سال بیست و یکم، شماره یک، ۱۳۸۹

شبیه سازی ناپایای بستر شارانیده شده حبابی حاوی ذرات نوع B با استفاده از CFD *

سيد حسين حسيني (۱) رهبر رحيمي (۲) مرتضى زيودار (۲) عبدالرضا صميمي (٤)

چکید و بسترهای شارانیده شده گاز – جامد، در صنعت بسیار مورد توجه می باشند. هیدرودینامیک این سیستمها به دلیل پیچیدگی بالای آنها نیاز به تحقیقات گسترده ای دارد. در مطالعه حاضر، هیدرودینامیک بستر شارانیده شده گاز –جامد حاوی ذرات کروی با قطر میانگین بس ۱۷۷۰ با استفاده از CFD به صورت دو بعدی آن هم در حالت ناپایا مورد بررسی قرار گرفته است. مدل دو سیالی با استفاده از نظریه جنبشی جریان دانه ای برای بیان بهتر رئولوژی فاز جامد در دامنه سرعت ظاهری ۱۳۸۶ تا ۲۰۰ تا ۲۰۰ در گاز مورد استفاده قرار گرفته است. مدل دو سیالی با استفاده از نظریه جنبشی ساده سازی معادله انتقال دمای داند. به صورت دو بعدی آن هم در حالت ناپایا مورد بررسی قرار گرفته است. مدل دو سیالی با استفاده از نظریه جنبشی بریان دانه ای برای بیان بهتر رئولوژی فاز جامد در دامنه سرعت ظاهری ۱۳۸۶ تا ۲۰۰ تا معاد رگاز مورد استفاده قرار گرفته است. با ساده سازی معادله انتقال دمای دانه ای به صورت یک معادله جبری، حجم محاسبات به میزان چشم گیری کاهش یافته است. ناده است شیبه سازی به کمک نرم افزار شیبه ساز CFD، بصورت کیفی و کمی با نتایج تجربی مقایسه گردیده و هم خوانی خوبی یافت شده است. پروفیل های پیش بینی شده سرعت و جزء حجمی ذرات درون بستر در درک بهتر پدیده های انتقال و برخی پدیدهای فیزیکی هم چون سایش ذرات در این سیستمها کمک میکند.

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

Unsteady State Simulation of Bubbling Fluidized Bed by CFD

S, H. Hosseini R. Rahimi M. Zivdar A. Samimi

Abstract Gas-solid fluidized bed reactors have many industrial applications. Hydrodynamics of these systems requires more investigation due to their complexity of behaviors. In this study, the 2D hydrodynamics of fluidized bed containing 275 µm spherical glass beads was investigated by using CFD analysis. The simulation of fluidized bed, carried out using the two-fluid model combined with kinetic theory of granular flow for description of rheology of solid phase as a pseudo fluid. Whilst the superficial gas velocity were set on the range of 0.1–0.46 m/s. For the system of dense gas-solid fluidized bed, an algebraic granular energy-balance equation is proposed for determining the granular temperature instead of solving the full granular energy balance equation. This simplification does not lead to different results, but significantly reduces the computational effort of the simulation. The CFD simulation results were qualitatively and quantitatively compared with the literature. These comparisons show the good agreement between them. Particles velocity and volume fraction profiles predicted by CFD code were studied to increase insight of the transport phenomena and some physical phenomena such as particles erosion in these systems.

Key Words Hydrodynamics, Bubbling Fluidized Bed, CFD, TFM.

^{*} نسخهی اول مقاله در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ و نسخهی نهایی آن در تاریخ ۸۸/۱۱/۱۲ به دفتر نشریه رسیده است.

⁽۱) نویسندهی مسئول، استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی ، دانشگاه ایلام

⁽۲) دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

⁽۳) دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

⁽٤) استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

شىبيە سازى ناپاياى بستر شارانيدە شدە حبابى ...

سخت افزارهایی با قدرت پردازش و حافظه زیاد استفاده شود. جهت شرح جریان گاز – جامد تخمین پیوسته اولرین بدلیل زمان محاسباتی مناسب (کمتر) و قابل استفاده بودن در مقیاسهای صنعتی یا نیمه صنعتی، بطور گسترده ای از سوی محققین در شبیه سازی بسترهای شارانیده شده بکار برده می شود. بنابراین در این تحقیق نیز از تخمین اولرین –اولرین استفاده شده است. این تخمین، رفتار فازهای جامد و سیال را نفوذپذیر و پیوسته در نظر می گیرد. با هدف حصول به نتایج واقع بینانهتر، از معادلات ترکیبی نیز برای شرح فشارهای فاز جامد استفاده می شود. در توصیف تنش و برای جریانهای گاز –جامد چگال، مفهوم تئوری مینتیکی برای سیستمهای حاوی مواد دانهای روش مطلوبی است [2].

شناخت نیروهای حاکم بر بستر شارانیده شده نیز از نقش کلیدی در موفقیت شبیهسازی هیدرودینامیک این بستر برخوردار میباشد. جاذبه و دراگ نیروهای عمده حاکم بر جریان میباشند، این درحالی است که برای جریانهای بسیار چگال علاوه بر نیروهای مذکور، تنشهای اصطکاکی نیز اهمیت پیدا میکنند [3].

از نیروی دراگ برای بیان اثرات متقابل بین ذرات جامد و گاز استفاده می شود. روابط تایید شده برای محاسبه ضریب تبادل ممنتوم سیستمهای گاز-جامد که از سوی محققین پیشنهاد شدهاند، در نرم افزارهای تجاری موجود می باشند [4]. در این تحقیق یک بستر شارانیده شده حبابی حاوی ذرات از نوع یک بستر شارانیده شده حبابی حاوی ذرات از نوع مازی شدهاست. همچنین با معرفی معادله ساده شده مرفه سازی شدهاست. همچنین با معرفی معادله ساده شده جری جهت محاسبه دمای دانهای، که باعث صرفه این سیستم خاص بررسی شده است. همچنین روند این سیستم خاص بررسی شده است. همچنین روند منطقی تغییرات برخی از پارامترهای هیدرودینامیکی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. مقدمه

شارانیدہ سازی (Fluidization) روشے موثر برای مخلوط کردن ذرات جامد در فاز گاز یا مایع میباشد و در فرآیندهای همراه با واکنش شیمیایی مثل تولید پلی اتیلن خطی، خشک کردن و سرد کردن به کار میرود. امروزه فرآیند شارانیده کردن گاز– جامد در بـسیاری از عملیات شیمیایی، نفتی، دارویی، کـشاورزی، بیوشـیمی، الکترونیک و صنایع تولید نیرو به کار میرود. از جدیدترین فنآوریهای تولید پلی اتیلن، راکتور بستر شارانیده شده میباشد که بعلت داشتن مزایای فراوان و متعدد نسبت به فرآیندهای دیگر، بطور گستردهای برای تولید این محصول شیمیایی استفاده میشود. این راکتور هم اکنون در بسیاری از مجتمعهای پتروشیمی کشور مانند پتروشیمی اراک و تبریز به کار میرود. علت گستردگی کاربرد بسترهای شارانیده شده گاز – جامد، مشخصههای اختلاط خوب و ازدیاد سطح تماس میان فازهای مختلف و در نتیجه انتقال جرم و حرارت بالای آنها می باشد.

پیچیدگیهای معادلات غیرخطی ریاضی و تعیین نفوذپذیری و حرکت مرزی فازها، ضرورت استفاده از مدلسازی هیدرودینامیک جهت بستر شارانیده شده را آشکار مینماید. دینامیک سیالات محاسباتی علاوه بر صرفه جویی در هزینه و زمان ساخت، در بهینه سازی طراحی و افزایش مقیاس سیستم نیز مورد استفاده قرار می گیرد. برخی از مشکلات و چالشها در ارتباط با اعتبار مدلهای CFD بستر شارانیده شده سیستم گاز-جامد توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است [1].

رفتار پیچیده جریان گاز – جامد در بسترهای شارانیده شده مورد استفاده قرار گیرند، یکی تخمین لاگرانژی یا خطمسیری (Trajectory) و دیگری تخمین اولری یا پیوسته (DEM). روش المان مجزا (DEM) یکی از متداولترین روش های خطمسیری است. در این روش با افزایش تعداد ذرات، محاسبات سنگین و هزینهبر میگردند در این حالت ضروری است که از

افزار شبیه ساز CFD انجام شده است که شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت برای هر فاز میباشد. این معادلات با استفاده از فشار و ضرایب تبادل بین فازی به هم مربوط می شوند. خواص فاز جامد با بکار بردن نظریه جنبشی دانهای ارائه شده است. معادلات حاکم بر سیستم شامل معادلات بقاء جرم، اندازه حرکت و انرژی دانهای می باشند.

معادله بقاء جرم برای هر فاز q (جامد و گاز) چنین بیان میگردد:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_{q}\rho_{q}) + \nabla (\alpha_{q}\rho_{q}\vec{v}_{q}) = 0 , \sum \alpha_{q} = 1$$
 (Y)

که در آن
$$\rho_q$$
 و \bar{v}_q بترتیب دانسیته و سـرعت فـاز
q میباشند.
معادله بقاء اندازه حرکت بـرای فـاز گـاز چنـین
میباشد:
 $\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \bar{v}_g) + \nabla .(\alpha_g \rho_g \bar{v}_g \bar{v}_g)$

$$= -\alpha_{g}\nabla P + \Delta \tau_{g} + \alpha_{g}\rho_{g}g - K_{gs}(\vec{\nu}_{g} - \vec{\nu}_{s})$$
(٣)

معادله بقاء اندازه حركت براى فاز جامد عبارت

است از:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_{s} \rho_{s} \vec{v}_{s}) + \nabla .(\alpha_{s} \rho_{s} \vec{v}_{s} \vec{v}_{s}) \\ &= -\alpha_{s} \nabla P - \nabla P_{s} + \Delta . \vec{\tau}_{s} + \alpha_{s} \rho_{s} g + K_{gs} (\vec{v}_{g} - \vec{v}_{s}) \end{aligned}$$

$$(\varepsilon)$$

که در آن
$$\alpha_{
m s}=1-lpha_{
m g}$$
 میباشد.

از آنجایی که تنش و فشار فاز جامد به مقدار نوسانات سرعت ذره وابسته میباشند، لازم است که بهمنظور تکمیل معادله پیوستگی و موازنه اندازه حرکت در هر دو فاز یک موازنه دانهای انرژی جهت نوسانات مذکور انجام شود. بنابراین بقاء انرژی جنبشی ذرات بر طبق دمای دانهای ه^O که بر گرفته از نظریه جنبشی گازهای چگال میباشد، عبارت است از:

نظرى

الف - نظریه جنبشی. نظریه جنبشی برای مواد دانهای (Granular) توسط برخی از محققین ارائه شده است (Granular) توسط برخی از محققین ارائه شده است [5,6]. این نظریه، طبیعت برخوردهای غیر الاستیکی فره - ذره را براساس تشابه با نظریه جنبشی گازها شرح می دهد. کاربرد نظریه جنبشی در مدل حرکتی مجموعه ذرات چگال تقریباً کشسان، بر اساس قیاس سینتیکی گازهای چگال می باشد. در این نظریه یک دمای دانهای گازهای چگال می باشد. در این نظریه یک دمای دانه ای نفر ورات چگال می باشد. در این نظریه یک دمای دانه می دام می دام در توری می باشد. در این نظریه یک دمای دانه می می درمای دانهای ور گازهای چگال می باشد. در این نظریه یک دمای دانه می درمای دانه در این نظریه یک دمای دانه یک معرفی می شود که وجود آن برای فرمولاسیون سرعت، و ویسکوزیته و فشار ذرات جامد ضروری می باشد. ()

با استفاده از این نظریه یک مدل جدید ارائه شده است که در آن از خواص ذرات جامد، از جمله ویسکوزیته و فشار آنها، بـرای بررسـی هیـدرودینامیک جریان دو فازی گاز – جامد به صورت جت هوا و توزيع يكنواخت گاز درون بـستر حبـابي اسـتفاده شـده است [7]. همچنین نظریه جنبشی جریان دانهای (Kinetic Theory of Granular Flow) برای ذرات ریز و نسبتاً چسبنده مانند Geldart A, C به منظور شرح تشکیل ذرات گروهی (cluster) و یا تجمع آنها مورد تصحیح قرارگرفتـه اسـت [8]. بـسیاری از محققـین در شبیهسازی بسترهای شارانیده شده معمولی از نظریه جنبشی جریان دانهای استفاده نمودهاند [13-9]. همچنین برخی از محققین از نظریه جنبشی جریان دانهای برای شبیه سازی بسترهای فوارهای همراه با لوله داخلي نامتخلخل (يعنى بستر شارانيده شده حاوى يک جت مرکزی گاز و بستر شارانیده شده حاوی یک لولـه شكافدار داخلي) استفاده نمودهاند [16–14].

ب- روابط حاکم بر سیستم. شبیهسازی بستر شارانیده شده با استفاده از تخمین اولرین- اولرین به کمک نـرم شىبيە سازى ناپاياى بستر شارانيدە شدە حبابى ...

O'Brien که در دامنه وسیعی از شرایط بستر شارانیده شده قابل استفاده میباشد، به کار رفته است [4]. ایس مدل دراگ به صورت زیر بیان میگردد:

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

ضریب دراگ C_D نیز چنین بیان می گردد:

$$C_{\rm D} = \left(0.6 + \frac{4.8}{\sqrt{\operatorname{Re}_{\rm s}/\operatorname{v}_{\rm r,s}}}\right)^2 \tag{A}$$

در رابطه فوق
$$v_{r,s}$$
 سرعت حد می باشد که بیان
ریاضی آن به صورت زیر می باشد:
 $v_{r,s} = 0.5[A - 0.06 \,\text{Re}_s + \sqrt{(0.06 \,\text{Re}_s)^2 + 0.12 \,\text{Re}_s(2B - A) + A^2}]$

$$\begin{split} A &= \alpha_g^{4.14} , B = C l \alpha_g^{1.28} \quad \text{for } \alpha_g \leq 0.85 \\ A &= \alpha_g^{4.14} , B = C l \alpha_g^{C2} \quad \text{for } \alpha_g > 0.85 \end{split}$$

مقادیر C1 و C2 را می توان برای همخوانی بیشتر با حداقل شارانیده شدن ذرات به روشی که در زیر ارائه شده است، به دست آورده و از آنها در تعیین ضریب دراگ جدید (اصلاح شده) استفاده نمود. این مقادیر بطور پیش فرض به ترتیب ۸/۰ و ۲/٦۵ می باشند.

اساس تصحیح ضریب دراگ Syamlal-O'Brien اساس تصحیح ضریب دراگ Syamlal-O'Brien بر مبنای حداقل شرایط شارانیده شدن ذرات می باشد، این درحالی است که به طور معمول صرفاً اطلاعات تجربی لازم برای شارانیده شدن ذرات خاص، در دسترس می باشد. پارامتر C1 به حداقل سرعت شارانیده شدن در رابطه جزء حجمی گاز – سرعت و عدد رینولدز حدی، Ret، (رابطه (۱۲)) مربوط می شود. به صورت سعی و خطا مقادیر مختلفی را برای این پارامتر در نظر می گیریم تا در عبارت زیر صدق کند:

$$\begin{split} &\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_{s} \rho_{s} \Theta_{s}) + \nabla . (\alpha_{s} \rho_{s} \nu_{s} \Theta_{s}) \right] \\ &= (-P_{s} \ddot{I} + \ddot{\tau}_{s}) : \nabla \vec{\nu}_{s} + \nabla . (k_{\theta s} \nabla \Theta_{s}) - \gamma_{s} + \phi_{gs} \end{split}$$

$$\tag{6}$$

ج- شرح روابط. روابط ساختار یافته مناسب برای تعیین فشار و ویسکوزیته جامد و نیز ضریب دراگ، در روابط اندازه حركت بسيار مهم مي باشند. در تخمين دوسیالی، استفاده از نظریه جنبشی دمای دانهای به عنوان روشی مناسب در توسعه روابط سازنده فیشار و ویسکوزیته فاز جامد از سوی بسیاری از محققین مورد استفاده قرار گرفته است. در معادله (٥)، جمله اول سمت راست ایجاد انرژی نوسانی ناشی از تنش در فاز جامد، جمله دوم نفوذ نوسانی انرژی (k_{@s} ضریب نفوذ)، γ_s انرژی پراکندگی ناشی از برخورد غیر الاسـتیکی ذرات و همچنـین φ_{gs} پراکنـدگی یـا ایجـاد انرژی دانهای بخاطر نیروهای نوسانی وارد شده توسط گاز از بین ذرات با سرعت های نوسانی می باشد. برای حل معادله فوق بعضي از محققين با صرفنظر از جملات مربوط به نفوذ و جابه جایی در معادلـه (٥) و نیز فرض این که انـرژی دانـهای در حالـت پایـدار قـرار داشته و به طور محلی پراکنده می گردد، معادله ساده ای به صورت زیر را ارائه کردند:

$$0 = (-P_{s}I + \bar{\tau}_{s}): \nabla \bar{\nu}_{s} - \gamma_{s}$$
⁽¹⁾

معادله فوق به صورت جبری قابل حل بوده و با استفاده از آن، دمای دانه ای محاسبه می گردد. این ساده سازی زمانی قابل قبول است که جزء حجمی جامدات نزدیک به محدوده پر شدن بوده و همچنین سرعت فاز جامد نسبتاً کم باشد. با استفاده از این معادله جبری، حجم محاسبات به شدت کاهش پیدا می کند. در این کار به دلیل شرایط گفته شده در فوق از معادله جبری (۲) به جای حل معادله انتقال (۵) استفاده شده است. در مطالعه حاضر از مدل دراگ -Syamlal

$$\gamma_{s} = \frac{12(1 - e_{ss}^{2})g_{0,ss}}{d_{s}\sqrt{\pi}}\rho_{s}\alpha_{s}^{2}\Theta_{s}^{\frac{3}{2}}$$
 (۱٦)

ہ انتقال انرژی سینتیکی
$$-\epsilon$$
 $v_{r,s}$ $\phi_{gs} = -3K_{gs}\Theta_s$ (۱۷)

$$p_{s} = \alpha_{s} \rho_{s} \Theta_{s} + 2\rho_{s} (1 + e_{ss}) \alpha_{s}^{2} g_{0,ss} \Theta_{s}$$
 (1A)

$$\mu_{s} = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr}$$
(14)

۸- ويسكوزيته سينتيكي

٥- ويسكوزيته برشي جامد

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

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \sin \phi}{2\sqrt{I_{2D}}}$$
(11)

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_{s} d_{s} \rho_{s} \sqrt{\Theta_{s} \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss})(3e_{ss} - 1) \alpha_{s} g_{0,ss} \right]$$
(YY)

$$\lambda_{s} = \frac{4}{3} \alpha_{s} \rho_{s} d_{s} g_{0,ss} \left(1 + e_{ss}\right) \left(\frac{\Theta_{s}}{\pi}\right)^{2}$$
(77)

$$\left\{ U_{mf}^{exp \text{ erimen}} - Re_{t} \cdot \frac{\alpha_{g}\mu_{g}}{d_{s}\rho_{g}} \right\} = 0$$
 (11)

(17)

$$\operatorname{Re}_{t} = v_{r,s} \operatorname{Re}_{ts}$$

$$v_{r,s} = \frac{A + 0.06B Re_{ts}}{1 + 0.06 Re_{ts}}$$

$$Re_{ts} = \left(\frac{\sqrt{23.04 + 2.52\sqrt{\frac{4Ar}{3}}} - 4.8}{1.26}\right)^{2}$$
$$Ar = \frac{(\rho_{s} - \rho_{s})d_{s}^{3}\rho_{g}g}{\mu_{g}}$$

$$C2 = 1.28 + \frac{\log{(C1)}}{\log{(0.85)}}$$
(17)

در مورد استفاده از مدلهای مختلف دراگ در
بستر حبابی شارانیده شده گاز – جامد، برخی از محققین
نشان دادهاند که ضرایب دراگ مختلف از جمله ضریب
دراگ Wen-Yu ،Gidaspow برای این بسترها بصورت
کیفی قابل قبول هستند [18,۱۹]. در معادلات ترکیبی که
برای کامل کردن مدل با استفاده از تئوری سینتیکی
دانهای استفاده شدهاند، شامل موارد زیر میباشند:
۱ – تنسور فشار فاز جامد
$$1 = \overline{\tau}_{s} = \alpha_{s}\mu_{s} (\nabla \overline{\nu}_{s} + \nabla \overline{\nu}_{s}^{T}) + \alpha_{s} (\lambda_{s} - \frac{2}{3}\mu_{s})\nabla \overline{\nu}_{s} \overline{I}$$

$$g_{0ss} = \left(1 - \frac{\alpha_s}{\alpha_{s \max}}\right)^{-2.5\alpha_{\max}}$$
(10)

شىبيە سازى ناپاياى بستر شارانىدە شدە حبابى ...

فشار به کار برده می شود، استفاده گردیده است.

ب- شرایط مرزی و اولیه. شرط اولیه تمام سرعتهای درون بستر (بستر در حالت سکون و ایستایی، قبل از شارانیده شدن) برابر صفر و دمای دانهای برابر با <u>m2</u> ۲۰۰۰، در نظر گرفته شده است. همچنین قسمت بالایی بستر با هوا پر شده و دیوارههای داخلی بستر به صورت سرعت غیر لغزشی برای هر دو فاز در نظر گرفته شده است. شرط مرزی birichlet در نیز شرط مرزی به صورت Noutflow در نظر گرفته شده است که از نوع Neumann می باشد. در این شرط مرزی، گرادیان تمامی کمیتهای جریان، به جز فشار در خروجی از سیستم برابر با صفر می باشد.

شبيه سازى

شبیهسازی های موجود در این مطالعه با استفاده از مدل ناپایا اولرین – اولرین و به کمک نـرم افـزار شـبیه سـاز CFD انجام گردیده است. سرعتهای مختلف ظـاهری گاز یعنی ۰/٤٦ m/s، ۰/٤٦ ا/۰ بـرای بررسـی مـوارد گوناگون، استفاده شدهاند.

کانتورهای جزء حجمی گاز، برداره ای سرعت جزء حجمی ذرات جامد، جزء حجمی گاز در سرعت برا m/s متوسط زمانی سرعت درات جامد و متوسط زمانی جزء حجمی ذرات جامد به ترتیب در اشکال (۳)، (٤)، (٦)، (٧)، (11- الف) و (11- ب) ارائیه شدهاند. نسبت انبساط بستر، متوسط زمانی جزء حجمی محلی گاز در ارتفاع ۲۸۰ از کف بستر، متوسط زمانی جزء حجمی محلی گاز در سرعتهای مختلف در همان ارتفاع، متوسط زمانی محلی ذرات جامد در ارتفاع همان ارتفاع، متوسط زمانی محلی ذرات جامد در ارتفاع فشار بستر در سرعت های مختلف به ترتیب در اشکال در معادلات فوق مقدار عددی ضریب ارتجاع برابر ۹/۰ در نظر گرفته شده است که توسط بسیاری از محققین مورد تأیید میباشد [3,18,20]. تأثیر ضریب ارتجاع بر انبساط بسترهای شارانیده شده حبابی گاز-جامد نیز از سوی محققین مورد بررسی قرارگرفته است [18,14].

مدل CFD

الف – هندسه و شرایط عملیاتی بستر. برای تایید مدل از دادههای تجربی گزارش شده در مرجع [18] استفاده شده است. بستر شارانیده شده دارای ارتفاع، عـرض و ضخامتی به ترتیب معادل ۱، ۲۸/۰ و ۲۰۳۰ میباشد. توزیع کننده گاز صفحهای است که در آن، مساحت سوراخهای ورودی گاز به سطح مقطع بستر معادل ۱/۲٪ میباشد.

ارتفاع اولیه جامد موجود در بستر m ۰/٤ متر و جزء حجمی آن در این ارتفاع، برابر ۲/۰ می باشد. قطر ذرات جامد که از نوع Geldart B هستند، بطور متوسط برابر با μm ۲۷۵ و دانسیته آنها نیز ³ ۲۰۰۰ kg/m می باشد. دانسیته و محدوده سرعت گاز ورودی به بستر به ترتیب ۱/۲۲۵ kg/m³ و ۱/۲۲۰ ار بوده است. معادلات حاکم بر سیستم با استفاده از روش

معادر ت حالم بر سیستم با استفاده از روس حجم محدود حل شدهاند. بستر شبیه سازی شده بصورت دو بعدی با ۱۱۲۰۰ سل چهار گوشه قائم الزاویه ساختار یافته به منظورگسسته سازی معادلات بقاء، ایجاد شده است. با شرایط مذکور نتایج خروجی از نرم افزار شبیه ساز CFD مستقل از اندازه مش میباشد. به دلیل ناپایدار بودن سیستم، گام زمانی ۶ میباشد. به دلیل ناپایدار بودن سیستم، گام زمانی ۶ میباشد. به دلیل ناپایدار با ٤٠ در نظر گرفته شده میباشد. این مقادیر برای رسیدن به حل همگرا با است، که این مقادیر برای رسیدن به حل همگرا با SIMPLE که توسعه یافته الگوریتم SIMPLE است، و در جریانهای چند فازی برای جفت کردن سرعت-

(٥)، (٨)، (٩)، (١٠) و (١٢) ارائه شدهاند.

بحث

در بررسی تأثیر اندازه مش بر دقت نتایج عددی (تعیین استقلال مش)، مش با اندازههای ۱ cm ، ۰/۰ و ۲/۰ به کار برده شده است. برای این منظور، توزیع متوسط غلظت ذرات جامد در طول بستر در زمان ۵ ثانیه (که ذرات رفتاری شبه- پایدار از خود نشان می دهند) تا ۲۵ ثانیه از شبیه سازی متوسط گیری می گردد. همان طور که ثانیه از شبیه سازی متوسط گیری می گردد. همان طور که طول بستر زمانی که از مش ۲۵ ۰/۰ استفاده شده است در مقایسه با استفاده از ذرات با اندازه ریزتر (۳۵ ۲۰) تفاوت چندانی ندارد و لذا با اطمینان از نتایج خروجی نرمافزار تجاری و با هدف صرفه جویی در زمان نرمافزار مش ۱۰ مراحل بعدی مورد استفاده قرار محاسبات، اندازه مش ۲۰ مراحل بعدی مورد استفاده قرار

به منظور مقیاسه تاثیر حل معادله انتقال دمای دانهای و معادله جبری دمای دانهای بر نتایج شبیه سازی، متوسط زمانی جزء حجمی ذرات جامد در طول بستر برای زمان واقعی ۲۰ ثانیه از شبیه سازی انتخاب شده است. همان طور که در شکل (۲) دیده می شود اختلاف بین این دو روش بسیار کم و نامحسوس است و این نشان می دهد که روش جبری از لحاظ کمی برای سیستم های گاز – جامد چگال قابل قبول می باشد. از طرفی با استفاده از روش جبری همگرا شدن حل معادلات بسیار راحت تر و با گام زمانی بهینه ۲۰۰۰ روش حل کامل، گام زمانی ۲۰۰۰ برای رسیدن به روش حل کامل، گام زمانی ۲۰۰۰ برای رسیدن به زمانی که خود باعث افزایش زمان اجراء برنامه می شود، حجم محاسبات روش حل معادله انتقال دمای دانهای

بسیار بالاتر است و بنابراین روش حـل معادلـه جبـری دمای دانهای مورد استفاده قرار گرفته است.

شکل (۳)، کانتور جزء حجمی گاز حاصل از نتایج شبیه سازی CFD را نشان میدهد، در آغاز شارانیده شدن، بستر منبسط گشته و سپس در یک حالت پایدار فروکش میکند. رشد و خرد شدن حبابها درون بستر، باعث میشود که سطح ذرات جامد در آن به شکل نوسانی بالا و پایین رفته و هیچ گاه به طور کامل ثابت نگردد. همچنین پدیده مربوط به رشد و ترکیدن حبابها درون بستر منجر به مخلوط شدن مناسب ذرات جامد با گاز ورودی میشود که در موضوع به خوبی توسط بردارهای سرعت جزء حجمی ذرات جامد در شکل (٤) نشان داده شده است. هنگامی از سطح فوقانی حبابها به درون بستر لغزیده و در نتیجه، جریان برگشتی ذرات، ایجاد می گردد.



شکل ۱ بررسی استقلال مش با استفاده از معادله جبری دمای

شىبيە سازى ناپاياى بستىر شارانىدە شادە حبابى ...



شکل ۲ مقایسه اثر دمای دانهای محاسبه شده به روش های حل معادله جبری و حل معادله انتقال دمای دانهای بر روی جزء حجمی ذرات جامد پیش گویی شده در طول بستر



شکل ۳ کانتور جزء حجمی گاز درون بستر در زمان های مختلف در سرعت m/s گاز ورودی



شکل ٤ بردارهای سرعت جزء حجمی ذرات جامد درون بستر



شکل ٥ انبساط بستر با افزایش سرعت گاز ورودی نسبت به حالت اولیه سیستم

افزایش سرعت ظاهری گاز ورودی، افزایش نسبت انبساط بستر هم در نتایج تجربی و هم در شبیه سازی CFD به وضوح دیده می شود که دلیل این امر را می توان در درشت شدن حبابها جستجو نمود. همچنین در شکل (۵) دیده می شود که نتایج حاصل از شبیه سازی در سرعت ۱۳/۶ بستر را بدون انبساط پیش گویی می کند که این موضوع بدون تردید به انتخاب مقادیر ثابت برای ضریب دراگ باز می گردد که فرض اولیه مدل می باشد (معادلات (۷) تا (۱۰)). شکل (۵) انبساط ذرات درون بستر با افزایش سرعت ظاهری گاز را نشان میدهد. در این مطالعه به منظور از بین بردن اثرات اولیه انبساط بستر در نتایج خروجی از نرم افزار CFD، متوسط زمانی انبساط بستر بر اساس پایداری شرایط بعد ازگذشت ٥ ثانیه از شبیه سازی، به دست آمده است. از شکل (٥) و جدول (۱) که خطای محاسباتی را نشان میدهد، می توان دریافت که نتایج حاصل از شبیهسازی از تطابق خوبی با نتایج تجربی برخوردار می باشد. همان طور که دیده می شود با

جدول ۱ خطای گزارش شده در شبیه سازی

$U_{ m g}$ سرعت ظاہری گاز	•/\ m/s	•/٣٨ m/s	۰/٤٦ m/s
خطاي انبساط بستر	١٢/٨ ٪.	٦/٤ ٪.	٤/٣ ٪.
خطای جزء حجمی محلی گاز	-	١٤ ٪.	-



شکل ٦ جزء حجمی گاز درون بستر در سرعت ۰/۱ m/s با استفاده از (a) ضرایب پیش فرض مدل دراگ Syamlal-O'Brien، (d) ضرایب

اصلاح شدہ مدل دراگ Syamlal-O'Brien

Syamlal و O'Brien یک مدل دراگ تصحیح شده که بر مبنای کمترین مقدار سرعت شارانیده شدن بوده و به طور متداول بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی موجود برای سیستمهای شارانیده شده مختلف به دست آمده بود را پیشنهاد کردند [21]. Zimmermann و آمده بود را پیشنهاد کردند [21]. Zimmermann و مریب دراگ Syamlal-O'Brien موجود در نرم افزار و شده تا بیش از ۱۰۰٪ و شرایط شارانیده شدن سریع شده تا بیش از ۱۰۰٪ و شرایط شارانیده شدن سریع برای ذرات از نوع A Geldart را گزارش کردند در حالی که نتایج تجربی انبساط بستر را ۲۰٪ و رژیم جریان را حبابی نشان میداد [22]. آنها با استفاده از مدل دراگ تصحیح یافته Syamla-O'Brien توانستند مدل دراگ تصحیح یافته Syamlal-O'Brien توانستند

در این تحقیق، برای رفع انبساط بستر در سرعت Syamlal-O'Brien از روش تصحیح مدل دراگ Svanlal-O'Arien (معادلات (۱۱)، (۱۲) و (۱۳)) استفاده گردیده و ضرایب C1 و C2 به ترتیب برابر با ۰/۳۷٦۵ و ۷/۲۹۰۲

به دست آمدهاند. با استفاده از این تصحیح که به صورت کد برای نرم افزار CFD تعریف شده است، نسبت انبساط بستر به ۱/۱۲۵ افزایش پیدا کرده است که خطای آن کمتر از ۲٪ میباشد. انبساط بستر در سرعت ظاهری گاز m/s از گاز در شکل (٦) نشان داده شده است.

آزمایشات تجربی، حبابهای کوچک نزدیک کف مخزن را نشان میدهند و زمانی که حبابها بالا رفته و به یکدیگر می پیوندند، حبابهای درشت دری را میدهند. این گونه رفتار در بسترهای حبابی گاز-جامد توسط بسیاری از محققین به صورت تجربی تایید شده است [3]، این موضوع به خوبی در نتایج شبیه سازی شکلهای (۳) و (۷) دیده می شود. رشد حبابها به خاطر اثرات دیواره و اثرات متقابل آنها بر یکدیگر می باشد. شکل (۷) که بعد از ۲۵ ثانیه از شبیه سازی به دست آمده است نشان می دهد که با افزایش سرعت ورودی گاز، انبساط بستر افزایش می یابد.



شکل ۷ توزیع حباب درون بستر در سرعت های مختلف بعد از ۲۵ ثانیه



شکل ۸ توزیع شعاعی جزء حجمی گاز در ارتفاع ۲/۰ متر بالاتر از توزیع کننده و با سرعت ظاهری گاز m/٤٦m



شکل ۹ توزیع شعاعی جزء حجمی گاز داده شده توسط CFD در ارتفاع ۲/۰ متر بالاتر از توزیع کننده، در سرعت های مختلف گاز

در بررسی متوسط زمانی جزء حجمی گاز، زمان ٥ تا ٢٥ ثانیه از شبیه سازی در نظر گرفته شده است. ١ نتایج تجربی و شبیه سازی در سرعت ظاهری ٢/٣٦m/٤ از گاز در شکل (٨) نشان داده شده است. با توجه به این شکل هر دو منحنی نسبت به مرکز متقارن بوده و در نزدیکی مرکز بستر هموارتر می شوند. با توجه به جدول (١)، خطای حاصل از CFD، ٪ ١٤ می باشد که برای سیستم پیچیده مورد مطالعه در این تحقیق قابل قبول است.

همچنین از شکل (۸) می توان فهمید نتایج تجربی و شبیه سازی جزء حجمی محلی گاز در ارتفاع ۱۰/۲ m از کف بستر، روند یکسانی را نشان میدهند. در مرکز به دلیل حرکت روبه بالای حبابها و تراکم آنها جزء حجمی گاز بیشترین مقدار را دارا می باشد. از طرف دیگر، جریان رو به پایین ذرات جامد در نزدیکی دیواره، باعث تراکم آنها در این ناحیه از بستر می شود.

دلیل نداشتن پستی و بلندی در نتایج تجربی موجود این است که نتایج بعد از ۱۰۰ ثانیه از شروع شارانیده شدن به دست آمدهاند. هر نوع ناهم خوانی با نتایج تجربی می تواند از در نظر نگرفتن توزیع کننده گاز در شبیه سازی ناشی شود. همچنین در صورتی که یک مدل دراگ بهینه برای این سیستم ها به دست آمده و ساده سازیهای موجود در روش اولرین برای در نظر گرفتن فاز جامد به صورت شبه سیال، کاهش داده شود، انطباق با نتایج تجربی بهتر خواهد شد.

بعد از اطمینان از صحت مدل موجود با استفاده از نتایج کیفی و کمی تجربی که در بخش قبل ارائه شد، برخی از پارامترهای هیدرودینامیکی، از جمله پروفایل جزء حجمی گاز، سرعت محلی ذرات و اثرات سرعت ظاهری گاز ورودی بر افت فشار توسط نرم افزار شبیه ساز CFD پیش گویی شده است.

در شکل (۹) متوسط زمانی جزء حجمی گاز در

سرعت های ۷/۳۸ m/s و ۳/۳۸ در ارتفاع ۲/۰ ۲ مراد ارتفاع ۲/۰ ا بالاتر از توزیع کننده گاز که توسط CFD پپیش گویی شده است، ارائه گردیده است. همان طور که دیده می شود در سرعت های بالاتر، جزء حجمی گاز تخت تر و همچنین از لحاظ مقدار بیشتر می باشد، چرا که با افزایش سرعت گاز ورودی، حباب ها در شت تر شده و جزء حجمی جامد در طول بستر کم تر می شود. همان طور که در این شکل دیده شده است در سرعت های بالاتر تقارن بیشتری برای جزء حجمی گاز ایجاد می گردد.

در شکل (۱۰) توزیع متوسط زمانی سرعت محوری به صورت شعاعی در ارتفاع ۲۰/۳ از توزیع کننده گاز نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود در مرکز بستر به دلیل وجود حبابهای درشت تر (جزء حجمی گاز)، سرعت حمل و انتقال ذرات جامد به طرف بالا بیشتر می باشد و طبیعتاً هر چه سرعت ظاهری گاز ورودی افزایش یابد سرعت ذرات در مرکز نیز افزایش خواهد یافت. عکس این موضوع برای جریان برگشتی ذرات در نزدیکی دیواره صادق بوده و با افزایش سرعت گاز ورودی، سطح انبساط بستر و سرعت ذرات در مرکز آن بیشتر می شود. در نتیجه این امر، سرعت فرود و یا برگشت ذرات نیز افزایش می یابد. این پدیده توسط Pain و همکاران نیز تأیید شده است [1].

برای شناخت بیشتر الگوی حرکت ذرات درون بستر، سرعت متوسط ذرات جامد در سرتاسر بستر در شکل (۱۱- ۵) نشان داده شده است. همان طور که دیده میشود سرعت ذرات در نزدیکی کف بستر با رشد حبابها به سمت بالا، افزایش مییابد و این افزایش تا ناحیه مرکزی بستر ادامه خواهد داشت. در این ناحیه همان گونه که در شکل هم دیده می شود سرعت متوسط ذرات به ۰/۵۳۵ m/s رسیده و یک ناحیه

۲٥

شىبيە سازى ناپاياى بستىر شارانيدە شىدە حبابى ...

بیضوی را پوشش میدهند، از این ناحیه به بالا مجدداً سرعت ذرات جامد افت کرده و نهایتاً به مقدار منفی (برگشت ذرات به بستر) خواهد رسید.

همچنین شکل (۱۱– b) متوسط زمانی جزء حجمی ذرات جامد درون بستر را نشان میدهد. از ایس شکل میتوان فهمید که دو ناحیه جهت توزیع غلظت ذرات جامد درون بستر وجود دارد که توسط Zhu و همکاران نیز به صورت تجربی به دست آمده است [23]، این دو ناحیه عبارتند از:

- ۱- مرکز بستر جایی کـه غلظـت ذرات بـه دلیـل عبـور حبابهای درشتتر، کم میباشد
- ۲- نزدیکی دیواره که بـه دلیـل جریـان برگـشتی ذرات جامد، تراکم آنها شدت بیشتری دارد.

شکل (۱۲) تغییرات افت فشار حاصل از شبیه سازی CFD را به عنوان تابعی از زمان به ازای سرعتهای مختلف نشان می دهد. همان طور که دیده می شود افت فشار کلی بستر مدام در حال نوسان بوده و هیچ گاه کاملاً ثابت نمی شود. نوسانات به دلیل تشکیل و شکستن حبابها رخ می دهد و لذا افت فشار نیز همان گونه که انتظار می رود مقدار ثابتی نخواهد داشت، این موضوع در شکل (۱۲) تأیید گردیده است. در این شکل با افزایش سرعت گاز ورودی، حبابها درشت تر شده و پیوستن و خرد شدن آنها افزایش می یابد. در نتیجه، دامنه نوسانات افت فشار نیز با افزایش سرعت ظاهری گاز افزایش پیدا کرده است.



شکل ۱۰ توزیع شعاعی متوسط زمانی سرعت ذرات جامد در ارتفاع ۲/۰ متر از توزیع کننده برای سرعت های مختلف گاز



شکل ۱۱ متوسط زمانی دو پارامتر (a) سرعت محوری ذرات درون بستر و (b) جزء حجمی ذرات جامد درون بستر



شکل ۱۲ نتایج افت فشار حاصل از شبیه سازی در سرعت های مختلف گاز ورودی

نتیجه گیری مطالعه حاضر نشان میدهد که معادلات ترکیبی ویسکوزیته و فــشار جامــدات در مــدلهای Syamlal-O'Brien و همکاران (Fluent (۲۰۰۲)) بـرای سیـستمهـای حبـابی نتایج مناسبی را حاصل میکنند.

در این تحقیق نشان داده شد که برای کمتر کردن زمان مورد نیاز برای محاسبات میتوان از ساده سازی معادله انتقال دمای دانهای برای بستر شارانیده شده حبابی گاز – جامد چگال استفاده کرد که نتایجی مشابه با حل کامل معادله انتقال دمای دانهای را حاصل میکند. بنابراین برای بستر شارانیده شده حبابی چگال با ذرات از نوع Geldart B، به جای حل کامل معادله انتقال دمای دانهای، میتوان از معادله جبری دمای دانهای استفاده نمود.

نتایج مدل با در نظر گرفتن چگونگی رشد و خرد شدن حبابها و توزیع اندازه آنها (نتایج کیفی) و همچنین نسبت انبساط بستر و متوسط زمانی جزء حجمی حباب به صورت محلی (نتایج کمی)، از تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار میباشد.

نتایج شبیه سازی نشان میدهـد کـه بـا افـزایش سرعت گاز ورودی، دامنه نوسانات افت فشار کل بـستر افزایش مییابد.

روند سرعت ذرات جامد درون بستر به طور محلی و همچنین الگوی کلی سرعت ذرات درون بستر بررسی گردید. نتایج نشان میدهد که توزیع غلظت ذرات جامد در مرکز و نزدیکی دیواره به ترتیب کم تراکم و پر تراکم میباشد.

از نتایج این تحقیق می توان در پدیده ساییدگی ذرات که از مسایل مهم بسترهای شارانیده شده گاز-جامد است، بهره گرفت. در صورت رهایی از محدودیتهای سخت افزاری، می توان شبیه سازی سهبعدی این سیستمها را با در نظر گرفتن توزیع کننده گاز مورد بررسی قرار داد، هرچند که اثرات توزیع کننده تحت بررسی می باشد.

علائم و نشانه عدد ارشميدس Ar C1 پیش فرض های مدل دراگ Syamlal-O'Brien، بی بعد C2 پیش فرض های مدل دراگ Syamlal-O'Brien، بی بعد ضریب دراگ، بی بعد CD قط___ ذرات، m di ضريب ارتجاع، بي بعد ess شتاب بخاطر نیروی جاذبه، m/s² g ضریب توزیع شعاعی، بی بعد $g_{0,ss}$ ارتفاع انبساط يافته بستر، m Η ارتفاع اوليه بستر (حالت ايستايي بستر)، m H_0 Ī تانسور فشار، بي بعد دومين ثابت انحرافي تانسور فشار، بي بعد I_{2D} ضریب نفوذ انرژی دانهای، (kg/(s.m $k_{\Theta s}$ ضریب تبادل مومنتوم گاز/جامد، (kg/m³s) Kgs Р فشار ، Pa مختصات شعاعی، m r Re عدد رينولدز، بي بعد Re_t عدد رينولدز حدى، بي بعد عدد رینولدز تحت شرایط حد ته نشینی Rets برای یک ذرہ جامد، بی بعد t زمان، s سرعت ظاہری گاز، m/s U سرعت جزء m/s ، i \mathbf{v}_i رابطه سرعت حد، m/s V_{r.s} سرعت نوسانی ذرات، m/s vs متوسط کلی سرعت نوسانی ذرات، m/s $< v'_{s} >$ جهت ارتفاع اندازه گیری شده از توزیع کننده Z

حروف یونانی α_i جزء حجمی α_{s,max} محدودہ پر شدن

سیا، حسین حسینی- رهبر رحیمی- مرتضی زیوردار- عبادالرضا صمیمی

fr ترم مربوط به اصطکاک بین ذرات گاز g i انديس عمومي ترم مربوط به جنبش ذرات kin ρ_i كمترين مقدار شارانيده شدن mf τi زير نويس عمومي مربوط به فاز ها ¢ q s جامد تانسور فشار Т حد ، مثال V_t یعنی سرعت حد t col

 γ_{s} انرژی پراکندگی ناشی از برخورد Θ_{s} m^{2}/s^{2} دمای دانهای، λ_{i} λ_{i} $kg/(s \cdot m)$ ، حامد، (kg/m3 ، ویسکوزیته توده ذرات جامد، (kg/m3 ρ_{i} kg/m3 ، درات جامد، (m^{2}/s^{2} τ_{i} Pa ، السیته Pa ، المار و فشار، ϕ ϕ_{gs} $kg/(s^{3} \cdot m)$ ، درجه نرخ انتقال انرژی جنبشی، ($kg/(s^{3} \cdot m)$ ، نرخ انتقال انرژی جنبشی ($kg/(s^{3} \cdot m)$)

فهرست زیر نویس ها ترم مربوط به برخورد

مراجع

- Grace, J. R., and Taghipour, F., "Verification and validation of CFD models and dynamic similarity for fluidized beds", Powder Technol., 139, pp. 99–110, (2004).
- Gidaspow, D., "Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions", Academic Press, San Diego, (1994).
- van Wachem, B. G. M., Schouten, J. C., Krishna, R., van den Bleek, C. M., and Sinclair, J. L., "Comparative analysis of CFD models of dense gas-solid systems", *AIChE J.*, 47, pp. 1035–1051, (2001).
- 4. FLUENT Inc. FLUENT 6.0 User's Guide; FLUENT Inc, (2002).
- Jenkins, J. T., and Savage, S. B., "A theory for the rapid flow of identical, smooth, nearly elastic, spherical particles", *Fluid Mech. J.*, 30, pp. 187–202, (1983).
- Lun, C. K. K., Savage, S. B., Jeffrey, D. J., and Chepurniy, N., "Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field", *Fluid Mech. J.*, 140, pp. 223–256, (1984).
- Ding, J., and Gidaspow, D., "A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow", *AIChE J.*, 36, pp. 523–538, (1990).
- Kim, H. S., and Arastoopour, H., "Simulation of FCC particles flow behavior in a CFB using modified kinetic theory", *Can. J. Chem. Eng.*, 73, pp. 603–611, (1995).
- Ding, J. M., and Lyczkowski, R. W., "Three-dimensional kinetic-theory modeling of hydrodynamics and erosion in fluidized-beds", Powder Technol., 73, pp. 127–138, (1992).

شىبيە سازى ناپاياى بستر شارانىدە شدە حبابى ...

- van Wachem, B. G. M., Schouten, J. C., Krishna, R., and van den Bleek, C. M., "Eulerian simulations of bubbling behavior in gas-solid fluidized beds", Comput. Chem. Eng., 22, pp. 299–306, (1998).
- Enwald, H., and Almstedt, A. E., "Fluid dynamics of a pressurized fluidized bed: comparison between numerical solutions from two-fluid models and experimental results", Chem. Eng. Sci., 54, pp. 329– 342, (1999).
- 12. Pain, C. C., Mansoorzadeh, S., and de Oliveira, C. R. E., "A study of bubbling and slugging fluidized beds using the two-fluid granular temperature model", *Int. J. Multiph. Flow*, 27, pp. 527–551, (2001).
- Hosseini, S. H., Rahimi, R., Zivdar, M., and Samimi, A., "CFD simulation of gas-solid bubbling fluidized bed containing FCC particles", *Korean J. Chem. Eng.*, 26(5), pp. 1405–1413, (2009).
- Hosseini, S. H., Zivdar, M., and Rahimi, R., "CFD simulation of gas-solid flow in a spouted bed with a non-porous draft tube", Chem. Eng. Process., 48, pp. 1539–1548, (2009).
- 15. Utikar, R. P., and Ranade, V. V., "Single jet fluidized beds: Experiments and CFD simulations with glass and polypropylene particles", Chem. Eng. Sci., 62, pp. 167–183, (2007).
- Ahuja, G. N., and Patwardhan, A. W., "CFD and experimental studies of solids hold-up distribution and circulation patterns in gas-solid fluidized beds", *Chem. Eng. J.*, 143, pp. 147–160, (2008).
- 17. Syamlal, M., Rogers, W., and O'Brien, T. J., "MFIX Documentation: Theory Guide"; National Technical Information Service Springfield, VA, (1993)
- Taghipour, F., Ellis, N., and Wong, C., "Experimental and computational study of gas-solid fluidized bed hydrodynamics", Chem. Eng. Sci., 60, pp. 6857–6867, (2005).
- ۱۹. نصر اصفهانی؛ محسن، رحیمی؛ رهبر و حسینی؛ سید حسین، "بررسی هیدرودینامیک بستر سیال با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی CFD "، یازدهمین کنگره ملی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۸۵).
- Cammarata, L., Lettieri, P., Micale, G. D. M., and Colman, D., "2D and 3D CFD simulations of bubbling fluidized beds using Eulerian-Eulerian models", *Int. J. Chem. Reactor Eng.*, 1, Article A48, (2003).
- Syamlal, M., and O'Brien, T. J., Office of fossil energy, national energy technology laboratory, Morgantown, WV, April, (1987).
- 22. Zimmermann, S., and Taghipour, F., "CFD modeling of the hydrodynamics and reaction kinetics of FCC fluidized-bed reactors", Ind. Eng. Chem. Res., 44, pp. 9818–9827, (2005).
- 23. Zhu, H., Zhu, J., Li, G., and Li, F., "Detailed measurements of flow structure inside a dense gassolids fluidized bed", Powder Technol., 180, pp. 339-349, (2008).