۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

شبیه‌سازی عددی جریان دو فاز گاز-جامد محترق در بستر سیال

جهت دریافت درجه کارشناسی‌ارشد در مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی

توسط:

احسان محمدی

استاد راهنما:

دکتر مهرزاد شمس

استاد مشاور:

دکتر رضا ابراهیمی

تابستان ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

تـقـدیـم

تقدیم به پدر و مادرم.

تاسیس ۱۳۰۷ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	**تأییدیه هیأت داوران**	**شماره:** **تاریخ:**

هیأت داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان :

شبیه‌سازی عددی جریان دو فاز گاز-جامد محترق در بستر سیال

توسط آقای **احسان محمدی** ، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته **مکانیک**. گرایش **تبدیل انرژی** در تاریخ ...../...../.....۱۳ مورد تأیید قرار می‌هند.

۱- استاد راهنمای اول	جناب آقای دکتر **مهرزاد شمس**	امضاء
۲- استاد راهنمای دوم	جناب آقای / سرکار خانم دکتر	امضاء
۳- استاد مشاور	جناب آقای دکتر **رضا ابراهیمی**	امضاء
۴- ممتحن داخلی	جناب آقای دکتر **محمدرضا شاه‌نظری**	امضاء
۵- ممتحن خارجی	سرکار خانم دکتر **افسانه مجری**	امضاء
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده	جناب آقای دکتر **محمدرضا شاه‌نظری**	امضاء

تاسیس ۱۳۰۷ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی	**اظهارنامه دانشجو**	**شماره:** **تاریخ:**

اینجانب **احسان محمدی** دانشجوی کارشناسی‌ارشد رشته **مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی** دانشکده **مهندسی مکانیک** دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان

شبیه‌سازی عددی جریان دو فاز گاز-جامد محترق در بستر سیال

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای **دکتر مهرزاد شمس** توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت واصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

تشکر و قدردانی

از آقای دکتر شمس و آقای دکتر ابراهیمی به خاطر راهنمایی‌هایشان کمال تقدیر و تشکر را دارم.

چکیده

موضوع این مطالعه مدل‌سازی جریان دو فاز در بستر سیال محترق می‌باشد. معادلات حاکم بر جریان دوفاز و همچنین جملات مربوط به احتراق آورده شده است. مدل‌سازی به صورت دوبعدی و گذرا می‌باشد و احتراق در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی از روش اولر-اولر استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی یک محفظه احتراق زغال‌سنگ آزمایشی انتخاب شده است. در مدل‌سازی علاوه بر معادلات هیدرودینامیکی، معادله انرژی، $K-\epsilon$ ، اجزا و معادله انرژی دانه‌ای حل شده است. در اکثر مدل‌سازی‌های انجام‌شده در گذشته، بستر سیال به صورت سیال سرد در نظر گرفته‌شده‌است، به این معنی که احتراق در نظر گرفته نشده است.همچنین ترکیب مدل‌سازی احتراق با جریان دانه‌ای تاکنون انجام نشده است. مزیت و نوآوری کار حاضر نسبت به کارهای گذشته، در نظر گرفتن احتراق همراه با فرض جریان دانه‌ای می‌باشد. چالش اصلی پیش روی این مطالعه بالا بودن حجم محاسبات می‌باشد که تا حد امکان با فرض‌های ساده‌سازی معقول کاهش‌یافته است. نتایج به دست آمده با نتایج ارائه‌شده در مراجع مقایسه و اعتبارسنجی شده است. همچنین استقلال از شبکه مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمت نتایج نیز کانتورهای کسر فضای خالی، کانتور فشار، دما و همچنین کانتورهای کسر جرمی واکنش‌دهنده‌ها و فراورده‌ها آورده شده است. مطالعه حاضر به ما در درک مکانیزم احتراق و طراحی سیستم‌های احتراقی جدید کمک می‌کند.

کلید واژه : بستر سیال، احتراق، جریان دوفاز، اولر-اولر.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... د

فهرست شکل‌ها ..... ه

فهرست علائم و اختصارات ..... و

فصل ۱- مقدمه ۲

۱-۱- تعریف ۲

۱-۲- کاربردها ۳

۱-۳- انواع بستر سیال ۳

۱-۴- روشهای تحلیل ۶

۱-۴-۱- مدل اولر-اولر ۷

۱-۴-۲- مدل اولر-لاگرانژ ۷

۱-۴-۳- مدل‌های عددی شیمیایی ۷

۱-۴-۴- انتگرال‌گیری مستقیم ۸

۱-۴-۵- کاهش درجات آزادی ۸

۱-۴-۶- ذخیره و بازیابی ۸

فصل ۲- مروری بر کارهای پیشین ۱۰

۲-۱- مدل‌های یک‌بعدی ۱۰

۲-۲- مدل های چندبعدی ۱۳

۲-۳- چشم‌انداز آینده ۱۶

فصل ۳- معادلات حاکم ۱۹

۳-۱- بقای جرم ۱۹

۳-۱-۱- معادله حالت ۲۰

۳-۲- بقای مومنتم ۲۰

۳-۲-۱- انتقال مومنتوم سیال جامد ۲۱

۳-۲-۲- انتقال مومنتوم جامد-جامد ۲۴

۳-۲-۳- تانسور تنش فاز سیال ۲۴

۳-۲-۴- تانسور تنش فاز جامد ۲۵

۳-۳- بقای انرژی داخلی ۲۸
۳-۳-۱- انتقال حرارت سیال-جامد ۲۹
۳-۳-۲- شار رسانایی گرمایی در فاز سیال ۳۰
۳-۳-۳- شار رسانایی گرمایی در فاز جامد ۳۰
۳-۳-۴- گرمای واکنش ۳۲
۳-۴- بقای اجزا ۳۳
۳-۴-۱- سینتیک واکنش ۳۳
۳-۵- معادله بقای انرژی دانه‌ای ۳۶
۳-۵-۱- شار پخشی انرژی دانه‌ای ۳۹
۳-۵-۲- اتلاف انرژی دانه‌ای ۴۰
۳-۵-۳- انتقال انرژی دانه‌ای ۴۰
فصل ۴- گسسته‌سازی معادلات ۴۲
معادلات انتقال عددی ۴۲
۴-۱-۱- انتگرالگیری روی حجم کنترل ۴۲
۴-۱-۲- گسسته سازی معادله انتقال ۴۴
۴-۲- نمای کلی از الگوریتم حل ۴۶
۴-۳- گسسته سازی معادله مومنتم ۵۰
۴-۴- دستگاه مختصات ۵۱
۴-۵- معادلات گسسته شده ۵۳
۴-۶- شرایط مرزی ۵۴
۴-۷- حل معادلات خطی ۵۶
۴-۸- حذف جزئی کوپلینگ فصل مشترک ۵۶
۴-۹- معادله تصحیح فشار سیال ۵۸
۴-۹-۱- فرمول‌بندی ۵۹
۴-۹-۲- جریان ملایم تراکم‌پذیر ۶۲
۴-۹-۳- شرایط مرزی ۶۳
۴-۱۰- معادله تصحیح کسر حجمی جامد ۶۴
۴-۱۰-۱- جمله همرفت ۶۴
۴-۱۰-۲- جمله گذرا ۶۶
۴-۱۰-۳- جمله تولید ۶۶

۴-۱۰-۴- معادله تصحیح ۶۷
۴-۱۰-۵- ضریب تخفیف انتخابی برای نواحی متراکم ۶۷
۴-۱۱- معادلات انرژی و اجزا ۶۸
۴-۱۱-۱- دفع حرارت از دیوار ۶۸
۴-۱۱-۲- تشعشع ۶۹
۴-۱۲- تنظیمات نهایی کد ۷۰
۴-۱۲-۱- ضریب تخفیف ۷۰
۴-۱۲-۲- محاسبه باقیمانده‌ها ۷۰
۴-۱۲-۳- تنظیم گام زمانی ۷۱
فصل ۵- نتایج ۷۳
۵-۱- مورد مطالعه ۷۳
۵-۲- اعتبارسنجی نتایج ۷۶
۵-۲-۱- استقلال از شبکه ۸۲
۵-۳- نتایج ۸۳
۵-۳-۱- کانتور کسر حجمی ۸۴
۵-۳-۲- کانتور فشار، دما و سرعت ۸۵
۵-۳-۳- کانتور کسر جرمی اجزا ۸۸
۵-۴- نتیجه‌گیری ۹۱
۵-۵- پیشنهادات ۹۲
ضمیمه الف : متن کد ورودی ۹۳
مراجع ۱۰۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱ : مرور مدل های احتراق سوخت جامد : مشخصات پایه مدل های یک بعدی..... ۱۲
جدول ۲-۲: مدل های یک بعدی احتراق سوخت جامد آورده شده است..... ۱۶
جدول ۵-۱ : پارامترهای مورد استفاده در مدلسازی..... ۷۴

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: نمای کلی از بستر سیال..... ۲
شکل ۱-۲: نمودار فرایند معلق سازی بر حسب سرعت گاز و افت فشار در آن..... ۴
شکل ۱-۳: حالتهای مختلف معلق سازی در بستر سیال..... ۶
شکل ۳-۱: محاسبه گرمای واکنش برای واکنش دهنده‌ها در دمای مختلف..... ۳۲
شکل ۳-۲: مدل کاهش هسته برای احتراق زغال‌سنگ..... ۳۴
شکل ۴-۱ : حجم کنترل و مکان نقاط در راستای x..... ۴۳
شکل ۴-۲ : لغزش آزاد و عدم لغزش روی دیواره شرقی [۸۰]..... ۵۵
شکل ۴-۳ : شرط لغزش آزاد در فصل مشترک [۸۰]..... ۵۶
شکل ۴-۴: شرایط مرزی جریان [۸۰]..... ۶۴
شکل ۴-۵: تنظیم تکرار برای کسر حجمی و فشار جامد [۸۰]..... ۶۸
شکل ۵-۱: نمای هندسی محفظه احتراق [۷۶]..... ۷۳
شکل ۵-۲: مقایسه نتایج کد با داده‌های مرجع برای کسر حجمی فضای خالی در طول محفظه احتراق.۷۶
شکل ۵-۳: مقایسه بین پروفیل سرعت فاز گاز با دادههای مرجع در مقطع ۴۰ سانتیمتر..... ۷۷
شکل ۵-۴ : مقایسه بین پروفیل سرعت فاز جامد با داده‌های مرجع در مقطع ۴۰ سانتیمتر..... ۷۸
شکل ۵-۵ : مقایسه بین پروفیل سرعت فاز گاز با داده‌های مرجع در مقطع ۲۰۰ سانتیمتر..... ۷۸
شکل ۵-۶ : مقایسه بین پروفیل سرعت فاز جامد با داده‌های مرجع در مقطع ۲۰۰ سانتیمتر..... ۷۹
شکل ۵-۷ : مقایسه بین پروفیل سرعت فاز گاز با داده‌های مرجع در مقطع ۴۰۸/۵ سانتیمتر..... ۸۰
شکل ۵-۸ : مقایسه بین پروفیل سرعت فاز جامد با داده‌های مرجع در مقطع ۴۰۸/۵ سانتیمتر..... ۸۰
شکل ۵-۹ : مقایسه تغییرات دما در طول محفظه احتراق با داده‌های آزمایشگاهی..... ۸۱
شکل ۵-۱۰: بررسی استقلال شبکه. سرعت متوسط در مقطع در ارتفاع ۲ متری..... ۸۲
شکل ۵-۱۱ : سری زمانی کانتور کسر حجمی فضای خالی..... ۸۵
شکل ۵-۱۲ : کانتورهای دمای گاز جامد بر حسب کلوین..... ۸۶
شکل ۵-۱۳ : کانتورهای سرعت گاز و جامد cm/s..... ۸۷
شکل ۵-۱۴: کانتور فشار گاز..... ۸۸
شکل ۵-۱۵ : کانتورهای کسر جرمی اجزای فاز گازی..... ۸۹
شکل ۵-۱۶ : کانتورهای کسر جرمی اجزای فازهای جامد..... ۹۰

فهرست علائم و اختصارات

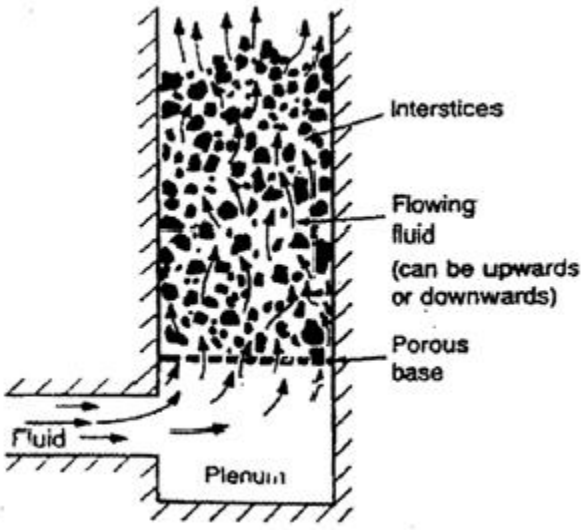
عنوان	علامت اختصاری
تابع پسای تک‌ذره	C_{D_s}
ضریب پسای بین فازهای جامد l و m	C_{flm}
قطر ذره	d_{pm}
تانسور نرخ کرنش فاز سیال	$\overline{\overline{D}}_g$
ضریب ارتجاع برای برخورد فازهای جامد l و m	e_{lm}
مقاومت در برابر جریان سیال ناشی از محیط متخلخل	$\vec{f}_g$
انتقال حرارت از سیال به جامد	H_{g1}
گرمای واکنش در فاز سیال	ΔH_{rg}
ضریب انتقال حرارت دیوار	H_{wall}
انتقال مومنتم بین فاز سیال و جامد	I_{gm}
مقاومت لایه خاکستر	k_{am}
ضریب انتقال حرارت سیال	k_g
مقاومت واکنش سطحی	k_{rm}
رسانایی انرژی دانه‌ای	k_{Θ_m}
فشار جزئی اکسیژن	P_{o2}
فشار فاز جامد در حالت رژیم لزج	P_{sm}^{v}
شار دیفیوز انرژی دانه‌ای	$\vec{q}_{\Theta_m}$
نرخ رسانایی جامد به سیال	R_{km}
عدد اشمیت	Sc
عدد شروود	Sh_m
کسر حجمی فاز سیال	ϵ_g
کسر فضای خالی بستر انباشته	ϵ_g^*
تابع ضریب ارتجاع	η
چگالی ماکروسکوپیک سیال	ρ_g
زاویه اصطکاک داخلی	ϕ

فصل اول

مقدمه

۱-۱- تعریف

تعداد زیادی از فرآیندهای صنعتی مربوط به تماس و واکنش بین جامدات و سیالات هستند، از جمله خشک کردن یا حرارت دهی ذرات، اُکسایش یا احیای سنگ معدن‌ها، عملیات سطحی فلزات و ... حرارت دهی و خشک کردن جامدات برای مثال تنها شامل انتقال حرارت و جرم می‌باشد، درحالی‌که محترق کننده‌ها، گازی کننده‌ها و علاوه بر انتقال حرارت و انتقال جرم شامل انجام واکنش‌های شیمیایی هم می‌باشند. در واقع آسان‌ترین روش برای انجام چنین فرآیندهایی فراهم کردن بستری از ذرات جامد و عبور دادن یک سیال از میان آن می‌باشد، یعنی نفوذ از میان فضاهای موجود در بین ذرات همان طور که در شکل ۱-۱ مشاهده می‌شود بستر جامد ساده‌ای از ذرات در شکل مشاهده می‌شود که در ظرفی با کف متخلخل قرارگرفته، سیال از میان آن به طرف بالا یا پایین جریان می‌یابد. اغلب جریان سیال به طرف بالا ترجیح داده می‌شود، چون دارای حد پایینی سرعت (لحظه سیال سازی بستر) و حد بالایی سرعت (لحظه خروج ذرات از سیستم) می‌باشد.



شکل ۱-۱: نمای کلی از بستر سیال[1]

در این حالت حد سرعت سیال به عنوان تابعی از افت فشار در سطح بستر تعیین می‌شود. در هر حال سیال با سطح ذرات تماس می‌یابد و جریان ممتد سیال به علت تماس یکنواخت سطوح ذرات تازه می‌گردد.

[1] http://www.fao.org/docrep/t0512e/t0512e0a.htm

نوع جریان سیال در فصل مشترک سیال/ جامد، روی سرعت واکنش تأثیر می‌گذارد. روش دیگر تماس دادن سیال با سطح ذرات عبارت است از ریختن ذرات جامد به طرف پایین در لوله‌ای عمودی که جریان سیال در آن وجود دارد، مخلوط کردن یا هم زدن مکانیکی و استفاده از بستر قیفی شکل که در آن جت سیال در سرعت‌های بالا از میان بستر نفوذ می‌کند. تشخیص مناسب‌ترین روش بستگی به شرایط کاری دارد. محفظه‌ای که در آن سیال سازی انجام می‌گیرد، حاوی یک کف متخلخل می‌باشد که به علت وظیفه‌ای که دارد (توزیع یکنواخت سیال در سطح بستر) توزیع‌کننده نامیده می‌شود.

۱-۲- کاربردها

بستر سیال[1] را می‌توان در بسیاری از عملیات شیمیایی، نفتی، داروسازی، کشاورزی، بیوشیمی، غذایی، الکتریکی و صنعت تولید انرژی پیدا کرد. به عنوان مثال احتراق یا تبخیر زغال در صنعت تولید انرژی استفاده‌شده است. FCC[2] در صنعتی مهندسی شیمی یکی یا تعداد بیشتر بستر سیال برای سیستم چرخشی ذرات کاتالیزور به خدمت می‌گیرد. سیلیکن برای صنعت نیمه‌هادی به قیمت ارزان از رآکتور ته-نشینی گاز شیمیایی به دست می‌آید. پدیده معلق سازی هنگامی اتفاق می‌افتد که ذرات جامد مانند حالت سیال در گاز یا مایع معلق می‌شوند. بستر سیال گازی بسیار شبیه جوشش مایع است و در بسیاری از جهات رفتاری شبیه مایع دارد. بستر سیال گاز-جامد مزایای بسیاری در مقایسه با روش‌های دیگر رآکتور گاز-جامد دارد. در بستر سیال محترق، اختلاط سریع ذرات جامد باعث هم دما شدن تقریبی در کل بستر می‌شود به همین دلیل بستر در برابر تغییرات سریع دما مقاومت نشان می‌دهد. انتقال حرارت و جرم در مقایسه با روش‌های دیگر بسیار زیادتر است. جریان روان ذرات باعث به وجود آمدن یک عملیات خودکار پیوسته می-شود که اضافه یا کم کردن مقدار زیاد انرژی را در رآکتورهای بزرگ را ممکن می‌سازد. رفتار سیال گونه ذرات جامد و سرعت و راحتی انتقال تماس راحت با گاز در بستر سیال مشخصات مهمی برای کاربردهای صنعتی هستند.

۱-۳- انواع بستر سیال

مهم‌ترین عامل تعیین سیال شدن یا ثابت بودن یک بستر، سرعتی است که سیال از میان بستر عبور می‌کند. حداقل سرعت سیال سازی (لحظه شروع سیالیت) Umf بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود :

[1] Fluidized bed
[2] Fluid catalytic cracking

$$U_{mf} = \frac{V_{mf}}{A} \qquad (۱-۱)$$

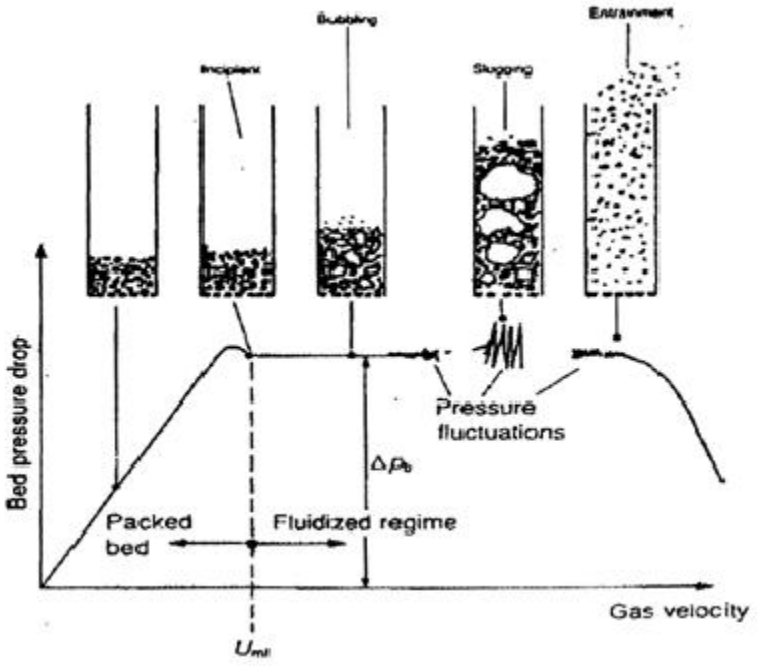
که Vmf دبی جریان در سیالیت اولیه وA مساحت سطح مقطع بستر در ظرف می‌باشد. در ابتدا برای سادگی فرض می‌شود که ذرات دارای سایز و دانسیته یکسان می‌باشند تا شرایط سیال شدن در آن‌ها یکسان شود. در طی این آزمایش سه نوع بررسی صورت می‌پذیرد

۱- مشاهده چشمی بستر

۲- افت فشار در سطح بستر

۳- عمق بستر.

شکل ۱-۲ نوع بستر را وقتی سرعت جریان گاز به طور تدریجی از صفر افزایش می‌یابد، نشان می‌دهد. در مرحله اول ظاهر بستر تغییری نمی‌کند و افت فشار با سرعت سیال افزایش می‌یابد (تا رسیدن به مقدار بیشینه در نقطه سیالیت اولیه). در ابتدا ذرات تمایل به ایجاد نظم مجدد دارند تا فضای بیشتری در بین خودشان ایجاد کنند، در نتیجه مقدار تخلخل در بستر افزایش می‌یابد، یعنی ارتفاع بستر بیشتر می‌شود. مقدار این انبساط و افزایش در سرعت سیال سازی بستگی به طبیعت ذرات دارد



شکل ۱-۲: نمودار فرایند معلق سازی بر حسب سرعت گاز و افت فشار در آن[1]

[1] Fluidised Bed Coal-Fired Boilers – Department of Coal Publications, Government of India Fluidised Combustion of Coal – A National Coal Board Report, London

. البته در برخی نقاط، تخلخل و حباب‌هایی در میان ذرات تشکیل می‌شود و این حباب‌ها که به طور غیریکنواخت توزیع‌شده‌اند، تا سطح بالا می‌آیند و تا رسیدن به سطح آزاد، ایجاد شیار می‌نمایند و در فضای بالای بستر پخش می‌شوند. در این حالت بستر شامل دو فاز است : « فاز ذرات معلق » و « فاز حبابی »

عمل تولید حباب باعث مخلوط شدن پیوسته ذرات می‌شود و بنابراین باعث یکنواخت شدن درجه حرارت و ترکیب شیمیایی بستر می‌گردد. در ضمن تولید حباب می‌تواند باعث عبور اضافی گاز سیال کننده واکنش نکرده می‌شود که باید در طراحی مد نظر قرار گیرد. با افزایش سرعت سیال سازی، به تدریج ذرات از بستر جداشده و به آرامی در گاز شناور می‌شوند و با ادامه این روند افت فشار بستر کاهش می‌یابد.

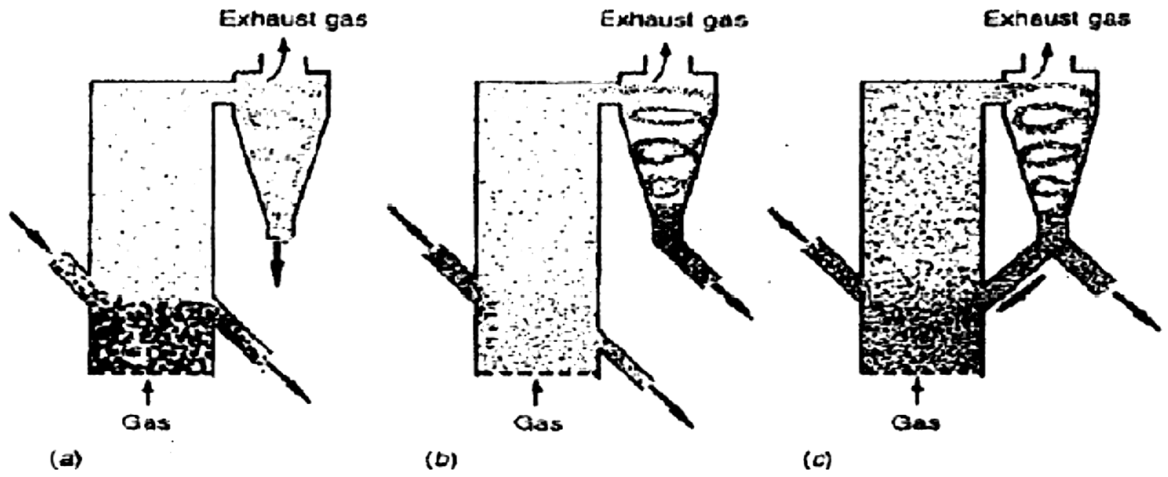
وقتی بستر سیال می‌شود، افت فشار در آن متناسب با وزن کل ذرات خواهد بود، یعنی:

$$\Delta P_b = \frac{M \cdot (\rho_p - \rho_g)}{\rho_p \cdot A} \qquad (۲-۱)$$

معادلات بالا نشان می‌دهند که یا هیچ واکنشی بین بستر ذرات و دیواره آن انجام نمی‌شود و یا هیچ انرژی ای در بستر از بین نمی رود. افزایش افت فشار در سطح مقطع بستر که در منحنی افت فشار بر حسب سرعت سیال سازی در قسمت بستر ثابت مشاهده می‌شود، بستگی به آن دارد که بستر چطور قبل از آن که سیالی از روی آن عبور کند، فشرده شده است. در ابتدا در سیال سازی اولیه، یک بیشینه در منحنی مشاهده می‌شود که ناشی از اولین تلاش برای سیال سازی بستر می‌باشد. این افزایش به علت فشار اضافی است که برای آزاد کردن ذرات از یکدیگر مورد نیاز است. وقتی ذرات از یکدیگر آزاد می‌شوند، تخلخل یعنی جزئی از حجم بستر که توسط فضاهای بین ذرات اشغال‌شده است نسبت به مقدار تخلخل در بستر ثابت به مقدار بزرگ‌تری در حداقل سرعت سیال سازی، افزایش می‌یابد. پس افت فشار به مقدار کافی جهت تحمل وزن ذرات بستر کاهش می‌یابد. روش دیگری که برای سیال سازی وجود دارد، سیستم سیال سازی سریع یا سیستم های سیال گردش کننده می‌باشد.

در سیستم بستر سیال نشان داده‌شده در شکل ۱-۳ که جریان پایداری به طور پیوسته برای انجام فرآیند در رآکتور بستر سیال ایجاد شده است، اگر سرعت سیال سازی پایین باشد، درصد ذرات ریزی که همراه گاز خروجی از بستر خارج می‌شوند، پایین خواهد بود. ذرات جامدی که از محفظه خارج می‌شوند، از روی بستر جدا می‌شوند و در این حالت بستر یک سطح آزاد قابل‌مشاهده خواهد داشت و زمان باقی ماندن ذرات در سیستم طولانی خواهد بود. البته اگر سرعت سیال سازی به مقدار کافی برای انبساط بستر افزایش یابد، بطوری‌که اغلب ذرات واردشده به بستر توسط مخروط خارج شوند، سطح آزاد بستر به وضوح مشخص نخواهد بود و تخلخل‌های گازی بزرگی تشکیل خواهد شد.اگر ورودی و خروجی گاز همان طور که در شکل

۱-۳ مشاهده می‌شود، در مقابل یکدیگر باشد، زمان اقامت ذرات کوتاه خواهد بود .چون اغلب آن‌ها توسط گاز در سیستم شناور خواهند بود



شکل ۱-۳: حالت‌های مختلف معلق سازی در بستر سیال[1]

در بین این دو حالت منطقه سیالیت سریع خواهد بود که در شکل ۱-۳ مشاهده می‌شود. ذرات خارج‌شده توسط مخروط دوباره با سرعت بالا و برای چند مرحله در رآکتور گردش می‌کنند که باعث افزایش زمان اقامت در رآکتور و کاهش تخلخل در بستر منبسط‌شده می‌شود. تمایل به مخلوط شدن، باعث یکنواختی درجه حرارت و سرعت انتقال حرارت بالا بین گاز و ذرات می‌شود.

۱-۴- روش‌های تحلیل

آزمایش‌ها متداولا در طراحی سیستم‌های چند فازی[2] همراه با واکنش مانند بستر سیال برای بالا بردن بهره پروسه به کار می‌روند. با این حال فرایندهای در مقیاس آزمایشگاهی همیشه رفتار مشابه جریان در رآکتور واقعی ندارند. معمولاً ضروری است که تجهیزات گران‌قیمت در مقیاس نمونه برای آزمایش قابلیت بستر سیال ساخته شود. دینامیک سیال محاسباتی CFD روش دیگری را برای آنالیز رفتار گاز-جامد فراهم می‌کند. معمولاً محاسبات CFD می‌تواند اطلاعات وابسته به زمان را در مورد مقدار فشار، دما و توزیع سرعت به ما بدهد. با چنین اطلاعاتی شرایط در رآکتور را می‌توان تصور کرد و مطالعات پارامتری را می‌توان انتقال

[1] Ragnar Warnecke , Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier , Biomass and Bioenergy Volume 18, Issue 6, 1 June 2000, Pages 489–497

[2] Multi Phase sistem

داد، به این وسیله می‌توان هزینه ساخت نمونه آزمایشی را حذف کرد. براتد و دیگران (۱۹۹۹) موفق شد عملکرد بستر محترق را در صنعت نفت با استفاده از CFD بهبود ببخشد.

CFD برای جریان‌های چندفازی هنوز به صورت عمده بکار بسته نشده است. یک دلیل آن به خاطر دشوار بودن توصیف سیستم‌های چندفازی است.

۱-۴-۱- مدل اولر-اولر

هنگامی که فازهای مختلف از نظر ریاضی در یکدیگر نفوذ داشته باشند، روش اولر-اولر برای حل معادلات در تمام فازها استفاده می‌شود. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی در تمام سلول‌های محاسباتی حل می‌شوند. سپس متغیرهای مربوط به هر فاز مانند سرعت‌ها و دماها در هر نقطه از شبکه معلوم می‌شوند. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای فازهای مختلف به وسیله انتقال جرم، نیروهای برهم‌کنش به نمایندگی از انتقال مومنتوم بین فازها و انتقال حرارت بیت فازها باهم ارتباط پیدا می‌کنند. مثال‌های کاربرد روش اولر-اولر بسترهای سیال محترق چرخشی و ستون‌های کرکینگ سیالات هستند.

۱-۴-۲- مدل اولر-لاگرانژ

مدل اولر-لاگرانژ در مواردی استفاده می‌شود که یک فاز پیوسته است و فاز دیگر به صورت گسسته در آن معلق می‌باشد. فاز پیوسته با استفاده از مدل اولر روی شبکه محاسباتی حل می‌شود، درحالی‌که فاز گسسته با استفاده از مدل لاگرانژ با دنبال کردن مسیر هر ذره حل می‌شود. در کوپلینگ یک راهه حل فاز پیوسته را می‌توان مستقل از فاز گسسته حل کرد. سپس مسیر ذره با حل معادلات حرکت به دست می‌آید. برای کوپلینگ های دو و چهار راهه تقابل اثر فازها بر یکدیگر و بر خود لحاظ می‌شود. مثال‌های کاربرد اولر-لاگرانژ جریان خون و جریان ذرات جامد در هوا است.

مدل اولر-لاگرانژ می‌تواند مسیر حرکت هر ذره را به ما بدهد. مزیت آن این است که می‌توان اندازه و چگالی‌های مختلف را برای ذره در نظر گرفت. پدیده‌های فیزیکی محلی وابسته به جریان ذرات را می‌توان بررسی و برای اعتبار بخشی به مدل‌های پیوسته استفاده کرد. با این حال مدل اولر-لاگرانز نیازمند مقدار زیادی حافظه و زمان محاسبه طولانی است.

۱-۴-۳- مدل‌های عددی شیمیایی

شیمی بخش ویژه‌ای در حل جریان‌های واکنش‌دهنده است و خود را با واردکردن عبارت شیمیایی در معادلات حاکم نشان می‌دهد. گام زمانی کسری به صورت عمده در جریان‌های واکنش‌دهنده استفاده می-شود. این روش بسیاری از عملیات پرهزینه ماتریسی را حذف و اجازه می‌دهد بهترین روش‌های حل برای هر