژی استفاده شده است.

۲- روش عددی

در دیدگاه اویلری-اویلری برای شبیه سازی جریان گاز-ذره از تئوری جنبشی دمای دانه ای (Kinetic theory of granular flow) استفاده می‌شود که در آن از شکل کلی معادلات ناویر-استوکس با خواص مستقل برای هر فاز استفاده می‌شود. در این مدل فاز گاز و ذره، به صورت محیط‌های نفوذپذیر در هر لحظه و در هر سلول محاسباتی در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۱- معادلات حاکم

معادلات بقا برای هر فاز و روابط کمکی برای توصیف تعامل ذره-سیال با مدل پسای گیداسپو و تعامل ذره-ذره با استفاده از تئوری جنبشی جریان دانه‌ای استفاده شده است [۲۳].

معادلات پیوستگی فازهای گاز و جامد به ترتیب مطابق رابطه‌های (۱) و (۲) نوشته می‌شوند.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g\rho_g)+\nabla(\alpha_g\rho_g\vec{V_g})=0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s\rho_s)+\nabla(\alpha_s\rho_s\vec{V_s})=0 \quad (۲)$$

کمیت‌های α_g و α_s در رابطه (۳) صدق می‌کنند.

$$\alpha_g+\alpha_s=1 \quad (۳)$$

معادلات بقای تکانه مطابق رابطه‌های (۴) و (۵) نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g\rho_g\vec{V_g})+\nabla(\alpha_g\rho_g\vec{V_g}\vec{V_g})=\nabla\cdot\bar{\bar{\tau}}_g-\alpha_g\nabla p+\alpha_g\rho_g\vec{g}-\beta_{gs}(\vec{V_g}-\vec{V_s}) \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s\rho_s\vec{V_s})+\nabla(\alpha_s\rho_s\vec{V_s}\vec{V_s})=\nabla\cdot\bar{\bar{\tau}}_s-\alpha_s\nabla p-\nabla p_s+\alpha_s\rho_s\vec{g}+\beta_{gs}(\vec{V_g}-\vec{V_s}) \quad (۵)$$

دمای دانه‌ای ذرات جامد با انرژی جنبشی ذرات جامد متناسب است و معادله بقای دمای دانه‌ای ذرات جامد به صورت رابطه (٦) تعریف می‌شود.

$$\frac{3}{2}\left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s\rho_s\theta)+\nabla\cdot(\alpha_s\rho_s\vec{V_s}\theta)\right]=(-p_s\bar{\bar{I}}+\bar{\bar{\tau}}_s):\nabla\vec{V_s}+\nabla\cdot(k_{\theta s}\nabla\theta)-\gamma_{\theta s}-3\beta\theta \quad (۶)$$

در معادلات فوق تانسور تنش فاز گاز و جامد به ترتیب مطابق رابطه (۷) و (۸) تعریف می‌شود.

$$\bar{\bar{\tau}}_g=\alpha_g\mu_g\left\{\left[\nabla\cdot\vec{V_g}+(\nabla\cdot\vec{V_g})^T\right]-\frac{2}{3}\nabla\cdot\vec{V_g}\bar{\bar{I}}\right\} \quad (۷)$$

$$\bar{\bar{\tau}}_s=\alpha_s\mu_s\left[\nabla\cdot\vec{V_s}+(\nabla\cdot\vec{V_s})^T\right]+\alpha_s\left(\lambda_s-\frac{2}{3}\mu_s\right)\nabla\cdot\vec{V_s}\bar{\bar{I}} \quad (۸)$$

کمیت p_s فشار فاز جامد است و مطابق رابطه (۹) تعریف می‌شود.

$$p_s=\alpha_s\rho_s\theta+2\rho_s(1+e_{ss})\alpha_s^2g_{0,ss}\theta \quad (۹)$$

لزجت برشی ذرات جامد از سه بخش وابسته به برخورد، انرژی جنبشی و اصطکاک تشکیل شده است.

$$\mu_s=\mu_{s,col}+\mu_{s,kin}+\mu_{s,fr} \quad (۱۰)$$

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5}\alpha_s\rho_s d_s\, g_{0,ss}(1+e_{ss})\sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \quad (۱۱)$$

$$\mu_{s,kin} = \alpha_s\rho_s d_s \frac{\sqrt{\theta\pi}}{6(3-e_{ss})}\left[1+\frac{2}{5}(1+e_{ss})(3e_{ss}-1)\alpha_s g_{0,ss}\right] \quad (۱۲)$$

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s sin\phi}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (۱۳)$$

لزجت توده‌ای جامد نشان دهنده مقاومت ذرات در برابر انبساط و انقباض است و طبق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود.

$$\lambda_s = \frac{4}{3}\alpha_s\rho_s d_s\, g_{0,ss}(1+e_{ss})\sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \quad (۱۴)$$

ضریب نفوذ انرژی دانه‌ای به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود.

$$k_{\theta s} = \frac{150\rho_s d_s\sqrt{\pi\theta}}{384(1+e_{ss})g_{0,ss}}\left[1+\frac{6}{5}\alpha_s g_{0,ss}(1+e_{ss})\right]^2 + 2\alpha_s^2\rho_s d_s g_{0,ss}(1+e_{ss})\sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \quad (۱۵)$$

رابطه (۱۶) اتلاف انرژی برخوردی را تعریف می‌کند.

$$\gamma_{\theta s} = \frac{12(1-e_{ss}^2)g_{0,ss}}{d_s\sqrt{\pi}}\rho_s\alpha_s^2\theta^{\frac{3}{2}} \quad (۱۶)$$

تابع توزیع شعاعی گذار از حالت تراکم پذیر با شرط $\alpha_s < \alpha_{s,max}$، به شرایط تراکم ناپذیر ($\alpha_s = \alpha_{s,max}$) را نشان می‌دهد و مطابق رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$g_{0,ss} = \left[1-\left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^{-1} \quad (۱۷)$$

ضریب تبادل تکانه بین فازهای جامد و گاز از تأثیر گذارترین عبارات در معادله بقای تکانه است. در مطالعه حاضر از مدل گیداسپو مطابق رابطه (۱۸) استفاده شده است.

$$\beta = \begin{cases} \frac{3}{4}C_D\left(\frac{\alpha_s\alpha_g\rho_g|\vec{V}_s-\vec{V}_g|}{d_s}\right)\alpha_g^{-2.65} & ,\alpha_g > 0.8 \\ 150\left(\frac{\alpha_s(1-\alpha_g)\mu_g}{\alpha_g d_s^2}\right)+1.75\left(\frac{\alpha_s\rho_g|\vec{V}_s-\vec{V}_g|}{d_s}\right) & ,\alpha_g > 0.8 \end{cases} \quad (۱۸)$$

که در این رابطه C_D ضریب پسا از رابطه (۱۹) بدست می‌آید.

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{\alpha_g Re_s}\left[1+0.15(\alpha_g Re_s)^{0.687}\right], & Re_s < 1000 \\ 0.44, & Re_s \geq 1000 \end{cases} \quad (۱۹)$$

عدد رینولدز نسبی از طبق رابطه (۲۰) تعیین می‌شود.

$$Re_s = \frac{\rho_g d_s|\vec{V}_s-\vec{V}_g|}{\mu_g} \quad (۲۰)$$

۲-۲- هندسه و خواص فیزیکی

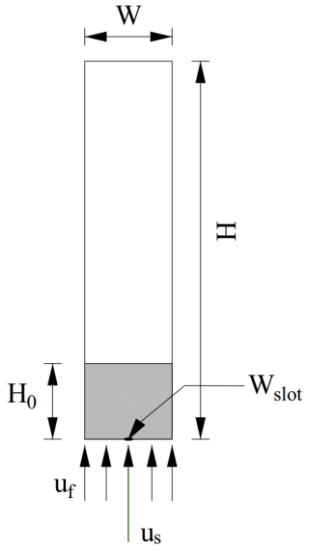
شبیه‌سازی عددی بر اساس سامانه آزمایشگاهی لینک و همکاران [۱۵] به صورت دوبعدی در دستگاه مختصات کارتزین انجام شده و طرح شماتیک هندسه بستر سیال فورانی در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین خواص فیزیکی هر فاز و کمیت‌های مورد استفاده در شبیه سازی مطابق جدول ۱ آورده شده است.

۲-۳- شرایط مرزی و اولیه

مطابق آزمایش لینک و همکاران [۱۵] بستر سیال فورانی حاوی ذرات جامد کروی شیشه‌ای با کسر حجمی اولیه ۰/۶ است. در پایین بستر جریان هوای فورانی و یکنواخت با شرط مرزی ورودی سرعت و بدون فاز جامد وارد می‌شود. برای خروجی گاز از بالای بستر، شرط مرزی فشار نسبی خروجی صفر تعیین شده است. در دیوارهای جانبی، برای گاز شرط مرزی عدم لغزش و برای فاز جامد شرط مرزی لغزش نسبی با استفاده از مدل جانسون و جکسون به صورت رابطه (۲۱) در نظر گرفته شده است.

$$\vec{V}_{s,w} = -\frac{6}{\pi\sqrt{3}}\frac{\mu_s\alpha_{s,max}}{\varphi\rho_s g_{0,ss}\alpha_s\sqrt{\theta}}\frac{\partial\vec{V}_{s,w}}{\partial n} \quad (۲۱)$$

که در آن φ ضریب انعکاسی تعریف شده است.



شکل ۱ طرح شماتیک هندسه دوبعدی بستر سیال فورانی [۱۵]

Fig. 1 Schematic of the 2D geometry of spout fluidized bed

Parameter	Dimension	Value
Bed height (H)	m	0.75
Bed width (W)	m	0.15
Slot width (W_{slot})	m	0.01
Static bed height (H_0)	m	0.13
Air density (ρ_g)	kg/m³	1.225
Air viscosity (μ_g)	kg/m.s	1.7894×10^{-5}
Particle density (ρ_s)	kg/m³	2526
Particle diameter (d_s)	mm	2.5
Spout velocity (u_s)	m/s	30
Fluidization velocity (u_f)	m/s	1.5
Particle-particle restitution coefficient	-	0.9
Particle-wall restitution coefficient	-	0.2
Maximum packing limit ($\alpha_{s,max}$)	-	0.63
Specularity coefficient (φ)	-	0.005, 0.01, 0.05, 0.5

جدول ۱ ابعاد هندسی بستر و خواص فیزیکی هر فاز

Table 1 Geometric dimension of bed and physical properties of each phase

۲-۴- روش حل

معادلات حاکم بخش ۲-۱ برای فازهای گاز و جامد به کمک نرم‌افزار تجاری انسیس فلوئنت ۲۰۲۱ حل شده‌اند. از الگوریتم پی‌سی-سیمپل (PC-SIMPLE) که نسخه توسعه یافته الگوریتم سیمپل برای جریان چندفازی است، برای ترکیب فشار و سرعت استفاده شده است. گسسته سازی ترم‌های جابجایی به روش مرتبه اول بالادست (First Order Upwind) و عبارات گذرا به صورت ضمنی مرتبه اول (First Order Implicit) تعیین شده است. ضریب زیر تخفیف (Under-Relaxation Factor) فشار برابر ۰/۵، تکانه و کسر حجمی برابر ۰/۴ و دمای دانه ای برابر ۰/۲ درنظر گرفته شده است. معیار همگرایی برای حداکثر باقیمانده بین دو تکرار متوالی برابر ۰/۰۰۱ و شبیه‌سازی گذرا با گام زمانی ثابت ۰/۰۰۰۱ ثانیه انتخاب شده است. در هر گام زمانی برای رسیدن به همگرایی حداکثر ۱۰۰ تکرار درنظر گرفته شده و شبیه‌سازی‌ها به مدت ۱۰ ثانیه انجام شده

است. متوسط گیری زمانی پس از رسیدن به حالت شبه پایا، از زمان ۳ تا ۱۰ ثانیه صورت پذیرفته است. کلیه محاسبات عددی روی رایانه‌ای با پردازنده اینتل نسل ۵ (Core i5-5400) و فرکانس ۳ گیگاهرتز و حافظه اصلی ۸ گیگابایت به مدت حدود ۳۰ ساعت برای هر شبیه سازی انجام شده است.

۳- نتایج و بحث

در پژوهش حاضر اثر ضریب انعکاسی در شرط مرزی ذره-دیوار روی هیدرودینامیک جریان دوفازی گاز-ذره در بستر سیال فورانی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور پس از مطالعه استقلال از شبکه، اعتبار سنجی حل عددی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی لینک و همکاران [۱۵] و همچنین نتایج شبیه سازی اویلری-لاگرانژی سعیدی و همکاران [۲۲] انجام شده است. در ادامه تأثیر این کمیت بر کسر حجمی جامد، سرعت عمودی گاز، تخلخل بستر و نوسانات سرعت جامد در ارتفاع‌های مختلف بستر به ازای مقادیر مختلف ضریب انعکاسی بررسی و مورد تحلیل قرار گرفته است.

۳-۱- استقلال از شبکه

بررسی استقلال نتایج از ابعاد شبکه محاسباتی در قابلیت اطمینان شبیه‌سازی عددی بسیار حائز اهمیت است. مطابق پژوهش شتریمایوم و همکاران [۱۶]، در شبیه‌سازی دوسیاله فرض می‌شود در هر سلول محاسباتی فازها همگن اند و در صورتی که ابعاد سلول بزرگتر از قطر ذرات باشد، در محاسبه نیروی پسا و سایر کمیت‌ها خطا ایجاد می‌شود، لذا سعی بر آن است تا ابعاد شبکه حداقل به اندازه قطر ذرات باشد. از طرف مقابل، شی و همکاران [۲۰] بیان نمودند با توجه به روابط مورد استفاده در تعیین نیروی وارد بر ذره، ابعاد هر ضلع سلول باید حداقل دوبرابر قطر ذرات باشد. برخی مطالعات از جمله لی و همکاران [۲۴]، لوها و همکاران [۱۹] با ابعاد سلول حتی ۱۰ برابر قطر ذرات نیز به نتایج مستقل از شبکه دست یافته‌اند.

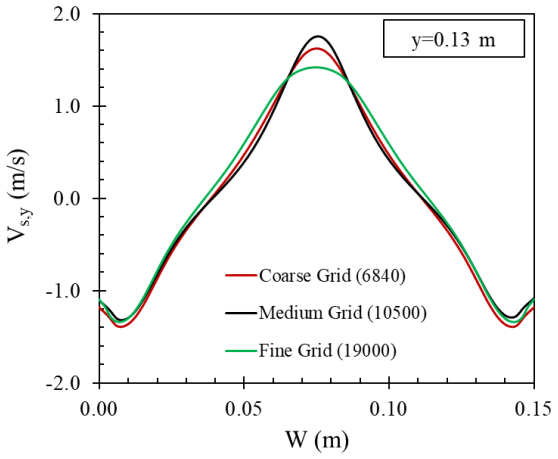
در این مطالعه استقلال نتایج از شبکه محاسباتی در سه شبکه بندی درشت (۶۸۴۰ سلول)، متوسط (۱۰۵۰۰ سلول) و ریز (۱۹۰۰۰ سلول) در شکل ۲ برای متوسط زمانی سرعت عمودی جامد نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تفاوت نتایج شبکه متوسط و ریز ناچیز است، لذا در ادامه نتایج از شبکه متوسط استفاده شده است.

۳-۲- اعتبار سنجی

به منظور بررسی صحت شبیه سازی عددی حاضر نتایج بدست آمده از متوسط زمانی توزیع شار جرمی عمودی ذرات، با داده‌های آزمایشگاهی لینک و همکاران [۱۵] مقایسه شده است. شار جرمی عمودی ذرات جامد به صورت رابطه (۲۲) تعریف می‌شود [۲۲].

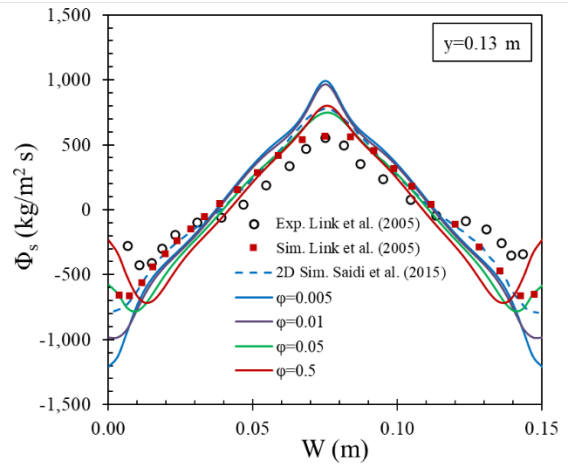
$$\Phi_s = \alpha_s \rho_s \vec{V}_s \qquad (۲۲)$$

و یک کمیت مهم در مطالعه رفتار بسترهای سیال به شمار می‌رود. در شکل ۳ مقایسه‌ای بین نتایج مطالعه حاضر با داده‌های آزمایشگاهی و عددی لینک و همکاران [۱۵] و همچنین نتایج شبیه‌سازی سعیدی و همکاران [۲۲] نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود در بیشتر نواحی تطابق قابل قبولی با داده‌های تجربی وجود دارد. در مرکز بستر نتایج شبیه سازی حاضر برای ضریب انعکاسی ۰/۵ و ۰/۰۵ با نتایج شبیه سازی سعیدی و همکاران [۲۲] مطابقت دارد و با داده‌های آزمایشگاهی لینک و همکاران کمی اختلاف نشان می‌دهد. این اختلاف می‌تواند به دلیل انتخاب مدل‌های استفاده شده در تئوری جنبشی جریان دانه‌ای از جمله فشار جامد، تنش جامد، لزجت جامد و تعامل ذره-جامد باشد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، حساسیت نتایج به ضرایب انعکاسی ۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۵ در مجاورت دیوار بسیار زیاد است. افزایش ضریب انعکاسی از ۰/۰۰۵ تا ۰/۵ باعث افزایش اصطکاک ذره و دیوار و کاهش شار جرمی عمودی ذرات به سمت پایین می‌شود. این انتقال تکانه از ذره به دیوار سبب می‌شود در قسمت فورانی بستر شار جرمی کاهش یابد. به عبارت دیگر به ازای مقادیر بزرگ ضریب انعکاسی علاوه بر شار جرمی ذرات کمتر در مجاورت دیوار، شار عمودی جریان در قسمت فورانی بستر نیز کاهش می‌یابد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد بهترین تطابق بین شبیه‌سازی حاضر با داده‌های آزمایشگاهی در ضریب انعکاسی ۰/۰۵ بدست می‌آید که اختلاف نتایج حاضر با شبیه سازی اویلری-لاگرانژی لینک و همکاران [۱۵] و سعیدی و همکاران [۲۲] در مرکز حداکثر ۶/۵٪ و نزدیک دیوار حداکثر ۱۸/۱٪ می‌باشد. برای ضرایب انعکاسی ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ اختلاف زیاد بین نتایج در مرکز و نزدیک دیوار مشاهده می‌شود.



شکل ۲ سرعت عمودی جامد در شبکه های مختلف

Fig.2 Solid Vertical Velocity for different grid resolutions



شکل ۳ متوسط زمانی شار جرمی عمودی ذرات برای ضرایب انعکاسی مختلف

Fig. 3 Time averaged vertical particle flux for different specularity coefficients

۳-۳- کسر حجمی جامد

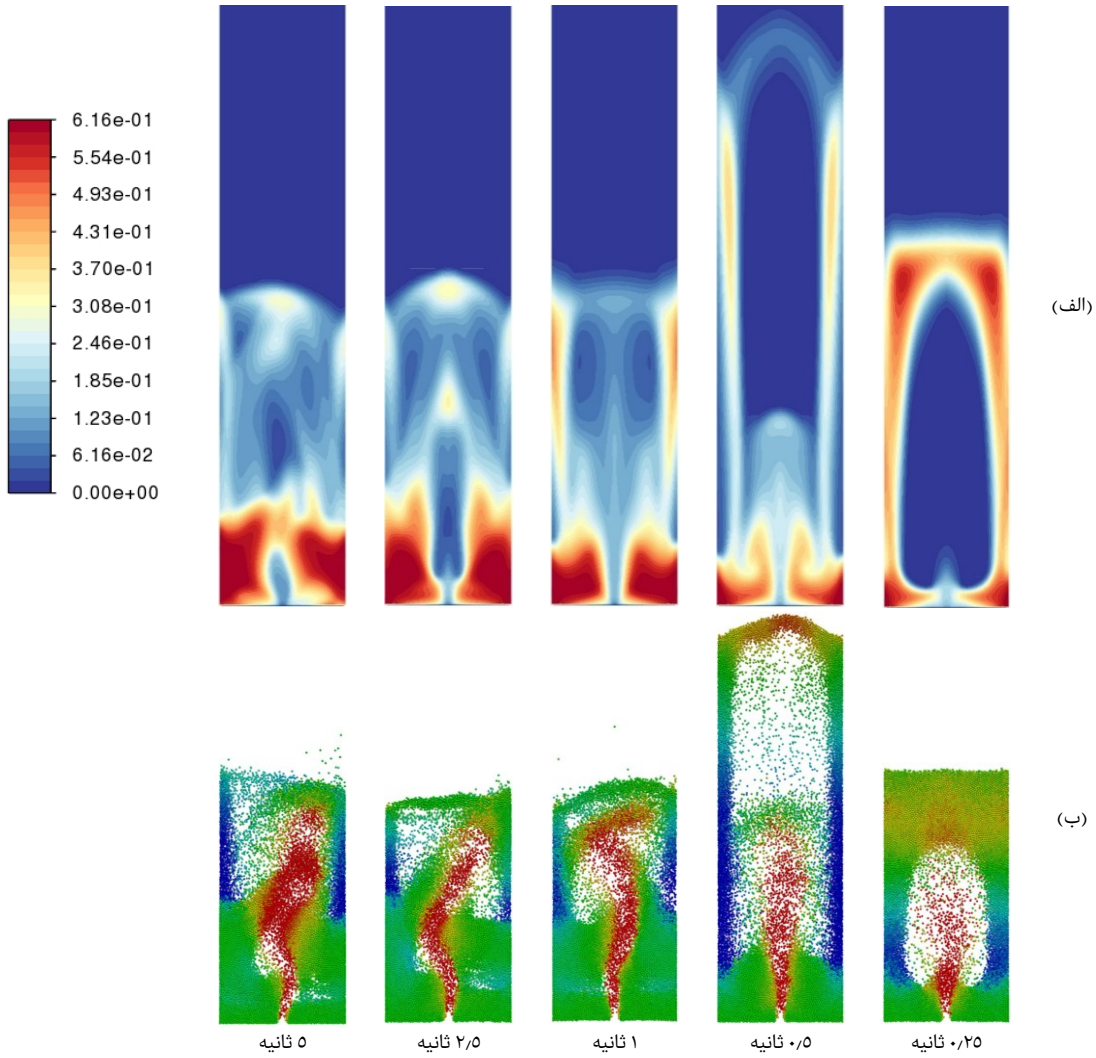
توزیع لحظه‌ای کسر حجمی جامد در بازه زمانی ۰/۲۵ ثانیه الی ۵ ثانیه در شکل ٤ نشان داده شده است. در شکل ٤ (الف) نتایج شبیه سازی حاضر و در شکل ٤ (ب) نتایج شبیه‌سازی اویلری-لاگرانژی سعیدی و همکاران [۲۲] جهت مقایسه آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با شروع حل و ورود جریان از پایین بستر، حباب گاز تشکیل و رشد می‌نماید و با گذشت زمان رفته رفته به ابعاد آن اضافه می‌شود تا جایی که در زمان ۰/۵ ثانیه به صورت یک لخته تا سطح بستر بالا می‌آید. در این لحظه تشکیل حباب و رشد آن در هر دو روش اویلری-اویلری و اویلری-لاگرانژی تطابق خوبی با یکدیگر دارند. در ادامه و در زمان ۱ ثانیه پس از ترکیدن لخته جریان گاز، ذرات جامد از دو طرف دیوار به سمت پایین برمی‌گردد. پس از زمان ۲/۵ ثانیه جریان هوای فورانی در مرکز و تجمع ذرات در کنار دیوار مشاهده می‌شود و این الگوی جریان به صورت شبه پایا در ادامه شبیه سازی وجود دارد. مقایسه نتایج حاضر با سعیدی و همکاران [۲۲] در شکل ٤ مطابقت خوبی را در کلیه بازه‌های زمانی نشان می‌دهد.

متوسط زمانی کسر حجمی ذرات برای ضرایب انعکاسی مختلف و مقایسه با نتایج تجربی لینک و همکاران [۱۵] و نتایج عددی لی و همکاران [۱۷] در شکل ۵ آورده شده است. در ضریب انعکاسی ۰/۰۰۵ که اصطکاک بین ذرات و دیوار کم است، حرکت ذرات در بستر به آسانی انجام می‌شود، لذا تراکم ذرات نزدیک دیوار کمتر و در نواحی مرکزی افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب انعکاسی و به تبع آن افزایش اصطکاک بین ذره و دیوار، حرکت آزادانه ذرات در نزدیکی دیوار کاهش می‌یابد که سبب می‌شود کسر حجمی ذرات در اطراف دیوار و پایین بستر افزایش و در بالای قسمت فورانی کاهش یابد و در ضریب انعکاسی ۰/۵ تراکم ذرات در بالای قسمت فورانی بسیار اندک است. مشاهده می‌شود که ناحیه تراکم ذرات جامد نزدیک دیوار با افزایش ضریب انعکاسی بزرگتر و تراکم ذرات در قسمت فورانی مرکز بستر کاهش می‌یابد.

مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج تجربی و عددی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد تغییر ضریب انعکاسی اثر چندانی در ارتفاع فورانی بستر ندارد و با نتایج لوها و همکاران [۱۹] و شتریمایوم و همکاران [۱٦] مطابقت دارد. در شکل ۵ مشاهده می‌شود الگوی کلی توزیع ذرات در روش دوسیاله مشابه نتایج آزمایشگاهی و عددی پژوهش‌های قبلی است و تفاوت عمدتاً در کسر حجمی ذرات جامد در نواحی مختلف بستر است. برخلاف مطالعه عدنان و همکاران [۸] در مقایسه روش دوسیاله با روش ذرات مجزای متراکم (Dense Discrete Particle Method, DDPM) که اثر ضریب انعکاسی در توزیع کسر حجمی ذرات را بسیار ناچیز گزارش نمودند، در این پژوهش اثر ضریب انعکاسی در الگوی جریان کاملاً مشهود و قابل تأمل است. همچنین آنها بهترین تطابق نتایج را در ضریب انعکاسی ۰/٦ گزارش کردند که در مطالعه حاضر برای ضریب انعکاسی ۰/۵ و ۰/۰۵ نتایج بسیار نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌آید.

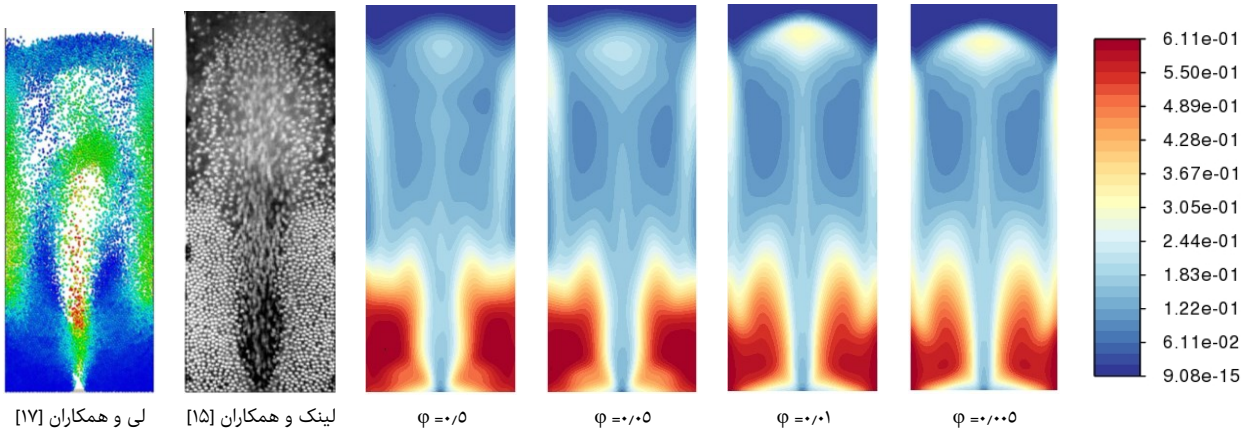
۳-٤- سرعت عمودی هوا

توزیع سرعت عمودی جریان هوا در ارتفاع ۰/۱۵ متر بستر برای چهار ضریب انعکاسی مختلف در شکل ٦ آورده شده و با نتایج آزمایشگاهی لینک و همکاران [۱۵] و شبیه‌سازی لی و همکاران [۱۷] مقایسه شده است. در قسمت مرکزی بستر و ناحیه فورانی، حداکثر سرعت جریان عمودی هوا برای ضرایب انعکاسی مختلف تقریباً ۹ متر بر ثانیه است که با نتایج تجربی حدود ۲۰٪ اختلاف نشان می‌دهد. تأثیر ضریب انعکاسی روی سرعت متوسط عمودی هوا در ناحیه فورانی ناچیز است، ولی در نواحی نزدیک دیوار، در ضریب انعکاسی ۰/۰۰۵ که اصطکاک کم است، انتقال تکانه از ذره به دیوار اندک و سرعت ذرات بیشتر است، در نتیجه سرعت هوا در این محدوده اندک است. با افزایش ضریب انعکاسی، اصطکاک ذره و دیوار افزایش، سرعت ذره کاهش و در نتیجه سرعت هوا افزایش می‌یابد. در ناحیه بسیار نزدیک دیوار، در ضریب انعکاسی ۰/۵ تا ۰/۰۰۱ سرعت هوا بیشتر از نتایج تجربی و در ضریب انعکاسی ۰/۰۰۵ نتایج به داده‌های موجود بسیار نزدیک است. با فاصله گرفتن از دیوار، تطابق نتایج شبیه‌سازی حاضر با داده‌های تجربی بهبود یافته و در ۰/۰۵ و ۰/۵ تطابق قابل قبولی مشاهده می‌شود.



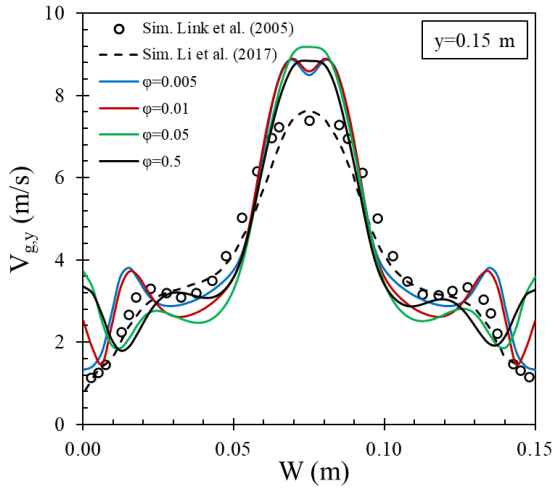
شکل ٤ کسر حجمی جامد در بازه زمانی ۰/۲۵ ثانیه تا ۵ ثانیه برای ضریب انعکاسی ۰/۰۵ ، الف) مطالعه حاضر، ب) سعیدی و همکاران [۲۲]

Fig. 4 Solid volume fraction over time for specularity coefficient of 0.05, (a) present study, (b) Saidi et al.



شکل ۵ متوسط زمانی کسر حجمی جامد برای ضرایب انعکاسی مختلف

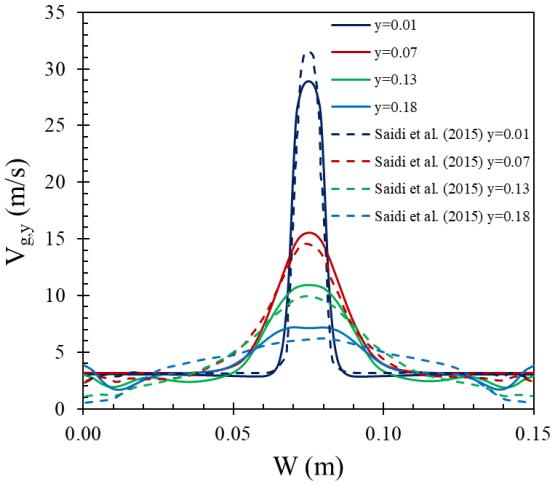
Fig. 5 Time averaged solid volume fraction for different specularity coefficients



شکل ۶ متوسط زمانی سرعت عمودی هوا برای ضرایب انعکاسی مختلف

Fig. 6 Time averaged vertical air velocity for different specularity coefficients

باید در نظر داشت که به منظور کاهش حجم محاسبات عددی، شبیه‌سازی حاضر به صورت دوبعدی انجام شده و اثر شرط مرزی دیوار برای صفحات جلو و پشت بستر در نظر گرفته نشده است که می‌تواند یکی از دلایل اختلاف نتایج حاضر با داده‌های پیشین باشد.



شکل ۷ متوسط زمانی سرعت عمودی هوا در ارتفاع‌های مختلف برای ضریب انعکاسی ۰/۰۵

Fig. 7 Time averaged vertical air velocity at different heights for specularity coefficient of 0.05

در شکل ۷ توزیع متوسط زمانی سرعت عمودی هوا در عرض بستر و در ارتفاع‌های ۰/۰۱، ۰/۰۷، ۰/۱۳ و ۰/۱۸ متر حاصل از شبیه سازی حاضر برای ضریب انعکاسی ۰/۰۵ و نتایج روش المان مجزای سعیدی و همکاران [۲۲] نمایش داده شده است. با توجه به شکل تطابق قابل قبولی بین نتایج ملاحظه می‌شود، به طوری که در ارتفاع کم، روش المان مجزا سرعت بیشتری نسبت به روش دوسیاله پیش بینی می‌کند، در حالی که در ارتفاع بیشتر، مقدار پیش بینی سرعت عمودی هوا روش دوسیاله حاضر کمی بیشتر از روش المان مجزا است. اختلاف بین نتایج برای مرکز بستر در ارتفاع ۰/۰۱ متر حداکثر ۸/۳٪، در ارتفاع ۰/۰۷ متر حداکثر ۵/۷٪ ، در ارتفاع ۰/۱۳ متر حداکثر ۱۰/۴٪ و در ارتفاع ۰/۱۸ متر حداکثر ۲۰/۴٪ می‌رسد. توزیع سرعت نزدیک دیوار در ارتفاع ۰/۰۱ و ۰/۰۷ متر بسیار نزدیک هم است و در ارتفاع‌های ۰/۱۳ و ۰/۱۸ متر اختلاف بین نتایج افزایش می‌یابد.

۳-۵- تخلخل بستر

شکل ۸ نمودار توزیع متوسط زمانی تخلخل بستر برای چهار ضریب انعکاسی ۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۵ در ارتفاع‌های ۰/۰۱، ۰/۰۷، ۰/۱۳ و ۰/۱۸ متر نشان می‌دهد. در مقطع نزدیک ورودی جریان هوا در ارتفاع ۰/۰۱ متر مطابق شکل ۸ (الف)، مقایسه نتایج روش حاضر با داده‌های سعیدی و همکاران [۲۲] تطابق خوبی را در قسمت فورانی نشان می‌دهد، ولی در نواحی اطراف جریان فورانی اختلاف قابل توجه است. در نزدیکی دیوار اختلاف بین نتایج دو روش ناچیز و تأثیر ضریب انعکاسی اندک است. با افزایش ضریب انعکاسی و در نتیجه افزایش اصطکاک ذره و دیوار، تراکم ذرات کاهش و کسر حجمی گاز در مجاورت دیوار افزایش می‌یابد.

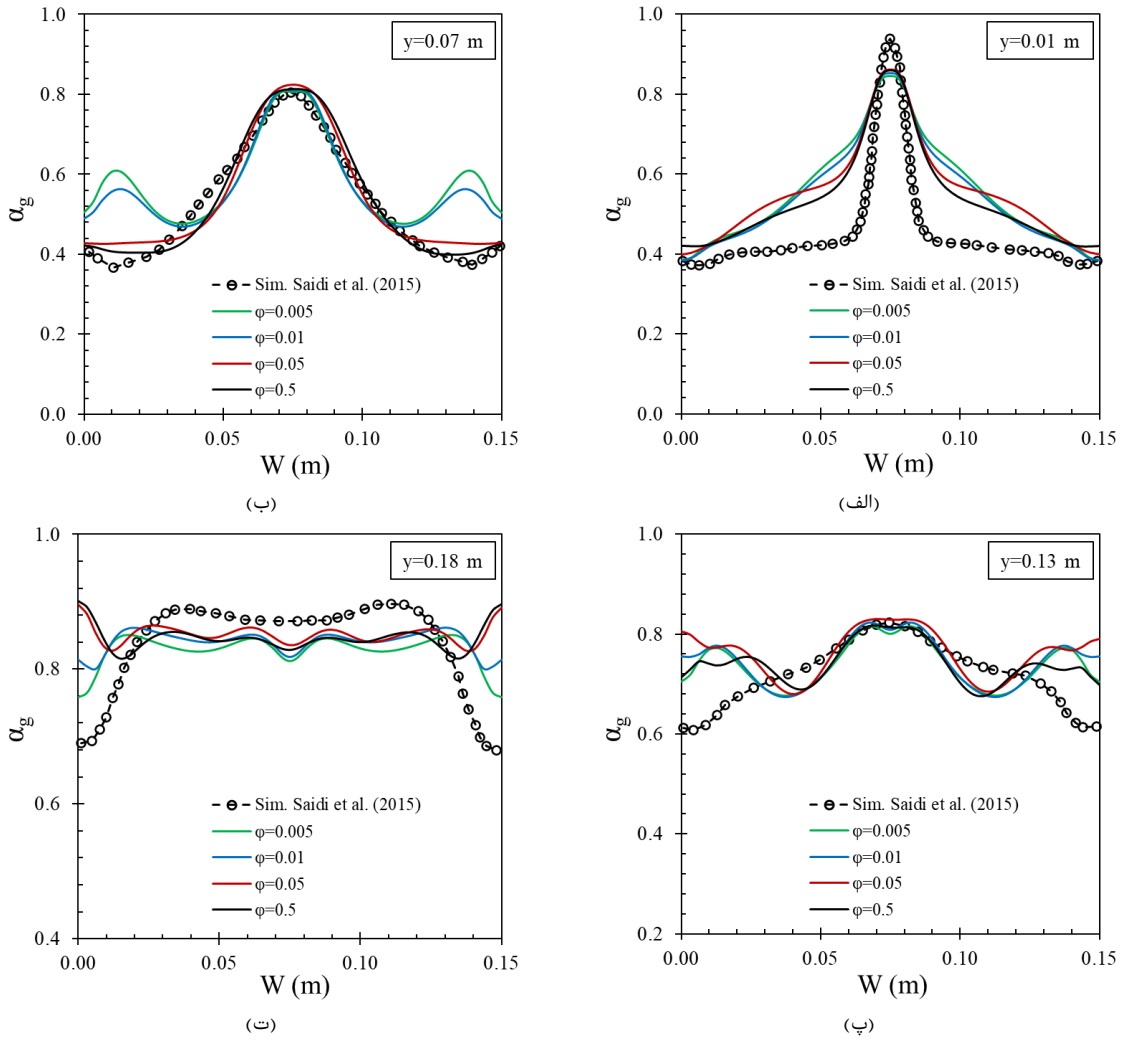
در شکل ۸ (ب)، در ارتفاع ۰/۰۷ متر برای ضرایب انعکاسی ۰/۵ و ۰/۰۵ اختلاف بین نتایج اندک است و با افزایش ضریب انعکاسی به ۰/۰۱ و ۰/۰۰۵، تخلخل بستر اختلاف زیادی را با پژوهش سعیدی و همکاران [۲۲] در نزدیکی دیوار نشان می‌دهد. در ارتفاع‌های ۰/۱۳ و ۰/۱۸ متر مطابق شکل ۸ (پ) و (ت)، در ناحیه فورانی نتایج شبیه‌سازی‌ها به هم نزدیک است و اختلاف در نواحی برگشت جریان ذرات و مجاورت دیوار ملاحظه می‌شود. در این ارتفاع‌ها، نمودار تغییرات تخلخل بستر بسیار تحت تأثیر ضریب انعکاسی است و با تغییر این کمیت، توزیع تخلخل بستر رفتار متفاوتی را نشان می‌دهد.

در ارتفاع بستر ۰/۱۸ متر در شکل ۸ (ت)، با افزایش ضریب انعکاسی و اصطکاک بیشتر ذره و دیوار، کسر حجمی ذرات کاهش و تخلخل بستر افزایش می‌یابد. تفاوت در مقدار ضریب انعکاسی اگرچه در نزدیک دیوار سبب تغییر چشمگیر تخلخل می‌شود، اما در ناحیه فورانی و مرکز نتایج تقریباً یکسانی را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر تأثیر این کمیت در توزیع کسر حجمی و سرعت در نزدیک دیوار بسیار بیشتر از سایر نواحی است.

نکته قابل توجه اینکه در شکل ۸ (ب) برای ارتفاع ۰/۰۷ متر، تخلخل بستر در نزدیکی دیوار برای ضریب انعکاسی ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ بیشتر از ضریب انعکاسی ۰/۰۵ و ۰/۵ است، در حالی که در شکل ۸ (ت) در ارتفاع ۰/۱۸ متر عکس این رفتار مشاهده می‌شود.

برخلاف نتایج لوها و همکاران [۱۹] که تأثیر اندک ضریب انعکاسی بر توزیع کسر حجمی ذرات را گزارش نمودند، مطابق شکل ۸ مقدار ضریب انعکاسی، تأثیر بسزایی در توزیع کسر حجمی هوا در ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۸ (ت) دو برآمدگی در توزیع تخلخل بستر برای نتایج سعیدی و همکاران [۲۲] مشاهده می‌شود که مسیر ترجیحی عبور حباب‌های گاز را نشان می‌دهد، این الگوی جریان برای مقادیر مختلف ضریب انعکاسی در مدل اویلری-اویلری کاملاً متفاوت است. اگرچه برخی مطالعات مقدار ۰/۵ برای ضریب انعکاسی در بستر سیال حبابی را پیشنهاد کرده‌اند [۲۴]، ولی با توجه به نتایج بدست آمده این مقدار تطابق خوبی را در همه مقاطع نشان نمی‌دهد و به عوامل دیگری مانند سرعت نسبی ذرات، صافی سطح دیوار بستر و ذرات و جنس آنها نیز وابسته است.



شکل ۸ متوسط زمانی تخلخل بستر در ارتفاع‌های مختلف، الف) ۰/۰۱ متر، ب) ۰/۰۷ متر، پ) ۰/۱۳ متر، ت) ۰/۱۸ متر

Fig. 8 Time averaged porosity for different bed heights

۳-۶- دمای دانه‌ای جامد

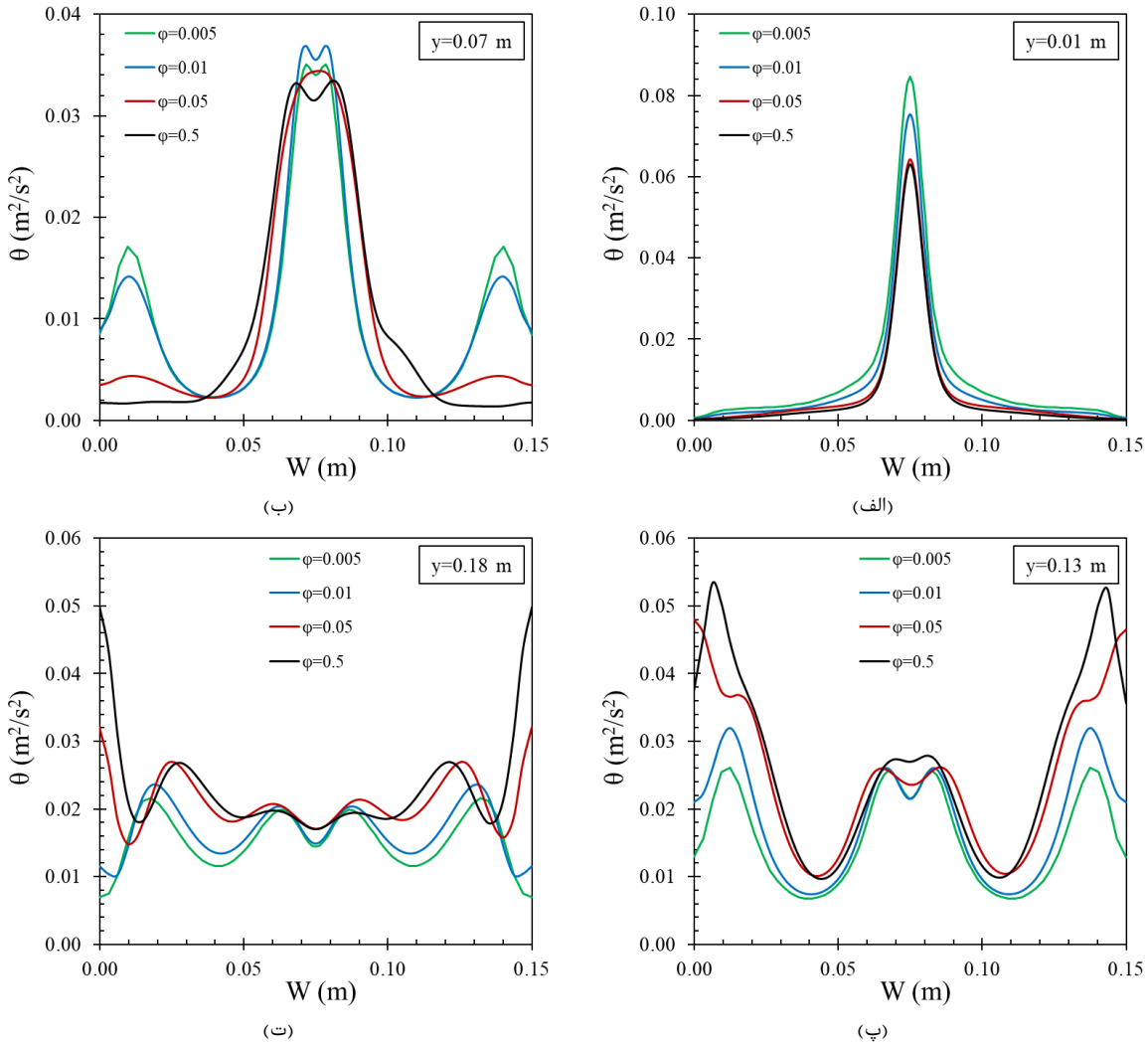
در دیدگاه اویلری-اویلری و تئوری جنبشی جریان دانه‌ای، دمای دانه‌ای به صورت رابطه (۲۳) تعریف می‌شود [۲۳]

$$\theta = \frac{1}{3}V'^2 \qquad (۲۳)$$

که متناسب با مربع نوسان سرعت ذرات است. نمودار تغییرات دمای دانه‌ای جامد در عرض بستر برای ارتفاع‌های مختلف و ضرایب انعکاسی متفاوت در شکل ۹ نشان داده شده است. برای تمام مقادیر ضریب انعکاسی در هر ارتفاع بستر، الگوی تغییرات دمای دانه‌ای تقریباً مشابه یکدیگر است. در شکل ۹ (الف) و در مقطع نزدیک جریان هوای ورودی در ارتفاع ۰/۰۱ متر، با توجه به سرعت هوای فورانی، بیشترین مقدار دمای دانه‌ای در ضریب انعکاسی ۰/۰۰۵ است که کمترین اصطکاک ذره با دیوار را دارد. با افزایش ضریب انعکاسی و در نتیجه انتقال تکانه ذره با دیوار، انرژی جنبشی ذرات و به تبع آن دمای دانه‌ای کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه اینکه با افزایش ضریب انعکاسی از ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۵ تغییرات دمای دانه‌ای شدید و از ۰/۰۵ تا ۰/۵ تغییرات اندک است. به عبارت دیگر حساسیت تغییر دمای دانه‌ای در مقادیر کوچک ضریب انعکاسی، بیشتر است.

همانطور که در شکل ۹ (الف) تا (ت) مشاهده می‌شود، در ارتفاع بیشتر، دمای دانه‌ای مرکز بستر کاهش و در نزدیکی دیوار افزایش می‌یابد. دلیل این امر کاهش شدت جریان هوای فورانی در مرکز بستر و نفوذ جریان هوا به اطراف و در نتیجه کاهش سرعت ذرات

و دمای دانه‌ای است. از طرف دیگر، دمای دانه‌ای در نزدیکی دیوار تحت تأثیر جریان برگشتی به سمت پایین ذرات افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۹ (پ) و (ت)، دمای دانه‌ای در ارتفاع ۰/۱۳ و ۰/۱۸ متر در نزدیکی دیوار بسیار زیاد و در ناحیه مرکزی اندک است. نتایج لوها و همکاران [۱۹] نیز توزیع مشابهی را نشان می‌دهد. در ارتفاع پایین با توجه به جریان غالب فورانی در مرکز، انرژی جنبشی و نوسانات سرعت ذرات زیاد است که سبب می‌شود دمای دانه‌ای در مرکز بیشتر از سایر نقاط باشد. با افزایش ارتفاع بستر، دمای دانه‌ای در مرکز بستر کاهش و در نزدیکی دیوار افزایش می‌یابد، زیرا در ارتفاع‌های بیشتر جریان ذرات عمدتاً به صورت ریزشی در نزدیکی دیوار است.



شکل ۹ متوسط زمانی دمای دانه‌ای جامد برای ضرایب انعکاسی متفاوت در ارتفاع‌های مختلف، الف) ۰/۰۱ متر، ب) ۰/۰۷ متر، پ) ۰/۱۳ متر، ت) ۰/۱۸ متر

Fig. 9 Time averaged granular temperature of solid for various specularity coefficients and different heights

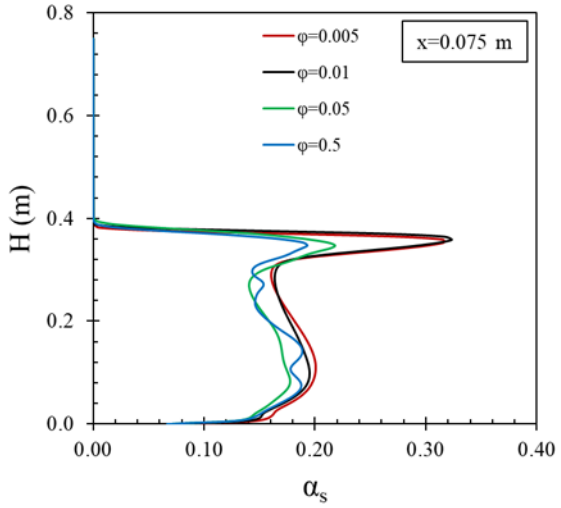
۳-۷- کسر حجمی جامد در ارتفاع بستر

تغییرات متوسط زمانی کسر حجمی جامد در امتداد عمودی مرکز بستر برای ضرایب انعکاسی مختلف در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در ضریب انعکاسی ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ کسر حجمی ذرات بیشتر از ضریب انعکاسی ۰/۰۵ و ۰/۵ است، زیرا با افزایش اصطکاک بین ذره و دیوار، حرکت ذرات و در نتیجه کسر حجمی آنها در مرکز بستر کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه اینکه تفاوت بارزی در ارتفاع متوسط بستر مشاهده نمی‌شود. به عبارت دیگر، مقدار ضریب انعکاسی در تغییر ارتفاع متوسط بستر چندان اثرگذار نیست.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه هیدرودینامیک جریان دوفازی گاز-جامد در بستر سیال فورانی به روش اویلری-اویلری و تئوری جنبشی جریان دانه‌ای شبیه سازی شده است. با توجه به عدم امکان تعیین ضریب انعکاسی به صورت آزمایشگاهی، در پژوهش حاضر نتایج حل عددی برای مقادیر مختلف ضریب انعکاسی با داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی اویلری-لاگرانژی پژوهش‌های پیشین مقایسه شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد ضریب انعکاسی کمیتی

بسیار تأثیر گذار بر هیدرودینامیک جریان فازهای گاز و جامد است. با افزایش ضریب انعکاسی انتقال تکانه ذره به دیوار افزایش می‌یابد و در نواحی نزدیک دیوار تجمع ذرات و در ناحیه فورانی مرکزی بستر، کاهش کسر حجمی ذرات مشاهده می‌شود.



شکل ۱۰ تغییرات محوری متوسط زمانی کسر حجمی جامد برای ضرایب انعکاسی مختلف، الف) مرکز بستر، ب) نزدیک دیوار

Fig. 10 Axial variation of time averaged solid volume fraction for different specularity coefficients

مقایسه نتایج متوسط زمانی شار جرمی ذرات برای روش حاضر با روش اویلری-لاگرانژی بیشترین اختلاف ٦/٥٪ در مرکز و ١٨/١٪ نزدیک دیوار نشان می‌دهد. متوسط زمانی سرعت عمودی هوا در ارتفاع‌های ٠/٠١، ٠/٠٧، ٠/١٣ و ٠/١٨ متر بیشترین اختلاف به ترتیب ٨/٣٪ ، ٥/٧٪، ١٠/٤٪ و ٢٠/٤٪ را با نتایج روش اویلری-لاگرانژی نشان می‌دهد. عواملی از جمله مدل نیرو پسا، مدل‌های استفاده شده در تئوری جنبشی جریان دانه ای و ضرایب بازگشت جامد در دقت روش حاضر مؤثر است که در این پژوهش به آن پرداخته نشده است. بررسی نتایج بدست آمده با داده‌های تجربی بهترین تطابق را در ضریب انعکاسی ٠/٥ و ٠/٠٥ نشان می‌دهد. همچنین مقایسه توزیع کسر حجمی گاز در شبیه سازی حاضر با نتایج روش اویلری-لاگرانژی بیان می‌کند در ارتفاع‌های مختلف بستر تفاوت چشمگیری بین نتایج وجود دارد و با تغییر ضریب انعکاسی تخلخل بستر نزدیک دیوار به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد، ولی در نواحی مرکزی اثرات آن کمتر مشاهده می‌شود. تغییرات دمای دانه‌ای جامد نشان می‌دهد با افزایش ضریب انعکاسی انرژی جنبشی ذرات جامد و در نتیجه دمای دانه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین حساسیت تغییر دمای دانه‌ای به ضریب انعکاسی در مقادیر کوچک شدیدتر است. تغییرات کسر حجمی جامد در امتداد بستر تفاوت بارزی در ارتفاع متوسط بستر برای ضرایب انعکاسی مختلف نشان نمی‌دهد. به بیان دیگر، مقدار ضریب انعکاسی در تغییر ارتفاع متوسط بستر اثرگذار نیست.

فهرست علائم

C_d	ضریب پسا
d_s	قطر ذره (m)
e_{ss}	ضریب بازگشت ذره-ذره
e_{sw}	ضریب بازگشت ذره-دیوار
g	شتاب گرانش (m^2/s)
$g_{0,ss}$	تابع توزیع شعاعی
H	ارتفاع بستر (m)
H_0	ارتفاع اولیه بستر (m)
I	تانسور تنش انحرافی
k	ضریب نفوذ انرژی دانه ای (W/mK)
P	فشار (Pa)
Re	عدد رینولدز
t	زمان (s)
u_f	سرعت جریان یکنواخت هوا (m/s)
u_s	سرعت جریان فورانی هوا (m/s)
V	سرعت (m/s)
W	عرض بستر (K)

علائم یونانی

α	کسر حجمی
β	ضریب تبادل تکانه بین فازی
θ	دمای دانه‌ای (m^2/s^2)
λ	لزجت توده‌ای (kg/m.s)
μ	لزجت برشی (kg/m.s)
ρ	چگالی (kg/m^3)
τ	تانسور تنش (Pa)
φ	ضریب انعکاسی
ϕ	زاویه اصطکاک داخلی (°)
Φ_s	شار جرمی ذرات ($kg/m^2.s$)

زیرنویس

col	برخورد
fr	اصطکاک
g	فاز گاز
kin	جنبشی
p	ذره
s	فاز جامد

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسنده است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: هیچگونه تعارض منافع مالی، سازمانی یا شخصی در ارتباط با انجام این پژوهش وجود ندارد.

منابع

[1] Y. Yue, T. Wang, M. Sakai, and Y. Shen, "Particle-scale study of spout deflection in a flat-bottomed spout fluidized bed," Chemical Engineering Science, vol. 205, pp. 121-133, 2019. doi: 10.1016 /j.ces.2019.04.031

[2] Z. Yan, X. Liu, J. Liu, Y. Liu, G. Li, and L. Zhou, "A Euler-Euler hydrodynamic modelling and simulation of dense particle flow in a small-scale fluidized bed," Advanced Powder Technology, vol. 35, pp. 104691, 2024. doi: 10.1016/j.apt.2024.104691

[3] L. Zhou, H. Yu, Z. Zhao, D. Kallon, R. Agarwal, and J. Chen, "CFD-DEM modeling and simulation of ellipsoidal particles in a gas–solid spouted bed," Advanced Powder Technology, vol. 36(12), 105095, (2025). doi: 10.1016/j.apt.2025.105095
[4] Y. Yue, W. Zhao, X. Sun, H. Che, and R. Duan, "A CFD-DEM study of a two-joint spouting flow pattern in a multiple rectangular spout fluidized bed," Powder Technology, vol. 435, pp. 119351, 2024. doi: 10.1016/j.powtec.2023.119351
[5] H. Hoorijani, B. Esgandari, R. Zarghami, R. Sotudeh-Gharebagh, and N. Mostoufi, "Comparative CFD-DEM study of flow regimes in spout-fluid beds," Particuology, vol. 85, pp. 323-334, 2024. doi: 10.1016/j.partic.2023.07.011
[6] X. Zhu, Z. Shi, G. Song, Y. Li, H. Wang, R. Ocone, and Z. Wang, "Impact of pressure on gas-solid hydrodynamics of Geldart B and D particles in a pressurized bubbling fluidized bed: A CFD-DEM study," Particuology, vol. 96, pp. 328-340, 2025. doi: 10.1016/j.partic.2024.11.016
[7] M. Adnan, J. Sun, N. Ahmad, and J.J. Wei, "Validation and sensitivity analysis of an Eulerian-Eulerian two-fluid model (TFM) for 3D simulations of a tapered fluidized bed," Powder Technology, vol. 396, pp. 490-518, 2022. doi: 10.1016/j.powtec.2021.08.057
[8] M. Adnan, J. Sun, N. Ahmad, and J.J. Wei, "Comparative CFD modeling of a bubbling bed using a Eulerian–Eulerian two-fluid model (TFM) and a Eulerian-Lagrangian dense discrete phase model (DDPM)," Powder Technology, vol. 383, pp. 418-442, 2021. doi: 10.1016/j.powtec.2021.01.063
[9] M. Zarepour, D.J. Bergstrom, L. Zhang, and R.J. Spiteri, "The effect of collision parameters on the 3D Eulerian simulation of a thin rectangular bubbling fluidized bed," International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 107, pp. 109354, 2024. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109354
[10] X. Guo, C. Wang, X. Li, and G. Liu, "A dynamic restitution coefficient model incorporating friction, impact velocity, and temperature effects: Validation in a bubbling fluidized bed," Powder Technology, vol. 469, pp. 121722, 2025. doi: 10.1016/j.powtec.2025.121722
[11] T. Fukada, G. Karte, and T. Pröll, "Effect of drag and friction models for the numerical prediction of particle mixing in Geldart Type B fluidized beds," Particuology, 2026 (In press). doi: 10.1016/j.partic.2025.12.015
[12] C. Moliner, F. Marchelli, L. Ong, A. Martinez-Felipe, D. Van der A, and E. Arato, "Sensitivity analysis and validation of a Two Fluid Method (TFM) model for a spouted bed," Chemical Engineering Science, vol. 207, pp. 39-53, 2019. doi: 10.1016/j.ces.2019.06.008
[13] J. Zhao, G. Liu, X. Yin, X. Li, Z. Gao, and H. Lu, "Two-Fluid Simulation of a Three-Dimensional Spout-Fluid Bed: Flow Structures, Regimes, and Insight into the Mechanism of Particle- Particle Momentum Transfer," Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 60, no. 21, pp. 7950-7965, 2021. doi: 10.1021/acs.iecr.1c00928
[14] J. M. Link, N. G. Deen, J. A. M. Kuipers, X. Fan, A. Ingram, D. J. Parker, J. Wood, and J. P. K. Seville, "PEPT and discrete particle simulation study of spout-fluid bed regimes," AIChE Journal, vol. 54, no. 5, pp. 1189-1202, 2008. doi: 10.1002/aic.11456
[15] J. M. Link, L. A. Cuypers, N. G. Deen, and J. A. M. Kuipers, "Flow regimes in a spout–fluid bed: A combined experimental and simulation study," Chemical Engineering Science, vol. 60, pp. 3425-3442, 2005. doi: 10.1016/j.ces.2005.01.027
[16] K. S. Kshetrimayum, S. Park, C. Han, and C.J. Lee, "EMMS drag model for simulating a gas–solid fluidized bed of geldart B particles: Effect of bed model parameters and polydisperity," Particuology, vol. 51, pp. 142-154, 2020. doi: 10.1016/j.partic.2019.10.004
[17] L. Li, B. Li, and Z. Liu, "Modeling of spout-fluidized beds and investigation of drag closures using OpenFOAM," Powder Technology, vol. 305, pp. 364-376, 2017. doi: 10.1016/j.powtec.2016.10.005
[18] J. Zhuang, Y. Zhao, M. Zhou, C. Wang, and B. Lu, "Comparative study of the single and double specularity coefficients on two-fluid modeling of a pseudo-2D gas–solid fluidized bed," Advanced Powder Technology, vol. 33, pp. 103721, 2022. doi: 10.1016/j.apt.2022.103721
[19] C. Loha, H. Chattopadhyay, and P. K. Chatterjee, "Euler-Euler CFD modeling of fluidized bed: Influence of specularity coefficient on hydrodynamic behavior". Particuology, vol. 11, pp. 673-680, 2013. doi: 10.1016/j.partic.2012.08.007
[20] H. Shi, A. Komrakova, and P. Nikrityuk, "Fluidized beds modeling: Validation of 2D and 3D simulations against experiments," Powder Technology, vol. 343, pp. 479-494, 2019. doi: 10.1016/j.powtec.2018.11.043
[21] C. Altantzis, R.B. Bates, and A.F. Ghoniem, "3D Eulerian modeling of thin rectangular gas–solid fluidized beds: Estimation of the specularity coefficient and its effects on bubbling dynamics and circulation times," Powder Technology, vol. 270, pp. 256-270, 2015. doi: 10.1016/j.powtec.2014.10.029
[22] M. Saidi, H. B. Tabrizi, J. R. Grace, and C. J. Lim, "Hydrodynamic investigation of gas-solid flow in rectangular spout-fluid bed using CFD-DEM modeling," Powder Technology, vol. 284, pp. 355-364, 2015. doi: 10.1016/j.powtec.2015.07.005
[23] D. Gidaspow, Multiphase Flow and Fluidization, first ed. Academic Press, London, 1994.
[24] T. Li, J. Grace, and X. Bi, "Study of wall boundary condition in numerical simulations of bubbling fluidized beds," Powder Technology, vol. 203, pp. 447-457, 2010. doi: 10.1016/j.powtec.2010.06.005