

معرفی بسترهای فورانی: ویژگی‌ها، کاربردها، تحقیقات آزمایشگاهی و مدلسازی هیدرودینامیکی

آرزو نیک‌سیر، مرتضی سهرابی*

تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی

پیام نگار: sohrabi@aut.ac.ir

چکیده

این مطالعه با هدف مرور فعالیت‌های انجام شده بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی بسترهای فورانی از دیدگاه تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته و نیز مدلسازی و شبیه‌سازی این تجهیزات انجام شده است. آرایش‌های گوناگون بسترهای فورانی و محدوده کارایی هر یک مورد مطالعه بوده و نگاه جامعی در زمینه سیر تکاملی فعالیت‌های انجام شده مرتبط با این بسترهای کارآمد از بدو اختراع (در ۱۹۵۵) تا اکنون، صورت گرفته است. تحقیقات متعددی با هدف تعیین الگوی جریان دو فاز و ارائه روابط تجربی در خصوص پارامترهای کلیدی، از جمله، حداقل سرعت فورانی شدن، افت فشار و نیروی کشش انجام شده است. آنچه می‌توان از مطالعات مختلف دریافت این است که نیروی غالب و کلیدی در معادلات تکانه، نیروی برهم‌کنش دو فاز گاز و جامد است که محاسبه آن مستلزم استفاده از روابط تجربی است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با وجود تأیید برخی مدل‌های بین‌فازی [که غالباً از قدمت بالایی نیز برخوردارند] برای آرایش‌های خاصی از بسترهای فورانی، مدل‌های مذکور در مورد آرایش‌های دیگر، نتایج بسیار نامناسبی را دربرداشته است. این مطالعه می‌تواند نقش موثری در شناخت عوامل موفقیت یا شکست مدل‌های ارائه شده داشته و به پژوهشگران در استفاده از روابط تجربی مناسب یاری رساند.

کلمات کلیدی: بسترهای فورانی، شبیه‌سازی عددی، روش جزء منفرد، روش اولری

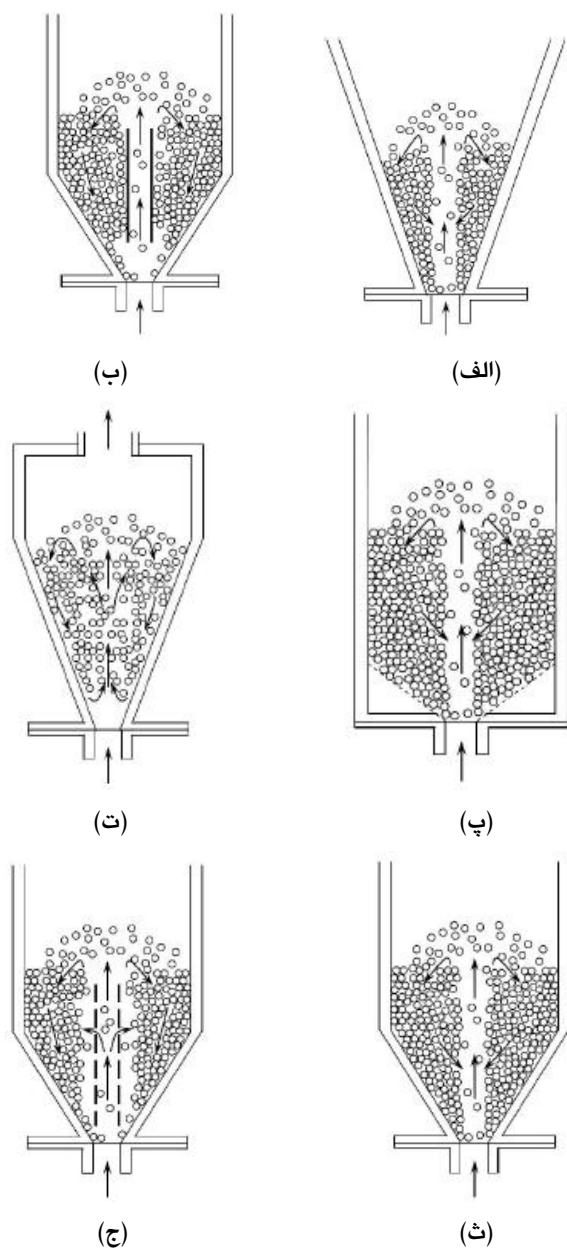
۱- مقدمه

کردن کودهای شیمیایی و مواد دیگر به کار برده شده است [۱]. علی‌رغم مزایای متعدد سیستم‌های بستر فورانی، معایبی نیز برای این نوع تجهیزات قابل ذکر است. جریان جانبی^۱ گاز، اختلاط معکوس، فرسایش و سطح تماس کم به دلیل استفاده از ذرات نسبتاً بزرگ از جمله نقاط ضعف این سیستم‌ها هستند [۲]. به طور کلی جریان (گاز- جامد) درون بسترهای فورانی را می‌توان

بسترهای فورانی یکی از انواع تماس‌دهنده‌های (گاز- جامد) هستند که در آن گاز از طریق یک شیپورک که در مرکز یک پایه مخروطی شکل یا صاف قرار دارد به بستر وارد می‌شود. این تجهیزات محیط بسیار مناسبی را برای اختلاط و گردش ذرات جامد نسبتاً درشت ولی با گستره توزیع اندازه باریک، فراهم می‌آورند. فناوری بستر فورانی در بسیاری از فرایندهای صنعتی، مانند خشک کردن ذرات دانه‌ای، اختلاط ورقه‌های بسپاری، پوشش‌دهی قرص‌ها و کروی

1. Bypass

آن به تماس (گاز- جامد) نیاز است برخوردارند (شکل (۱) - الف). علاوه بر این، بسترهای فورانی مخروطی در دامنه وسیعی از توزیع اندازه ذرات و سرعت گاز عمل می‌کنند. عملکرد مناسب این تجهیزات در فرایندهای احتراق زغال قیری، بسپارش کاتالیزی، تصفیه خاک اره و پسماندهای خاکی، تفکافت لاستیک‌های فرسوده و خشک کردن ذرات ریز اثبات شده است [۳].



شکل ۱- آرایش‌های مختلف بستر فورانی و الگوی حرکت گاز و جامد: بستر فورانی (الف) مخروطی، (ب) دارای دو صفحه مکش، (پ) استوانه‌ای، (ت) جت، (ث) مخروطی- استوانه‌ای، (ج) دارای یک لوله مکش متخلخل

به سه منطقه تقسیم کرد: منطقه فوران^۱ در مرکز بستر که در آن گاز و ذرات جامد با سرعت زیادی رو به بالا جریان دارند و غلظت ذرات در این منطقه کم است؛ منطقه حلقه^۲، بین فوران و دیواره‌ها که در آن ذرات با سرعت کمی به سمت پایین جریان دارند؛ و منطقه فواره^۳ که در آن ذرات به بالاترین ارتفاع درون بستر صعود کرده و سپس به سمت سطح حلقه ریزش می‌کنند. بنابراین یک الگوی چرخه‌ای برای حرکت جامد وجود دارد [۳].

به طور کلی اعتقاد بر این است که ذرات درون حلقه به صورت عمودی به سمت پایین و به صورت شعاعی به سمت درون بستر حرکت می‌کنند، و تقریباً یک مسیر سهمی شکل را می‌پیمایند [۴]. کسر حجمی ذرات از تقریباً صفر در ناحیه فوران به مقدار بیشینه‌ای در ناحیه حلقه تغییر می‌کند. این مسئله موجب شده است که الگوی چرخشی پیچیده و برهم‌کنش‌های (گاز- ذره) متنوعی در بسترهای فورانی وجود داشته باشد [۲]. دانش دینامیک گاز و ذره در یک بستر فورانی برای بررسی سرعت چرخش ذرات و بازدهی تماس گاز- جامد حائز اهمیت بسیار است [۱].

در این مطالعه سعی شده است با رویکردی تخصصی به معرفی بسترهای فورانی و مطالعات عملی (اعم از تحقیقات آزمایشگاهی و مطالعات مربوط به مدلسازی ریاضی و شبیه‌سازی) صورت گرفته در خصوص این تجهیزات پرداخته شود. امید است مطالعه حاضر بتواند با معرفی عوامل موفقیت یا شکست مدل‌های ریاضی ارائه شده و همچنین معرفی روابط تجربی مربوط به بسترهای فورانی راهگشای علاقمندان به این زمینه از تحقیقات در کشور باشد.

۲- انواع بسترهای فورانی و کاربردها

بسترهای فورانی از لحاظ شکل هندسی دارای انواع متفاوتی می‌باشند. در ادامه به انواع و آرایش‌های متداول بسترهای فورانی پرداخته می‌شود. شکل (۱) کلی آرایش‌های مختلف بستر فورانی را نشان می‌دهد.

۱-۲ بسترهای فورانی مخروطی

این نوع بسترها از قابلیت بالایی برای عملیات و فرایندهایی که در

1. Spout
2. Annulus
3. Fountain

۲-۲ بسترهای فورانی (استوانه‌ای - مخروطی)

دارای پایه مخروطی شکل و بدنه استوانه‌ای هستند (شکل (۱) - ث).

۳-۲ بسترهای فورانی جت

بستر فورانی جت نوعی از بستر فورانی است که در آن حرکت جامد بسیار شدید بوده و تماس یکنواختی برای دو فاز گاز - جامد پدید می‌آید (شکل (۱) - ت). این نوع تماس در مورد مواد جامد چسبنده و نیز در واکنش‌های بسیار گرمازا ضروری است. موارد زیر را می‌توان به عنوان تفاوت بسترهای فورانی جت با انواع متداول مخروطی شکل برشمرد [۵]:

- عدم وجود پسماند در منحنی‌های افت فشار بر حسب سرعت.
- انحراف نتایج آزمایشگاهی مربوط به حداقل سرعت، به این دلیل که روابط تجربی ارائه شده در خصوص بسترهای فورانی غالباً قابل بکارگیری نیستند.
- کمتر بودن مشکلات مربوط به ناپایداری، علیرغم اینکه رژیم هیدرودینامیکی به مقدار زیادی تحت تاثیر ابعاد تماس‌دهنده، ویژگی‌های ورودی، قطر ذرات و دیگر پارامترهای عملیاتی و طراحی است.

بسترهای فورانی جت به طور موفقیت‌آمیزی در گازسازی از زغال به کار برده شده‌اند. در این سیستم‌ها زمان ماند گاز بسیار کوتاه است. سهولت کار و اقتصادی بودن فرایند در بسترهای فورانی جت نسبت به انواع مختلف تجهیزات، همانند راکتورهای سیکلونی، راکتورهای بستر (فورانی - سیالی) دارای لوله مکش، راکتورهای بستر فورانی دارای لوله مکش، یا راکتورهای جریان برخوردی اثبات شده است. در نتیجه این راکتورها از پتانسیل بالایی برای انجام واکنش‌های سریع که در آن‌ها گزینش‌پذیری عاملی برای بهینه‌سازی است، برخوردارند [۵].

۴-۲ بسترهای فورانی دارای لوله/صفحه مکش

در بسترهای فورانی معمولی، در تمام طول بستر منطقه فوران در تماس مستقیم با منطقه حلقه است. این در حالی است که اگر ارتفاع عملیاتی بستر بیش از ارتفاع بیشینه آن (H_m) باشد، منطقه فوران قادر نیست در تمام طول بستر گسترش یابد و به سوی فروریختن پیش خواهد رفت. در این حالت، جریان گاز ورودی از

درون یک لوله مکش (شکل (۱) - ج) یا از بین دو صفحه مکش (شکل (۱) - پ) تعبیه شده در مرکز بستر عبور داده می‌شود و به این ترتیب فورانی شدن جامد در بستر تا حد زیادی پایدار می‌شود [۶]. لوله‌های مکش دارای دو نوع متخلخل و غیرمتخلخل است. کاربرد لوله مکش غیرمتخلخل در بسترهای فورانی در بسیاری از فرایندهای شیمیایی نظیر خشک کردن، گازسازی از زغال، احتراق، تفکافت هیدروکربن‌ها، داروسازی، و اختلاط توسعه یافته است. مطالعات نشان می‌دهد افت فشار یک بستر فورانی دارای لوله مکش کمتر از نوع معمولی آن است. همچنین حداقل سرعت فورانی شدن U_{ms} بسترهای فورانی دارای لوله مکش بسیار کمتر از نوع معمولی است. کمترین مقدار U_{ms} مربوط به بسترهای فورانی دارای لوله مکش غیرمتخلخل می‌باشد، که این موضوع از سرعت کم چرخش جریان جامد و نیز عدم امکان نفوذ گاز به درون بخش حلقه ناشی می‌شود. بنابراین در صورتی که فاز گازی نقش مهمی همچون خشک کردن یا واکنش برعهده داشته باشد استفاده از لوله مکش غیرمتخلخل مناسب نیست. زیرا در این صورت به دلیل عدم امکان نفوذ گاز از لوله مکش به درون حلقه، بازدهی تماس دو فاز کاهش می‌یابد. در این حالت بسترهای فورانی دارای لوله مکش متخلخل توصیه می‌شوند. در این نوع سیستم‌ها مسیر حرکت ذرات جامد به خوبی قابل کنترل است [۲].

۵-۲ بستر فورانی دارای توزیع‌کننده جت/مدور

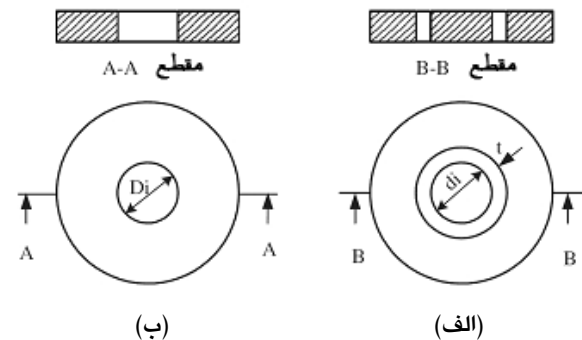
در مراجع مختلف به طور معمول از توزیع‌کننده‌های جت مرکزی برای مطالعات آزمایشگاهی استفاده می‌شود. توزیع‌کننده‌های مدور که نخستین بار توسط رسول و باتاچاری [۷] پیشنهاد گردیدند، نیز نوع جدیدی از توزیع‌کننده‌ها هستند که در آن هوا از طریق یک شیار دایره‌ای به درون بستر ذرات تزریق می‌شود [۸]. نمای کلی دو نوع توزیع‌کننده جت مرکزی و مدور در شکل (۲) داده شده است.

۳- تحقیقات آزمایشگاهی صورت گرفته

بررسی دینامیک گاز و ذره بدون برهم‌زدن میدان جریان، بسیار دشوار است. برای این منظور معمولاً حسگرهایی^۱ درون بستر تعبیه می‌شود که تا اندازه‌ای باعث برهم‌زدن مسیر جریان می‌شوند.

1. Probe

سرعت چرخش ذرات در بسترهای فورانی استوانه‌ای توسط بسیاری از محققان به طور تجربی مطالعه شده است [۲۰-۱۱۳]. تخلخل بستر موضوع مهم دیگری است که توسط پژوهشگران مورد توجه قرار گرفته است. تخلخل در حلقه بسترهای فورانی معمولاً یک مقدار ثابت و برابر با تخلخل بسترهای آکنده از ذرات دانه‌ای فرض می‌شود [۴، ۱۳]. از سوی دیگر، مطالعات اخیر نشان داده است که اختلاف ناچیزی بین تخلخل بخش‌های مختلف حلقه وجود دارد. در جدول (۱) به برخی از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده در خصوص هیدرودینامیک بسترهای فورانی اشاره شده است.



شکل ۲- طراحی توزیع‌کننده‌های بسترهای فورانی. (الف) توزیع کننده مدور. (ب) توزیع‌کننده جت مرکزی

جدول ۱- چکیده مشخصات و نتایج مطالعات آزمایشگاهی در خصوص هیدرودینامیک بسترهای فورانی

نام پژوهشگران	موضوع پژوهش	روش پژوهش و مهمترین نتایج حاصل
بنکرید و کارام [۱۱]	سرعت ذرات	از یک روش نوری رشته‌ای برای اندازه‌گیری سرعت ذرات در بخش حلقه یک ستون کامل استفاده کردند.
چوئی و میسن [۲۱]	حداقل سرعت فورانی شدن	یک منطقه جریان قالبی در بخش فوقانی حلقه وجود دارد. بجز در ناحیه زیرین، هیچ‌گونه همراهی ذرات در طول فصل مشترک فوران مشاهده نشد.
روی و همکاران [۱۰]	سرعت ذرات	آزمایش‌های خود را بر روی یک بستر فورانی مخروطی کم‌عمق با مواد جامد مختلف انجام دادند.
هی و همکاران [۹]	سرعت چرخش ذرات	معادلات تجربی ارائه شده قبلی برای محاسبه حداقل سرعت فورانی شدن را مورد مطالعه قرار داده و یک معادله تجربی ارائه دادند. آنان نشان دادند معادله تجربی (مورگان - لیتمن) [۲۲] تغییرات فشار را در منطقه حلقه بسترهای (مخروطی - استوانه‌ای) به خوبی پیش‌بینی می‌کند.
اولازار و همکاران [۲۴]	تخلخل بستر	سرعت ذرات در یک بستر فورانی سه‌بعدی را با استفاده از روش ردیابی ذرات به کمک پرتوافکنی گاما اندازه‌گیری کردند. مواد جامد در منطقه حلقه به صورت جریان قالبی حرکت می‌کنند و احتمال عبور آن‌ها از مرزهای منطقه فوران در بخش استوانه‌ای بستر یکسان است.
ایشیکورا و همکاران [۲۶]	لوله‌های مکش	از یک سیستم دارای حسگر رشته‌ای نوری برای دست آوردن تغییرات سرعت عمودی ذرات در مناطق حلقه و فواره یک بستر فورانی کامل استفاده کردند.
سن جوس و همکاران [۵]	سرعت گاز در بسترهای فورانی جت	مولفه عمودی سرعت ذرات در بخش حلقه در جهت شعاعی از یک توزیع گوسی برخوردار است. این توزیع گوسی در منطقه فواره نیز در سرعت‌های بالای گاز مشاهده می‌شود. مدل (گریس - ماتور) [۲۳] به خوبی ارتفاع منطقه فواره را پیش‌بینی می‌کند.
سن جوس و همکاران [۲۷]	سرعت ذرات	با استفاده از یک حسگر رشته‌ای نوری تاثیر شرایط عملیاتی (زاویه پایه، قطر ورودی گاز، ارتفاع بستر ساکن، قطر ذرات و سرعت گاز) بر روی سرعت ذرات در سه منطقه بسترهای فورانی: فوران، فواره و حلقه بررسی شد.
لیو و همکاران [۲۸]	الگوی حرکت ذرات	دقت معادله (اپستین - گریس) [۲۵] در پیش‌بینی مولفه عمودی سرعت ذره در بخش فوران و معادله (ماتور - اپستین) [۴] در پیش‌بینی سرعت ذرات در هسته فواره تأیید شد.
پیسکوا و مورل [۲۹]	اندازه‌گیری فشار و رژیم جریان	سه نوع بستر فورانی شامل بستر فورانی معمولی، دارای لوله مکش متخلخل و دارای لوله مکش غیرمتخلخل را با هم مقایسه کردند.
		افت فشار یک بستر فورانی دارای لوله مکش کمتر از نوع معمولی آن است. حداقل سرعت فورانی شدن U_{ms} بسترهای فورانی دارای لوله مکش، بسیار کمتر از نوع معمولی است. کمترین مقدار U_{ms} مربوط به بسترهای فورانی دارای لوله مکش غیرمتخلخل می‌باشد.
		الگوی جریان گاز در نظام بستر فورانی جت و در بسترهای فورانی مخروطی تجزیه و تحلیل شد.
		نتایج آزمایشگاهی مربوط به سرعت گاز بر روی محور بستر فورانی با یک معادله تجربی برازش شد. این سرعت با افزایش فاصله طولی از محور کاهش می‌یابد و این کاهش با افزایش جرم ویژه جامد تشدید می‌گردد. تغییرات سرعت در مورد این نوع از بسترهای فورانی بسیار مشخص‌تر از تغییرات سرعت در نظام بسترهای فورانی مخروطی است.
		با استفاده از یک حسگر رشته‌ای نوری، تخلخل بستر در بخش‌های مختلف را به صورت تابعی از عوامل هندسی بستر (زاویه و قطر ورودی) و شرایط عملیاتی مختلف (ارتفاع بخش ساکن، قطر ذرات، سرعت گاز) به دست آوردند.
		تخلخل بستر در امتداد محور مناطق فوران و فواره با ارتفاع بستر کاهش و بر روی هسته فواره از روی محور تا فصل مشترک (هسته - محیط) به سرعت کاهش می‌یابد. در منطقه نزول فواره، مقدار تخلخل برای مواد جامد با چگالی‌های مختلف تقریباً یکسان است. آنان یک رابطه تجربی برای محاسبه تخلخل در دو منطقه فوران و حلقه ارائه دادند.
		با استفاده از یک سرعت‌سنج تصویری ذرات (PIV) رفتار نوسانی و متوسط زمانی ذرات جامد در یک بستر فورانی دوبعدی را مطالعه کردند.
		ذرات در منطقه حلقه به طور متناوب و در قالب یک فرایند (شتاب مثبت - شتاب منفی - سکون) حرکت می‌کنند که دامنه فرکانس آن با دامنه فرکانس افت فشار یکسان است. در منطقه فوران، تغییرات طولی مولفه عمودی سرعت ذرات در طول محور دارای یک دوره شتاب‌گیری سریع است و سپس در مدتی نسبتاً طولانی یک مقدار بیشینه را سپری می‌کند.
		با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مختلف و تجزیه و تحلیل سیگنال نوسانات فشاری، نظام جریان در سه آرایش بستر فورانی را مطالعه کردند.
		نظام‌های گوناگونی شامل بستر ثابت، تشکیل کانال، تشکیل حباب، فورانی پایدار و لخته‌ای ^۱ را مشاهده نمودند.

1. Slugging

۴- مدل‌های ریاضی ارائه شده

روش‌های شبیه‌سازی عددی و دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در رابطه با جریان‌های دوفازی گاز-جامد مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. به عنوان نمونه می‌توان به مطالعات انجام شده بر روی بسترهای سیالی و بسترهای فورانی اشاره کرد. شبیه‌سازی عددی وسیله‌ای مناسب جهت دستیابی به جزئیات مربوط به جریان‌های مختلف بدون برهم زدن میدان آن‌ها است. به طور کلی مدل‌های CFD را می‌توان به دو گروه لاگرانژی و اولری طبقه‌بندی کرد.

در مدل‌های لاگرانژی، یا مدل‌های ذرات منفرد (DEM)، مدل دینامیک سیال گاز بر مبنای انتگرال حجمی از معادلات (نویر-استوکس) توصیف می‌شود. در مورد ذرات جامد، معادله حرکت نیوتنی مربوط به هر ذره منفرد حل می‌شود و به این ترتیب مسیر حرکت هر ذره منفرد دنبال می‌گردد. در این مدل برخوردهای بین ذرات و نیروهای وارد بر ذرات از فاز گاز در نظر گرفته می‌شود. مدل برخورد بر مبنای قوانین بقا در خصوص تکانه زاویه‌ای و خطی استوار است و صرف نظر از عوامل هندسی، به دو پارامتر هندسی نیاز دارند: یک ضریب جبرانی^۱ و یک ضریب اصطکاک. مزیت استفاده از این روش در این است که اتفاق مربوط به هر ذره و همچنین پارامترهای سیستم به طور دقیق معین می‌شوند. با وجود این، به خاطر اینکه برای تعیین رفتار متوسط یک سیستم سرگذشت تعداد زیادی از ذرات باید مورد توجه قرار گیرد، محاسبات کامپیوتری مربوط به این روش بسیار زیاد است که کاربرد آن را محدود می‌سازد [۱].

در مدل CFD دو سیالی که آن را (اولری-اولری) (EE) نیز می‌نامند، می‌توان دو فاز مجزای دارای با برهم‌کنش را مدل کرد. فازهای گاز و جامد به طور پیوسته و کاملاً نفوذپذیر در نظر گرفته می‌شوند. روش اولری در مورد هر فاز به کار برده شده و در آن تمامی برخوردهای احتمالی درون‌فازی و بین‌فازی در نظر گرفته می‌شود. در مدل چندفازی اولری برهم‌کنش‌های (گاز-ذره) و برخوردهای (ذره-ذره) باید در ضرایب انتقال فاز جامد لحاظ شود. موفقیت این مدل‌ها به انتخاب الگوی مناسبی برای پیش‌بینی نیروهای بین دو فاز و تنش جامد وابسته است [۳۰]. این روش عددی هزینه‌های محاسباتی را به ویژه در مورد جریان‌های چگال از

ذرات به حداقل می‌رساند [۱].

۴-۱ مدل‌های لاگرانژی

مطالعات مختلف نشان داده است که نتایج شبیه‌سازی DEM در مورد بسترهای فورانی به موفقیت نتایج مربوط به بسترهای سیالی نیستند [۳۴-۳۱]. به اعتقاد تاکنوچی و همکاران [۳۲] مشکل اصلی این است که شبیه‌سازی DEM دوبعدی با مسئله مهم پایداری بستر فورانی، صرف نظر از تنظیم پارامترهایی همچون قطر ذره، سرعت گاز، نسبت قطرهای شیپورک و بستر و غیره روبه‌رو است. در واقع نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که یک بستر فورانی دوبعدی به طور ذاتی ناپایدار ولی دارای یک دوره تناوب است. البته مدل‌های DEM موجود اساساً بر روی بسترهای استوانه‌ای سه بعدی تمرکز می‌کنند که در آن مشکلات ناپایداری وجود ندارد. مسئله دیگر این است که حسگرهای نوری که برای اندازه‌گیری جریان جامد در بسترهای سه‌بعدی به کار می‌روند، قادر نیستند به خوبی نتایج DEM را در تمام دامنه میدان جریان، به ویژه در جریان‌های ناپایا تأیید کنند. ادامه به معرفی برخی تلاش‌های صورت گرفته توسط پژوهشگران در این زمینه پرداخته می‌شود.

۴-۱-۱ مدل ژائو و همکاران [۶] و [۳۵]

ژائو و همکاران [۳۵] با استفاده از روش جزء منفرد (DEM)، یک بستر فورانی دو بعدی، و ژائو و همکاران [۶] یک بستر فورانی دو بعدی دارای دو صفحه مکش را مدل‌سازی کردند. در مدل آنان، معادله سرعت انتقالی و چرخشی ذره i حاصل از معادلات تکانه خطی و زاویه‌ای به ترتیب عبارتند از:

$$m_i \frac{d\bar{v}_i}{dt} = \sum_j (\bar{F}_{n,ij} + \bar{F}_{t,ij}) + m_i \bar{g} + \bar{F}_{f,i} \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\bar{\omega}_i}{dt} = \sum_j (\bar{r}_i \times \bar{F}_{t,ij} - \bar{M}_{ij}) \quad (2)$$

که در آن \bar{v}_i ، $\bar{\omega}_i$ و I_i به ترتیب مولفه خطی سرعت، مولفه زاویه‌ای سرعت، گشتاور اینرسی و نیروی کشش ذره i است. $\bar{F}_{n,ij}$ ، $\bar{F}_{t,ij}$ و \bar{M}_{ij} به ترتیب نیروی تماس قائم، نیروی تماس انتقالی و گشتاور چرخشی ذره i است که در همسایگی ذره j

می‌باشد:

$$\bar{F}_{n,ij} = -[k\delta_{n,ij} + \eta(\bar{v}_{ij} \cdot \bar{n}_{ij})] \bar{n}_{ij} \quad (۳)$$

$$\bar{F}_{t,ij} = -\min[k\delta_{t,ij} + \eta(\bar{v}_{ij} \cdot \bar{s}_{ij}), \mu | \bar{F}_{n,ij} |] \bar{s}_{ij} \quad (۴)$$

$$M_{ij} = -\mu_r (r_i \bar{\omega}_i) | \bar{F}_{n,ij} | \quad (۵)$$

به طوری که n و s بردارهای واحد قائم و مماسی و δ_t و δ_n مقدار جابجایی ذره در جهت قائم و مماسی هستند. پارامتر k مقدار سختی ارتجاعی و η ضریب پراکندگی ذره است. در مدل ژائو و همکاران [۳۵] معادله تکانه فاز گاز به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_f u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon \rho_f u_i u_j) = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial x_i} - f_d + \rho_f \varepsilon g + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\varepsilon (\mu_f + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (۶)$$

که در آن ε ، ρ_f ، μ_f ، μ_t و f_d به ترتیب تداخل موضعی، چگالی گاز، گرانیوز گاز، گرانیوز جریان آشفته و نیروی کشش سیال هستند. در حالی که تقریباً در تمامی مدل‌های DEM قبلی، اثرات آشفستگی سیال حذف می‌گردید، ژائو و همکاران یک مدل جریان آشفته $(k-\varepsilon)$ با رینولدز پایین در مورد فاز سیال به کار بردند. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی آنان که با استفاده از یک سرعت‌سنج تصویری ذرات (PIV) تهیه شده بود به خوبی همخوانی داشت. این نتایج شامل میدان جریان سیال، تغییرات سرعت ذرات متوسط‌گیری شده، و شکل ناحیه فوران می‌باشد.

ژائو و همکاران [۳۵] علت اختلاف بعضی از نتایج پیش‌بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی را ضعف حاصل از بعضی ساده‌سازی‌های مختص مدل دوبعدی نظیر خطا در محاسبه تداخل یا نیروی کشش می‌دانند. موارد زیر را می‌توان به عنوان مهمترین نتایج حاصل از این شبیه‌سازی و همچنین کار آزمایشگاهی برشمرد.

نتایج ژائو و همکاران [۳۵]:

- ذرات به صورت تناوبی و گروهی به سمت بالا حرکت می‌کنند و حرکت تناوبی آن‌ها فضای گسسته‌ای (فورانی ناپایدار) را در بستر فراهم می‌آورد.

- بیشترین آشفستگی در فصل مشترک دو منطقه فوران و حلقه وجود دارد، بنابراین بالاترین نیمرخ سرعت مربوط به این منطقه است.

- بدون در نظر گرفتن آشفستگی جریان، عرض منطقه فوران بیش از اندازه واقعی پیش‌بینی می‌شود. بنابراین آشفستگی گاز اثر قابل ملاحظه‌ای بر نفوذ عرضی جت گاز به درون منطقه فوران دارد.

- مولفه عمودی سرعت ذرات در محور فوران به سرعت افزایش می‌یابد و به یک مقدار بیشینه در نزدیکی بخش انتهایی فوران می‌رسد. این مولفه سپس در بخش فواره به تدریج کاهش می‌یابد. این رفتار کاملاً متفاوت با بسترهای فورانی (مخروطی - استوانه‌ای) است که در آن‌ها سرعت ذره تا رسیدن به یک مقدار بیشینه در نزدیکی اریفیس (روزنه) ورودی سریعاً افزایش و سپس به تدریج در طول دو بخش فوران و فواره کاهش می‌یابد.

- نیروی کشش ذرات در منطقه حلقه کوچکتر از این نیرو در بخش فوران بوده و قادر نیست تا با نیروی وزن آن‌ها برابری کند.

نتایج ژائو و همکاران [۶]:

- در بسترهای فورانی دارای صفحه مکش ذرات به صورت منفرد (و نه به حالت خوشه‌ای) رو به بالا حرکت می‌کنند. چگالی ذرات در بخش پایینی صفحه مکش (در منطقه فوران) کمی بیشتر از بخش‌های دیگر است که در واقع موید اختلاط معکوس ضعیفی برای ذرات در این بخش می‌باشد.
- در ناحیه‌ای که صفحات مکش تعبیه شده‌اند اثر مدل آشفستگی جریان، تقریباً ضعیف است، زیرا در این ناحیه امکان نفوذ گاز از منطقه فوران به منطقه حلقه وجود ندارد.

۴-۱-۲ مدل لینک و همکاران [۳۴] و [۳۶]

این مدل بر مبنای مدل کره‌های سخت ارائه شده است که در آن فرض می‌شود ذرات صلب به صورت دوتایی و لحظه‌ای با یکدیگر برخورد می‌کنند. دینامیک برخورد ذرات، توسط نظریه برخورد توصیف می‌شود. حرکت هر ذره منفرد از معادله حرکت نیوتن تعیین می‌شود:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = -V_p \nabla p + \frac{V_p \beta}{1 - \varepsilon_f} (u_f - v_p) + m_p g \quad (۷)$$

۴-۱-۳ مدل تاکئوچی و همکاران [۳۲]

آنان با استفاده از DEM یک بستر فورانی سه‌بعدی با پایه مخروطی را شبیه‌سازی کردند. این محققان از ترکیب معادلات ارگان [۳۷] و (ون-یو) [۳۸] برای توصیف برهم‌کنش (گاز- ذره) استفاده کردند. در مورد فاز جامد:

$$m \frac{dv}{dt} = f_c + f_D + mg \quad (10)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = M \quad (11)$$

به طوری که v بردار سرعت (با سه مولفه v_x, v_y, v_z)، f_c نیروی اعمالی بر اثر برخورد ذرات با یکدیگر و با دیواره، f_D نیروی کشش گاز- ذره، ω سرعت زاویه‌ای و M تکانه زاویه‌ای حاصل از برخورد است.

معادله (نویر- استوکس) در مورد فاز گاز:

$$\frac{\partial \varepsilon u}{\partial t} + \nabla(\varepsilon u u) = -\frac{\varepsilon}{\rho} \nabla p + \frac{\beta(\bar{v} - u)}{\rho} \quad (12)$$

تاکئوچی و همکاران [۳۲] یک روش جدید برای اعمال شرایط مرزی در یک آرایش سه‌بعدی پیشنهاد دادند. شرایط مرزی جدید، هر دو معادله پیوستگی و موازنه تکانه را در مورد فاز گاز ارضاء می‌کند. نتایج شبیه‌سازی آنان قادر است وجود هر سه منطقه مربوط به بسترهای فورانی را پیش‌بینی کند و سرعت‌های ذرات در دو منطقه فوران و حلقه با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دارد. یک جریان معکوس کوچک در نزدیکی بخش پایینی بستر قابل مشاهده است به طوری که شدت این جریان با افزایش زاویه بستر کاهش می‌یابد. نتایج تاکئوچی و همکاران [۳۲] بیانگر این است که با نصب یک لوله مکش در محور بستر می‌توان پایداری آن را افزایش داد. روند تغییرات شعاعی مولفه عمودی سرعت ذرات در لوله مکش تقریباً به صورت خطی با شعاع تغییر می‌کند.

که در آن β ضریب انتقال تکانه بین دو فاز است که از معادلات تجربی ارگان [۳۷] و (ون-یو) [۳۸] محاسبه شده است. معادله حرکت فاز (در دو بعد) از انتگرال حجمی معادلات نویر- استوکس به دست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_f \rho_f u_f) + \nabla \cdot (\varepsilon_f \rho_f u_f u_f) = -\varepsilon_f \nabla p - \nabla \cdot (\varepsilon_f \tau_f) - S_p + \varepsilon_f \rho_f g \quad (8)$$

S_p افت تکانه بر اثر کشش (گاز- ذره) است.

نتایج شبیه‌سازی شده، شار ذرات را بسیار بزرگتر از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. لینک و همکاران [۳۴] علت این اختلاف را ناشی از ضعف سیستم PIV در عکس‌برداری مناسب از ذرات و اندازه‌گیری سرعت آن‌ها به ویژه در سرعت‌های بالا می‌دانند. در این شرایط، تغییرات تداخل بستر نیز با دقت بسیاری کمی قابل اندازه‌گیری است. اختلاف در مقادیر شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در مناطقی که ذرات با چگالی بالا و سرعت کم حضور دارند نیز مشاهده می‌شود که این مورد را دیگر نمی‌توان به ضعف سیستم اندازه‌گیری نسبت داد. لینک و همکاران [۳۴] دلیل اصلی را در معادله ارگان [۳۷] می‌دانند، زیرا این معادله در سیستم‌های رقیق (تخلخل بیش از ۰.۵) که عدد رینولدز ذرات بالا است نیروی کشش را بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. همچنین فرض دو‌بعدی بودن برای فاز گاز نیز قابل تردید است.

برای توسعه این مدل، لینک و همکاران [۳۶] یک بستر فورانی سه‌بعدی را شبیه‌سازی کردند. آنان برای محاسبه β از معادلات تجربی مختلفی از جمله معادله (کوچ- هیل) [۳۹] استفاده کردند:

$$\beta_{\text{Koch-Hill}} = \frac{18\mu_f \varepsilon_f^2 \varepsilon_p}{d_p^2} (F_0(\varepsilon_p) + \frac{1}{2} F_3(\varepsilon_p) \text{Re}_p) \quad (9)$$

لینک و همکاران [۳۶] پیشنهاد می‌کنند که برای ضریب کشش از مقدار کمینه محاسبه شده از معادلات ارگان [۳۷] و (ون-یو) [۳۸] و همچنین معادله (کوچ- هیل) [۳۹] استفاده شود. با وجود این، همچنان نوسانات محاسباتی در خصوص افت فشار بالا است.

۲-۴ مدل‌های اولری

مطالعات محدودی بر روی دینامیک سیالات بستری‌های فورانی با استفاده از مدل‌های اولری چندفازی صورت گرفته است. با وجود این، نشان داده شده است که نتایج رضایت‌بخشی از این مدل قابل استخراج است.

۱-۲-۴ مدل دوئارت و همکاران [۱، ۱۲، ۴۰]

دوئارت و همکاران [۱، ۱۲، ۴۰] مدل اولری دوفازی را که در آن گاز و جامد به صورت محیط‌های پیوسته نفوذپذیر در نظر گرفته می‌شوند در مورد بستری‌های فورانی به کار بردند. هر سه مطالعه در واقع در یک راستا انجام شده‌اند، با این تفاوت که در هر یک، دو آرایش مختلف بستر فورانی مورد نظر قرار گرفته است. از آنجایی که حجم یک فاز توسط حجم فاز دیگر اشغال نمی‌شود، در این مطالعات مفهوم کسر حجمی فاز مطرح شده است. این کسرهای حجمی به صورت توابع پیوسته‌ای از زمان و فضا فرض می‌شوند. آنان معادلات بقای تکانه فازهای گاز و جامد را به صورت زیر توسعه دادند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \bar{v}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \bar{v}_f \bar{v}_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \bar{g} + \alpha_f \rho_f (\bar{F}_{q,f} + \bar{F}_{lift,f} + \bar{F}_{vm,f}) + \alpha_f \rho_f \bar{g} + \alpha_f \rho_f (\bar{F}_{q,f} + \bar{F}_{lift,f} + \bar{F}_{vm,f}) + K_{fs} (\bar{v}_f - \bar{v}_s) \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \bar{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{v}_s \bar{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \bar{g} + \alpha_s \rho_s (\bar{F}_{q,s} + \bar{F}_{lift,s} + \bar{F}_{vm,s}) + K_{fs} (\bar{v}_f - \bar{v}_s) \quad (14)$$

که در آن \bar{F}_{vm} و \bar{F}_{lift} ، \bar{F}_q به ترتیب نیروی خارجی، نیروی لیفت و نیروی جرم مجازی است:

$$\bar{F}_{lift} = -0.5 \rho_f \alpha_s (\bar{v}_f - \bar{v}_s) \times (\nabla \times \bar{v}_f) \quad (15)$$

$$\bar{F}_{vm} = 0.5 \alpha_s \rho_f \left(\frac{d_f \bar{v}_f}{dt} - \frac{d_s \bar{v}_s}{dt} \right) \quad (16)$$

به طوری که $\bar{F}_{lift,f} = -\bar{F}_{lift,s}$ و $\bar{F}_{vm,f} = \bar{F}_{vm,s}$ در مطالعات خود از مدل گیداسپا و همکاران [۴۰]، برای محاسبه

نیروی کشش و از نظریه جنبشی ارائه شده توسط لون و همکاران [۴۲] برای محاسبه تنش جامد استفاده کردند. آنان عبارت فشار جامد (p_s) را برای اعمال نیروهای بین ذرات جامد به کار بردند. نتایج این مطالعات دنباله‌ای را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

- دوئارت و همکاران [۱۲] (آرایش‌های استوانه‌ای و دوبعدی): نتایج شبیه‌سازی مربوط به سرعت ذرات و تغییرات تخلخل در بخش‌های فوران و حلقه بستر فورانی استوانه‌ای را با نتایج آزمایشگاهی هی و همکاران [۹] مقایسه کرده و تطابق نسبتاً خوبی را مشاهده نمودند.
- دوئارت و همکاران [۱] (آرایش‌های مخروطی- استوانه‌ای) و دوبعدی): روند تغییرات سرعت ذرات، حداقل سرعت فورانی شدن و افت فشار در طول بستر را به دست آورده و با مقادیر آزمایشگاهی خود مقایسه کردند. نتایج شبیه‌سازی توافق نسبتاً خوبی را با داده‌های تجربی در شرایط مورد بررسی نشان می‌دهد.
- دوئارت و همکاران [۴۰] (آرایش‌های مخروطی- استوانه‌ای): مخروطی): الگوی کسر حجمی ذرات بر حسب شدت جریان هوا و در نتیجه حداقل سرعت فورانی شدن (U_{ms}) را به دست آوردند. آنان مقادیر حاصل از شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی را در مورد U_{ms} با مقادیر حاصل از برخی روابط تجربی ارائه شده [۱۳]، [۴۳-۴۵] مقایسه کردند و نشان دادند که نتایج حاصل از شبیه‌سازی آنان (۳/۸٪ خطا) خطای کمتری در مقایسه با روابط ارائه شده قبلی (بیش از ۱۲/۸٪ خطا) دارد.

۲-۲-۴ مدل حسینی و همکاران [۲]

در مطالعه مذکور، یک مدل چندسیالی (اولری- اولری) بر مبنای نظریه جنبشی جریان ذرات برای شبیه‌سازی یک بستر فورانی دارای لوله مکش غیرمتخلخل به کار برده شده است. در این مدل، معادلات تکانه برای هر فاز جامد و برای فاز گاز به ترتیب عبارتند از:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_m \rho_m u_{mi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_m \rho_m u_{mj} u_{mi}) \right] = -\alpha_m \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{mij}}{\partial x_j} + I_{gmi} - \sum_{m=1}^M I_{kmi} + \alpha_m \rho_m g_i \quad (17)$$

۳-۲-۴ مدل ژونگونا و ماجومدر [۳۰]

در این مطالعه رفتار جریان (گاز- ذرات) در یک بستر فورانی استوانه‌ای و یک بستر (فورانی- سیالی) سه بعدی متشکل از ذرات جامد با استفاده از روش مدلسازی دو سیالی (اولری- اولری) شبیه‌سازی گردید. در این مدل معادله تکانه فازهای گاز و جامد عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial t}(a_g \rho_g \bar{v}_g) + \nabla \cdot (a_g \rho_g \bar{v}_g \bar{v}_g) = -a_g \nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + a_g \rho_g \bar{g} + \bar{R}_{gs} \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(a_s \rho_s \bar{v}_s) + \nabla \cdot (a_s \rho_s \bar{v}_s \bar{v}_s) = -a_s \nabla P_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + a_s \rho_s \bar{g} - \bar{R}_{gs} \quad (20)$$

به طوری که \bar{v}_{gs} سرعت در فصل مشترک، \bar{R}_{gs} نیروی برهم‌کنش بین دو فاز و $\bar{\tau}$ تنسور تنش رینولدز هر فاز است. برهم‌کنش بین گاز و ذرات با استفاده از مدل کشش گیداسپاو [۴۰] و تنش جامد با استفاده از نظریه جنبشی لون و همکاران [۴۲] مدلسازی شده است. ژونگونا و ماجومدر [۳۰] الگوی جریان در یک بستر فورانی استوانه‌ای و یک بستر سه‌بعدی را شبیه‌سازی کردند. نتایج آنان نشان داد که در یک بستر سه‌بعدی، ذرات در بخش فوقانی بستر، به حالت سیال درآمده و سطح بالایی بستر تقریباً صاف است. بنابراین وجود منطقه فواره که در بستر استوانه‌ای پیش‌بینی گردید، در مورد بستر سه‌بعدی قابل پیش‌بینی نیست. همچنین نتایج آنان موید این است که در بستر استوانه‌ای، غلظت ذرات در منطقه حلقه تقریباً یکنواخت است، در حالی که در بستر سه‌بعدی در کنار توزیع‌کننده سیال گازی حباب‌هایی تولید شده و به سمت بالا متصاعد می‌شوند که موجب ناپایداری و غیریکنواختی توزیع ذرات در ستون می‌شود. ژونگونا و ماجومدر [۳۰] الگوی جریان پیش‌بینی شده در مورد بستر فورانی استوانه‌ای را با داده‌های آزمایشگاهی هی و همکاران [۹]، [۴۹] مقایسه کردند و تطابق کیفی و کمی نسبتاً خوبی را مشاهده نمودند. همچنین الگوی جریان پیش‌بینی شده در مورد بستر فورانی سه‌بعدی تنها از نظر کیفی با داده‌های آزمایشگاهی لینک و همکاران [۳۴] مطابقت دارد.

$$\left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g u_{gi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_g \rho_g u_{gj} u_{gi}) \right] = \quad (18)$$

$$-\alpha_g \frac{\partial P_g}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{gij}}{\partial x_j} - \sum_{m=1}^M I_{gmi} + \alpha_g \rho_g g_i$$

m بیانگر تعداد فازهای جامد و α_g و α_m کسرهای حجمی فاز گاز و جامد هستند. مدل‌های مختلف ارائه شده در برخی مراجع برای محاسبه نیروی کشش و ضریب جبرانی مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین از مدل جریان آشفته $k-\varepsilon$ در مورد فاز گاز استفاده شد. بردارهای سرعت گاز و جامد، شدت جریان گاز در مناطق حلقه و فوران و توزیع طولی فشار مشخص گردید.

حسینی و همکاران [۲] برای ارزیابی دقت مدل خود از داده‌های آزمایشگاهی ایشیکورا و همکاران [۲۶] بهره بردند. نتایج نشان می‌دهد با استفاده از مدل‌های کشش گیبیلارو [۴۶] و (ژانگ-ریس) [۴۷] ذرات در لوله انباشته شده و حرکت رو به بالا درون لوله مکش نیز متوقف می‌گردد. بنابراین، این مدل‌ها در مورد سیستم مورد مطالعه مناسب نیستند. دو مدل کشش (ون-یو) [۳۸] و (سیاملال-اوپرین) [۴۸] مقدار غلظت اندکی را برای ذرات در ناحیه فوران و غلظت بالایی را در ناحیه حلقه پیش‌بینی می‌کند که این پیش‌بینی‌ها به خوبی با مشاهدات تجربی مطابقت داشت. همچنین مدل کشش (ون-یو) [۳۸] و در درجه بعدی، مدل (دینگ-گیداسپاو) [۳۷]، همخوانی بسیار بهتری را در مقایسه با سایر مدل‌ها در پیش‌بینی سرعت محوری گاز در بستر نشان می‌دهد.

ضریب جبرانی (e) معیاری از میزان کشسانی برخورد بین دو ذره است که در عبارت مربوط به معادله تکانه فاز جامد ظاهر می‌شود. این ضریب بین حالات غیرکشسان کامل ($e=0$) تا کشسان کامل ($e=1/0$) متغیر است. از آنجایی که قطر ذرات در بسترهای فورانی غالباً بزرگتر از ۱ mm و سرعت ذرات در منطقه حلقه غالباً کم است، این سیستم‌ها طبعاً از ضریب جبرانی کوچکی برخوردارند [۲].

حسینی و همکاران [۲] در شبیه‌سازی خود مقادیر متفاوتی را برای این پارامتر مورد آزمایش قرار داده و نتیجه گرفتند که با مقدار $e=0/85$ تطابق بسیار مناسبی برای شدت جریان گاز در بخش حلقه منتج از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی برقرار می‌گردد. در مطالعه حسینی و همکاران [۲] مقدار پیش‌بینی شده برای توزیع فشار طولی از نظر عددی کمتر از مقادیر آزمایشگاهی است. این اختلاف به ویژه در بخش مرکزی بستر مشاهده می‌شود.

۴-۲-۴ مدل اولازار و همکاران [۳]

در مطالعه صورت گرفته یک مدل یک‌بعدی بر مبنای معادلات جرم و تکانه فازهای گاز و جامد در دو منطقه حلقه و فوران برای بسترهای فورانی مخروطی توسعه داده شد. بدین منظور، فرض شده است در هر مقطع افقی از مناطق فوران و حلقه، گاز و ذرات دارای یک سرعت یکنواخت هستند. در مورد کسر حجمی بستر، در هر مقطع افقی در بخش فوران یک مقدار یکنواخت و همچنین یک مقدار ثابت و یکنواخت برای تمامی منطقه حلقه در نظر گرفته شده است. معادلات تکانه دو فاز گاز و جامد در منطقه فوران عبارتند از:

$$-\rho_g \frac{d(\epsilon_s u_s^2)}{dz} - \epsilon_s \frac{dP}{dz} - \beta(u_s - v_s) = 0 \quad (21)$$

$$-\rho_s \frac{d[v_s^2(1-\epsilon_s)]}{dz} + (1-\epsilon_s) \frac{dP}{dz} + \beta(u_s - v_s) + \rho_s g(1-\epsilon_s) = 0 \quad (22)$$

β ضریب برهم‌کنش (سیال-ذره) در عبارت مربوط به نیروی کشش است که از مدل کشش گیداسپاو [۴۸] محاسبه شده است. مزیت اصلی این مدل این است که تنها به دو معادله تجربی نیاز دارد: یکی برای به دست آوردن حداقل سرعت فورانی شدن و دیگری برای به دست آوردن نیمرخ فشار در طول بستر. آنان از رابطه اولازار و همکاران [۵۰] برای U_{ms} و از رابطه اولازار و همکاران [۵۱] برای نیمرخ فشار استفاده کردند:

$$(Re_0)_{ms} = 0.126 Ar^{0.5} \left(\frac{D_b}{D_0}\right)^{1.68} \left[\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right]^{-0.57} \quad (23)$$

$$-\frac{\Delta P_s}{H_0 \rho_b g} = 1.20 \left[\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right]^{-0.11} (Re_0)_{ms}^{-0.06} \left(\frac{H_0}{D_0}\right)^{0.08} \quad (24)$$

با استفاده از مدل پیشنهادی اولازار و همکاران [۳] سرعت هوا در ارتفاع‌های مختلف بستر در هر دو بخش فوران و حلقه و سرعت جامد در حلقه (مقادیر متوسط در جهت شعاعی)، جریان عرضی جامد از حلقه به درون فوران و تخلخل در طول فوران پیش‌بینی می‌شود. مقادیر شبیه‌سازی شده برای سرعت‌های گاز و جامد با

داده‌های آزمایشگاهی مطابقت دارند بجز سرعت ذرات در طول فوران که در آن پیش‌بینی دقیق، مستلزم ملاحظات مربوط به تغییرات قطر فوران با ارتفاع بستر است. در واقع مدل پیشنهادی قادر نیست سرعت ذرات را در فوران به درستی پیش‌بینی کند. زیرا در این مدل فرض می‌شود که قطر فوران ثابت است، در حالی که شکل فوران در بسترهای فورانی مخروطی از پیچیدگی خاصی برخوردار است. با وجود این، یکی از مزایای مهم این مدل سادگی آن است. این مسئله به خصوص زمانی که مدل‌های هیدرودینامیکی به همراه مدل‌های سینتیکی برای طراحی راکتورهای بستر فورانی به کار می‌رود حائز اهمیت خواهد بود.

۴-۳ مدل‌های شبکه عصبی

محاسبات شبکه عصبی روشی است برای حل مسائل پیچیده که بر مبنای عملکرد مغز انسان استوار است. این مدل‌ها به خوبی با داده‌های ناکامل و مسائل ناخطی همگونی پیدا کرده و پیش‌بینی سریعی از رفتار سیستم ارائه می‌دهند. این مدل، موفقیت قابل توجهی در حل مسائلی که شبیه‌سازی آن‌ها با استفاده از روش‌های منطقی و تحلیلی دشوار است نشان داده است. مدل مذکور را می‌توان به این صورت تعریف کرد: یک سیستم محاسباتی متشکل از تعدادی عنصر ساده دارای ارتباطات گسترده که اطلاعات را از طریق پاسخ دینامیک آن‌ها به ورودی‌ها پردازش می‌کند. هنگامی که ساختار شبکه عصبی تعیین شد، اطلاعات قابل پردازش خواهد بود. مسائل اصلی مربوط به ورودی‌ها، خروجی‌ها، وزن‌ها، توابع شبیه‌سازی و انتقال، پرورش شبکه، آزمایش‌ها و غیره است [۸].

۴-۳-۱ مدل عبدالسلام و باتاچاری [۸]

در مطالعه مذکور یک مدل کامل شبکه عصبی خوراک پیش‌رونده برای پیش‌بینی حداقل سرعت فورانی شدن بسترهای دارای توزیع‌کننده‌های مرکزی و دایره‌ای به کار برده شده است. به منظور طراحی دقیق و بزرگنمایی بسترهای فورانی، پیش‌بینی حداقل سرعت فورانی شدن یک سیستم خاص با ابعاد مختلف و ویژگی‌های مختلف ذرات و گاز فواره ضروری است. با توجه به پیچیدگی ذاتی پیش‌بینی حداقل سرعت فورانی شدن، روش متداول، استفاده از روابط تجربی است. داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده از مراجع و

- لینک و همکاران [۳۴] معادله نیوتن را در مورد مؤلفه عمودی سرعت ذره به کار برده و از تمامی نیروهای اصطکاکی بین ذرات جامد و نیز مؤلفه چرخشی سرعت صرفنظر کرده‌اند. آنان همچنین مدلی برای لحاظ کردن آشفتگی سیال را مدنظر قرار نداده‌اند. این فرضیات تا اندازه زیادی موجب انحراف نتایج شبیه‌سازی از داده‌های آزمایشگاهی گردیده است. گرچه لینک و همکاران [۳۴] علت انحراف را اعمال فرض دوبعدی مدل و ضعف رابطه ارگان [۳۷] می‌دانند. اما در مطالعه بعدی آنان نیز [۳۶] که در آن از یک مدل سه‌بعدی و روابط تجربی گوناگونی برای محاسبه نیروی کشش استفاده شده است بهبود چشمگیری در نتایج شبیه‌سازی مشاهده نمی‌شود.
 - در تمامی مدل‌های اولری ارائه شده از نظریه جنبشی لئون و همکاران [۴۲] برای محاسبه تنش جامد استفاده شده است.
 - از آنجایی که نیروی کشش (گاز- جامد) نقش اساسی در معادلات تکانه دو فاز دارد، در مطالعات انجام شده مدل‌های مختلفی برای محاسبه این نیرو مورد استفاده قرار گرفته و نتایج متنوعی استخراج گردیده است. در این بین، تلفیقی از دو مدل ارگان [۳۷] و (ون- یو) نیز [۳۸] توسط پژوهشگران متعددی به کار برده شده است. اما همچنان برخی از پژوهشگران، در اثبات ضعف این مدل‌ها مواردی را ارائه داده‌اند.
- حاصل از کار آزمایشی انجام شده در این مطالعه برای ارزیابی دقت مدل‌ها به کار رفته است. حداقل سرعت فورانی شدن و سیالی شدن پیش‌بینی شده به کمک مدل‌های شبکه عصبی تطابق بهتری را با داده‌های آزمایشگاهی واقعی در مقایسه با آنچه از روابط تجربی موجود در مراجع به دست می‌آید، نشان می‌دهد. عبدالسلام و باتاچاری [۸] در مطالعه خود محدوده پارامترهای عملیاتی را که در آن دقت مدل شبکه عصبی پیشنهادی تأیید می‌شود معرفی کردند. نتایج کلی زیر از مطالعه مذکور استخراج شده است:
- به ازای یک مقدار ثابت برای ارتفاع بستر و مساحت روزنه ورودی هوا، حداقل سرعت فورانی شدن در توزیع‌کننده‌های دایره‌ای به طور قابل توجهی بیشتر از توزیع‌کننده‌های جت مرکزی است.
 - به ازای یک مقدار ثابت برای ارتفاع بستر، مساحت روزنه ورودی هوا و اندازه ذره، حداقل سرعت فورانی شدن با افزایش چگالی ذرات افزایش می‌یابد.
 - به ازای یک مقدار ثابت برای روزنه ورودی هوا، با افزایش اندازه ذرات، حداقل سرعت فورانی شدن افزایش می‌یابد.
 - با افزایش ارتفاع بستر، حداقل سرعت فورانی شدن در هر دو نوع توزیع‌کننده به سوی یک مقدار میل می‌کند؛ همچنین با افزایش مساحت روزنه ورودی هوا اختلاف بین مقدار حداقل سرعت فورانی شدن منتج از دو نوع توزیع‌کننده کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1] Duarte, C.R., Murata, V.V., Barrozo, A.S. "Experimental and numerical study of spouted bed fluid dynamics, Brazilian Journal of Chemical Engineering", Vol. 25, No. 1, pp. 95-107, (2008).
- [2] Hosseini, S.H., Zivdar, M., Rahimi, R. "CFD simulation of gas-solid flow in a spouted bed with a non-porous draft tube", Chemical Engineering and Processing, Vol. 48, No. 11 & 12, pp.1539-1548.
- [3] Olazar, M., Lopez, G., Altzibar, H., Barona, A., Bilbao, J. "One-dimensional modeling of conical spouted beds", Chemical Engineering and Processing, Vol. 48, pp. 1264-1269, (2009).
- [4] Mathur, K.B., Epstein, N. "Spouted beds", Academic Press Inc. LTD., New York, 304p, (1974).
- [5] San Jose, M.J., Alvarez, S., Salazar, A.O., Olazar, M., Bilbao, J. "Influence of the particle diameter and density in the gas velocity in jet spouted beds", Chemical Engineering and Processing, Vol. 44, No. 2, pp. 153-157, (2005).

۵- بحث و نتیجه‌گیری

- مدل ژانو و همکاران [۳۵] رفتار بسترهای فورانی را با دقت بسیار خوبی پیش‌بینی می‌کند. بهبود نتایج به دست آمده را می‌توان تا اندازه زیادی ناشی از اعمال نیروی اصطکاک چرخشی ذره و همچنین یک مدل جریان آشفته در مدل پیشنهادی دانست. اگرچه به نظر می‌رسد فرضیه استفاده از یک مدل دوبعدی، تا اندازه‌ای موجب اختلاف نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی است. نتیجه جالب توجه دیگر حاصل از مطالعه ژانو و همکاران [۶]، شبیه‌سازی بسترهای فورانی دارای صفحات مکش است. مطابق با نتایج به دست آمده به دلیل عدم امکان نفوذ گاز از منطقه فوران به درون حلقه، اثر مدل آشفتگی جریان در ناحیه‌ای که صفحات مکش تعبیه شده‌اند بسیار ناچیز و قابل صرفنظر کردن است.

- [6] Zhao, X.L., Li, S.Q., Liu, G.Q., Song, Q., Yao, Q. "Flow patterns of solids in a two-dimensional spouted bed with draft plates: PIV measurement and DEM simulations", *Powder Technology*, Vol. 183, pp. 79-87, (2008).
- [7] Rasul, M.G., Bhattacharya, S.C. "Performance comparison of three spouted bed reactor designs", *Journal of the Institution of Engineers (India)*, Vol. 72, pp. 73-76, (1992).
- [8] Abdul Salam, P.A., Bhattacharya, S.C. "A Comparative hydrodynamic study of two types of spouted bed reactor designs", *Chemical Engineering Science*, Vol. 61, pp.1946-1957, (2006).
- [9] He, Y.L., Qin, S.Z., Lim, C.J. and Grace, J.R. "Particle velocity profiles and solid flow patterns in spouted beds", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 72, pp. 561-568, (1994).
- [10] Roy, D., Larachi, F., Legros, R., Chaouki, J. "A study of solid behavior in spouted beds using 3-D particle tracking", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 72, pp. 945-952, (1994).
- [11] Benkrid, A., Caram, H.S. "Solid flow in the annular region of a spouted bed", *AIChE*, Vol. 35, pp. 1328-1336, (1989).
- [12] Duarte, C.R., Murata, V.V., Barrozo, M.A.S. "A study of the fluid dynamics of the spouted bed using CFD", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 263-270, (2005).
- [13] Mathur, K.B., Gishler, N. "A technique for contacting gases with coarse solid particle", *AIChE*, Vol. 1, pp. 157-164, (1955).
- [14] Thorley, B., Saunby, J.B., Mathur, K.B., Osberg, G.L. "An analysis of air and solids flow in a spouted wheat bed", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 37, pp.184-19, (1959).
- [15] Chatterjee, A. "Effect of particle diameter and apparent particle density on internal solid circulation rate in air spouted beds", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 9, pp. 531-540, (1970).
- [16] Van Velzen, D., Flamm, H.J., Langenkamp, H., Casile, A. "Motion of solids in spouted beds", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 52, pp. 156-161, (1974).
- [17] Lim, C.J., Mathur, K.B. "Modeling of particle movement in spouted beds, in fluidization", Eds J.F. Davidson and D.L. Keairns, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 104-109, (1978).
- [18] Waldie, B., Wilkinson, D. "Measurement of particle movement in a spouted bed using a new microprocessor based technique", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 64, pp. 944-949, (1986).
- [19] Randalman, R., Benkrid, A., Caram, H.S. "Investigation of the solid flow pattern in a spouted bed", *AIChE*, Vol. 83, pp. 23-28, (1987).
- [20] Kim, S.J., Cho, S.Y. "Particle velocity and circulation rate in liquid spouted beds", *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 8, pp. 131-136, (1991).
- [21] Choi, M., Meisen, A. "Hydrodynamics of shallow, conical spouted beds", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 70, pp. 916-924, (1992).
- [22] Morgan, M.H., Day, J.Y., Littman, H. "Spout voidage distributions, stability and particle circulation rates in spouted beds of coarse particles, I. Theory", *Chemical Engineering Science*, Vol. 40, pp. 1367-1377, (1985).
- [23] Grace, J.R. and Mathur, K.B. "Height and structure of the fountain region above spouted beds", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 56, pp. 533-537, (1978).
- [24] Olazar, M., San Jose, M.J., Izquierdo, M.A., Salazar, A.O., Bilbao, J. "Effect of operating conditions on solid velocity in the spout, annulus and fountain of spouted beds", *Chemical Engineering Science*, Vol. 56, pp. 3585-3594, (2001).
- [25] Epstein, N., Grace, J.R. "Spouting of particulate solids, In L. Otten, & M.E. Fayed (Eds.), *Handbook of Powder Science and Technology*", Chapter 11, New York: Van Nostrand Reinhold, (1984).
- [26] Ishikura, T., Nagashima, H., Ide, M. "Hydrodynamics of a spouted bed with a porous draft tube containing a small wall amount of finer particles", *Powder Technology*, Vol. 131, pp. 56-65, (2003).
- [27] San Jose, M.J. Olazar, M., Alvarez, O., Morales, A., Bilbao, J. "Local porosity in conical spouted beds consisting of solid of varying density", *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 7, pp. 2017-2025, (2005).
- [28] Liu, G.Q., Li, S.Q., Zhao, X.L., Yao, Q. "Experimental studies of particle flow dynamics in a two-dimensional spouted bed", *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, pp. 1131-1141, (2008).
- [29] Piskova, E., Morl, L. "Characterization of spouted bed regimes using pressure fluctuation signals", *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, pp. 2307-2316, (2008).
- [30] Zhonghua, W., Mujumdar, A.S. "CFD modeling of the gas- particle flow behavior in spouted beds", *Powder Technology*, Vol. 183, 260-272, (2008).
- [31] Kawaguchi, T., Sakamoto, M., Tanaka, T., Tsuji, Y. "Quasi-three-dimensional numerical simulation of spouted beds in cylinder", *Powder Technology*, Vol. 109, No. 1, pp. 3-12, (2000).
- [32] Takeuchi, S. Wang, S., Rhodes, M. "Discrete element simulation of a flat-bottomed spouted bed in the 3-D cylindrical coordinate system", *Chemical Engineering Science*, Vol. 59, No. 17, pp. 3495-3504, (2004).
- [33] Swasdisevi, T., Tanthapanichakoon, W., Charinpanitkul, T., Kawaguchi, T., Tanaka, T., Tsuji, Y. "Investigation of fluid and coarse-particle dynamics in a two-dimensional spouted bed", *Chemical Engineering and Technology*, Vol. 27, No. 9, pp. 971-981, (2004).

- [34] Link, J., Zeilstra, C., Deen, N., Kuipers, H. "Validation of a discrete particle model in a 2D spout-fluid bed using non-intrusive optical measuring techniques", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 82, No. 1, 30-36, (2004).
- [35] Zhao, X.L., Li, S.Q., Liu, G.Q., Yao, Q., Marshall, J.S. "DEM simulation of the particle dynamics in two-dimensional spouted beds", *Powder Technology*, Vol. 184, pp. 205-213, (2008).
- [36] Link, J.M., Cuypers, L.A., Deen, N.G., Kuipers, J.A.M. "Flow regimes in a spout-fluid bed: A combined experimental and simulation study", *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, pp. 3425-3442, (2005).
- [37] Ergun, S. "Fluid flow through packed columns", *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48, pp. 89-94, (1952).
- [38] Wen, C.Y., Yu, Y.H., *Mechanics of fluidization*, Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., Vol. 62, No. 2, pp. 100-111, (1966).
- [39] Koch, D.L., Hill, R.J. "Inertial effects in suspension and porousmedia flows", *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol. 33, pp. 619-647, (2001).
- [40] Duarte, C.R., Olazar, M., Murata, V.V., Barrozo, M.A.S. "Numerical simulation and experimental study of fluid-particle flows in a spouted bed", *Powder Technology*, Vol. 188, pp. 195-205, (2009).
- [41] Gidaspow, D., Bezburuah, R. and Ding, J. "Hydrodynamics of circulating fluidized beds: kinetic theory approach", *Proc. of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*, pp. 75-82, (1992).
- [42] Lun, C.K.K., Savage, S.B. and Jeffrey, D.J. "Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in couette flow and slightly inelastic particles in general flow field", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 140, 223-256, (1984).
- [43] Uemaki, O., Yamada, R., Kugo, M. "Particle segregation in a spouted bed of binary mixtures", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 61, pp. 303-307, (1983).
- [44] Olazar, M., San Jose, M.J., Lamosas, R., Alvarez, S., Bilbao, J. "Study of local properties in conical spouted beds using an optical fiber probe", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 34, pp. 4033-4039, (1995).
- [45] Ogino, F., Zhang, L., Maehashi, Y. "Minimum rate of spouting and peak pressure-drop in a spouted bed", *Inter. Chem. Eng. Jpn.*, Vol. 33, pp. 265-272, (1993).
- [46] Gibilaro, L.G., Di Felice, R., Waldram, S.P. "Generalized friction factor and drag coefficient correlations for fluid-particle interactions", *Chemical Engineering Science*, Vol. 40, No. 10, pp. 1817-1823, (1985).
- [47] Zhang, Y., Reese, J.M. "The drag force in two fluid models of gas-solid flows", *Chemical Engineering Science*, Vol. 58, No. 8, pp. 1641-1644, (2003).
- [46] Syamlal, M., O'Brien, T.J. "Simulation of granular layer inversion in liquid fluidized beds", *Int. J. Multiphase Flow* 14(4), 473-481, (1988).
- [47] Ding, J., Gidaspow, D. "A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow", *AIChE*, Vol. 36, No. 4, pp. 523-538, (1990).
- [48] Gidaspow, D. "Multiphase Flow and Fluidization", Academic Press, San Diego, (1994).
- [49] He, Y.L., Lim, C.J., Grace, J.R., Zhu, J.X., Qin, S.Z. "Measurements of voidage profiles in spouted beds", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 72, pp. 229-234, (1994).
- [50] Olazar, M., San José, M.J., Aguayo, A.T., Arandes, J.M., Bilbao, J. "Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 31, pp. 1784-1791, (1992).
- [51] Olazar, M., San José, M.J., Aguayo, A.T., Arandes, J.M., Bilbao, J. "Pressure drop in conical spouted beds", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 51, pp. 53-60, (1993).