

شبیه‌سازی ناپایای بستر شارانیده حبابی حاوی ذره‌های نوع B با استفاده از CFD در سرعت‌های بالای گاز

سید حسین حسینی

ایلام، دانشگاه ایلام، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

مرتضی زیودار*⁺، رهبر رحیمی

زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده فنی و مهندسی شهید نیکبخت، گروه مهندسی شیمی

چکیده: بستر شارانیده گاز - جامد حبابی با استفاده از مدل دو سیالی و تئوری سینتیکی جریان دانه‌ای برای مطالعه ماندگی ذرات جامد در جهت محوری و شعاعی در سه مقطع (h/H) ۰٫۲۵، ۰٫۵۸ و ۰٫۸۹، شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی‌ها در سرعت‌های بالا انجام شده است. حرکت ذره‌ها و رفتار حباب‌ها درون بستر، پیش‌بینی شده و با نتیجه‌های تجربی و یافته‌های دیگر پژوهشگران مقایسه شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که رفتار ذره‌های جامد به سرعت گاز و نسبت قطر بستر به ارتفاع ایستایی آن بستگی دارد. نتیجه‌های مدل به شدت به مدل دراگ حساس است. مدل دراگ ارسطوپور بهترین نتیجه‌ها را در سامانه‌ی مورد بررسی از خود نشان می‌دهد. در سرعت ظاهری گاز 2.1824 m/s ، مدل در هم $k-\epsilon$ و جریان آرام برای فاز پیوسته استفاده شده و نتیجه‌های این دو مدل با هم مقایسه شده‌اند. به‌طور کلی مدل موجود تطابق قابل قبولی با نتیجه‌های تجربی داشته و بهبود چشم‌گیری در کاهش خطا نسبت به کارهای گذشته را نشان می‌دهد. خطای محاسبه شده در این مطالعه در جهت شعاعی کمترین ۸ درصد در بخش پایینی بستر، بیشترین ۲۰ درصد در بخش بالای بستر و در جهت محوری ۴/۵ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: هیدرودینامیک، بستر شارانیده حبابی، CFD، مدل دو سیالی.

KEY WORDS: Hydrodynamics, Bubbling fluidized bed, CFD, Two-fluid model.

مقدمه

هیدرودینامیک بسترهای شارانیده بسیار پیچیده می‌باشد. این درحالی است که شناخت مشخصه‌های هیدرودینامیک بستر شارانیده در بسیاری موارد از جمله طراحی، افزایش مقیاس و افزایش بازده بستر امری ضروری است. روش‌های حل عددی امروزه به طور گسترده‌ای برای شناخت هیدرودینامیک بستر شارانیده گاز - جامد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان

گسترده‌ی کاربرد بسترهای شارانیده گاز - جامد، به‌خاطر مشخصه‌های اختلاط خوب و ازدیاد سطح تماس میان فازهای مختلف و در نتیجه انتقال جرم و حرارت بالای آنها می‌باشد. فرایند شارانیده کردن گاز - جامد امروزه در بسیاری از عملیات شیمیایی، نفتی، دارویی، کشاورزی، بیوشیمی، الکترونیک و صنایع تولید نیرو کاربرد دارند.

+E-mail: morteza@hamoon.usb.ac.ir

*عهده دار مکاتبات

برخی پارامترهای مدل از جمله تنش‌های فاز جامد را به صورت کمی تحلیل کردند. *Patil* و همکاران [۲] پروفیل‌های جزء حجمی گاز در بستر حبایی که یک نازل در مرکز آن تعبیه شده، با استفاده از CFX 4.4 مطالعه کردند. *Taghipour* و همکاران [۶] در بررسی برخی جمله‌های هیدرودینامیکی مانند انبساط بستر، افت فشار بستر و متوسط جزء حجمی گاز در سرعت‌های مختلف روند یکسانی بین نتایج عددی و تجربی را مشاهده نمودند. *Wang* و همکاران [۱۰] هیدرودینامیک بستر حبایی و لخته‌ای را در یک هندسه سه بعدی با استفاده از ECT و Fluent بررسی کردند. نتیجه‌های شبیه‌سازی آنها انطباق قابل قبولی به‌ویژه برای رژیم حبایی با نتیجه‌های تجربی از خود نشان می‌داد. *Zhu* و همکاران [۱۱] با استفاده از OFP^(۴) (ردیاب فیبر نوری) نتیجه‌های تجربی ماندگی ذره‌های ریز نوع A در بستر شارانیده گاز- جامد را ارایه نمودند که این نتیجه‌ها برای مطالعات عددی بسیار مناسب می‌باشند.

اخیراً *Ahuja* و *Patwardhan* [۱۲] ماندگی ذرات جامد در یک بستر حبایی در سرعت‌های مختلف گاز را مورد مطالعه قرار دادند. آنها در سه مقطع محوری بستر، پروفیل‌های ماندگی ذره‌های جامد را با استفاده از GRT^(۵) به دست آوردند. نتیجه‌های تجربی آنها برای بررسی اعتبار مدل در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به گزارش‌های ارایه شده توسط پژوهشگران در ارتباط با شبیه‌سازی بسترهای شارانیده شده حبایی در سرعت‌های پایین و نیز خطای به نسبت بالای این شبیه‌سازی‌ها، در این پژوهش یک بستر حبایی گاز - جامد حاوی ذرات پلی‌پروپیلن در سرعت‌های بالای گاز و در مقاطع مختلف بستر در جهت شعاعی و محوری با استفاده از CFD مطالعه شده است. با وجود مدل‌های پیشنهادی توسط پژوهشگران در ارتباط با تأثیر متقابل بین فازی در بسترهای شارانیده شده گاز - جامد، در این مطالعه مدل‌های گوناگون دراک نیز به‌طور کمی در بستر ذکر شده در مرجع [۱۲]، بررسی شده‌اند. همچنین مسیر حباب و عوامل مؤثر بر الگوی جریان (جهت و حرکت ذره‌ها) در این شبیه‌سازی پیش‌بینی شده‌اند. پیشینه کردن خطای مدل‌سازی با استفاده از انتخاب مناسب پارامترهای مؤثر بر شبیه‌سازی صورت گرفته است. همچنین تأثیر مدل درهم $k-\epsilon$ برای فاز پیوسته در سرعت بالا (2.1824 m/s) بر نتیجه‌های هیدرودینامیک بستر با استفاده از CFD بررسی شده است.

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) یکی از قوی‌ترین ابزارهای حل عددی برای فهم بهتر حرکت ذره‌ها و الگوی جریان درون بستر می‌باشد. دینامیک سیالات محاسباتی دو تخمین مهم یعنی اولرین - اولرین و لاگرانژین را مورد استفاده قرار می‌دهد که در این پژوهش از روش اولرین - اولرین استفاده شده است. برای شرح تنش‌های فاز جامد به‌منظور در نظر گرفتن این فاز به صورت سیال از تئوری سینتیکی جریان دانه‌ای (KTGF)^(۱) استفاده شده است.

دو نیروی عمده که در فرایندهای شارانیده شدن حاکم هستند، نیروی گرانش و دراک می‌باشند. برخی پژوهشگران تنش اصطکاکی بین ذره‌ها در بستر شارانیده شده چگال را نیز مؤثر دانسته‌اند [۵ - ۱]. *Taghipour* و همکاران [۶] سه مدل دراک *Gidaspow*, *Syamlal-O'Brien*, *Wen-Yu* را برای یک سیستم شارانیده حبایی مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که رفتار کیفی حباب‌ها با استفاده از هر سه مدل دراک یکسان است. *van Wachem* و همکاران [۱] در بررسی اثر کمی مدل‌های دراک پیشنهاد شده توسط پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که مدل *Syamlal-O'Brien* افت فشار، انبساط بستر و قطر حباب کمتری را نسبت به دیگر مدل‌ها از خود نشان می‌دهد. *Hosseini* و همکاران [۷] اهمیت مدل‌های مختلف دراک از جمله مدل‌های اصلی و اصلاح شده بر اساس کمترین سرعت شارانیده شدن (U_{mf}) را بر نتیجه‌های کیفی و کمی بسترهای حبایی^(۲) و لخته‌ای^(۳) مورد مطالعه قرار دادند. مدل *Gidaspow* نتیجه‌های مناسبی را برای بسترهای مورد مطالعه آنها، از خود نشان می‌داد.

همچنین *Hosseini* و همکاران تأثیر مدل‌های مختلف دراک بر هیدرودینامیک یک بستر شارانیده شده ذره‌های ریز نوع A و یک بستر فواره‌ای با لوله نامتخلخل داخلی حاوی دو نوع ذره با اندازه‌های مختلف را بررسی نمودند؛ که در بسترهای شارانیده شده حبایی و فواره‌ای به ترتیب مدل اصلاح شده *Gibilaro* و مدل *Wen-Yu* نتایج هیدرودینامیکی بهتری در قیاس با دیگر مدل‌های دراک منجر می‌شدند [۸، ۹].

یکی از مهمترین پارامترهای هیدرودینامیک بستر شارانیده گاز - جامد، ماندگی ذرات جامد درون بستر می‌باشد. *van Wachem* و همکاران [۱] برای بررسی اعتبار مدل خویش برخی پارامترها از جمله انبساط بستر، سرعت بالا رفتن لخته، سرعت بالا رفتن حباب و قطر حباب را بررسی نمودند. آنها همچنین

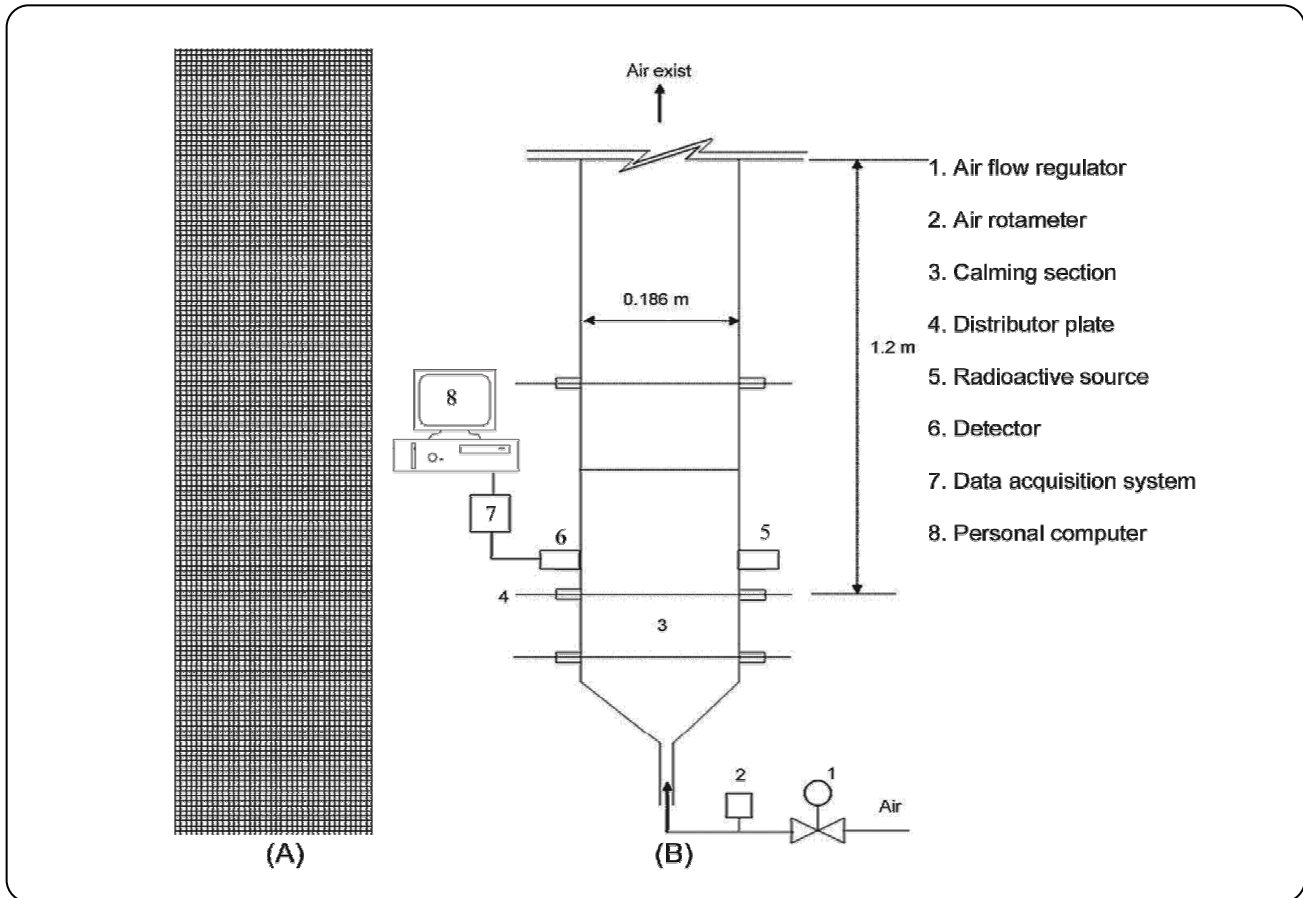
(۱) Kinetic Theory of granular flow

(۲) Bubbly

(۵) Gamma ray tomography

(۳) Slugging

(۴) Optical fiber probe



شکل ۱- دامنه محاسباتی بستر (A)، نمایی از بستر و تجهیزات مربوط به پرتونگاری مقطعی Tomography (B).

حجم محدود و به کمک الگوریتم SIMPLE حل می‌شوند. طرح First order upwind برای گسسته‌سازی معادلات پایستگی استفاده می‌شود. دامنه محاسباتی به تعداد محدودی حجم کنترل تقسیم می‌شود، که در شکل ۱ نشان داده شده است. از یک گام زمانی قابل تطبیق^(۱) به منظور کاهش زمان محاسبات استفاده شده است. رابطه‌های ترکیبی استفاده شده در این پژوهش نیز در جدول ۱ موجود می‌باشند.

شبیه‌سازی بستر شارانیده

توزیع ماندگی ذره‌های جامد در یک ستون با ارتفاع ۱٫۲ m و قطر درونی ۰٫۱۸۶ m که شمای آن در شکل ۱ نشان داده شده، مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۱ تجهیزات مربوط به پرتونگاری مقطعی با استفاده از اشعه گاما (GRT)، برای اندازه‌گیری پارامترهای هیدرودینامیکی بستر نشان داده شده است.

شبیه‌سازی CFD

مدل CFD

مدل‌های دو بعدی برای کاهش زمان محاسباتی با دقت بالایی از سوی پژوهشگران توصیه شده‌اند [۱۳، ۱۴]، بنابراین شبیه‌سازی به صورت ناپایا و دوبعدی با استفاده از تخمین اولرین - اولرین ترکیب با KTGF انجام شده است. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، مش‌های مربعی ساختار یافته در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده‌اند. با انجام تکمیل حساسیت در ارتباط با اندازه مش‌ها، فاصله داخلی بین مش‌ها در دو جهت x و y برابر ۵ mm برای تمامی شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است. دمای دانه‌ای با استفاده از معادله جبری به جای معادله پاره‌ای، برای کاهش زمان محاسباتی بدون از دست دادن دقت نتیجه‌ها، مورد استفاده قرار گرفته است [۷، ۱]. در این پژوهش شبیه‌سازی با استفاده از کد MFIX صورت گرفته است. معادله‌های حاکم بر سامانه که در جدول ۱ ارائه شده‌اند، با استفاده از روش

(۱) Adaptive

جدول ۱- معادلات حاکم و معادلات ترکیبی.

معادلات بقاء	
الف) پیوستگی	فاز گاز: $\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \bar{V}_g) = 0$
فاز جامد:	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{V}_s) = 0$
ب) معادلات مومنتوم	فاز گاز: $\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \bar{V}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \bar{V}_g \bar{V}_g) = \nabla \cdot \bar{S}_g - \alpha_g \nabla P P + \alpha_g \rho_g \bar{g} + \beta(\bar{V}_s - \bar{V}_g)$
فاز جامد:	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \bar{V}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{V}_s \bar{V}_s) = \nabla \cdot \bar{S}_s - \nabla P_s - \alpha_s \nabla P + \alpha_s \rho_s \bar{g} - \beta(\bar{V}_s - \bar{V}_g)$
معادلات ترکیبی	
چهار ترم خلاصه شده معادله جبری دمای دانه‌ای	$K_1 = \gamma(1 + e_s) \rho_s g_o$ $K_\gamma = \frac{\gamma}{\gamma \sqrt{\pi}} d_s \rho_s (1 + e_s) \alpha_s g_o - \frac{\gamma}{\gamma} K_\gamma$ $K_\gamma = \frac{d_s \rho_s}{\gamma} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{\gamma(1 - e_s)} \left[1 + \frac{\gamma}{\delta} (1 + e_s) (\gamma e_s - 1) \alpha_s g_o \right] + \frac{\lambda \alpha_s}{\delta \sqrt{\pi}} g_o (1 + e_s) \right)$ $K_\gamma = \frac{\gamma(1 - e_s) \rho_s g_o}{d_s \sqrt{\pi}}$
فشار جامد:	$P_s = \alpha_s (\rho_s + K_1 \alpha_s) \Theta_s$
انرژی پراکندگی نوسانات:	$\gamma_s = K_\gamma \alpha_s \Theta_s^{\gamma/\gamma}$
دمای دانه‌ای معادله جبری [۱۶]:	$\Theta_s = \left[\frac{-(K_1 \alpha_s + \rho_s) \text{tr}(\bar{D}_s)}{\gamma K_\gamma \alpha_s} + \frac{\sqrt{(K_1 \alpha_s + \rho_s) \text{tr}(\bar{D}_s) + K_\gamma \alpha_s \left[\gamma K_\gamma \text{tr}(\bar{D}_s) + K_\gamma \text{tr}(\bar{D}_s) \right]}}{\gamma K_\gamma \alpha_s} \right]$
تانسور تنش فاز گاز:	$\bar{S}_g = -P_g \bar{I} + \bar{\tau}_g$ $\bar{D}_g = \frac{1}{\gamma} \left[\nabla \bar{V}_g + (\nabla \bar{V}_g)^T \right], \bar{\tau}_g = \gamma \alpha_g \mu_g \bar{D}_g + \alpha_g \lambda_g \text{tr}(\bar{D}_g) \bar{I}$

$\text{tr}(\bar{D})$ نرخ تغییر شکل تانسور حجمی است.

جدول ۱- ادامه

<p>تانسور تنش فاز جامد [۱۷، ۱۸]:</p> $\bar{\bar{S}}_s = \begin{cases} -P_s^p \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s^p & \text{if } \alpha_g \leq \alpha_g^* \\ -P_s^v \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s^v & \text{if } \alpha_g > \alpha_g^* \end{cases}$ $\tau_s^v = \nu \mu_s \bar{\bar{D}}_s + \lambda_s \text{tr}(\bar{\bar{D}}_s) \bar{\bar{I}}$ $\bar{\bar{D}}_s = \frac{1}{\nu} \left[\nabla \bar{\bar{V}}_s + (\nabla \bar{\bar{V}}_s)^T \right]$ $P_s^p = \alpha_s P^* \quad , \quad P^* = A (\alpha_g^* - \alpha_g)^n \quad \text{where } A = 1.0^{25} \quad , \quad n = 1.0$ $\alpha_g^* \quad , \quad \bar{\bar{\tau}}_s^p = \nu \mu_s^p \bar{\bar{D}}_s \quad , \quad \mu_s^p = \frac{P^* \sin \phi}{\nu \sqrt{I_\nu}}$
<p>ویسکوزیته توده ذرات [۱۹]:</p> $\lambda_s = \left(K_r + \frac{\nu}{\nu} K_r \right) \alpha_s \sqrt{\Theta_s}$
<p>ویسکوزیته تنشی فاز جامد [۱۹]:</p> $\mu_s = K_r \alpha_s \sqrt{\Theta_s}$
<p>اثر متقابل بین فازی (مدل دراگ) [۲۰]:</p> $\alpha = \left(\frac{17}{Re_s} + 0.7336 \right) \frac{\rho_g}{d_s} \bar{\bar{V}}_s - \bar{\bar{V}}_g (1 - \alpha_g) \alpha_g^{-2.8} \quad , \quad Re_s = \frac{d_s \bar{\bar{V}}_s - \bar{\bar{V}}_g \alpha_g \rho_g}{\mu_g}$

برای شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه، فرضیه‌های زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- خواص فیزیکی همچون دمای هر دو فاز، دانسیته و ویسکوزیته فاز گاز، ثابت فرض شده است.
- ۲- انتقال جرم بین دو فاز قابل اغماض فرض شده است.
- ۳- فاز گاز ایده‌ال و تراکم‌ناپذیر فرض شده است.
- ۴- اندازه ذرات یکنواخت فرض شده است (۸۵۳ μm).
- ۵ - به هم چسبیدن و خرد شدن ذرات در شبیه‌سازی در نظر گرفته نشده است.
- ۶ - کرویت ذره‌ها برابر یک فرض شده است.

نتیجه‌ها و بحث

پارامترهای مدل

حساسیت مدل‌های CFD به ضریب ارتجاع در متون علمی گزارش شده است [۲۱، ۲۲، ۶] به دلیل مشکلات مربوط

با استفاده از نمودار پیشنهاد شده توسط Grace یافت می‌شود که بستر مورد نظر به صورت حبابی رفتار می‌کند [۱۵]. تقسیم بندی انواع ذرات بر اساس قطر و دانسیته آنها در مرجع [۱۵] موجود است که با استفاده از آن می‌توان نوع ذره‌ها و در نتیجه رفتارهای مربوط به آنها را تعیین نمود. ذره‌های جامد استفاده شده پلی‌پروپیلن بوده و فاز گاز نیز هوا در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های ذره‌های جامد و شرایط عملیاتی در جدول ۲ خلاصه شده‌اند. شرایط مرزی نیز به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- ۱- در پایین بستر، گاز به صورت سرعت ظاهری تنها در جهت محوری تعریف می‌شود.
- ۲- شرط مرزی فشار اتمسفریک در بالای بستر (خروجی بستر) در نظر گرفته شده است.
- ۳- شرایط مرزی دیواره‌های داخلی به صورت لغزش آزاد برای فاز جامد فرض می‌شود.

بنابراین مطالعه حساسیت برای ضریب ارتجاع و بیشترین محدوده پاشیدن ذرات انجام شده است. سرانجام با ارزیابی نتیجه‌های مدل، مقادیرهای ۰/۸ و ۰/۶۵ به ترتیب برای ضریب ارتجاع و بیشترین محدوده پاشیدن ذرات، به دست آمده که در ادامه از آنها استفاده می‌شود.

به منظور بررسی اثرهای مدل‌های دراگ گوناگون گزارش شده توسط پژوهشگران بر نتیجه‌های شبیه‌سازی و به دست آوردن بهترین مدل، چندین مدل دراگ به صورت زیربرنامه برای در نظر گرفتن اثرهای متقابل بین فازی در چهارچوب تخمین اولرین - اولرین درون کد اعمال شده است. شکل ۲ ماندگی ذره‌ها جامد در h/H برابر با ۰/۸۹ (H ارتفاع ایستایی ذره‌های درون بستر) در سرعت ورودی گاز برابر با ۰/۹۸۵۶ m/s با استفاده از مدل‌های مختلف دراگ را نشان می‌دهد. تحلیل خطا نشان می‌دهد که RMSD^(۱) مدل دراگ Syamlal-O'Brien بیشترین مقدار (۳۰٪) و مدل دراگ Arastoopour کمترین مقدار (۱۲٪) را دارا می‌باشند. خطا مدل برای پارامتر دلخواه X از معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$\delta_{\text{RMSD}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_{\text{experimental}} - X_{\text{computational}}}{X_{\text{experimental}}} \right)^2 \right]^{1/2} \times 100 \quad (1)$$

مدل‌های دراگ Gidaspow, Syamlal-O'Brien, Wen-Yu رفتار مشابهی را نشان می‌دهند. آنها پروفیل‌های به نسبت تختی را برای ماندگی ذره‌ها پیش‌بینی می‌کنند در حالی که نتیجه‌های تجربی رفتاری شبیه جریان حلقوی^(۲) از خود نشان می‌دهند.

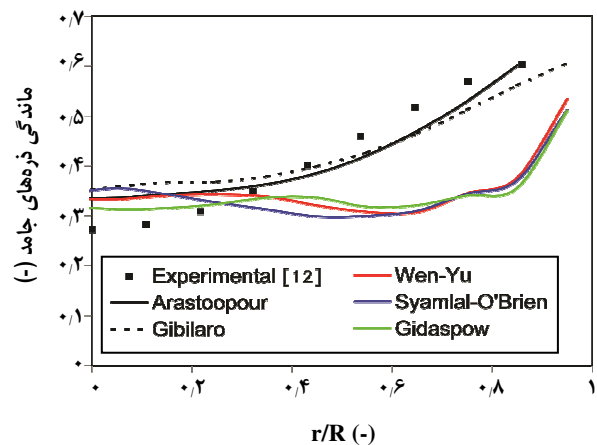
مدل Arastoopour هم‌خوانی قابل قبولی را با نتیجه‌های تجربی دارد. این شکل نشان می‌دهد که مدل‌های درگ از لحاظ کمی نتیجه‌های تأثیر گذاری را از خود به جای می‌گذارند. بنابراین در شبیه‌سازی‌های بستر شارانیده می‌بایست بهترین مدل دراگ در مدل‌سازی به کار برده شود.

رفتار حباب‌ها و حرکت ذرات جامد

در این بخش رفتار کیفی حباب‌ها و حرکت ذره‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل ۳ کانتور ماندگی ذره‌های جامد در سرعت‌های متفاوت را نمایش می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش سرعت ظاهری گاز، انبساط بستر افزایش می‌یابد. سرعت بالاتر موجب تشکیل حباب‌های بزرگتر می‌شود. همانطور که در شکل

جدول ۲- ویژگی‌های ذره‌های بستر و شرایط عملیاتی.

پارامترها	واحد	مقدار
دامنه قطر ذرات	μm	۷۱۰ - ۱۰۰۰
متوسط قطر ذرات	μm	۸۵۳
دانسیته ذرات	Kg/m^3	۹۰۶
دانسیته فاز گاز	Kg/m^3	۱/۱۸
ویسکوزیته فاز گاز	Kg/m.s	1.8×10^{-5}
α_{mf}	-	۰/۳۷۸
کمترین سرعت شارانیده شدن	m/s	۰/۱۷۶
کروییت ϕ_s	-	۱
سرعت ظاهری گاز	m/s	۰/۳۵-۲/۱۹
ارتفاع ایستایی بستر	m	۰/۱۸۶



شکل ۲- نتیجه‌های شبیه‌سازی ماندگی ذرات با استفاده از مدل‌های دراگ مختلف در سرعت $U_g = 0.9856 \text{ m/s}$.

به اندازه‌گیری این جمله و گزارش‌های متفاوت در مورد مقدار آن، اندازه ضریب ارتجاع با مقایسه کردن نتیجه‌های شبیه‌سازی و تجربی به دست می‌آید. پژوهش‌ها نشان می‌دهد با افزایش ضریب ارتجاع، دمای دانه‌های افزایش می‌یابد و در نتیجه نفوذ و ویسکوزیته برشی ذرات و همچنین فشار ذره‌ها افزایش می‌یابد که در پایان به افزایش ماندگی ذره‌های جامد منجر می‌شود [۲۳].

همچنین مشاهده شده است که بیشترین محدوده پاشیدن ذره‌ها نیز نقش مهمی در شبیه‌سازی بستر فواره‌ای گاز - جامد دارد [۲۲].

(۱) Root mean square deviation

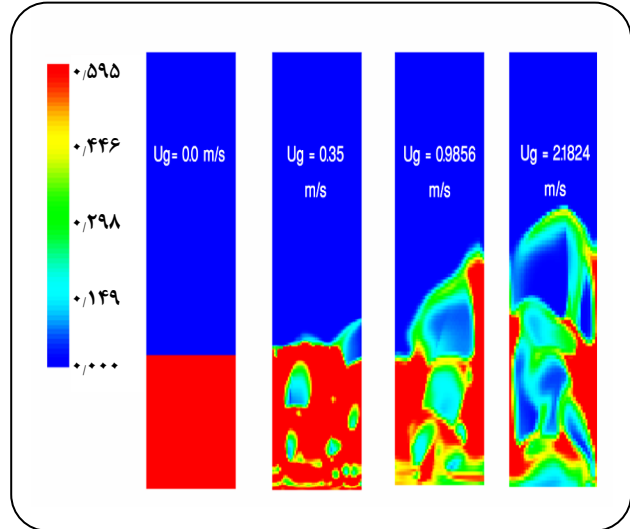
(۲) Core-annular flow

نیز دیده می‌شود حباب‌های کوچکتر در پایین بستر و حباب‌های بزرگتر در بالای بستر دیده می‌شوند. این گونه رفتارها توسط بسیاری از پژوهشگران گزارش شده‌اند [۲۴، ۳ - ۱].

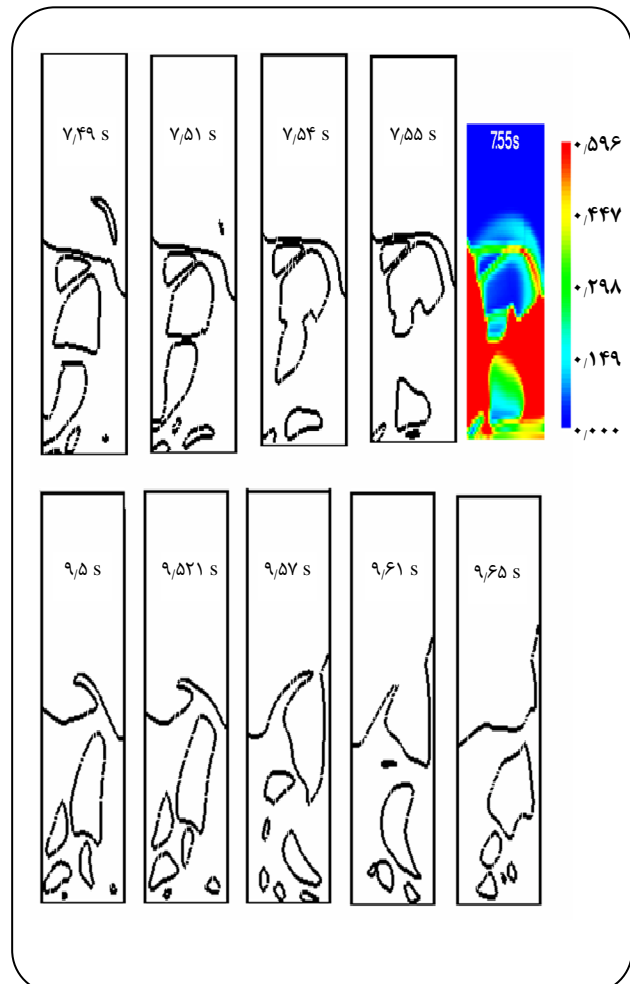
فرایند پیوستن و حرکت حباب‌ها در شکل ۴ برای سرعت 0.9886 m/s به خوبی نشان داده شده است که حرکت حباب‌ها خود، نیروی محرکه برای حرکت ذره‌ها می‌باشند و در سیستم‌های شارنیده شدن نقش مهمی را یاری می‌کنند. مرز حباب در این شکل خطی است که در آن جزء حجمی گاز برابر 0.8 می‌باشد که از این روش برای بررسی قطر و توزیع اندازه حباب‌ها در مقاطع گوناگون استفاده شده است [۲۵]. همانطور که در شکل دیده می‌شود حباب‌ها در زمان 7.49 s در گوشه پایینی بستر ایجاد می‌شوند و سپس به سمت مرکز بستر میل می‌کنند و تا زمان 7.51 s در جهت حباب بالایی خود در حرکت می‌باشند. حباب مرکزی وارد دنباله^(۱) حباب بالاتر شده و در زمان 7.55 s پیوستگی بین حباب‌ها صورت می‌گیرد، این رفتار مشاهده شده در شبیه‌سازی با تفسیر پیوستگی حباب‌های *Clif* و *Grace* [۲۶] مطابقت دارد. بنابراین همانطور که در شکل دیده می‌شود حباب‌ها از گوشه‌های چپ و راست کف بستر به سمت مرکز بستر و سپس بسمت بالای بستر با همراه بودن پدیده پیوستگی حرکت می‌کنند.

به علت پیوستگی حباب‌ها قطر حباب‌ها در بخش‌های بالایی بستر از پایین آن بزرگتر می‌باشد. در سرعت‌های بالا در قسمت بالایی بستر قطر حباب قابل مقایسه با قطر بستر می‌باشد که شبیه پدیده *Slugging* است. شکل ۵ بردارهای سرعت ذره‌های جامد درون بستر در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۵ (الف) دیده می‌شود در سرعت گاز برابر با 0.35 m/s مشابه با شرایط عملیاتی *Lin* و همکاران [۲۷]، نتیجه‌های یکسانی دیده می‌شود. در مرکز بستر سقوط ذرات جامد و در کناره دیواره‌ها صعود ذره‌های جامد دیده می‌شود.

در سرعت‌های بالاتر یعنی 0.9886 m/s ، شبیه‌سازی (شکل ۵ (ب)) بالا رفتن ذره‌ها در مرکز و فرودشان در کنار دیواره را پیش‌بینی می‌کند این موضوع با نتیجه‌های تجربی *Laverman* و همکاران [۲۸] که در سرعت 0.63 m/s با استفاده از ترکیب *PIV* و *DIA* استخراج شده و نتیجه‌های دیگر پژوهشگران [۲۹، ۲۷] هم‌خوانی دارد. *Syamlal* و *O'Brien* [۳۰] به هنگام شبیه‌سازی متقارن فروپاشی ازن در یک بستر حاوی ذره‌های FCC مشاهده کردند که ذره‌های جامد در مرکز بستر سقوط و در کناره دیواره صعود می‌کنند. آنها دلیل این پدیده را کم بودن عمق بستر عنوان نمودند.



شکل ۳- کانتور ماندگی ذره‌های جامد در بستر در سرعت‌های گوناگون گاز.



شکل ۳- کانتور ماندگی ذره‌های جامد در بستر در سرعت‌های گوناگون گاز.

(۱) Wake

شکل ۵ (ج) نیز تاثیر عرض بستر به ارتفاع ایستایی بستر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵ (ج) دیده می‌شود با افزایش این نسبت (در این حالت برابر است با $3/1$)، الگوی جریان به‌طور کامل تغییر می‌کند چراکه چندین مسیر چرخش ذره‌ها درون بستر ایجاد شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که حرکت ذره‌ها به چند عامل مهم بستگی دارد: مقدار سرعت فاز گاز و همچنین نسبت عرض بستر به ارتفاع ایستایی بستر که این موضوع می‌تواند در مسائل خشک کردن و مخلوط شدن دو فاز مفید واقع گردد.

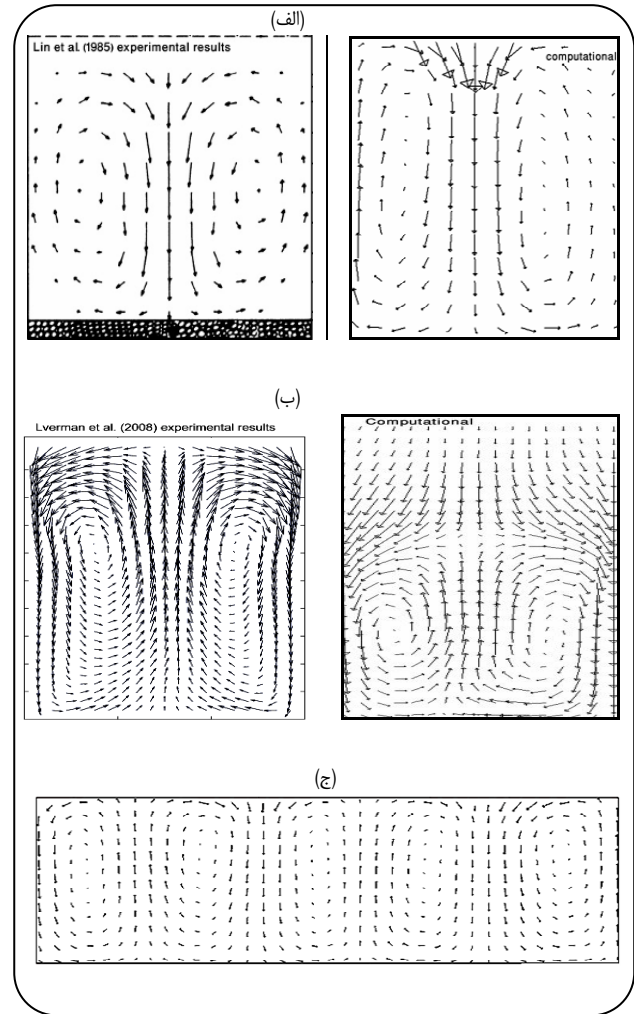
توزیع ماندگی ذرات جامد

الف - توزیع ماندگی در سرعت 0.9856 m/s در جهت محوری

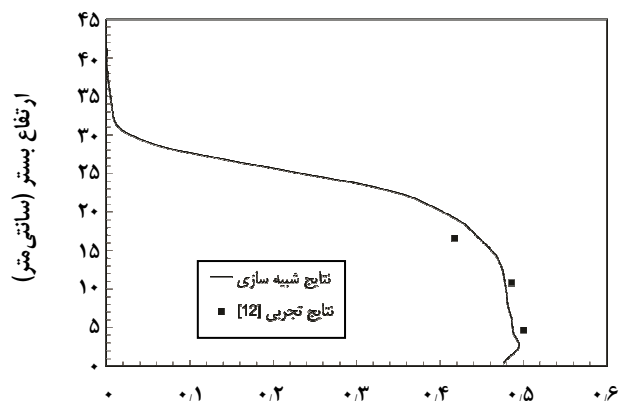
شکل ۶ توزیع محوری ماندگی ذره‌ها در بستر را نشان می‌دهد. تحلیل خطا نشان می‌دهد که RMSD برابر است با $4/5\%$ که نشان دهنده خطای پایین نتیجه‌های عددی توزیع ماندگی در جهت محوری است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با افزایش موقعیت طولی بستر، ماندگی ذره‌های جامد کاهش می‌یابد. بر اساس یافته‌های پژوهشگران [۲۴] و ارزیابی شکل ۶، می‌توان نتیجه گرفت که انبساط بستر در حالت شبیه‌سازی تفاوت چندانی با مقدار تجربی انبساط بستر که گزارش نگردیده است، نخواهد داشت.

ب - توزیع ماندگی در سرعت 0.9856 m/s

بعد از گذشت 5 s از شبیه‌سازی، بستر شبه پایدار خواهد شد بنابراین متوسط زمانی از 5 s تا 25 s از شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۷ توزیع شعاعی ماندگی ذره‌های جامد در مقاطع گوناگون بستر را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در h/H برابر با 0.25 ، بیشترین و کمترین ماندگی ذرات جامد به ترتیب در نواحی مرکز و نزدیک دیواره در قیاس با دیگر موقعیت‌ها یعنی 0.58 و 0.89 می‌باشد. کمترین مقدار ماندگی در این سطح در موقعیت شعاعی r/R برابر با 0.6 می‌باشد که با حرکت به سمت دیواره دوباره ماندگی ذره‌های جامد افزایش می‌یابد. در h/H برابر با 0.58 ، رفتار ماندگی شبیه به حالت قبلی (h/H برابر با 0.25) است با این تفاوت که مقدار ماندگی ذره‌های جامد در مرکز و نزدیکی دیواره (r/R برابر با 0.6) به ترتیب، کمتر و بیشتر نسبت به حالت قبلی می‌باشد. در $h/H = 0.89$ ماندگی ذره‌های جامد از قسمت مرکزی به سمت دیواره به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد چون بر طبق شکل‌های ۴، ۳ و ۵ حباب‌های بزرگتر در بخش‌های مرکزی بستر و در ارتفاعی که در آن پیوستن حباب‌ها به همدیگر زیادتر است، ایجاد می‌شوند



شکل ۵ - متوسط زمانی بردارهای سرعت ذرات جامد در (الف) $D/H = 1$ و $U_g = 0.9856 \text{ m/s}$ (ب) $D/H = 1$ و $U_g = 0.35 \text{ m/s}$ (ج) $D/H = 3/1$ و $U_g = 0.35 \text{ m/s}$



ماندگی ذره‌های جامد (-)

شکل ۶ - توزیع محوری ماندگی ذرات در سرعت $U_g = 0.9856 \text{ m/s}$

جدول ۳- خطای RMSD .

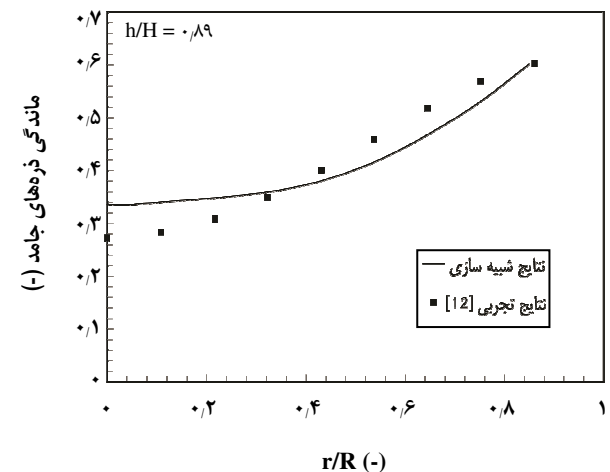
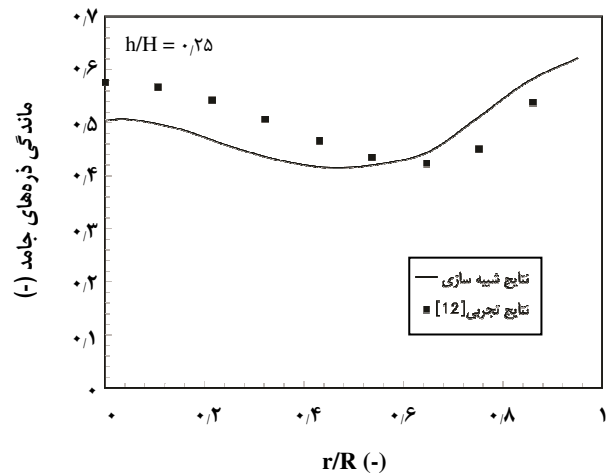
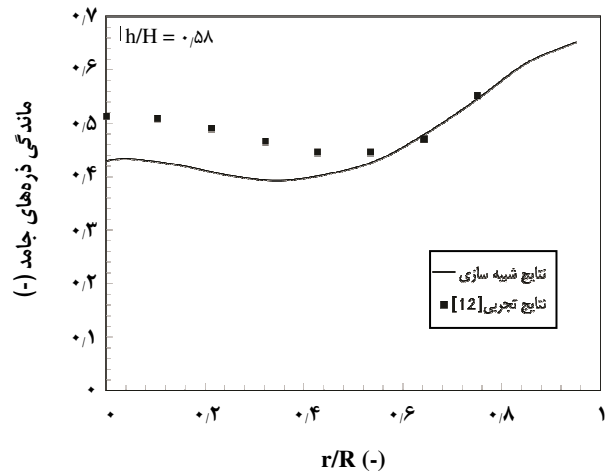
RMS %	$h/H=0,25$	$h/H=0,58$	$h/H=0,89$
Laminar ($U_g = 0,99$ m/s)	۱۱	۱۱,۵	۱۲
Laminar ($U_g = 2,18$ m/s)	۹,۵	۱۵,۸	۲۰,۸
Turbulent $k-\epsilon$ ($U_g = 2,18$ m/s)	۸	۱۴,۵	۲۰

که منجر به کمترین ماندگی ذره‌های جامد در این بخش از بستر می‌شوند و جریان برگشتی ذره‌ها در نزدیکی دیواره باعث تجمع یا بالا رفتن ماندگی ذره‌های نزدیک دیواره می‌شود.

McKeen و Pugsley [۲۴] با استفاده از یک عامل مقیاس مناسب (مقداری بین ۰,۲ و ۰,۳) در مدل دراگ Gibilaro توانستند خطای مدلسازی را کاهش دهند. تصحیح آنها سبب شد نتیجه‌های مدلسازی فقط به صورت کیفی با نتیجه‌های تجربی انطباق داشته باشند. نتیجه‌های شبیه‌سازی Taghipour و همکاران [۶] درحالی که خطایی بین ۳۰-۵۰٪ را برای جزء حجمی گاز و افت فشار بستر در بر داشت تنها روند یکسانی را با نتیجه‌های تجربی از خود نشان می‌داد. Ahuja و Patwardhan [۱۲] بستر حبابی مجهز به توزیع کننده پاره‌ای و لوله داخلی در یک سطح از بستر (h/H برابر با ۰,۲۵) را شبیه‌سازی کردند. با وجود RMSD بالای نتیجه‌های آنها یعنی ۰,۴۶ و ۰,۵۱، روند یکسانی بین نتیجه‌های عددی و تجربی نشان داده شد. در این پژوهش علاوه بر نشان دادن پروفیل ماندگی ذرات جامد، آنالیز خطا با استفاده از RMSD به دست آمده از معادله (۱)، در جدول ۳ ارایه شده است. با مقایسه این نتیجه‌ها و نتیجه‌های گزارش شده در متون علمی، چنین یافت می‌شود که مدل موجود، نتیجه‌های مناسب با خطای کمتر را پیش‌بینی می‌کند.

ج- توزیع ماندگی در سرعت $2,1824$ m/s

با افزایش سرعت گاز رژیم حبابی با رژیم درهم جایگزین می‌شود. در رژیم درهم حرکت دسته جمعی ذره‌ها و جزء حجمی گاز (حباب) در اندازه و شکل‌های گوناگون دیده می‌شود [۱۵]. با ملاحظه شکل ۳ یک چنین رفتاری در سرعت گاز برابر با $2,1824$ m/s دیده می‌شود. بنابراین در این سرعت مدل درهم $k-\epsilon$ نیز برای فاز گاز در نظر گرفته می‌شود. شکل ۸ نتیجه‌های پیش‌بینی شده در سرعت $2,1824$ m/s در دو حالت جریان فاز گاز آرام و درهم با نتیجه‌های تجربی مقایسه شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود انطباق قابل قبولی بین نتیجه‌های تجربی و شبیه‌سازی



شکل ۷- ماندگی ذرات جامد در موقعیت‌های مختلف بستر و سرعت ظاهری گاز $0,9856$ m/s

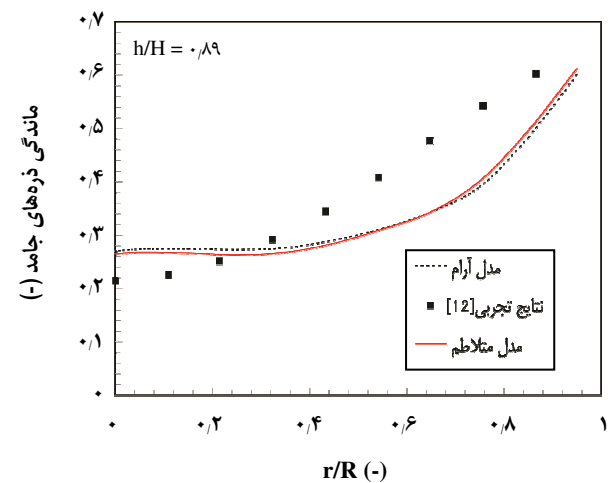
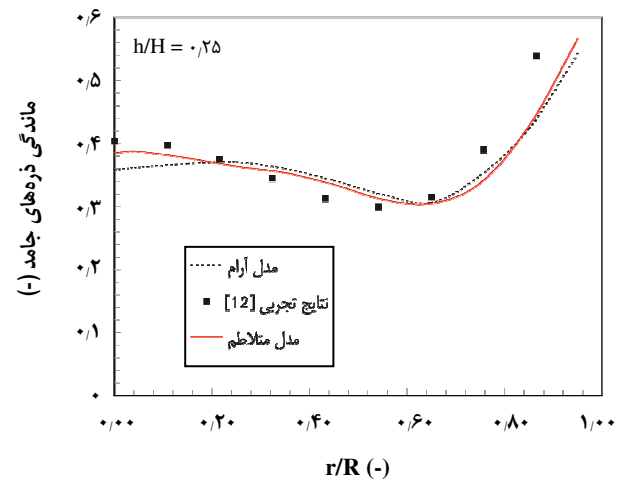
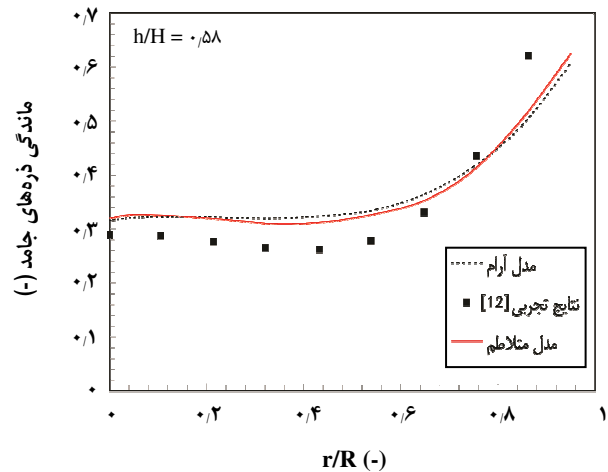
در هر دو حالت آرام و درهم دیده می‌شود که در ارتفاع‌های پایین‌تر بستر نتیجه‌ها تطبیق بیشتری را نشان می‌دهند. در بررسی مدل درهم و آرام از شکل ۷ و خط ارایه شده در جدول ۳، این چنین نتیجه‌گیری می‌شود که اختلاف دو مدل اندک بوده اما مدل درهم به ویژه در مقاطع پایین‌تر بستر، نتیجه‌های بهتری را پیش‌بینی می‌کند. بنابراین مدل درهم $k-\epsilon$ می‌تواند در بهبود نتایج CFD بسترهای شارانیده گاز - جامد حبابی به‌ویژه در سرعت‌های بالای گاز، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین دیگر مدل‌های درهم موجود، می‌بایست برای بهبود نتیجه‌های مدل CFD بررسی شوند.

نتیجه‌گیری

مدل اولرین - اولرین دو سیالی ترکیب با نظریه سینتیکی جریان دانه‌ای برای شبیه‌سازی یک بستر شارانیده گاز - جامد حبابی شامل ذرات پلی‌پروپیلن مورد استفاده قرار گرفت. مطالعه حاضر نشان داد که مدل دراگ یک پارامتر کلیدی در مدلسازی‌های CFD برای شبیه‌سازی کمی هیدرودینامیک هر بستر شارانیده حبابی می‌باشد که می‌بایست بهترین مدل دراگ انتخاب شود. در این پژوهش مدل دراگ Arastoopour نتیجه‌های بهتری نسبت به دیگر مدل‌های موجود در متون علمی از خود نشان داد. همچنین رفتار حباب‌ها و حرکت ذره‌های جامد نیز به‌خوبی پیش‌بینی شدند و نشان داده شد که سرعت ظاهری گاز و نیز نسبت قطر بستر به ارتفاع ایستایی بستر، پارامترهای مؤثر بر حرکت ذره‌ها هستند (که نیرو محرکه آنها حباب‌ها می‌باشند). مدل ارایه شده می‌تواند ماندگی ذرات جامد را در ارتفاع‌های گوناگون بستر در سرعت‌های بالا، در جهت شعاعی و محوری بخوبی پیش‌بینی کند. در سرعت 2.1824 m/s اثر درهم بودن فاز گاز در بستر مورد مطالعه قرار گرفت که منجر به نتیجه‌های بهتری هر چند اندک در قیاس با مدل آرام برای فاز پیوسته شد. در مطالعه‌های آینده بررسی مدل‌های گوناگون درهم در سرعت‌های بالا بسترهای گاز - جامد توصیه می‌شود.

فهرست نمادها

d_s	قطر ذرات، m
e_s	ضریب ارتجاع، (-)
g	گرانش، m/s^2
D	قطر بستر (ستون)، m
\bar{D}_g	تانسور نرخ کشش، فاز گاز، (S^{-1})



شکل ۸ - ماندگی ذرات جامد در موقعیت‌های مختلف بستر و سرعت ظاهری گاز 2.1824 m/s بر ثانیه در دو حالت آرام و متلاطم.

	حروف یونانی		
		\bar{D}_s	تانسور نرخ کشش، فاز جامد، (S^{-1})
α_i	جزء حجمی فاز i (-)	g_0	تابع توزیع شعاعی، (-)
β	ضریب تبادل بین فازی، $kg/m^3.s$	h	ارتفاع بالاتر از توزیع کننده گاز، m
γ_s	انرژی پراکندگی برخوردی، $kg/s^3.m$	H	ارتفاع ایستایی بستر، m
Θ_s	دمای دانه‌ای، m^2/s^2	N	در بستر تعداد نقاط اندازه‌گیری شده
λ_s	ویسکوزیته توده ذرات جامد، $kg/m.s$	K_1, K_2, K_3, K_4	ثوابت موجود در معادله جبری دمای دانه‌ای
μ_i	ویسکوزیته فاز i $kg/m.s$	\bar{I}	تانسور یکه، (-)
ρ_i	دانسیته فاز i kg/m^3	I_{VD}	دومین ثابت تانسور انحراف تنش، (-)
\bar{v}_i	تانسور تنش انحرافی فاز i Pa	P	فشار، Pa
ϕ	زاویه داخلی اصطکاکی، deg	r	مختصات شعاعی، m
δ_{RMSD}	محاسبه خطای شبیه‌سازی	R	شعاع، m
		Re_s	عدد رینولدز، (-)
	زیر نویس‌ها و بالا نویس‌ها	\bar{S}_g	تانسور تنش فاز گاز، Pa
g	گاز	\bar{S}_s	تانسور تنش فاز جامد، Pa
s	جامد	t	زمان، s
p	رژیم پلاستیک	X	یک پارامتر دلخواه هیدرودینامیکی در بررسی خطای مدل
V	رژیم ویسکوز	\bar{V}_i	سرعت فاز i m/s

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۱۱/۲۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۸/۱۷

مراجع

- [1] van Wachem B.G.M., Schouten J.C., Krishna R., van den Bleek C.M., Sinclair J.L., Comparative Analysis of CFD Models of Dense Gas-Solid Systems, *AIChE J.*, **47**, p. 1035 (2001).
- [2] Patil D.J., van Sint Annaland M., Kuipers J.A.M., Critical Comparison of Hydrodynamics Models for Gas-Solid Fluidized Beds-Part I: Bubbling Gas-Solid Fluidized Beds Operated with a Jet, *Chem. Eng. Sci.*, **60**, p. 57 (2005).
- [3] Patil D.J., van Sint Annaland M., Kuipers J.A.M., Critical Comparison of Hydrodynamic Models for Gas-Solid Fluidized Beds-Part II: Freely Bubbling Gas-Solid Fluidized Beds, *Chem. Eng. Sci.*, **60**, p. 73 (2005).
- [4] Passalacqua A., Marmo L., A Critical Comparison of Frictional Stress Models Applied to the Simulation of Bubbling Fluidized Beds, *Chem. Eng. Sci.*, **64**, p. 2795 (2009).
- [5] Hosseini S.H., Ahmadi G., Zivdar M., Rahimi R., Esfahany M.N., CFD Studies of Solids Hold-Up Distribution and Circulation Patterns in Gas-Solid Fluidized Beds, *Powder Technol.*, **200**, p. 202 (2010).
- [6] Taghipour F., Ellis N., Wong C., Experimental and Computational Study of Gas-Solid Fluidized Bed Hydrodynamics, *Chem. Eng. Sci.*, **60**, p. 6857 (2005).

- [7] Hosseini S.H., Zhong W., Esfahany M.N., Pourjafar L., Azizi S., CFD Simulation of the Bubbling and Slugging Gas-Solid Fluidized Beds, *J. Fluids Eng. (ASME)*, **132**, p. 41301 (2010).
- [8] Hosseini S.H., Rahimi R., Zivdar M., Samimi A., CFD Simulation of Gas-Solid Bubbling Fluidized Bed Containing the FCC Particles, *Korean J. Chem. Eng.*, **26**, p. 1405 (2009).
- [9] Hosseini S.H., Zivdar M., Rahimi R., CFD Simulation of Gas-Solid Flow in a Spouted Bed with a Non-Porous Draft Tube, *Chem. Eng. Process.*, **48**, p. 1539 (2009).
- [10] Wang H., Yang W., Dyakowski T., Liu S., Study of Bubbling and Slugging Fluidized Beds by Simulation and ECT, *AIChE J.*, **52** (9), p.3078 (2006).
- [11] Zhu H., Zhu J., Li G., Li F., Detailed Measurements of Flow Structure Inside a Dense Gas-Solids Fluidized Bed, *Powder Technol.*, **180**, p. 339 (2008).
- [12] Ahuja G.N., Patwardhan A.W., CFD and Experimental Studies of Solids Hold-Up Distribution and Circulation Patterns in Gas-Solid Fluidized Beds, *Chem. Eng. J.*, **143**, p.147 (2008).
- [13] Cammarata L., Lettieri P., Micale G.D.M., Colman D., 2D and 3D CFD Simulations of Bubbling Fluidized Beds Using Eulerian-Eulerian Models, *Int. J. Chem. Reactor Eng.*, **1** (2003).
- [14] Xie N., Battaglia F., Pannala S., Effects of Using Two-Versus Three-Dimensional Computational Modeling of Fluidized Beds Part I, hydrodynamics, *Powder Technol.*, **182**, p. 1 (2008).
- [15] Ranade V.V., "Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering", First Edition, Academic Press, (2002).
- [16] Syamlal M., O'Brien T.J., AIChE Symp Ser., **85**, p.22 (1989).
- [17] Syamlal M., Rogers W., O'Brien T.J., "Mfix Documentation: Volume I, Theory Guide", Technical Report DOE/METC-9411004, NTIS/DE9400087, (1993).
- [18] Schaeffer D.G., Instability in the Evolution Equations Describing Incompressible Granular Flow, *J. Diff. Eq.*, **66**, p. 19 (1987).
- [19] Lun C.K.K., Savage S.B., Jeffrey D.J., Chepuriniy N., Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field, *J. Fluid Mech.*, **140**, p. 223 (1984).
- [20] Arastoopour H., Pakdel P., Adewumi M., Hydrodynamic Analysis of Dilute Gas-Solids Flow in a Vertical Pipe, *Powder Technol.*, **62**, p. 163 (1990).
- [21] Huilin L., Yurong H., Wentie L., Jianmin D., Gidaspow D., Bouillard J., Computer Simulations of Gas-Solid Flow in Spouted Beds Using Kinetic-Frictional Stress Model of Granular Flow, *Chem. Eng. Sci.*, **59** (4), p. 865 (2004).
- [22] Du W., Bao X.J., Xu J., Wei W.S., Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of Spouted Bed: Influence of Frictional Stress, Maximum Packing Limit and Restitution Coefficient of Particles, *Chem. Eng. Sci.*, **61** (14), p. 4558 (2006).

- [23] Hulme I., "Verification of the Hydrodynamics of a Polyethylene Fluidized Bed Reactor Using CFD and Imaging Experiments", M. Sc. Thesis, University of Calgary, Calgary (2003).
- [24] McKen T., Pugsley T., Simulation and Experimental Validation of a Freely Bubbling Bed of FCC Catalyst, *Powder Technol.*, **129**, p. 139 (2003).
- [25] Zhang K., Zhang H., Lovick J., Zhang J., Zhang B., Numerical Computation and Experimental Verification of the Jet Region in a Fluidized Bed, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**, p. 3696 (2002).
- [26] Clift R., Grace J.R. (Eds.), "Continuous Bubbling and Slugging", Academic Press, London, (1985).
- [27] Lin J.S., Chen M.M., Chao B.T., A Novel Radioactive Particle Tracking Facility for Measurements of Solids Motion in Gas Fluidized Beds, *AIChE J.*, **31**, p. 465 (1985).
- [28] Laverman J.A., Roghair I., van Sint Annaland M., Investigation into the Hydrodynamics of Gas-Solid Fluidized Beds Using Particle Image Velocimetry Coupled with Digital Image Analysis, *Can. J. Chem. Eng.*, **86**, p. 523 (2008).
- [29] Ding J., Gidaspow D., A Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow, *AIChE J.*, **36**, p. 523 (1990).
- [30] Syamlal M., O'Brien T.J., Fluid Dynamic Simulation of O₃ Decomposition in a Bubbling Fluidized Bed, *AIChE J.*, **49**, p. 2793 (2003).