مطالعه تجربی اختلاط ذرات جامد در یک بستر سیال با استفاده از روش پردازش تصاویر

حجت قاسمی[۱] **حسن امینی**[۲] **و مرتضی خیاط**[۳]

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

(تاریخ دریافت:۹۳/۴/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۲۸)

چکیده

در این مقاله، اثرات اندازه و چگالی در اختلاط ذرات جامد در یک بستر سیال، به‌صورت تجربی بررسی شده‌اند. برای این منظور، از یک بستر متشکل از ذرات شن سیلیکا استفاده شده است. روش به‌کار برده شده در این آزمایش‌ها، اختلاط ذرات در بسترهای دولایه می‌باشد. لایه زیرین این بسترها را ذرات شن سیلیکا و لایه فوقانی از ردیاب‌ها که ذراتی با شکل، اندازه، چگالی و با رنگی متفاوت نسبت به ذرات شن بودند، استفاده شده است. اتفاقات سطح بستر توسط یک دوربین از بالای بستر ثبت شده و با ردگیری ذرات ردیاب و با استفاده از روش پردازش تصاویر، اختلاط ذرات با معرفی شاخص غلظت ذرات ردیاب در سطح بستر و در طول زمان مطالعه شده است. در این تحقیق، ابتدا مکانیزم اختلاط ذرات در یک بستر دو لایه بررسی و سپس تأثیر مشخصات ذرات مخلوط شونده بر اختلاط آن‌ها مطالعه شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهند که برای همه اندازه‌های ذرات شن، افزایش چگالی ذرات ردیاب و نزدیکی آن به چگالی ذرات شن بستر باعث می‌شود تا ذرات ردیاب بیشتر در بستر نفوذ کنند. همچنین، مشخص شد که اندازه ذرات شن بستر تأثیر زیادی در کیفیت اختلاط دارند، به‌طوری که می‌توان برای اختلاط ذرات ردیاب با چگالی‌های مختلف، اندازه مناسبی از ذرات بستر را انتخاب کرد.

واژه های کلیدی: بستر سیال، اختلاط، پردازش تصاویر، نسبت اختلاط، غلظت ذرات ردیاب

An Experimental Study of Solid Particles Mixing in a Fluidized Bed, Using Image Processing Technique

H. Ghassemi

Mechanical Engineering Department
Iran University of Science and Technology

H. Amini and M. Khayyat

Mechanical and Aerospace Engineering Department
Science and Research Branch
Islamic Azad University of Tehran

(Received: 5 July, 2014; Accepted: 18 January, 2015)

ABSTRACT

In this paper, the effects of size and density on mixing of solid particles in a fluidized bed have been studied experimentally. For this purpose, a bed consisting of silica sands has been used. The mixing of particles in a two-layer bed has been studied. The lower layer consists of silica sands, while in the upper layer tracer sand particles with different shape, size, density, and color have been used. All events occurring on the bed surface are recorded by a camera above the bed and tracer particles are being tracked, using image processing technique. Particles being mixed in the bed are studied by studying the variation of the tracer particles concentration index with time. First, the mechanism of particle mixing in a two-layer fluidized bed was investigated. Then, the effect of the characteristics of mixing particles on mixing process was studied. The results show that increasing the tracer particle density (approaching the bed sands density), enhances the penetration of tracer in the bed and reduces the tracer presence on the bed surface. Also, the size of sand particles has significant effect on mixing quality; it makes it possible to find a proper sand size to mix the particles with different densities.

Keywords: Fluidized Bed, Mixing, Image Processing, Mixing Ratio, Tracer Concentration Ratio

۱- استادیار: h_ghassemi@iust.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد: h_aminy@yahoo.com

۳- استادیار (نویسنده پاسخگو): mkhayat@srbiau.ac.ir

۱- مقدمه

استفاده از فرایند سیال‌سازی در چند دهه اخیر، به شکل گسترده‌ای در صنایع مختلف راه پیدا کرده است. در برخی از کاربردها، بستر سیال‌شده، محیطی است تا ذرات مختلف در مجاورت سیال وارد فرایند خاصی شوند. این ذرات بایستی به خوبی در میان بستر پراکنده شوند. گازسازی مواد جامد در بسترهای سیال شده، نمونه‌ای از این کاربردها می‌باشد. در فرایند گازسازی ذرات جامدی مانند زغال سنگ، زیست توده‌ها، و زباله‌ها در فرایندی با سیال مناسبی مانند هوا، اکسیژن، یا بخار آب به گاز قابل احتراق تبدیل می‌شوند. در این فرایند اختلاط ذرات جامد با ذرات بستر تأثیر زیادی در طراحی راکتور و راندمان آن دارد. مسئله اختلاط در بسترسیال به پراکندگی مناسب ذرات جامد درون بستر باز می‌گردد. میزان و کیفیت اختلاط ذرات در یک بستر سیال تابعی از هیدرودینامیک بستر و همچنین مشخصات ذرات مخلوط شونده است.

مطالعات تجربی زیادی برای پی بردن به مکانیزم اختلاط و تأثیر شرایط مختلف بر آن، با به کارگیری روش‌های مختلف، انجام شده است. این روش‌ها در دو دسته کلی طبقه‌بندی می‌شوند. برخی از محققین فرایند اختلاط را در بسترهایی با دو لایه مجزا از ذرات بستر و ذرات ردیاب مطالعه نمودند. ذرات ردیاب در واقع، بدیل ذراتی هستند که قرار است در بستر سیال وارد فرایند خاصی شوند. این محققین با ردگیری ذرات ردیاب در یک بازه زمانی معین، تغییرات توزیع ذرات ردیاب را در زمان‌های مختلف و مکان-های خاصی از بستر بررسی نمودند [۲و۱]. در این روش هیچ ذره-ای به بستر وارد و یا از آن خارج نمی‌شود. روش دیگری که محققان برای بررسی کیفیت اختلاط از آن استفاده نمودند، تزریق ذرات ردیاب به داخل بستر می‌باشد. در این روش تغییرات در میزان پخش مواد و به‌عبارتی میزان اختلاط ذرات با استفاده از راه-های مختلف ثبت می‌شود [۵-۳].

شن و ژائو [۵] اختلاط ذرات زیست توده را در یک گازساز بستر سیال شده مطالعه کردند. آنها از ذرات چوبی قرمز رنگ که نقش زیست توده را ایفا می‌کرد به عنوان ذرات ردیاب استفاده نمودند. کلیه مراحل فرایند اختلاط توسط دوربین ثبت شده و برای بررسی اختلاط ذرات از روش پردازش تصاویر دیجیتال استفاده نمودند. استین و همکارانش [۶] حرکت ذرات را در یک بستر حبابی سه بعدی مشاهده کردند. آن‌ها برای مشاهده مکانیزم حرکت ذرات ردیاب از روش تابش پوزیترون (PEPT) استفاده نمودند. گلیکسمن و همکارانش [۷] با استفاده از روش ردیابی حرارتی، مشخصات اختلاط را در یک بستر سیال حبابی احتراقی در دما و فشار اتمسفر مطالعه کردند. آنها برای ردیابی مسیر ذرات سرد از یک مجموعه ترمومتر استفاده نمودند که در داخل بستر با آرایشی مناسب نصب شده بود. پالارس و جانسون [۸] ذرات ردیاب درخشان را برای مطالعه اختلاط ذرات سوخت در یک بستر سیال دو بعدی به‌کار بردند. در این روش حرکت ذره روشن به‌صورت تصاویر دیجیتال ویدئویی ضبط شد و با آنالیز این تصاویر مسیر حرکت ذره بررسی شد. ذرات ردیاب کپسول‌هایی از جنس پلاستیک با درخشندگی زیاد بوند. این ذرات ردیاب دارای اندازه بزرگ و چگالی کم بوده و به نوعی شبیه‌سازی برای ذره سوخت مورد استفاده در بسترهای سیال بویلر بودند. کاروینن [۹] اختلاط ذرات پلاستیک با مشخصات فیزیکی یکسان و رنگ‌های مختلف را در یک بستر سه‌بعدی بررسی نمود. در هر آزمایش از نقاط مورد نظر در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری شده و غلظت ذرات سفید و سیاه هر نمونه اندازه‌گیری شد. سلیمان و همکارانش [۱۰] اختلاط ذرات را در یک بستر استوانه‌ای و با استفاده از ذرات شن و ذرات شکر به‌عنوان ردیاب مطالعه نمودند. آن‌ها در هر آزمایش از مواضع مختلف شعاعی و محوری نمونه‌برداری و بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که میزان اختلاط به اندازه ذرات ردیاب بستگی دارد. مجموعه این مطالعات نشان می‌دهد که اختلاط بستر با ذرات ردیاب خاص و دنبال کردن این ذرات به شیوه‌های مختلف، روش مؤثر و قابل اعتمادی است. به‌کارگیری تکنیک پردازش تصاویر، به‌ویژه برای اختلاط ذراتی که از نظر نوری تمایز قابل توجهی دارند، مورد توجه محققان بوده است.

در بخش دیگری از تحقیقات مربوط به اختلاط، تأثیر پارامترهای مختلف بر روند و کیفیت اختلاط مطالعه می‌شود. این تحقیقات عمدتاً بر اثر تغییرات هیدرودینامیکی و مشخصات ذرات بستر بر اختلاط تمرکز دارند. برگس و همکارانش [۲] اختلاط ذرات را در بستر دو لایه بررسی کردند. آنها دریافتند که برای بسترهایی با دو لایه از ذرات با چگالی برابر، اختلاط زمانی آغاز می‌شود که مقدار سرعت هوای ورودی، از حداقل سرعت سیالیت ذرات سبک بستر تجاوز کند. در صورتی که چگالی ذرات یکسان نباشد، تا زمانی که سرعت هوای ورودی از حداقل سرعت سیالیت ذرات سنگین‌تر بیشتر نشود، اختلاطی رخ نمی‌دهد. ژانگ و همکاران [۱۱] اختلاط ساقه‌های خردشده کتان که ذراتی استوانه‌ای شکل بودند را با ذرات شن در یک بستر سیال بررسی

کردند. آنها این کار را برای نسبت‌های مختلف ذرات زیست‌توده به ذرات شن و در سرعت‌های متفاوت گاز انجام دادند. نتیجه این بررسی تعیین یک محدوده برای سرعت گاز، برای دستیابی به یک محدوده مناسب اختلاط بود. سان و همکاران [۱۲] اختلاط ساقه‌های بزرگ در بستر حاوی ذرات آلومینا را مطالعه نمودند. آنها تأثیر طول ذرات کتان، قطر ذرات آلومینا و سرعت گاز ورودی را روی مشخصات بستر بررسی کردند. نتیجه این تحقیق به‌دست آوردن یک بازه طولی برای اندازه ذرات کتان و یک محدوده برای قطر ذرات آلومینا برای رسیدن به یک اختلاط مناسب بود. در تحقیقی دیگر، ژیائودونگ و همکاران [۱۳] اختلاط زباله‌های جامد شهری را بررسی کردند. آنها برای این کار به جای استفاده از زباله، از یک سری مواد شبیه‌سازی شده نظیر چوب، پلاستیک و شمع با اندازه‌های مشخص استفاده نموده و اختلاط آنها را در بستری از ذرات شن سیلیکا آزمایش کردند. این تحقیق نشان داد که از میان همه عوامل مؤثر بر اختلاط، چگالی ذرات تأثیر مهم‌تری را بر نحوه اختلاط ذرات بستر دارد. زوکی و همکارانش [۱۴] نیز اختلاط در ذرات بستر را با استفاده از روش پردازش تصاویر بررسی نمودند. آنها این روش را برای شرایط مختلف اختلاط توسعه دادند.

روش به‌کار گرفته شده در این تحقیق برای بررسی فرایند اختلاط ذرات در یک بستر سیال، استفاده از بسترهای دولایه می‌باشد. برای آنالیز اختلاط ذرات بستر نیز روش پردازش تصاویر دیجیتال انتخاب شد. یکی از مزیت‌های این روش، در دسترس بودن رفتار اختلاط در کلیه زمان‌های آزمایش است. مزیت دیگر آن امکان بررسی فضای بیشتر از بستر به نسبت روش‌های مبتنی بر نمونه‌برداری است. بیشتر مطالعات انجام شده با استفاده از روش پردازش تصاویر مربوط به اختلاط در بسترهای دوبعدی است و کم‌تر به بسترهای سه‌بعدی پرداخته شده است.

تنوع بسترهای مطالعه شده به ابعاد جریان حاکم بر بستر مربوط می‌شود. بسترهای دوبعدی برای صحه‌گذاری و تنظیم مدل‌های ریاضی استفاده می‌شوند. در این بسترها، حباب‌های ایجاد شده ماهیت دوبعدی دارند. در عوض بسترهای سه‌بعدی به آنچه که در عمل استفاده می‌شود بسیار نزدیک است. با توجه به انحراف نسبی در رفتار هیدرودینامیکی بسترهای دوبعدی نسبت به رفتار واقعی، از یک بستر سه‌بعدی استفاده شده تا بتوان رفتار یک بستر را در مقیاس واقعی با دقت بیشتری پیش‌بینی نمود.

از طرفی در هیچ‌یک از این مطالعات، به رفتار سطح بستر پرداخته نشده و بررسی اختلاط ذرات از دیواره بستر انجام‌شده است. بنابراین تصاویر ثبت‌شده از سطح فوقانی بستر پردازش‌شده و با مشاهده اتفاقات رخ داده در این سطح، اختلاط ذرات بستر بررسی می‌شود. در نهایت با به‌کارگیری این روش، مکانیزم اختلاط ذرات در یک بستر دولایه مشخص می‌شود. از طرف دیگر مشخصات ذرات مخلوط شونده نقشی اساسی در ایجاد یک اختلاط بهینه دارند، بنابراین بررسی تأثیر این مشخصات بر فرایند اختلاط از اهمیت فراوانی برخوردار است. از این رو در این مطالعه اثر چگالی ذرات مخلوط شونده (ذرات ردیاب) و اندازه ذرات بستر از طریق معرفی شاخص غلظت ذرات ردیاب مورد توجه قرار گرفته است.

۲- تجهیزات آزمایش

برای بررسی تجربی فرایند اختلاط، یک بستر سیال به‌عنوان دستگاه آزمایش طراحی و ساخته شد. مشخصات کلی بستر، شامل هندسه بستر، مشخصات مواد بستر با توجه به رژیم جریانی مورد نظر، انتخاب شدند.

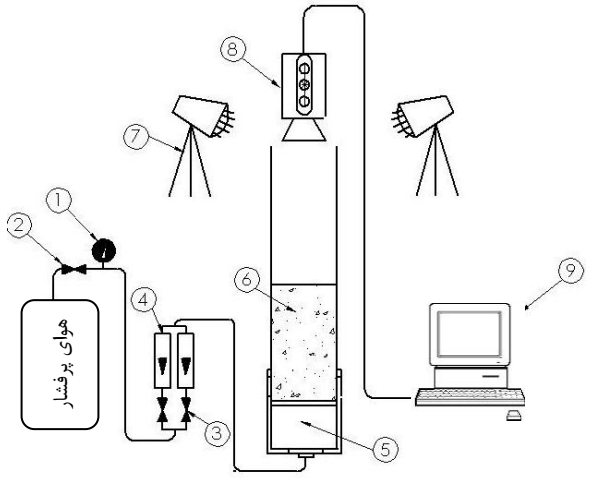
۲-۱- دستگاه آزمایش

شکل **۱** طرحواره‌ای از دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. این بستر استوانه‌ای به قطر ۱۴ سانتی‌متر بوده و ارتفاع بستر می‌تواند از ۵ تا ۳۵ سانتی‌متر متغیر باشد. با راه‌اندازی دستگاه، هوای پرفشار از مخزن از طریق خطوط انتقال و ادوات سنجش وارد بستر می‌شود. برای تعیین سرعت هوای ورودی به بستر از یک دبی‌سنج روتامتری کمک گرفته می‌شود. برای اندازه‌گیری دبی جریان در یک بازه گسترده، از دو روتامتر استفاده شد که به‌صورت موازی در مسیر انتقال قرار گرفتند. جریان هوا پس از اندازه‌گیری، وارد مجموعه پخش‌کننده شده و از آنجا وارد بستر می‌شود. پخش‌کننده وظیفه هوارسانی یک‌نواخت به بستر را، بدون ایجاد نواحی مرده و سیال‌نشده، دارد. تمامی اتفاقات رخ داده در سطح بستر توسط یک دوربین ضبط ثبت می‌شود. همچنین برای بهبود کیفیت تصاویر ضبط شده از چند لامپ هالوژن برای نورپردازی سطح بستر استفاده شده است.

۲-۲- مشخصات ذرات بستر

ذرات مختلف مشخصه‌های متفاوتی مانند چگالی، اندازه، میزان کرویت، و میزان تخلخل در بستر دارند. با در نظر گرفتن این مشخصه‌ها و همچنین بستر طراحی شده، ذرات شن سیلیکا برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. اندازه این ذرات در محدوده ۲۰۰ تا

۷۰۰ میکرومتر می‌باشد. با توجه به این محدوده ابعاد و همچنین چگالی آنها، این ذرات در گروه ذرات B از طبقه‌بندی گلدارت [۱۵] واقع می‌شوند. با توجه به گستردگی بازه اندازه ذرات و برای بالا بردن دقت بررسی‌ها، اندازه ذرات به سه بازه باریک تفکیک شد. این کار با استفاده از روش تجزیه غربالی انجام شد. چگالی حجمی این ذرات با اندازه‌گیری جرم و حجم طبیعی اشغال شده توسط ذرات تعیین شد و برای اندازه‌گیری میزان تخلخل و چگالی ذره، حجم خالص ذرات به‌دست آمد. همچنین برای به‌دست آوردن میزان کرویت ذرات از روش کانی [۱۶] استفاده شد. جدول **۱** مشخصات ذرات شن غربال‌شده را نشان می‌دهد. شکل **۲** تصاویری بزرگ شده‌ای از ذرات شن سیلیکای تهیه شده از معادن فیروزکوه و قزوین را که با استفاده از روش تجزیه غربالی دانه‌بندی شده است را نشان می‌دهد.



۱- فشارسنج، ۲و۳- شیر قابل تنظیم، ۴- روتامتر، ۵- مجموعه پخش‌کننده، ۶- بستر سیال، ۷- سیستم نورپردازی، ۸- دوربین فیلم برداری، ۹- رایانه

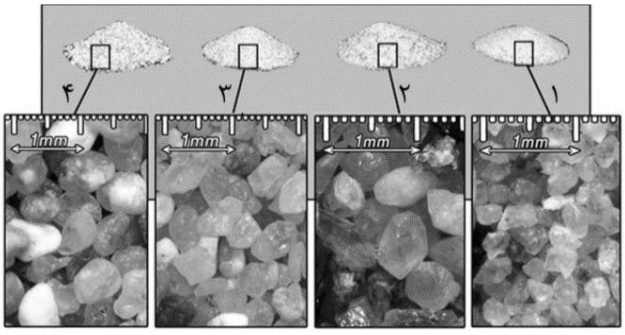
شکل (۱): طرحواره‌ای از دستگاه آزمایش.

جدول (۱): مشخصات ذرات شن استفاده شده برای آزمایش‌ها.

بازه اندازه ذرات (µm)	اندازه متوسط (µm)	چگالی ذره (kg/m^3)	چگالی حجمی (kg/m^3)	تخلخل	کرویت
۳۰۰-۲۵۰	۲۷۵	۲۶۳۰	۱۴۷۰	۰/۴۵	۰/۸۰
۵۰۰-۴۲۰	۴۶۰	۲۶۳۰	۱۴۳۰	۰/۶	۰/۷۶
۷۰۰-۶۰۰	۶۵۰	۲۶۳۰	۱۴۵۰	۰/۴۵	۰/۷۸

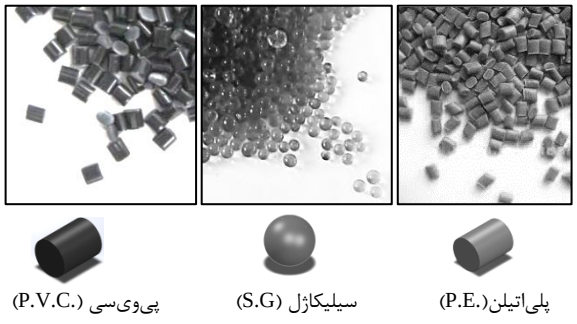
۲-۳- مشخصات ذرات ردیاب

در یک بستر سیال، اختلاط ذرات بستر با ذراتی که قرار است فرایندهایی را تجربه کنند، بسیار مهم می‌باشد. به جای استفاده از این ذرات که از تنوع و گستردگی زیادی در ابعاد، شکل، و جنس برخوردارند، می‌توان از ذرات معادل که در این جا به عنوان ذرات ردیاب معرفی شده‌اند، استفاده کرد. به همین منظور و برای مطالعه مکانیزم اختلاط و بررسی کیفیت آن، از ذراتی با شکل، اندازه و رنگی متفاوت نسبت به ذرات بستر استفاده شد. این ذرات، گرانول‌هایی رنگین در اندازه‌های نسبتاً بزرگ می‌باشند. علت استفاده از این دانه‌های رنگی، ایجاد تمایز بصری بین آن‌ها و ذرات شن بستر برای ردگیری در فرایند اختلاط در بستر بود. شکل **۳** ذرات ردیاب استفاده شده در آزمایش‌های اختلاط را به همراه شکل هندسی آن‌ها نشان می‌دهد. این سه نوع ذره دارای مشخصات فیزیکی مختلفی می‌باشند که در جدول **۲** درج شده‌اند.



۱ و ۲ از معدن فیروزکوه، ۳ و ۴ از معدن قزوین

شکل (۲): تصاویری بزرگ‌شده از ذرات شن سیلیکای دانه‌بندی شده.



شکل (۳): ذرات ردیاب استفاده‌شده در آزمایش‌ها به‌همراه شکل شماتیک آنها.

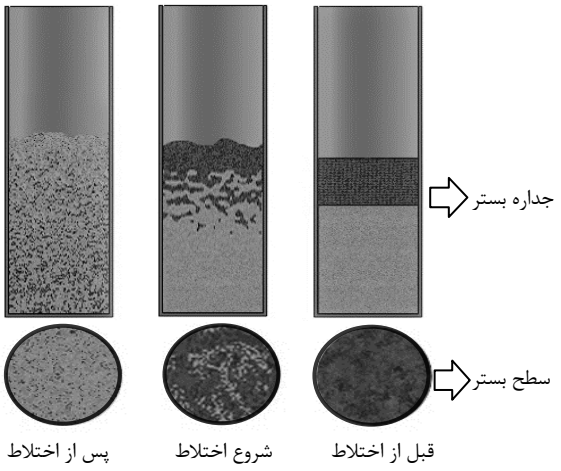
جدول (۲): مشخصات فیزیکی گرانول‌های ردیاب.

جنس ذره	شکل	رنگ	قطر متوسط (mm)	ارتفاع متوسط (mm)	چگالی (gr/cm^3)
پلی‌اتیلن PE-LLD	استوانه	سبز	۴	۶	۰/۹۱
پلی‌ونیل-کلراید PVC	استوانه	سیاه	۴	۵	۱/۴
سیلیکاژل SG	کره	آبی	۴	-	۲/۳

ابعاد و اندازه این ردیاب‌ها با توجه به ردگیری آسان‌تر آنها در فرایند اختلاط، انتخاب شده است. با در نظر گرفتن مشخصات فیزیکی این ذرات گرانولی، هر یک از این ذرات نقش یک نوع ذره حاوی انرژی را در فرایند اختلاط با ذرات شن ایفا می‌کند. ذرات پلی‌اتیلن به علت چگالی کمی که دارند به‌عنوان نماینده ذرات چوب در نظر گرفته می‌شوند. ذرات پی‌وی‌سی نیز نقش زباله‌های شهری و ذرات سیلیکاژل به دلیل چگالی نسبتاً زیاد، نقش ذرات ذغال سنگ را ایفا می‌کنند.

۳- آزمایش‌ها

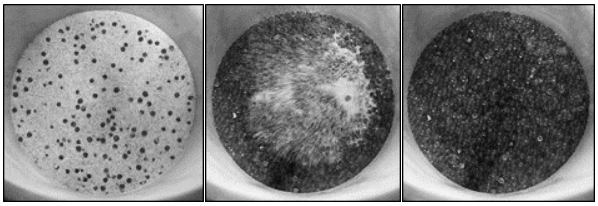
روش انجام آزمایش‌های اختلاط در بسترهای دولایه به این صورت است که در همه آزمایش‌ها، لایه زیرین بستر را ذرات شن، با یک ارتفاع مشخص و لایه فوقانی را ذرات ردیاب، با یک نسبت حجمی معین تشکیل می‌دهد. با راه‌اندازی دستگاه، هوا با دبی مشخصی وارد بستر می‌شود. هم‌زمان با سیال شدن ذرات بستر، فرایند اختلاط ذرات نیز آغاز شده و با سیالیت همه ذرات موجود در بستر، فرایند اختلاط نیز همه‌گیر می‌شود. کار دستگاه تا رسیدن اختلاط ذرات بستر به یک پایداری نسبی یعنی زمانی که تغییرات در کیفیت اختلاط با گذشت زمان به حداقل برسد، ادامه می‌یابد. این شرایط با استفاده از چند آزمایش، در حدود ۱۰ ثانیه به‌دست آمد. با این حال برای بررسی رفتار بستر پس از ایجاد پایداری نسبی، زمان هر آزمایش در حدود یک دقیقه انتخاب شد. زمان‌های بیشتر در اجرای آزمایش، اطلاعات بیشتری را ارائه نمی‌داد. شکل **۴** مراحل مختلف فرایند اختلاط، از آماده سازی بستر تا فراگیر شدن اختلاط را در بستر به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل (۴): مراحل مختلف فرایند اختلاط از آماده‌سازی بستر تا فراگیرشدن آن.

برای آنالیز اختلاط، از روش پردازش تصاویر دیجیتال استفاده شده است. سطح مقطع انتخاب شده برای تحلیل، سطح فوقانی بستر است. این سطح به دلیل دسترسی اپتیکی به آن انتخاب شده است. اگر چه ممکن است بتوان سطح جانبی بستر را نیز انتخاب کرد. ولی در بسترهای استوانه‌ای انتخاب سطح جانبی برای تحلیل با اشکالاتی مانند دسترسی ضعیف نوری و اثر شدید دیواره همراه می‌باشد. با این وجود اگر از روش‌های دیگری مانند نمونه‌برداری برای سنجش کیفیت اختلاط استفاده شود، انتخاب سطح مقطع بسیار مهم است.

در این روش تصاویر ثبت‌شده از سطح بستر آنالیز شده و با بررسی توزیع ذرات ردیاب در سطح بستر، شاخص کیفیت اختلاط به‌دست می‌آید. به‌عبارت دیگر، معیار بررسی کیفیت اختلاط در آزمایش‌ها، میزان حضور ذرات ردیاب در سطح بستر می‌باشد. شکل **۵** نمونه‌ای از تصاویر برداشت شده از سطح بستر، برای اختلاط ذرات شن و سیلیکاژل منطبق بر مراحل سه‌گانه شکل **۴** را نشان می‌دهد.



شکل (۵): فرایند اختلاط ذرات شن سیلیکا و ردیاب سیلیکاژل در سطح بستر.

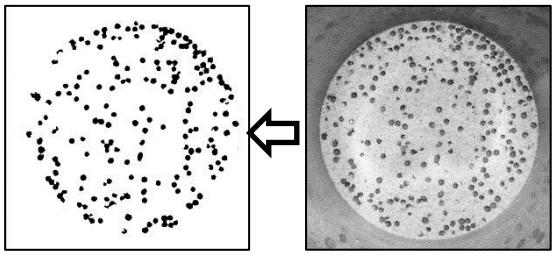
میزان حضور ذرات مختلف در سطح بستر را می‌توان به‌عنوان شاخصی از اختلاط قلمداد کرد. قبل و هم چنین در آغاز فرایند اختلاط، سطح بستر پوشیده از یک نوع ماده (در این جا ذرات ردیاب) می‌باشند. با گذشت زمان، این سطح در بردارنده ذرات متفاوت بستر و ردیاب خواهد بود. در هر لحظه می‌توان نسبت حضور ذرات ردیاب در سطح بستر را به‌عنوان شاخص در نظر گرفت. در این صورت، پس از گذشت زمانی و ثابت شدن تقریبی این نسبت، می‌توان به اتمام فرایند اختلاط و هم‌چنین میزان نهایی آن پی برد. با توجه به مقدار (حجم) ذرات ردیاب و ذرات بستر، می‌توان درجه اختلاط مورد انتظار، یا اختلاط ایده‌آل را به‌دست آورد و با مقایسه آن با شاخص اختلاط نهایی، از کیفیت اختلاط نیز آگاه شد.

غلظت‌های بالاتر و پایین‌تر ذرات ردیاب در سطح بستر نشان از تمایل نسبی بستر برای جدایش دارد. در صورتی که غلظت ذرات در سطح بستر کمتر از مقدار نسبت اولیه (ایده‌آل) باشد، ذرات ردیاب متمایل به حضور در قسمت‌های پایین بستر هستند. این مساله نشان می‌دهد که اختلاط خوبی نمی‌شود. هم‌چنین غلظت زیاد ذرات ردیاب در سطح بستر نیز نشان‌دهنده تمایل کم ذرات برای شرکت در فرایند اختلاط در قسمت‌های پایینی بستر بوده و در نتیجه اختلاط ضعیفی رخ می‌دهد.

با استفاده از این روش و با کمک پردازش تصاویر، نحوه اختلاط ذرات شن و ردیاب‌ها بررسی شد. نرم‌افزارهای مختلفی برای پردازش تصاویر وجود دارد. در این تحقیق از بسته پردازش تصاویر نرم‌افزار MATLAB نسخه ۲۰۱۰ استفاده شد. در این نرم‌افزار، تصاویر دیجیتالی که به شکل فیلم ضبط شده بود، به‌صورت عکس خوانده شده و با استفاده از چند دستور، این تصاویر به‌صورت تصاویر دو رنگی در می‌آید. در این تصاویر دو رنگی، ذرات ردیاب به رنگ سیاه و ذرات شن سطح بستر به رنگ سفید در می‌آید. شکل **۶** نمونه‌ای از تصویر دو رنگی شده توسط نرم‌افزار MATLAB را نشان می‌دهد. به این ترتیب یک تصویر قابل تفکیک از سطح بستر به‌دست می‌آید. این تصویر در واقع یک ماتریس با ابعاد $m \times n$ می‌باشد که m و n تعداد پیکسل‌های عمودی و افقی تصویر هستند. درایه‌های این ماتریس از ارقام صفر و یک تشکیل شده که به ترتیب نشان‌دهنده قسمت‌های سیاه و سفید آن تصویر می‌باشد. شاخص اختلاط که نسبت غلظت ذرات ردیاب به کل ذرات سطح بستر زمان‌های مختلف می‌باشد، از تقسیم مساحت نواحی سیاه رنگ به مساحت کل سطح بستر در هر تصویر به‌دست می‌آید.

بنابراین با اعمال این دستور بر روی کلیه عکس‌های استخراج شده از یک فیلم، می‌توان رفتار اختلاط ذرات بستر را در یک بازه زمانی معین بررسی نمود. به این ترتیب می‌توان نموداری استخراج نمود که نسبت غلظت ذرات ردیاب به کل ذرات موجود در سطح بستر نسبت به زمان را ارائه می‌کند و می‌توان روند اختلاط ذرات بستر را با کمک این نمودار بررسی نمود. در این بررسی‌ها دو مساله مورد توجه قرار گرفت. مسئله اول مربوط به میزان اختلاط این ذرات در شرایط پایداری نسبی بود که نشان‌دهنده کیفیت اختلاط در هر آزمایش بود. مسئله دوم نرخ رسیدن به این شرایط پایدار و به‌عبارتی سرعت اختلاط ذرات بود که با تمرکز بر زمان‌های آغازین اختلاط به‌دست می‌آید.

خطای موجود در این روش بسته به قیافه، اندازه و رنگ ذرات مخلوط شونده و حتی نور سطح بستر می‌تواند متغیر باشد. برای هر دسته تصاویر مربوط به یک آزمایش، تصاویر دوتایی به‌دست‌آمده از سطح بستر با تصاویر واقعی مقایسه شده‌اند. در صورت عدم انطباق، با تغییر در دستورهای کد پردازش تصویر تهیه شده به‌منظور بهینه‌سازی، حداقل انحراف حاصل شده است.



شکل (۶): نمونه‌ای از تصویر دو رنگی شده توسط نرم‌افزار MATLAB.

۴- نتایج و تفسیر آنها

نتایج آزمایش‌ها شامل دو بخش است. نخست به مکانیزم اختلاط در بسترهای دولایه پرداخته می‌شود و سپس تاثیر مشخصات ذرات مخلوط شونده بر روند اختلاط بررسی خواهد شد.

۴-۱- مکانیزم اختلاط

وقتی هوا با سرعت‌های کم وارد بستری از ذرات می‌شود، از فضای خالی بین ذرات عبور می‌کند. اگر سرعت هوا به اندازه کافی افزایش یابد، موجب می‌شود تا ذرات بستر به‌صورت معلق در آمده و کل بستر به حالت سیالیت درآید. در چنین حالتی بستر رفتاری سیال-گونه دارد و حداقل سرعتی که موجب ایجاد چنین حالتی شود را حداقل سرعت سیالیت گویند [۱۶]. با افزایش سرعت، حباب‌هایی

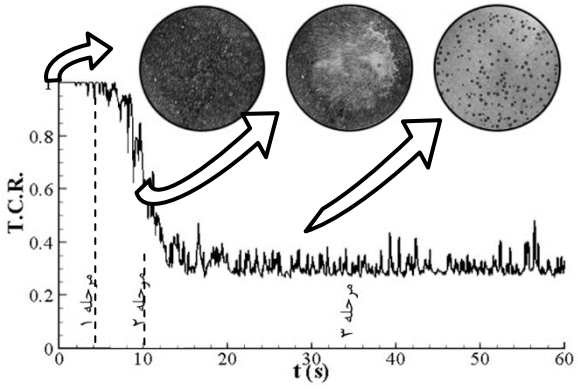
در بستر شکل می‌گیرند. به این ترتیب بستر به شکل جزئی به‌صورت سیالیت حبابی درآمده و حباب‌های شکل گرفته به سمت بالا حرکت می‌کنند. این حباب‌ها با رسیدن به سطح مشترک دولایه می‌ترکند و در نتیجه، ذرات ردیاب لایه فوقانی را به اطراف رانده و مخلوطی از ذرات شن و ردیاب را جایگزین ذرات تفکیک شده در فصل مشترک می‌کنند. با تکرار و توالی این فرایند، در هر مرحله لایه‌ای از ذرات شن و ردیاب جای خود را به ذرات مخلوط شده می‌دهد. درنهایت با سیال شدن کلیه ذرات بستر، یعنی سیالیت کامل، فرایند اختلاط همه‌گیر می‌شود. در نتیجه در چند ثانیه نخست، قسمت‌های بالایی بستر در برابر سیالیت و اختلاط ذرات از خود تأخیر نشان می‌دهند.

پس از ایجاد سیالیت کامل اختلاط متوقف نشده و با حرکت حباب در بستر ادامه می‌یابد. با حرکت هر حباب دنباله‌ای از ذرات (شن و ردیاب) ایجاد می‌شود. در این دنباله گردبه‌های کوچکی شکل می‌گیرند که با تبادل ذرات با نواحی کناری دنباله، اختلاط مستمری را فراهم می‌کند. پس از رسیدن حباب‌ها به سطح بستر و ترکیدن آنها، ذرات دنباله و اطراف حباب روی سطح بستر پخش می‌شوند. مجموعه این اتفاقات سبب ایجاد یک جریان کلی در فاز امولسیون می‌شوند که تأمین کننده ابزار لازم برای اختلاط دائمی در بستر است.

شکل **۷** نمودار به‌دست آمده از روش پردازش تصاویر را برای یکی از آزمایش‌های اختلاط ذرات شن سیلیکای ۶۵۰ میکرومتری با ردیاب سیلیکاژل و نسبت حجمی ۲۰ درصدی نشان می‌دهد. این نمودار تغییرات نسبت غلظت ذرات ردیاب (T.C.R.) در سطح بستر را نسبت به زمان نشان می‌دهد. این نمودار از سه مرحله مختلف تشکیل شده است. در مرحله نخست نسبت غلظت ذرات ردیاب بدون تغییر و در عدد ثابت یک، باقی می‌ماند. بنابراین در این مرحله تمامی سطح بستر از ذرات ردیاب تشکیل شده است و بستر در برابر اختلاط مقاومت می‌کند. این مقاومت در واقع تأخیر زمانی است که ذرات شن برای بالا آمدن و رسیدن به سطح فوقانی نیاز دارند. مدت این مرحله به نسبت حجمی ردیاب به ذرات بستر، جنس و اندازه ذرات، و سرعت هوای ورودی به بستر بستگی دارد.

مرحله دوم نمودار شکل **۷** بیانگر رسیدن اختلاط به سطح بستر می‌باشد. ذرات شن به سمت بالای بستر رسیده و به همراه آن ذرات ردیاب به اعماق بستر نفوذ می‌کند. با گذشت زمان این اختلاط در سطح به مقدار معینی می‌رسد. با گذشت زمان بیشتر، کیفیت اختلاط، یعنی میزان درهم رفتگی ذرات بستر و ردیاب تغییر نمی‌کند. این وضعیت در مرحله سوم این نمودار دیده می‌شود. مدت زمان مرحله دوم در واقع بیانگر شدت یا نرخ اختلاط است. هرچه اختلاط سریع‌تر انجام شود حالت نهایی زودتر به‌دست می‌آید و مدت زمان مرحله دوم کوتاه‌تر می‌شود. بنابراین شیب منحنی اختلاط در مرحله دوم، بیانگر نرخ اختلاط می‌باشد.

نوسانات مشاهده شده در این نمودار به علت وجود جریان‌های ذرات و ترکیدن حباب‌ها در سطح بستر می‌باشد. این اتفاقات سبب تغییرات غلظت ذرات ردیاب در سطح بستر می‌شود. از طرف دیگر سایه‌های ایجاد شده در سطح بستر در زمان ترکیدن برخی از حباب‌های بزرگ، ممکن است خطاهای لحظه‌ای را در تشخیص ذرات ردیاب ایجاد نمایند. این‌گونه خطاها در روش پردازش تصاویر اجتناب ناپذیر است. با این حال خطاهای مذکور قابل توجه نبوده و خدشه‌ای به تشخیص روند اختلاط وارد نمی‌کنند.



شکل (۷): تغییرات نسبت غلظت ذرات سیلیکاژل در سطح بستر بر حسب زمان.

از نمودار اختلاط نشان‌داده‌شده در شکل **۷** سه شاخص اختلاط در بستر به‌دست می‌آید؛ زمان تأخیر اختلاط در سطح بستر، نرخ اختلاط یا شیب نمودار در مرحله دوم، و درجه اختلاط نهایی یا سطح اختلاط در مرحله سوم. زمان لازم برای رسیدن به یک اختلاط پایدار در سرتاسر بستر، می‌تواند به‌عنوان یک شاخص بسیار مهم در بستر به شمار آید. این زمان در واقع مجموع زمان‌های مرحله‌های اول و دوم می‌باشد.

۴-۲- تأثیر مشخصات ذرات ردیاب

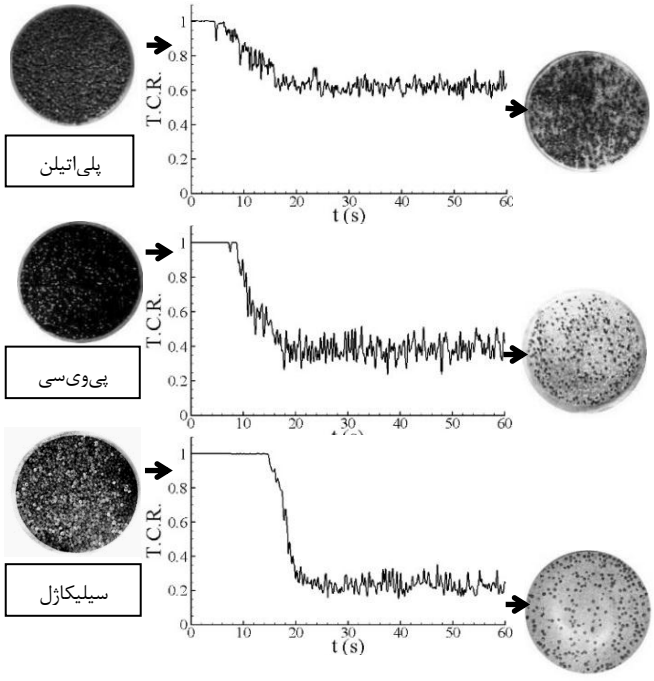
به‌منظور بررسی تأثیر مشخصات ذرات ردیاب بر فرایند اختلاط، چند دسته آزمایش تعریف و انجام شدند. در این آزمایش‌ها اختلاط

ذرات شن سیلیکا در سه اندازه مختلف با سه نوع از ذرات ردیاب بررسی شد. در همه آزمایش‌ها ارتفاع مجموعه ذرات یک‌سان و نسبت حجمی (بالک) ذرات ردیاب به ذرات شن ۰/۲ می‌باشد. ارتفاع ذرات شن ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ذرات ردیاب ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. بدین‌ترتیب نسب حجمی ذرات ردیاب در مخلوط نهایی برابر با ۰/۱۷ می‌باشد. آزمایش‌ها برای سه اندازه متوسط برای ذرات شن بستر برابر با ۶۵۰، ۴۶۰، و ۲۷۵ میکرون انجام شده است. حداقل سرعت سیالات برای این ذرات، به‌ترتیب برابر با ۲۵، ۱۲، و ۵ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد [۱۷]. سرعت هوای ورودی به بستر، ۱/۴ برابر حداقل سرعت سیالیت انتخاب شد. رژیم سیالیت نسبتاً آرام به‌وجود آمده در این سرعت، علت انتخاب این مقدار از سرعت می‌باشد؛ چرا که در جریان‌های قدرتمند، درگیری ذرات ردیاب در فرایند اختلاط شدید شده و مطالعه تأثیر مشخصات ذرات بر این فرایند را مشکل می‌سازد. در رژیم آرام حرکت دسته ذرات به‌دلیل حرکت پرقدرت حباب‌ها به‌وجود نمی‌آید. بنابراین با انتخاب یک رژیم نسبتاً آرام نقش مشخصات ذرات مخلوط شونده به‌صورت پررنگ‌تر دیده می‌شود.

شکل **۸** نتایج آزمایش اختلاط ذرات شن ۶۵۰ میکرومتری را با ذرات ردیاب مختلف نشان می‌دهد. اختلاط ذرات بستر در این نمودارها شبیه به هم هستند. با این حال تفاوت‌هایی در نرخ فراگیر شدن و کیفیت نهایی اختلاط آنها وجود دارد. برای بررسی رفتار و همچنین مقایسه روند اختلاط بهتر است که این نمودارها در کنار هم آورده شوند. شکل **۹** همه نمودارهای شکل **۸** را به‌صورت یک‌جا نشان می‌دهد. به‌منظور مقایسه دقیق‌تر نرخ اختلاط، زمان‌های شروع مرحله دوم نموداری اختلاط جابجا شده و شروع این مرحله در همه نمودارها همزمان شده است.

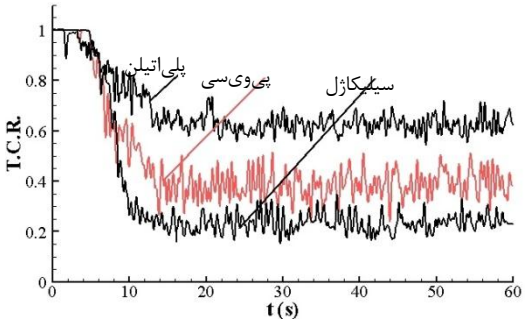
مقایسه انجام شده در شکل **۹** نشان می‌دهد که ذرات پلی‌اتیلن نسبت به دیگر ردیاب‌ها، تمایل بیشتری برای حضور در لایه‌های فوقانی بستر دارند. به‌عبارت دیگر، برای شرکت در اختلاط، از خود مقاومت نشان می‌دهند. این درحالی است که ذرات پی‌وی‌سی و سیلیکاژل در لایه‌های پایینی بستر بیشتر نفوذ کرده و این مسئله نشان از حضور فعال‌تر این ذرات در فرایند اختلاط می‌باشد.

نسبت غلظت ذرات ردیاب در اختلاط نهایی برای ذرات پلی‌اتیلن، پی‌وی‌سی، و سیلیکاژل، به‌ترتیب برابر با ۰/۶۳، ۰/۳۸، و ۰/۲۴ می‌باشد. این مقادیر در مقام مقایسه با نسبت حجمی اولیه یعنی ۰/۱۷ بیانگر فاصله کیفیت اختلاط با شاخص اختلاط ایده‌آل می‌باشند. انتخاب نسبت حجمی اولیه یعنی ۰/۱۷ به‌عنوان شاخص اختلاط ایده‌آل شاید خیلی دقیق به نظر نرسد، اما مزنه مناسبی برای سنجش می‌باشد. برای شاخص اختلاط بیش از این مقدار، انتظار می‌رود که ذرات ردیاب سبک‌تر در سطح قرار داشته باشند و برای مقادیر کمتر از آن، نفوذ ذرات ردیاب در لایه‌های پایینی بیش‌تر است. شکل **۹** نشان می‌دهد که در بازه چگالی و اندازه ذرات بستر و ردیاب موجود، هر چه چگالی ذرات ردیاب بیشتر باشد اختلاط با کیفیت بالاتری صورت می‌گیرد. در حالت حدی اگر چگالی ذرات ردیاب با چگالی ذرات بستر یکسان باشد، اختلاط ایده‌آل خواهد بود؛ یعنی نسبت غلظت مواد به نسبت حجمی اولیه خواهد رسید.

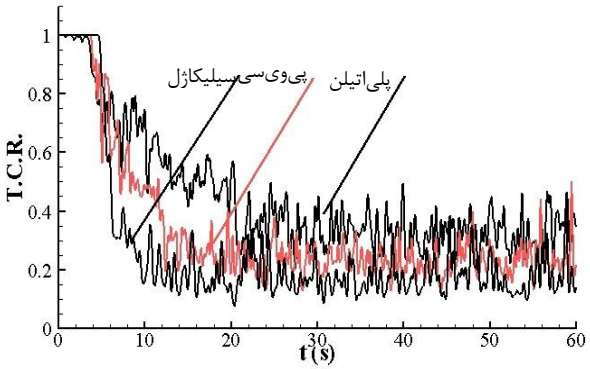


شکل (۸): تغییرات غلظت ذرات ردیاب در سطح بستر برحسب زمان.

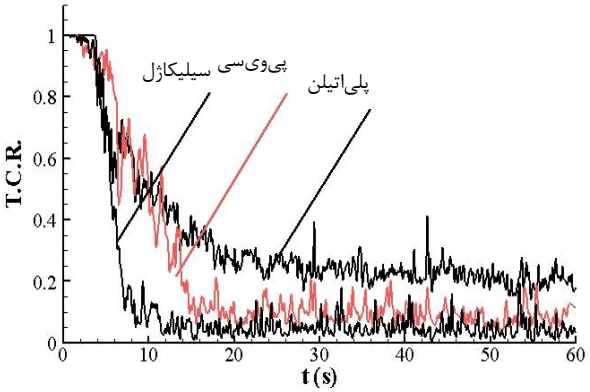
شکل **۹** همچنین نشان می‌دهد که نرخ اختلاط مواد، صرف‌نظر از کیفیت نهایی اختلاط، متأثر از اختلاف چگالی آنها نیز خواهد بود. ذرات ردیاب سبک‌تر کندتر از ذرات سنگین‌تر با ذرات بستر مخلوط می‌شوند. به تعبیر دیگر، ذرات سنگین‌تر، زودتر به سمت لایه‌های پایین حرکت کرده و به کیفیت نهایی اختلاط می‌رسند.



شکل (۹): مقایسه اختلاط ذرات شن ۶۵۰ میکرومتری با سه نوع ردیاب مختلف.



شکل (۱۰): مقایسه اختلاط ذرات شن ۴۶۰ میکرومتری با سه نوع ردیاب مختلف.



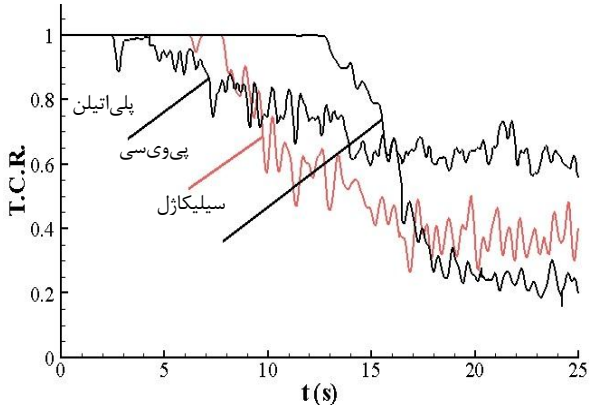
شکل (۱۱): مقایسه اختلاط ذرات شن۲۷۵ میکرومتری با سه نوع ردیاب مختلف.

این آزمایش برای ذرات شن با اندازه‌های ۴۶۰ و ۲۷۵ میکرومتری نیز تکرار ش و نتایج در شکل‌های **۱۰** و **۱۱** ارائه شده‌اند. این شکل‌ها نشان می‌دهند که با کوچک‌تر شدن ذرات بستر، نرخ اختلاط اندکی افزایش می‌یابد. این تغییر آنچنان نیست که توجه خاصی را جلب کند.

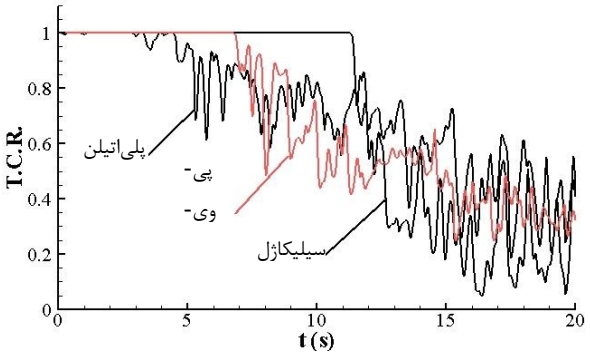
در این نمودارها، همانند نمودار مربوط به ذرات بستر ۶۵۰ میکرومتری، نشان داده شده که با افزایش چگالی ذرات ردیاب، حضور ذرات ردیاب در سطح بستر کاهش می‌یابد. شکل **۱۰** نشان می‌دهد که فاصله اختلاط نهایی برای ردیاب‌های مختلف کم‌تر از حالتی است که در بستر با ذرات درشت‌تر به‌دست آمده است. این هم‌سویی مقادیر نهایی اختلاط می‌تواند به معنی حساسیت کم‌تر بستر به چگالی ذرات ردیاب، در محدوده این اندازه از ذرات بستر، باشد.

درجه اختلاط نهایی برای ذرات بستر خیلی ریزتر، ۲۷۵ میکرومتر، در شکل **۱۱** نشان داده شده است. برای ذرات ردیاب با چگالی‌های زیاد، شاخص اختلاط نهایی از مقدار ایده‌ال عبور کرده و این به معنی ته‌نشین‌شدن ذرات، به ویژه سلیکاژل در بستر است. این شرایط برای ذرات سبک پلی‌اتیلن هنوز فراهم نشده است. می‌توان انتظار داشت که با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات بستر، برای این ذره ردیاب، کاهش شاخص اختلاط و به تبع آن ته‌نشینی یا جدایش ذرات رخ دهد. در راستای عکس این اثر نیز، با توجه به شکل **۹** می‌توان انتظار داشت که با افزایش اندازه (سنگین‌تر شدن) ذرات بستر، برای ذرات ردیاب سبک‌تر، اختلاطی رخ ندهد و لایه‌های بستر و ردیاب جدا از هم باقی بمانند.

تأخیر زمانی به‌وجود آمده در فرایندهای اختلاط شکل **۹**، به علت جابه‌جایی نمودارها دیده نشد. شکل‌های **۱۲** و **۱۳** اختلاط ذرات بستر را با تمرکز بر تأخیر زمانی این فرایند نشان می‌دهند.



شکل (۱۲): مقایسه تأخیر زمانی اختلاط ذرات ردیاب با ذرات شن ۶۵۰ میکرومتری.



شکل (۱۳): مقایسه تأخیر زمانی اختلاط ذرات ردیاب با ذرات شن ۲۷۵ میکرومتری

با مقایسه زمان‌های شروع اختلاط، مشاهده می‌شود که ذرات ردیاب سیلیکاژل پس از گذشت زمان نسبتاً بیشتری درگیر فرایند اختلاط می‌شوند. ذرات پی‌وی‌سی و پلی‌اتیلن که دارای وزن کمتری هستند، مقاومت کمتری در برابر اختلاط از خود نشان داده و زودتر در فرایند اختلاط شرکت می‌کنند. با توجه به ارتفاع ثابت ذرات بستر و ردیاب در هر آزمایش، می‌توان نتیجه گرفت که هر چه چگالی ذرات ردیاب بیشتر باشد، وزن مجموعه ذرات بستر افزایش یافته و بستر در برابر سیالیت کامل مقاومت نموده و به تبع آن، فرایند اختلاط با تاخیر بیشتری آغاز می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله اختلاط ذرات جامد در یک بستر سیال دو لایه در رژیم حبابی به‌صورت تجربی بررسی شد. هدف از این کار، بررسی شاخص‌های اختلاط و اثر بستر و سیالیت آن بر اختلاط مواد مخلوط شونده بوده است. برای این کار، روش ردگیری ذرات ردیاب که در این جا نقش مواد مخلوط شونده را ایفا می‌کنند، در سطح بستر به کار رفت. میزان حضور ذرات ردیاب و بستر در سطح بستر توسط یک دوربین دیجیتال ثبت شد. با استفاده از پردازش تصاویر، اختلاط ذرات در سطح بستر مطالعه شد. در این مطالعه ابتدا مکانیزم اختلاط در یک بستر سیال بررسی و شاخص‌های اختلاط مانند درجه اختلاط نهایی، نرخ اختلاط، و تأخیر زمانی آغازش اختلاط در سطح معرفی شد.

سپس با انجام چند دسته آزمایش، تأثیر مشخصات فیزیکی ذرات مخلوط شونده نیز مطالعه شد. این مطالعات نشان می‌دهند که چگالی ذرات مخلوط شونده نقشی مهمی در کیفیت اختلاط خواهد داشت. با افزایش وزن ذرات ردیاب، تاخیر زمانی شروع به اختلاط افزایش می‌یابد. و فرایند اختلاط با نرخ سریع‌تری انجام می‌گیرد.کیفیت اختلاط را نمی‌توان مستقل از اندازه (وزن) ذرات بستر سنجید. برای ذرات نسبتاً بزرگ بستر (ذرات سنگین)، با افزایش چگالی (یا وزن) ذرات ردیاب، کیفیت اختلاط افزایش می‌یابد؛ طوری که برای ذرات چگال‌تر به سمت اختلاط ایداه‌ال پیش خواهد رفت. برای ذرات بستر کوچک‌تر (سبک‌تر) افزایش چگالی ذرات ردیاب، منجر به جدایش ذرات بستر و ردیاب می‌شود.

نتایج نشان دادند که در اندازه خاصی از ذرات بستر، حساسیت کم‌تری نسبت به چگالی ذرات ردیاب وجود دارد و در این شرایط درجه اختلاط نزدیک اختلاط ایده‌آل می‌باشد. چنین شرایطی برای طراحی یک بستر سیال به‌منظور اختلاط با مواد گوناگون مناسب می‌باشد و دستیابی به آن، از طریق تجربی میسر خواهد بود.

۶- تشکر و قدردانی

این مطالعه در آزمایشگاه پیشرانش پیشرفته دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. به این وسیله از دوستان خود در این آزمایشگاه تشکر می‌شود.

۷- مراجع

1. Lim, K.S., Gururajan, V.S., and Agarwal, P.K. "Mixing of Homogeneous Solids in Bubbling Fluidized Beds-theoretical Modeling and Experimental Investigation, Using Digital Image Analysis", Chemical Engineering Science, Vol. 48, pp. 2251–2265, 1993.
2. Burgess, J.M., Fane, A.G., and Fell, C.J. "Measurement and Prediction of the Mixing and Segregation of Solids in Gas Fluidized", Proceeding of the 2nd Pacific Chemical Engineering Congress., Vol. 2, pp. 1405-1412, 1977
3. Shen, L., Zhang, M. "Effect of Particle Size on Solids Mixing in Bubbling Fluidized Bed", Powder Technology, Vol. 97, pp. 170–177, 1998.
4. Schlichthaerle, P. and Werther, J. "Solids Mixing in the Bottom Zone of a Circulating FLuidized Bed", Powder Technology, Vol. 120, pp. 21–33, 2001.
5. Shen, L., Xiao, J., Niklasson, F., and Johnsson, F. "Biomass Mixing in a Fluidized Bed Biomass Gasifier for Hydrogen Production", Chemical Engineering Science, Vol. 62, pp. 636 – 643, 2007.
6. Stein, M., Ding, Y.L., Seville, J.P.K., and Parker, D.J. "Solids Motion in Bubbling Gas Fluidized Bed", Chemical Engineering Science, Vol. 55, pp. 5291-5300, 2000.
7. Glicksman, L., Carr, E., and Noymen, P. "Particle Injection and Mixing Experiments in a One-quarter Scale Model Bubbling Fluidized Bed", Powder Technology, Vol. 180, pp. 284-288 2008.

8. Pallarès, D. and Johnsson, F. "A Novel Technique for Particle Tracking in Cold Two-dimensional Fluidized Beds, Simulating Fuel Dispersion", Chemical Engineering Science, Vol. 61, pp. 2710-2720, 2006.
9. Karvinen R., and Savolainen, K. "Particle Mixing in Gas-Solid Bubbling Bed", Finnish-Swedish Flame Days, Session 4B, 2009.
10. Sulaymon, A.H., Abbas, A.S., and Salman, R.H. "Prediction of Equilibrium Mixing Index and Optimum Mixing Time for Three Solid Saterials in Fluidized Column", Al-Khwarizmi Engineering Journal, Vol. 6, No. 4, pp. 21-30, 2010.
11. Zhang, Y., Jin, B., and Zhong, W. "Experimental Investigation on Mixing and Segregation Behavior of Biomass Particle in Fluidized Bed", Chemical Engineering and Processing, Vol. 48, pp. 745–754, 2009.
12. Sun, Z., Jin, B., Zhang, M., Liu, R., and Zhang, Y. "Experimental Studies on Cotton Stalk Combustion in a Fluidized Bed", Energy, Vol. 33, pp. 1224–1232, 2008.
13. Xiaodong, L., Jianhua, Y., Mingjiang, N., and Kefa, C. "Study on Mixing Performance of Municipal Solid Waste (MSW) in Differential Density Fluidized Beds (FBs)", Chemical Engineering Journal, Vol. 84, pp. 161–166, 2001.
14. Zuki, S.A.M., Abdul Rahman, N., and Yassin, I.M. "Particle Mixing Analysis, Using Digital Image Processing Technique", Journal of Applied Sciences, Vol. 14, pp. 1391-1396, 2014.
15. Geldart, D. "The Effect of Particle Size and Size Distribution on the Behavior of Gas-Fluidized Beds", Powder Technology, Vol. 6, pp. 201-205, 1972.
16. Kunii, D., and Levenspiel, O. "Fluidization Engineering", New York: Wiley, Translated by S.M. Alavi, A. A. Hamidi , Iran University of Science and Technology Publications, pp. 85, 2000 (In persian).
17. Ghassemi, H., Aminy, H., and Khayat, M. "An Experimental Study of Fluidization of Solids Particles in a Bubbling Fluidized Bed", Modarres Mechanical Engineering, Vol. 16, pp. 94-100,2015 (In Persian).