

مطالعه عددی هیدرودینامیک ذره‌ها در بسترهای شارانیده مخروطی با استفاده از CFD-DEM

سید حسین حسینی*⁺، حسین فاتح بیگی، محسن منصور

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

علی زارعی

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

چکیده: در این مطالعه هیدرودینامیکی، بسترهای گاز-جامد مخروطی دارای ذره‌ها از نوع گلدارت D و B با قطرهای به ترتیب 2 mm و 0.287 mm با استفاده از نرم افزار دینامیک سیال‌های محاسباتی (CFD) فلوئنت ۱۸٫۱ در حالت سه بعدی بررسی شده و نتیجه‌های به دست آمده از نرم افزار با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شدند. مدل فاز گسسته متراکم (DDPM) با بسته DEM به منظور در نظر گرفتن اثرهای تماس ذره-ذره در فاز ذره‌های مورد استفاده قرار گرفت. فاز پیوسته نیز از روش اولرین در شبیه سازی استفاده شد که مدل آشفتگی پراکنده $k-\epsilon$ برای این فاز مورد استفاده قرار گرفت. مدل درگ گیداسپاو نیز برای محاسبه ضریب تبادل مومنتوم بین گاز-جامد استفاده شد. نتیجه‌های افت فشار و انبساط بستر مدل با داده‌های تجربی همخوانی قابل پذیرشی را نشان می‌دهند. نتیجه‌های توان تراکمی طیف سنجی در این سامانه‌ها نشان می‌دهد که فرکانس غالب برابر 2.3 Hz بوده که با سامانه‌های حبابی معمولی تفاوت دارد. با توجه به این که در زمینه بسترهای فواره ای مخروطی کارهای محدودی صورت گرفته است و به‌طور ویژه از دیدگاه لاگراثری در این بسترها تاکنون کاری انجام نشده است، مطالعه حاضر که شبیه سازی سه بعدی بستر فواره ای مخروطی است می‌تواند مبنای خوبی برای کارهای آینده در زمینه شبیه سازی CFD بسترهای مخروطی باشد.

واژه‌های کلیدی: شبیه سازی؛ هیدرودینامیک؛ بستر شارانیده مخروطی؛ CFD-DEM.

KEYWORDS: Simulation; Hydrodynamics; Conical fluidized bed; CFD-DEM.

مقدمه

در جهت محوری می‌شود که منجر به ویژگی‌های دینامیکی یگانه بستر می‌شود [۱]. با توجه به این مشخصه، بسترهای شارانیده مخروطی در بسیاری از فرایندهای صنعتی، مانند تصفیه پساب [۲]، واکنش فیلم زیستی ساکن، سوزاندن مواد زاید، پوشش ذره‌های سوخت هسته‌ای، کریستالیزاسیون، گازدهی زغال سنگ، کوره‌های

بیش‌تر مطالعه‌های صورت گرفته در ارتباط با رفتار جریان‌های گاز-جامد، بر روی بسترهای مستطیلی یا استوانه ای انجام شده است، با این حال بخش چشمگیری از بسترهای شارانیده، دارای دیواره‌های شیب دار بوده که به بسترهای شارانیده مخروطی^(۱) معروف هستند و همین ویژگی در بستر باعث ایجاد یک گرادیان سرعت

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: s.h.hosseini@ilam.ac.ir

(۱) Tapered Fluidized Bed

بنابراین، کاربرد دیدگاه لاگرانژی محدود به سامانه های با اندازه کوچک می شود. تاکنون کارهای مطالعاتی اندکی از شبیه سازی بسترهای مخروطی در منابع گزارش شده است. از آن جمله *Biswal* و *Sau* مطالعاتی بر روی یک بستر مخروطی در دو حالت با اندازه ذره های متفاوت برای مقایسه سرعت مینیمم شارانیده شدن و نسبت های انبساط بستر با داده های آزمایشگاهی انجام دادند. آن ها به کمک روش اویلرین-اویلرین (با به اصطلاح روش دو سیالی^(۳)) که رایج ترین روش در شبیه سازی بسترهای سیال می باشد، در حالت تقارن محوری بستر را شبیه سازی کردند [۱]. *Abdelmotalib* و همکاران [۱۰] هیدرودینامیک و انتقال گرمای یک بستر مخروطی گاز-جامد را با استفاده از استفاده از روش تئوری دمای دانه ای [۱۱، ۱۲] شبیه سازی کردند. این روش بر اساس تئوری جنبشی دمای دانه ای^(۳) است و از تشابه با تئوری جنبشی گازها به دست می آید [۱۲]. آن ها دریافتند که معادله کامل انتقال دمای دانه ای نتیجه های بهتری در قیاس با دمای دانه ای جبری برای پیش بینی افت فشار بستر منجر می شود. *Abdelmotalib* و همکاران در کار دیگری تأثیر ضریب انعکاسی^(۴) بر روی انتقال گرما و هیدرودینامیک ذره های درون بستر مخروطی را بررسی نمودند [۱۳]. نتیجه ها نشان می داد که این فاکتور اگر چه بر ضریب انتقال گرما از دیواره به درون توده ذره ها تأثیر به سزایی دارد، بر روی افت فشار بستر اثر ناچیزی از خود نشان می دهد. در پژوهش بعدی *Abdelmotalib* و *Im* نشان دادند که در شبیه سازی بسترهای مخروطی در نظر گرفتن بستر سه بعدی، نتیجه ها به طور چشمگیری نسبت به حالت دو بعدی بهبود خواهند یافت [۱۴].

در این پژوهش، شبیه سازی سه بعدی هیدرودینامیکی بستر مخروطی دارای ذره های دانه شیشه ای با استفاده از نرم افزار دینامیک سیال های محاسباتی (CFD) انجام شد. مدل فاز گسسته متراکم (DDPM) با بسته DEM برای تماس ذره-ذره در فاز ذره های مورد استفاده قرار گرفته و مدل آشفتگی پراکنده $k-\epsilon$ برای فاز گاز و مدل درگ گیداسپاو نیز برای محاسبه ضریب تبادل مومنتوم گاز-جامد استفاده شد. نتیجه های افت فشار پیش بینی شده و انبساط بستر که از شبیه سازی به دست می آید با داده های تجربی و کارهای مشابه مقایسه شدند. نظر به این که تاکنون در زمینه بسترهای فواره ای مخروطی از دیدگاه لاگرانژی DDPM کاری انجام نشده است، مطالعه حاضر که شبیه سازی سه بعدی بستر فواره ای مخروطی است،

سنگ معدن سولفید [۳] و فرآورش مواد غذایی [۴] و غیره کاربرد فراوانی دارند.

بسترهای شارانیده شده مخروطی می توانند بدون هیچ گونه ناپایداری، به عنوان نمونه با نوسان های کم فشار، عمل کنند. این بسترها برای شارانیده شدن مواد با توزیع گسترده اندازه ذره ها و نیز برای واکنش های گرماده مناسب هستند. یکی از مهم ترین فاکتورهای طراحی در بسترهای گاز-جامد سرعت کمینه شارانیده شدن می باشد. بر خلاف بسترهای گاز-جامد معمولی (استوانه ای)، در بسترهای مخروطی سرعت کمینه شارانیده شدن نه تنها تابعی از ویژگی های ذره ها و فاز سیال می باشد، بلکه به هندسه و زاویه بستر بستگی دارد که نشانگر پیچیدگی این سامانه ها است [۵].

در دو دهه اخیر بررسی هایی بر روی بسترهای مخروطی انجام شده است [۶، ۴-۲]. *Schaafsma* و همکاران [۶] الگوی حرکت ذره ها و پدیده ی جدایش در بسترهای مخروطی با استفاده از آزمایش جدایش و نیز آزمایش های ردیابی پوزیترون منتشر شده از ذره^(۱) انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که الگوی جریان و پدیده ی جدایش در این بسترها به طور کامل متفاوت از بسترهای استوانه ای رایج است. *Sau* و همکاران [۸، ۹] در زمینه هیدرودینامیک بسترهای مخروطی مدل هایی نیمه تجربی را برای پیش بینی سرعت کمینه شارانیده شدن و افت فشار بیشینه، به دست آوردند. کریمی و همکاران با استفاده از شبکه عصبی برخی پارامترهای هیدرودینامیکی همچون سرعت کمینه شارانیده شدن، سرعت کمینه شارانیده شدن کامل و افت فشار بیشینه در بسترهای شارانیده مخروطی با دقت بالایی تخمین زدند [۵].

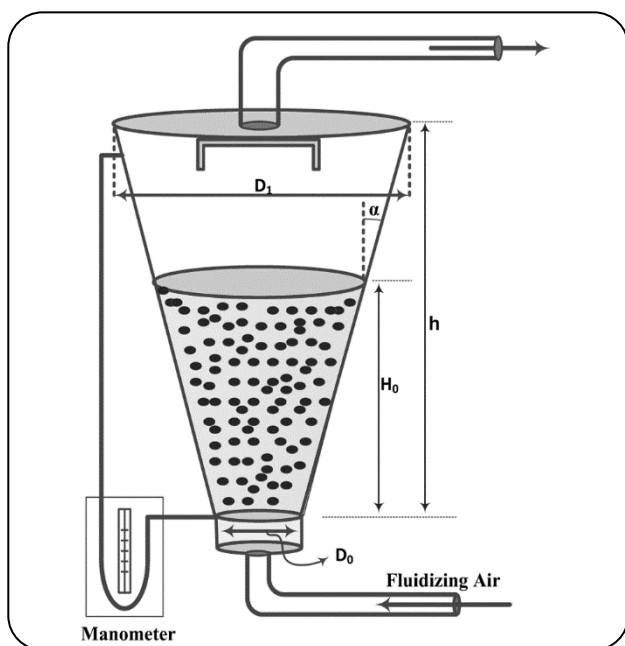
دو روش عمده برای حل عددی جریان های چند فازی همچون جریان درون بسترهای شارانیده مخروطی عبارتند از: روش اویلرین-اویلرین و روش اویلرین-لاگرانژی. در روش اویلرین-اویلرین، افت های متفاوت به عنوان محیط های قابل نفوذ و پیوسته در نظر گرفته می شوند. جز حجمی فازها توابع پیوسته ای از زمان و مکان هستند و مجموع آن ها برابر یک است. روش اویلرین-لاگرانژی فاز جامد را در سطح ذره و فاز گاز را به عنوان یک محیط پیوسته در نظر می گیرد. در این روش حرکت هر ذره به تنهایی و به طور مستقیم مورد محاسبه قرار می گیرد و بنابراین با افزایش تعداد ذره ها، محاسبه های سنگین و هزینه بر می شود، که در این حالت ضروری است از سخت افزارهایی با قدرت حافظه زیاد استفاده شود؛

(۱) PEPT

(۲) TFM

(۳) KTGF

(۴) Specularity coefficient



شکل ۱- بستر شارانیده شده مخروطی با مشخصه های مربوطه.

جریان ذره‌های جامد با دیدگاه DEM بررسی و مدل درگ گیداسپا^(۱)، که یکی از مدل‌های تأیید شده برای بیش‌تر سامانه‌های گاز-جامد و از آن جمله بسترهای حبابی است، برای محاسبه ضریب‌های تبادل مومنتوم گاز-جامد استفاده شده است. ضریب مدول یانگ برابر 10^4 pa و نسبت پواسان نیز 0.38 در نظر گرفته شده اند. در جدول ۱ شرایط مرزی مورد استفاده برای شبیه سازی بیان شده که دیده می شود در ورودی بستر شرط سرعت ثابت بدون وجود فاز ذره در نظر گرفته شده است. در دیواره بستر هم شرط عدم لغزش برای فاز گاز و تنش برشی صفر برای فاز ذره‌ها در نظر گرفته شد. در خروجی بستر یک مقدار برای فشار مشخص شده که برابر فشار جو است.

در جدول ۲ شرایط آزمایشگاهی و شبیه سازی برای این بستر از جمله ویژگی‌های هندسی بستر و ویژگی‌های فیزیکی ذره‌های لیست شده است. ارتفاع استاتیک بستر برابر 0.08 متر می‌باشد. ضریب ارتجاعی که معیار نرم بودن^(۴) برخورد یک ذره با دیواره و یا با ذره‌های دیگر است برای برخورد ذره-ذره 0.9 در نظر گرفته شده است. ضریب ارتجاعی کم‌تر بین ذره‌ها و دیواره به معنای برخوردهای محکم‌تر بوده و موجب افزایش هدررفت انرژی نوسانی ذره‌ها در دیواره می شود که باعث کاهش دمای دانه ای و افزایش

می‌تواند مبنای خوبی برای کارهای بیش‌تر در زمینه شبیه سازی CFD این بسترها باشد.

مقیاس آزمایشگاهی

بستر مورد استفاده در این پژوهش که در شکل ۱ نشان داده شده، یک بستر شارانیده مخروطی به ارتفاع 520 mm و قطر 50 mm در پایین و 135 mm در بالا می باشد. در قسمت پایین و پیش از ورودی بستر ذره‌های شیشه‌ای با قطر 3 mm برای ورود یکنواخت هوا به داخل بستر، در این مسیر ایجاد مقاومت می کنند.

یک مانومتر برای اندازه گیری افت فشار بستر مطابق شکل ۱ به آن متصل شده است. طول مانومتر^(۱) m بوده که با کربن تتراکلرید پر شده است. هوای ورودی با دمای 301 K (با دانسیته 1.17 kg/m³ و 1.82×10^{-5} kg/m.s) به عنوان سیال خشک کننده از طریق یک دریافت کننده و یک بستر دارای دانه‌های سیلیکاژل خشک می شد و مقدار جریان هوا برای ورود به بستر تنظیم می‌شد. ذره‌های شیشه‌ای با قطر 2 mm و چگالی 2600 kg/m³ در دمای 301 K و فشار اتمسفری به حالت شارانیده شده در می آمدند. افت فشار و انبساط بستر در دو سرعت متفاوت هوای ورودی یعنی 2.83 و 3.54 m/s اندازه گیری می شدند. ارتفاع استاتیک اولیه بستر نیز برابر 0.08 متر بود.

شبیه سازی CFD-DEM

در این کار، شبیه سازی با استفاده از نرم افزار دینامیک سیال‌های محاسباتی فلوئنت ۱۸٫۱ در حالت سه بعدی و به روش اویلرین-لاگرانژی انجام شد. روش DDPM روشی بر پایه تحلیل خط مسیرهای لاگرانژی است و روشن است که با افزایش تعداد ذره‌های محاسبه‌های آن به نسبت بیش‌تری پیچیده می شود. فاز گاز به عنوان فاز پیوسته در نظر گرفته می شود و برای آن در دامنه مورد نظر از حل معادله‌های ناویر-استوکس^(۲) استفاده می شود که در آن در هر سلول محاسباتی اثر حضور فاز ذره‌ها لحاظ می‌شود. فاز پراکنده می‌تواند با فاز پیوسته (سیال) تبادل مومنتوم، جرم و انرژی داشته باشد. یک فرض اساسی که در این روش انجام می‌گیرد این است که فاز پراکنده درصد حجمی کم‌تری اشغال میکند. برای تعیین فضای شبیه سازی بستر مورد نظر به ارتفاع 520 mm و قطر پایینی 50 mm و قطر بالایی 135 mm از نرم افزار DesignModeler استفاده شد.

(۱) Manometer

(۲) Navier-Stokes

(۳) Gidaspow

(۴) Elastic

جدول ۱- شرایط مرزی مورد استفاده برای شبیه سازی بستر مخروطی سیال.

موقعیت	نوع	توضیحات
ورودی	ورودی-سرعت	توزیع یکنواخت برای فاز گاز برای فاز جامد ورود ذره وجود ندارد
خروجی	خروجی- فشار	اتمسفریک
دیواره	دیواره ساکن	شرط عدم لغزش ^(۱) برای فاز گاز تنش برشی صفر برای فاز جامد

(1) No slip conditions

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

$$\begin{aligned} (\alpha_g \cdot \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) &= -\alpha \nabla p + \nabla \cdot [\alpha_g (\mu_t + \mu_g) \times \\ &(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T)] + \alpha_g \rho_g \vec{g} + \vec{F}_{DEM} \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن چگالی فاز گاز، بردار سرعت، α_g تخلخل و \vec{F}_{DEM} نمایانگر فشار استاتیک، و نیروی تولید شده در اثر تماس بین فاز گاز و ذره‌های جامد می باشد. در اغلب بسترهای گاز-جامد مانند بسترهای فواره ای برای هر دو روش DEM و TFM مدل آشفته‌گی k-ε برای شبیه سازی رفتار آشفته جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\mu_t = C_\mu \rho_g k^\nu / \epsilon \quad (3)$$

که C_μ ضریب ثابتی با مقدار ۰٫۰۹ و k و ϵ به ترتیب انرژی جنبشی آشفته و سرعت انتشار آن است که از حل معادله‌های زیر به دست می‌آیند:

$$(\alpha_g \cdot \rho_g k \vec{v}_g) = \nabla \cdot \left[\alpha_g \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \times \nabla k \right] - \quad (4)$$

$$(\alpha_g \rho_g k) + \nabla \frac{\partial}{\partial t} \alpha_g \rho_g \sigma_k + \alpha_g G_k$$

$$(\alpha_g \rho_g \epsilon \vec{v}_g) = \nabla \cdot [\alpha_g (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \times \nabla \epsilon] \quad (5)$$

$$(\alpha_g \rho_g \epsilon) + \nabla \frac{\partial}{\partial t} \alpha_g \epsilon + \alpha_g \frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho_g \epsilon)$$

در اینجا σ_k برابر یک و σ_ϵ برابر ۱٫۳، به ترتیب عددهای Prandtl آشفته برای k و ϵ هستند. همچنین C_1 و C_2 ثوابت مدل به ترتیب با مقدارهای ۱٫۴۴ و ۱٫۹۲ هستند. G_k نیز به معنای تولید انرژی جنبشی ناشی از گرادینان سرعت متوسط و به شکل زیر می‌باشد:

$$G_k = \mu_t (\nabla \vec{u}_g + (\nabla \vec{u}_g)^t) : \nabla \vec{u}_g \quad (6)$$

جدول ۲- شرایط آزمایشگاهی [۱] و شبیه سازی برای بستر مخروطی.

پارامتر	مقدار
قطر پایینی (m)	۰٫۰۵
قطر بالایی (m)	۰٫۱۳۵
ارتفاع کلی بستر (m)	۰٫۵۲
ارتفاع استاتیک بستر (m)	۰٫۰۸
سرعت ورودی گاز (m/s)	۲٫۸۳ و ۳٫۵۴
چگالی گاز (kg/m ³)	۱٫۱۷
گرانروی گاز (kg/m.s)	۱٫۸۲ × ۱۰ ^{-۵}
چگالی ذره (kg/m ³)	۲۶۰۰
قطر ذره (mm)	۲
پرکنی ابتدایی ذره‌ها	۰٫۴۸
ضریب ارتجاعی ^(۱)	۰٫۹
گام زمانی (s)	۰٫۰۰۰۱
شرط همگرایی	۰٫۰۰۱

(1) Restitution coefficient

جزء حجمی ذره‌ها می‌شود. با این حال، ضریب ارتجاعی ذره‌ها-دیواره نقش محدودی در تأثیرگذاری بر روی الگوهای جریان گاز دارد، که مطابق با کارهای بسیاری است که در آن تغییر ضریب ارتجاعی ذره‌ها-دیواره بر پیش بینی مدل اثر معناداری ندارد [۱۸]. برای هر دو فاز گاز و جامد معادله‌های استفاده شده به ترتیب زیر بیان می‌شوند:

فرمولاسیون مدل

معادله‌های پیوستگی و مومنتوم برای فاز گاز به صورت زیر است:

معادله حرکت ذره‌ها

حرکت‌های چرخشی و انتقالی ذره i م با قانون دوم نیوتن و توسط ممان زاویه ای بصورت زیر به دست می آید:

$$m_i \frac{d\vec{v}_{pi}}{dt} = m_i \vec{g} - \vec{F}_p + \vec{F}_d + \vec{F}_c + \vec{F}_{fr} \quad (7)$$

$$I_i \frac{d\omega_{pi}}{dt} = T_i \quad (8)$$

که در آن \vec{g} ، \vec{v}_{pi} ، m_i و I_i و ω_i به ترتیب جرم ذره‌ها، سرعت انتقالی، شتاب گرانش، اینرسی چرخشی ذره و سرعت زاویه ای ذره هستند. T_i بمایانگر گشتاور کلی وارده بر ذره‌ها توسط ذره‌های برخوردی و دیواره می‌باشد. در معادله (۷) بیانگر نیروی گرادیان فشار وارد بر ذره بوده و توسط معادله‌ی زیر به دست می آید:

$$\vec{F}_p = V_{pi} \nabla p \quad (9)$$

برای مدل کردن برخورد ذره‌های مدل تماسی پیشنهاد شده توسط Cundall و Strack استفاده شده است. قانون برخورد غیرخطی Hertzian-dashpot که در آن نیروی ذره ۱ بر ذره ۲ توسط معادله‌ی زیر به دست می‌آید، استفاده شده است:

$$\vec{F}_{1,2} = (K_H \delta^{3/2} + \gamma ((\vec{v}_r - \vec{v}_i) \cdot \vec{e}_{1,2})) \vec{e}_{1,2} \quad (10)$$

که در آن δ عمق نفوذ ذره-ذره و ذره-دیواره می باشد، $\vec{e}_{1,2}$ بردار یکه و K_H مدول موثری است که از مدول‌های یانگ E_1 و E_2 دو ذره ی برخوردی و نسبت پواسن‌های v_1 و v_2 به دست می‌آید یعنی:

$$K_H = \frac{4}{3} \frac{E_1 E_2}{E_2 (1 - v_1^2) + E_1 (1 - v_2^2)} \sqrt{\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}} \quad (11)$$

$$\gamma = -2 \sqrt{\frac{K_H \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \ln(\eta)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(\eta)^2}}} \quad (12)$$

که m_1 و m_2 جرم و v_1 و v_2 سرعت ذره‌های ۱ و ۲ هستند. γ ضریب میرایی و η نیز ضریب ارتجاعی است. در این کار نیروی اصطکاکی بین ذره‌ها از قانون اصطکاک کلمب به دست می آید:

$$\vec{F}_{fr} = (\mu_s + \mu_{rolling}) \vec{F}_{normal} \quad (13)$$

که μ_s ضریب اصطکاک ایستایی، $\mu_{rolling}$ ضریب اصطکاک دورانی و F_{normal} اندازه‌ی نیروی نرمال در صفحه تماس است. برای نیروی اصطکاکی عکس حرکت مماسی است.

سرانجام نیروی درگ وارد بر ذره‌های \vec{F}_d در معادله (۶) از معادله‌ی

زیر به دست می‌آید:

$$\vec{F}_{d,i} = \beta_{gp} (\vec{u}_g - \vec{v}_{pi}) V_{pi} / (1 - \alpha_g) \quad (14)$$

که β_{gp} تبادله مومنتوم روی سطح مشترک است و از معادله‌ی گیداسپاو مطابق زیر به دست می آید:

$$\beta_{gp} = \begin{cases} \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_g \rho_g (1 - \alpha_g)}{d_{pi}} \alpha_g^{-\gamma_{gs}} & \alpha_g \geq 0.8 \\ \frac{150 (1 - \alpha_g)^2 \mu_g + 1.75 \Delta (1 - \alpha_g) |\vec{u}_g - \vec{v}_{pi}|}{\alpha_g d_{pi}^2} & \alpha_g \geq 0.8 \end{cases} \quad (15)$$

$$C_D = \begin{cases} 24 (1 + 0.15 Re_{pi}^{0.75}) & Re_{pi} < 1000 \\ 0.44 & Re_{pi} \geq 1000 \end{cases} \quad (16)$$

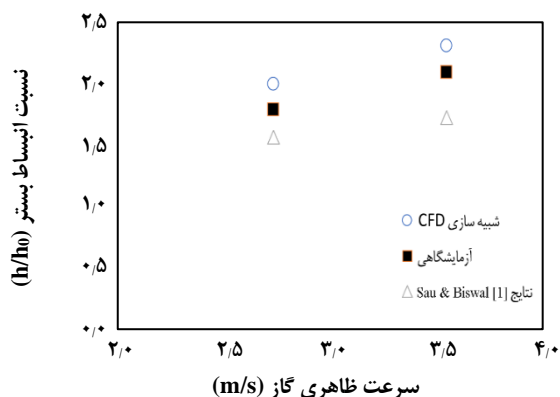
$$Re_{pi} = \frac{\alpha_g \rho_g |\vec{u}_g - \vec{v}_{pi}| d_{pi}}{\mu_g} \quad (17)$$

که C_D ضریب نیروی درگ، d_{pi} قطر ذره ی i و Re_{pi} عدد رینولدز ذره است.

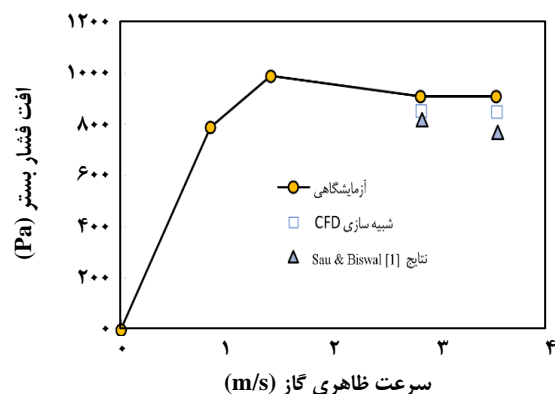
نتیجه‌ها و بحث

اعتبار سنجی

در این کار هیدرودینامیک ذره‌های شیشه‌ای با قطر ۲ mm و از نوع گلداتر D در یک بستر شارائیده مخروطی با استفاده از دینامیک سیال‌های محاسباتی (CFD) شبیه‌سازی و مطالعه شده است. در ارزیابی اعتبار و دقت مدل مورد نظر، نتیجه‌های خروجی مدل CFD را با داده‌های تجربی متناظر و موجود مقایسه می‌کنیم. تنها داده‌های گزارش شده توسط *Sau* و *Biswal* [۱] برای بستر مخروطی، افت فشار کل و انبساط بستر بوده است. این دو پارامتر بخصوص افت فشار از اهمیت بالایی برخوردار بوده به طوری که رابطه مستقیم با سرعت دارد. شکل ۲ نتیجه‌های تجربی و محاسباتی افت فشار در برابر سرعت ظاهری گاز را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود در ابتدای ورود سیال به بستر هر چه سرعت گاز زیاد شود نیروی وارد بر ذره‌ها و افت فشار بستر افزایش می‌یابد و با افزایش دوباره سرعت سیال روند افزایشی مقدار افت فشار ادامه می‌یابد تا اینکه به نقطه شروع شارائیده شدن می‌رسیم که در آن نیروی وارد بر ذره‌ها از طرف سیال با وزن ذره‌ها (mg) برابری می‌کند. به این سرعت، سرعت کمینه شارائیده شدن u_{mf} گفته می‌شود که بسته به



شکل ۳- مقایسه نتیجه‌های آزمایشگاهی [۱] و شبیه سازی نسبت انبساط بستر در سرعت‌های گوناگون.



شکل ۴- مقایسه نتیجه‌های افت فشار بستر به کمک CFD با نتیجه‌های تجربی [۱] در دو سرعت متفاوت ۲/۸۳ و ۳/۵۴ متر بر ثانیه.

در این شکل مقایسه شده اند. همان گونه که دیده می‌شود با افزایش سرعت گاز ورودی به بستر از طریق توزیع کننده گاز، نسبت انبساط بستر نیز افزایش می‌یابد، چراکه با افزایش سرعت گاز قطر و اندازه حباب افزایش یافته که این امر منجر به افزایش انبساط بستر می‌شود. این موضوع با یافته‌های محاسباتی دیگر پژوهشگران در سامانه‌های گاز-جامد حبابی که به روش اولرین-اولرین صورت گرفته است، انطباق قابل پذیرشی را نشان می‌دهد [۱۷، ۱۶]. میانگین خطای نسبی شبیه سازی حاضر در محاسبه نسبت انبساط بستر برابر ۱۱/۰۶٪ می‌باشد که از نتیجه‌های خطای به دست آمده از شبیه سازی *Sau* و *Biswal* [۱] کم‌تر است. همان گونه که دیده می‌شود نتیجه‌های شبیه سازی انجام شده توسط *Sau* و *Biswal* [۱] نسبت به نتیجه‌های تجربی بسیار پایین‌تر پیش بینی شده‌اند. در مجموع با توجه به یافته‌های بالا، چنین استنتاج می‌شود که مدل پیشنهاد شده در این پژوهش قابلیت مناسبی را در پیش بینی رفتار هیدرودینامیکی بسترهای شارانیده شده مخروطی داراست. بنابراین با اطمینان بالا می‌توان نتیجه‌های دیگر پارامترهای هیدرودینامیکی این بسترها را با مدل پیشنهادی ارزیابی و ارایه نمود که در ادامه تشریح شده اند.

شکل ۴ میانگین جز حجمی ذره‌ها در طول بستر در دو سرعت گوناگون برای ذره‌های ۲ mm را نشان می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود در ناحیه ورودی بستر (توزیع کننده گاز) جایی که سیال وارد می‌شود، ذره‌های درون بستر جابه‌جا شده و به حرکت در می‌آیند و از آنجایی که گاز بصورت پیوسته وارد بستر می‌شود در نتیجه در ناحیه ورودی بستر جز حجمی ذره‌های کم‌تر از سایر نقطه‌ها است. با افزایش ارتفاع از توزیع کننده گاز، تراکم ذره‌ها جابه‌جا شده

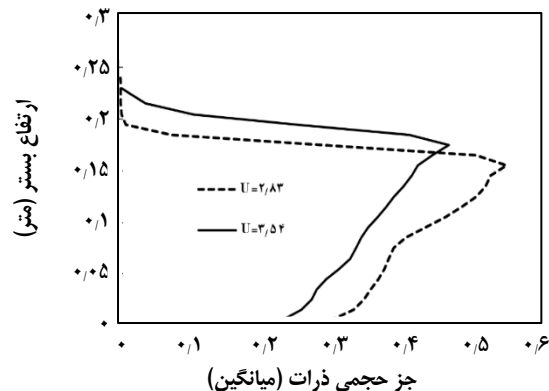
نوع و اندازه ذره‌ها و بستر مقدارهای گوناگونی دارد [۵]. در این نقطه بیش‌ترین مقدار افت فشار را داریم و از این نقطه به بعد به دلیل رشد و ترکیبگی حباب‌ها و نیز نبود اثرهای اولیه انبساط بستر (start-up) با افزایش سرعت سیال افت فشار تغییر چشمگیری ندارد که این امر در هر دو نمودار آزمایشگاهی و شبیه سازی شکل ۲ قابل دیدن است. همچنین دیده می‌شود که افت فشار بستر در دو سرعت ۳/۵۴ m/s و ۲/۸۳ m/s به ترتیب برابر با ۸۴۹ pa و ۸۴۵ pa به دست آمده اند که با نتیجه‌های آزمایشگاهی متناظر یعنی حدود ۹۰۴/۴۳ pa برای هر دو سرعت، تفاوت اندکی دارند که بیانگر مطلوب بودن نتیجه‌های مدل حاضر است. همچنین این یافته‌ها با نتیجه‌های شبیه سازی *Sau* و *Biswal* [۱] که با استفاده از TFM به صورت تقارن محوری در دو بعد انجام شده [۱] مقایسه شده اند. افت فشار بستر با استفاده از مدل این پژوهشگران [۱] در دو سرعت ۳/۵۴ m/s و ۲/۸۳ m/s به ترتیب ۸۲۰ pa و ۷۷۰ pa محاسبه شده است. میانگین خطای نسبی شبیه سازی حاضر در محاسبه افت فشار برابر ۶/۵۷٪ می‌باشد که از نتیجه‌های خطای به دست آمده از شبیه‌سازی *Sau* و *Biswal* [۱] کم‌تر است. این امر می‌تواند به دقت مدل روش اولرین-لاگرانژی و نیز کامل بودن دامنه محاسباتی که سه بعدی بودن مسئله است نسبت داد.

پارامتر دیگری که بسیاری از پژوهشگران در ارزیابی صحت سنجی مدل خود در سامانه‌های گاز-جامد مورد مطالعه قرار داده اند، انبساط بستر می‌باشد [۱۴، ۱۵]. شکل ۳ نسبت انبساط بستر، یعنی ارتفاع ثانویه بستر منبسط شده به ارتفاع اولیه آن، برای سرعت‌های گوناگون را نشان می‌دهد. نتیجه‌های شبیه‌سازی با مقدارهای آزمایشگاهی و شبیه‌سازی ارایه شده توسط *Sau* و *Biswal* [۱]

همچنین دیده می‌شود که حباب‌ها در طول مسیر دستخوش رشد ($t = 3/2$ s)، به هم پیوستگی رشد ($t = 4$ s) و ترکیدن و خارج شدن از سطح بالای بستر می‌شوند.

به تقریب برای همه موردها (شکل‌های ۵ و ۶) غلظت ذره‌ها در منطقه مرکزی کم‌تر از نزدیک دیواره است و این به خاطر شکل‌گیری و افزایش حباب‌ها در منطقه مرکزی است. وجود پیوسته جریان سیال در آغاز بستر (خروجی از توزیع کننده گاز) سبب جریان چشمگیر رو به بالای ذره‌ها می‌شود و این همان دلیل کاهش لحظه‌ای جز حجمی در ابتدای بستر بوده که در شکل ۴ و ۵ نمایان است. در شکل‌های ۵ و ۶ بخش الگوی جریان حباب‌ها در توزیع کننده شکل می‌گیرند که ذره‌ها را مجبور به حرکت به سمت بالا می‌کنند. این حباب‌ها که به سمت بالا حرکت می‌کنند، سرانجام تبدیل به لخته در قسمت بالای بستر می‌شوند. هنگامی که ذره‌های جابه‌جا شده به ورودی بستر برمی‌گردند، چرخش و مخلوط شدن ذره‌ها دوباره ادامه پیدا می‌کند. موضوعی که در طول سال‌ها کم‌تر مورد مطالعه قرار گرفته است تشکیل لخته است. نخست در سال ۱۹۶۷ میلادی به عنوان نوعی از رژیم‌های شارانیده شدن شناخته شده و از آن زمان یکی از انواع رژیم جریان نام‌گذاری شده است. لخته به‌طور ساده یک حباب است که قطر آن به تقریب برابر با قطر خود بستر است. گذار از حالت رژیم حبابی به لخته‌ای می‌تواند در بسترهای با نسبت کم قطر بستر به ارتفاع ایستایی ذره‌ها مانند راکتورهای مقیاس آزمایشگاهی و واحدهای عملیاتی با مقیاس کوچک رخ دهد. لخته به‌طور کلی به دو نوع تقسیم می‌شود: لخته متقارن (دماغه گرد و دماغه مربعی) و لخته دیواری [۲۰].

بر اساس کار *Lettieri* و همکاران [۲۱] اگر سه شرط: (۱) بیش‌ترین اندازه حباب بیش از ۰/۶ برابر قطر بستر باشد، (۲) سرعت سطحی گاز به اندازه کافی بالا باشد و (۳) بستر به اندازه کافی عمیق باشد، فراهم شود شارانیده شدن از نوع لخته‌ای می‌تواند اتفاق افتد. همچنین *Baeyens* و *Geldart* شرط دوم و سوم را ترکیب و رابطه‌ای بر حسب قطر بستر و سرعت کمینه شارانیده شدن برای محاسبه کم‌ترین سرعت هوای ورودی مورد نیاز برای ایجاد رژیم لخته‌شدگی را به‌دست آوردند [۲۲]. با مقایسه بستر مورد نظر مطالعه با شرایط یادشده و با توجه به اینکه سرعت سطحی هوا نیز به اندازه کافی بالا می‌باشد امکان تشکیل رژیم لخته‌شدگی در صورت افزایش ارتفاع استاتیک بستر وجود دارد. در قسمت پایینی شکل‌های ۵ و ۶ هم که الگوی حرکت ذره‌ها نمایش داده شده رفتار گذرا و ناپایدار ذره‌ها به‌طور کامل روشن است. جریان سیال ورودی، ذره‌هایی را



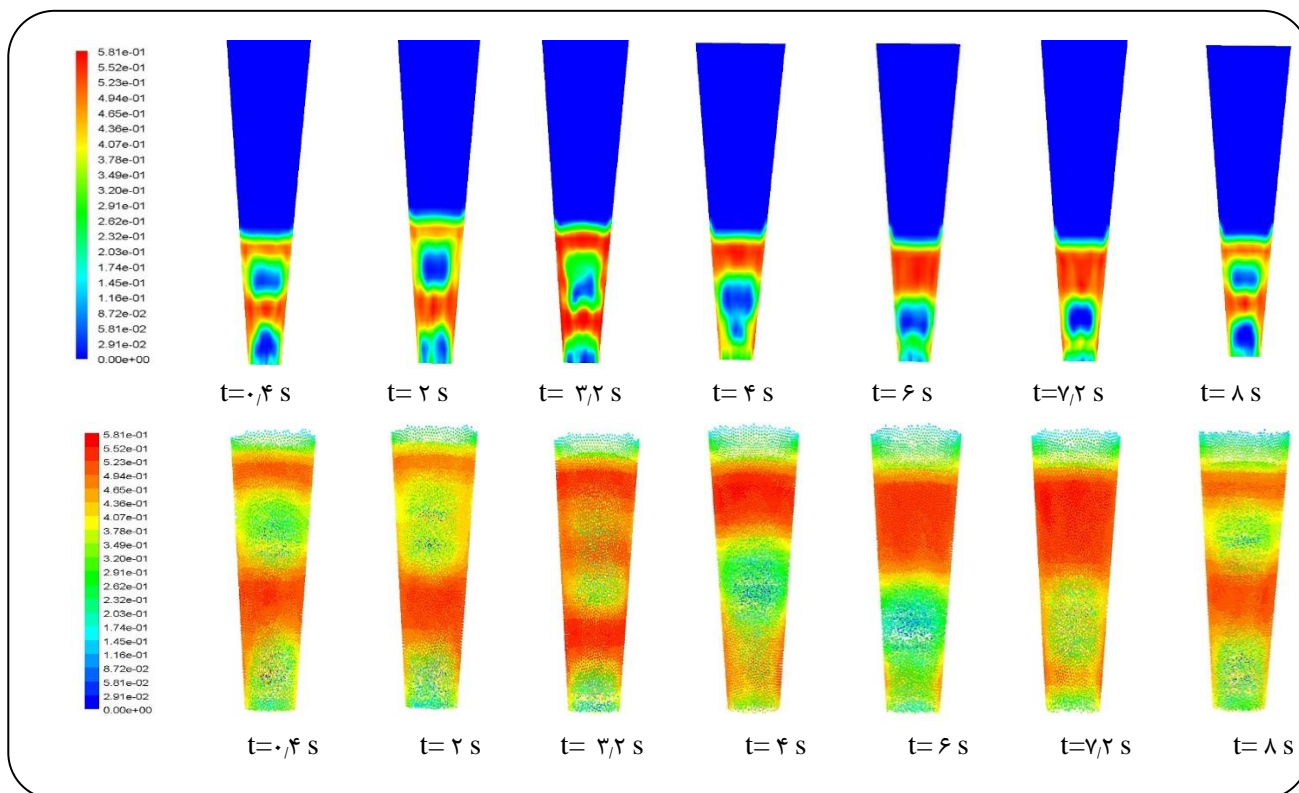
شکل ۴- نمودار جز حجمی ذره‌ها برای بستر مخروطی سیال در مقطع‌های گوناگون بستر.

از سمت پایین رفته رفته (جز حجمی ذره‌ها) افزایش می‌یابد. این روند تا جایی ادامه خواهد داشت که ذره‌ها سرعت خود را از دست داده به طوری که ساکن شده و در اثر نیروی گراویتی از کناره‌های دیواره بستر به درون آن برگشت می‌یابند. در ناحیه بالاتر بستر ذره‌های دیگر موجود نمی‌باشند به طوری که تنها سیال هوا در این ناحیه در حال خروج از بستر است.

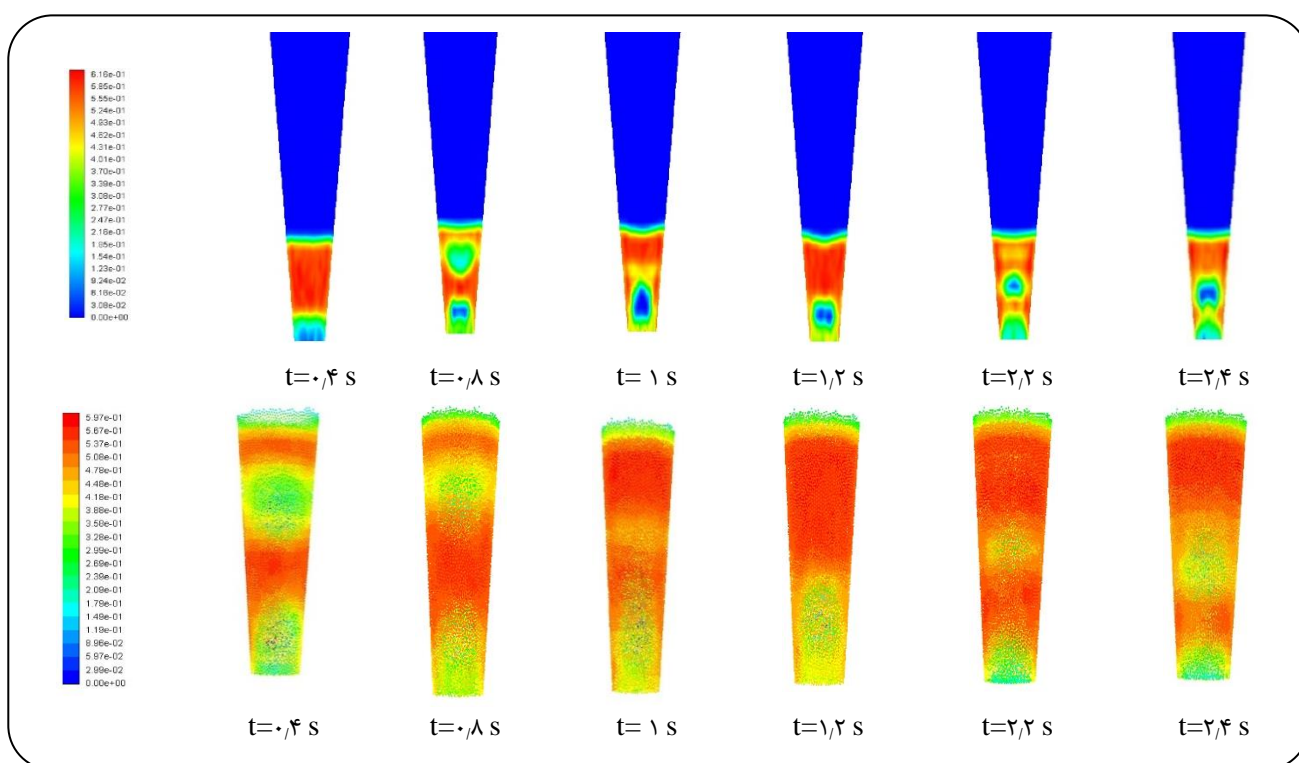
مقایسه متوسط جز حجمی ذره‌ها در دو سرعت متفاوت در شکل ۴ به وضوح نشان می‌دهد که متوسط جز حجمی ذره‌ها در طول بستر تا جایی که به بیش‌ترین مقدار خود برسد، در سرعت بالاتر ($U = 3.52$) نسبت به زمانی که سرعت سیال کم‌تر است ($U = 2.83$)، مقدار کم‌تری دارد. از طرفی در حالتی که گاز سرعت بیش‌تری دارد قطر حباب‌های تشکیل شده درون بستر نسبت به سرعت‌های پایین گاز بیش‌تر بوده که این موضوع سبب انبساط بیش‌تر بستر در سرعت‌های بالاتر می‌شود. باید توجه شود که در بسترهای معمولی دارای ذره‌های نوع B توزیع جزء حجمی ذره‌ها در طول بستر به تقریب یکنواخت است [۱۹، ۱۸]. بنابراین می‌توان این نکته مهم را استنتاج کرد که توزیع غلظت ذره‌های جامد در طول بسترهای معمولی و مخروطی به دلیل تفاوت در هندسه آن‌ها یکسان نمی‌باشد.

مقایسه کانتورهای سرعت، جز حجمی و الگوی حرکت جریان در فاز سیال و ذره

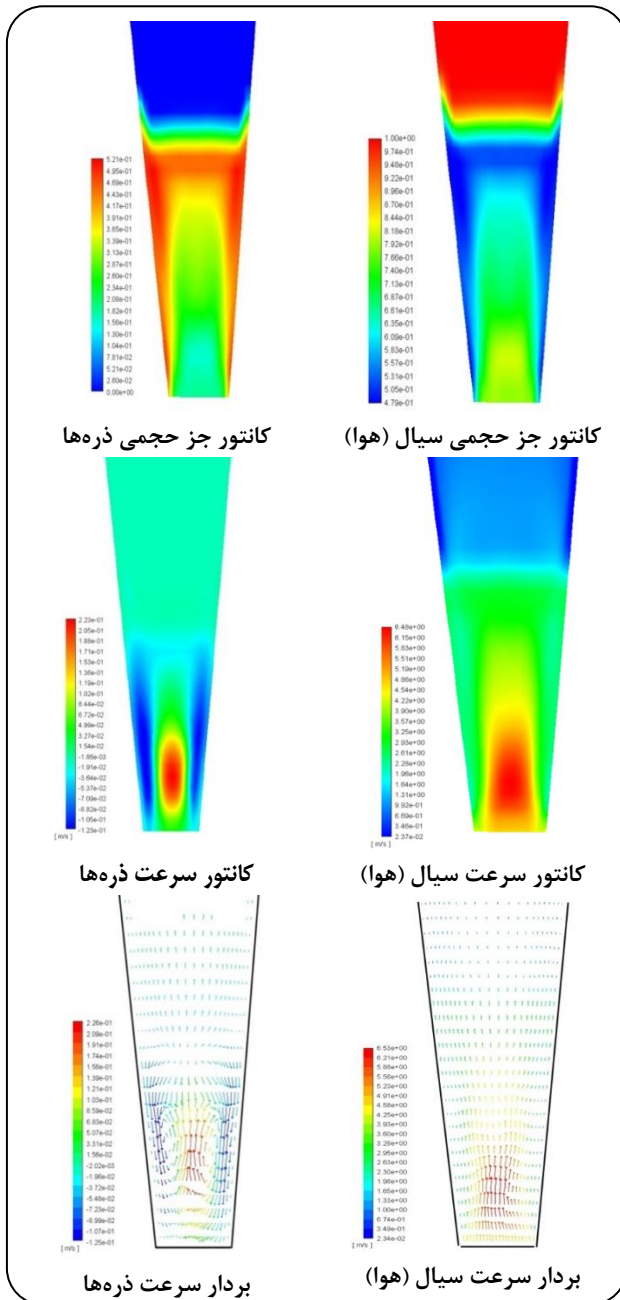
شکل‌های ۵ و ۶ نمودار کانتور جز حجمی ذره‌ها و الگوی جریان ذره‌ها در مقاطع زمانی متفاوت در دو سرعت شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها مشخص است که نخست حباب‌ها در پایین بستر شکل می‌گیرند و در امتداد محور بستر بالا می‌روند.



شکل ۵ - نمودار کانتور جز حجمی ذره‌ها و الگوی جریان ذره‌ها در مقاطع زمانی متفاوت در سرعت ورودی $u=3/54$.



شکل ۶ - نمودار کانتور جز حجمی ذره‌ها و الگوی جریان ذره‌ها در مقاطع زمانی متفاوت در سرعت ورودی $u=2/83$.



شکل ۷- مقایسه بردار سرعت، کانتور سرعت و جز حجمی ذره‌ها و سیال.

به صورت توان تراکمی طیف سنجی در محور عمودی رسم شده است. همان گونه که در شکل ۸ دیده می شود فرکانس غالب برابر $2/3$ Hz به دست آمده است. نتیجه‌های پژوهش Zhang و همکاران [۲۳]، مقدار یافت شده برای فرکانس غالب در این پژوهش را تأیید می نماید. در کار جانگ و ارسطوپور [۲۴] برای بستر سیال این فرکانس غالب

که در مسیر خود می بیند با خود حمل کرده به بالای بستر منتقل می کند در آنجا از طریق کنارهای دیواره به پایین برگشت می خورد و همین سیکل تکرار می شود. همان گونه که دیده می شود بین شکل های الگوی جریان و کانتور جز حجمی تطابق خوبی وجود دارد و روند تشکیل حباب در این شکل ها بیان شده است و با توجه به توضیح های داده شده در قسمت الگوی جریان ذره های مربوط به شکل های ۴ و ۵، چگونگی تشکیل حباب ها قابل درک می باشد.

در شکل ۷ مقایسه بردار سرعت، کانتور سرعت و جز حجمی ذره‌ها و سیال به طور جداگانه نشان داده شده اند. همان گونه که در این شکل ها مشخص است تطابق مناسبی بین نمودارهای بردار و کانتور سرعت با کانتور جز حجمی در هر دو فاز ذره‌ها و سیال وجود دارد در قسمت مربوط به بردار سرعت سیال مشخص است که در آغاز بستر سرعت سیال زیاد و جز حجمی ذره‌ها کم است با افزایش ارتفاع از ورودی بستر سرعت سیال بتدریج کاهش و جز حجمی ذره‌ها افزایش می یابد. میدان برداری این سامانه های رفتار دینامیک آن ها را نشان می دهد.

بردار سرعت ذره‌ها نشان می دهد که بیشترین سرعت ذره‌ها در قسمت مرکزی و محور بستر و کمترین سرعت ذره‌ها در کنار دیواره می باشند. ذره‌ها در قسمت میانی بستر توسط سیال به سمت بالا و تا ناحیه فواره ای می روند و سپس در آنجا پخش می شوند و از طریق کنارهای دیواره به سمت پایین بستر می آیند، به همین دلیل است که سرعت ذره‌ها در کنار دیواره منفی می باشد. شکل کانتور سرعت ذره‌ها هم به طور کامل منطبق با بردار سرعت ذره‌ها است و می بینیم که در اطراف دیواره تعداد ذره‌های بالا رونده کم و در محور بستر زیاد است. کانتور جز حجمی ذره‌ها هم تأیید کننده مطالب بالا است و دیده می شود که در راستای محور بستر که مجرای عبور سیال است کمترین جز حجمی ذره‌ها وجود دارد.

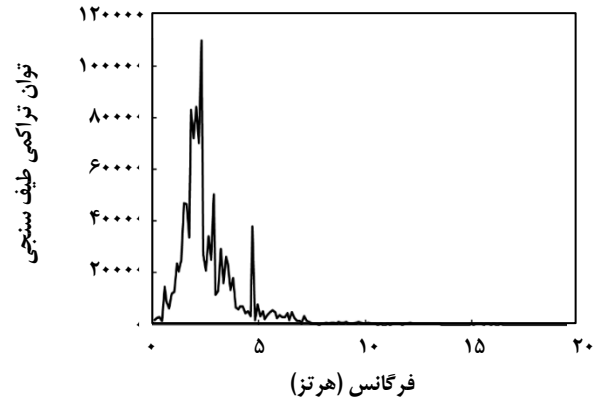
عامل مهم دیگری که از روی آن می شود جنبه های ساختاری و هیدرودینامیکی بستر را دقیق تر ارزیابی کرد آنالیز دامنه فرکانسی است. آنالیز دامنه فرکانسی که تخمینی از توان تراکمی طیف سنجی^(۱) است از تبدیل اطلاعات دامنه زمانی فشار به دامنه فرکانسی به دست می آید و از آن می توان برای شناسایی رژیم های متفاوت جریان در بسترهای فواره ای و دیگر سامانه های چند فازی استفاده کرد. بنابراین در PSD فرکانس غالب سیگنال سری زمانی فشار یا ارتعاش با تابع تبدیل فوریه آنالیز می شود. در شکل ۸، بازه های زمانی را تبدیل و برحسب فرکانس در محور افقی و نوسان های سیگنال فشار را

(۱) Power Spectral Density (PSD)

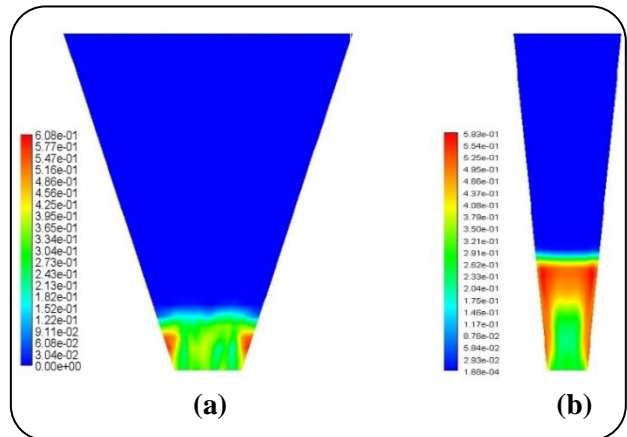
شکل ۹ نتیجه‌های شبیه‌سازی مربوط به کانتور متوسط جزء حجمی ذره‌ها در بستر استفاده شده توسط *Sau* و *Biswal* [۱] که دارای ذره‌ها از نوع گلدرات D بوده و نیز بستر بررسی شده توسط *جانگ* و *ارسطوپور* [۲۴] که دارای ذره‌ها از نوع گلدرات B می باشد، را نشان می دهد. همان گونه که دیده می شود توزیع ذره‌های درون این سامانه‌ها به طور کامل متفاوت بوده و بیانگر رفتار هیدرودینامیک متفاوت در این بسترها می باشد. بستر شبیه سازی شده *جانگ* و *ارسطوپور* [۲۴] رفتاری حبابی، حباب شدگی، از خود نشان می دهد که در آن توزیع ذره‌های به تقریب یکنواخت تر است و نیز جز حجمی ذره‌ها در هر دو سامانه در کناره دیواره به دلیل برگشت ذره‌ها در اطراف دیواره بیش‌ترین مقدار را داراست. همچنین تفاوت دیده شده به نسبت اندازه‌های هندسی بسترها، نسبت ارتفاع ایستایی به قطر توزیع کننده گاز و نوع ذره‌های درون بسترها مربوط می شود. همان گونه که در بالا اشاره شد نتیجه‌های شبیه‌سازی بستر *Sau* و *Biswal* [۱] بیانگر آن است که این بستر رفتاری شبیه بسترهای لخته‌ای، لخته شدگی، دارا می باشد.

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی سه بعدی هیدرودینامیکی ذره‌های دانه شیشه‌ای در بستر مخروطی دارای ذره‌های نوع گلدرات D و B با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیال‌های محاسباتی (CFD) انجام شد. مدل فاز گسسته متراکم (DDPM) با بسته DEM برای تماس ذره-ذره در فاز ذره‌های مورد استفاده قرار گرفت. مدل آشفته پراکنده k-ε برای فاز گاز و مدل درگ گیداسپاو نیز برای محاسبه ضریب‌های تبادل مومنتوم گاز-جامد استفاده شد. نتیجه‌های به‌دست آمده از نرم افزار با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و دیده شد که دقت این روش نسبت به روش اویلرین بیش‌تر و پیش بینی‌های آن دقیق‌تر است. نتیجه‌های پیش بینی شده افت فشار و انبساط بستر به‌دست آمده از شبیه سازی‌ها با داده‌های تجربی و با بسیاری از کارهای همانند [۱،۱۱،۱۲،۲۸] همخوانی خوبی داشت و تأثیر شبیه‌سازی سه بعدی و روش لاگرانژی را نمایان کرد. همچنین با مقایسه نتیجه‌های این کار با کار *جانگ* و *ارسطوپور* [۲۴] که نمونه‌ی دیگری از یک بستر مخروطی است مشخص شد که رفتار بسترهای فواره ای بسته به اندازه و هندسه بستر، زاویه مخروطی بستر و نیز نوع و اندازه ذره‌ها می‌تواند به طور کامل متفاوت از هم‌دیگر باشد. با توجه به این‌که تاکنون در زمینه بسترهای فواره‌ای مخروطی از دیدگاه لاگرانژی DDPM



شکل ۸ - نمودار جز حجمی ذره‌های برای بستر مخروطی سیال در مقاطع گوناگون بستر.



شکل ۹- مقایسه نتیجه‌های شبیه‌سازی جزء حجمی ذره‌ها در بسترهای (a) *جانگ* و *ارسطوپور* [۲۴] و (b) *Biswal* [۱].

در سه مقیاس آزمایشگاهی یک کیلویی و چند کیلویی اندازه‌گیری شده و در هر مقیاس فرکانس غالبی در حدود ۳/۱۸ Hz به‌دست آمد.

در واقع این فرکانس مربوطه به بزرگ‌ترین اندازه حباب است و رفتار کمی جریان با توجه به بیش‌ترین مقدار PSD، که مربوطه به این فرکانس غالب است، ارزیابی می شود. *Lettieri* و همکاران مقدار PSD را با توجه به نوع لخته شونده و غیر لخته شونده بودن بستر برای بسترهای معمولی به ترتیب در دامنه‌ی فرکانسی بین یک تا دو هرتز و چهار تا هشت هرتز تخمین زدند که با توجه به تفاوت رفتار حباب‌ها و هیدرودینامیک بسترهای مخروطی با معمولی تفاوت در مقدارهای فرکانس غالب در این پژوهش و کارهای گذشته امری اجتناب ناپذیر است [۲۵].

کار انجام نشده است مطالعه حاضر که شبیه سازی سه بعدی بستر فواره ای مخروطی است می تواند مبنای خوبی برای کارهای بیشتر تر در زمینه شبیه سازی CFD این بسترها باشد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۲۴

مراجع

- [1] Sau D.C., Biswal K.C., [Computational Fluid Dynamics and Experimental Study of the Hydrodynamics of Gas-Solid Tapered Fluidized Bed](#), *Appl. Math. Model.*, **35**:2265–2278 (2011).
- [2] Shi Y.F., Yu Y.S., Fan L.T., [Incipient Fluidization Condition for a Tapered Fluidized Bed](#), *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **23**:484–489 (1984).
- [3] Peng Y., Fan L.T., [Hydrodynamic Characteristics of Fluidization in Liquid-Solid Tapered Beds](#), *Chem. Eng. Sci.*, **52**:2277–2290 (1997).
- [4] Depypere F., Pieters J.G., Dewettinck K., [Expanded Bed Height Determination in a Tapered Fluidized Bed Reactor](#), *J. Food Eng.*, **67**:353–359 (2005).
- [5] Karimi M., Vaferi B., Hosseini S.H., Rasteh M., [Designing an Efficient Artificial Intelligent Approach for Estimation of Hydrodynamic Characteristics of Tapered Fluidized Bed from Its Design and Operating Parameters](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **57**:259-267 (2018).
- [6] Kim H.G., Lee I.O., Chung U.C., Kim Y.H., [Fluidization Characteristics of Iron ore Fines of Wide Size Distribution in a Cold Tapered Gas-Solid Fluidized Bed](#), *ISIJ Int.*, **40**:16–22 (2000).
- [7] Schaafsma S.H., Marx T., Hoffmann A.C., [Investigation of the Particle Flow Pattern and Segregation in Tapered Fluidized Bed Granulators](#), *Chem. Eng. Sci.*, **61**:4467–4475 (2006).
- [8] Sau D.C., Mohanty S., Biswal K.C., [Minimum Fluidization Velocities and Maximum Bed Pressure Drops for Gas-Solid Tapered Fluidized Beds](#), *Chem. Eng. J.*, **132**:151–157 (2007).
- [9] Sau D.C., Mohanty S., Biswal K.C., [Critical Fluidization Velocities and Maximum Bed Pressure Drops of Homogeneous Binary Mixture of Irregular Particles in Gas-Solid Tapered Fluidized Beds](#), *Powder Technol.*, **186**:241–246 (2008).
- [10] Abdelmotalib H.M., Ko D.G., Im I.T., [A Study on Wall-to-Bed Heat Transfer in a Conical Fluidized Bed Combustor](#). *Appl. Therm. Eng.* **99**:928-937 (2016).
- [11] Enwald H., 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**:329–342 (1999).
- [12] Lun C.K.K., Savage S.B., Jeffrey D.J., Chepuriniy N., [Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field](#), *J. Fluid Mech.*, **140**:223–256 (1984).

- [13] Abdelmotalib H.M., Youssef M.A.M., Hassan A.A., Youn S.B., Im I.T., [Influence of the Specularity Coefficient on Hydrodynamics and Heat Transfer in a Conical Fluidized Bed Combustor](#), *Int. Commun. Heat Mass*, **75**:169–176 (2016).
- [14] Abdelmotalib H.M., Im I.-T., [Three Dimensional Modeling of Heat Transfer and Bed Flow in a Conical Fluidized Bed Reactor](#), *Int. J. Heat Mass*, **106**:1335–1344 (2017).
- [15] Lan X.Y., Xu C.M., Gao J.S., Al-Dahhan M., [Influence of Solid-Phase Wall Boundary Condition on CFD Simulation of Spouted Beds](#), *Chem. Eng. Sci.*, **69**:419-430(2012).
- [16] Taghipour F., Ellis N., Wong C., [Experimental and Computational Study of Gas-Solid Fluidized Bed Hydrodynamics](#), *Chem. Eng. Sci.*, **60**:6857–6867 (2005).
- [17] Hosseini S.H., Ahmadi G., Rahimi R., Zivdar M., Nasr Esfahany M., [CFD Studies of Solids Hold-Up Distribution and Circulation Patterns in Gas-Solid Fluidized Beds](#), *Powder Technol.*, **200**: 202-215 (2010).
- [18] Wang T., Xia Z., Chen C., [Coupled CFD-PBM Simulation of Bubble Size Distribution in a 2D Gas-Solid Bubbling Fluidized Bed with a Bubble Coalescence and Breakup Model](#), *Chem. Eng. Sci.*, **202**:208–221 (2019).
- [19] Wang H., Lu Y., [Numerical Simulation of Bubble Behavior in a Quasi-2D Fluidized Bed Using a Bubble-Based EMMS Model](#), *Particuology* (2019).
- [20] Stewart P.S.B., Davidson J.F., [Slug Flow in Fluidised Beds](#), *Powder Technol.* **1**:61-80 (1967).
- [21] Lettieri P., Saccone G., Cammarata L., [Predicting the Transition from Bubbling to Slugging Fluidization Using Computational Fluid Dynamics](#), *Chem. Eng. Res. Design*, **8**: 939-944 (2004).
- [22] Baeyens, J. Geldart, D., [An Investigation into Slugging Fluidized Beds](#), *Chem. Eng. Sci.*, **29**: 255–265 (1974).
- [23] Zhang H., Liu M., Li T., Huang Z., Sun X., Bo H., Dong Y., [Experimental Investigation on Gas-Solid Hydrodynamics of Coarse Particles in a Two-Dimensional Spouted Bed](#), *Powder Technol.*, **307**:175–183 (2017).
- [24] Jang, J., Arastoopour, H., [CFD Simulation of a Pharmaceutical Bubbling Bed Drying Process at Three Different Scales](#), *Powder Technol.*, **263**:14-25 (2014).
- [25] Mahmoodi B., Hosseini S.H., Olazar M., Altzibar H., [CFD-DEM Simulation of a Conical Spouted Bed with Open-Sided Draft Tube Containing Fine Particles](#), *J. Taiwan Inst. Chem. E.* **81**: 275-287 (2017).