

شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک جریان چند فازی گاز-جامد در بستر دوار: تأثیر ضریب ارتجاعی بر ضخامت لایه فعال

افشین تقی‌زاده^۱، سید حسن هاشم‌آبادی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه

علم و صنعت ایران

^۲ دانشیار، آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

نوع مقاله: ترویجی

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۲ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۹

چکیده

در مطالعه حاضر به شبیه‌سازی دوبعدی هیدرودینامیک بستر گاز - جامد دوار در رژیم غلتان به‌منظور استفاده در پیرولیز ضایعات پلیمری پرداخته شده است. مدل‌سازی با رویکرد اولرین - اولرین به همراه نظریه جنبشی جریان‌های دانه‌ای انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با کار آزمایشگاهی انجام شده در بستر دوار توسط سانتوس و همکاران (۲۰۱۵) مقایسه شد که حاکی از انطباق خوب نتایج با کارهای آزمایشگاهی بوده است. در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامتر ضریب ارتجاعی بر ضخامت لایه فعال پرداخته شده است. بدین منظور مقادیر مختلف ضریب ارتجاعی (۰/۸۵، ۰/۹، ۰/۹۲ و ۰/۹۵) انتخاب شده و تأثیر آن بر ضخامت لایه فعال در بستر دوار بررسی شده است. با افزایش ضریب ارتجاعی از ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ میزان ضخامت لایه فعال افزایش یافته که با توجه به اینکه بخش اصلی اختلاط در بسترهای دوار صورت می‌گیرد، می‌توان تأثیر آن در بهبود اختلاط در بسترهای دوار را با در نتایج مشاهده کرد.

کلمات کلیدی: بستر دوار، شبیه‌سازی عددی، ضریب ارتجاعی، لایه فعال، هیدرودینامیک

* hashemabadi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

بسیاری از فرآیندهای صنعتی نیازمند سطح تماس بالا بین فازها هستند تا موجب افزایش پدیده‌های انتقال از جمله حرارت و جرم شود. ستون‌های دوار اغلب به صورت استوانه‌هایی هستند که حول محور مرکزی می‌چرخند و هیدرودینامیک مناسبی برای تماس فازها فراهم می‌کنند. ستون‌های دوار به دلیل انجام فرآیند برای طیف گسترده ای از مواد و به طور گسترده استفاده می‌شوند؛ بنابراین ستون‌های دوار جهت استفاده در فرآیندهای مواد دانه‌ای در کاربردهای مهندسی به عنوان کوره، مخلوط‌کن، خشک‌کن و راکتور مناسب‌اند.

حرکت ذرات در ستون دوار بسیار پیچیده است. بررسی مشکلات موجود در فرآیند ستون‌های دوار توسط چندین محقق منجر به دستیابی به اطلاعات مهمی مانند دینامیک بسترهای دانه‌ای، حرکت ذرات و انتقال حرارت درون بستر دانه‌ای شده است، بنابراین دستیابی به چگونگی بهبود کیفیت محصولات و افزایش محصولات بسیار مهم و ضروری است. با این وجود، بازدهی ستون دوار وابسته به رفتار دینامیکی سیالات در بستر است.

با افزایش سرعت چرخش ستون، شش حالت حرکت جامدات در ستون دوار به وجود می‌آید که عبارت‌اند از: حالت لغزشی^۱، سقوط ناگهانی^۲، حالت غلتان^۳، حالت آبشاری^۴، حالت آبشاری بزرگ^۵ و حالت سانتریفیوژی^۶. در صنعت، رژیم‌های غلتان و سقوط ناگهانی بیشتر مرسوم هستند. در رژیم غلتان، بستر مواد به دو بخش تقسیم می‌شود: فعال، غیرفعال. در ناحیه فعال ذرات با توجه به زاویه ریزش از بالای بستر به سمت پایین می‌لغزند و در ناحیه غیرفعال ذرات به وسیله سرعت چرخش دیواره به سمت بالا حرکت می‌کنند. در ناحیه غیرفعال حرکت ذرات با سرعتی مشابه سرعت چرخش دیواره همانند جسم صلب است، لذا اختلاط ذرات در این ناحیه قابل صرف نظر کردن است. اختلاط ذرات به طور عمده در ناحیه فعال اتفاق می‌افتد [۱].

در سال‌های اخیر، مطالعات بسیاری در رابطه با هیدرودینامیک جریان‌های دانه‌ای در بستر دوار انجام شده است. هنین و همکاران [۱] تأثیر متغیرها از قبیل سرعت چرخش، عمق بستر، قطر سیلندر، سایز ذرات و شکل ذرات در حرکت بستر جامد در ستون دوار را بررسی کرده‌اند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که ضخامت لایه فعال در رژیم غلتان با کاهش قطر ذرات و افزایش سرعت چرخش و عمق بستر افزایش یافته است.

چو و همکاران [۲] به بررسی تأثیر میزان مایع و ویسکوزیته بر جدایش ذرات در ستون دوار به صورت آزمایشگاهی پرداخته‌اند. تأثیر حجم و ویسکوزیته مایعات در سیستم دانه‌ای بر شاخص جدایش و زاویه ریزش در ستون دوار بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که حجم و ویسکوزیته مایعات اضافه شده، تأثیر به‌سزایی در جریان دانه ای خیس دارند. همچنین، شاخص جدایش با افزایش زاویه ریزش مواد دانه‌ای خیس کاهش یافت که این روند برخلاف حجم و ویسکوزیته مایع اضافه شده بود.

¹ Slipping

² Slumping

³ Rolling

⁴ Cascading

⁵ Cataracting

⁶ Centrifuging

هوانگ و کو [۳] به بررسی عملکرد ستون دوار با استفاده از ذرات شیشه‌ای با سایزهای مختلف پرداختند. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که گرادیان غلظت ذرات درشت‌تر در ناحیه انتقالی زمانی که نسبت سایز ذرات از ۱/۶۸ تا ۲/۰۱ افزایش می‌یابد به شدت زیاد می‌شود و سپس به تدریج با افزایش نسبت سایز از ۲/۰۱ تا ۳/۳۷ کاهش می‌یابد. تفاوت در پروفایل غلظت به وسیله تفاوت در زاویه ریزش برای ذرات مختلف مخلوط دوتایی توجیه می‌شود.

چو و هیاسائو [۲] به بررسی خصوصیات دینامیکی و رفتار جریان مواد دانه‌ای غوطه‌ور ستون دوار پرداختند و درجه پرشدگی، سرعت چرخش و ویسکوزیته سیال به عنوان پارامترهای کنترل در نظر گرفته شدند. نتایج نشان دادند که هردوی خصوصیات دینامیکی مواد دانه‌ای و رفتار جریان بسیار تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی هستند.

کارهای آزمایشگاهی در جریان دانه‌ای بستر دوار به منظور درک رفتار ذرات جامد در ستون دوار انجام شده‌اند. در آزمایش‌ها، از تجهیزات اندازه‌گیری برای اندازه‌گیری خصوصیات جریان مانند سرعت ذرات، دمای دانه‌ای و کسر حجمی استفاده می‌شود. این روش‌ها با صرف هزینه و زمان زیادی قابل انجام هستند. از سویی دیگر، با استفاده از روش‌های عددی می‌توان درک بهتری از مفاهیم جریان در ستون دوار به دست آورد. روش اولرین - اولرین و روش اجزای گسسته (DEM^۷) دو مدلی هستند که عمدتاً برای شبیه‌سازی جریان‌های دانه‌ای استفاده می‌شوند.

در روش DEM، هر یک از ذرات به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شود و برهم‌کنش بین ذرات دیده می‌شود. با این وجود، بسیاری از محققان این روش را برای شبیه‌سازی رفتار بستر در ستون دوار انتخاب کرده‌اند [۴ و ۱۰]. در این روش در انتخاب تعداد ذرات به دلیل حجم بالای محاسباتی محدودیت وجود دارد.

از سویی دیگر، در روش اولرین - اولرین، هر دو فاز به صورت نفوذکننده در هم در نظر گرفته می‌شوند و معادلات برای هر فاز به صورت مجزا حل می‌شود. در این روش فازها به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شوند و برهم‌کنش بین ذرات دیده نمی‌شود. مطالعه عددی بستر گاز-جامد در ستون دوار با روش اولرین-اولرین بسیار محبوب است، اما در حوزه بررسی دینامیک سیالات در بستر گاز-جامد تعداد مطالعات محدود است.

هی و همکاران [۱۱] و یاسین دماغ و همکاران [۱۲] به بررسی حرکت ذرات جامد در ستون دوار با استفاده از شبیه‌سازی CFD پرداخته‌اند. در این پژوهش از روش پیوسته به همراه تئوری سنتیک ذرات دانه‌ای برای شبیه‌سازی جریان دوفازی گاز - جامد در ستون دوار استفاده شده است. نتایج به وضوح دو ناحیه مجزا را در سطح مقطع ستون دوار نشان می‌دهند (ناحیه فعال و غیرفعال). از نتایج به دست آمده درمی‌یابیم که بردارهای سرعت در ناحیه فعال الزاماً با سطح بستر موازی نیستند. آن‌ها به مقایسه سرعت‌های به دست آمده از مطالعه عددی و داده‌های آزمایشگاهی پرداختند و تطابق خوبی بین نتایج کار عددی و داده‌های آزمایشگاهی دیده شد که صحت مدل آن‌ها را تأیید می‌کند.

سانتوس [۱۳] و همکاران به صورت آزمایشگاهی و عددی به بررسی رفتار هیدرودینامیکی بستر جامد در ستون دوار در شرایط مختلف عملیاتی پرداختند. آن‌ها از مدل اولرین-اولرین به همراه نظریه جنبشی ذرات دانه‌ای برای شبیه‌سازی استفاده کردند. همچنین آن‌ها از روشی آزمایشگاهی استفاده کردند که به طور مستقیم پارامترهای مربوط به ذرات دانه‌ای از قبیل سرعت ذرات را به دست می‌دهد.

⁷ Discrete Element Method

هوانگ و همکاران [۱۴] به مطالعه حرکت ذرات جامد در سیستم جامد-جامد-گاز به کمک شبیه‌سازی CFD پرداخته‌اند. آن‌ها از نرم‌افزار فلونت برای این مطالعه استفاده کرده‌اند.

در مطالعه‌ای دیگر سانتوس و همکاران [۱۵] به بررسی تأثیر ضریب درگ در شبیه‌سازی جریان‌های گاز-جامد به صورت آزمایشگاهی و عددی پرداختند. آن‌ها دریافته‌اند که در سیستم‌های بدون ورود و خروج سیال نیروی درگ تأثیری بر هیدرودینامیک جریان گاز-جامد ندارد.

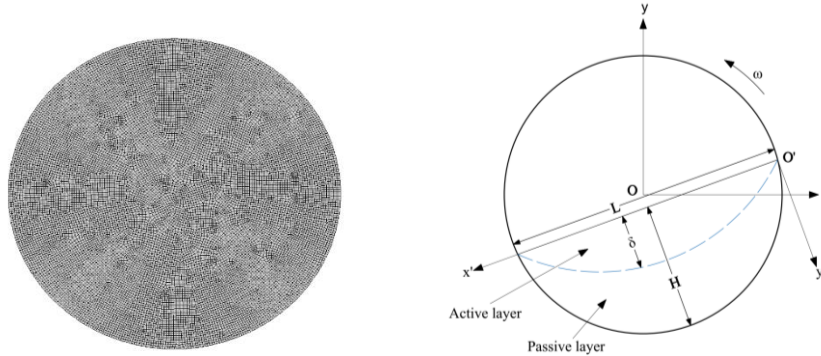
دیله و همکاران [۱۶] نیز به بررسی رفتار جریان گاز-جامد در بستر دوار به کمک مدل‌های CFD با روش اولرین-اولرین پرداخته‌اند. آن‌ها تأثیر سرعت چرخش، درجه پرشدگی، نرخ خوراک و شیب ستون دوار در هیدرودینامیک بستر دوار را مطالعه کرده‌اند و دریافته‌اند که با افزایش سرعت چرخش ضخامت لایه فعال و زاویه ریزش افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش درجه پرشدگی سرعت سطحی ذرات در بستر، زاویه ریزش و ضخامت لایه فعال افزایش می‌یابد.

در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر ضریب ارتجاعی بر ضخامت لایه فعال با استفاده از شبیه‌سازی به روش اولرین-اولرین به همراه نظریه جنبشی جریان‌های دانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار فلونت ۱۶/۱ پرداخته می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد؛ رژیم غلتان، بستر دوار را به دو بخش مجزا؛ ناحیه فعال در بخش بالایی بستر و ناحیه غیرفعال در بخش پایینی و نزدیک به دیواره، تقسیم می‌کند. تقریباً تمام پدیده‌های انتقال در بخش فعال رخ می‌دهند و ضخامت این بخش از اهمیت بالایی در بازدهی و کارایی بستر دوار برخوردار است.

۲- تشریح مدل

در پژوهش حاضر، از دیدگاه دوفازی اولرین-اولرین به همراه نظریه جنبشی جریان دانه‌ای به منظور شبیه‌سازی جریان در بستر دوار استفاده شده است. مدل اولرین-اولرین پیچیده‌ترین مدل چندفازی موجود در مبحث شبیه‌سازی‌های CFD است. در این مدل معادلات پیوستگی و مومنتوم برای هر فاز حل خواهد گردید. ارتباط این معادلات از طریق فشار و ضرایب تبادل بین فازی صورت می‌گیرد که این ارتباط به نوع فازها بستگی دارد. در شکل ۱ شماتیکی از بستر دوار کشیده شده است. در این مطالعه، ستون دوار با قطر ۲۱/۵ سانتی‌متر به صورت دوبعدی مدل شده است. فرضیات اصلی مورد استفاده به‌قرار زیر است:

- خواص فیزیکی ثابت
- ذرات کروی شکل با اندازه یکسان
- عدم چسبندگی ذرات
- عدم وجود انتقال جرم بین فازها
- عدم وجود واکنش



شکل ۱- شماتیک بستر دوار در حالت رژیم غلتان و شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی

در ادامه به معرفی معادلات حاکم در شبیه‌سازی حاضر بر اساس مدل اولرین-اولرین پرداخته می‌شود:

۲-۱- معادلات بقا

الف) معادلات بقای جرم در فازهای گاز و جامد به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (2)$$

$$(\alpha_g + \alpha_s) = 1 \quad (3)$$

در این روابط α_g ، α_s ، \vec{v}_g ، \vec{v}_s ، ρ_g و ρ_s به ترتیب کسرهای حجمی و سرعت و دانسیته فازهای گاز و جامد هستند. (ب) معادلات مومنتوم برای فازهای گاز و جامد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = \alpha_g \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \beta(\vec{v}_s \vec{v}_g) + \alpha_g \rho_g g \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = \alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \beta(\vec{v}_g \vec{v}_s) + \alpha_s \rho_s g \quad (5)$$

در این رابطه p ، $\bar{\tau}_g$ ، $\bar{\tau}_s$ ، p_s و β به ترتیب فشار سیال، تانسور تنش برای گاز و جامد، فشار ذرات در فاز جامد، ضریب درگ بین فازی و شتاب گرانش هستند.

تنسور تنش فاز گاز و فاز جامد:

$$(6)$$

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

$$(7)$$

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

در این رابطه μ_g و μ_s به ترتیب ویسکوزیته در فاز گاز و جامد و ویسکوزیته توده هستند. فشار در فاز جامد به صورت زیر است [۱۳]:

$$P_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s(1 + e_{ss})\alpha_s^2 g_{0.ss}\theta_s \quad (8)$$

ضریب درگ بین فازهای گاز و جامد به صورت زیر است [۱۷]:

$$\beta = \begin{cases} \beta_{Ergan} = 150 \frac{\alpha_s^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_s^2} + 1.75 \frac{\alpha_s \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} & \text{for } \alpha_g \leq 0.8 \\ \beta_{Wen-Yu} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \alpha_g^{-2.65} & \text{for } \alpha_g > 0.8 \end{cases} \quad (9)$$

در این رابطه C_D ضریب درگ است که به صورت زیر به دست می‌آید:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{\alpha_g Re_s} [1 + 0.15(\alpha_g Re_s)^{0.687}] & \text{for } Re_s < 1000 \\ 0.44 & \text{for } Re_s \geq 1000 \end{cases} \quad (10)$$

$$Re = \frac{\alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g| d_s}{\mu_g} \quad (11)$$

۲-۲- نظریه جنبشی جریان‌های دانه‌ای

معادله بقای دمای به صورت زیر است:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \theta_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \theta_s) \vec{v}_s \right] = (\nabla p_s I + \alpha_s \nabla \bar{t}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_s + \varphi_s \quad (12)$$

در این رابطه (۱۲) به ترتیب اتلاف توربولنت انرژی سینتیکی و تبادل انرژی بین فازهای سیال و جامد هستند، که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\gamma_s = 3(1 - e_{ss}^2) \alpha_s^2 \rho_s g_{0.ss} \theta_s \left(\frac{4}{d_p} \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} - \nabla \cdot \vec{v}_s \right) \quad (13)$$

در این رابطه e_p و $g_{0.ss}$ ضریب ارتجاعی ذره-ذره و تابع توزیع شعاعی می‌باشند. تابع توزیع شعاعی ارائه شده توسط لان و همکاران [۱۸] به صورت زیر است:

$$g_{0.ss} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (14)$$

$$\varphi_s = -3\beta_{gs} \theta_s \quad (15)$$

ویسکوزیته برشی جامد به صورت جمع سه ترم (ویسکوزیته برخوردی، ویسکوزیته سینتیکی و ویسکوزیته اصطکاکی) است:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (16)$$

ویسکوزیته برخوردی و سینتیکی ذرات جامد به صورت زیر است [۱۷]:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_0 (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (17)$$

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 d_s \rho_s \sqrt{\pi \theta_s}}{96(1 + e_{ss}) g_{0.ss}} \left[1 + \frac{4}{5} \alpha_s g_{0.ss} (1 + e_{ss}) \right]^2 \quad (18)$$

ویسکوزیته اصطکاکی ذرات جامد با استفاده از مدل شافیر [۱۹] به صورت زیر است:

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \sin \varphi}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (19)$$

در این رابطه p_s ، $\sin\varphi$ و I_{2D} به ترتیب فشار در فاز جامد، زاویه اصطکاک داخلی و دومین ثابت تنسور تنش انحرافی است. این ترم زمانی به معادله اضافه می‌شود که کسر حجمی فاز جامد از مقدار مشخصی فراتر رود که در شبیه سازی‌ها مشخص می‌شود.

در پژوهش حاضر، معادلات بالا با رویکرد حجم محدود و با استفاده از الگوریتم SIMPLE^A توسط بسته‌ی نرم‌افزاری و تجاری انسیس فلونت ۱۶/۱ حل شده‌اند. برای دیواره، شرط مرزی عدم لغزش برای هر دو فاز گاز و جامد در نظر گرفته شد. هندسه موردنظر با استفاده از نرم‌افزار گمبیت ۴/۲ شبکه‌بندی شد (شکل ۱). گام زمانی مورد استفاده در این شبیه‌سازی ۰/۰۰۰۱ ثانیه است. در جدول ۱ تمام اطلاعات موردنیاز برای شبیه‌سازی آورده شده است.

جدول ۱- اطلاعات موردنیاز در شبیه‌سازی

پارامتر	توضیحات	مقدار
دانسیته ذرات	$\rho_s \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	۱۱۶۴
قطر ذرات	$d_p (mm)$	۶/۲
درجه پرشدگی	$f(\%)$	۱۸/۸۱
سرعت چرخش	$\omega (rad/sec)$	۱/۴۵
ضریب ارتجاعی	e_{ss}	۰/۹۵

۳- نتایج

۳-۱- اعتبار سنجی و بررسی استقلال شبکه

در پژوهش حاضر به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه مورد استفاده، چهار نوع شبکه که اطلاعات آن در جدول ۲ آورده شده‌اند انتخاب شد و با بررسی نتایج و مقایسه مقادیر سرعت ذرات در راستای خط عمود بر بستر در جهت شعاعی بستر دوار در چهار نوع شبکه، به این نتیجه رسیدیم که شبکه با سایز ۲۰۶۴۴ به دلیل دقت مناسب و همچنین حجم محاسباتی پایین‌تر برای این شبیه‌سازی مناسب است.

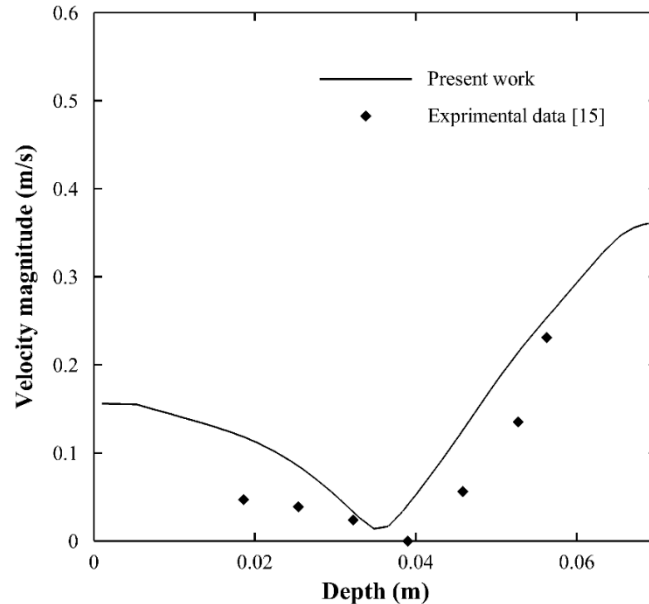
جدول ۲- مشخصات شبکه‌بندی

شبهه	تعداد سلول‌های شبهه
شبهه ۱	۲۰۶۴۴
شبهه ۲	۲۶۴۰۵
شبهه ۳	۳۰۷۸۴
شبهه ۴	۳۵۷۵۹

به منظور استفاده از این مدل در کارهای آینده و اطمینان از نتایج به دست آمده باید نتایج حاصل از مدل با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شوند. برای این منظور از پژوهش سانتوس و همکاران [۱۵] استفاده شده است. در شکل ۲ مقدار سرعت ذرات جامد با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.

⁸ Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation

با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۲ درمی‌یابیم که بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی وجود دارد. این خطا نیز به دلیل ساده‌سازی‌های انجام شده در مدل و یا خطاهای آزمایشگاهی است.



شکل ۲- مقایسه مقادیر سرعت ذرات بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی در امتداد خط عمود بر بستر در جهت شعاعی (درصد پرشدگی ۱۸/۸۱٪، سرعت چرخش ۱/۴۵ Rad/s)

۳-۲- تأثیر ضریب ارتجاعی بر ضخامت لایه فعال

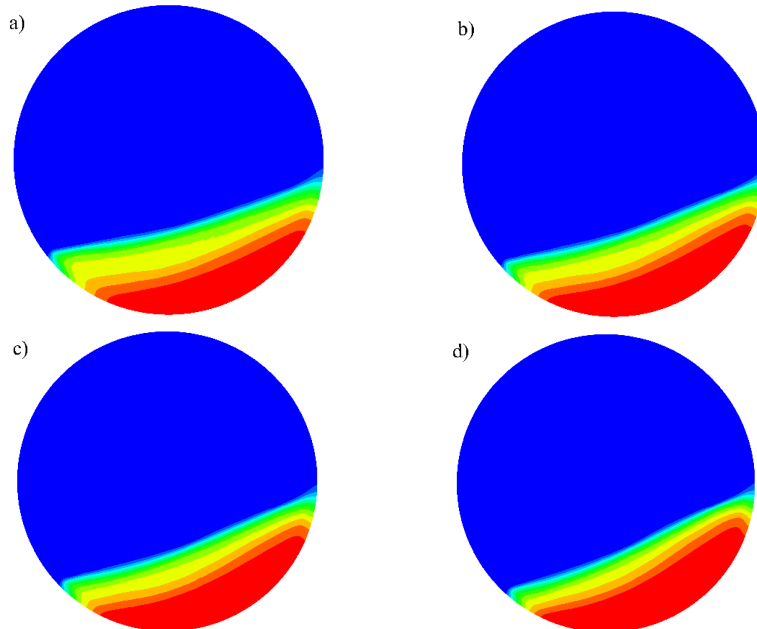
به‌منظور شبیه‌سازی جریان‌های جامد، باید بتوان خصوصیات جریان جامد از قبیل تنش، فشار، ویسکوزیته را تعریف کرد. برای این منظور عمدتاً از نظریه جنبشی جریان‌های دانه‌ای استفاده می‌شود. در این مدل ذرات دارای حرکت‌های تصادفی هستند و به‌وسیله برخورد بین ذرات انتقال انرژی صورت می‌پذیرد. این اغتشاشات در سرعت ذرات جامد و انتقال انرژی موجب به وجود آمدن ترم جدیدی به نام دمای دانه‌ای شده است. این پارامتر در هیدرودینامیک بستر دوار علی‌الخصوص در لایه فعال بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش مقادیر مختلف ضریب ارتجاعی (۰/۹۵، ۰/۹۲، ۰/۹ و ۰/۸۵) برای تخمین ضخامت لایه فعال، مورد بررسی قرار گرفت. در شبیه‌سازی‌های CFD این پارامتر نقش تنظیم‌کننده نتایج شبیه‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی بازی می‌کند.

جدول ۳- مقادیر زاویه ریزش برای ضرایب ارتجاعی مختلف

زاویه ریزش	ضریب ارتجاعی
۱۸/۷۸۵۱۳۸	۰/۹۵
۱۹/۹۱۷۴۴۵	۰/۹۲
۲۰/۸۰۵۹۹۴۶	۰/۹
۲۴/۱۹۴۱۳۱	۰/۸۵

در شکل ۳ می‌توان، الگوی جریان بستر دوار در ضرایب ارتجاعی مختلف را مشاهده و مقایسه کرد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که این پارامتر بر هیدرودینامیک بستر دوار تأثیرگذار است و این تأثیر را می‌توان در میزان

زاویه ریزش در حالت‌های مختلف مشاهده کرد. در جدول ۳ میزان زاویه ریزش محاسبه شده در حالت‌های مختلف آورده شده است. در ضرایب ارتجاعی مختلف با افزایش این پارامتر میزان زاویه ریزش کاهش می‌یابد که تأثیر به‌سزایی بر هیدرودینامیک بستر دوار علی‌الخصوص در لایه فعال دارد.



شکل ۳- الگوی جریان در بستر دوار برای ضرایب ارتجاعی مختلف (درصد پرشدگی $18/11\%$ ، سرعت چرخش Rad/s $1/45$) (a) ضریب ارتجاعی $0/95$ (b) ضریب ارتجاعی $0/92$ (c) ضریب ارتجاعی $0/9$ (d) ضریب ارتجاعی $0/85$

همان‌طور که در بخش ۲ در قسمت نظریه جنبشی جریان‌های دانه‌ای بیان شده است، با توجه به روابط (فشار، ویسکوزیته بالک، ویسکوزیته برشی) با تغییرات دمای دانه‌ای میزان فشار جامد، ویسکوزیته برشی و ویسکوزیته بالک تغییر می‌کنند و در نهایت رفتار هیدرودینامیکی بستر تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

در رژیم غلتان، بستر به دو بخش مجزا، ناحیه فعال^۹ در بخش بالایی بستر و ناحیه غیرفعال^{۱۰} در بخش پایینی و نزدیک به دیواره، تقسیم می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر گفته شده است تقریباً تمام پدیده‌های انتقال در ناحیه فعال اتفاق می‌افتند به همین منظور ضخامت لایه فعال در بستر دوار از اهمیت بالایی برخوردار است.

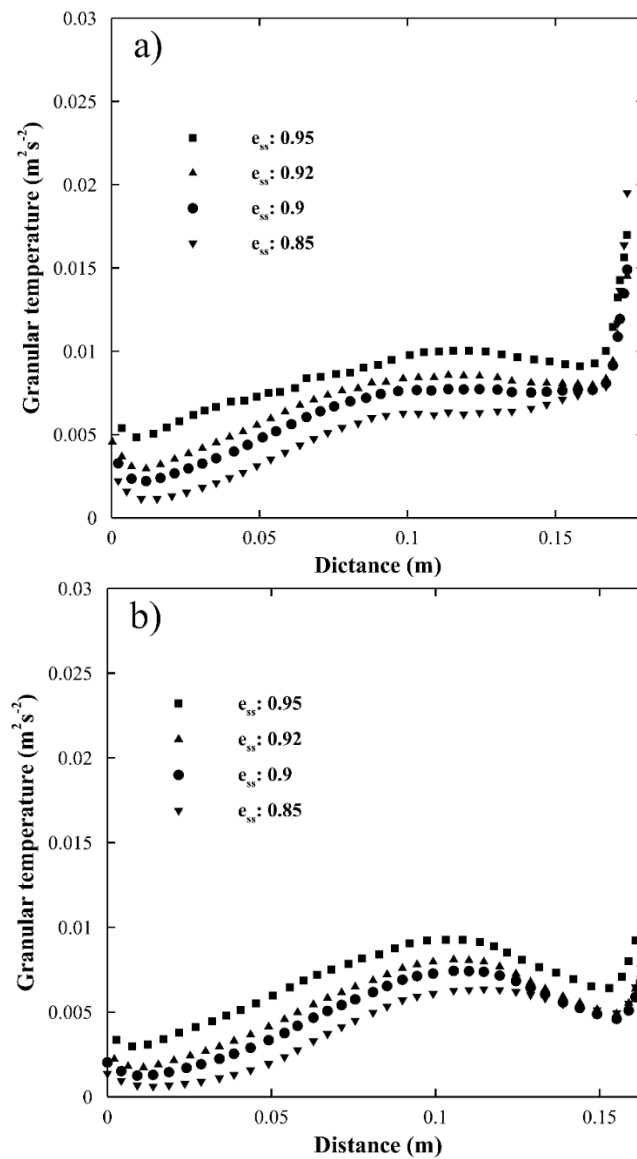
در بخش بالایی بستر (لایه فعال) از آنجایی که دمای دانه‌ای ذرات بالا است، تأثیر برخورد بین ذرات زیاد است. ضریب ارتجاعی بالا حاکی از اتلاف مومنتوم کم در برخورد بین دو ذره بوده و در نهایت موجب افزایش اغتشاش در فاز جامد و افزایش دمای دانه‌ای در فاز جامد می‌شود. از طرفی با افزایش عمق بستر به سمت لایه غیرفعال می‌رویم و با مقایسه دمای دانه‌ای در ارتفاع مختلف متوجه می‌شویم که میزان این پارامتر به سمت صفر می‌رود و پس از گذر از مرز لایه فعال و غیرفعال میزان این پارامتر تقریباً صفر است. در این ناحیه می‌توان از تأثیر برخورد بین ذرات صرف‌نظر کرد. جریان به‌صورت قالبی^{۱۱} است و در بستر دوار ذرات به‌صورت قالبی با سرعت دیواره حرکت می‌کنند

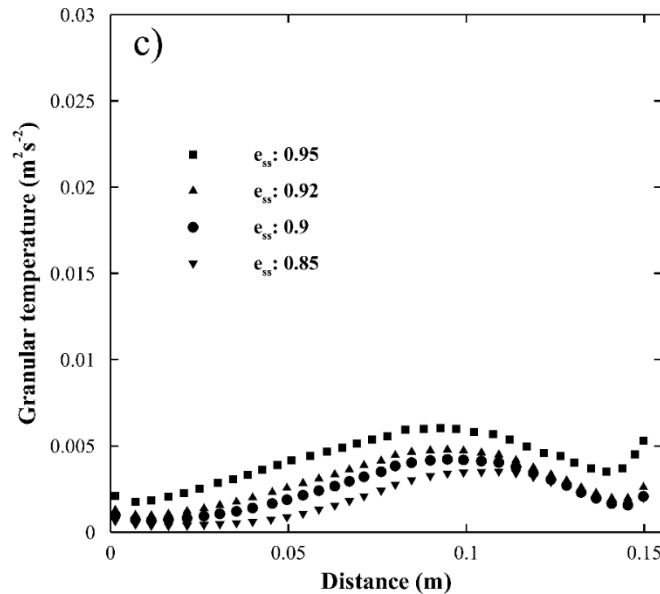
⁹ Active

¹⁰ Passive

¹¹ Plug

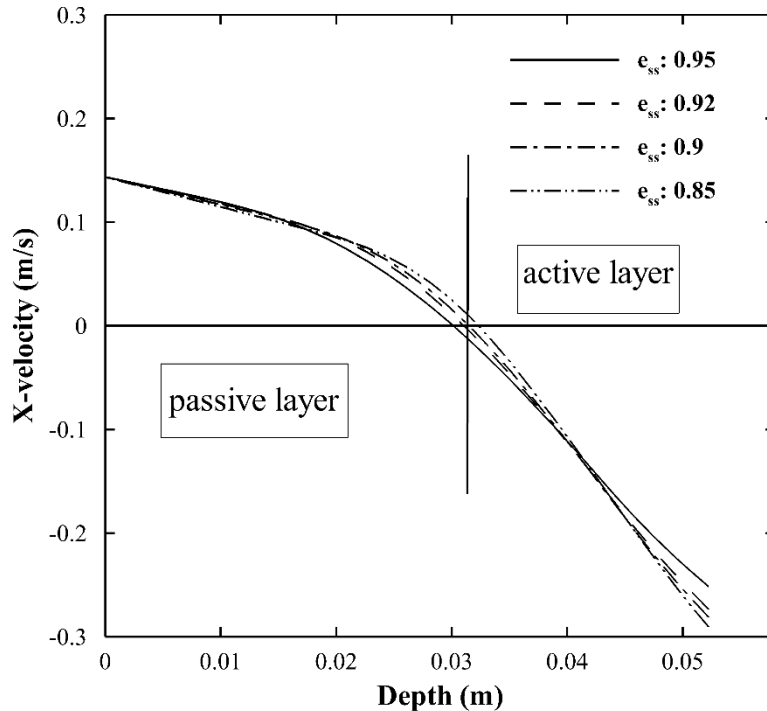
و اغتشاشی در سرعت حرکت ذرات دیده نمی‌شود. در شکل ۴ می‌توان تغییرات دمای دانه‌ای در امتداد خط موازی با سطح بستر را در عمق‌های مختلف لایه فعال مشاهده کرد.





شکل ۴- مقادیر دمای دانه‌ای برای ضرایب ارتجاعی متفاوت در عمق‌های مختلف (درصد پرشدگی ۱۸/۸۱٪، سرعت چرخش ۱/۴۵ Rad/s) (a) عمق ۷ mm (b) عمق ۱۵ mm (c) عمق ۲۲ mm

به‌طور کلی همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌کنید با افزایش میزان ضریب ارتجاعی میزان دمای دانه‌ای افزایش می‌یابد. در یک عمق خاص (به‌عنوان مثال ۱۰ درجه) در نواحی نزدیک دیواره میزان دمای دانه‌ای کاهش یافته است و نمودار در مرکز به‌صورت نوک‌تیز است. این کاهش در نواحی نزدیک دیواره را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در این نواحی ضخامت لایه فعال با کاهش روبه‌روست و زودتر از نواحی مرکزی خصوصیات جریان به سمت لایه غیرفعال سوق می‌یابد. در شکل ۱ می‌توان شماتیکی از لایه فعال و غیرفعال و ضخامت لایه فعال مشاهده کرد. در دو انتهای نمودار (چسبیده به دیوار) افزایش ناگهانی در میزان دمای دانه‌ای مشاهده می‌شود که می‌توان با توجه به شرط عدم لغزش آن را توجیه کرد. در نواحی چسبیده به دیوار ذرات به دلیل شرط مرزی عدم لغزش با سرعتی معادل با سرعت دیواره حرکت می‌کنند و با توجه به رابطه دمای دانه‌ای که در بخش ۲ به آن اشاره شده است درمی‌یابیم که دمای دانه‌ای متناسب با سرعت ذرات جامد است. پس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضریب ارتجاعی میزان دمای دانه‌ای در عمق‌های مختلف افزایش یافته است و این نشان‌دهنده دور بودن از خصوصیات لایه غیرفعال (دمای دانه‌ای صفر) است، درنهایت می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضریب ارتجاعی میزان ضخامت لایه فعال افزایش می‌یابد. برای اثبات این ادعا میزان سرعت ذرات در جهت افق در ضرایب ارتجاعی مختلف در امتداد خط عمود بر بستر در جهت شعاعی در شکل ۵ رسم شده است. با توجه به شکل، نقطه‌ای که سرعت تغییر علامت می‌دهد نشان‌دهنده میزان ضخامت لایه فعال است. با توجه به شکل درمی‌یابیم که ضخامت لایه فعال برای ضرایب ارتجاعی بالاتر، بیش‌تر است.



شکل ۵- مقادیر سرعت در جهت افق، در امتداد خط عمود بر بستر در جهت شعاعی برای ضرایب ارتجاعی مختلف (درصد پرشدگی ۱۸/۸۱٪، سرعت چرخش ۱/۴۵ Rad/s)

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود و نتایج حاصل از شبیه‌سازی CFD، می‌توان به این نتیجه رسید که شبیه‌سازی جریان‌های دوفازی گاز - جامد بر مبنای روش اولرین - اولرین به همراه نظریه جنبشی جریان دانه‌ای تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

در پژوهش حاضر نتایج حاصل از پژوهش تجربی سانتوس و همکاران با نتایج شبیه‌سازی CFD مقایسه شد و نشان‌دهنده تطابق مناسب بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی بود.

تأثیر ضریب ارتجاعی بر هیدرودینامیک بستر دوار و همچنین ضخامت لایه فعال بررسی شد. با کاهش ضریب ارتجاعی میزان زاویه ریزش افزایش می‌یابد که این می‌تواند تأثیر به‌سزایی در هیدرودینامیک بستر دوار و اختلاط در بستر داشته باشد، اما با کاهش ضریب ارتجاعی میزان دمای دانه‌ای ذرات در بستر در عمق‌های ثابت کاهش می‌یابد و این موجب این می‌شود که در عمق‌های کم‌تری به سمت لایه غیرفعال برویم و ضخامت لایه فعال کاهش می‌یابد. از آنجایی که تمام پدیده‌های انتقال در فرآیند پیرولیز ضایعات در لایه فعال انجام می‌شود، از این رو ضخامت لایه فعال به‌منظور طراحی ستون دوار بسیار مهم و تأثیرگذار است.

فهرست علائم و نشانه‌ها

C_D	ضریب درگ
d	قطر
	[m]

-	ضریب ارتجاعی	e_{ss}
[m/s ²]	شتاب گرانش	g
-	تابع توزیع شعاعی	g_{0ss}
-	ثابت دوم تنسور تنش انحرافی	I_{2D}
-	ضریب نفوذ انرژی	$k_{\theta s}$
[Pascal]	فشار سیال	p
-	عدد بدون بعد رینولدز	Re
[deg]	زاویه اصطکاک داخلی	$\sin\varphi$
[s]	زمان	t
[m/s]	سرعت	\vec{v}

علائم یونانی

	ضریب درگ بین فاز گاز و جامد	β
	اتلاف اغتشاش انرژی سینتیکی	γ_s
	کسر حجمی	α
	دمای دانه‌ای	θ
	ویسکوزیته توده	λ
	ویسکوزیته دینامیک	μ
	دانسیته	ρ
	تنسور تنش	$\bar{\tau}$
	انتقال انرژی بین فازهای جامد و گاز	φ_s

زیروند

	سیال	f
	گاز	g
	ذره	p
	جامد	s

منابع

- [1] Henein, H., J.K. Brimacombe, and A.P. Watkinson, Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns. Metallurgical Transactions B, 1983. 14 (2): pp. 191-205.
- [2] Chou, S.H. and S.S. Hsiau, Dynamic properties of immersed granular matter in different flow regimes in a rotating drum. Powder Technology, 2012. 226: pp. 99-106.
- [3] Huang, A.N. and H.P. Kuo, A study on the transition between neighbouring drum segregated bands and its application to functionally graded material production. Powder Technology, 2011. 212 (2): pp. 348-353.
- [4] Finnie, G.J., et al., Longitudinal and transverse mixing in rotary kilns: A discrete element method approach. Chemical Engineering Science, 2005. 60 (15): pp. 4083-4091.



- [5] Kwapinska, M., G. Saage, and E. Tsotsas, Mixing of particles in rotary drums: A comparison of discrete element simulations with experimental results and penetration models for thermal processes. *Powder Technology*, 2006. 161(1): pp. 69-78.
- [6] Yang, R.Y., et al., Numerical simulation of particle dynamics in different flow regimes in a rotating drum. *Powder Technology*, 2008. 188(2): pp. 170-177.
- [7] Xu, Y., et al., 2D DEM simulation of particle mixing in rotating drum: A parametric study. *Particuology*, 2010. 8(2): pp. 141-149.
- [8] Jiang, M., et al., Enhancing mixing of particles by baffles in a rotating drum mixer. *Particuology*, 2011. 9(3): pp. 270-278.
- [9] Komossa, H., et al., Transversal bed motion in rotating drums using spherical particles: Comparison of experiments with DEM simulations. *Powder Technology*, 2014. 264: pp. 96-104.
- [10] Liu, P.Y., R.Y. Yang, and A.B. Yu, DEM study of the transverse mixing of wet particles in rotating drums. *Chemical Engineering Science*, 2013. 86: pp. 99-107.
- [11] He, Y.R., et al., Solids Motion and Segregation of Binary Mixtures in a Rotating Drum Mixer. *Chemical Engineering Research and Design*, 2007. 85 (7): pp. 963-973.
- [12] Demagh, Y., et al., Surface particle motions in rotating cylinders: Validation and similarity for an industrial scale kiln. *Powder Technology*, 2012. 224: pp. 260-272.
- [13] Santos, D.A., et al., Experimental and CFD study of the hydrodynamic behavior in a rotating drum. *Powder Technology*, 2013. 250: pp. 52-62.
- [14] Huang, A.-N., W.-C. Kao, and H.-P. Kuo, Numerical studies of particle segregation in a rotating drum based on Eulerian continuum approach. *Advanced Powder Technology*, 2013. 24 (1): pp. 364-372.
- [15] Santos, D.A., et al., A hydrodynamic analysis of a rotating drum operating in the rolling regime. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015. 94: pp. 204-212.
- [16] Delele, M.A., et al., Studying the solids and fluid flow behavior in rotary drums based on a multiphase CFD model. *Powder Technology*, 2016. 292: pp. 260-271.
- [17] Gidaspow, D., *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions*. 1st ed. 1994, USA: Boston, Mass.
- [18] Lun, C.K.K., et al., Kinetic theories for granular flow: Inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984. 140: pp. 223-256.
- [19] Schaeffer, D.G., Instability in the evolution equations describing incompressible granular flow. *Journal of Differential Equations*, 1987. 66 (1): pp. 19-50.