

تأثیر استفاده از توزیع کننده ثانویه بر هیدرودینامیک واکنشگاههای بستر سیال

احد قائمی^{۱*}، محمد حسن خانی^۲، مسعود نصیری^۳، مصطفی قاسمی^۴

۱- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار مهندسی شیمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

۳- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان

۴- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۳

پیام نگار: aghaemi@iust.ac.ir

چکیده

در واکنشگاههای بستر سیال، افزایش شدت جریان فاز گاز باعث آشفته‌گی جریان، ایجاد پدیده لختگی و دور شدن از رژیم سیالیت حبابی می‌شود. همچنین، به پدید آمدن رژیم‌های سیالیت سریع و حمل بادی شده و کاهش کارایی واکنشگاه می‌انجامد. برای حل این مشکلات، در این تحقیق علاوه بر بهره‌گیری از توزیع کننده کف بستر از یک توزیع کننده ثانویه برای ورود فاز گاز استفاده شد. در آزمایشهای تجربی، تاثیر توزیع کننده ثانویه جریان گاز بر اندازه قطر حباب‌ها در واکنشگاه بستر سیال گاز- جامد بررسی شد. برای بررسی کاهش قطر حباب‌ها و سنجش نسبت قطر در حالت استفاده از توزیع کننده ثانویه در حالت معمولی، از روش انحراف استاندارد فشار بهره گرفته شده است. نتایج تجربی نشان داد که با استفاده از توزیع کننده مجدد، قطر حباب‌ها به میزان ۵۰ درصد قطر اولیه کاهش یافته و این امر باعث بهبود و افزایش تماس گاز- جامد شده است.

کلیدواژه‌ها: واکنشگاه بستر سیال، انحراف استاندارد فشار، توزیع کننده ثانویه، قطر حباب

۱- مقدمه

متاثر از نیروی وارد از جانب سیال به حالت معلق درمی‌آیند و انتقال جرم و گرما بین فازهای تماس صورت می‌گیرد [۱]. با وجود این، سیال‌سازی برخی از پودرها همواره با مشکلاتی همراه بوده است. مثلاً، سیال‌سازی ذرات گروه گلدات C به دلیل ریز و چسبناک و کوچکی نیروهای وارد از سیال به آن‌ها، به دلیل سطح مقطع کم‌شان و نیز بزرگ بودن نیروهای بین ذره‌ای، دشوار است [۲]. سیال‌سازی گروه ذرات گلدات D نیز به دلیل بزرگی و سنگینی‌شان با مشکلات متعددی همراه است و در صورت افزایش سرعت گاز با

پودرهای جامد در واکنشگاههای بستر سیال خاصیت شبه سیالی دارند و مانند سیال رفتار می‌کنند. این امر با وجود قابلیت جابه‌جایی آسان پودرها و نیز ایجاد سطح تماس وسیع در واکنش‌های گاز- جامد، باعث شده است که واکنشگاههای بستر سیال در صنایع شیمیایی و پتروشیمی، مخصوصاً برای سامانه‌های گاز- جامد کاربردهای فراوانی داشته باشند. در واکنشگاههای بستر سیال ذرات

* تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه طراحی فرایند

ایجاد جت در بستر همراه خواهد بود. در مورد برخی پودرها نیز امکان رسوب در کف بستر وجود دارد که باعث سکون در کف بستر و عدم سیالیت یکنواخت در طول بستر می‌شود.

در واکنشگاههای بستر سیال حبابی افزایش قطر حبابها در ضمن صعود در طول بستر باعث بروز مشکلاتی چون کاهش سطح تماس بین فازهای موجود و در نتیجه کاهش سرعت انتقال جرم و گرما و نیز هدررفت گاز واکنشگاه با جریان میانبر از طریق حبابها و ترک بستر بدون واکنش می‌شود. در نتیجه، باید برای جلوگیری از رشد قطر حبابها برای واکنشگاههای بستر سیال حبابی تدابیری اندیشیده شود. به این منظور، در برخی واحدهای صنعتی از تیغه‌ها استفاده می‌شود، ولی اثر آنها بر کاهش اندازه حبابها ناچیز است. روش‌های خیلی پیشرفته کاهش اندازه حبابها مانند جریان الکتریکی، ارتعاش مکانیکی بستر، استفاده از خوراک ضربه‌ای، بهره‌گیری از میدان‌های مغناطیسی، بستر سیال‌های باریک و اختلاط مکانیکی اند [۳-۷]. کاربرد این روش‌ها به علت مصرف زیاد انرژی یا مسئله مربوط به عملیات آنها محدود است. سود جستن از همزن مکانیکی نیز نیاز به هزینه‌های بالای ساخت، تعمیر و نگهداری دارد و به دلیل خرد کردن پودرها، آثار منفی فراوانی بر پودرهای جامد می‌گذارد. واکنشگاههای بستر سیال ضربه‌ای نیز به دلیل نیاز به ژنراتور تولید ضربه، هزینه‌های واحد را بالا می‌برند و نیز سیال سازی را پیچیده می‌کنند. میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نیز به دلیل مصرف انرژی الکتریکی و مغناطیسی هزینه بر و با پیچیدگی‌های فرایندی خاصی همراه‌اند. بنابراین، روش جایگزینی که برای این روش‌ها می‌توان در نظر گرفت، بهره‌گیری از توزیع‌کننده فراکتال ثانویه در قلب واکنشگاه است.

به دلیل مزایای فراوان رژیم حبابی نسبت به رژیم‌های ملایم و درهم و بالا بودن ضرایب انتقال و بازده در این رژیم نسبت به رژیم ملایم در صنعت، غالباً ترجیح می‌دهند در این رژیم جریان کار کنند. در واقع، رژیم سیالیت حبابی حد واسط رژیم‌های ملایم و درهم است و ضمن برخورداری از مزایای رژیم درهم مانند اختلاط مناسب، معایب آن را نیز که شامل زمان اقامت کوتاه و حمل ذرات است، تا حدودی مرتفع می‌کند و با وجود بالا بودن ضرایب پدیده‌های انتقال از سطح تماس کافی نیز برخوردار است. البته، با وجود مزایای فراوان رژیم حبابی، همانطور که در بالا نیز به آن

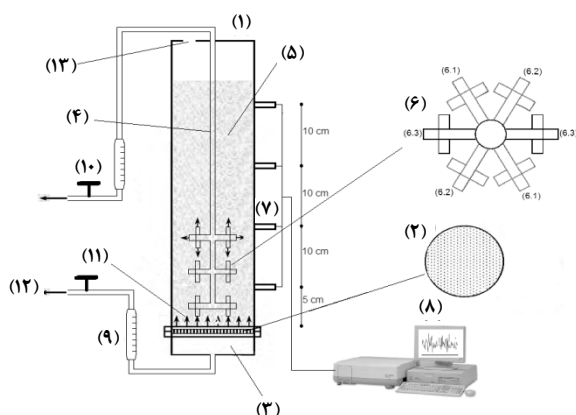
اشاره شد، گاهی حباب‌های ایجاد شده در این رژیم به دلیل پدیده ائتلاف، در حین صعود به یکدیگر می‌پیوندند و رشد می‌کنند و بزرگ‌تر می‌شوند و این امر به دلیل وجود مشکل جریان جانبی گاز توسط حبابها، به کاهش بازدهی تماس گاز-جامد و نیز از دست رفتن سطح تماس میان فازها و در پی آن، کاهش سرعت انتقال جرم می‌انجامد. چنگ و ویلیگان در تحقیقات خود نشان دادند که تزریق ثانویه گاز به طور مستقیم به داخل بستر سیال، می‌تواند اندازه حباب را به نحو مؤثری کاهش دهد و سرعت بهم پیوستن حبابها را کم کند [۸-۹]. نتایج نشان می‌دهند که خود تزریق‌کننده اندازه حبابها را تا ۱۰ درصد کاهش می‌دهد [۹-۱۰].

تزریق یکنواخت گاز در کل فضای واکنشگاه به کمک توزیع‌کننده کف بستر و توزیع‌کننده ثانویه به طور همزمان به جای تزریق گاز به تنهایی از توزیع‌کننده کف بستر، باعث کاهش قطر حباب‌های ایجاد شده، تماس بهتر گاز-جامد، بهبود چشمگیر انتخاب‌گری و درصد تبدیل مواد واکنش دهنده در واکنش‌ها و مخصوصاً واکنش‌های محدود شونده از لحاظ انتقال جرم می‌شود.

بنابراین، هدف از این تحقیق مطالعه مشخصه‌های هیدرودینامیکی واکنشگاه بستر سیال با توزیع‌کننده ثانویه گاز و ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی میزان کاهش قطر حبابها در اثر استفاده از توزیع‌کننده ثانویه است. تاکنون روابط متعددی برای پیش‌بینی قطر حبابها در واکنشگاههای بستر سیال معمول بدون توزیع‌کننده ثانویه جریان گاز ارائه شده که هر یک در شرایط مختلفی مانند قطرهای مختلف پودرها و انواع مختلف توزیع‌کننده‌ها است [۱۱-۱۴]. با توجه به ضرورت مدل سازی و شبیه‌سازی واکنشگاههای بستر سیال به‌منظور به‌دست آوردن روابط ریاضی برای توصیف رفتار گاز-جامد و پیش‌بینی عملکرد این واکنشگاهها و نیاز داشتن به روابط مطمئن به‌منظور پیش‌بینی قطر حبابها برای مدل سازی این واکنشگاهها، ارائه رابطه‌ای برای پیش‌بینی قطر حبابها در واکنشگاههای بستر سیال با توزیع‌کننده ثانویه گاز ضروری است.

یکی دیگر از وظایف حبابها در واکنشگاههای بستر سیال ایجاد اختلاط است که این امر نیز با کاهش قطر حبابها و افزایش تعداد آنها به نحو چشمگیری بهبود خواهد یافت و این امر باعث حذف فضاهای مرده درون بستر و کارایی بالاتر آن می‌شود. همچنین، نیاز به قرار گرفتن همزن که دارای هزینه‌های گزاف عملیاتی و نگهداری

وظیفه آنها ثبت فشار و نوسانهای فشار است. دو فشار سنچ نیز در بالا و پایین بستر قرار گرفته‌اند تا اختلاف فشار کل بستر را در مراحل مختلف آزمایشها اندازه‌گیری کند و نمایش دهند تا از این اطلاعات برای محاسبه Q_{mf} و نیز بررسی تغییرات ΔP_{total} با Q_t و نیز نسبت جریان توزیع کننده ثانویه بهره گرفته شود. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای تعبیه شده در بدنه واکنشگاه برای مشخص شدن به یک دستگاه PLC انتقال داده می‌شود و پس از تجزیه و تحلیل، نمودارها و جدولهای P-t توسط رایانه ترسیم می‌شوند. طرح کلی از سامانه به کار رفته در این آزمایشها را می‌توان در شکل (۱) مشاهده کرد.



شکل ۱. طرح کلی واکنشگاه بستر سیال دارای توزیع کننده ثانویه فراکتال به کار رفته در آزمایشها؛
 ۱. محفظه واکنشگاه بستر سیال؛ ۲. توزیع کننده صفحه متخلخل کف بستر؛ ۳. محفظه گاز؛ ۴. توزیع کننده ثانویه؛ ۵. ذرات جامد درون واکنشگاه؛ ۶. نازل‌های توزیع کننده ثانویه؛ (۶-۱) ۲ سانتی‌متر بالاتر از توزیع کننده کف بستر؛ (۶-۲) ۷ سانتی‌متر بالاتر از توزیع کننده کف بستر؛ (۶-۳) ۱۲ سانتی‌متر بالاتر از توزیع کننده کف بستر؛ ۷. حسگرهای اندازه‌گیری فشار؛ ۸. سیستم تحلیل سیگنال‌های فشار و ترسیم نمودار P-t؛ ۹. دبی سنچ؛ ۱۰. شیر و اتصالات قطع و وصل گاز؛ ۱۱. خطوط جریان گاز؛ ۱۲. کمپرسور؛ ۱۳. خروجی گاز از بستر؛ ۱۴. فشارسنج‌های تعبیه شده در کف و انتهای بستر.

ذرات به کار رفته در این آزمایشها، ذرات سیلیس با توزیع ۱۵۰ تا ۵۰۰ میکرومتراند که با توجه به غربال این ذرات در پنج دسته و به دست آوردن فراوانی هر دسته، قطر متوسط ذرات مورد استفاده در

است، در بستر مرتفع می‌شود. بنابراین، بهره‌گیری از شیپوره ثانویه برای تزریق بخشی از گاز به دلیل عدم نیاز به مصرف انرژی مازاد و حتی کاهش میزان افت فشار در اغلب موارد و نیز سادگی و هزینه ساخت پایین، بسیار مقرون به صرفه است مشکلات فرایندی پیچیده‌ای نیز ندارند. در این تحقیق، برای بررسی و سنجش نسبت قطر حباب‌ها، از روش انحراف استاندارد فشار استفاده شده است. نوسانهای فشار یکی از پارامترهای معمول در مطالعات بسترهای سیال‌اند [۱۵]. در این روش، فشار به وسیله دستگاه‌های اندازه‌گیری در مقاطع مورد نظر از واکنشگاه ثبت شده و سپس تجزیه و تحلیل می‌شود. رژیم‌های سیال سازی که وابسته به اندازه حباب است، سرعت بالا رفتن حباب و حرکت سطح بستر با زمان تأثیر زیادی بر نوسانات فشار می‌گذارد [۱۶].

۲- آزمایشها و تجهیزات

واکنشگاه بستر سیال به کار رفته در این آزمایشها، واکنشگاهی استوانه‌ای با قطر ۱۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲ متر است. این واکنشگاه دارای دو ورودی مجزا برای جریان گاز است که یکی از آنها توزیع کننده صفحه متخلخل واقع در کف بستر و دیگری توزیع کننده ثانویه جریان گاز قرار می‌گیرد، در قلب واکنشگاه است. مطابق شکل (۱)، توزیع کننده ثانویه شامل یک لوله با قطر ۱/۵ سانتی‌متر است که در قسمت فوقانی واکنشگاه تعبیه شده و در جهت عمودی در محور واکنشگاه قرار گرفته است. این توزیع کننده دارای شش شیپوره مجزاست که دو به دو مقابل هم و در ارتفاع‌های ۲، ۷ و ۱۲ سانتی‌متری بالای توزیع کننده کف بستر قرار گرفته‌اند. این شیپوره‌ها که در ارتفاع‌های ۵ سانتی‌متر از یکدیگر واقع‌اند، با زاویه افقی ۶۰ درجه از یکدیگر قرار گرفته‌اند تا تمامی فضای واکنشگاه را پوشش دهند. برای جلوگیری از ورود ذرات ریز به درون این شیپوره‌ها در خلال انجام آزمایشها و جلوگیری از انسداد آنها در سر هر یک از شاخک‌های خروجی، یک فیلتر کوچک نصب شده است که از ورود ذرات جامد به داخل شیپوره‌ها جلوگیری و هوا به راحتی از آن عبور می‌کند.

هوای مورد نیاز را یک کمپرسور تأمین می‌کند و پس از عبور از دبی سنچ‌ها توسط لوله‌هایی که به توزیع کننده‌ها متصل شده‌اند، به درون واکنشگاه جریان می‌یابد. چهار حسگر در بدنه واکنشگاه و در ارتفاع‌های ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سانتی‌متری کف بستر تعبیه شده‌اند که

از کف بستر، می‌توان پیروی قطر حباب‌ها را نسبت به ارتفاع بستر نیز مشاهده کرد. در واقع، در این آزمایشها نسبت قطر حباب‌ها به ازای $Q_s = 0$ ، به حالتی که بخشی از گاز ورودی از توزیع‌کننده ثانویه وارد واکنشگاه می‌شود، نسبت به سه عدد بدون بعد (h/L) و (Q_t/Q_{mf}) و (Q_s/Q_t) مورد بررسی شده است.

۳- روش اندازه‌گیری

با وجود آسان بودن اندازه‌گیری فشار، نوسانهای فشار تابع پیچیده‌ای از مشخصه‌های ذره، هندسه بستر، شرایط جریان، فشار و دماست [۱۷]. اطلاع از نوسانهای فشار در مراحل طراحی و اندازه‌گیری واکنشگاه بستر سیال بسیار مهم است و با توجه به آن می‌توان شاخصه‌هایی را چون سیالیت بستر، شکل‌گیری و اندازه حباب‌ها، کمینه سرعت سیالیت، صعود و فوران حباب‌های گاز و جنبش ذرات جامد که عموماً به عنوان شاخصه‌های تعیین‌کننده هیدرودینامیک بستر در نظر گرفته می‌شوند بررسی و تحلیل کرد [۱۸]. این روش نیاز به یک مبدل فشار با یک لوله کوچک در سوراخ دیواره ستون دارد [۱۹]. واریانس سیگنال نوسانهای فشار σ_{iop}^2 به اندازه حباب وابسته است و مقدار نوسانهای فشار با سرعت گاز و قطر ذرات افزایش می‌یابد [۲۰-۲۲]. نوسانات فشار در ستون بستر سیال اطلاعات اتفاقاتی را که در داخل ستون سیال اتفاق می‌افتد ارائه می‌کند [۲۰]. تحقیقات مختلفی در زمینه تحلیل سیگنال‌های فشار و نوسانهای فشار در بستر سیال برای شناخت رفتار بستر سیال انجام شده است [۲۳-۲۷]. با توجه به رابطه مستقیم انحراف استاندارد فشار با قطر حباب‌ها، با در اختیار داشتن نمودارها و جدولهای P-t و تحلیل آن‌ها و به دست آوردن انحراف استاندارد فشار می‌توان پی به ریزتر و یا درشت‌تر شدن حباب‌ها برد و از اثر پدیده‌های مختلف بر قطر حباب‌ها مطلع شد. می‌توان به نسبت قطر حباب‌ها در حالات مختلف آزمایش به حالت پایه ($Q_s=0$ و ثابت Q_t) نیز پی برد. در اندازه‌گیری نوسانهای فشار از حسگرهای فشاری با حساسیت ± 25 پاسکال از نوع مقاوم به گرمای شرکت کوبولد استفاده شد. بسامد حباب‌ها ۱ تا ۱۰ هرتز و نمونه‌برداریها با رعایت آهنگ ناپکوئیست صورت گرفته است.

حدود ۲۶۵ میکرومتر برآورد شده است که در محدوده ذرات گلدارت B قرار می‌گیرد. ارتفاع بستر ذرات جامد در حالت ایستا در این آزمایشها معادل ۳۷ سانتی‌متر است. در جدول (۱)، توزیع اندازه پودرها درج شده‌اند.

آزمایشها در چهار دبی کل متفاوت که به ترتیب ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ برابر حداقل دبی سیال سازی بوده‌اند، انجام شده‌اند. در هر یک از دبی‌های کل نیز بخشی از هوا از توزیع‌کننده کف و بخش دیگری از توزیع‌کننده ثانویه به فضای واکنشگاه وارد می‌شود. برای اطلاع از تأثیر نسبت دبی گاز ورودی از توزیع‌کننده ثانویه به دبی کل ورودی، بر روی نسبت قطر حباب‌ها به حالتی که تمام دبی گاز از توزیع‌کننده کف بستر وارد واکنشگاه می‌شود، با ثابت نگاه داشتن دبی کل میزان دبی توزیع‌کننده‌ها را تغییر می‌دهیم. به طوری که در ابتدا تمام دبی ورودی از توزیع‌کننده کف بستر وارد شده و سپس با کاهش دبی عبوری از توزیع‌کننده کف بستر، در آزمایشهای مختلف، ۱/۰ تا ۵/۰ برابر دبی کل ورودی گاز به توزیع‌کننده ثانویه اختصاص یافته است.

آزمایشهای مربوط به اندازه‌گیری نسبت قطر حباب‌ها، شامل ۲۲ مرحله‌اند که در هر مرحله نمودارها و جدولهای P-t برای هر یک از چهار حسگر به کمک سامانه‌های اندازه‌گیری ثبت شده‌اند.

همان‌گونه که اشاره شد، برای به دست آوردن Q_{mf} در این آزمایشها از روش افت فشار استفاده شده است. در این روش، ΔP_{max} متناظر با Q_{mf} است و با ترسیم نمودار $\Delta P_t - Q_t$ و با به دست آوردن ΔP_{max} در زمانی که از توزیع‌کننده ثانویه استفاده نمی‌شود، می‌توان Q_{mf} را محاسبه کرد. همچنین، از اطلاعات دو فشار سنج تعبیه شده در کف (زیر توزیع‌کننده کف بستر) و نیز بالای بستر و به دست آوردن ΔP در مراحل مختلف برای بررسی تغییرات افت فشار با تغییر دبی توزیع‌کننده ثانویه استفاده شده است.

مطابق آنچه بیان شد، دبی‌های کل ورودی به واکنشگاه، به ترتیب، ضرایبی از Q_{mf} هستند. این ضرایب صحیح به این دلیل مد نظر قرار گرفته‌اند که بتوان درک صحیحی از تأثیرپذیری نسبت قطر حباب‌ها در حالت‌های مختلف نسبت به دبی بدون بعد Q_t/Q_{mf} داشت. در این آزمایشها با توجه به وجود چهار حسگر در ارتفاع‌های مختلف

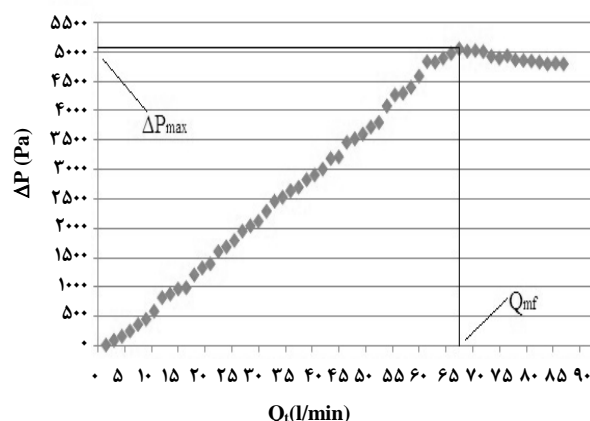
جدول ۱. توزیع اندازه پودر جامد SiO_2 .

قطر پودر (μm)	(۱۵۰-۲۰۰)	(۲۰۰-۲۵۰)	(۲۵۰-۳۰۰)	(۳۰۰-۳۵۰)	(۳۵۰-۴۰۰)
درصد وزنی	۲۷	۱۸	۱۹	۲۱	۱۵

۴- نتایج و بحث

۱-۴ تعیین کمینه دبی سیال سازی، Q_{mf}

کمینه دبی سیال سازی یکی از مشخصه‌های هیدرودینامیکی واکنشگاههای بستر سیال است. در این تحقیق، به دلیل نیاز به این پارامتر در مراحل بعدی آزمایشها، در مرحله ابتدایی به بررسی نمودارهای $\Delta P_{total}-Q_{total}$ برای مشخص کردن Q_{mf} پرداخته شده است. در شکل (۲) می‌توان نمودار $\Delta P_{total}-Q_{total}$ را مشاهده کرد.



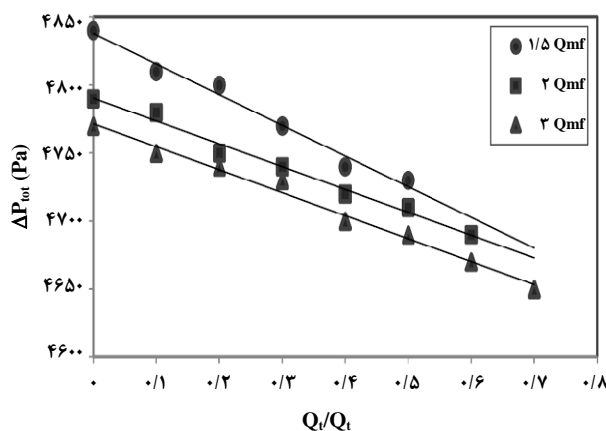
شکل ۲. نمودار $\Delta P_{total}-Q_{total}$ برای محاسبه کمینه دبی سیال سازی.

با توجه به نمودار شکل (۲) که در خلال انجام آزمایشات به دست آمده است، و با توجه به این که ΔP_{max} در این نمودار با Q_{mf} متناظر است، کمینه دبی سیال سازی در این آزمایشها $5/67$ لیتر بر دقیقه به دست آمده است. با توجه به کمینه دبی سیال سازی و قطر واکنشگاه، کمینه سرعت سیال سازی $8/47$ سانتی متر بر ثانیه به دست آمده است.

۲-۴ مطالعه و بررسی منحنی نمایش تغییرات ΔP_{tot} بر حسب دبی توزیع کننده ثانویه (Q_s)

تعداد زیادی از افت فشار در واکنشگاههای بستر سیال مربوط به عبور سیال از توزیع کننده کف بستر و نیز فشار ایستای ستون جامد است. در زمان استفاده از شیپوره ثانویه به دلیل ورود بخشی از گاز در ارتفاعهای بالاتری از بستر و فشار کمتر ستون ذرات جامد بر این بخش از سیال و نیز کاهش دبی عبوری از توزیع کننده کف بستر، انتظار می‌رود که ΔP_{tot} در بستر کاهش یابد. در شکل (۳) میزان

تغییرات ΔP_{tot} را بر حسب تغییرات Q_s در دبی‌های کل متفاوت مشاهده می‌کنید. مطابق شکل (۳)، افزایش دبی توزیع کننده ثانویه، کاهش در میزان افت فشار کل بستر در دبی‌های کل مختلف را در پی دارد.

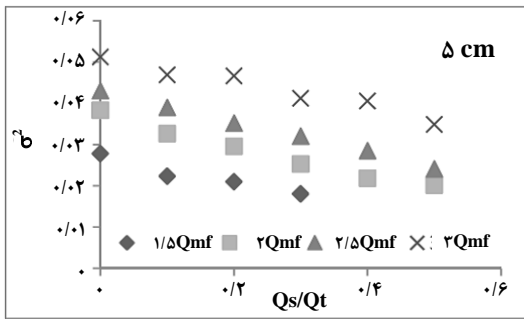


شکل ۳. تغییرات فشار بر حسب Q_s .

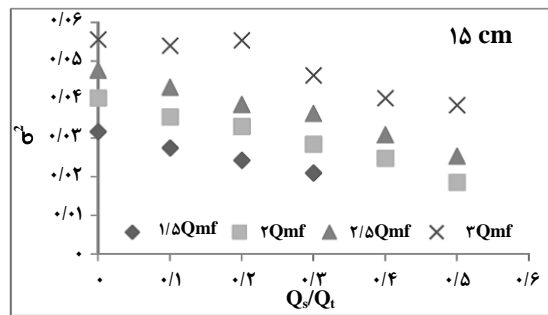
۳-۴ محاسبه تغییرات نوسانهای فشار و محاسبه قطر حبابها

با توجه به حجم زیاد داده‌ها و برای محاسبه دقیق‌تر، تغییرات نوسانات فشار در مراحل مختلف آزمایشها با کمک نرم افزار و با تحلیل نمودارهای P-t توسط رایانه محاسبه شده است. در نمودارهای (۴) پیروی تغییرات نسبت به دبی کل و نسبت دبی توزیع کننده ثانویه به دبی کل در ارتفاعهای مختلف را مشاهده می‌کنید.

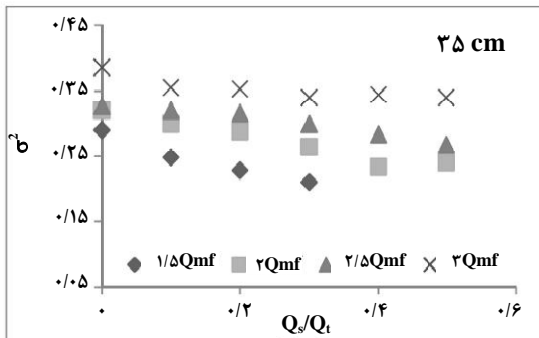
با توجه به این که σ_{iop}^2 معیار مناسبی برای سنجش قطر حبابهاست، بنابراین با توجه به این نمودارها می‌توان پیروی قطر حبابها را نسبت به عواملی چون (Q_t/Q_{mf}) و (Q_s/Q_t) و ارتفاع مشاهده کرد. همچنین، با توجه به رابطه مستقیم قطر حبابها با σ_{iop}^2 ، می‌توان از نسبت σ_{iop}^2 به ازای $Q_s \neq 0$ ، نسبت به حالت $Q_s=0$ سود جست و نسبت قطر حبابها را در حالت بهره‌گیری از توزیع کننده ثانویه به حالتی را به دست آورد که دبی عبوری از این توزیع کننده صفر است. نمودارهای شکل (۵) بیانگر نسبت قطر حبابها در حالتها مختلف آزمایش نسبت به حالت پایه ($Q_s=0$) و ثابت (Q_t) و در ارتفاعهای مختلف است.



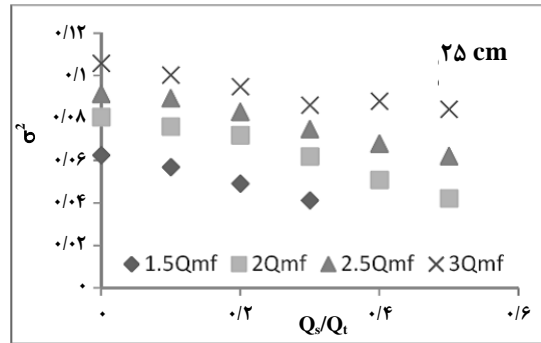
(ب)



(الف)

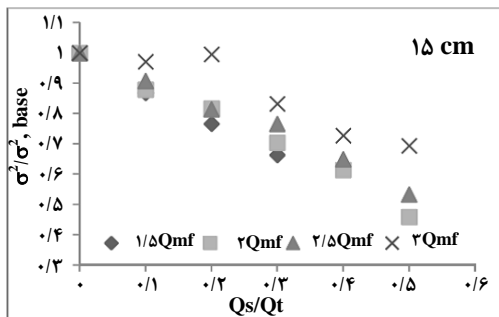


(ت)

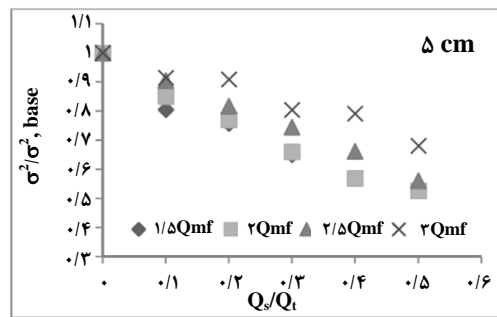


(پ)

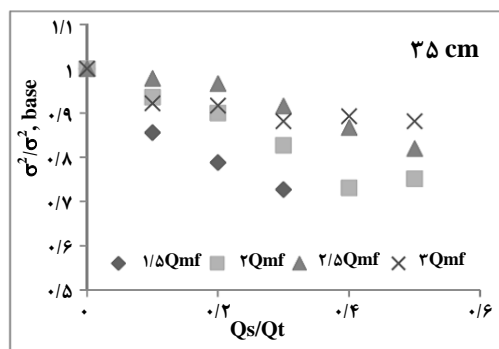
شکل ۴. نمودارهای انحراف پیروی تغییرات بر حسب نسبت دبی توزیع‌کننده ثانویه به دبی کل ورودی در دبی کل و ارتفاع‌های مختلف.



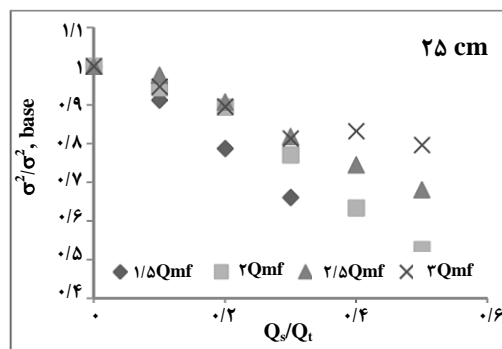
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۵. تغییرات نسبت قطر حباب‌ها بر حسب نسبت دبی توزیع‌کننده ثانویه به دبی کل در دبی‌های کل و ارتفاع‌های مختلف.

۵- مدل سازی

در این بخش به بررسی اثر پدیده های مختلف بر اندازه حبابها پرداخته و سعی می شود یک مدل ریاضی منطبق بر شرایط و روابط فیزیکی مسئله ارائه شود که از توان پیش بینی تغییرات اندازه حبابها نسبت به پارامترهای مختلف مورد نظر برخوردار باشد. هدف از این مدل سه متغیره، تدوین عبارتی برای نسبت قطر حبابها بر اساس پارامترهایی چون نسبت دبی توزیع کننده ثانویه به دبی کل (Q_s/Q_t)، ارتفاع بدون بعد (h/L) و نسبت دبی کل به کمینه دبی سیال سازی (Q_t/Q_{mf}) است.

۵-۱- تأثیر دبی توزیع کننده ثانویه قطر حبابها

در نتایج تجربی مشاهده شد که به ازای Q_t ثابت با تزریق بخشی از گاز توسط توزیع کننده ثانویه، از مقدار انحراف استاندارد فشار کاسته شده است که این امر بیانگر کاهش قطر حبابهاست. همچنین، با افزایش دبی توزیع کننده ثانویه این کاهش در میزان قطر حبابها افزایش می یابد که این موضوع بیانگر کارایی مفید و عملکرد مناسب توزیع کننده ثانویه در کاهش دادن قطر حبابهای ایجاد شده است. این کاهش قطر حبابها گاهی تا میزان ۵۰٪ قطر اولیه حبابهاست. مثلاً، در حسگر واقع در ۱۵ سانتی متری کف بستر و به ازای $Q_t=2Q_{mf}$ ، در هنگامی که $Q_s=0/4$ ، شاهد کاهش حدود ۴۰٪ در اندازه قطر حبابها بر حسب $Q_s=0$ خواهیم بود.

مطابق شکل (۵)، کاهش نسبت قطر حبابها با افزایش Q_s دارای نسبت مستقیمی است. میزان کاهش در نسبت قطر حبابها با افزایش ارتفاع و نیز افزایش دبی کل کاهش می یابد. در مورد علت کاهش قطر حبابها در حالت به کارگیری توزیع کننده ثانویه و نیز افزایش این کاهش با افزایش دبی توزیع کننده ثانویه می توان به تراکم زدایی از کف بستر برای ایجاد حبابها اشاره کرد. در واقع، وقتی تنها ورودی گاز به درون بستر توزیع کننده کف بستر است، حجم بیشتری از گاز نسبت به حالتی از توزیع کننده کف بستر خارج می شود که توزیع کننده ثانویه موجود است. این افزایش در دبی توزیع کننده کف بستر باعث افزایش فشار در پشت این توزیع کننده و به تبع آن افزایش سرعت خروج حبابها و نیز تراکم بالای حبابهای گاز در کف بستر می شود که این عوامل به هم پیوستگی بیشتر حبابها را در پی دارند. با بهره گیری از توزیع کننده ثانویه و ورود بخشی از گاز توسط این توزیع کننده به داخل بستر،

مکانهای ایجاد حباب در بستر متعدد و از تراکم حبابها در یک نقطه و نیز سرعت بالای آنها در خروج از توزیع کننده کاسته شده است. بنابراین، از به هم پیوستگی، و در پی آن، ایجاد حبابهای بزرگتر جلوگیری می شود و این موضوع باعث کاهش قطر حبابهای ایجاد شده در حضور توزیع کننده ثانویه خواهد شد. مطابق نمودارها، با افزایش میزان Q_s ، از میزان کاهش اندازه حبابها کاسته می شود و منحنی به سمت تخت شدن میل می کند. بر این اساس، و با توجه به برآزشهای انجام شده، پیش بینی تغییرات نسبت قطر حبابها با دبی توزیع کننده ثانویه با یک تابع معکوس نمایی دارای نتایجی مناسب و منطبق بر فیزیک مسئله است.

۵-۲- تأثیر ارتفاع بستر بر نسبت قطر حبابها

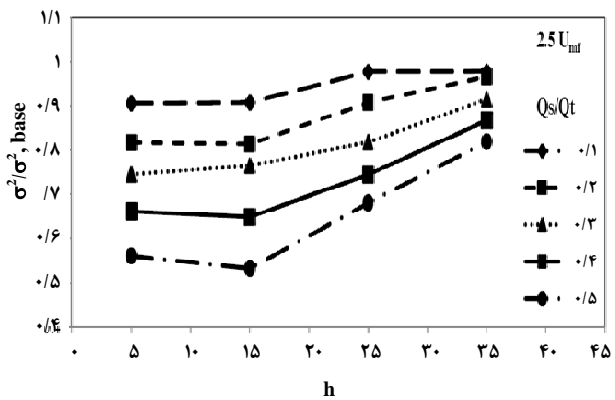
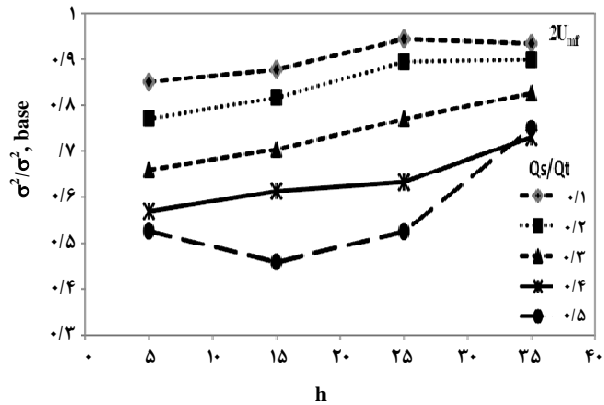
مطابق شکل (۶)، با افزایش فاصله از کف بستر و به بیان دیگر صعود حبابها در درون بستر، قطر حبابها افزایش می یابد. در واقع، می توان این گونه گفت که بین قطر حبابها و ارتفاع حبابهای درون بستر رابطه مستقیمی برقرار است. این پدیده از عوامل متعددی ناشی می شود. از جمله این عوامل می توان به کاهش فشار ناشی از ستون جامد بر حبابها در حالت صعود حبابها اشاره کرد. این کاهش فشار با قطر حبابها نسبت عکس دارد و به افزایش قطر حبابها می انجامد. همچنین، یکی از عوامل دیگر که نقش بسزایی در افزایش قطر حبابها در طی مسیر صعود دارد، به هم پیوستگی آنهاست. در مسیر صعود، گاهی به دلیل تراکم بالای حبابها، حبابها به یکدیگر می پیوندند و حبابهای بزرگتری را تشکیل می دهند. البته، به هم پیوستگی حبابها در مقاطع مختلف واکنشگاه به شکل های مختلفی صورت می گیرد. در کف واکنشگاه به دلیل تراکم بالای حبابها و نیز سرعت بالای آنها پس از خروج از توزیع کننده، به هم پیوستگی بیشتر به صورت عمودی است، ولی در ارتفاعهای بالاتر به دلیل رشد اندازه حبابها و بزرگتر شدن آنها و نیز سرعت صعود کمتر، به هم پیوستگی حبابها معمولاً به صورت افقی و از کناره ها صورت می گیرد. البته، گاهی نیز حبابهای بزرگتر می شکنند و به حبابهای کوچکتر تقسیم می شوند. این پدیده در بسترهای حاوی ذرات گلدارت A متداول تر است. مطابق نمودارهای بالا، با بالا رفتن ارتفاع حسگرها از کف بستر تأثیر استفاده از توزیع کننده ثانویه کمتر شده و قطر حبابها به حالتی که در آن $Q_s=0$ است نزدیک تر می شود.

بیانگر توابع دارای مجانب باشند که برازش‌های انجام گرفته نشانگر دقت بالای این توابع در مورد داده‌های مورد نظر ما می‌باشند. در واقع این توابع دارای نتایجی مناسب و منطبق بر فیزیک مسئله برای پیش بینی تغییرات نسبت قطر حباب‌ها با ارتفاع می‌باشد.

۳-۵ تأثیر میزان دبی کل بر نسبت قطر حباب‌ها

همان‌گونه که می‌دانیم با افزایش دبی کل گاز ورودی به واکنشگاه قطر حباب‌ها افزایش می‌یابد. علت این افزایش می‌تواند بالا رفتن موجودی گاز درون بستر و در نتیجه بالا رفتن سرعت خروج حباب‌ها و تعداد حباب‌ها از توزیع‌کننده باشد. همچنین افزایش تعداد و سرعت خروجی حباب‌ها باعث افزایش به هم پیوستگی و رشد سریع‌تر آن‌ها را نسبت به حالتی که تعداد حباب‌ها کمتر است را در پی دارد. در هنگام استفاده از توزیع‌کننده ثانویه سرعت بالای رشد حباب‌ها باعث کمتر شدن کاهش در قطر حباب‌ها گردیده و در واقع قطر حباب‌ها به قطر حباب‌ها در حالت مینا نزدیک‌تر می‌گردد. همان‌گونه که در شکل (۵) مشخص است با افزایش نسبت دبی کل به حداقل سیال سازی از میزان کاهش در نسبت قطر حباب‌ها کاسته شده است. برای مثال در سنسور واقع در ۵ سانتی‌متر کف بستر زمانی که $Q_t/Q_{mf}=2$ است، میزان کاهش در قطر حباب بالغ بر ۵۰٪ بوده و زمانی که $Q_t/Q_{mf}=0.3$ است این کاهش برابر با ۳۰٪ قطر اولیه می‌باشد. در واقع با توجه به نتایج آزمایش‌ها می‌توان دریافت که در Q_s/Q_t و نیز h/L ثابت، با افزایش دبی کل، قطر حباب‌ها به حالت $Q_s=0$ نزدیک‌تر شده و یا به بیان دیگر نسبت قطر حباب‌ها افزایش یافته و بر عدد یک نزدیک‌تر می‌گردد.

همچنین می‌توان مشاهده نمود که با افزایش Q_t/Q_{mf} نمودارها جمع‌تر شده و میزان تغییرات نسبت قطر حباب‌ها کاهش می‌یابد. با توجه به موارد فوق و برازش‌های انجام شده، تخمین داده‌های نسبت قطر حباب در حالت $Q_s=0$ و $Q_s \neq 0$ نمایانگر تابعیت Ln برای نسبت قطر حباب‌ها بر اساس Q_t/Q_{mf} می‌باشد. همچنین تابع Ln علاوه بر تخمین مناسب و دقیق تغییرات داده‌های آزمایشگاهی با پارامتر Q_t/Q_{mf} منطبق با موارد ذکر شده بر اساس فیزیک مسئله نیز می‌باشد.



شکل ۶. تغییرات نسبت اندازه حباب‌ها در طول بستر با دبی‌های مختلف.

این پدیده می‌تواند ناشی از به هم پیوستگی حباب‌ها در حین صعود باشد. همان‌گونه که بیان شد با کوچک‌تر شدن حباب‌ها در اثر تزریق بخشی از گاز توسط توزیع‌کننده ثانویه، حجم حباب‌ها کاهش یافته و این امر باعث افزایش تعداد حباب‌ها در دبی ثابت گاز ورودی به واکنشگاه در مقایسه با حالت $Q_s=0$ گردد. این افزایش در تعداد حباب‌ها می‌تواند باعث افزایش به هم پیوستگی حباب‌ها در ارتفاع‌های بالاتر و نزدیک‌تر شدن قطر حباب‌ها به حالت پایه می‌گردد. نمودارهای زیر نسبت قطر حباب‌ها را بر اساس ارتفاع بستر در حالتی که Q_t ثابت است را نشان می‌دهند.

همان‌گونه که در شکل (۶) مشهود است با افزایش ارتفاع، اندازه حباب‌ها افزایش پیدا کرده، ولی با افزایش ارتفاع منحنی به سمت تخت شدن و کاهش اندازه تغییرات حرکت می‌کنند. علت این کاهش در میزان تغییرات می‌تواند نزدیک شدن قطر حباب‌ها به قطر تعادلی و نیز خرد شدن برخی از حباب‌ها باشد. در واقع منحنی‌ها نشان دهنده یک تابع s شکل دارای مجانب می‌باشند. این نوع توابع صعودی که با پیشرفت از میزان شیب آن‌ها کاسته می‌شود می‌توانند

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
a	۲.۲۹۵	f	۲۱.۵۶۲
b	-۱.۳۲۷	g	۲۴.۹۲۳
c	۲۴.۰۰	h	-۰.۷۱۳۶
d	۰.۳۲۵۶	i	۰.۷۴۲۳۵
e	۸.۹۵۶	j	-۲.۷۴۷۶
$R^2=۰.۹۵۱۱$			

در معادله بالا، X_1 نمایانگر نسبت دبی توزیع کننده ثانویه به دبی کل، $(Q_s/Q_t, X_2)$ نسبت ارتفاع حباب به ارتفاع بستر در حالت ایستا (h/L) و X_3 نسبت دبی کل به کمینه دبی سیال سازی است. با توجه به این که معادله (۱) دارای ضریب همبستگی مناسبی است و در تمام موارد انطباق آن با فیزیک مسئله در نظر گرفته شده، این عبارت معیار مناسبی برای سنجش نسبت قطر حبابها در حالت استفاده از توزیع کننده ثانویه به حالت $Q_s=0$ است. با توجه به روابط متعدد، پیش بینی قطر حبابها که در واکنشگاههای معمولی و با توزیع کنندهها و پودرهای مختلف نیز ارائه شده است. بنابراین، از معادله (۱) می توان برای برآورد کردن قطر و نسبت قطر حبابها در واکنشگاههای دارای توزیع کننده ثانویه جریان گاز با تقریب مناسبی بهره گرفت.

۶- نتیجه گیری کلی

در واکنشگاههای بستر سیال همواره افزایش شدت جریان فاز گاز باعث آشفته گی جریان، ایجاد پدیده لختگی و دور شدن از رژیم سیالیت حبابی و پدید آمدن رژیمهای سیالیت نامناسب می شود و در نهایت کارایی واکنشگاه را کاهش می دهد. در این تحقیق، برای رفع این مشکلات، علاوه بر توزیع کننده کف بستر از یک توزیع کننده ثانویه برای ورود فاز گاز بهره گرفته شد. بنابر نتایج به دست آمده، استفاده از توزیع کننده مجدد به کاهش قطر حبابهای ایجاد شده انجامید. کاهش در میزان قطر حبابها به افزایش سطح تماس میان فازها و در پی آن افزایش تبادل گاز میان حبابها و فاز امولسیون متشکل از ذرات جامد و گاز منجر می شود و بهبود شرایط واکنش و نیز تبدیل واکنش را در پی خواهد داشت. همچنین، استفاده از توزیع کننده مجدد تحرک در کل ستون را ایجاد می کند و

به منظور یافتن یک مدل ریاضی به منظور پیش بینی میزان کاهش قطر حبابها با استفاده از توزیع کننده ثانویه نسبت به واکنشگاه بدون توزیع کننده ثانویه، به بررسی اثر پدیده های مختلف بر روی اندازه حبابها پرداخته شده و تلاش شده است تا مدلی منطبق بر فیزیک مسئله ارائه شود که توان پیش بینی تغییرات اندازه حبابها را نسبت به پارامترهای مختلف مورد نظر داشته باشد. هدف از این مدل تدوین عبارتهایی برای نسبت قطر حبابها بر اساس پارامترهایی چون نسبت دبی توزیع کننده ثانویه به دبی کل (Q_s/Q_t) ، ارتفاع بدون بعد (h/L) و نسبت دبی کل به کمینه دبی سیال سازی (Q_t/Q_{mf}) است. ابتدا، با توجه به تغییرات تک تک پارامترها نوع معادله حاکم یافت شد و سپس ترکیب آنها به صورت معادله (۱) جهت برآزش با داده های فیزیکی در نظر گرفته شد.

با توجه به موارد یاد شده و یافتن تابع نسبت قطر حبابها در حالت $Q_s \neq 0$ به حالت $Q_s=0$ ، رابطه ی (۱)، که منطبق بر فیزیک مسئله است، ارائه شد:

$$\frac{(d_b)Q_s \neq 0}{(d_b)Q_s = 0} = (a + \exp(x_1)) * (c + \frac{d(x_2)^e}{1 + F(x_2)^e}) * (g + \ln(x_3)) \quad (1)$$

معادله ی (۱) پس از بازنویسی به صورت معادله (۲) در آمده است.

$$\frac{(d_b)Q_s \neq 0}{(d_b)Q_s = 0} = a + b * \exp(x_1) + c * (\frac{d * x_2^e}{1 + F * X_2^e}) + g * \exp(x_1) * (\frac{d * x_2^e}{1 + F * X_2^e}) + h * \ln(x_3) + i * \exp(x_1) * \ln(x_3) + j * (\frac{d * x_2^e}{1 + Fx_2^e}) * \ln(x_3) + \exp(x_1) * \ln(x_3) * (\frac{dx_2^e}{1 + Fx_2^e}) \quad (2)$$

بر اساس برآزش نمودارهای شکل (۵) با معادله ی بالا، ضرایب این معادله های بالا به دست می آیند که مقادیر آنها در جدول (۲) درج شده اند.

- باعث می‌شود بدون مصرف انرژی بیشتر، حباب‌ها با قطرهای مناسب تولید شوند. این نتایج را می‌توان برای بسترهای واکنشی نیز به‌کار گرفت.
- مراجع**
- [16] Fan, L. T., HO. T. C., Hiraoka, S., "pressure Fluctuations in afluidizes bed", AICHE journal, 27, 388-396, (1981).
- [17] Sobrino, C., Sanchez-Delgado, S., Garcia-Hernando, N., "VegaStandard deviation of absolute and ifferential pressurefluctuations in fluidized beds of group B particles", (2008).
- [18] Felipe, C. A. S., Rocha, S. C. S., "Prediction of minimum fluidization velocity of gas–solid fluidized beds by pressure fluctuation measurements-analysis of the standard deviation methodology", Powder Technology, 174, 104-113, (2007).
- [19] Brown, R. C., Brue, E., "Resolving dynamical features of fluidized bed from pressure fluctuation", Powder Technology, 119,68-80, (2001).
- [20] Kage, H., Agari, M., Ogura, H., Matsuno, Y., "Frequency Analysis of pressure fluctuation in Fluidized bed plenum and It's Confidence limit of detection of various modes of Fluidization", Advanced Powder Technology, 11, 459-474, (2000).
- [21] Christensen, D., Nijenhuis, J., Van Ommen, J. R., Coppens, M. O., "Residence times in fluidized beds with secondary gas injection", Powder Technology 180, 321-331, (2008).
- [22] Svoboda, K., Cermak, J., Hartman, M., Drahos, J., Selucky, K., "Pressure fluctuations in gas-fluidized beds at elevated temperatures", Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 22, 514-520, (1983).
- [23] Geng, Q., Zhu, X., Yang, J., You, X., Liu, Y., Li, C., "Flow regime identification in a novel circulating-turbulent fluidized bed", Chemical Engineering Journal, Vol. 244, pp. 493-504, (2014).
- [24] Sheikhi, A., Sotudeh-Gharebagh, R., Mostoufi, N., Zarghami, R., "Frequency-based characterization of Liquid–Solid fluidized bed hydrodynamics using the analysis of vibration signature and pressure fluctuations", Powder Technology, Vol. 235, pp. 787-796, (2013).
- [25] Aghbashlo, M., Sotudeh-Gharebagh, R., Zarghami, R., Mujumdar, A. S., Mostoufi, N., "Measurement Techniques to Monitor and Control Fluidization Quality in Fluidized Bed Dryers: A Review", Drying Technology, Vol. 32(9), (2014).
- [26] Martin, L., Dries, K., Ommen J. R., "Comparison of three different methodologies of pressure signal processing to monitor fluidized-bed dryers/granulators", Chemical Engineering Journal, Vol. 172, pp. 487-499, (2011).
- [۲۷] فرهاد کریمی، رحمت ستوده قره باغ، رضا ضرغامی، نوید مستوفی، "بهره‌گیری از نوسانات فشار در رصد هیدرودینامیک بستر سیال"، فرایندنو، ۳۸، ۵-۱۶، (۱۳۹۱).
- [1] Kunii, D., Levenspiel, O., "Fluidization Engineering", John Wiley & Sons, New York, (1991).
- [2] Wang, Y., Cheng, Y., Jin, Y., Bi, H. T., "On impacts of solid properties and operating conditions on the performance of gas-solid fluidization systems", Powder Technology 172, 167-176 (2007).
- [3] Willigen, V., Turnhout V., Ommen V., Den Bleek V., "Bubble Size Reduction in a Fluidized Bed by Electric Fields", Journal of Chemical reactor Engineering, 1, 1-14 (2003).
- [4] Kwauk, M., "Fluidization: Idealized and Bubbleless, with Applications, Science Press", Beijing, (1992).
- [5] Coppens, M. O., "Method for operating a chemical and/or physical process by means of a hierarchical fluid injection system", US Patent 6333019, (2001).
- [6] Rosensweig, R. E., "Process concepts using field-stabilized two-phase flow", Journal of Electrostatics, 34, 163-187, (1995).
- [7] Hristov, J., "Magnetic field assisted fluidization a unified approach: a series of review papers", Review of Chemical Engineering, 18,4 (2002).
- [8] Cheng, Y., Van den Bleek, C. M., Coppens M. O., Proc. 10th Int. Conference on Fluidization, United Engineering Foundation, New York, 373, (2001).
- [9] Klijen van Willigen, F., Christensen, D., Van Ommen, J. R., Coppens, M. O., Catalysis Today 105,560 (2005).
- [10] Coppens, M. O., "Scaling up and down in a nature inspired way", IndustrialEngineering Chemistry Research 44, 5011-5019, (2005).
- [11] Kaart, S., "Controlling Chaotic Bubbles", PhD-thesis, Delft University of Technology, (2002).
- [12] Davidson, J. F., Schuler, B. O. G., "Bubble formation at an orifice in inviscid liquid", Transaction Institution Chemical Engineering, 38, 335-342, (1960).
- [13] Werther, J., "Mathematical modelling of fluidized bed reactors", ChemicalEngineering Technology, 50, 850-860, (1978).
- [14] Yasui, G., Johanson, L. N., "Characteristics of gas packets in fluidizes bed", AICHE Journal, 4, 445-452, (1958).
- [15] Alberto, C., Felipe, S., Rocha, S. C. S., "Time series analysis of pressure fluctuation in gas-solid fluidized beds", Brazilian Journal of chemical engineering, 21, 497-507, (2004).