دانشگاه سیستان و بلوچستان
تحصیلات تکمیلی

پایان نامه دکتری در مهندسی شیمی

عنوان:

بررسی هیدرودینامیک راکتور بستر شارانیده شده گاز– جامد به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

اساتید راهنما:
دکتر رهبر رحیمی
دکتر مرتضی زیودار

استاد مشاور:
دکتر عبدالرضا صمیمی

تحقیق و نگارش:
سید حسین حسینی

۱۳۸۸

بسمه تعالی

این پایان نامه با عنوان ‘‘بررسی هیدرودینامیک راکتور بستر شارانیده شده گاز– جامد بکمک دینامیک سیالات محاسباتی’’ قسمتی از برنامه آموزشی دوره دکتری مهندسی شیمی توسط دانشجو سید حسین حسینی تحت راهنمایی اساتید پایان نامه رهبر رحیمی و مرتضی زیودار تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به‌منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می باشد.

(نام و امضاء دانشجو)

	نام و نام خانوادگی	**امضاء**	**تاریخ**
استاد راهنما:	رهبر رحیمی		
استاد راهنما:	مرتضی زیودار		
استاد مشاور:	عبدالرضا صمیمی		
استاد مشاور:	-		
داور ۱:			
داور ۲:			
نماینده تحصیلات تکمیلی:			

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب سید حسین حسینی تأیید می کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: سید حسین حسینی

امضاء

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که در تمام مراحل زندگی مرا یاری نموده‌اند و همچنین خـواهر و برادران عزیزم که مشوق اصلی بنده در موفقیت‌های علمی بوده‌اند.

و تقدیم به:

همسر مهربانم که صبر و گذشت فراوانی را در اتمام این پایـان نامـه از خـود نشـان داد.

سپاسگزاری

به پاس زحمت‌های فراوان اساتید راهنما و مشاور این پایان‌نامه، آقایان دکتر رهبر رحیمی، دکتر مرتضی زیودار و دکتر عبدالرضا صمیمی، از ایشان قدردانی به‌عمل می‌آورم.

به پاس قدردانی از زحمات استاد فقید پروفسور محمد خشنودی، وظیفه خود می‌دانم از آن بزرگوار یاد کنم. خدایش بیامرزاد. روحش شاد و یادش گرامی و راهش پر رهرو باد.

بر خود لازم می‌دانم از اساتید محترم، پروفسور Wenqi Zhong، دکتر Junwu Wang، پروفسور گودرز احمدی، دکتر محمد رضا مستوفی، دکتر Sreekanth Pannala، دکتر فریبرز تقی‌پور، پروفسور Thomas J. O'Brien، و دکتر محسن نصر اصفهانی که راهنمایی‌های ارزنده‌ای در پیشرفت تز دکتری اینجانب ارائه نموده‌اند، تقدیر و تشکر فراوان به عمل آورم.

همچنین از دوستان عزیزم آقایان دکتر محمودرضا رحیمی، فردین اژدری، امین قربانی، اسلام کاشی، مجید مهدویان، علیرضا میر اولیایی، کیانوش رزاقی و مهندس جواد محمد صادقی، منوچهر اصغری، پیمان رشیدی، سجاد کوثری و مابقی دوستان که در این دوره تحصیلی با تمام خوشی‌ها و تلخی‌هایش در کنار بنده بوده‌اند سپاس‌گذاری می‌نمایم.

چکیده:

هیدرودینامیک بسترهای شارانیده گاز-جامد با استفاده از نرم‌افزارهای فلوئنت و MFIX، مطالعه شده و بمنظور بررسی اعتبار مدل‌های پیشنهاد شده، از داده‌های تجربی موجود در برخی منابع علمی استفاده گردیده است. تاثیر برخی مدل‌های کشندگی اصلی و اصلاح شده بر پایه حداقل سرعت شارانیده شدن (U_{mf})، مطالعه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که مدل‌های کشندگی به استثناء مدل‌های اصلاح شده، از لحاظ کیفی نتایج یکسانی ارائه می‌دهند درحالی‌که از لحاظ کمّی با هم اختلاف دارند. مدل‌های کشندگی اصلاح شده بر اساس U_{mf}، هیدرودینامیک بسترهای شارانیده حاوی ذرات نوع B را بر خلاف ذرات ریز A، به‌شکل مطلوب پیش‌بینی نمی‌کنند. تاثیر بافل‌های حلقوی بر روی الگوی جریان و مخلوط شدن ذرات نوع B در بستر شارانیده شده نیز به‌طور کیفی مطالعه گردیده است.

در بررسی پدیده لخته و انتقال رژیم حبابی به لخته‌ای مشاهده شده است که مدل‌های گوناگون کشندگی، به‌طور کیفی تشکیل لخته را پیش بینی می کنند در حالی‌که نتایج کمّی آنها با هم اختلاف دارند. علاوه بر این پارامترهای موثر بر حرکت ذرات جامد درون بستر (سرعت گاز و نسبت ارتفاع ایستایی بستر به عرض آن) نیز بررسی شده‌اند. در این تحقیق تاثیر سرعت‌های بالای گاز بر روی هیدرودینامیک بسترهای شارانیده مطالعه شده است که استفاده از مدل‌های متلاطم ($k-\varepsilon$ و سیمونین) منجر به بهبود نتایج شبیه‌سازی شده است. تاثیر توزیع‌کننده‌های گاز از جمله توزیع‌کننده کامل یکنواخت، توزیع‌کننده سوراخ‌دار و توزیع‌کننده پاره‌ای و نیز تاثیر لوله داخلی با شکاف جانبی، مطالعه شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که هر گونه تغییری در ساختار بستر منجر به اعمال تغییرات عمده در مدل می‌گردد و در نتیجه به‌منظور رسیدن به یک مدل مناسب، علاوه بر مدل‌های کشندگی، مدل‌های اصطکاکی و روش‌های گسسته‌سازی نیز می‌بایست بررسی گردند. در بسترهای با توزیع‌کننده پاره‌ای و لوله شکاف‌دار جانبی، مدل‌های اصطکاکی نقش مهمی را در شبیه‌سازی هیدرودینامیک این بسترها ایفا می‌کنند. اعمال شرط مرزی جانسون و جکسون برای فاز پراکنده بر روی دیواره به ویژه برای بستر حاوی لوله شکاف‌دار، منجر به بهبود نتایج مدل می‌شود.

با کاهش نیروی کشندگی به‌کمک یک فاکتور مقیاس مناسب (Scale Factor)، نتایج هیدرودینامیکی قابل‌قبولی در سرعت‌های بالای گاز در بستر حاوی ذرات نوع A به‌دست آمده و نیز برخی پارامترهای هیدرودینامیکی بستر پیش‌بینی شده‌اند. بمنظور مطالعه بیشتر مدل پیشنهاد شده برای شبیه‌سازی بسترهای

حاوی ذرات ریز نوع A، یک بستر حاوی ذرات FCC که در آن واکنش تجزیه اُزن رخ می‌دهد شبیه‌سازی شده و تاثیر وزن FCC بر روی درصد تبدیل خروجی از بستر نیز مطالعه گردیده است.

نهایتاً بسترهای فواره‌ای معمولی، حاوی لوله متخلخل و نامتخلخل شامل ذرات با دو اندازه مختلف شبیه‌سازی شده‌اند. مدل پیشنهاد شده، رفتار جریان گاز و ذرات را در بستر فواره‌ای حاوی لوله داخلی بخوبی پیش‌بینی می‌کند و یک گام رو به جلویی برای شبیه‌سازی این سیستم‌ها ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، هیدرودینامیک، بستر شارانیده شده، سرعت بالای گاز، رژیم حبابی، رژیم لخته‌ای، بستر فواره‌ای.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- قلمرو مطالعه موجود ۳

۱-۳- نوآوری‌های پایان‌نامه ۴

فصل دوم: مروری بر کارهای گذشته ۶

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- تئوری سینتیکی و روابط ترکیبی ۷

۲-۳- بستر حبابی حاوی ذرات نوع B ۱۱

۲-۴- بسترهای لخته‌ای ۱۸

۲-۵- تاثیر توزیع‌کننده‌های گازی ۲۱

۲-۶- واکنش شیمیایی درون بسترهای شارانیده ۲۲

۲-۷- بستر حبابی حاوی ذرات نوع A ۲۳

۲-۸- بستر شارانیده شده با جریان برگشتی ۲۷

۲-۹- بسترهای فواره‌ای حاوی ذرات نوع D ۳۱

فصل سوم، مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی و معادلات حاکم بر سیستم ۳۶

۳-۱- مقدمه ۳۷

۳-۲- دینامیک سیالات محاسباتی و کاربردهای آن ۳۷

۳-۲-۱- سیستم‌های چندفازی CFD ۳۹

۳-۳- ابزارهای شبیه‌ساز CFD استفاده شده: ۴۱

۳-۴- معادلات هیدرودینامیک حاکم در فلوئنت: ۴۱

۳-۴-۱- معادلات بقاء ۴۱

۳-۴-۲- معادلات ترکیبی ۴۳

۳-۵- معادلات هیدرودینامیک حاکم در MFIX: ۴۹

۳-۵-۱- معادله جبری دمای دانه‌ای برای تخمین TFM ۴۹
۳-۵-۲- معادله پاره‌ای دمای دانه‌ای برای تخمین‌های TFM و MFM ۵۱
فصل چهارم، شبیه سازی هیدرودینامیک بسترهای شارانیده حاوی انواع ذرات جامد (Geldart)..... ۵۸
۴-۱- مطالعه هیدرودینامیک بسترهای شارانیده حاوی ذرات نوع B و تاثیر بافل‌های حلقوی بر الگوی جریان آنها ۵۹
۴-۱-۱- مقدمه..... ۵۹
۴-۱-۲- شبیه‌سازی بستر دو بعدی گاز-جامد حاوی ذرات نوع B [۳, ۴]: ۵۹
۴-۱-۲-۱- دامنه محاسباتی مراجع [۳, ۴]: ۶۱
۴-۱-۲-۲- روش‌های عددی استفاده شده..... ۶۱
۴-۱-۲-۳- بحث و بررسی نتایج مدل‌سازی بستر شارانیده [۳, ۴]: ۶۳
۴-۱-۲-۳-۱- آنالیز حساسیت بر روی اندازه مش:..... ۶۳
۴-۱-۲-۳-۲- بررسی مدل‌های کشندگی مختلف به‌صورت کمّی: ۶۵
۴-۱-۲-۳-۳- بررسی استفاده از تئوری سینتیکی به دو صورت جبری و پاره‌ای:.....۶۶
۴-۱-۲-۳-۴- بررسی انبساط بستر توسط مدل‌های مختلف کشندگی [۳]:..... ۶۷
۴-۱-۲-۳-۵- متوسط محلی جزء حجمی گاز در ارتفاع ۰/۲ m از کف بستر [۳]: ۷۴
۴-۱-۳-شبیه‌سازی بستر شارانیده مرجع [۲]:..... ۸۲
۴-۱-۴- پیش‌بینی پارامترهای هیدرودینامیکی حاصل از CFD: ۸۵
۴-۱-۴-۱- بررسی برخی پارامترهای هیدرودینامیکی بستر شارانیده [۳, ۴]: ۸۵
۴-۱-۴-۲- مطالعه تاثیر بافل‌های حلقوی بر هیدرودینامیک بستر شارانیده شده به کمک CFD ۸۸
۴-۱-۴-۲-۱- تاثیر بافل بر مخلوط شدن محوری:..... ۸۹
۴-۱-۴-۲-۲- تاثیر بافل بر مخلوط شدن شعاعی: ۹۰
۴-۲- هیدرودینامیک بسترهای شارانیده حاوی ذرات B در سرعت‌های بالای گاز و تاثیر توزیع‌کننده‌های گاز و لوله داخلی بر جریان..... ۹۴
۴-۲-۱- مقدمه..... ۹۴
۴-۲-۲- یک مقایسه کمّی و کیفی بین فلوئنت و MFIX..... ۹۴

۴-۲-۳- شبیه‌سازی بستر شارانیده مرجع [۵۲] به‌کمک MFIX: ۹۶
۴-۲-۳-۱- روابط حاکم بر سیستم: ۹۷
۴-۲-۳-۲- بررسی پارامترهای مدل : ۹۸
۴-۲-۳-۳- الگوی جریان بستر: ۱۰۱
۴-۲-۳-۴- توزیع ماندگی ذرات جامد در مقاطع مختلف بستر با توزیع‌کننده کامل: ۱۰۵
۴-۲-۳-۴-۱- توزیع ماندگی در سرعت ۰/۹۹ m/s: ۱۰۵
۴-۲-۳-۴-۲- توزیع ماندگی در سرعت ۲/۱۸ m/s: ۱۰۷
۴-۲-۳-۵- تاثیر توزیع‌کننده سوراخ‌دار: ۱۰۹
۴-۲-۳-۶- تاثیر توزیع‌کننده پاره‌ای: ۱۱۱
۴-۲-۳-۷- تاثیر توزیع‌کننده پاره‌ای گاز در بستر همراه با یک لوله شکاف‌دار: ۱۱۸
۴-۲-۴- بررسی کیفی بسترهای شارانیده لخته‌ای: ۱۲۳
۴-۳- هیدرودینامیک بسترهای شارانیده حاوی ذرات نوع A با استفاده از CFD در دامنه وسیعی از سرعت گاز ۱۳۱
۴-۳-۱- مقدمه: ۱۳۱
۴-۳-۲- شبیه‌سازی بستر شارانیده شده حاوی ذرات نوع A ۱۳۲
۴-۳-۲-۱- بستر شارانیده شده گاز-جامد مرجع [۱۵۵] ۱۳۲
۴-۳-۲-۲- مدل هیدرودینامیکی: ۱۳۲
۴-۳-۲-۳- بحث و نتیجه گیری: ۱۳۶
۴-۳-۲-۳-۱- بررسی مدل کشندگی: ۱۳۶
۴-۳-۲-۳-۲- مقایسه کیفی نتایج حاصل از شبیه‌سازی: ۱۳۸
۴-۳-۲-۳-۳- متوسط جزء حجمی محلی گاز: ۱۳۹
۴-۳-۲-۳-۴- غلظت آنی ذرات جامد: ۱۴۴
۴-۳-۲-۳-۵- سرعت ذرات: ۱۴۵
۴-۳-۳- بستر گاز-جامد با واکنش تجزیه اُزن ۱۴۷
۴-۴- مطالعه هیدرودینامیک بستر فواره‌ای با یک لوله داخلی با استفاده از CFD ۱۵۳

۴-۴-۱- مقدمه ۱۵۳
۴-۴-۲- شبیه‌سازی بستر فواره‌ای همراه با یک لوله نامتخلخل داخلی ۱۵۳
۴-۴-۲-۱- روش حل مدل: ۱۵۳
۴-۴-۲-۲- بحث و نتیجه‌گیری: ۱۵۵
۴-۴-۲-۲-۱- اثر ضریب ارتجاع، e_s: ۱۵۵
۴-۴-۲-۲-۲- تاثیر مدل کشندگی: ۱۵۷
۴-۴-۲-۲-۳- بردارهای سرعت ذرات ۱۵۹
۴-۴-۲-۲-۴- میزان جریان گاز در بخش های حلقوی و مخروطی بستر: ۱۶۰
۴-۴-۲-۲-۵- الگوی جریان فاز گاز: ۱۶۳
۴-۴-۳-۳-۶- فواره (fountain) و ناحیه فواره‌ای: ۱۶۴
۴-۴-۲-۲-۷- اثرات U و C_s بر سرعت های ظاهری گاز در بخش های فواره ای و حلقوی: ۱۶۶
۴-۴-۲-۲-۸- اثرات پارامترهای هندسی بستر یعنی H_D و D_D بر روی میزان جریان گاز در بخش حلقوی بستر: ۱۶۹
۴-۴-۲-۲-۹- فشار: ۱۷۰
۴-۴-۲-۲-۱۰- جداسازی ذرات (Segregation): ۱۷۰
فصل پنجم، نتیجه‌گیری نهایی و پیشنهادات ۱۷۳
۵-۱- نتیجه‌گیری نهایی ۱۷۴
۵-۲- پیشنهادات ۱۸۱
مراجع ۱۸۴

فهرست جداول

جدول **صفحه**

جدول (۳-۱). کاربردهای CFD در صنایع شیمیایی ۳۹

جدول (۴-۱). مشخصات بستر و شرایط عملیاتی [۳, ۴]..... ۶۰

جدول (۴-۲). گزارشی از اندازه مش‌های استفاده شده در منابع علمی. ۶۵

جدول (۴-۳). خطای گزارش شده انبساط بستر توسط مدل‌های مختلف کشندگی. ۶۹

جدول (۴-۴). مقایسه خطای مدل‌های کشندگی گیداسپاو و سیاملال-اوبراین در بررسی جزء حجمی گاز در سرعت های مختلف و نسبت انبساط بستر..... ۷۶

جدول (۴-۵). مشخصات بستر و شرایط عملیاتی مرجع [۲]..... ۸۲

جدول (۴-۶). مشخصات بستر و شرایط عملیاتی بستر شارانیده مرجع [۵۲]..... ۹۴

جدول (۴-۷). متوسط خطای ماندگی ذرات بین نتایج عددی و تجربی. ۱۰۰

جدول (۴-۸). محاسبه خطای مدل‌های آرام و متلاطم در سرعت‌های مختلف. ۱۰۹

جدول (۴-۹). محاسبه خطای توزیع‌کننده کامل و سوراخ‌دار. ۱۱۰

جدول (۴-۱۰). مشخصات بستر و شرایط عملیاتی [۶۰]. ۱۲۴

جدول (۴-۱۱). مشخصات بسترهای چهار وجهی و استوانه ای. ۱۲۹

جدول (۴-۱۲). مشخصات بستر شارانیده Ellis [۱۵۵]. ۱۳۲

جدول (۴-۱۳). مشخصات بستر شارانیده Sun [۱۵۶]. ۱۴۸

جدول (۴-۱۴). مشخصات هندسی بستر [۱۱۷]. ۱۵۳

جدول (۴-۱۵). مشخصات ذرات و شرایط عملیاتی [۱۱۷]..... ۱۵۴

جدول (۴-۱۶). تاثیر ضریب ارتجاع بر نتایج شبیه‌سازی ۱۵۷

جدول (۴-۱۷). مقایسه کمّی مدل‌های کشندگی مختلف. ۱۵۹

جدول (۸-۱). بهترین مدل‌های کشندگی پیشنهاد شده در این تحقیق توسط CFD برای بسترهای مختلف. ۱۷۹

فهرست شکل‌ها

شکل **صفحه**

شکل (۲-۱). توزیع محلی تعداد حباب ها و سطح شامل حباب ها برای گروه های با اندازه های مختلف حباب در (a) بخش پایین بستر (b) بخش بالای بستر [۳۷]. ۱۳

شکل (۲-۲). شکل های مختلف لخته شدن در بستر [۵۹]. ۱۸

شکل (۲-۳). نمای ساختار بستر شارانیده شده برگشتی جدید [۹۶]. ۲۸

شکل (۲-۴). ویسکوزیته پیش‌گویی شده شده با استفاده و بدون استفاده از تنش‌های اصطکاکی ذرات [۱۱۵]. ۳۳

شکل (۲-۵). نمای لوله داخلی اطراف باز [۱۱۸]. ۳۴

شکل (۲-۶). الگوهای جریان پایدار پیش‌بینی شده [۱۲۰]. ۳۵

شکل (۳-۱). شماتیک کلی شبیه سازی به‌کمک CFD [۱۲۶]. ۴۰

شکل (۴-۱). تصویر بستر دو بعدی استفاده شده در مراجع [۳, ۴]. ۶۰

شکل (۴-۲). ناحیه شبکه محاسباتی. ۶۱

شکل (۴-۳). بررسی استقلال مش با استفاده از ضریب کشندگی گیداسپاو و معادله جبری دمای دانه‌ای. ... ۶۴

شکل (۴-۴). تغییر ضریب کشندگی بر حسب جزء حجمی ذرات جامد برای مدل‌های مختلف کشندگی. ۶۶

شکل (۴-۵). مقایسه نتایج حاصل از روش حل جبری و معادله پاره‌ای دمای دانه‌ای. ۶۷

شکل (۴-۶). مقایسه نسبت انبساط بستر بدست آمده از شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های کشندگی مختلف با نتایج تجربی بستر مرجع [۳]. ۶۸

شکل (۴-۷). جزء حجمی محاسبه شده ذرات جامد با استفاده از مدل‌های اصلی و اصلاح شده آنها در سرعت ظاهری گاز برابر با ۰/۱ m/s. ۷۰

شکل (۴-۸). کانتور جزء حجمی ذرات جامد در سرعت ظاهری ۰/۳۸ m/s با استفاده از مدل کشندگی گیداسپاو. ۷۲

شکل (۴-۹). مقایسه کیفی مدل‌های کشندگی با نتایج تجربی در سرعت ظاهری گاز برابر با ۰/۳۸ m/s. ۷۲

شکل (۴-۱۰). متوسط محاسبه شده جزء حجمی ذرات جامد در طول بستر در سرعت ظاهری گاز ۰/۳۸ m/s برای ضریب کشندگی‌های مختلف. ۷۳

شکل (۴-۱۱) (a). متوسط جزء حجمی محاسبه شده گاز توسط مدل‌های کشندگی گیداسپاو و سیاملال-اوبراین در قیاس با نتایج تجربی مرجع [۳] در ارتفاع ۰/۲ m از کف بستر و سرعت گاز برابر با ۰/۳۸ m/s.. ۷۴
شکل (۴-۱۲). متوسط جزء حجمی محاسبه شده گاز با استفاده از مدل‌های کشندگی گیداسپاو و سیاملال-اوبراین در قیاس با نتایج تجربی مرجع [۳] در ارتفاع ۰/۲ m از کف بستر در سرعت ۰/۴۶ m/s..... ۷۸
شکل (۴-۱۳). متوسط افت فشار محاسبه شده توسط مدل در مقایسه با نتایج تجربی مرجع [۴]. ۸۰
شکل (۴-۱۴). جزء حجمی محلی و آنی فاز گاز در مرکز بستر در ارتفاع ۰/۲ m از کف بستر و سرعت گاز برابر ۰/۴۶ m/s..... ۸۱
شکل (۴-۱۵). پروفایل محاسبه شده و تجربی (مرجع [۲]) جزء حجمی گاز در مقاطع مختلف بستر. ۸۳
شکل (۴-۱۶). کانتورهای محاسبه شده جزء حجمی گاز برای بستر مرجع [۲]..... ۸۴
شکل (۴-۱۷). متوسط بردارهای محاسبه شده سرعت ذرات جامد در سرعت ظاهری گاز ۲/۸ m/s برای بستر مرجع [۲] با استفاده از مدل ارائه شده در بخش (۴-۳)..... ۸۴
شکل (۴-۱۸). توزیع جزء حجمی ذرات جامد در طول بستر و در سرعت های مختلف..... ۸۶
شکل (۴-۱۹). توزیع متوسط جزء حجمی ذرات در کل بستر. ۸۶
شکل (۴-۲۰). توزیع محوری سرعت ذرات در ۰/۳ m از کف بستر برای سرعت‌های مختلف گاز ورودی..... ۸۷
شکل (۴-۲۱). متوسط زمانی سرعت محوری ذرات در کل بستر در سرعت ظاهری گاز ۰/۳۸ m/s. ۸۸
شکل (۴-۲۲). تصویر بستر با بافل های تعبیه شده در آن..... ۸۸
شکل (۴-۲۳). توزیع محوری متوسط جزء حجمی ذرات جامد..... ۸۹
شکل (۴-۲۴). کانتور متوسط جزء حجمی ذرات جامد در سرعت ۰/۳۸ m/s..... ۹۰
شکل (۴-۲۵). توزیع متوسط سرعت ذرت در مقاطع مختلف از بستر حاوی بافل ۹۱
شکل (۴-۲۶). توزیع متوسط سرعت ذرت در مقاطع مختلف از بستر شارانیده شده معمولی ۹۱
شکل (۴-۲۷). متوسط زمانی جزء حجمی گاز در مقاطع مختلف از بستر حاوی بافل..... ۹۲
شکل (۴-۲۸). متوسط زمانی جزء حجمی گاز در مقاطع مختلف از بستر معمولی ۹۳
شکل (۴-۲۹). متوسط بردارهای سرعت ذرات جامد درون بستر..... ۹۳
شکل (۴-۳۰). مقایسه جزء حجمی گاز در مقطع ۰/۲ m از کف بستر در سرعت ۰/۳۸ m/s با استفاده از MFIX و فلوئنت (نتایج تجربی مرجع [۳])..... ۹۵

شکل (۴-۳۱). کانتور جزء حجمی ذرات جامد درون بستر در سرعت‌های مختلف توسط MFIX..... ۹۵
شکل (۴-۳۲). اثر ضریب ارتجاع بر روی ماندگی ذرات جامد در سرعت ظاهری گاز برابر با ۰/۹۹ m/s و $h/H_0=0.58$ ۹۹
شکل (۴-۳۳). اثر بیشترین مقدار پرشدن ذرات جامد بر روی ماندگی ذرات جامد در سرعت ظاهری گاز برابر با ۰/۹۹ m/s و $h/H_0=0.58$ ۹۹
شکل (۴-۳۴). اثر مدل‌های مختلف کشندگی بر روی ماندگی ذرات جامد در سرعت ظاهری گاز برابر با m/s ۰/۹۹ و $h/H_0=0.89$ ۱۰۱
شکل (۴-۳۵). کانتور جزء حجمی گاز در زمان‌های مختلف برای سرعت‌های گوناگون (a) ۰/۳۵ m/s، (b) m/s ۰/۹۹، (c) ۲/۱۸ m/s..... ۱۰۲
شکل (۴-۳۶). فرآیند پیوستن حباب‌ها و حرکت آنها در سرعت ظاهری گاز برابر با ۰/۹۹ m/s. ۱۰۳
شکل (۴-۳۷). متوسط زمانی بردارهای سرعت ذرات جامد در سرعت های (a, b, e) ۰/۳۵ m/s و (c, d) m/s ۰/۶۳ و ۰/۹۹ m/s، (e) ۰/۳۵ m/s و ارتفاع ایستایی برابر ۶ cm..... ۱۰۴
شکل (۴-۳۸). مقایسه نتایج تجربی و عددی در مقاطع مختلف بستر و سرعت ۰/۹۹ m/s. ۱۰۶
شکل (۴-۳۹). توزیع محوری ماندگی ذرات در سرعت ۰/۹۹ m/s..... ۱۰۷
شکل (۴-۴۰). ماندگی ذرات جامد در موقعیت‌های مختلف بستر و سرعت ظاهری گاز ۲/۱۸ m/s در حالت‌های آرام و متلاطم. ۱۰۸
شکل (۴-۴۱). کانتور جزء حجمی ذرات جامد با در نظر گرفتن توزیع‌کننده سوراخ‌دار. ۱۱۰
شکل (۴-۴۲). ماندگی ذرات جامد در مقطع h/H_0 برابر با ۰/۵۸و سرعت ظاهری گاز ۲/۱۸ m/s با در نظر گرفتن توزیع‌کننده سوراخ‌دار. ۱۱۱
شکل (۴-۴۳). نمای توزیع‌کننده پاره‌ای گاز..... ۱۱۲
شکل (۴-۴۴). (a) کانتور آنی جزء حجمی ذرات جامد در سرعت ظاهری گاز ۲/۱۸ m/s برای توزیع‌کننده پاره‌ای؛ (b) کانتور جزء حجمی ذرات جامد در سرعت ظاهری گاز ۲/۱۸ m/s در حالت بستر فواره‌ای؛ (c) کانتور جزء حجمی و بردارهای ذرات جامد در بستر شارانیده شده با جریان برگشتی [۹۵]..... ۱۱۳

شکل (۴-۴۵). پروفایل ماندگی ذرات جامد با استفاده از انواع روش‌های محاسبه دمای دانه‌ای، مدل کشندگی سیاملال-اوبراین و ضریب ارتجاع ۰/۸ در سرعت ۲/۱۸ m/s و h/H_0 = ۰/۲۵ (مقایسه با نتایج تجربی مرجع[۵۲]). ۱۱۳

شکل (۴-۴۶). تاثیر روش‌های گسسته‌سازی با استفاده از مدل کشندگی سیاملال-اوبراین و ضریب ارتجاع ۰/۸ در سرعت ۲/۱۸ m/s و h/H_0 = ۰/۲۵ (مقایسه با نتایج تجربی مرجع[۵۲]). ۱۱۴

شکل (۴-۴۷). تاثیر مدل‌های کشندگی با استفاده از مدل‌های کشندگی سیاملال-اوبراین، گیداسپاو و ارسطوپور و ضریب ارتجاع ۰/۸ در سرعت ۲/۱۸ m/s و h/H_0 = ۰/۲۵ (مقایسه با نتایج تجربی مرجع[۵۲]). ۱۱۵

شکل (۴-۴۸). نتایج MFIX با استفاده از شرایط شبیه‌سازی بهینه و مقایسه با نتایج تجربی و عددی Ahuja و Patwardhan [۵۲]. ۱۱۶

شکل (۴-۴۹). (a) سرعت محوری ذرات جامد در مقطع h/H_0 برابر با ۰/۲۵؛ (b) متوسط زمانی بردارهای سرعت ذرات جامد؛ (c) متوسط زمانی بردارهای سرعت فاز گاز. ۱۱۷

شکل (۴-۵۰). توزیع‌کننده پاره ای در بستر با یک لوله شکاف‌دار. ۱۱۹

شکل (۴-۵۱). پروفایل ماندگی ذرات جامد در بستر با یک لوله شکاف دار و توزیع‌کننده پاره‌ای گاز با استفاده از مدل‌های مختلف تنش اصطکاکی و سرعت ظاهری گاز ۲/۱۸ m/s (مقایسه با نتایج تجربی مرجع[۵۲]). ۱۱۹

شکل (۴-۵۲). (a) سرعت محوری ذرات جامد در بستر به همراه لوله شکاف دار و توزیع‌کننده پاره ای در مقطع h/H_0 برابر با ۰/۲۵؛ (b) متوسط زمانی بردارهای سرعت ذرات جامد؛ (c) متوسط زمانی بردارهای سرعت فاز گاز..... ۱۲۱

شکل (۴-۵۳). نتایج MFIX با استفاده از مدل جانسون-جکسون [۱۵۳] و مقایسه با نتایج عددی Ahuja [۵۲] در بستر حاوی لوله شکاف دار و توزیع‌کننده پاره‌ای. ۱۲۳

شکل (۴-۵۴). کانتور جزء حجمی گاز در سرعت ظاهری ۲۵ cm/s.....۱۲۶

شکل (۴-۵۵). کانتور جزء حجمی گاز در سرعت ظاهری ۳۵ cm/s.....۱۲۶

شکل (۴-۵۶). کانتور جزء حجمی گاز در سرعت ظاهری ۳۵ cm/s با استفاده از مدل سیاملال-اوبراین.... ۱۲۷

شکل (۴-۵۷). رفتار حبابی بستر در سرعت ۲۵ cm/s با استفاده از مدل کشندگی سیاملال-اوبراین ۱۲۷

شکل (۴-۵۸). افت فشار بستر در سرعت های مختلف بر حسب زمان. ۱۲۸

شکل (۵-۵۹). جزء حجمی ذرات جامد در طول بستر توسط مدل‌های مختلف کشندگی در سرعت cm/s ۳۵. ..... ۱۲۹
شکل (۴-۶۰). جزء حجمی ذرات جامد بستر چهار وجهی در سرعت cm/s ۴۰. ..... ۱۳۰
شکل (۴-۶۱). جزء حجمی فاز گاز بستر استوانه‌ای در سرعت cm/s ۴۰. ..... ۱۳۱
شکل (۴-۶۲). مقایسه تنش ویسکوزیته ذرات با استفاده از مدل‌های مختلفی سینتیکی ۱۳۳
و $e_s = 0.9, \alpha_{s,max} = 0.57$ ۱۳۳
شکل (۴-۶۳). مقایسه هدایت حرارتی ذرات با استفاده از مدل‌های مختلفی سینتیکی ۱۳۴
و $e_s = 0.9, \alpha_{s,max} = 0.57$ ۱۳۴
شکل (۴-۶۴). مقایسه توابع توزیع شعاعی مختلف در بیشترین مقدار پرشدن برابر ۰/۵۷. ..... ۱۳۴
شکل (۴-۶۵). توزیع جزء حجمی ذرات در طول بستر با استفاده از تغییر اندازه مش‌ها در دو جهت (a) شعاعی و (b) محوری. ۱۳۵
شکل (۴-۶۶). مقایسه کمّی مدل‌های کشندگی مختلف برای ذرات FCC یاد شده در جدول (۴-۱۲) با استفاده از سرعت لغزشی m/s ۰/۵. ..... ۱۳۷
شکل (۴-۶۷). جزء حجمی ذرات جامد با استفاده از مدل کشندگی استاندارد ون-یو در سرعت ظاهری گاز m/s ۰/۳ ..... ۱۳۸
شکل (۴-۶۸). کانتور جزء حجمی ذرات جامد در سرعت های مختلف. ۱۳۹
شکل (۴-۶۹). توزیع شعاعی جزء حجمی گاز در مقاطع مختلف بستر. ۱۴۰
ادامه شکل (۴-۶۹). ۱۴۱
شکل (۴-۷۰). تاثیر ارتفاع محوری بستر (h) بر توزیع شعاعی جزء حجمی گاز در سرعت های مختلف ۱۴۲
ادامه شکل (۴-۷۰). تاثیر ارتفاع محوری بستر (h) بر توزیع شعاعی جزء حجمی گاز در سرعت‌های مختلف. ۱۴۳
ادامه شکل (۴-۷۰). تاثیر ارتفاع محوری بستر (h) بر توزیع شعاعی جزء حجمی گاز در سرعت‌های مختلف. ۱۴۴
شکل (۴-۷۱). غلظت آنی و محلی ذرات جامد در موقعیت های شعاعی مختلف. ۱۴۵

شکل (۴-۷۲). توزیع شعاعی سرعت محوری ذرات جامد در سرعت ظاهری گاز ۰/۳ m/s و ارتفاع های مختلف از کف بستر..... ۱۴۶
شکل (۴-۷۳). سرعت محوری ذرات جامد در طول خط مرکزی بستر و در سرعت ظاهری گاز ۰/۳ m/s. . ۱۴۷
شکل (۴-۷۴). جزء حجمی گاز در در سه ارتفاع ایستایی مختلف از بستر (a): با استفاده از روش گسسته‌سازی Upwind مرتبه اول، (b): ۰/۱۶۴ m، (c): ۰/۴۰۹ m و (d): ۰/۷۴۳ m. ۱۴۹
شکل (۴-۷۵). کانتور جزء جرمی اُزن با استفاده از روش گسسته‌سازی Superbee و مدل کشندگی اصلاح شده گیبیلارو در سه ارتفاع ایستایی از بستر: (a): ۰/۱۶۴، (b): ۰/۴۰۹ و (c): ۰/۷۴۳ m. ۱۵۱
شکل (۴-۷۶). تبدیل کلی اُزن برای سه مقدار جرمی از کاتالیست ذخیره شده در بستر..... ۱۵۱
شکل (۴-۷۷). تغییرات تبدیل درصد اُزن در حالتی که بستر حاوی ۵ کیلو گرم کاتالیست با ارتفاع بستر. . ۱۵۲
شکل (۴-۷۸). ناحیه شبکه‌های محاسباتی. ۱۵۵
شکل (۴-۷۹). تاثیر ضریب ارتجاع بر جزء حجمی گاز درون لوله ۱۵۶
شکل (۴-۸۰). کانتورهای جزء حجمی گاز در بستر برای مدل‌های کشندگی مختلف..... ۱۵۷
شکل (۴-۸۱). کانتور سرعت محوری فاز گاز درون بستر با استفاده از مدل‌های مختلف کشندگی..... ۱۵۸
شکل (۴-۸۲). بردارهای سرعت ذرات در کل بستر توسط MFIX. ۱۶۰
شکل (۴-۸۳). نرخ جریان گاز در بخش حلقوی بستر ($Q_A/Q_T=V_A.A_A/V.A_T$) و در مقطعی به شعاع ۰/۰۱۵ متر از مرکز در برابر مسافت های طولی از بستر با استفاده از: C_s برابر صفر و U = ۰/۴۱۴ m/s و دیگری C_s برابر ۰/۰۵ و U = ۰/۳۶۲ m/s. ۱۶۲
شکل (۴-۸۴). نرخ جریان گاز در بخش حلقوی بستر ($Q_A/Q_T=V_A.A_A/V.A_T$) و در شعاع ۰/۰۱۵ متر در برابر مسافت‌های طولی از بستر با استفاده از C_s های مختلف یعنی ۰/۰۵، ۰/۱۵ و ۰/۵ در سرعت ظاهری گاز برابر با U = ۰/۲۹۸ m/s. ۱۶۲
شکل (۴-۸۵). نرخ جریان گاز در بخش حلقوی بستر حاوی لوله متخلخل و در شعاع (a) ۰/۰۱۵ متر و (b) ۰/۰۴۵ متر در مسافت‌های طولی از بستر با استفاده از دو دسته اطلاعات: C_s برابر صفر و U = ۰/۴۱۴ m/s.و دیگری C_s برابر ۰/۰۵ و U = ۰/۳۶۲ m/s. ۱۶۳
شکل (۴-۸۶). سرعت محوری گاز را در ناحیه حلقوی بستر را برای حالت C_s برابر ۰/۰۵ و U = ۰/۳۶۲ m/s. ۱۶۴

شکل (۴-۸۷). جزء حجمی ذرات جامد درون بستر فواره‌ای معمولی در سرعت گاز تزریقی $1.1.1-1.6U_{ms}$ ۱۶۵
شکل (۴-۸۸). ناحیه فواره درون بستر هراه با لوله مکش..... ۱۶۶
شکل (۴-۸۹). اثرات U و C_s بر روی سرعت‌های ظاهری گاز در بخش‌های فواره‌ای، U_D، و سرعت های ظاهری گاز در ناحیه حلقوی، U_A..... ۱۶۷
شکل (۴-۹۰). تاثیر پارامتر هندسی H_D، بر روی نرخ جریان گاز درون بخش حلقوی. ۱۶۹
شکل (۴-۹۱). تاثیر قطر لوله نامتخلخل D_T بر نرخ جریان گاز درون بخش حلقوی. ۱۷۰
شکل (۴-۹۲). توزیع طولی فشار بی بعد درون ناحیه حلقوی و فواره ای..... ۱۷۱
شکل (۴-۹۳). تصویر جدا شدن ذرات ریزتر در بخش حلقوی بستر. ۱۷۲