



مطاعه عددی اثر نیروهای بین ذرات زیست توده با ابعاد بزرگ بر نحوه اختلاط پیش از احتراق

مهسا بقایی فر^۱، مرتضی خیاط^{۲*}، محمد حسن نوبختی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۷۷۵-۱۴۵۱۵، mkhayat@srbiau.ac.ir

چکیده

بهترین تکنولوژی برای تبدیل انرژی ذرات زیست توده به حرارت، استفاده از بستر شناوری است. در این مقاله نحوه اختلاط هسته‌های زیتون بعنوان زیست توده، پیش از احتراق بصورت عددی بررسی شده است. شبیه‌سازی عددی گازدهی زیست‌توده در بستر شناوری با استفاده از یک رویکرد ترکیبی انجام شده است، به‌نحوی که معادلات حاکم بر فاز گاز در چارچوب اویلری حل گردیده و ذرات جامد بر اساس روش ذرات درون سلولی چند فاز^۱ به روش ترکیبی اویلری-لاگرانژی با رویکرد بسته تصادفی مدل‌سازی شده‌اند و تأثیر عوامل عملیاتی مانند سرعت ورودی گاز به بستر، نسبت دانسیته ذرات داخل بستر و اندازه ذرات داخل بستر، بر کیفیت اختلاط، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که کیفیت اختلاط با افزایش سرعت ورودی به میزان هشت برابر کمترین سرعت شناوری، به عدد ۰/۹۷ و برای سرعت چهار برابر کمترین سرعت شناوری، به عدد ۰/۸۵ می‌رسد. با افزایش نسبت دانسیته ذرات زیست توده به ذرات ثابت بستر از ۰/۲ به ۰/۶۵، کیفیت اختلاط از عدد ۰/۸۶ به عدد ۰/۹۶ افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش اندازه قطر ذرات زیست توده و ذرات بستر به ترتیب از ۱۱ میلی‌متر به ۸ میلی‌متر و ۰/۹ میلی‌متر به ۰/۶ میلی‌متر، کیفیت اختلاط از عدد ۰/۸ به عدد ۰/۹۵ افزایش می‌یابد. در نهایت سرعت گاز در بستر در زمان اختلاط کامل به عدد حدود ۲ متر بر ثانیه می‌رسد که سرعت مناسبی برای شناوری و اختلاط می‌باشد. با مقایسه نتایج با پژوهش‌های تقریباً مشابه انجام شده توسط سایر محققین، تطابق خوبی بین روند آن‌ها مشاهده شده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۷ بهمن ۱۳۹۹

پذیرش: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۰

ارائه در سایت: ۲۰ خرداد ۱۴۰۰

کلیدواژگان

اختلاط

زیست توده

بستر شناوری حبابی

ذرات گروه گلدارت D

Numerical study of the effect of inter-particle forces of large biomass on mixing before combustion

Mahsa baghaeifar¹, Morteza Khayat^{2*}, Mohammad Hasan Nobakhti³

1,2,3- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14515-775 Tehran, Iran, mkhayat@srbiau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 19 August 2021

Accepted 15 February 2021

Available Online 10 June 2021

ABSTRACT

The The best technology to convert the energy of biomass particles into heat is to use a fluidized bed. In this paper, the olive kernels mixing method as large biomass before combustion is numerically investigated. Numerical simulation of biomass gasification in a fluidized bed has been performed

¹ Multi Phase Particle-In-Cell (MP-PIC)

Please cite this article using:

Mahsa baghaeifar, Morteza Khayat, Mohammad Hasan Nobakhti, Numerical study of the effect of inter-particle forces of large biomass on mixing before combustion, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 12, No. 1, pp. 13-25, 2021 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Keywords

Mixing
Biomass
Fluidized bed
Geldart group D particles

using a hybrid approach, in which the governing equations of the gas phase are solved in Eulerian framework and solid particles are modeled based on Multi Phase Particle-In-Cell (MP-PIC) using mixed Eulerian-Langerian method with closed-loop stochastic approach and the effect of operating factors such as gas velocity inlet to fluidized bed, particle density ratio and particle size in fluidized bed on mixing quality have been investigated. The results show that the mixing quality reaches 0.97 by increasing the inlet velocity to eight times faster than the minimum fluidization velocity and 0.85 for the four times faster than the minimum fluidization velocity. Also by increasing the density ratio of biomass particles to fixed bed particles from 0.2 to 0.65, the mixing quality increases from 0.86 to 0.96. Furthermore, by reducing the diameter of biomass particles and fixed bed particles from 11 mm to 8 mm and 0.9 mm to 0.6 mm, respectively, the mixing quality increases from 0.8 to 0.95. Finally, the gas velocity in the bed at the time of complete mixing, reaches about 2 m/s, which is a good velocity for fluidization and mixing. By comparing the results with almost similar studies conducted by other researchers, a good agreement between them has been observed.

۱- مقدمه

تلاش می‌شود شرایط بهتری برای اختلاط در بستر شناوری برقرار شود و جدایی کاهش یابد [۱-۳].

علی‌رغم پیشرفت‌هایی که در زمینه روش‌های آزمایشگاهی صورت گرفته است اما هنوز اطلاعات کافی در زمینه دینامیک جریان سیال و نیروهای وارد بر ذرات جامد موجود نیست لذا در دو دهه گذشته محققان سعی کرده اند از طریق کارهای عددی، نتایج تحقیقات تجربی را نقد و تحلیل کنند. گرا و همکاران [۴] یک شبیه‌سازی دو بعدی از بستر شناوری با استفاده از روش اوپلری- اوپلری، شامل ذرات با دانسیته یکسان و اندازه متفاوت ارائه نمودند. نتایج آنها مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشت. فن و فاکس [۵] از روش اوپلری- اوپلری، برای مدل کردن دوبعدی پدیده جدایش ذرات نامشابه در بستر شناوری استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد، ذرات بزرگتر در لایه‌های پایینی بستر جمع می‌شوند و با افزایش سرعت شناوری نسبت به کمترین سرعت شناوری، کیفیت اختلاط بهتر می‌شود. گائو و همکاران [۶] مطالعات تجربی گسترده‌ای، به‌همراه شبیه‌سازی عددی سه بعدی اوپلری- اوپلری، برای بستر شناوری با دو نوع ذره با اندازه مختلف و دانسیته برابر، انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که جدایی با افزایش سرعت شناوری و کاهش نسبت جرمی ذرات کوچک، افزایش می‌یابد. فنج و یو [۷] از یک مدل اوپلری- لاگرانژی، برای بررسی پدیده اختلاط و جدایش در بستر شناوری، شامل ذراتی با دانسیته یکسان ولی اندازه متفاوت استفاده کردند. آنها پدیده اختلاط و جدایی را از طریق اطلاعاتی که در مورد نیروهای برخورد ذرات و نیروهای بین ذرات و سیال وجود دارد، تحلیل کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان

احساس خطر بشر از تمام شدن منابع انرژی سوخت‌های فسیلی با این که مهم‌ترین دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرم‌تر شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی می‌باشند، باعث شده تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر که یکی از آنها زیست توده می‌باشد، بیشتر شود. سالانه نزدیک به هشت هزار تن هسته زیتون با ارزش حرارتی بالا، در شهر رودبار دفن می‌شود. احتراق یا سوختن، مرسوم‌ترین روش برای بدست آوردن انرژی از ذرات زیست توده است. متداول‌ترین نوع سیستم‌های احتراقی که در نیروگاه‌های زیست توده استفاده می‌شوند، احتراق بستر ثابت^۱، کوره‌های تعلیق^۲ و احتراق بستر شناوری^۳ هستند که از این میان، بستر شناوری بهترین تکنولوژی برای آزاد کردن انرژی ذرات زیست توده می‌باشد. در بسترهای شناوری، ذرات سوخت زیست توده توسط جریان پر فشار گاز در محفظه بستر، شناور شده و سطح تماس آنها با اکسیژن بیشتر می‌شود که باعث نرخ انتقال حرارت یکنواخت و بالا و توزیع دمایی یکنواخت پس از احتراق می‌گردند. یکی از مهم‌ترین مفاهیم هیدرودینامیک بستر شناوری که بر عملکرد فرایندهای مختلف احتراقی موثر است، پدیده اختلاط و جدایی ذرات جامد و اجزا گازی موجود در فرایند احتراق بستر شناوری می‌باشد. با افزایش سرعت جریان گاز ورودی به بستر نسبت به شرایط کمترین سرعت شناوری

¹ Fixed bed

² Suspension Burners

³ Fluidized bed

۲ میلی‌متر با نرم‌افزار باراکودا^۵ و با استفاده از روش MP-PIC پرداختند. یانگا و همکاران [۱۷] به شبیه‌سازی سه بعدی بستر شناوری گازی‌سازی زیست‌توده با حلگر CCHF نرم افزار این فوم و با کمک روش MP-PIC پرداختند. بیشترین قطر ذرات زیست توده مورد بررسی آن‌ها ۱/۸ میلی‌متر بود. ژو و همکاران [۱۸] مطالعه عددی روی گازی‌سازی زیست‌توده در بستر شناوری حبایی با نرم‌افزار این فوم و با روش MP-PIC انجام دادند و تأثیر توزیع گسترده اندازه ذرات بر عملکرد گازسنجی زیست‌توده را بررسی کردند. ذرات زیست‌توده مورد بررسی آن‌ها دارای ابعاد بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ میکرومتر بود، که ذرات بسیار کوچکی بودند. در مطالعه احتراق و اختلاط زیست‌توده در تمام تحقیقات انجام شده پیشین، هیچگونه بررسی روی تأثیر انواع نیروهای بین ذرات زیست توده برای بزرگترین سایز ذرات گروه D گلدات (مثل هسته زیتون) انجام نشده است به‌طوری‌که اطلاعاتی در خصوص تأثیر انواع نیروها بر فرآیند اختلاط و پس از آن احتراق زیست‌توده که خود وابسته به متغیرهایی نظیر دما و فشار بستر، سرعت شناوری، دانسیته سیال و دانسیته ذرات می‌باشد، موجود نیست. معدود تحقیقات انجام شده در این رابطه برای ذرات گروهایی از گلدات بوده که دارای ابعاد بسیار کوچک بوده‌اند. مطالعه نیروی ذرات به یکدیگر و همچنین نیروی بین ذرات و گاز که تحت پیدایش جدایی رخ می‌دهد، کمک بسیار زیادی به فهم و درک مکانیزم حاکم بر اختلاط و جدایی می‌کند. در تحقیق حاضر این نیروها برای ذرات با ابعاد بزرگ (هسته زیتون) به صورت عددی سه بعدی مدل‌سازی و تأثیر آن‌ها بر اختلاط پیش از احتراق توسط نرم افزار این فوم بررسی شده است. از آنجا که در بسترهای غلیظ که تعداد برخوردهای بین ذرات زیاد و غیرقابل صرف‌نظر است، نتایج حاصل از خروجی‌های نرم‌افزار بدلیل عدم در نظر گرفتن نیروی بین ذرات در حلگر، قابل استناد نخواهد بود، لذا برای رفع این مشکل و بهینه‌کردن نتایج نرم‌افزار، در این تحقیق نیروی بین ذرات به کمک روش MP-PIC و ایجاد یک حلگر جدید با قابلیت اعمال نیروی بین ذرات به حلگر اولیه لاگرانژی موجود، به نرم‌افزار این فوم اضافه شد. در واقع شبیه‌سازی عددی گازدهی زیست‌توده در بستر شناوری با استفاده از یک رویکرد ترکیبی انجام شد، به‌نحوی که معادلات حاکم بر فاز گاز در یک چارچوب اویلری و ذرات جامد بر اساس روش MP-PIC طبق روش ترکیبی اویلری-لاگرانژی با رویکرد بسته تصادفی مدل‌سازی شدند تا در بسترهای شناوری

داد که افزایش درصد جرمی ذرات کوچک، باعث کاهش سرعت شناوری برای رسیدن به اختلاط با کیفیت بالا می‌شود. سینگ و همکاران [۸] بررسی کاملی از نحوه مدل‌سازی عددی برای مطالعه احتراق و گازی‌سازی در بستر شناوری انجام دادند. آن‌ها معادلات ریاضی حاکم بر جریان، انتقال حرارت و جرم سیال و واکنش‌های شیمیایی احتراق در بستر شناوری و سیستم گازی-سازی سیال را شرح دادند و مدل‌های اصلی و موثر عددی را معرفی نمودند. میائو و همکاران [۹] با بررسی تفصیلی مدل‌های موجود، به یک مدل ریاضی جدید برای مطالعه گازی‌سازی زیست‌توده در بستر شناوری دوار دست یافتند. کریم و ناصر [۱۰] از یک مدل عددی سه بعدی کامل برای تحلیل گذرای احتراق بستر شناوری استفاده کردند. آن‌ها بیان کردند مدل‌سازی عددی سیستم احتراق در مقایسه با تحلیل تجربی، دارای مزایایی است. کاردوسو و همکاران [۱۱] شبیه‌سازی دو بعدی و سه بعدی را در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از روش اویلری- اویلری چند فازی برای پیش‌بینی فرآیند گازی‌سازی در بستر شناوری حبایی انجام و نتایج آن‌ها با آزمایشات تجربی گازی‌سازی و منحنی‌های شناوری موجود تطابق خوبی داشت. یانگ و همکاران [۱۲] هیدرودینامیک ذرات گلدات A [۱۳]، را در بسترهای شناوری جامد-گاز، با و بدون صفحات سوراخ‌دار با استفاده از روش MP-PIC بصورت عددی شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل درگ MSB بهترین عملکرد را دارد و تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی داشت.

اکایشی و همکاران [۱۴] به شبیه‌سازی عددی گازی‌سازی زیست‌توده در بستر شناوری حبایی با حلگر DPM^۲ و استفاده از روش MP-PIC به منظور بررسی بهترین شکل صفحه سوراخ‌دار کف بستر برای داشتن بهترین عملکرد گازی‌سازی پرداختند و مشاهدات آن‌ها نشان داد صفحه مثلثی بهترین عملکرد را دارد. کادیرو و همکاران [۱۵] به بررسی و شبیه‌سازی سه مدل نیروی درگ در بستر شناوری حبایی با نرم‌افزار این فوم^۳، با حلگر DPM و استفاده از روش MP-PIC پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد مدل درگ EMMS/DP^۴ با داده آزمایشی موجود توافق خوبی داشت. کونگ و همکاران [۱۶] به شبیه‌سازی عددی بستر شناوری دوگانه ذرات زیست توده از جنس پوسته برنج با دانسیته ۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و توزیع اندازه ذرات ۰/۸ تا

¹ Modified Structure-Based

² Discrete Phase Model

³ OpenFOAM

⁴ Energy Minimization Multi-scale/ Discrete Particle

⁵ Barracuda

⁶ Coal Chemistry Foam

برابر فشار اتمسفر، دمای اولیه تمامی ذرات زیست توده برابر ۲۷ درجه سلسیوس و دمای اولیه ذرات ثابت بستر با پیش گرمایش معادل ۸۵۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.

معادلات پیوستگی و ممنتوم فاز گازی برای جریان گاز در بستر شناوری به ترتیب طبق روابط (۱) و (۲) می‌باشند.

$$\frac{\partial(\theta_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_g \rho_g u_g) = \delta \dot{m}_s \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\theta_g \rho_g u_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_g \rho_g u_g u_g) \\ = -\theta_g \nabla P + F + \theta_g g \\ + \nabla \cdot (\theta_g \tau_g) \end{aligned} \quad (2)$$

که در رابطه (۲)، τ_g از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\tau_{g,ij} = \mu_g \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_g \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (3)$$

معادله انرژی فاز گازی مطابق رابطه (۴) می‌باشد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\theta_g \rho_g h_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\theta_g \rho_g u_g h_g) \\ = \nabla \cdot (\lambda_g \theta_g \nabla T_g) \\ + \theta_g \left(\frac{\partial P}{\partial t} + u_g \cdot \nabla p \right) + \phi + \dot{q}_D \\ + \dot{Q} + S_h + S_{h,p} \end{aligned} \quad (4)$$

حرکت ذرات جامد از طریق روش MP-PIC مورد بررسی قرار گرفته است. این رویکرد برای کاهش تعداد کل ذرات محاسباتی از مفهوم بسته استفاده می‌کند زیرا یک بسته می‌تواند چندین ذره واقعی دارای خصوصیات یکسان مانند اندازه، سرعت، موقعیت، دما و ترکیب را نشان دهد [۱۹]. در این روش، پویایی ذرات با حل معادله انتقال از شیوه توابع توزیع ذرات، f مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود، که موقعیت مکانی α_s سرعت ذرات u_s جرم ذرات m_s و زمان t توزیع ذرات را می‌توان با حل این معادله حاکم به روز کرد [۲۰]. بر اساس این معادله، معادلات توده ذرات زنجیره‌ای و حرکت در شبکه اویلری را می‌توان بدست آورد. پس از اینکه معادلات شبکه حل شدند، سرعت گاز موضعی، گرادیان فشار گاز و گرادیان تنش جامد به قسمت‌های ذرات برگردانده شده و سرعت ذرات را می‌توان به راحتی به روز کرد.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial(f u_s)}{\partial x} + \frac{\partial(f A)}{\partial u_s} = \frac{f_D - f}{T_D} \quad (5)$$

شتاب ذرات براساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

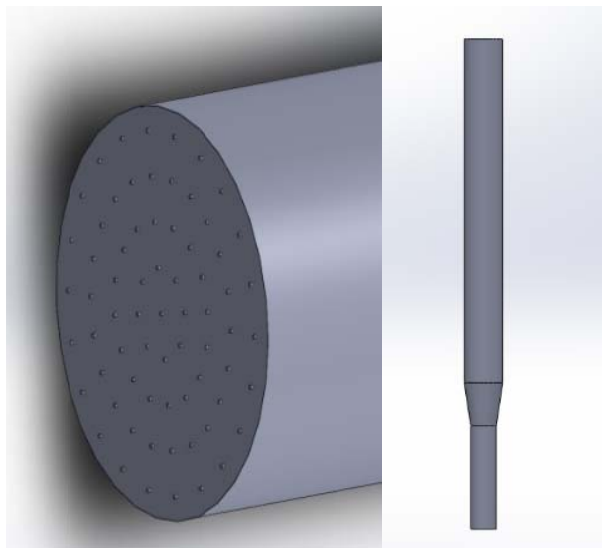
$$A = \frac{du_s}{dt} = D_s(u_g - u_s) - \frac{\nabla p}{\rho_s} - \frac{\nabla \tau_s}{\theta_s \rho_s} + g + F_s \quad (6)$$

غلیظ هم نتایج به واقعیت نزدیک‌تر شوند. همچنین اثر تعدادی از عوامل عملیاتی نظیر سرعت جریان ورودی به بستر، نسبت دانسیته ذرات در بستر و اندازه ذرات موجود در بستر، بر کیفیت اختلاط بررسی شدند.

۲- مدلسازی اختلاط زیست توده

۲-۱- معرفی دامنه حل

هندسه مساله یک استوانه با یک تبدیل در طول آن است. طول قسمت پایین استوانه ۱/۲ متر با قطر ۳۰۰ میلی‌متر، طول قسمت میانی (بخش تبدیل) ۰/۵ متر و طول و قطر بخش بالایی مدل به ترتیب ۳/۵ متر و ۴۵۰ میلی‌متر می‌باشند. در شکل ۱ نمایی از هندسه مساله به همراه طرح صفحه سوراخ دار کف بستر متشکل از ۸۸ سوراخ هر کدام به قطر ۳ میلی‌متر، نشان داده شده است. با وجود تبدیلی که بین بستر شناوری و سطح آزاد بستر قرار دارد، قطر بستر به صورت تدریجی افزایش می‌یابد تا از این طریق سرعت افزایش یافته جریان در بستر در اثر احتراق، کاهش یافته تا گازهای فرار احتراق نیافته در بستر با سرعت کم در سطح آزاد به سمت دودکش حرکت کنند و فرصت احتراق در سطح آزاد بستر را داشته باشند. از این طریق همه انرژی قبل از خروج مواد احتراق نیافته از بستر آزاد شده و بازده به حداکثر مقدار ممکن افزایش می‌یابد.



شکل ۱ نمایی از هندسه بستر شناوری حیایی به همراه طرح سوراخ دار کف بستر

۲-۲- فرضیات و معادلات حاکم

در این شبیه سازی عددی سه بعدی، رژیم جریان آشفته، غیردائم و تراکم‌پذیر فرض شده است. فشار اولیه یکنواخت و

۲-۳- شرایط مرزی و روش حل عددی

حلگر ابتدایی مورد استفاده با توجه به شرایط مساله، حلگر CCHF است که یک حلگر لاگرانژی است. علت استفاده از این حلگر علاوه بر مناسب بودن برای رژیم جریان آشفته، غیر دائم و تراکم‌پذیر، بزرگ بودن اندازه ذرات زیست توده در تحقیق حاضر و همچنین نیاز به بررسی اثر نیروهای بین ذرات است. این حلگر پس از اعمال تغییراتی در کد آن، به حلگر جدیدی به نام CCCHF^۴ ذخیره گردید به نحوی که بتواند نیروی بین ذرات را اعمال نماید. بنابراین در روش اوپلری- لاگرانژی بکار رفته در این تحقیق، فاز گاز به عنوان یک فاز پیوسته و فاز جامد به عنوان یک فاز گسسته عمل می‌کند. معادلات اوپلری فاز گازی با استفاده از روش حجم محدود^۵ حل شده و ذرات جامد براساس روش بسته تصادفی لاگرانژی ردیابی شده‌اند. همچنین در شبیه‌سازی جریان جامد-گاز معمولاً از روش اتصال چهار طرفه که هم تعامل بین گاز و ذرات و هم برخورد بین ذرات را در نظر می‌گیرد، استفاده شده است.

حلگر اولیه شامل سه زیر پوشه با نام‌های صفر، سیستم و ثوابت می‌باشد. در زیر پوشه صفر مقادیر اولیه و مرزی قرار دارند که برای مساله حاضر در شروع احتراق در محفظه احتراق فقط هوا وجود دارد و از آنجایی که در ابتدا در ورودی محفظه احتراق هیچ گونه سوخت CH₄ به صورت گازی وجود ندارد، مقدار آن در شروع حل صفر در نظر گرفته شده است. شرط مرزی ورودی از نوع نیومن برای سرعت است. اما برای خروجی چون سرعت مشخص نیست و از طرفی جریان خروجی به محیط اتمسفر تخلیه می‌شود، شرط دیریکله حاکم است.

دمای ورودی هوا ۳۰۰ کلوین، دمای میانگین کوره با توجه به پژوهش‌های قبلی انجام شده، برابر ۸۵۰ درجه سلسیوس و نرخ ورود ذرات زیست توده به بستر ۱۰ گرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در حلگر جدید CCCHF تغییراتی در پوشه‌ی صفر مساله ایجاد نگردید.

در پوشه ثوابت هندسه مساله و خواص فیزیکی قرار می‌گیرند. دانسیته و قطر ذرات زیست توده (هسته زیتون) و ذرات ثابت بستر به کار برده شده در مدل‌سازی (آلومینا) مطابق جدول ۱ می‌باشند.

ساختار شیمیایی ماده ثابت بستر باید به شکلی باشد که با مواد قبل از احتراق، مثل سوخت‌های زیست توده و هوا و نیز مواد بعد از احتراق، نظیر مواد تشکیل‌دهنده خاکستر و گازهای احتراقی،

برای محاسبه نیروی ضریب انتقال حرکت بین فازها D_s از ترکیب معادلات ارگان^۱، ون^۲ و یو^۳ مطابق رابطه (۷) استفاده می‌شود و معادله ارگان زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که θ_s بزرگتر از ۰/۲ شود [۲۱].

$$D_s = \begin{cases} \frac{3}{4} C_d \frac{\theta_s \rho_g}{d_p} |u_g - u_s| \theta_g^{-2.65} & \theta_g \geq 0.8 \\ 150 \frac{\theta_s^2 \mu_g}{\theta_g^2 d_p^2} + 1.75 \frac{\theta_s \rho_g}{\theta_g d_p} |u_g - u_s| & \theta_g < 0.8 \end{cases} \quad (7)$$

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & Re_p < 1000 \\ 0.44 & Re_p \geq 1000 \end{cases}$$

$$Re_p = \theta_g \rho_g d_p |u_g - u_s| / \mu_g$$

کسر حجم ذره از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$\theta_s = 1 - \theta_g = \iint f \frac{m_s}{\rho_g} d m_s d u_s \quad (8)$$

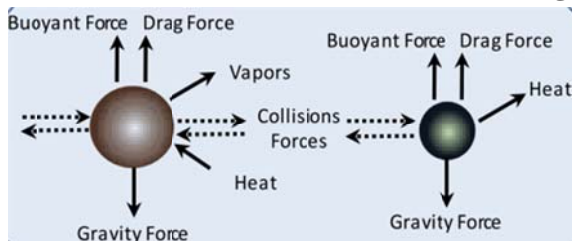
تنش (فشار) نرمال ذره مطابق رابطه (۹) بدست می‌آید.

$$\tau_s = \frac{P_s \theta_s^\beta}{\max[\theta_{cp-\theta_s}, \gamma(1 - \theta_s)]} \delta \quad (9)$$

نرخ انتقال حرکت بین فاز، از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$F = \iint f m_s \left[D_s (u_g - u_s) - \frac{\nabla p}{\rho_s} \right] d m_s d u_s \quad (10)$$

شکل ۲ نیروهای وارد بر ذرات در بستر شناوری را نشان می‌دهد.



شکل ۲ نیروهای موثر بر ذرات در بستر شناوری [۲۲]

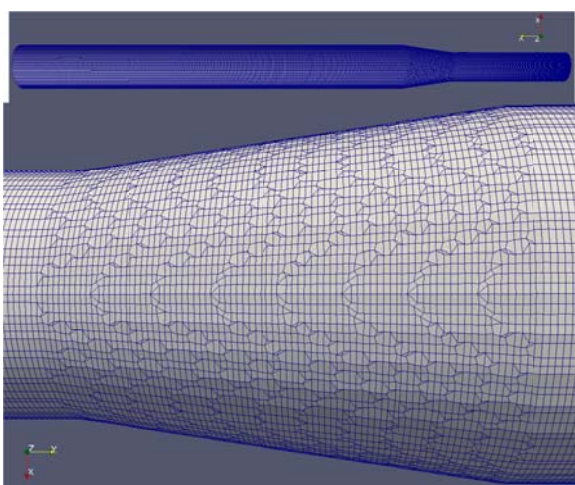
¹ Ergun
² Wen
³ Yu

⁴ Coal Colliding Chemistry Foam
⁵ Finite Volume Method

از آنجایی که کد نوشته شده برای حلگر جدید بسیار سنگین بود و حجم اطلاعات خروجی بسیار بالایی نیاز داشت، یک سرور ابررایانه ۱۲ هسته‌ای از نوع SSD و حجم دیسک ۲۰۰ گیگابایت تهیه و حل مساله با آن انجام گرفت. تعداد هسته‌های سیستم استفاده شده در پوشه سیستم حلگر جدید اضافه شد.

۲-۴- بررسی عدم وابستگی به شبکه

نمایی از شبکه‌بندی هندسه مساله با استفاده از مش‌های هگزاهدرون در شکل ۳ نشان داده شده است. قسمت میانی همانطور که مشاهده می‌شود دارای مش سازمان‌نیافته است.



شکل ۳ نمایی از شبکه بندی هندسه مساله

پارامترهای اصلی در تحقیق حاضر سرعت، دما و فشار می‌باشند که برای بررسی استقلال از شبکه به ازای تغییر در تعداد المان‌های شبکه، مقدار سرعت در سه نقطه مختلف از بستر در ارتفاع‌های مختلف ۰/۵ متر، ۰/۱ متر و ۰/۵ متر از ورودی مدل در ثانیه پنجم اختلاط کامل مطابق شکل ۴ گزارش شده است. مطابق این شکل تغییرات بسیار کم و نامحسوس در سرعت برای نقاط مختلف، به‌عنوان یکی از خروجی‌های مهم این مساله، مبین مستقل از شبکه بودن مطالعه حاضر است و شبکه‌بندی شماره ۲ با تعداد ۲۰۰۹۲۶ المان بعنوان شبکه حل انتخاب گردید. به این ترتیب در وقت و هزینه صرفه‌جویی صورت گرفت و بهترین شبکه‌بندی نیز لحاظ شد.

واکنش ندهد و صرفاً به دلیل مشخصات فیزیکی مثل اندازه، دانسیته و ظرفیت گرمایی ویژه سبب بالا رفتن کیفیت اختلاط، انتقال حرارت و بازده احتراق گردد. در تحقیق حاضر ذرات آلومینا به‌عنوان ذرات ثابت بستر انتخاب شدند چرا که با فلزات قلیایی حتی در دماهای بالا، به سختی واکنش می‌دهد. در نهایت میانگینی از دانسیته ظاهری و واقعی آلومینا معادل ۲۷۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شد.

جدول ۱ دانسیته ذرات زیست توده (هسته زیتون) و ذرات ثابت بستر (آلومینا)

| نام ماده | قطر ماده (با فرض کروی) | دانسیته واقعی | دانسیته ظاهری |
|---------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| | mm | kg/m ³ | kg/m ³ |
| هسته زیتون | ۸ | ۱۰۷۶ | --- |
| آلومینای سفید | ۰/۹ | ۳۹۰۰ | ۱۶۵۰ |

پوشه سیستم شامل فایل‌های مختلفی است که به تنظیمات زمان شروع، زمان پایان، گام زمانی حل، گام تکرار، نحوه گسسته‌سازی عملگرهای دیفرانسیلی، مقادیر باقیمانده‌ها، تعداد تکرارهای حل، میزان خطا، نحوه حل دستگاه معادلات خطی، تنظیمات مربوط به حل موازی در نرم‌افزار اپن‌فوم، تنظیمات ابعاد شبکه و هندسه مساله، مختصات راس‌ها و بلوک‌ها و صفحات مرزی مرتبط می‌شود. در حلگر جدید CCCHF برای اعمال نیروی بین ذرات، دو کلاذ^۲ جدید تعریف شد که ویژگی‌های حلگر

MP-PIC را با خود به‌همراه دارند چراکه حلگر اولیه بر اساس جریان‌های رقیق از فعل و انفعالات بین ذرات جامد چشم پوشی می‌کند. نهایتاً اینکه کلاذ سینماتیک^۳ برای حرکت ذرات، کلاذ دمایی^۴ برای انتقال گرما، کلاذ واکنشی^۵ برای تبخیر مایع و تغییر فاز و کلاذ واکنشی چند فازی^۶ برای واکنش سطح ذرات جامد در حلگر جدید بکار گرفته شدند.

¹ Residuals
² Coal Colliding Cloud & Basic Thermo Colliding Cloud
³ Kinematic Cloud
⁴ Thermo Cloud
⁵ Reacting Cloud
⁶ Reacting Multiphase Cloud

$$u_{mf} = \left(\frac{\mu_f}{d_p \rho_f} \right) \left[[25.3^2 + 0.0651 Ar]^{0.5} - 25.3 \right] \quad (12)$$

که در آن Ar عدد ارشمیدس است و از رابطه (۱۳) بدست می آید.

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_f^2} \quad (13)$$

با توجه به اینکه در دمای کوره که ۸۵۰ درجه سلسیوس است، دانسیته و ویسکوزیته دینامیکی هوا به ترتیب ۰/۴۴۰۵ کیلوگرم بر متر مکعب و $10^{-5} \times 3/625$ کیلوگرم بر متر ثانیه می باشند، سرعت شناوری برای قطرهای مختلف ذره آلومینا مطابق جدول ۲ بدست آمده است.

جدول ۲ سرعت شناوری برای قطرهای مختلف ذره آلومینا

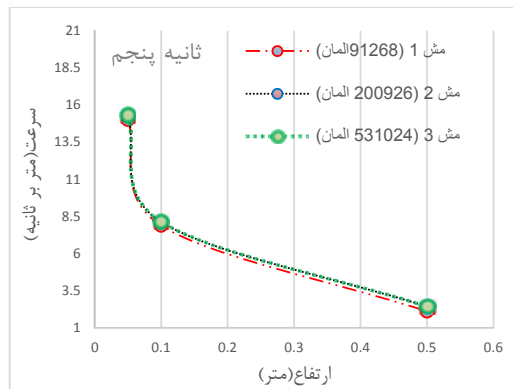
| نوع ذرات جامد بستر | قطر ماده (با فرض کروی) mm | Ar | می نیمم سرعت شناوری (m/s) |
|--------------------|---------------------------|--------|---------------------------|
| آلومینا | ۰/۶ | ۲۰۱۴/۴ | ۰/۲۹۸ |
| آلومینا | ۰/۹ | ۹۳۲۵/۹ | ۰/۸۱۸ |

مطابق تحقیقات تجربی دیویدسون و هریسو [۲۵]، سرعت حد در بسترهای شناوری ذرات درشت، تقریباً ده برابر مینیمم سرعت شناوری ذرات می باشد.

۴- نتایج و بحث

طبق نتایج شبیه سازی عددی سه بعدی، جت های ایجاد شده ناشی از وجود سوراخ های ورودی بستر، دقیقاً در محل سوراخ ها با سرعتی حدود ۸۱ متر بر ثانیه وارد فضای بستر می شوند. مطابق جدول ۲ کمترین سرعت شناوری برای ذره بستر آلومینا با قطر ۰/۶ میلی متر، برابر ۰/۲۹۸ متر بر ثانیه و بیشترین سرعت شناوری برای این ذره ۲/۳۸ متر بر ثانیه می باشد.

با توجه به نتایج شبیه سازی که سرعت در ناحیه دور از سوراخ ها تا حدود ارتفاع ۰/۱۶ متری (انتهای جت) به ماکزیمم مقدار ۲ متر بر ثانیه می رسد، این سرعت، سرعت ایده آلی برای رسیدن به اختلاط مناسب در بستر است. نماهای مختلف کانتورهای سرعت در زمان اختلاط کامل، در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل آخر در مجموعه ی شکل های ۵، نمایشگر یکی



شکل ۴ تغییرات سرعت در سه ارتفاع مختلف از بستر برای شبکه بندی های مختلف

۳- شاخص اختلاط و تعیین سرعت شناوری

نسبت ذرات بزرگتر و سنگین تر در قسمت فوقانی بستر به مقدار کل این ذرات در بستر شناوری، به عنوان شاخص اختلاط تعریف شده و از رابطه (۱۱) بدست می آید.

$$MI = \frac{x_U}{x_T} \quad (11)$$

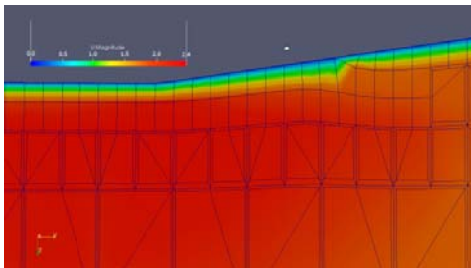
$MI = 0$ نشان دهنده جدایش کامل و $MI = 1$ نشان دهنده اختلاط کامل می باشد. در این تحقیق برای بررسی کیفیت اختلاط در بستر شناوری از این شاخص استفاده شده است.

برای شناوری ذرات زیست توده در جریان هوا، سرعت جریان هوا بایستی بزرگتر یا حداقل مساوی کمترین سرعت شناوری باشد و از طرفی دبی هوا باید مقداری داشته باشد تا رژیم حبایی که بهترین اختلاط را نتیجه می دهد، ایجاد شود.

در تحقیق حاضر، ذرات جامد بستر شناوری از دو نوع ذره هسته زیتون و آلومینا تشکیل شده اند. روابط موجود برای محاسبه سرعت شناوری فقط برای بستری که از یک نوع ذره جامد تشکیل شده است، می باشند. مطابق تحقیقات سان و همکاران [۲۳]، در مواقعی که درصد جرمی ذرات زیست توده به ذرات ثابت بستر، کمتر از ۰/۵٪ می باشد، مقدار مینیمم سرعت شناوری بستر با دو نوع ذره جامد، بسیار نزدیک به مینیمم سرعت شناوری بستری است که فقط شامل ذرات ثابت می باشد. بنابراین حد پایین سرعت شناوری در تحقیق حاضر، برابر مینیمم سرعت شناوری ذرات آلومینا، فرض شد.

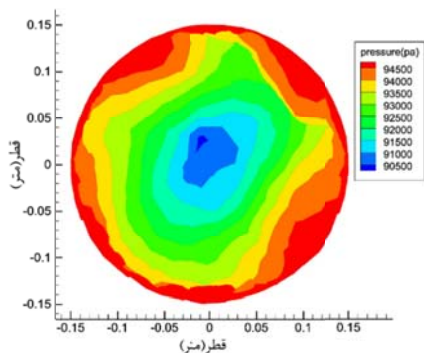
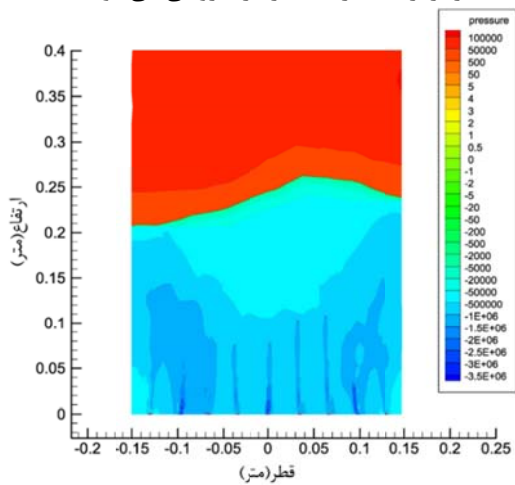
با توجه به اینکه ذرات مورد استفاده در کار حاضر، از گروه D گلدارت انتخاب شده اند برای محاسبه مینیمم سرعت شناوری بستری که فقط شامل ذرات آلومینا است، از رابطه تجربی (۱۲) استفاده گردید [۲۴].

حاکي از مدلسازی دقیق و شبکه‌بندی مناسب نواحی کنار دیواره‌ها می‌باشد. همچنین شرط عدم لغزش در دیواره‌ها و سرعت صفر در این ناحیه، به خوبی قابل مشاهده است.



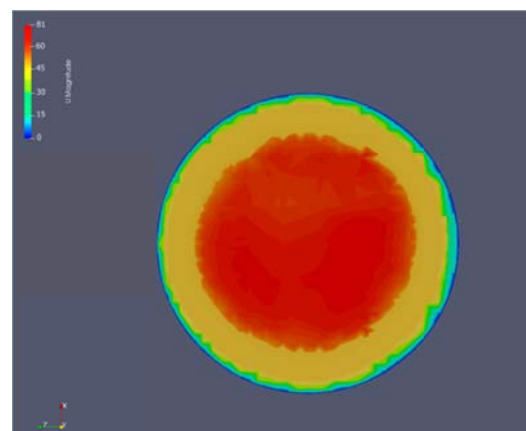
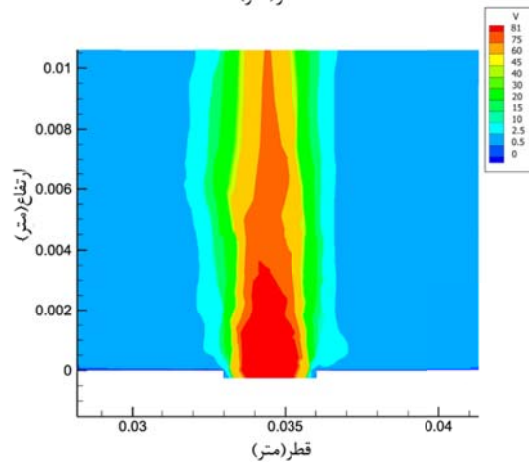
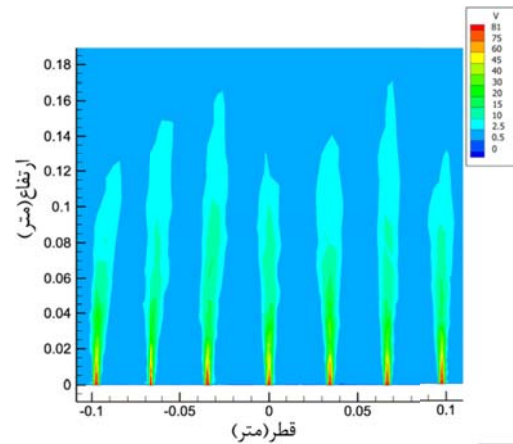
شکل ۶ نمایش لایه مرزی سرعت و بیان شرط عدم لغزش در یک برش از مدل

نماهای مختلف کانتورهای فشار در زمان اختلاط کامل، در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فشار در کناره‌های دیوار نسبت به مرکز بیشتر است چرا که سرعت در کناره‌های دیوار کمتر می‌باشد و به تدریج با نزدیک شدن به مرکز افزایش می‌یابد. در مقاطع دور از سوراخ‌های ورودی، فشار برابر با فشار اتمسفر در خروجی می‌شود.



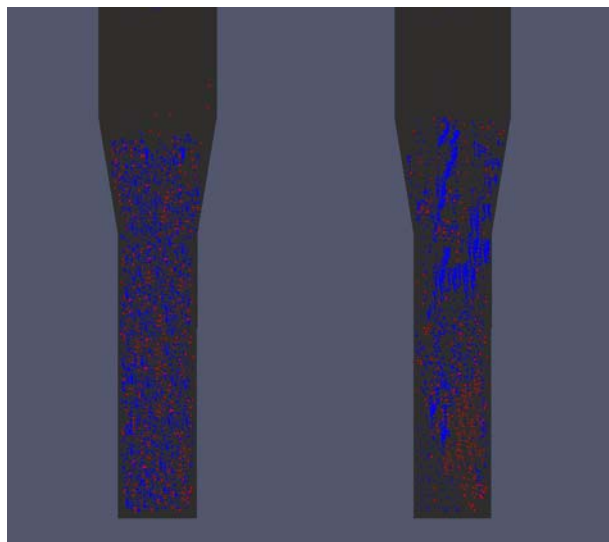
شکل ۷ نماهای مختلف کانتورهای فشار در بستر شناوری در بخشی از یک برش طولی و عرضی از بستر

از سوراخ‌های ورودی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت در مرکز سوراخ دارای بیشترین مقدار و در کناره‌های دیواره ی سوراخ به مقدار صفر رسیده است.



شکل ۵ نماهای مختلف کانتورهای سرعت در بستر شناوری در بخشی از یک برش طولی و عرضی از بستر

شکل ۶ نمایی از تغییرات سرعت را که از صفر تا $1/5$ متر بر ثانیه در عرض لایه مرزی تغییر می‌کند را نشان می‌دهد، که



شکل ۹ میزان اختلاط ذرات بستر در ثانیه پنجم حل در یک برشی عمودی از مدل الف) بدون در نظر گرفتن نیروی بین ذرات ب) با در نظر گرفتن نیروی بین ذرات

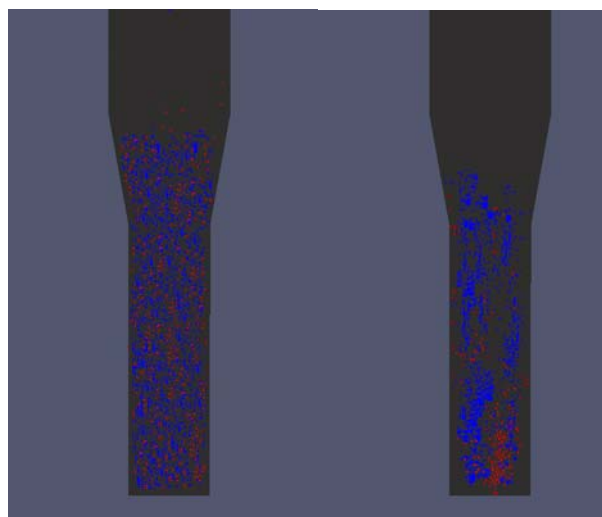
در جدول ۳ مقایسه کمی کیفیت اختلاط با در نظر گرفتن نیروی بین ذرات (حلگر جدید) و بدون در نظر گرفتن این نیروها (حلگر اولیه) نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می شود با در نظر گرفتن نیروی بین ذرات میزان اختلاط ذرات داخل بستر شناوری افزایش قابل توجهی داشته است.

جدول ۳ مقایسه کیفیت اختلاط با در نظر گرفتن نیروی بین ذرات و بدون در نظر گرفتن این نیروها

| زمان حل (S) | MI بدون در نظر گرفتن نیروی بین ذرات | MI با در نظر گرفتن نیروی بین ذرات |
|-------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| ۱ | ۰/۱ | ۰/۱۴ |
| ۲ | ۰/۲۱ | ۰/۳ |
| ۳ | ۰/۳۶ | ۰/۴۳ |
| ۴ | ۰/۵ | ۰/۶۹ |
| ۵ | ۰/۸ | ۰/۹۵ |

برای بررسی تأثیر سرعت بر میزان اختلاط در بستر شناوری تحقیق حاضر، سه سرعت برای جریان ورودی به بستر در نظر گرفته شد. این سرعتها، $8 U_m$ ، $6 U_m$ و $4 U_m$ یعنی به ترتیب هشت، شش و چهار برابر کمترین میزان سرعت برای

شکل ۸ به عنوان نمونه ای از حالت های حل شده، میزان اختلاط ذرات بستر را با در نظر گرفتن نیروی بین ذرات در ثانیه های چهارم و پنجم حل در یک برشی عمودی از مدل سه بعدی نشان می دهد. ذرات آبی رنگ ذرات ثابت بستر (آلومینا) و ذرات قرمز رنگ ذرات زیست توده (هسته زیتون) می باشند. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، میزان کسر حجمی مواد بستر در ناحیه پایینی بستر شناوری بیشترین مقدار خود را دارد. در ثانیه پنجم تقریباً اختلاط کامل حاصل شده است. همچنین در زمان اختلاط کامل فقط تعداد بسیار کمی از ذرات بایومس در بخش بالایی بستر قرار دارند و هیچ یک از ذرات ثابت بستر در این قسمت وجود ندارند. علت این مطلب این است که ذرات بستر بسیار سنگین تر از ذرات زیست توده می باشند.



شکل ۸ میزان اختلاط ذرات بستر با در نظر گرفتن نیروی بین ذرات در یک برشی عمودی از مدل الف) ثانیه چهارم حل ب) ثانیه پنجم حل

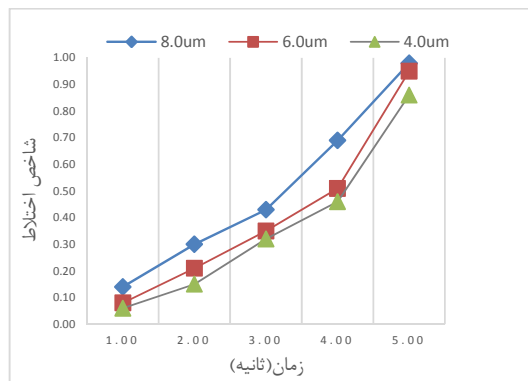
جهت نشان دادن تأثیر در نظر گرفتن نیروی بین ذرات بر مدلسازی اختلاط، به عنوان نمونه ای از حالت های حل شده، در شکل ۹ مقایسه بین میزان اختلاط در ثانیه پنجم حل برای دو حالت بدون در نظر گرفتن نیروی بین ذرات و با در نظر گرفتن این نیروها به صورت کیفی نشان داده شده است.

برای بررسی تاثیر نسبت دانسیته ذرات زیست توده به دانسیته ذرات ثابت بستر (که با ρ^* نشان داده می‌شود) بر کیفیت اختلاط، ρ^* های ۰/۶۵، ۰/۴ و ۰/۲ در نظر گرفته شد و نتایج در شکل ۱۲ نشان داده شده است. طبق این شکل مشاهده می‌شود با افزایش زمان در تمام ρ^* ها، پایداری در کیفیت اختلاط ایجاد می‌شود. همچنین با افزایش میزان ρ^* ، کیفیت اختلاط افزایش می‌یابد. علت این امر این است که با نزدیک شدن دانسیته ذرات زیست توده و ذرات ثابت بستر، نیروی‌های موجود در بستر شناوری شامل نیروهای شناوری، وزن و نیروی ناشی از ممنتم ذرات که به ذرات زیست توده وارد می‌شوند، به یکدیگر غلبه کرده و شناوری و اختلاط بهتری را فراهم می‌آورد. در واقع نیروی شناوری برابر با حاصلضرب دانسیته فاز امولسیون، حجم ذره‌ای که شناور می‌شود و شتاب ثقل است. دانسیته فاز امولسیون، ناشی از دانسیته ذرات ثابت بستر و دانسیته هوای داخل بستر است و دانسیته هوا در مقابل دانسیته ذرات ثابت بستر قابل اغماض است. پس هرچه ρ^* بزرگتر باشد این نیروها که در دو جهت مختلف بوده، یکدیگر را خنثی می‌کنند و باعث شناور ماندن ذرات بایومس و بهبود عملکرد اختلاط و پس از آن احتراق می‌گردند. طبق شکل ۱۲، با افزایش ρ^* از ۰/۲ به ۰/۶۵، شاخص کیفیت اختلاط از عدد ۰/۸۶ به ۰/۹۶ افزایش یافته است.

برای بررسی تأثیر اندازه ذرات بستر بر کیفیت اختلاط در بستر شناوری، ۴ حالت مختلف ذرات زیست توده با قطرهای ۸ و ۱۱ میلی‌متر و ذرات ثابت بستر با قطرهای ۰/۶ و ۰/۹ میلی‌متر در نظر گرفته شدند و کیفیت اختلاط بین زمان‌های ۵ تا ۶/۱ ثانیه که بیشترین میزان اختلاط وجود داشت، در هر کدام از حالت‌های ترکیبی بررسی شد. نتایج نشان داد با کاهش اندازه ذرات و نزدیک شدن اندازه ذرات بستر و ذرات زیست توده به یکدیگر، میزان کیفیت اختلاط افزایش قابل توجهی دارد. علت این امر خنثی شدن نیروهای داخل بستر و بهبود شناوری ذرات زیست توده می‌باشد.

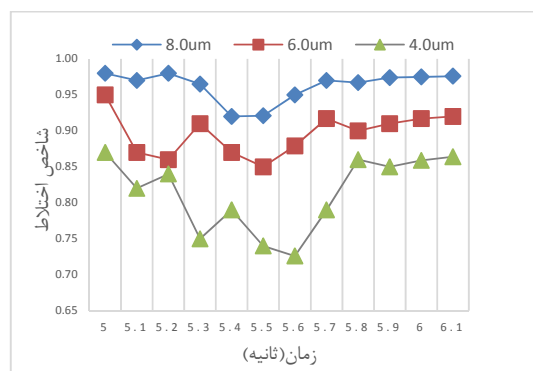
شکل ۱۳ تأثیر اندازه ذرات بستر بر کیفیت اختلاط در بستر شناوری را نشان می‌دهد. برای ذرات زیست توده به قطر ۸ میلی‌متر و ذرات ثابت بستر به قطر ۰/۶ میلی‌متر، که دارای کوچکترین ابعاد بودند، کیفیت اختلاط بیشترین مقدار یعنی ۰/۹۵ می‌باشد و این عدد برای ذرات زیست توده به قطر ۱۱ میلی‌متر و ذرات ثابت بستر به قطر ۰/۹ میلی‌متر، ۰/۸ شده است.

شناوری ذرات انتخاب شدند. شکل ۱۰ اثر افزایش سرعت ورودی بر اختلاط را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش سرعت، اختلاط در بستر بیشتر شده است، زیرا افزایش سرعت باعث افزایش نیروهای بین ذرات و همچنین ذرات با دیواره در محفظه شده و تعداد برخوردها بیشتر می‌شود.



شکل ۱۰ اثر سرعت ورودی بر کیفیت اختلاط

در تمام حالت‌های حل شده، شاخص اختلاط دچار نوساناتی در طی زمان تا رسیدن به حالت پایدار اختلاطی برای هر سه سرعت ذکر شده می‌باشد. طبق نتایج حل، مشاهده شد که زمان رسیدن به پایدار نسبی در کیفیت اختلاط، با افزایش سرعت ورودی، کاهش پیدا می‌کند. به طوری که در سرعت 8 U_m زمان کمتری برای رسیدن به پایداری در اختلاط لازم است. می‌توان گفت انتخاب صحیح سرعت در ورودی، مهمترین پارامتر در بهبود کیفیت اختلاط و احتراق ذرات زیست توده در بستر شناوری می‌باشد و می‌تواند بازده احتراق را افزایش دهد. شکل ۱۱ اثر سرعت ورودی بر پایداری در اختلاط را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ اثر سرعت ورودی بر پایداری در اختلاط

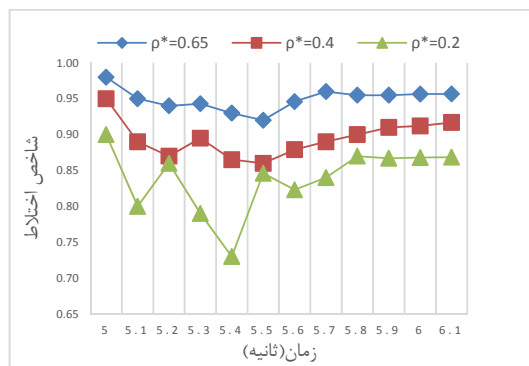
جدول ۴ مقایسه نتایج تاثیر اندازه ذرات بر کیفیت اختلاط پژوهش

| کاردوسو و همکاران [۱۱] و تحقیق حاضر | | |
|---|---|---------------------------|
| نام تحقیق | قطر زیست توده (mm) قطر ذره ثابت بستر (mm) | کیفیت اختلاط <i>MI</i> |
| تحقیق حاضر زیست توده: هسته زیتون ذره ثابت بستر: آلومینا | ۸ ۰/۶ | ۰/۹۵ |
| | ۸ ۰/۹ | ۰/۹۱ |
| | ۱۱ ۰/۶ | ۰/۸۶ |
| | ۱۱ ۰/۹ | ۰/۸ |
| تحقیق کاردوسو [۱۱] زیست توده: چوب اکالیپتوس ذره ثابت بستر: شن | ۳ ۰/۵ | ۰/۸۷۲ |
| | ۵ ۰/۵ | ۰/۸۶۷ |
| | ۷ ۰/۵ | ۰/۸۶۵ |

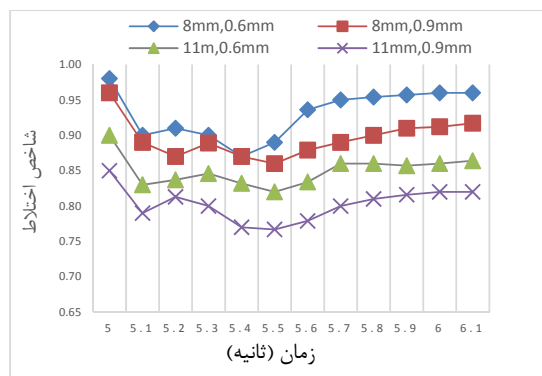
۵- نتیجه گیری

در این تحقیق حلگر جدیدی با نام CCCHF با استفاده از تعریف کلادهای جدید و ایجاد کتابخانه‌ی جدید با قابلیت اعمال نیروی بین ذرات در نرم افزار اپن فوم نوشته شد. به این ترتیب مدل-سازي فرآیند اختلاط ذرات زیست توده با خروجی‌های بسیار دقیق‌تری قابل بررسی شد. نتایج عددی نشان داد که حلگر توسعه یافته می‌تواند به‌عنوان ابزاری مطمئن جهت طراحی و بهینه‌سازی فرآیند راکتورهای متراکم بستر شناوری استفاده شود. تأثیر عوامل عملیاتی، همچون سرعت ورودی جریان، نسبت دانسیته ذرات موجود در بستر و اندازه ذرات بر کیفیت اختلاط مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد با افزایش سرعت ورودی تا حد معینی که نزدیک به ماکزیمم سرعت شناوری است، میزان کیفیت اختلاط بهبود قابل توجهی می‌یابد و به این ترتیب راندمان احتراق نیز بهبود می‌یابد که بسیار مورد توجه است.

همچنین با افزایش نسبت دانسیته ذرات موجود در بستر، یعنی کاهش تفاوت میان دانسیته ذرات ثابت بستر و ذرات زیست توده، کیفیت اختلاط بهبود می‌یابد، که علت این امر خنثی شدن نیروهای داخل بستر و شناور ماندن بهتر ذرات زیست توده است. در نهایت با کاهش اندازه ذرات و نزدیک شدن



شکل ۱۲ تاثیر نسبت دانسیته ذرات زیست توده به دانسیته ذرات ثابت بستر بر کیفیت اختلاط



شکل ۱۳ تأثیر اندازه ذرات بستر بر کیفیت اختلاط

جهت بررسی اعتبارسنجی تحقیق حاضر، با توجه به اینکه تاکنون هیچگونه تحقیق کاملاً مشابه عددی یا تجربی بر روی ذرات گروه D گلدارت در هندسه مشابه انجام نشده است، تنها می‌توان اثر اندازه ذرات بر کیفیت اختلاط را در تحقیق حاضر با نتایج مرجع [۱۱] که در آن ذرات ثابت بستر شن و ذرات زیست توده چوب اکالیپتوس بوده‌اند، مقایسه نمود.

این مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده است و تطابق خوبی در روند تغییرات مشاهده می‌شود.

- production, *Chemical Engineering Science*, 62(1-2), 636-643, 2007.
- [2] Zhang. Y., Jin. B. & Zhong. W., Experimental investigation on mixing and segregation behavior of biomass particle in fluidized bed, *Chemical Engineering and Processing*, 48(3), 745-754, 2009.
- [3] Zhang. Y., Jin. B., & Zhong. W., Fluidization, mixing and segregation of a biomass-sand mixture in a fluidized bed, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 6, 1-29, 2008.
- [4] Gera. D., Syamlal. M., & O'Brien. T. J., Hydrodynamics of particle segregation in fluidized beds, *International Journal of Multiphase Flow*, 30(4), 419-428, 2004.
- [5] Fan. R. & Fox. R. O., Segregation in polydisperse fluidized beds: Validation of a multifluid model, *Chemical Engineering Science*, 63(1), 272-285, 2008.
- [6] Gao. J., Chang. J., Lu. C. & Xu. C., Experimental and computational studies on flow behavior of gas-solid fluidized bed with disparately sized binary particles, *Particuology*, 6(2), 59-71, 2008.
- [7] Feng. Y. & Yu. A., Microdynamic modelling and analysis of the mixing and segregation of binary mixtures of particles in gas fluidization, *Chemical engineering science*, 62(1), 256-268, 2007.
- [8] R. Inder Singh., A. Brink. & M. Hupa., CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification, *Applied Thermal Engineering*, 52, 585-614, 2013.
- [9] Q. Miao. , J. Zhu., S. Barghi., C. Wu., X. Yin. & Z. Zhou., Modeling biomass gasification in circulating fluidized beds, *Renewable Energy*, 50, 655-661, 2013.
- [10] M.R. Karim. & J. Naser., Numerical modelling of solid biomass combustion: difficulties in initiating the fixed bed combustion, *Energy Procedia*, 110, 390-395, 2017.
- [11] J. Cardoso., V. Silvaa., D. Eusebioa., P. Britoa. & L. Tarelho., Improved numerical approaches to predict hydrodynamics in a pilot-scale bubbling fluidized bed biomass reactor: A numerical study with experimental validation, *Energy Conversion and Management*, 156 53-67, 2018.
- [12] S. Yang., H. Wu., W. Lin., H. Li. & Q. Zhu., An exploratory study of three-dimensional MPPIC-based simulation of bubbling fluidized beds with and without baffles, *Particuology*, Vol. 39, 68-77, 2018.
- [13] Geldart. D., Types of gas fluidization, *Powder Technology*, 7(5), 285-292, 1973.
- [14] A. Akaishi., A. Valera., M. Chong. & R. Marsha., CFD Analysis of the Fluidised Bed Hydrodynamic Behaviour inside an Isothermal Gasifier with different Perforated Plate Distributors, *Energy Procedia*, Vol. 142, 835-840, 2017.
- [15] T. Kadyrov., A. FeiLi. & W. Wang., Bubble-based EMMS/DP drag model for MP-PIC simulation, *Powder Technology* Vol. 372, 611-624, 2020.
- [16] D. Kong., S. Wang., K. Luo., C. Hu., D. Li. & J. Fan., Three-dimensional simulation of biomass gasification in a full-loop pilot-scale dual fluidized bed with complex geometric structure, *Renewable Energy*, 157 466-481, 2020.
- [17] S. Yanga., F. Fana., Y. Weia., J. Hua., H. Wanga. & S. Wub., Three-dimensional MP-PIC simulation of the steam gasification of biomass in a spouted bed gasifier, *Energy Conversion and Management*, Vol. 157, 466-481, 2020.
- [18] T. Zhou., S. Yang., Y. Wei., J. Hu. & H. Wang., Impact of wide particle size distribution on the gasification

اندازه ذرات بستر و ذرات زیست توده به یکدیگر، میزان کیفیت اختلاط افزایش قابل توجهی می یابد.

۶- فهرست علائم

| | |
|-------------|---|
| A | شتاب (m/s^2) |
| C_d | ضریب درگ |
| D_S | ضریب انتقال حرکت بین فاز (N/m^3) |
| d | قطر (m) |
| F | نرخ انتقال حرکت بین فازی (N/m^3) |
| f | تابع توزیع ذرات |
| f_D | سرعت متوسط جرم موضعی (m/s) |
| F_S | اصطکاک ذره در واحد وزن |
| g | شتاب جاذبه (m/s^2) |
| h | آنتالپی (J/kg) |
| m | جرم (kg) |
| P | فشار ترمودینامیکی گاز (Pa) |
| P_s | ضریب ثابت |
| \dot{q}_D | انتشار آنتالپی (W/m^3) |
| \dot{Q} | منبع انرژی تشعشعی (W/m^3) |
| Re | عدد رینولدز |
| S_h | آنتالپی ناشی از تشعشع ناهمگن (J/m^3s) |
| $S_{h,p}$ | آنتالپی ناشی از تشعشع همگن (J/m^3s) |
| t | زمان (s) |
| T | دما (K) |
| τ_s | تنش تماس ذرات (Pa) |
| u | سرعت (m/s) |

علائم یونانی

| | |
|-----------|-------------------------------|
| θ | کسر حجمی |
| ρ | دانسیته (Kg/m^3) |
| τ | تنش برشی (Pa) |
| δ | تانسور واحد |
| μ | ویسکوزیته برشی (Pa.s) |
| λ | ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$) |
| ϕ | اتلاف ویسکوز ($N/m^2.S$) |
| γ | ضریب ثابت |
| β | ضریب ثابت |

زیر نویس ها

| | |
|----|---------------|
| g | گاز |
| S | منبع |
| s | جامد |
| p | ذره |
| mf | کمترین شناوری |

۷- مراجع

- [1] Shen. L., Xiao. J., Niklasson. F., & Johnsson. F., Biomass mixing in a fluidized bed biomass gasifier for hydrogen

- performance of biomass in a bubbling fluidized bed gasifier, *Renewable Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.059>, 2020.
- [19] M.J. Andrews. & P.J. O'Rourke., The multiphase particle-in-cell (MP-PIC) method for dense particle flows, *Int. J. Multiphase Flow*, 22, 379–402, 1996.
- [20] P.J. O'Rourke. & D.M. Snider., An improved collision damping time for MP-PIC calculations of dense particle flows with applications to polydisperse sedimenting beds and colliding particle jets, *Chemical Engineering Science*, 65, 6014–6028, 2010.
- [21] G. Bokkers., M. van Sint Annaland. & J. Kuipers., Mixing and segregation in a bidisperse gas–solid fluidised bed: a numerical and experimental study, *Powder Technology*, 140(3), 176-186, 2004.
- [22] M. Sharifzadeh., M. Sadeqzadeh., M. Guo., T.N. Borhani., N.V.S.N. Murthy Konda., M.C. Garcia., L. Wang., J. Hallett. & N. Shah., The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions, *Progress in Energy and Combustion Science*, 71, 1–80, 2019.
- [23] Z. Sun., B. Jin., M. Zhang., R. Liu. & Y. Zhang, Experimental studies on cotton stalk combustion in a fluidized bed, *Energy*, 33, 1224– 1232, 2008.
- [24] S.P. Babu., B. Shah. & A. Talwalke.r, Fluidization correlations for coal gasification materials — minimum fluidization velocity and fluidized bed expansion ratio, *Chemical Engineering Progress Symp.*, 74, 176–186, 1978.
- [25] J. Davidson. & D. Harriso, Fluidization, 1st ed. London: Academic Press, 1971.