



Sharif University of technology
Department of chemical engineering
Separation process group

Fluidization

Final project

Project title:

CFD analysis of 2D-non reactive fluidized bed

Mohammad lotfi

98206737

Deadline:

10 SEP 2020

چکیده

در این تحقیق هیدرودینامیک بستر سیاله گاز جامد، شبیه سازی شده است. در این پروژه هدف شبیه سازی رفتار هیدرودینامیکی یک بستر سیالی دو بعدی بدون واکنش بود که برای دست یابی به این هدف از نرم افزار *Ansys fluent 2019 R3* استفاده شد.

پس از تست استقلال از شبکه، شبکه با طول گام 0.003 انتخاب شد که میتوان آن را به عنوان سبک ترین شبکه با دقت قابل قبول برای این مسئله انتخاب کرد. به طور کلی مدل های عددی هیدرودینامیکی با دو رویکرد، اولر - اولر (اولرین) و اولر - لاگرانژ (لاگرانژین) توصیف شده اند (گیداسپو، ۱۹۹۴). هزینه محاسبات، در روش دوم بیشتر از روش اولرین است، در نتیجه روش اول بیشتر در شبیه سازی عددی بسترهای سیال مورد استفاده قرار می گیرد. بومر و همکاران (۱۹۹۷) اظهار داشتند که نتایج شبیه سازی فرآیندهای بستر سیال با رویکرد اولر - اولر و نظریه جنبشی جریان دانه ای، مطابقت فراوانی با نتایج تجربی دارند. از این رو شبیه سازی با استفاده از دیدگاه اولری با استفاده از مدل *Gidaspow* برای نیروی درگ انتخاب گردید. [2]

با بررسی تغییرات فشار ورودی، دبی هوای خروجی، ارتفاع جامد در بستر با زمان مدت زمان شبیه سازی لازم برای رسیدن به حالت *statistically steady state* حدود 2.5 تا 3 ثانیه در نظر گرفته شد با بررسی افت فشار بستر و ارتفاع جامد درون بستر میزان حداقل سرعت سیالیت درون بستر بین $u_{mf} = 0.03 - 0.04 \text{ m/s}$ تخمین زده می شود که این مقدار با داده های آزمایشگاه و رابطه ی "Wen and Yu" انطباق خوبی داشته و خطایی کمی دارد.

کلمات کلیدی: بستر سیاله، حداقل سرعت سیالیت، هیدرودینامیک

تاریخچه استفاده صنعتی از بستر سیال به سال ۱۹۲۲ میلادی بازمی‌گردد. برای نخستین بار توسط وینکلر در آلمان یک راکتور بستر سیال برای فرآیند گازسازی از ذغال استفاده شد. در این فرآیند با استفاده از هوا و بخار آب از ذغال، گاز سنتز تولید می‌گردد. با شروع جنگ جهانی دوم و نیاز به سوخت بیشتر برای هواپیماهای نظامی، تلاش‌های گسترده‌ای در زمینه افزایش بازدهی پالایشگاه‌ها و استفاده از مزایای بسترهای سیال صورت گرفت. نهایتاً در سال ۱۹۴۲ اولین راکتور بستر سیال گردشی برای شکست کاتالیزوری نفت خام در یکی از پالایشگاه آمریکا ساخته شد. تحقیقات و پیشرفت در زمینه کاربردهای بستر سیال همچنان ادامه داشت و در سال ۱۹۵۷ بستر سیال در راکتور هسته‌ای نیز مورد استفاده قرار گرفت. [1]

سیالیت پدیده‌ای است که به بستری از ذرات جامد، با عبور جریان گاز یا مایع، خواص سیال گونه می‌دهد. اگر بستری از ذرات جامد ریز در معرض جریان رو به بالای گاز قرار گیرد، بستر هنگامی حالت سیال شده پیدا می‌کند که نیروی درگ وارد شده از طرف گاز به ذرات برابر با نیروی وزن ظاهری آنها شود. در این شرایط مخلوط ذرات و گاز رفتاری همانند یک سیال از خود نشان می‌دهند. در بستر سیال، ذرات به حرکت در آمده و باعث اختلاط بالایی می‌گردند. این پدیده منجر به افزایش تماس بین گاز و جامد و در نتیجه آن، انتقال جرم و حرارت مناسب می‌گردد. با توجه به این مزیت، در سال‌های اخیر، بسترهای سیال گاز جامد به طور وسیعی در صنایع شیمیایی، پتروشیمی، غذایی، دارویی، متالورژی و تولید انرژی استفاده میشوند.

کاربردهای بسترهای سیالی

بسترهای سیال با توجه به نوع واکنشی که در آنها اتفاق می‌افتد کاربردهای صنعتی گسترده‌ای دارند. از مهمترین آنها می‌توان در [1]

- تولید مواد پیشرفته همانند سیلیکون، برای استفاده در نیمه رساناها و سلول‌های خورشیدی، نانولوله‌های کربنی با نانو ذرات روکش دار
- واکنش‌های شیمیایی و پتروشیمی مثل احتراق، گازسازی، واکنش‌های پلیمری و شکست کاتالیزوری و نیز (۳)

- عملیات فیزیکی همانند روکش دار نمودن فلزات و شیشه و قرص های دارویی، انتقال حرارت، خشک کردن، جداسازی ذرات بر اساس اندازه، جذب و دفع استفاده نمود

در یک تقسیم بندی کاربردهای واحد بستر سیال را می توان به دودسته عمده، عملیات های فیزیکی و شیمیایی تقسیم نمود. در عملیات فیزیکی فعالیت هایی نظیر انتقال ذرات جامد، خشک کردن، حرارت دادن و نظیر اینها انجام می گیرد که در این عملیات ها بسترهای سیال نسبت به روش های دیگر دارای بازده، تناسب و صرفه اقتصادی بهتری می باشند. در فرایندهای شیمیایی دلیل اصلی انتخاب ترجیحی بسترهای سیال در مقابل بسترهای ثابت برای انجام واکنش های کاتالیستی کنترل دما در ناحیه واکنش میباشد. چندین دلیل برای این امر وجود دارند که عبارتند از [1]:

- واکنش ممکن است در خارج از محدوده باریکی از دما انفجار آمیز باشد.
- نسبت محصول به محصولات جانبی ممکن است شدیداً به سطح دمایی عملیات حساس باشد.
- به وجود آمدن نقاط داغ بر روی کاتالیست ممکن است باعث زوال و غیرفعال شدن سریع

کاتالیست شود.

- اختلاط همگن ذرات جامد با گاز باعث توزیع همگن دما در بستر سیال میشود.
- دمای بستر با رقیق یا غلیظ کردن گازهای واکنش دهنده به آسانی کنترل می گردد

به دلیل مزیت های قابل توجه بسترهای سیال، تحقیقات فراوانی در رابطه با استفاده از این بسترها در فرآیندهای مختلف انجام شده است. متأسفانه بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه ی راکتورهای بستر سیال مربوط به بسترهایی در اندازه های کوچک بوده و این در حالی است که طراحان و سازندگان به خوبی آگاه هستند که الگوهای رفتاری فاز جامد و سیال در بسترهای کوچک و بزرگ بسیار متفاوت از هم می باشد، به گونه ای که در حال حاضر و با دانش کنونی محققین، افزایش مقیاس جهت طراحی برای مقیاس های مدل سازی ریاضی رفتار جریان فازهای گاز و جامد در بسترهای سیال در دهه ۶۰ توسط داویدسون وهاریسون (۱۹۶۳) و نیز لونشپیل و کانی (۱۹۶۹) شروع شد، که به طور خاص حرکت حباب، انتقال جرم و ناپایداری های سیستم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و پس از آن بسیاری از محققین به مدل سازی راکتورهای بستر سیال با هدف شناخت شرایط حاکم بر آنها و بهبود کنترل بهتر سیستم پرداختند به طوری که ابزار

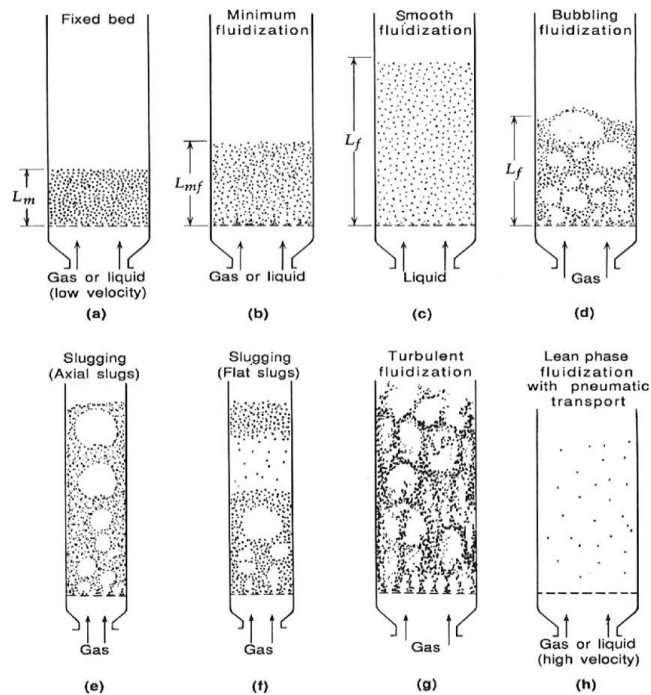
دینامیک سیالات محاسباتی به طور گسترده به منظور پیش بینی پدیده های فیزیکی و شیمیایی در خلال فرآیندهای بستر سیال مورد استفاده قرار گرفت [2]

مدل های هیدرودینامیک، حرکت و توزیع جامدات، ترکیب گاز - جامد، قطر، سرعت و رشد حبابها، و ارتباط بین فازهای حباب و امولسیون و پدیده های انتقال جرم و حرارت را تشریح می کنند. به طور کلیه هیدرودینامیک بسترهای سیال به وسیله تعادل نیروهای ناشی از سرعت ذرات جامد و سرعت گاز ارائه شده اند. با کنترل سرعت گاز ورودی، این امکان وجود دارد که رژیم جریان حاکم بر سیال سازی مواد جامد مشخص شود.

انواع رژیم های جریان در بستر های سیالی

در فرآیندهای سیال سازی با توجه به مقدار گاز ورودی به بستر، رژیم های مختلفی از جریان فاز جامد را شاهد خواهیم بود. در حالت کلی رژیم های ایجاد شده در یک بستر سیال عبارتند از

- رژیم بستر ثابت، به وسیله یک سرعت گازی پایین، که حالت بستر را حفظ می کند، مشخص می شود.
- رژیم حداقل سیالیت، نقطه شروع سیالی شدن است.
- رژیم حباب زاء، پس از این مرحله و با افزایش سرعت گاز ورودی به بستر، حباب هایی درون بستر ظاهر می شوند که در این حالت، رژیم حباب زاء را خواهیم داشت.
- رژیم لخته ای، با ادامه افزایش سرعت گاز و رشد حبابها، اگر نسبت طول بستر به قطر آن به اندازه کافی بزرگ باشد، قطر حبابها می تواند تقریباً برابر قطر بستر باشد که در این حالت، بستر در حالت رژیم لخته ای خواهد بود.
- رژیم متلاطم نیز زمانی ناشی می شود که به جای حبابها، حرکت توربولنت دسته ذرات جامد و توده گاز با اندازه و شکل هایی متفاوت مشاهده می شود. انتقال بادی نیز زمانی اتفاق می افتد که سرعت گاز از سرعت حدا بزرگ تر شود.



شکل 1 انواع رژیم جریان در بستر سیالی

سیالی شدن به طور گسترده تحت تأثیر مشخصات ذرات جامد قرار دارد. گلدارت (۱۹۷۳)، رفتار ذرات جامد در سیال را به ۴ گروه تقسیم کرد، که به طور گسترده در مدل سازی بسترهای سیال پذیرفته شده و مورد استفاده قرار می گیرد.

دسته بندی انواع ذرات [2]

- گروه A: ذرات کوچک، قطر ۳۰-۱۰۰ میکرون و با چگالی کمتر از ۴/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب. نرم و روان با سیالیت آسان و همگن است. این ویژگی امکان عملیات با جریان های گازی کم و کنترل بر رشد و سرعت حباب ها را ممکن می کند.
- گروه B: ذرات معمولی با قطر ۴۰-۵۰۰ میکرون و چگالی ۱-۴/۴ گرم بر سانتی متر مکعب. سیالی شدن این ذرات برای گازهای با نرخ های جریان بالا خوب است. حبابها تمایل زیاد به رشد و ظاهر شدن در ابتدای سیال شدن دارند.
- گروه C: ذرات بسیار ریز با قطر کمتر از ۳۰ میکرون. به دلیل نیروهای قوی بین مولکولی و واندروالسی، زمانی که این نوع ذرات جامد در کنار یکدیگر در یک بستر سیال قرار می گیرند. هم چنین به دلیل قوی تر بودن

نیروهای چسبندگی بین ذرات جامد نسبت به نیروی اعمال شده از طرف سیال بر ذرات جامد، سیالی شدن این ذرات، سخت و غیریکنواخت خواهد بود.

- گروه D : بزرگترین اندازه‌ی ذرات جامد مربوط به این دسته می باشد که بزرگتر از ۱ میلی متر می باشند. بستریهای عریض پر شده با این نوع ذرات جامد به سختی به صورت یکنواخت به حالت سیال شده در می آیند. این نوع از ذرات برای بستریهای جوشان مناسب می باشند.

مدل TFM

معادلات حاکم

در مدل پیوسته دو سیاله ، فاز گاز و فاز ذرات معلق به صورت 2 فاز پیوسته مداوم و کاملاً نفوذ پذیر در نظر گرفته می شوند. برای بستریهای سیال مقیاس مهندسی ، این نوع مدل سازی به دلیل وجود تعداد زیاد ذرات (معمولاً 10^9-10^{12}) موجود در سیستم مورد نظر، قابل توجیه است. در واقع می توان معادلات حاکم به کار رفته در این مدل ها را به عنوان تعمیم معادلات ناویر-استوکس برای تعامل 2 فاز در نظر گرفت. معادلات پیوستگی و مومنتم وابسته به زمان برای گاز و جامد توسط معادلات زیر توصیف می شود [3]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \bar{u}_g) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \bar{u}_s) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \bar{u}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \bar{u}_g \bar{u}_g) = -\varepsilon_g \nabla P_g - \nabla \cdot (\varepsilon_g \bar{\tau}_g) - \beta(\bar{u}_g - \bar{u}_s) + \varepsilon_g \rho_g \bar{g}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \bar{u}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \bar{u}_s \bar{u}_s) = -\varepsilon_s \nabla P_s - \nabla \cdot (\varepsilon_s \bar{\tau}_s) + \beta(\bar{u}_g - \bar{u}_s) + \varepsilon_s \rho_s \bar{g}$$

شبیه سازی

شبیه سازی عددی بستریهای سیال بر اساس کوپل معادلات کلاسیک بقای جرم، مومنتوم، انرژی و معادلاتی که برهمکنش بین فازها را توصیف می کنند، می باشد. مدل ها و معادلات کمکی برای توصیف برهمکنش های بین فاز، از نظریه جنبشی جریان دانه ای مشتق شده است (سیاملال و همکاران، ۱۹۹۳؛ گیداسپوه، ۱۹۹۴). به طور کلی مدل های عددی

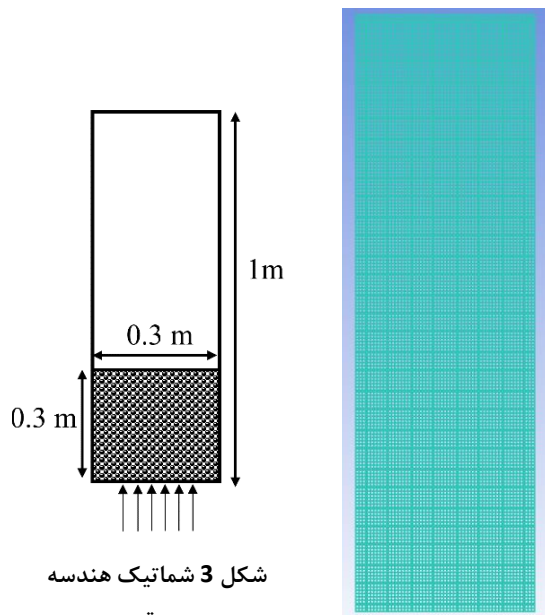
هیدرودینامیکی با دو رویکرد، اولر – اولر (اولرین) و اولر – لاگرانژ (لاگرانژین) توصیف شده اند (گیداسپو، ۱۹۹۴). هزینه محاسبات، در روش دوم بیشتر از روش اولرین است، در نتیجه روش اول بیشتر در شبیه سازی عددی بسترهای سیال مورد استفاده قرار می گیرد. بومر و همکاران (۱۹۹۷) اظهار داشتند که نتایج شبیه سازی فرآیندهای بستر سیال با رویکرد اولر – اولر و نظریه جنبشی جریان دانه ای، مطابقت فراوانی با نتایج تجربی دارند. امروزه در شبیه سازی عددی بسترهای سیال از کدهای تجاری نظیر *Fluent*، *CFX* و غیره استفاده می شود. [2]

هندسه و مش بندی

شبکه بندی به صورت باسازمان با نرم افزار *ICEM-CFD* با طول گام ۳ میلی متر در هر دو راستا انجام شده است. مشخصات مربوط به هندسه و همچنین شبکه بندی در جدول 1 بیان شده است. همچنین شماتیک هندسه بستر و شبکه بندی خروجی نیز در شکل های زیر نشان داده شده است.

جدول 1 مشخصات مربوط به هندسه و شبکه بندی

Simulation conditions settings for two-fluid simulations.	
Geometry	
Height of simulated setup	1 m
Width of simulated setup	0.3 m
Initial bed height	0.3m
Mesh	
Number of cells in horizontal direction	100
Number of cells in vertical direction	333



شکل 3 شماتیک هندسه بستر

شکل 2 شبکه بندی خروجی از نرم افزار *ICM CFD*

شبیه سازی و شرایط مرزی

اطلاعات هیدرودینامیک سیستم و شبیه سازی و شرایط مرزی سیستم به شرح زیر می باشد.

شبیه سازی های CFD در این پروژه توسط نرم افزار تجاری *Ansys fluent 2019 R3* انجام شده است. از الگوریتم Simple فاز جفت شده برای کوپل کردن سرعت و فشار تحت شرایط گذرا استفاده شده است. برای اندازه حرکت، انرژی سینتیکی آشفته و نرخ اتلاف آشفته، از حل کننده پیشرو درجه دو جهت به دست آوردن نتایج دقیق استفاده می شود. از بازه زمانی ثابت با مقدار 0.001 ثانیه برای شبیه سازی گذرا و حداکثر تعداد تکرار 30 بار در هر بازه زمانی استفاده می شود. برای دستیابی به نتایج ثابت در رفتار هیدرودینامیکی، شبیه سازی در 3 ثانیه انجام شده است. اطلاعات شبیه سازی در جدول 2 آمده است.

جدول 2 تنظیمات شرایط مرزی

Boundary Conditions		value
Inlet	Velocity inlet	changeable
Outlet	Outlet Pressure	Gauge pressure=0
Wall	Stationary wall	
Air	No-slip	
Solid	Specularity coefficient	0

جدول 3 تنظیمات شبیه سازی و اطلاعات فیزیکی سیستم

simulation settings for two-fluid simulations			
Particle diameter, dp	250 μm	Frictional viscosity	Schaeffer
Particle density	1400 kg / m^3	Drag law	Gidaspow
Flow model	laminar	Coefficient of restitution	0.9
Granular viscosity	Gidaspow	Convergence criteria	10^{-3}
Granular bulk viscosity	Lun-et-al	Time step size	0.001
Temperature	298 K	phase viscosity Gas	$1.8 \cdot 10^{-5}$
Iteration/time step	30	pressure	101325 Pa

جدول 4 تنظیمات گسسته سازی

Simulation discretization settings	
Pressure-velocity coupling	Phase coupled SIMPLE
Gradient	Gradient
Least squares cell based	Least squares cell based
Pressure	Pressure
Second order	Second order

فرضیات

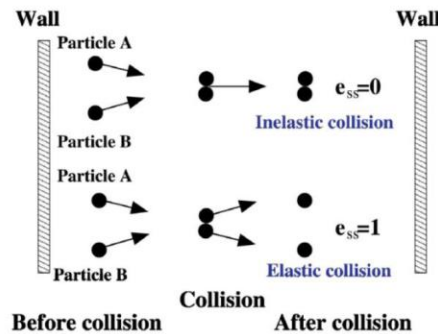
- نیروهای خارجی، لیفت در معادلات مومنتوم قابل صرف نظر کردن می باشند.

- Restitution coefficient = 0.9

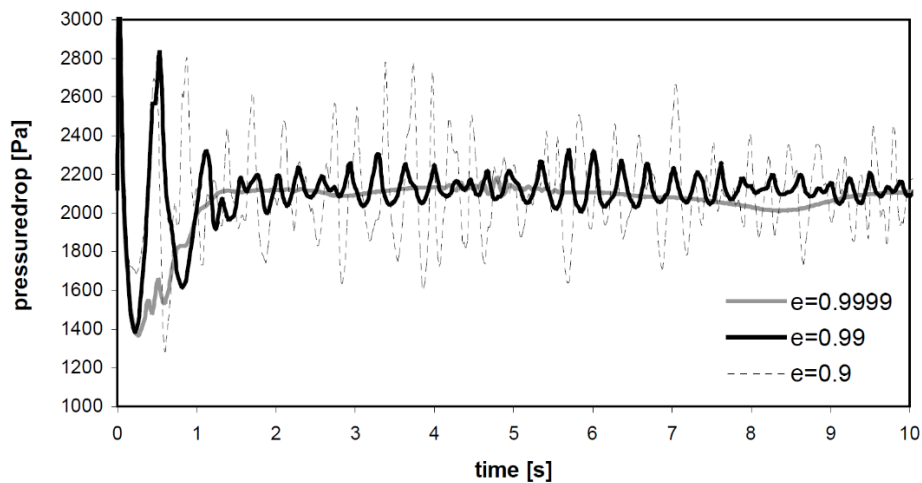
• Specularity coefficient = 0

برهمکنش بین دیواره و ذرات به عنوان شرایط مرزی ذره-دیواره توصیف میشود که یکی از مهمترین پارامترهای مؤثر در پیشبینی دقیق مدل چند سیالی در بستری سیال است. [۱۷،۱۸] نوع کلی شرایط مرزی که معمولاً در شبیه سازی CFD فرآیندهای سیال سازی استفاده میشود، با معرفی ضریب آینه‌ای Φ توسط جانسون و جکسون [19] برای توصیف شرایط مرزی دیواره به دست آمده است. ضریب آینه‌ای شرایط اصطکاک برشی را در دیواره‌ها با مقداری بین ۰ برای برخورد کاملاً آینه‌ای (لغزش آزاد) و ۱ برای برخورد کاملاً بدون لغزش، مشخص میکند.

نتایج شبیه سازی



شکل 4 تاثیر Restitution coefficient بر روی برخورد



شکل 5 تاثیر Restitution coefficient بر روی افت فشار [3]

نتایج شبیه سازی

حداقل سرعت سیالیت

حداقل سرعت سیالیت یکی از مهمترین پارامترهای مورد بررسی جهت فهم هیدرودینامیک بستر سیال می باشد و در این زمینه برای بسترهای تک ذره ای و چند ذره ای، تحقیق های زیادی صورت گرفته است. ناکامورا و همکارانش [4] در سال ۱۹۸۵ به بررسی حداقل سرعت سیالیت در بسترهایی با دما و فشار بالا پرداختند و روابطه تجربی برای محاسبه این سرعت ارائه کردند. نودا و همکارانش [5] در سال ۱۹۸۵ حداقل سرعت سیالیت را برای سیستم های متشکل از دو نوع ذره بررسی کردند که در اندازه، چگالی و شکل ظاهری متفاوت بودند و رابطه ارائه شده توسط ون و یو را اصلاح کردند. در سال ۲۰۰۱ هیلال و همکارانش [6] اثر پارامترهایی چون قطر بستر، نوع توزیع کننده را روی حداقل سرعت سیالیت در یک بستر دو بعدی بررسی کردند و دریافتند که با افزایش قطر بستر، حداقل سرعت سیالیت کاهش می یابد. در سال 2014 شاول و همکاران تحقیقی بر روی خواص سیاله شدن گلداتر های مختلف از جمله حداقل سرعت سیالیت انجام دادند [7].

در بستر سیاله گاز جامد، با افزایش سرعت سیال، افت فشار بستر نیز افزایش مییابد تا زمانی که بستر در شرایط حداقل سیالیت قرار گیرد و پس از آن با افزایش سرعت، افت فشار ثابت و برابر با وزن موثر ذرات می باشد، لذا با استفاده از نمودار افت فشار بر حسب سرعت، می توان حداقل سرعت سیالیت را برای هر بستر شبیه سازی شده بدست آورد.

نمودار $\Delta P - U_0$ را میتوان به سه منطقه اصلی تقسیم کرد که به رژیمهای مختلف سیالیت مربوط میشود

- رژیم بستر ثابت
- رژیم سیالیت جزئی
- رژیم سیالیت کامل

در رژیم بستر ثابت، یک رابطه شبه خطی بین سرعت گاز و افت فشار بستر وجود دارد که اثرات قابلیتوجه ویسکوزیته در برهم کنش های گاز-جامد را نشان میدهد. در رژیم سیالیت جزئی، ذرات کوچک شروع به شناور شدن کرده، اثرات ویسکوزیته کاهش یافته و تغییرات افت فشار با سرعت گاز زانویی مانند میشود. در رژیم سیالیت کامل، شناوری کامل ذرات اتفاق افتاده و حداکثر ΔP_{max} که در تعادل با وزن ذرات و اصطکاک ذره-دیواره است، ثابت باقی میماند. سرعت گاز متناظر با انتقال از رژیم سیالیت جزئی به سیالیت کامل به عنوان حداقل سرعت سیالیت شناخته میشود

جدول 5 جدول افت فشار

U_0	ΔP
0.03	2275
0.035	2460
0.04	2472
0.06	2468
0.08	2459
0.1	2458
0.12	2460

خلاصه فعالیت های انجام شده در حوزه شبیه سازی

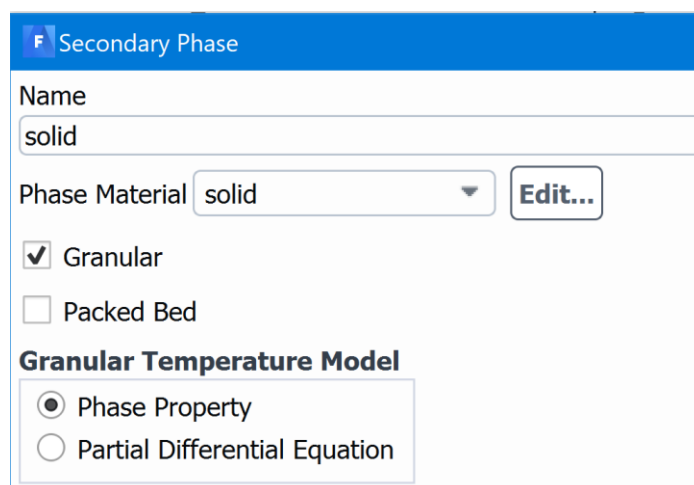
پس از شبیه سازی بستر سیال برای سرعت های بین 0.03 تا 0.12 مشخص است بستر حدود سرعت 0.03 تا 0.04 در ناحیه سیالیت جزئی قرار دارد و حداقل سرعت سیالیت در این بازه می باشد.

و بستر پس از سرعت 0.04 وارد رژیم سیالیت کامل می گردد. متاسفانه به دلایل نامعلوم شبیه سازی ناحیه بستر ثابت یعنی سرعت های زیر 0.03 نتایج صحیحی بدست نمی داد.

برای مثال پس شبیه سازی بستر در بازه سرعت 0.001 تا 0.02 افت فشار برای کل بازه حدود 2200 پاسکال بدست می آمد. که نتیجه کاملاً غلطی می باشد. و به طوری کلی ناحیه خطی ابتدایی در نمودار افت فشار به طور کل دیده نمی شد.

پس از مواجهه با این مشکل فعالیت هایی به شرح زیر برای پیدا کردن مشکل شبیه سازی انجام شد.

- کاهش گام زمانی شبیه سازی از 0.001 به 0.0001
- افزایش سلول های شبکه محاسباتی
- تلاش برای شبیه سازی بستر ثابت به وسیله شبیه سازی porous media در فلونت
- استفاده از مود packed bed در تنظیمات فاز دوم مدل دو فازی اولرین



شکل 6 استفاده از مود بستر ثابت در تنظیمات مدل دو فازی اولرین

متاسفانه هیچ کدام از فعالیت های فوق نتیجه مطلوب برای بدست آوردن ناحیه خطی ابتدایی نمودار نداد.

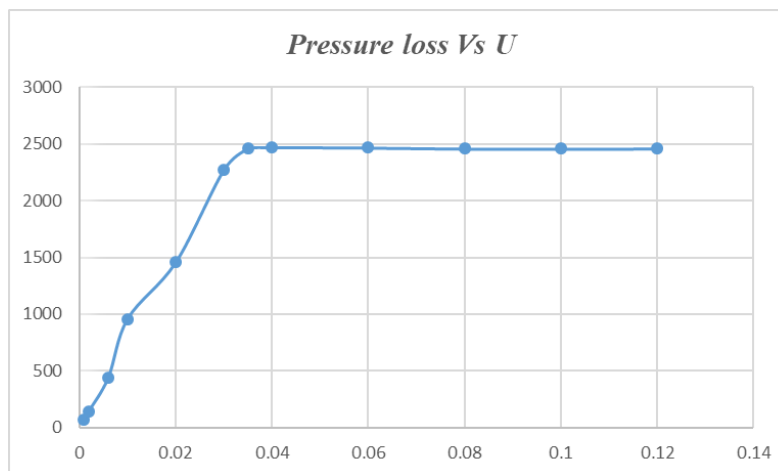
بنابراین به ناچار از معادله ارگان برای ناحیه بستر ثابت استفاده شد که نتایج این معادله به شرح زیر است .

جدول 6 جدول افت فشار ناحیه بستر ثابت

U_0	ΔP
0.001	70.004
0.002	145.01
0.06	438.58
0.01	957.68
0.02	1456.81

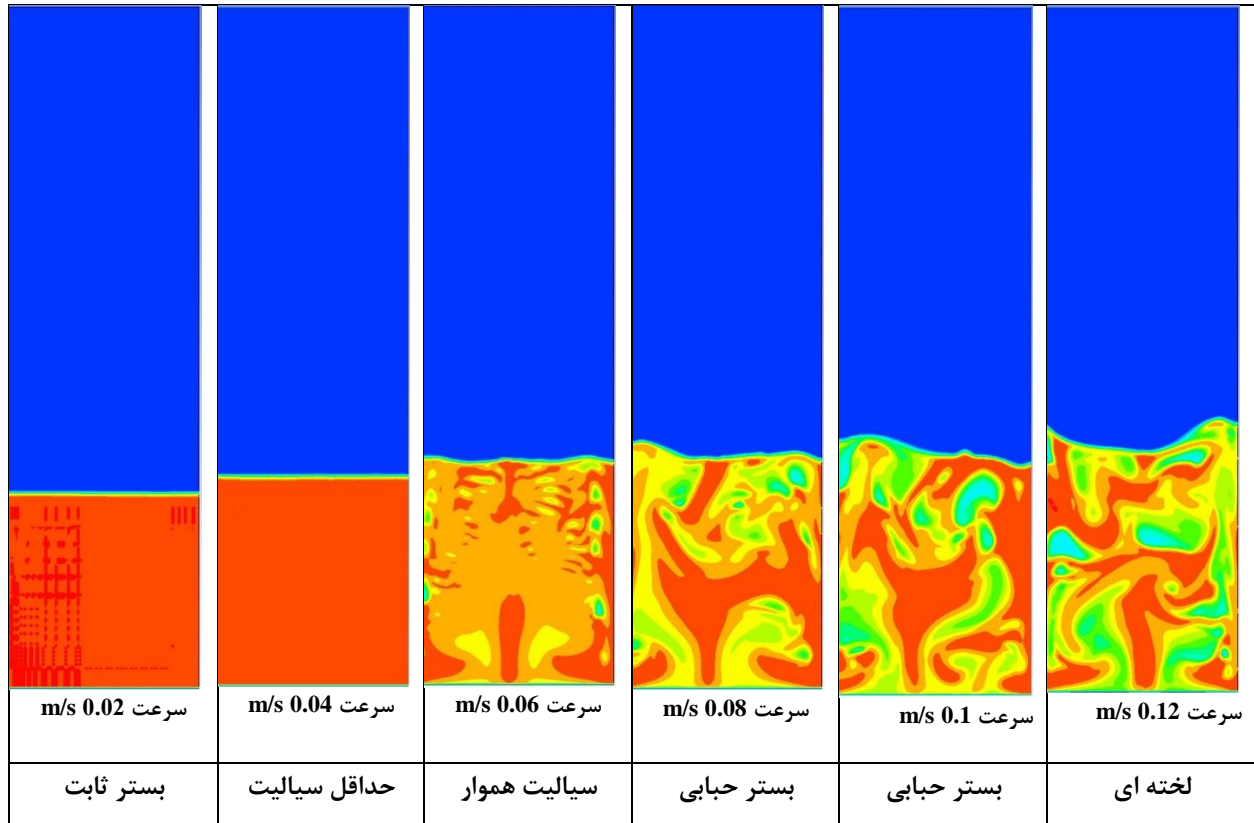
جدول 7 جدول افت فشار بر حسب سرعت هوای ورودی

U_0	ΔP [pascal]
0.001	70.004
0.002	145.01
0.06	438.58
0.01	957.68
0.02	1456.81
0.03	2275
0.035	2460
0.04	2472
0.06	2468
0.08	2459
0.1	2458
0.12	2460



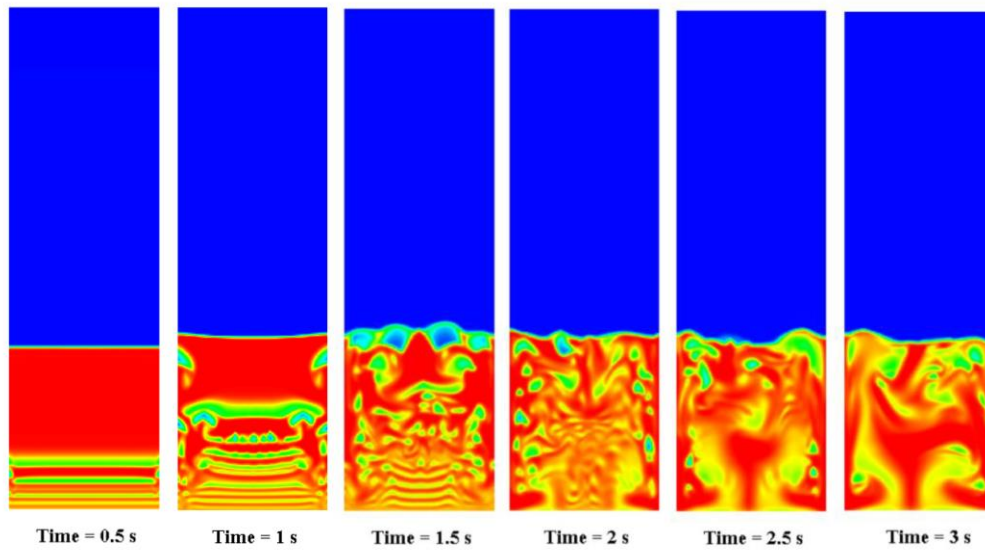
شکل 7 نمودار افت فشار بر حسب سرعت هوای ورودی

تأثیر سرعت جریان ورودی روی رژیم جریان



شکل 6 تأثیر سرعت جریان ورودی بر روی رژیم جریان پس از 3 ثانیه

کانتور درصد حجمی ذرات جامد

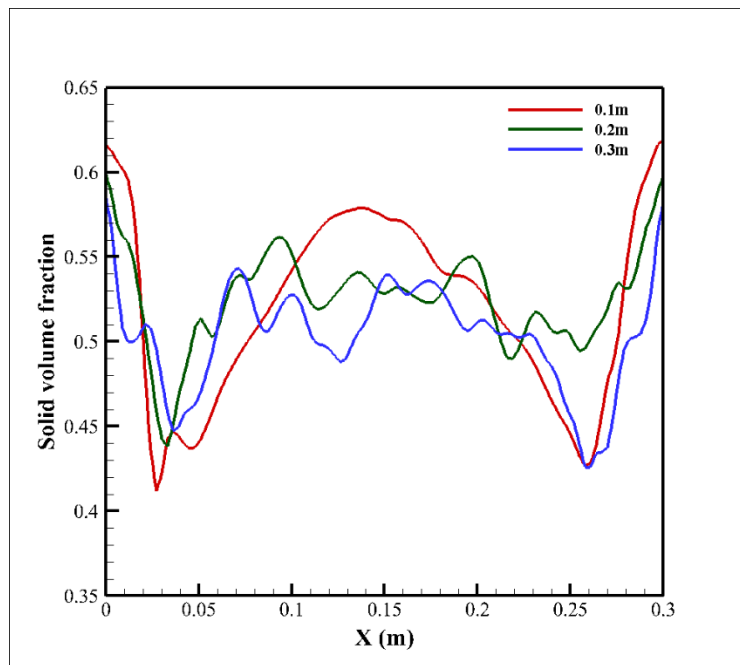


شکل 7 جامد ذرات حجمی درصد کانتور در گذر زمان برای سرعت 0.08

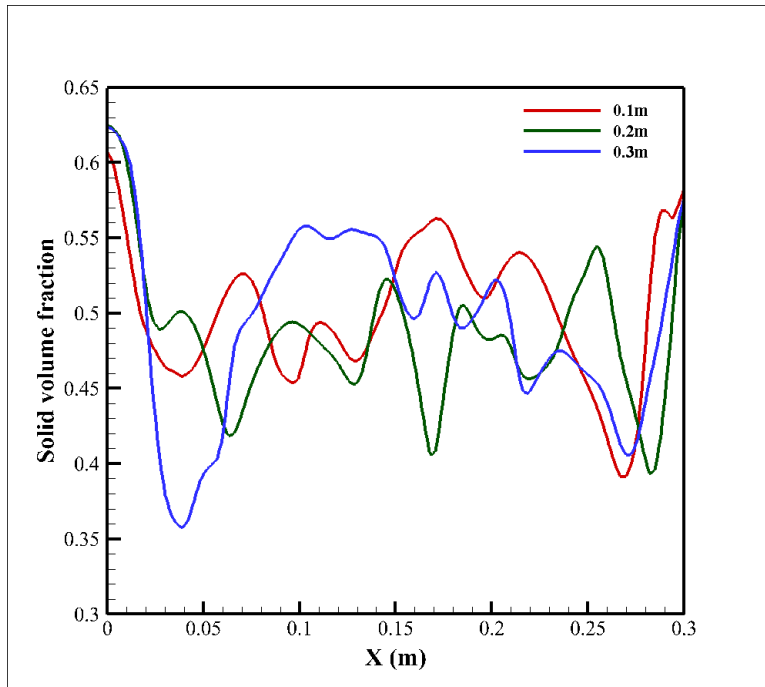
توزیع درصد حجمی ذرات جامد در یک ارتفاع مشخص از بستر

در شکل 8 و 9 نمودار درصد حجمی جامد برای 3 ارتفاع مشخص در بستر برای سرعت های 0.08 و 0.12 m/s رسم شده است. با توجه به این دو نمودار میتوان نکات زیر را برداشت کرد.

- با مقایسه نمودار ارتفاع 10 سانتی با ارتفاع 30 سانتی متری میتوان دریافت با افزایش ارتفاع از ورودی با کاهش درصد حجمی جامد در عرض بستر حباب ها رشد یافته و حباب های بزرگتری در این ارتفاع وجود دارد. که علت آن به وضوح به هم پیوستن حباب های کوچک در بستر و ایجاد حباب های بزرگتر می باشد.
- نمودار در ارتفاع 10 سانتی نوسان های بیشتری با دامنه محدود دارد این نوسان های زیاد نشان دهنده ی تعداد حباب بیشتر اما کوچکتر در ارتفاع کمتر دارد. بنابراین با افزایش ارتفاع از ورودی بستر تعداد حباب ها کمتر شده اما اندازه این حباب ها بزرگتر خواهد بود.
- در هر ارتفاع مشخص پس از بررسی نمودار درصد حجمی جامد میتوان دریافت ماکسیمم درصد حجمی جامد در هر ارتفاع در نزدیکی دیواره ها اتفاق می افتد. که نشان دهنده این موضوع است که حباب ها بیشتر در قسمت میانی بستر ایجاد می شوند.

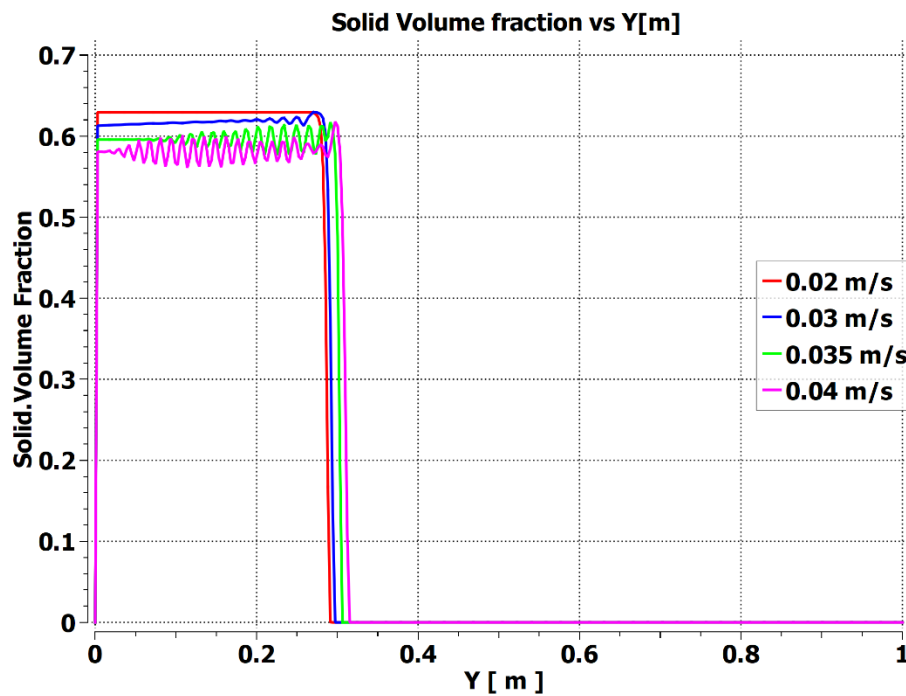


شکل 8 درصد حجمی جامد برای سرعت 0.08 m/s در 3 ارتفاع 10 و 20 و 30 سانتی متر بر حسب X



شکل 9 درصد حجمی جامد برای سرعت 0.12 m/s در ارتفاع 10 و 20 و 30 سانتی متر بر حسب X

توزیع درصد حجمی ذرات جامد در یک عرض مشخص از بستر



شکل 10 درصد حجمی جامد در عرض 15 سانتی متر بر حسب Y

در شکل 10 نمودار درصد حجمی جامد برای یک عرض مشخص در بستر برای سرعت های مختلف رسم شده است.

با توجه به این نمودار میتوان نکات زیر را برداشت کرد.

- با افزایش سرعت ورودی میزان انبساط بستر افزایش می یابد.
- در ناحیه بستر ثابت توزیع درصد حجمی جامد به صورت یک تابع پله بوده و از مقدار 0.6 به مقدار 0 می رسد.
- هنگام نزدیک شدن به سرعت حداقل سیالیت یعنی در ناحیه سیالیت جزئی نمودار درصد حجمی جامد دچار نوسان می گردد.
- بنابراین طبق نکته قبل میتوان انتظار داشت میزان حداقل سرعت سیالیت در بازه ی 0.03 تا 0.04 می باشد.

References

- [1] ابراهیمی، بهزاد، بررسی هیدرودینامیکی بسترهای خمیده سیاله با ورود جت. صنعتی شریف 1395
- [2] جباری، اسماعیل، بررسی نظری فرایند اختلاط جامدات در بسترهای سیاله گاز - جامد با وجود یک جت در ورودی. صنعتی شریف 1394
- [3] M. Goldschmidt, "HYDRODYNAMIC MODELLING OF FLUIDISED BED SPRAY GRANULATION" Ph.D. thesis University of Twente,(1973)
- [4] M. Nakamura, Y. Hamada and Sh. Toyama, "An experimental investigation of minimum fluidization velocity at elevated temperatures and pressures" The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol.63,8-13 (1985).
- [5] K. Noda, S. Uchida, T. Makino and H. Kamo, "Minimum Fluidization Velocity of Binary Mixture of Particles with Large Size Ratio" Powder Technology, Vol.46,149-154 (1986).
- [6] N. Hilal, M.T. Ghannam and M.Z. Anabtawi, "Effect of Bed Diameter, Distributor and Inserts on Minimum Fluidization Velocity Chemical Engineering & Technology, Vol.24.161-165 (2001).
- [7] Semion Shaul , Evgeny Rabinovich & Haim Kalman (2014) Typical Fluidization Characteristics for Geldart's Classification Groups, Particulate Science and Technology: An International Journal, 32:2, 197-205