

## تعیین مشخصه‌های هیدرودینامیکی بسترهای سیال سه‌فازی به کمک پایش نوسان‌های ارتعاش

امیر شیخی، رحمت ستوده قره‌باغ\*<sup>+</sup>، نوید مستوفی، رضا ضرغامی

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه سیستم‌های چند فازی، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵

محمد محبوب جهرمی

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه مودال، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵

**چکیده:** پایش نوسان‌های ارتعاش بستر سیال سه‌فازی گاز-مایع-جامد، به عنوان روشی نوین در تعیین مشخصه‌های هیدرودینامیکی این گونه سامانه‌ها مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفت. بستر سیال سه‌فازی مورد مطالعه، حاوی هوا، آب و شن به عنوان سه فاز عملیاتی بود که آب به صورت فاز پیوسته و هوا و ذرات شن به صورت فازهای گسسته اول و دوم در نظر گرفته شد. این نوع از بسترهای سیال که آب و هوا به صورت همسو و رو به بالا جریان داشته و فاز جامد از ابتدا درون بستر حضور دارد، به عنوان متداول‌ترین حالت عملیاتی بسترهای سیال سه‌فازی در صنعت شناخته می‌شوند. به منظور مطالعه هیدرودینامیک چنین سامانه پیچیده‌ای، استفاده از ابزارها و روش‌هایی قابل اعتماد و تا حد امکان بدون مزاحمت برای پدیده‌های درون بستر، حیاتی می‌باشد. تحلیل سری زمانی به دست آمده از ثبت نوسان‌های ارتعاش بستر در ارتفاع ۱۳/۵ سانتی‌متری از توزیع کننده گاز-مایع، به منظور دستیابی به مشخصه‌های هیدرودینامیکی بستر سیال سه‌فازی، در حوزه زمان (روش‌های آماری)، به عنوان روش‌های تحلیل متداول، و همچنین به کمک میانگین فرکانس دوره نوسان‌ها، به عنوان روشی نوین در تحلیل این گونه سامانه‌ها انجام شد. نتیجه گرفته شد که انحراف معیار نوسان‌های ارتعاش پوسته معیار خوبی برای تعیین تغییر رژیم کلی بستر بوده و تغییر شیب برجستگی نوسان‌های ارتعاش، در نزدیکی شرایط کمترین سیالیت اتفاق می‌افتد. همچنین سرعت کمترین سیالیت با دقت دلخواهی، به کمک میانگین نوسان‌های دوره سیگنال ارتعاش بستر، تخمین زده شد. شرایط عملیاتی متناسب با تغییر الگوی بستر که به کمک پایش نوسان‌های ارتعاش به دست آمد، با یافته‌های تجربی تطابق خوبی داشته و نتیجه‌های کمترین سیالیت با جامع‌ترین رابطه موجود در منابع مطالعاتی همخوانی بسیار خوبی داشت. سرانجام، پایش نوسان‌های ارتعاش بستر، به عنوان یک روش به طور کامل غیرتداخلی و نوین که آسبایی به هیدرودینامیک درون بستر نمی‌رساند، به عنوان روشی مؤثر در تعیین مشخصه‌های مهم هیدرودینامیکی بسترهای سیال سه‌فازی، معرفی می‌شود. نتیجه‌های این پژوهش به ویژه در راکتورهای صنعتی که در شرایط عملیاتی شدید از دما و/یا فشار کار کرده و امکان دسترسی به درون آن‌ها نمی‌باشد، به آسانی قابل استفاده است.

**واژه‌های کلیدی:** بستر سیال سه‌فازی، هیدرودینامیک، نوسان ارتعاش، کمترین سیالیت، تحلیل آماری.

**KEY WORDS:** Three-phase fluidized bed, Hydrodynamics, Vibration fluctuation, Minimum fluidization, Statistical analysis.

Expanded Bed Regime in Gas-Liquid-Solid Fluidization	Mode Designation	E-I-a-1	E-I-a-2	E-I-b	E-I-a-1	E-II-a-2	E-II-b	E-III-a	E-III-b	
	Schematic Diagram									
Continuous Phase		Liquid			Gas		Liquid			
Flow Direction		Cocurrent Up-Flow			Counter-current Flow			Gas-Up-Flow Liquid-Batch		
References (Chapters)		1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, A			1, 4, 6, 7, 10, 11, A		1, 2, 11		1, 5, 6, 7, 8	
References (Chapters)		5, 9, 11		1, 5, 7, 9, 11		1, 4, 7, 11		1, 5		

Transport Regime in Gas-Liquid-Solid Fluidization	Mode Designation	T-I-a-1	T-I-a-2	T-I-b	T-II-a	T-II-b	T-III-c	T-III-b	
	Schematic Diagram								
Continuous Phase		Liquid		Gas		Liquid		Gas	
Flow Direction		Cocurrent Up-Flow		Counter-current Flow		Cocurrent Down-Flow			
References (Chapters)		1, 6, 7, 8, 11		1, 4, 10, 11, A		1, 6		1, 9, 11	
References (Chapters)		1, 9		1, 6, 11		1, 6, 9			

(S-↑) Independent Charge of Solids from Fluid (L-↓) Independent Discharge of Solids from Fluid (L+S) Charge or Discharge of Solids with Fluid  
A - Appendix A

شکل ۱- دسته‌بندی اساسی سامانه‌های سیال‌سازی گاز - مایع - جامد [۱].

به‌صورت مستقل از جریان مایع قابل ورود و خروج به بستر هستند (حالت E-I-a-1). برای ذره‌های کوچک یا سبک که  $U_t < 0.05 \text{ m/s}$ ، وارد کردن یا تخلیه مواد جامد، اغلب وابسته به جریان مایع خواهد بود (حالت E-I-a-2) [۱]. حالت E-I-a-1 یکی از مهم‌ترین حالت‌های عملیاتی متداول در صنعت بوده و در نتیجه، توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌است. این پژوهش به هیدرودینامیک حالت E-I-a-1 اختصاص پیدا می‌کند.

در بسترهای سیال سه‌فازی، تقسیم‌بندی‌های گوناگونی در مورد الگوی حباب‌ها، با نام‌گذاری‌های متفاوت به چشم می‌خورد. بر طبق رفتار حباب‌ها، فن و همکاران [۱۴]، سه الگوی جریان گوناگون تعریف نموده‌اند: حباب‌های به هم چسبیده (متصل)، حباب‌های پراکنده، و رژیم لخته‌ای. در رژیم حباب‌های به هم چسبیده (متصل)، حباب‌ها تمایل دارند به یکدیگر چسبیده و حباب‌هایی با اندازه و سرعت بیشتر، با توزیع بسیار گسترده‌ای به وجود آورند. در رژیم حباب‌های پراکنده، هیچ‌گونه اتصال حبابی دیده نشده و حباب‌ها دارای اندازه کوچک و یکنواختی هستند. این الگو در حالت سرعت زیاد مایع و سرعت کم یا متوسط گاز اتفاق می‌افتد.

## مقدمه

بسترهای سیال سه‌فازی به دلیل برخورداری از برتری‌های فراوان، مانند نرخ بالای انتقال جرم و حرارت و تماس مؤثر بین فازهای جامد و سیال، در صنایع گوناگون نفتی [۱]، شیمیایی [۲، ۳]، پتروشیمیایی [۴، ۵]، معدنی [۱]، زیست محیطی [۶-۹]، تصفیه [۱۰-۱۲] و غیره، از اهمیت فراوانی برخوردار شده است. سیال‌سازی سه‌فازی عبارت است از فرایندی که در آن، ذره‌های جامد با معلق شدن در مخلوطی از فازهای گاز و مایع به حالت شبه‌سیال می‌رسند [۱۳]. امروزه، فرایند سیال‌سازی گسترش فراوانی یافته و جایگزینی مناسب برای بسیاری از فرایندهای قدیمی صنعتی به شمار می‌آید.

در یک دید گسترده، سیال‌سازی گاز - مایع - جامد شامل هر دو رژیم بستر انبساط یافته و انتقالی با سرعت حد ذرات ( $U_t$ ) بین  $0.003$  تا  $0.50 \text{ m/s}$  می‌شود. شکل ۱ شرایط عملیاتی لازم برای هر یک از رژیم‌ها را نشان می‌دهد [۱]. در رژیم بستر انبساط یافته، با فاز مایع پیوسته و جاری به‌صورت همسو با جریان گاز و رو به بالا، جامدها هم به‌صورت پیوسته و هم ناپیوسته قابل وارد شدن هستند. برای ذره‌های با چگالی زیاد که  $U_t > 0.05 \text{ m/s}$ ، ذره‌های جامد

اختصاصی مورد مطالعه شده و در مورد سایر سامانه‌های سه‌فازی، گاه تا چند صد درصد خطا نیز می‌تواند داشته باشد، و همچنین این که روابط نیمه‌تجربی دارای متغیرهایی هستند که تعیین دقیق آن‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد، ابزارهای ارائه شده برای تخمین سرعت مایع حداقل سیالیت از مطلوبیت زیادی برخوردار نبوده است. باتوجه به نبود یک روش مؤثر برای تعیین مشخصه‌های هیدرودینامیکی بسترهای سیال سه‌فازی که مزاحمتی برای پدیده‌های درون بستر ایجاد نکند، هدف این پژوهش، امکان‌سنجی و معرفی یک روش به طور کامل نوین و غیرتداخلی به منظور بررسی دو مشخصه مهم هیدرودینامیکی بسترهای سیال سه‌فازی، یعنی شرایط کمترین سیالیت و تغییر الگوی غالب می‌باشد.

### بخش تجربی

#### تجهیزات اندازه‌گیری و روش انجام آزمایش

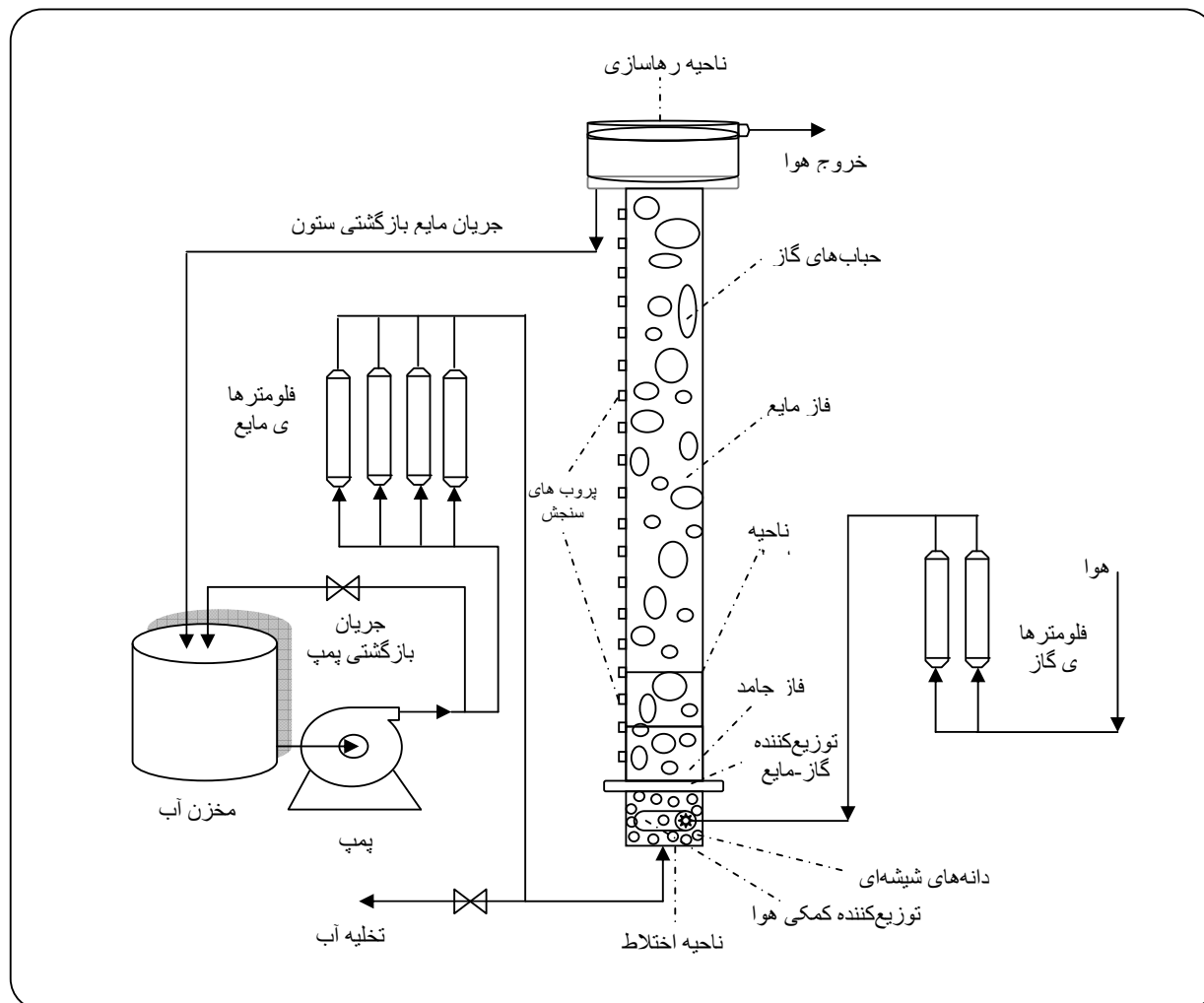
آزمایش‌های تجربی، در یک بستر سیال آزمایشگاهی، که در آزمایشگاه تحقیقاتی سامانه‌های چندفازی دانشکده‌ی مهندسی شیمی دانشگاه تهران طراحی و ساخته شد [۳۸] انجام شد. نمای کلی بستر به همراه مدار هوای فشرده و آب در شکل ۲ [۳۸] ارائه شده است. به‌منظور مقاومت در برابر تنش‌های وارد بر جداره و استحکام در برابر شکسته‌شدن، این بستر از جنس پلکسی‌گلس ساخته شده و دارای قطر داخلی ۰٫۰۹ m، قطر خارجی ۰٫۱ m و ارتفاع ۲ متر می‌باشد. بستر شامل سه قسمت می‌باشد: ناحیه اختلاط، ناحیه اصلی و ناحیه جداسازی (رهاسازی) فازها.

هوای فشرده عاری از روغن، به‌کمک یک توزیع‌کننده کمکی استوانه‌ای شکل متخلخل از جنس سرامیک به قطر ۰٫۰۳ و ارتفاع ۰٫۰۸۵ متر، که دارای سوراخ‌های ۰٫۰۰۱ متری است، وارد ناحیه اختلاط می‌شود. آب، به عنوان فاز پیوسته، از مخزن ذخیره به‌کمک یک پمپ صنعتی، از روش مدار آب، وارد ناحیه اختلاط شده و به‌خوبی با هوای ورودی مخلوط می‌شود. ناحیه اختلاط دارای ارتفاعی برابر ۰٫۱ متر بوده و به منظور فراهم‌شدن امکان اختلاط و همگنی بیشتر، از دانه‌های شیشه‌ای با قطر ۰٫۰۱ متر پر شده است. سپس، مخلوط گاز - مایع از روش یک صفحه متخلخل به عنوان توزیع‌کننده، که دارای ۱۱۰ سوراخ به قطر ۰٫۰۳ متر، با آرایشی تصادفی، که برای واردنشدن مواد جامد به درون ناحیه اختلاط و مشکلات عملیاتی حاصل از آن، با یک ورق فلزی مشبک با قطر سوراخ‌های ۰٫۰۰۳ متر پوشیده شده است، وارد بستر (ناحیه اصلی) می‌شود.

همچنین، در یک نگاه کلی‌تر، الگوی جریان حاکم بر بستر سیال سه‌فازی را می‌توان به دو دسته همگن و ناهمگن، براساس نوع حباب‌های موجود در بستر، تقسیم نمود [۱۵]. تعبیر بستر همگن، اغلب به رژیم حباب‌های منفصل یا پراکنده، و بستر ناهمگن به حباب‌های متصل یا لخته‌ای مربوط می‌شود [۱۸، ۱۷]. بیشتر تلاش‌ها مبنی بر تعیین الگوهای جریانی، پیش از دهه ۱۹۹۰ میلادی، به کمک روش‌های بصری صورت‌گرفته [۲۱-۱۹] و به‌تدریج روش‌هایی مانند تحلیل سیگنال به دست آمده از پروب سنجش اندازه حباب [۲۲] و رسانایی [۲۳ و ۲۲]، پروب یا سوند مقاومت الکتریکی، ردیابی ذره رادیواکتیو، نوسان‌های فشار در دیواره بستر [۲۴، ۲۳، ۱۵] و غیره، مورد توجه قرار گرفت. همچنین، تعیین الگوی جریانی حاکم و نقطه تغییر آن از روی مسیر حرکت مواد جامد نیز از موضوع‌های مورد مطالعه توسط پژوهشگران بوده است [۲۶ و ۲۵]. برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد چگونگی این روش‌ها می‌توان به [۲۷] مراجعه شود.

جامع‌ترین مطالعه بر روی رژیم‌های جریانی بسترهای سه‌فازی گاز - مایع - جامد (و بسترهای دوفازی گاز - مایع)، توسط ژنگ و همکاران [۲۸]، به‌کمک پروب سنجش رسانایی برای تعیین فرکانس عبور حباب‌ها، انجام شد. براساس مطالعه انجام‌گرفته توسط ژنگ و همکاران [۲۸]، ۶ الگوی جریانی کلی شامل حباب‌های پراکنده، منفصل، متصل، لخته‌ای، آشفته، پل‌مانند، و لوله‌ای، در بسترهای سیال سه‌فازی معرفی شد. از توضیح بیشتر در مورد تک‌تک این الگوها صرف‌نظر شده و به جنبه مهم دوم از هیدرودینامیک چنین سامانه‌هایی، یعنی آغاز سیالیت، پرداخته می‌شود.

بی‌شک، یکی از مهمترین مشخصه‌های هیدرودینامیکی بسترهای سیال سه‌فازی، سرعت مایع کمترین سیالیت می‌باشد. این سرعت، به‌صورت سرعت ظاهری مایع در یک سرعت مشخص و ثابت گاز، که بستر را به حالت سیالیت می‌رساند، تعریف می‌شود [۲۹]. اطلاع کافی از شرایط آغاز سیال‌سازی به منظور دستیابی به عملیاتی موفق، دارای اهمیت فراوانی می‌باشد. مشخصه‌های ظاهری بستری که در آستانه سیالیت قرار دارد، آغاز انبساط بستر، یا آغاز جابه‌جایی یکنواخت ذرات بستر با ذرات همسایه خود می‌باشد [۳۰]. در سه دهه گذشته، مطالعه‌های تجربی فراوانی برای تعیین آغاز سیالیت در بسترهای سه‌فازی صورت گرفته است. این تلاش‌ها، منجر به دو دسته رابطه نیمه‌تجربی [۳۴-۳۱] و به طور کامل تجربی [۳۷-۳۵] شد. به دلیل این‌که روابط تجربی، محدود به سامانه



شکل ۲- نمایی از بستر سیال سه‌فازی گاز - مایع - جامد [۳۸].

برای سنجش‌های مربوطه، بر روی جداره بستر، تعبیه شد. شرایط عملیاتی در دمای محیط و فشار کمی بیشتر از یک اتمسفر تنظیم شد. انجام آزمایش‌های دقیق به منظور مطالعه هیدرودینامیک بستر سیال، نیازمند تعیین درست ویژگی‌های ذرات مورد استفاده مانند دانسیته و قطر متوسط آن‌ها می‌باشد. در این پژوهش از ذرات شن (گلدارت B) استفاده شده و توزیع اندازه ذرات از روش تجزیه غربالی به دست آمد. چگالی ذرات، ۲۶۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب و قطر متوسط آن‌ها، ۶۹۰ میکرومتر اندازه گیری شد. همچنین، به منظور انجام آزمایش‌ها و ثبت سیگنال‌های ارتعاشی پوسته بستر سیال، از شتاب‌سنج مدل A/120/V ساخت شرکت Bruel & Kjaer استفاده شد [۳۹].

تمام تجهیزات با اتصال به زمین از نظر بار الکتریکی خنثی شد تا از اثر الکتریسته ساکن و اشکال در ثبت سیگنال‌ها جلوگیری به عمل آید. ناحیه بالایی، موسوم به ناحیه جدایی فازهای گاز و مایع، به گونه‌ای طراحی شد که هوا به اتمسفر فرستاده شده و آب دوباره با یک جریان بازگشتی وارد مخزن ذخیره شود. به منظور جلوگیری از سرفتن آب در این ناحیه، بخشی از هوای جدا شده به عنوان عامل تحریک‌کننده خروج آب، به مدار جریان برگشتی آب وارد شد. همچنین، یک مدار برگشتی برای خروجی پمپ به منظور تنظیم دقیق شدت جریان‌های مایع (از مقدارهای بسیار کم تا مقدارهای بسیار زیاد) در نظر گرفته شد. سوراخ‌هایی با فاصله ۰/۱ متر در سرتاسر ارتفاع ناحیه اصلی، به منظور فراهم آوردن امکان اتصال پروب‌های گوناگون

در حوزه زمان، مطالعه شدت سیگنال به کمک انحراف معیار دامنه سیگنال (گشتاور یا ممان آماری مرتبه دوم) می‌باشد [۴۰، ۴۱]. گشتاورهای مرتبه بالاتر مانند چولگی (گشتاور مرتبه سوم) و برجستگی (گشتاور مرتبه چهارم) نیز حائز اهمیت ویژه‌ای هستند. چولگی، عدم تقارن منحنی فراوانی و برجستگی، میزان کشیدگی یا پخی منحنی فراوانی را نسبت به منحنی توزیع نرمال نشان می‌دهد. انحراف معیار استاندارد برای یک سری زمانی طبق معادله (۱) حاصل می‌شود [۴۰، ۴۲]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (1)$$

که در آن  $x_i$  متغیر گسسته مورد نظر (به‌طور مثال، ولتاژ یا فشار)،  $\bar{x}$  متوسط  $x_i$  ها و  $N$  تعداد کل داده‌ها می‌باشد. میزان تقارن موجود در یک سیگنال را می‌توان از معادله (۲) محاسبه نمود [۴۰، ۴۲]:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{N\sigma^3} \quad (2)$$

این مشخصه نشان‌دهنده تقارن در توزیع احتمال یک متغیر تصادفی بوده و بدون بعد می‌باشد. منحنی فراوانی توزیع نرمال، متقارن بوده (نما، در میانگین یا میانه رخ می‌دهد)، در نتیجه دارای چولگی صفر می‌باشد. بر اساس این که چولگی منحنی فراوانی سری زمانی مثبت یا منفی باشد، منحنی فراوانی چوله به راست (نما در سمت چپ میانگین یا میانه) یا چوله به چپ (نما در سمت راست میانگین یا میانه) خواهد داشت. برجستگی، درجه اوج سیگنال یا میزان کشیدگی، گشتاور چهارم آماری بوده که بی‌بعد می‌باشد و از معادله (۳) محاسبه می‌شود [۴۲]:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{N\sigma^4} \quad (3)$$

این مشخصه نشان می‌دهد که آیا داده‌ها نسبت به یک توزیع نرمال دارای پیک بوده یا مسطح می‌باشند. داده‌هایی که برجستگی آن‌ها زیاد می‌باشد دارای یک پیک مشخص در نزدیکی متوسط داده‌ها بوده که به سرعت کاهش می‌یابد، و داده‌هایی که برجستگی کوچکی دارند، دارای پیک مسطحی در نزدیکی متوسط داده‌ها می‌باشند.

### نتیجه‌ها و بحث

در این قسمت، به نتیجه‌های به دست آمده از مطالعه نوسان‌های ارتعاش بستر پرداخته و به تحلیل سیگنال ارتعاش ایجاد شده که

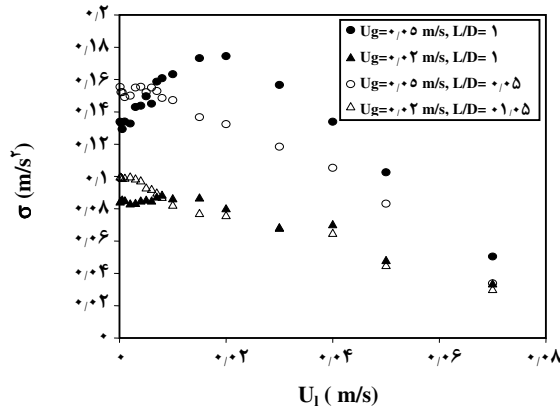
آزمایش‌ها، در بستر سیال سه‌فازی هوا - آب - شن به منظور ثبت نوسان‌های ارتعاش بستر در بازه‌ی گسترده‌ای از سرعت‌های مایع، در سرعت‌های ثابت گاز، انجام شد. بدین منظور، در ابتدا داخل راکتور به مقدار معینی از شن پر شد، که این مقدار معین، به میزان ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابر قطر بستر که معادل ارتفاع ۰/۴۵، ۰/۹ و ۰/۱۳۵ متر می‌باشد، انتخاب شد. شتاب‌سنج با مشخصات ارایه شده در [۳۹] در ارتفاع ۰/۱۳۵ متری از صفحه توزیع‌کننده مخلوط گاز - مایع، قرار داده شده و به ازای تغییرات سرعت مایع ورودی در بازه‌ی ۰/۰۷ - ۰/۰۰۱ m/s و سرعت ثابت گاز در بازه‌ی ۰/۰۵ - ۰/۰۱ m/s، نمونه‌گیری انجام شد (در هر یک از آزمایش‌ها سرعت هوا و آب، بر روی مقدار معینی ثابت نگه‌داشته شده و پس از ذخیره سیگنال ارتعاش بستر، سرعت تغییر داده شد).

برای اطمینان از تکرار آزمایش‌ها با دقت مورد نظر، آزمایش‌ها به صورت تصادفی بین ۲ تا ۴ مرتبه تکرار شد تا خطا به کمتر از ۱۰٪ برسد. به منظور نمونه‌برداری توسط شتاب‌سنج، مدت زمان نمونه‌برداری و فرکانس نمونه‌برداری می‌بایست مشخص شوند. تعیین درست این دو عامل در درستی نتیجه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. مدت زمان نمونه‌برداری (۳۰ ثانیه) به گونه‌ای انتخاب شد که در آن مدت مشخص، پدیده‌های مورد نظر به طور کامل در بستر رخ دهد [۴۰]. همچنین، فرکانس نمونه‌برداری به گونه‌ای انتخاب شد که از اختلاط فرکانسی جلوگیری شود.

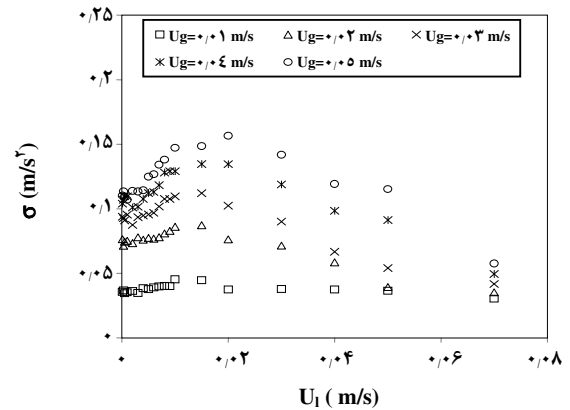
درواقع، اگر شرایط نمونه‌برداری به خوبی تعیین نشود، فرکانس‌ها همپوشانی خواهند داشت، که پدیده همپوشانی فرکانس‌ها، اختلاط فرکانسی نامیده می‌شود. در نتیجه، حداقل فرکانس نمونه‌برداری باید به گونه‌ای انتخاب شود که از اختلاط فرکانسی جلوگیری شود. کمترین فرکانس نمونه برداری به اصطلاح نرخ نایکویست (۲B) نامیده می‌شود و دوبرابر بیشترین فرکانسی است که در سیگنال وجود دارد. سرانجام، آزمایش‌های ارتعاش بستر، در فرکانس ۶۵ kHz انجام شده و سیگنال ارتعاش در تمامی شرایط عملیاتی گفته شده، ثبت شد.

### روش‌های تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی

پس از ثبت سیگنال‌های ارتعاش مطابق آنچه در قسمت قبل بیان شد، می‌بایست به تحلیل آن‌ها پرداخته شود. اصلی‌ترین روش تحلیل سری‌های زمانی در حوزه زمان، رسم نقاط سیگنال به دست آمده در مقیاس زمان می‌باشد. این روش آسان می‌تواند تصویری کیفی بر حسب زمان ارایه دهد که پرکاربردترین روش ارزیابی



شکل ۴- تغییر انحراف معیار نوسان‌های ارتعاش با تغییر سرعت گاز و مایع در ۱ و ۰/۵  $L/D$ .



شکل ۳- تغییر انحراف معیار نوسان‌های ارتعاش با تغییر سرعت گاز و مایع در ۱/۵  $L/D$ .

تغییر بیشتر در الگوی حباب‌های متصل - منفصل می‌باشد. هرچند، دیده شده در شکل، همچنان افزایش بسیار نامحسوس اولیه در اندازه حباب‌ها و سپس کاهش اندازه آن‌ها را نشان داده که حاکی از وضعیت دینامیک یا پویای حباب‌ها در طول بستر می‌باشد.

شکل ۴، تغییر انحراف معیار نوسان‌های ارتعاش را بر حسب سرعت مایع، در برخی سرعت‌های ثابت گاز برای دو مقدار دیگر از جامد موجود در بستر (۱ و ۰/۵  $L/D$ )، نشان می‌دهد. در بسترهای سیال (هم در بسترهای سیال دوفازی گاز - جامد و هم بسترهای سیال سه‌فازی گاز - مایع - جامد)، هرچه اندازه حباب‌ها کوچک‌تر و از توزیع یکسان‌تر (باریک‌تری برخوردار باشد، عبور آن‌ها از درون بستر سبب ارتعاش‌های یکنواخت‌تر و در نتیجه با انحراف معیار بسیار کوچک‌تری می‌شود.

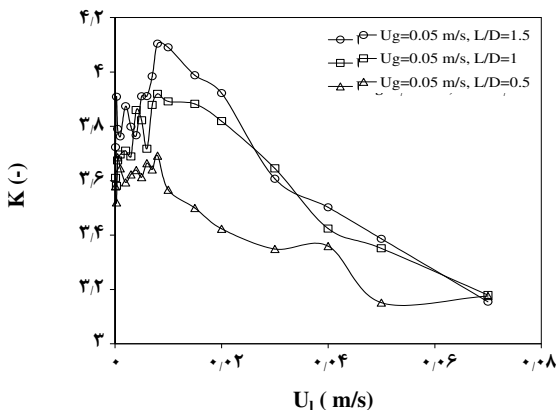
با کاهش مقدار جامد به ۱  $L/D$ ، همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، مقدار عددی انحراف معیار در سرعت‌های گاز ثابت، نسبت به حالت متناظر در ۱/۵  $L/D$ ، بیشتر شده است. این افزایش، به دلیل افزایش نسبی اندازه متوسط حباب‌های موجود در طول بستر با کاهش مقدار جامد موجود می‌باشد. در واقع، با کاهش جامد، بستر از حباب‌های همسان‌تر و یکنواخت‌تری که کمتر تحت تاثیر سرعت مایع قرار می‌گیرند، برخوردار می‌شود. پدیده کاهش اندازه نسبی حباب‌های درون بستر با افزایش میزان جامد، با آن‌چه به‌صورت تجربی نیز مشاهده شد، تطابق دارد.

بنابر آن‌چه دیده شد، ذره‌های جامد به‌صورت عامل جدایی عمل کرده که به حباب‌های خروجی از سطح خود خراشی وارد می‌کردند، این حباب‌ها با طی کردن مسافتی عمودی در بستر، شکسته شده

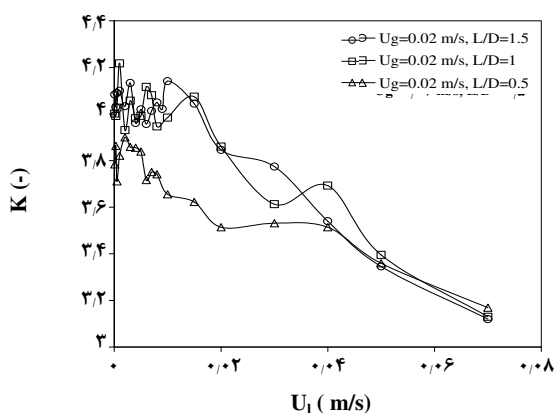
در زمره سری‌های زمانی می‌باشد، در حوزه زمان (به روش‌های آماری) پرداخته می‌شود.

شکل ۳، تغییرهای انحراف معیار نوسان‌های ارتعاش بستر را بر حسب سرعت مایع در سرعت‌های مختلف گاز، برای ۱/۵  $L/D$ ، نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، در سرعت‌های زیاد گاز، انحراف معیار نوسان‌های ارتعاش بستر در حالتی که بیشترین مقدار از جامد در بستر حضور دارد، تا سرعت مشخصی از مایع افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. از آن‌جایی که عامل اصلی افزایش انحراف معیار، افزایش اندازه حباب‌های گاز هستند، می‌توان نتیجه گرفت که اندازه متوسط حباب‌ها تا این سرعت مشخص از مایع در حال افزایش بوده و سپس کاهش می‌یابد. این پدیده به دلیل اثر دوگانه سرعت مایع بر اندازه حباب‌ها می‌باشد. در واقع در مقدارهای نه چندان زیاد از سرعت مایع، افزایش سرعت مایع سبب به هم پیوستن و در نتیجه افزایش اندازه حباب‌ها می‌شود. هرچند، در سرعت‌های زیاد مایع که تنش حاصل از آن بر حباب‌ها شدید می‌شود، افزایش سرعت مایع، موجب شکسته شدن حباب‌ها و کاهش اندازه آن‌ها می‌شود. سرعتی از مایع که در آن مقدار انحراف معیار نوسان‌های ارتعاش بستر بیشترین مقدار را دارد، نقطه تغییر رژیم غالب بستر از ناحیه لخته ای-متصل به حباب‌های منفصل - متصل می‌باشد. این سرعت مایع انتقال رژیم، با کاهش سرعت گاز، کاهش می‌یابد زیرا به تنش کمتری برای شکسته شدن حباب‌های بزرگ و کوچک‌تر شدن اندازه نسبی آن‌ها نیاز می‌باشد.

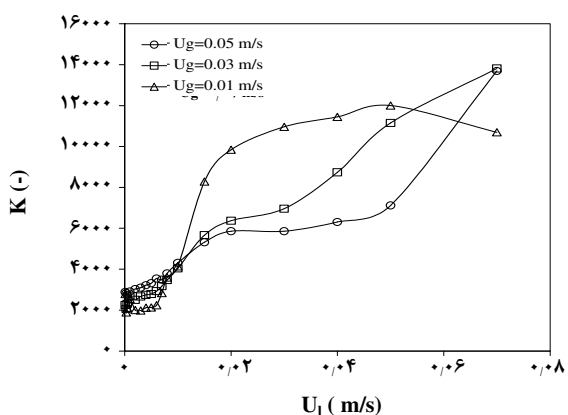
در سرعت‌های کمتر گاز، نقطه بیشینه در منحنی‌ها فروکش کرده و به تقریب غیرقابل تشخیص می‌شود. علت این امر، وجود نداشتن



شکل ۵- تغییر برجستگی نوسان‌های ارتعاش بستر با تغییر سرعت مایع در  $L/D$  های متفاوت، در سرعت گاز  $0.05 \text{ m/s}$ .



شکل ۶- تغییر برجستگی نوسان‌های ارتعاش بستر با تغییر سرعت مایع در  $L/D$  های متفاوت، در سرعت گاز  $0.02 \text{ m/s}$ .



شکل ۷- تغییر میانگین فرکانس دوره نوسان‌های ارتعاش بستر با تغییر سرعت مایع در  $L/D = 1.5$  و سرعت متفاوت گاز.

و بسته به سرعت گاز ورودی، تعداد به نسبت زیادی حباب‌های کوچک در ناحیه‌های دورتر از سطح آزاد جامد ایجاد می‌کردند.

نکته قابل توجه دیگر، شیب ناحیه صعودی انحراف معیار نوسان‌های ارتعاش بستر می‌باشد که در  $L/D$  های بیشتر، بیشتر است. روند این شیب در واقع نشان می‌دهد که هر چه میزان جامد موجود در بستر، بیشتر باشد، به دلیل افزایش گرانروی مخلوط مایع - جامد بستر، اثر سرعت مایع در برای اتصال حباب‌ها به یکدیگر، در مقادیر نه چندان زیاد سرعت مایع، بیشتر می‌شود. با وجود آن که اندازه ابتدایی حباب‌ها در بستر، در حالتی که مقدار جامد کمتری وجود دارد، بیشتر است، افزایش اندازه ناشی از محیط گرانروتر در مقادیر زیادتر جامد، حتی می‌تواند منجر به درشت‌تر شدن اندازه حباب‌ها در بازه‌ی مشخصی از شرایط عملیاتی، نسبت به حالتی که میزان جامد موجود در بستر کمتر است، نیز بشود. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، در  $L/D = 0.5$ ، شیب ناحیه صعودی، به نزدیکی صفر رسیده است. بنابراین می‌توان گفت که اثر دوگانه مایع بر الگوی حباب‌های حاکم بر کل بستر، در مقادیرهای بیشتر جامد، آشکارتر می‌باشد.

شکل‌های ۵ و ۶ تغییر برجستگی نوسان‌های ارتعاش بستر را با تغییر سرعت مایع در  $L/D$  های متفاوت، در دو سرعت گاز انتخابی نشان می‌دهند. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، تمامی نمودارها دارای روند مشخص و مطابق روند انحراف معیار هستند. بدین معنا که مثلاً در  $L/D = 1.5$ ، در سرعت زیاد گاز ( $0.05 \text{ m/s}$ ) ابتدا افزایش کرده و سپس کاهش می‌یابد. البته سرعتی که کاهش برجستگی آغاز می‌شود، با آن‌چه انحراف معیار به‌عنوان نقطه تغییر الگو معرفی می‌نماید، متفاوت می‌باشد. ناحیه تغییر شیب برجستگی، بیشتر نزدیک به شرایط کمترین سیالیت می‌باشد تا تغییر الگوی حباب‌ها. این امر به این دلیل است که کمیت آماری برجستگی، به ساختارهای ریز توجه بیشتری دارد.

تغییرات میانگین فرکانس دوره (تعداد دفعات قطع مقدار میانگین دامنه‌ها در واحد زمان دوره نمونه‌گیری)، به عنوان یک کمیت جدید در تحلیل نوسان‌های ارتعاش، به‌منظور امکان‌سنجی توانایی آن در تعیین مشخصه‌های هیدرودینامیکی بستر، محاسبه شد.

شکل ۷ تغییرات میانگین فرکانس دوره در ۳ سرعت متفاوت گاز و  $L/D = 1.5$ ، با تغییر سرعت مایع را نشان می‌دهد. آغاز اولین صعود واضح، در بازه‌ی کمترین سیالیت اتفاق افتاده و ناحیه‌ای که میانگین فرکانس دوره، به نسبت ثابت می‌شود، تغییر رژیم غالب را نشان می‌دهد. هرچند، دقت تعیین سرعت کمترین سیالیت

جدول ۱- سرعت مایع حداقل سیالیت به دست آمده از آزمایش‌ها در مقایسه با [۳۵].

$U_g$ (m/s)	$U_{lmf,Exp}$ (m/s)	$U_{lmf}$ (m/s) [۳۵]	بیشترین خطا
۰/۰۵	۰/۰۰۴ - ۰/۰۰۵	۰/۰۰۴۶۳	۱۶٪
۰/۰۳	۰/۰۰۵ - ۰/۰۰۶	۰/۰۰۵۱۵	۱۷٪
۰/۰۱	۰/۰۰۶ - ۰/۰۰۷	۰/۰۰۶۵۸	۱۰٪

در سرعت‌های کمتر گاز، به دلیل ایجاد تغییر بیشتر، به نسبت بیشتر می‌باشد. همچنین، همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است، با کاهش سرعت گاز، ناحیه ای که میانگین فرکانس دوره در آن ثابت می‌شود، کوچک‌تر شده و در سرعت گاز ۰/۰۱ متر بر ثانیه، در عمل قابل تعیین نمی‌باشد. علت این امر، تغییر نیافتن آشکار رژیم در سرعت‌های کم گاز که الگوی حباب‌های منفصل حاکم است، می‌باشد. گستره‌ی سرعت کمترین سیالیت به دست آمده از این روش در مقایسه با رابطه برگرفته از شبکه‌های عصبی مصنوعی [۳۵]، به‌عنوان جامع‌ترین رابطه موجود برای تخمین سرعت کمترین سیالیت، در جدول ۱، آورده شده است.

### نتیجه‌گیری

بسترهای سیال سه‌فازی، به عنوان مهم‌ترین و همچنین پیچیده‌ترین محیط تماس سه‌فاز گاز، مایع و جامد در راکتورهای صنعتی به حساب می‌آیند. به منظور شناخت هر چه بیشتر هیدرودینامیک این راکتورها برای تحقق اهدافی همچون طراحی، تنظیم شرایط عملیاتی، بهبود عملکرد و افزایش مقیاس، پایش

نوسان‌های ارتعاش بستر، در بازه‌ی بسیار گسترده‌ای از شرایط عملیاتی، در بستری به قطر ۰/۰۹ متر و ارتفاع ۲ متر، دارای ذرات شن، انجام شد. دید کلی از هیدرودینامیک بستر با استفاده از نوسان‌های ارتعاش بستر به دست آمد که توانایی بسیار زیاد به‌کارگیری این روش در فرآیندهایی که در شرایط عملیاتی بسیار شدید از دما و/یا فشار انجام می‌پذیرند را نشان می‌دهد. بیشینه انحراف معیار نوسان‌های ارتعاش بستر (مستقل از بازه‌ی عملیاتی)، معیاری از تغییر الگوی کلی بستر بود و اثر دوگانه سرعت مایع بر الگوی جریانی غالب بستر تأیید شد. تغییر شیب برجستگی نوسان‌های ارتعاش در نزدیکی شرایط کمترین سیالیت اتفاق افتاد. اثر دوگانه حضور جامد بر هیدرودینامیک کلی بستر مورد پژوهش قرار گرفت. در سرعت‌های مایع کم، افزایش جامد سبب افزایش اندازه حباب‌ها با افزایش سرعت مایع شده، هرچند اندازه متوسط اولیه حباب‌های کل بستر، در حضور جامد کمتر، بیشتر بود. فراتر از این، مواد جامد، در سرعت‌های مایع زیاد، که به‌صورت منفرد یا خوشه‌های مستقل درمی‌آیند، به عنوان عاملی در برای تفکیک حباب‌ها، سبب افزایش تأثیر مایع بر انفصال حباب‌ها از یکدیگر می‌شوند. سرانجام، پایش ارتعاشات بستر به‌عنوان روشی مؤثر و بدون مزاحمت برای اتفاقات درونی بستر، برای سنجش مشخصه‌های هیدرودینامیکی بسترهای سیال سه‌فازی، به ویژه راکتورهای صنعتی با ماهیتی نزدیک به بسترهای گاز - مایع - جامد، پیشنهاد می‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۹ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۹/۲۸

### مراجع

- [1] Fan L.S., "Gas-liquid-solid Fluidization Engineering," In Butterworth Series in Chemical Engineering," Butterworth Publishers, Boston, MA (1989)
- [2] Charinpanitkul T., Limsuwan P., Chalotorn C., Sano N., Yamamoto T., Tongpram P., Wongsarivej P., Soottitantawat A., W. Tanthapanichakoon, Synergetic Removal of Aqueous Phenol by Ozone and Activated Carbon Within Three-Phase Fluidized-Bed Reactor, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **16**, p. 91 (2010)
- [3] Nam W., Woo K., Han G.Y., Photooxidation of Anionic Surfactant (Sodium Lauryl Sulfate) in a Three-Phase Fluidized Bed Reactor Using  $TiO_2/SiO_2$  Photocatalyst, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **15**, p. 348 (2009)



- [4] Hossain S.M., Anantharaman N., Das M., Anaerobic Biogas Generation from Sugar Industry Wastewaters in Three-Phase Fluidized Bed Bioreactor, *Indian Journal of Chemical Technology.*, **16**, p. 58 (2009).
- [5] McKnight C.A., Hackman L.P., Grace J.R., Macchi A., Kiel D., Tyler J., Fluid Dynamic Studies in Support of an Industrial Three-Phase Fluidized Bed Hydroprocessor, *The Canadian Journal of Chemical Engineering.*, **81**, p. 338 (2003).
- [6] Lin C.N., Wua S.Y., Chang J.S., Chang J.S., Biohydrogen Production in a Three-Phase Fluidized Bed Bioreactor Using Sewage Sludge Immobilized by Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer, *Bioresource Technology.*, **100**, p. 3298 (2009).
- [7] Raju H.P., Hossain S.M., Anantharaman N., Das M., Biodesulphurization of Natural gas in a Three-phase Fluidized Bed Bioreactor Using Thiobacillus Dentrificans, *Journal of scientific and industrial research.*, **68**, p. 406 (2009)
- [8] Sarrouh B.F., da Silva S.S., Evaluation of the Performance of a Three-Phase Fluidized Bed Reactor with Immobilized Yeast Cells for the Biotechnological Production of Xylitol, *International Journal. Chemical Reactor Engineering*, **6**, Article A75 (2008).
- [9] Ensuncho L., Cuenca M.A., Legge R.L., Removal of Aqueous Phenol Using Immobilized Enzymes in a Bench Scale and Pilot Scale Three-Phase Fluidized Bed Reactor, *Bioprocess and Biosystems Engineering*, **27**, p. 185 (2005).
- [10] Lohi A., Cuenca M.A., Anania G., Upreti S.R., Wan L., Biodegradation of Diesel Fuel-Contaminated Wastewater Using a Three-Phase Fluidized Bed Reactor, *Journal of Hazardous Materials.*, **154**, p. 105 (2008).
- [11] Song P.S., Choi W.K., Jung C.H., Oh W.Z., Kang S.H., Kang Y.J., Characteristics of the Copper Recovery from Wastewater in Two- and Three-Phase Fluidized Bed Reactors, *Industrial and Engineering Chemistry*, **12**, p. 98 (2006).
- [12] Souza R.R., Bresolin I.T.L., Bioni T.L., Gimenes M.L., Dias-Filho B.P., The Performance of a Three-Phase Fluidized Bed Reactor in Treatment of Wastewater with High Organic Load, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **21**, p. 219 (2004).
- [13] Epstein N., Three-Phase Fluidization: Some Knowledge Gaps, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **59**, p. 649 (1981).
- [14] Muroyama K., Fan L.S., Fundamentals of Gas-Liquid-Solid Fluidization, *AIChE J.*, **31**, p. 1 (1985).
- [15] Fraguio M.S., Cassanello M.C., Larachi F., Limtrakul S., Dudukovic M., Classifying Flow Regimes in Three-Phase Fluidized Beds from CARPT Experiments, *Chemical Engineering Science*, **62**, p. 7523 (2007).
- [16] Mena P.C., Ruzicka M.C., Rocha F.A., Teixeira J.A., Drahos J., Effect of Solids on Homogeneous-Heterogeneous Flow Regime Transition in Bubble Columns, *Chemical Engineering Science*, **60**, p. 6013 (2005).

- [17] Fan, L.S., Yang G.Q., Lee D.J., Tsuchiya K., Luo X., Some Aspects of High-Pressure Phenomena of Bubbles in Liquids and Liquid-Solid Suspensions, *Chemical Engineering Science*, **54**, p. 4681 (1999).
- [18] Ermakova A., Ziganskin G.K., Slin'ko M.G., Hydrodynamics of a Gas-Liquid Reactor with a Fluidized Bed of Solid Matter, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **4**, p. 84 (1970).
- [19] Nacef S., Wild G., Laurent A., Scale Effects in Gas Liquid-Solid Fluidization, *International Journal of Chemical Engineering*, **32**, p. 51 (1992).
- [20] Mukherjee R.N., Bhattacharya P., Taraphdar D.K., "Fluidization and Its Applications," ed. by Angelino, H., Couderc, J. P., Gibert, H., and C. Laguerie, 372, Cepadues-Editions, Toulouse (1974).
- [21] Lee S.L.P., Soria A., de Lasa H.I., Evolution of Bubble Length Distributions in Three Phase Fluidized Beds, *AIChE Journal*, **36**, p. 1763 (1990).
- [22] Soda A., de Lasa H., Kinematic Waves and Flow Patterns in Bubble Columns and Three-Phase Fluidized Beds, *Chemical Engineering Science*, **47**, p. 3403 (1992).
- [23] Vince M.A., Lahey R.T.Jr., On the Development of an Objective Flow Regime Indicator, *International Journal of Multiphase Flow*, **8**, p. 93 (1982).
- [24] Matsui G., Automatic Identification of Flow Regimes in Vertical Two-phase Flow Using Differential Pressure Fluctuations, *Nuclear Engineering and Design*, **95**, p. 221 (1986).
- [25] Luewisthichat W., Tsutsumi A., Yoshida K., Fractal Analysis of Particle Trajectories in Three-Phase Systems, *Transactions of IChemE*, **73**, p. 222 (1995).
- [26] Cassanello M., Larachi F., Marie M.N., Guy C., Chaouki J., Experimental Characterization of the Solid Phase Chaotic Dynamics in Three-Phase Fluidization, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **34**, p. 2971 (1995).
- [27] Chaouki J., Larachi F., Dudukovic M.P., "Non-invasive Monitoring of Multiphase Flows, Elsevier, Amsterdam, (1997).
- [28] Zhang J.-P., Grace J.R., Epstein N., Lim K.S., Flow Regime Identification in Gas-Liquid Flow and Three-Phase Fluidized Beds, *Chemical Engineering Science*, **52**, p. 3979 (1997)
- [29] Jena H.M., Sahoo B.K., Roy G.K., Meikap B.C., Characterization of Hydrodynamic Properties of a Gas-Liquid-Solid Three-Phase Fluidized Bed with Regular Shape Spherical Glass Bead Particles, *Chemical Engineering Journal*, **145**, p. 50 (2008).
- [30] Briens L.A., Briens C.L., Hay J., Margaritis A., Minimum Liquid Fluidization Velocity in Gas-Liquid-Solid Fluidized Beds, *AIChE Journal*, **43**, p. 1180 (1997).
- [31] Ermakova A., Ziganskin G.K., Slin'ko M.G., Hydrodynamics of a Gas-liquid Reactor with a Fluidized Bed of Solid Matter, *Theoretical Foundation of Chemical Engineering*, **4**, p. 84 (1970).

- [32] Bloxom V.R., Costa J.M., Herranz J., MacWilliam G L., Roth S.R., "Determination and Correlation of Hydrodynamic Variables in a Three-Phase Fluidized Bed," MIT Report N219; Oak Ridge National Laboratory: Oak Ridge, TN, (1975).
- [33] Begovitch J.M., Watson J.S., "Hydrodynamic Characteristics of Three-Phase Fluidized Beds." In Fluidization; Davidson J.F., Kearins D.L., Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, pp. 190-195 (1978).
- [34] Costa N., De Lucas A., Garcia P., Fluid Dynamics of Gas-Liquid-Solid Fluidized Beds, *Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development*, **25**, p. 849 (1986).
- [35] Larachi F., Iliuta I., Rival O., Grandjean B.P.A., Prediction of Minimum Fluidization Velocity in Three-Phase Fluidized-Bed Reactors, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **39**, p. 563 (2000).
- [36] Zhang J., Epstein N., Grace J.R., Zhu J., Minimum Fluidization Velocity of Gas-Liquid Fluidized Beds, *Transactions of IChemE*, **73**, p. 347 (1995).
- [37] Zhang J., Epstein N., Grace J.R., Minimum Fluidization Velocities for Gas-Liquid-Solid Three-Phase Systems, *Powder Technology*, **100**, p. 113 (1998).
- [38] Sheikhi A., "Experimental Study and Modeling of Hydrodynamics of Three-Phase Fluidized Beds," M.Sc. Thesis, University of Tehran, Iran (2010).
- [39] <http://www.bksv.com/Library/Primers.aspx/Accelerometers> and Conditioning, (Accessed on: Feb (2010).
- [40] Abbasi M., "Determination of Fluidization Quality in Fluidized Beds Through the Vibration Analysis", M.Sc. Thesis, University of Tehran, Iran (2008).
- [41] Zarghami R., "Conditional Monitoring of Fluidization Quality in Fluidized Beds," Ph.D. Thesis, University of Tehran, Iran (2009).
- [42] Dash P., Behera H., Lee I., Time Sequence Data Mining Using Time-Frequency Analysis and Soft Computing Techniques, *Applied Soft Computing*, **8**, p. 202 (2008).