



## مطالعه‌ی تجربی سیال سازی ذرات جامد در یک بستر سیال حبابی

حجت قاسمی<sup>1</sup>، حسن امینی<sup>2</sup>، مرتضی خیاط<sup>3\*</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 1477893855، [mkhayat@srbiau.ac.ir](mailto:mkhayat@srbiau.ac.ir)

### چکیده

برای مطالعه تجربی هیدرودینامیک بستر سیال و پارامترهای موثر بر آن، یک بستر سیال طراحی و ساخته شد. این بستر، استوانه‌ای عمودی و شفاف به قطر 14 سانتی‌متر با ذرات شن سیلیکا در بازه اندازه 212 تا 800 میکرومتر بوده و توسط هوا با فشار و دمای محیط، سیال می‌شود. در این تحقیق ابتدا حداقل سرعت سیالیت برای ذرات مختلف به دست آمده و تاثیر اندازه ذرات و ارتفاع بستر روی این سرعت بررسی شده است. سپس افت فشار بستر و تاثیر ارتفاع و اندازه ذرات روی آن مطالعه شده است. در پایان، نتایج حاصل از آزمایش برای حداقل سرعت سیالیت و افت فشار بستر با مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط موجود، مقایسه شده تا میزان انحراف این روابط با نتایج آزمایش‌ها مشخص شود. نتیجه این آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش اندازه ذرات، سرعت حداقل سیالیت افزایش می‌یابد. اما برای یک ارتفاع معین، اندازه ذرات تاثیری روی مقدار افت فشار بستر ندارد. افزایش ارتفاع بستر علاوه بر افزایش افت فشار، سبب می‌شود تا حداقل سرعت سیالیت اندکی افزایش یابد اما این افزایش چشم‌گیر نمی‌باشد. همچنین افت فشار بستر با تغییر ارتفاع به صورت خطی تغییر می‌کند.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 دی 1392

پذیرش: 21 اسفند 1392

ارائه در سایت: 10 آبان 1393

کلید واژگان:

سیالیت

بستر سیال

حداقل سرعت سیالیت

افت فشار بستر

## An experimental study of fluidization of solids particles in a bubbling fluidized bed

Hojjat Ghasemi<sup>1</sup>, Hasan Amini<sup>2</sup>, Morteza Khayat<sup>3\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Science and Research Branch Tehran, Tehran

3- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Science and Research Branch Tehran, Tehran

\* P. O. B. 1477893855 Tehran, Iran, [Mkhayat@srbiau.ac.ir](mailto:Mkhayat@srbiau.ac.ir)

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 14 January 2014  
Accepted 12 March 2014  
Available Online 01 November 2014

**Keywords:**  
Fluidized bed  
Fluidization  
Minimum fluidization velocity  
Bed pressure drop

### ABSTRACT

To perform an experimental study of the hydrodynamics of fluidized bed and investigate the affecting parameters, a fluidized bed has been designed and fabricated. This bed consists of 212 to 800 microns silica sand in a transparent vertical cylinder with 14 cm inner diameter. It is fluidized by air at atmospheric pressure and temperature. In this research, at first the minimum fluidization velocity for different sand sizes and bed heights are obtained. Then the effects of size and height on the pressure drop across the bed have been studied. Finally, the experimental results are compared with calculated values from existing correlations to determine the deviations of the predicted values. Results indicate that by increasing the particle size in the equal bed height, the minimum fluidization velocity is increased, while the pressure drop does not significantly change. Also, by increasing bed height, the pressure drop is increased, while increase in the minimum fluidization velocity is ignorable. Also, bed pressure drop changed linearly with bed height.

### 1- مقدمه

روش به دلیل نگرانی‌های موجود در مورد آلودگی هوا توسط گازهای گلخانه‌ای و همچنین محدودیت در منابع دیگر انرژی، در چند سال اخیر مورد توجه همه‌ی کشورها به خصوص کشورهای توسعه یافته قرار گرفته است [1]. برای دستیابی به بازدهی بالای یک بستر سیال در مقیاس صنعتی، می‌بایست درکی عمیق از آن چه که در آن رخ می‌دهد، وجود داشته باشد. همین مساله سبب شده تا در طول این سال‌ها مطالعات زیادی بر رفتارهای مربوط به بسترهای سیال انجام شود. بخش عمده‌ی این مطالعات مربوط به هیدرودینامیک بستر سیال بوده که شامل سرعت‌های سیالیت، میزان افت فشار، رفتار حباب‌ها و جریان‌های موجود در بستر

سیال سازی فرآیندی است که طی آن مجموعه‌ای از ذرات جامد، رفتاری شبیه به یک سیال از خود نشان می‌دهند. در این فرآیند جریان سیال از میان ذرات جامد مستقر در محلی به نام بستر ذرات عبور کرده و سبب بروز رفتاری سیال گونه از آن ذرات می‌شود. استفاده از بسترهای سیال شده‌ی ذرات در چند دهه اخیر، به طور گسترده مورد استفاده صنایع مختلف قرار گرفته است. یکی از کاربردهای این بسترها، تولید برق در مقیاس کوچک با به کارگیری فرآیند احتراق یا گازسازی ذرات جامدی مانند زغال سنگ، زیست توده‌ها و زباله‌ها می‌باشد. استفاده از این

جدول 1 برخی از روابط موجود برای محاسبه‌ی حداقل سرعت سیالیت

شماره	رابطه	مرجع
[8]	$u_{mf} = \frac{2.997 \times 10^{-3} d_p^{1.636} (\rho_p - \rho_g)^{1.128} g}{\mu^{0.446} \rho_g^{0.0247}}$	(10)
[9]	$u_{mf} = \frac{7.39 d_p^{1.82} (\rho_p - \rho_g)^{0.94}}{\rho_g^{0.06}}$	(11)
[10]	$u_{mf} = \frac{9 \times 10^{-4} d_p^{1.8} (\rho_p - \rho_g) g^{0.934}}{\rho_g^{-0.066} \mu^{0.87}}$	(12)
[11]	$u_{mf} = \frac{\mu}{\rho_g d_p} ((33.7^2 + 0.0408 A_r)^{0.5} - 33.7)$	(13)

$$k_1 = \frac{1.75}{\varepsilon^3 \varphi_s} \quad (12)$$

$$k_2 = \frac{150(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 \varphi_s^2} \quad (13)$$

آن‌ها متوجه شدند که ضرایب  $k_1$  و  $k_2$  برای مقادیر مختلف اندازه ذرات و در دامنه وسیعی از اعداد رینولدز تقریباً ثابت باقی می‌ماند. آن‌ها مقدار  $24/5$  را برای  $k_1$  و برای ضریب  $k_2$  مقدار  $1650$  را به دست آوردند. بنابراین با استفاده از این رابطه و بدون نیاز به مشخصات ظاهری ذرات، حداقل سرعت سیالیت ذرات مختلف به دست می‌آید. جدول 1 برخی از روابط ارائه شده توسط دیگر محققان را برای محاسبه این سرعت نشان می‌دهد.

همان‌طوری که دیده می‌شود روابط زیادی برای به دست آوردن مقدار حداقل سرعت سیالیت وجود دارد. اما برای یک بستر با شرایط مشخص، سرعت محاسبه شده با استفاده از این روابط، مقادیری متفاوت خواهد داشت. علت بوجود آمدن این اختلاف آن است که این روابط تجربی در شرایط آزمایشگاهی متفاوتی استخراج شده است و تحت تاثیر نوع طراحی، هندسه و همچنین ذرات بستر می‌باشند.

علاوه بر به دست آوردن این سرعت، تلاش‌های زیادی برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر حداقل سرعت سیالیت صورت گرفته است. مطالعه‌ی اثر مشخصات فیزیکی ذرات جامد، دمای هوای ورودی، فشار کارکرد، هندسه و ارتفاع بستر نمونه‌هایی از این بررسی‌ها می‌باشد. سائو و همکاران [7] تاثیر ارتفاع بستر را بر حداقل سرعت سیالیت، برای یک بستر مخروطی مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که تغییر در ارتفاع بستر تاثیر مهمی روی حداقل سرعت سیالیت ندارد. گان و هیلال [12] یک بستر سه‌بعدی استوانه‌ای شکل از ذرات کروی شیشه‌ای با اندازه‌های مختلف را برای بررسی تاثیر ارتفاع به کار بردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌داد که برای همه اندازه‌های ذرات، افزایش ارتفاع تاثیری روی مقدار حداقل سرعت سیالیت ندارد. نتیجه‌ی دیگر این تحقیق افزایش حداقل سرعت سیالیت با بزرگ شدن اندازه ذرات بود. همچنین اسکودرو [13] این آزمایش‌ها را برای بستری از ذرات مختلف شامل ذرات شیشه‌ای و ذرات چوب خرد شده بررسی کرده و نشان دادند که نتایج کارشان با نتایج تحقیقات گان و هیلال تطابق دارد. جوهری و تائب [14] حداقل سرعت سیالیت اندازه‌های مختلف ذرات شن را به دست آورده و دریافتند که با بزرگ شدن اندازه ذرات، این سرعت افزایش می‌یابد. اگرچه بررسی‌های راموسو همکارانش [2] روی تاثیر اندازه‌ی ذرات بر حداقل سرعت سیالیت، نتایج دیگران را تایید می‌کرد، اما در مورد تاثیر ارتفاع، نتیجه مطالعات آن‌ها با نتایج دیگر محققین همخوانی ندارد. بستر مورد استفاده آن‌ها در این بررسی، یک بستر دو بعدی با مقطع مستطیل بود و ذرات آن را گلوله‌های کوچک شیشه‌ای در اندازه‌های مختلف تشکیل می‌داد. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش ارتفاع بستر، سبب افزایش مقدار حداقل سرعت سیالیت می‌شود. این در حالی است که نتیجه بررسی‌های دیگر محققین عدم تغییر را نشان می‌داد.

می‌باشد. بررسی‌های انجام شده معمولاً در بسترهای آزمایشگاهی انجام می‌شوند و با استفاده از روش‌های موجود، نتایج حاصله برای پیش‌بینی رفتار در بسترهای صنعتی به کار می‌روند. یکی از پارامترهای مهم و اساسی در بررسی‌های هیدرودینامیکی یک بستر سیال، حداقل سرعت سیالیت می‌باشد. این سرعت نقطه انتقال بستر از حالت ثابت به حالت سیال است [2]. پارامترهای موثر بر حداقل سرعت سیالیت را می‌توان در سه دسته‌ی کلی طبقه بندی کرد. این سه دسته شامل مشخصات ذرات بستر مانند جنس یا چگالی، شکل و اندازه ذرات بستر، مشخصات سیال عامل از قبیل چگالی و گرانشی و مشخصات هندسی بستر مانند ارتفاع آن می‌باشد. به دلیل اهمیت زیاد سرعت سیالیت، مطالعات زیادی در این رابطه توسط محققان مختلف انجام شده است. نتیجه این تحقیقات، روابط مختلف ارائه شده برای به دست آوردن این سرعت و تاثیر پارامترهای مختلف بر آن می‌باشد. بیشتر روابط ارائه شده با استفاده از روش‌های تجربی استخراج شده‌اند. رویکردهای اتخاذ شده در پیش‌بینی حداقل سرعت سیالیت به کمک این روابط را می‌توان به سه دسته‌ی کلی آنالیز ابعادی، روش افت فشار و روش نیروی پسا طبقه‌بندی نمود [3]. براساس رویکرد فشار، سیال شدن بستر ذرات زمانی به وقوع می‌پیوندد که نیروی اعمالی به وسیله جریان گاز روی ذره که در خلاف راستای جاذبه است، برابر با وزن ذره شود. ارگان افت فشار  $\Delta P$  بسترهای ثابت به ارتفاع  $H$  و با اندازه ذرات  $d_p$  را به صورت تابعی از مشخصات سیال و ذرات بستر و همچنین سرعت هوای ورودی به بستر  $u$ ، به صورت رابطه 1 ارائه کرد [4].

$$\frac{\Delta P}{H} g_c = 150 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\mu u}{(\varphi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g u^2}{\varphi_s d_p} \quad (1)$$

کافی از رابطه افت فشار ارگان استفاده کرد و یک رابطه درجه دو را برای به دست آوردن حداقل سرعت سیالیت  $u_{mf}$  پیشنهاد نمود [4].

$$\frac{1.75}{\varepsilon^3 \varphi_s} \left[ \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right]^2 + \frac{150(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 \varphi_s^2} \left[ \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right] = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2)$$

در این روابط  $\mu$  گرانشی سیال،  $\rho_g$  چگالی سیال،  $\rho_p$  چگالی ذره،  $\varepsilon$  میزان تخلخل بستر، و  $\varphi_s$  میزان تخلخل بستر می‌باشند. با دقت بر این معادله مشخص است که ارتفاع بستر تاثیری در مقدار حداقل سرعت سیالیت ندارد. سینگ و همکاران برای پیش‌بینی مقدار افت فشار بستر و سرعت در حالت حداقل سیالیت روابط 3 و 4 را ارائه کردند [5]. در رابطه‌ی پیشنهادی آن‌ها تاثیر ارتفاع بستر بر این سرعت در نظر گرفته شده است.

$$-\Delta P_{mf} = (A u_{mf} + B u_{mf}^2) \quad (3)$$

$$u_{mf} = B + \frac{(B^2 + 4AC)}{4A} \quad (4)$$

که پارامترهای آن بر اساس روابط زیر تعریف می‌شوند.

$$A = \frac{150(1-\varepsilon)\mu}{\varepsilon^3(\varphi_s d_p)^2} \quad (5)$$

$$B = \frac{1.75(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g}{\varphi_s d_p} \quad (6)$$

$$\dot{A} = A_b B H \quad (7)$$

$$\dot{B} = A_b A H \quad (8)$$

$$\dot{C} = (1-\varepsilon) (\rho_p - \rho_g) g A_b H \quad (9)$$

ون و یو از رابطه کافی استفاده کرده و برای محاسبه حداقل سرعت سیالیت، زمانی که اطلاعات کاملی از مشخصات ذرات بستر در دسترس نباشد، رابطه 10 را پیشنهاد دادند [6].

$$k_1 Re_{mf}^2 + k_2 Re_{mf} = A_r \quad (10)$$

که در این رابطه

$$A_r = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (11)$$

مجموعه‌ی پخش کننده شامل محفظه‌ی هوا و صفحه‌ی پخش کننده می‌باشد. صفحه‌ی پخش کننده‌ی این دستگاه یک صفحه سوراخ‌دار بود که براساس تئوری اوریفیس طراحی شد. با عبور هوا از این صفحه، جریان از شکل جت خارج شده و به‌صورت یکنواخت مجموعه‌ی پخش کننده را ترک کرده و به بستر تزریق می‌شود. هوای ورودی با دمای 20 تا 25 درجه سانتی‌گراد و فشار اتمسفر وارد بستر می‌شود. برای به‌دست آوردن سرعت هوای ورودی به بستر از دبی سنجی کمک گرفته شد و با معلوم بودن مساحت سطح مقطع و دبی حجمی، سرعت مورد نظر به‌دست می‌آید. برای اندازه‌گیری بازه‌ی گسترده‌ای از دبی جریان هوا، از دو روماتر استفاده می‌شود. اندازه‌گیری فشار کف بستر و همچنین هوای ورودی به آن به‌کمک دو مانومتر انجام می‌گیرد. بررسی نوسانات فشار بستر نیز با استفاده از یک سنسور فشار متصل به محفظه‌ی هوا انجام می‌شود. اطلاعات به‌دست آمده از این سنسور به‌صورت سیگنال‌های آنالوگ بوده که با استفاده کارت A/D به‌صورت دیجیتال درآمده و در کامپیوتر ذخیره می‌شود. با در نظر گرفتن دقت تجهیزات، خطای به‌وجود آمده برای سرعت کمتر از 3 درصد و برای مقدار فشار کمتر از یک درصد می‌باشد.

## 2-2- مشخصات ذرات بستر

ذرات مختلف مشخصه‌های متفاوتی برای سیال شدن دارند. این مشخصه‌ها شامل چگالی، اندازه و شکل ذرات می‌باشد. پارامترهای اثرگذار مربوط به شکل ذرات، میزان کرویت و میزان تخلخل بستر هستند. با در نظر گرفتن این خواص، از ذرات شن سیلیکا برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. ذرات استفاده شده از معادن فیروزکوه و قزوین تهیه شدند که دارای اندازه‌های مختلفی بودند. ذرات مورد استفاده در این تحقیق در محدوده‌ی 212 تا 800 میکرومتر قرار داشت. با توجه به این محدوده و همچنین چگالی آن‌ها، این ذرات در گروه ذرات B از طبقه‌بندی گلدارت [15] واقع می‌شوند. جدول 2 مشخصات به دست آمده برای ذرات شن سیلیکای مورد استفاده را نشان می‌دهد. دانسیته حجمی این ذرات با اندازه‌گیری جرم و حجم طبیعی اشغال شده توسط ذرات به‌دست آمد و برای اندازه‌گیری میزان تخلخل و دانسیته ذره، حجم خالص ذرات به دست آمد. همچنین برای به دست آوردن میزان کرویت ذرات از روش کانی [4] استفاده شد. با توجه به گسترده بودن بازه اندازه ذرات و برای بالا بردن دقت بررسی‌ها، اندازه‌ی ذرات در پنج بازه‌ی کوچک تفکیک شد. این کار با استفاده از روش تجزیه غربالی صورت گرفت. اندازه‌های ذرات غربال شده در جدول 3 ارائه شده است. شکل 2 نیز تصاویر بزرگ شده‌ای از آن‌ها را در اندازه غربال شده  $650\mu\text{m}$  نشان می‌دهد.

## 3- روش تحقیق

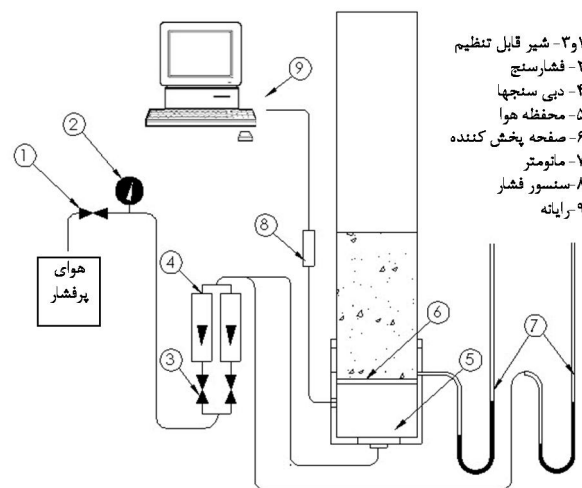
هدف اصلی این تحقیق بررسی حداقل سرعت سیالیت برای ذرات شن سیلیکای مورد نظر و همچنین تاثیر اندازه و ارتفاع بستر بر روی این سرعت می‌باشد و در کنار آن به مساله افت فشار نیز پرداخته می‌شود. بیشتر مطالعات هیدرودینامیک یک بستر سیال بر پایه بررسی رفتار افت فشار در برابر تغییرات سرعت هوای ورودی به بستر می‌باشد که این رفتار بیانگر رفتار هیدرودینامیکی آن بستر است. در آزمایش‌های مربوطه، مقدار فشار کف بستر به‌ازای تغییرات معین سرعت هوای ورودی اندازه‌گیری می‌شود. این روش عمومی‌ترین روش به‌دست آوردن حداقل سرعت سیالیت می‌باشد. این آزمایش‌ها برای تمام ذرات غربال شده انجام می‌پذیرد تا علاوه بر به دست آوردن حداقل سرعت سیالیت این ذرات، تاثیر اندازه ذرات بر روی مقدار حداقل سرعت سیالیت بررسی شود.

با توجه به اهمیت حداقل سرعت سیالیت برای پیش‌بینی رفتارهای یک بستر سیال گازساز، لازم است تا مقدار این سرعت به‌دست آید تا بهتر بتوان رفتارهای هیدرودینامیکی آن بستر را پیش‌بینی نمود. محاسبه سرعت مذکور با استفاده از روابط بیان شده، مقادیر متفاوتی را ارائه می‌دهد. این اختلاف همان‌طور که ذکر شد به دلیل شرایط آزمایشگاهی متفاوت می‌باشد. برای مثال تفاوت در جنس و مهم‌تر از آن، شکل ذرات بستر عواملی هستند که می‌توانند روی این سرعت اثر بگذارند. در مورد مقدار افت فشار نیز این تفاوت وجود دارد. لذا با توجه به اختلاف زیاد موجود در مقادیر محاسبه شده‌ی این دو پارامتر، نمی‌توان به آن‌ها اعتماد نمود. در نتیجه لازم به نظر می‌رسد مقدار قابل اعتماد این دو پارامتر برای ذرات مورد نظر، از طریق آزمایش و در شرایط معین معلوم شود. بنابراین در این تحقیق، حداقل سرعت سیالیت و میزان افت فشار بستر برای ذرات موجود با اندازه‌های مختلف به صورت تجربی به‌دست می‌آید. سپس مقادیر محاسبه شده با نتایج آزمایش مقایسه شده تا علاوه بر تعیین میزان انطباق مقادیر پیش‌بینی شده با این نتایج، رابطه‌ای که بیش‌ترین انطباق را با مقادیر تجربی داشته باشد مشخص شود. به علاوه تاثیر اندازه‌ی ذرات مورد استفاده بر سرعت مذکور نیز بررسی می‌شود تا این مساله در مورد ذرات موجود بر کشور نیز مطالعه شود. همچنین به دلیل اهمیت ارتفاع بستر ذرات به عنوان یکی از پارامترهای موثر بر بازدهی یک بستر سیال گازساز و از طرف دیگر، تناقض‌های مشاهده شده در نتایج مطالعات دیگران در مورد تاثیر این پارامتر بر حداقل سرعت سیالیت، تاثیر ارتفاع بستر بر حداقل سرعت سیالیت در یک بستر سیال سه بعدی از ذرات شن سیلیکای معادن کشور بررسی شده است.

## 2- تجهیزات آزمایش

### 2-1- دستگاه آزمایش

برای بررسی تجربی حداقل سرعت سیالیت و پارامترهای موثر بر آن یک بستر سیال به‌عنوان دستگاه آزمایش طراحی و ساخته شد. مشخصات کلی بستر، شامل هندسه، جنس و اندازه مواد آن با توجه به رژیم جریانی مورد نظر انتخاب شدند. شکل 1 طرح‌واره‌ای از دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد. مقطع این بستر دایروی بوده و قطر آن 14 سانتی‌متر می‌باشد. ارتفاع آن بسته به نوع آزمایش از 5 تا 35 سانتی‌متر متفاوت بوده و ارتفاع کل شامل ارتفاع ذرات و منطقه‌ی آزاد می‌تواند تا 1/5 متر افزایش یابد. هوای پرفشار از مخزن به وسیله‌ی خطوط انتقال به صورت جت وارد مجموعه‌ی پخش کننده می‌شود.



شکل 1 طرح‌واره‌ای از بستر مورد استفاده

تاثیر ارتفاع بستر بر روی این سرعت نیز یکی دیگر از بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق می‌باشد. برای این منظور حداقل سرعت سیالیت سه اندازه از ذرات، در ارتفاعات مختلف به دست آمده و با مقایسه مقادیر این سرعت‌ها تاثیر ارتفاع بستر روی حداقل سرعت سیالیت بررسی می‌گردد.

#### 4- نتایج و تفسیر آن‌ها

##### 4-1- حداقل سرعت سیالیت

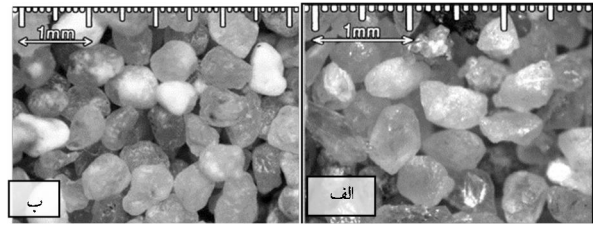
افزایش سرعت هوای ورودی منجر به افزایش مقدار افت فشار بستر می‌شود. از یک سرعت مشخص به بعد مقدار افت فشار تقریباً ثابت شده و تغییرات چندانی در آن مشاهده نمی‌شود. این نقطه در واقع نقطه انتقال بستر از حالت ثابت به سیال می‌باشد و سرعت متناظر با آن، حداقل سرعت سیالیت می‌باشد. شکل 3 رفتار فشار در برابر افزایش سرعت گازهای ورودی را برای بستری از ذرات شن نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است، حداقل سیالیت در محلی اتفاق می‌افتد که رفتار افت فشار بستر تغییر کرده و تقریباً به صورت ثابت باقی می‌ماند. دلیل ثابت بودن افت فشار، تغییر ماهیت بستر ذرات از حالت ثابت به حالت سیال می‌باشد و از این مرحله به بعد، افت فشار همانند افت فشار استاتیکی مایعات، تابعی از ارتفاع بستر می‌گردد که با توجه به عدم تغییر ارتفاع، مقدار آن ثابت باقی می‌ماند. در سرعت‌های بالاتر از حداقل سیالیت، حباب‌های گازی ظاهر می‌گردد که با بالا آمدن و ترکیدن این حباب‌ها در سطح بستر، نوساناتی در ارتفاع بستر ایجاد می‌شود. همین مساله موجب تغییرات نوسانی در مقدار افت فشار در هر لحظه می‌گردد. مقادیر افت فشار ارائه شده در حالت سیالیت حبابی که در نمودار شکل 3 نشان داده شده است، در واقع مقدار متوسط فشاری است که در این آزمایش‌ها مشاهده شد. شکل 4 محدوده فشارهای رویت شده در محدوده سیالیت حبابی را نشان می‌دهد.

با افزایش سرعت هوای ورودی، دامنه نوسانات افت فشار افزایش می‌یابد. علت این افزایش بزرگ شدن اندازه‌ی حباب‌ها بوده و بالا آمدن این حباب‌های بزرگ به سطح بستر و ترکیدن آن‌ها، تغییرات زیادتری را در ارتفاع به وجود می‌آورند که این تغییرات زیاد منجر به نوسانات بیشتر در مقدار افت فشار می‌شود. شکل 5 نوسانات فشار محفظه‌ی هوای ثبت شده توسط سنسور فشار را نسبت به زمان نشان می‌دهد. مقادیر نشان داده شده در این نمودار، فشار محفظه هوای پخش کننده می‌باشد که به نوعی منعکس کننده رفتار فشار بستر می‌باشد. با این حال با اعمال یک ضریب در مقادیر فشار، می‌توان مقادیر آن را به افت فشار بستر تبدیل نمود.

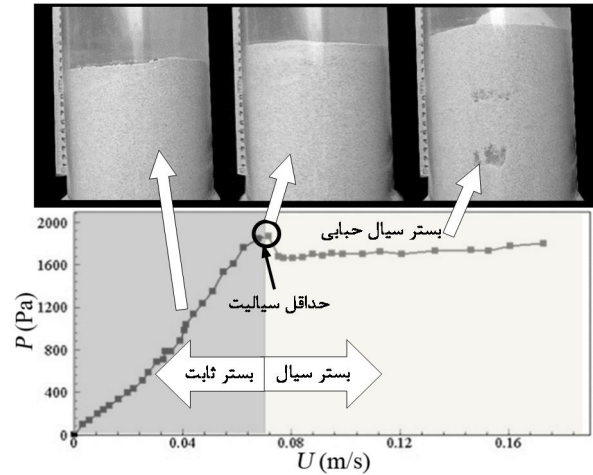
##### 4-2- تاثیر اندازه ذرات بستر

نتایج آزمایش‌های مربوط به حداقل سرعت سیالیت برای بستری به ارتفاع 15 سانتی‌متر از ذرات شن سیلیکا در اندازه‌های مختلف ذرات در شکل 6 نشان داده شده است. اندازه‌هایی که در این شکل ارائه شده است، اندازه متوسط ذرات می‌باشد. شکل 7 تغییرات حداقل سرعت سیالیت را نسبت به افزایش اندازه ذرات شن بستر نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که با افزایش اندازه متوسط ذرات، حداقل سرعت سیالیت برای این ذرات بیشتر می‌شود. علت این افزایش، زیاد شدن وزن ذرات بستر با افزایش قطر متوسط آن‌ها می‌باشد.

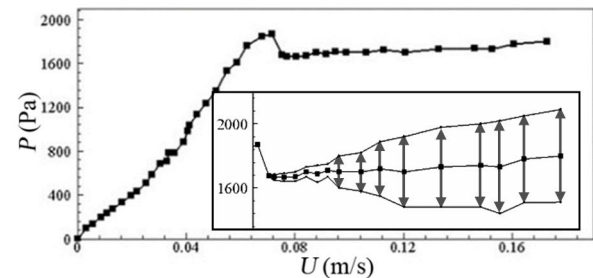
برای بررسی این نتایج و مقایسه آن‌ها با مقادیر به دست آمده از روابط پیش‌بینی موجود یک شیوه نمایش وجود دارد که بیشتر محققین از آن استفاده می‌کنند.



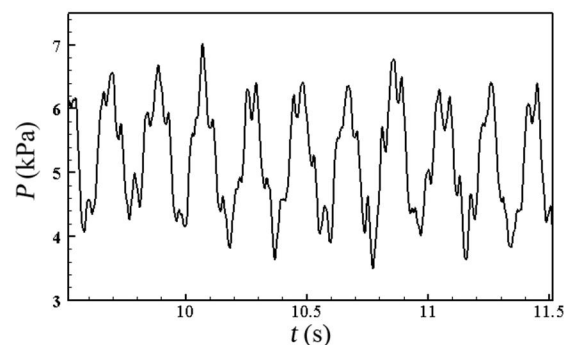
شکل 2 تصاویری بزرگ شده از ذرات شن سیلیکا با اندازه متوسط  $650\mu\text{m}$ ، الف- شن قزوین با بزرگ‌نمایی 25 برابر؛ ب- شن فیروزکوه با بزرگ‌نمایی 35 برابر.



شکل 3 رفتار فشار بستر در برابر سرعت گازهای ورودی



شکل 4 رفتار واقعی فشار بستر در محدوده سیالیت حبابی



شکل 5 نوسانات فشار محفظه‌ی هوا نسبت به زمان در یک بستر سیال حبابی

##### جدول 2 مشخصات ذرات شن استفاده شده برای آزمایش‌ها

محدوده اندازه ( $\mu\text{m}$ )	تخلخل (%)	کرویت (%)	چگالی حجمی ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	چگالی ذره ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
212-800	45	80	1450	2630

##### جدول 3 اندازه‌های ذرات شن غربال شده مورد استفاده در آزمایش‌ها

محدوده اندازه ( $\mu\text{m}$ )	212-250	250-300	420-500	600-700	700-800
اندازه متوسط ( $\mu\text{m}$ )	227	275	460	650	750

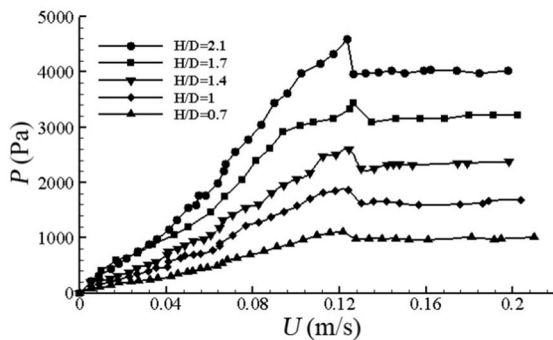
به‌دست آمده از آزمایش، انحراف قابل تاملی دارند. البته مقدار انحراف برخی از روابط نیز نسبتاً زیاد می‌باشد. همچنین رابطه پیشنهادی توسط لوا [9] کمترین انحراف را نسبت به مقدار به‌دست آمده داشته و لذا با توجه به انطباق مناسب آن، بهترین رابطه برای پیش‌بینی حداقل سرعت سیالیت بستری از ذرات مدنظر می‌باشد.

به نظر می‌رسد که یکی از دلایل عمده این پراکندگی‌ها، تفاوت ذرات بستر می‌باشد. مشخصات هندسی ذرات را می‌توان به سه مشخصه اندازه، میزان کرویت، و کیفیت سطح گسترش داد. معمولاً دو مشخصه اول قابلیت سنجش بیشتری دارند؛ اندازه را می‌توان با استفاده از الک‌ها تعیین کرد، کرویت ذرات را می‌توان با مدل‌هایی بیان نمود، ولی کیفیت سطح که میزان وجود صفحات شکست و میزان زبری یا صیقلی بودن سطوح آن را تعیین می‌کنند، به آسانی قابل سنجش و در نتیجه قابل نظر گرفتن نمی‌باشند. این موضوع باعث می‌شود تا رفتار بسترها هنگامی که ذرات متفاوتی (از نظر هندسی) به کار برده می‌شوند، متفاوت باشد.

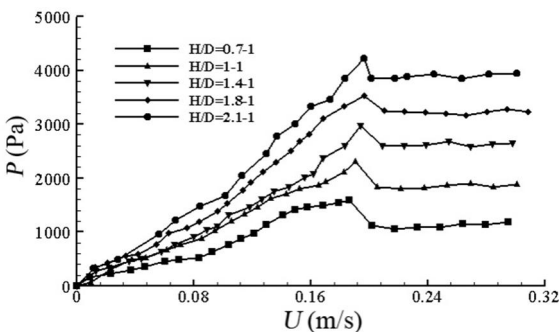
### 3-4- تاثیر ارتفاع بستر

نتایج حاصل از آزمایش‌های مربوط به بررسی تاثیر ارتفاع بستر روی حداقل سرعت سیالیت برای ذرات با قطر متوسط 275 میکرومتر در شکل 9 نشان داده شده است. این آزمایش‌ها برای ذرات 460 و 650 میکرومتری نیز تکرار و نتایج مشابه حاصل گردید. شکل‌های 10 و 11 نتایج آزمایش‌های مذکور را برای ذرات 460 و 650 میکرومتر نشان می‌دهند.

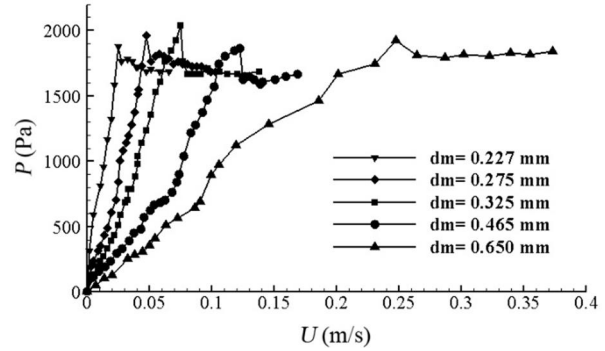
با توجه به اهمیت نسبت ارتفاع به قطر بستر در بررسی‌های هیدرودینامیکی، ارتفاع بستر در این نمودارها در قالب این پارامتر مهم ارائه شده است. همان‌طور که از این نمودارها مشخص است، برای ذرات با اندازه‌های برابر، حداقل سرعت سیالیت در بسترهایی با ارتفاع بیشتر، اندکی بالاتر از بسترهایی با ارتفاع نسبتاً کم‌تر می‌باشد. این مساله می‌تواند به این علت رخ دهد که همراه با افزایش ارتفاع، وزن بستر نیز افزایش یافته و به همین دلیل مقاومت بستر به سیال شدن بیشتر می‌شود.



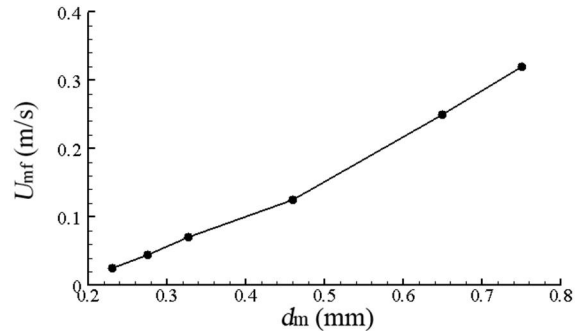
شکل 10 تاثیر ارتفاع بستر بر  $U_{mf}$  برای ذرات شن با اندازه 460 میکرومتر



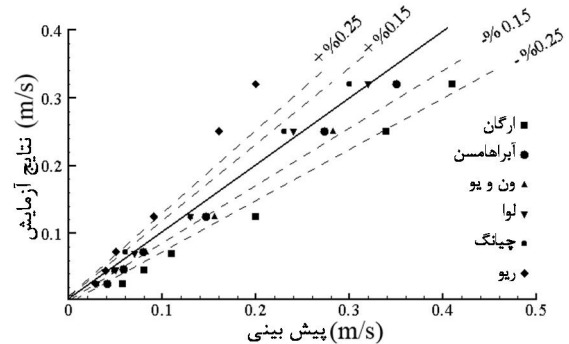
شکل 11 تاثیر ارتفاع بستر بر  $U_{mf}$  برای ذرات شن با اندازه 650 میکرومتر



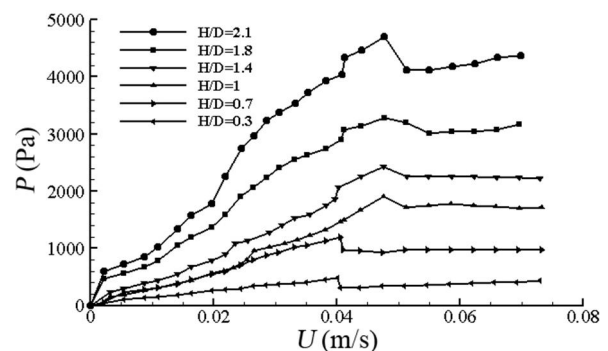
شکل 6 حداقل سرعت سیالیت برای اندازه‌های مختلف ذرات شن سیلیکا



شکل 7 تغییرات حداقل سرعت سیالیت با افزایش اندازه ذرات شن



شکل 8 مقایسه‌ی نتایج تجربی با مقادیر پیش‌بینی شده‌ی  $U_{mf}$



شکل 9 تاثیر ارتفاع بستر بر  $U_{mf}$  برای ذرات شن با اندازه 275 میکرومتر

شکل 8 نتایج به‌دست آمده از آزمایش را با مقادیر محاسبه شده از پنج رابطه ارائه شده را در قالب این نمودار نشان می‌دهد. تصویر هر نقطه‌ی این نمودار در محور عمودی، سرعت به‌دست آمده از آزمایش بوده و تصویر همان نقطه روی محور افقی، نشان‌دهنده مقدار پیش‌بینی شده‌ی آن به کمک یکی از روابط ارائه شده می‌باشد. هرگونه انحراف از خط 45 درجه بیانگر انحراف مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به نتایج آزمایش‌ها می‌باشد. از این نمودار می‌توان دریافت که مقادیر محاسبه شده از روابط بیان شده نسبت به نتایج

مقدار افت فشار بستر نمی‌گذارد. همچنین با مشاهده رفتار بستر در برابر تغییرات ارتفاع بستر، مشخص است که مقدار افت فشار بستر با افزایش ارتفاع آن افزایش می‌یابد. علت این مساله رفتار سیال‌گونه بستر می‌باشد و این افزایش همانند فشار هیدرواستاتیکی در مایعات، بایستی به‌صورت خطی تغییر کند. شکل 13 تغییرات افت فشار بستر سیال شده را به ازای تغییر در ارتفاع بستر نشان می‌دهد. برای مقایسه فشارهای پیش‌بینی شده و نتایج آزمایش از همان روش به کار رفته برای مقایسه حداقل سرعت سیالیت استفاده شد که نتایج آن در شکل 14 نشان داده شده است. این نمودار نشان دهنده میزان انطباق مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر تجربی به‌دست آمده و از روی آن می‌توان میزان انحراف مقادیر محاسبه شده از روابط پیشنهادی سینگ و ارگان را نسبت به نتایج تجربی به‌دست آورد.

با دقت بر این نمودار، انحراف زیادی میان این مقادیر به‌دست آمده از آزمایش و مقادیر پیش‌بینی شده برای افت فشار بستر، مشاهده نمی‌شود.

#### 5- نتیجه‌گیری

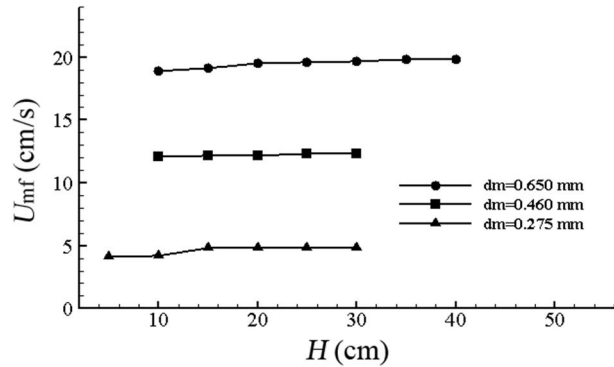
در این تحقیق با انجام چند دسته آزمایش حداقل سرعت سیالیت و افت فشار در یک بستر سیال متشکل از ذرات شن سیلیکا با دانه‌بندی معین بررسی شده است. در این آزمایش‌ها تاثیر اندازه ذرات و همچنین ارتفاع بستر بر روی حداقل سرعت سیالیت مطالعه شده است. نتیجه این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که حداقل سرعت سیالیت با افزایش ارتفاع بستر، افزایش می‌یابد. اما میزان این افزایش چشمگیر نبوده و می‌توان از تاثیر ارتفاع بر این سرعت در محدوده‌ی مطالعه شده چشم‌پوشی نمود. همچنین برای ذرات استفاده شده، با بزرگ شدن اندازه ذرات حداقل سرعت سیالیت افزایش می‌یابد. در مورد افت فشار بستر، نتیجه این بررسی نشان می‌دهد که همانند آنچه که در سیالات مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع، افت فشار بستر افزایش می‌یابد که این افزایش با تغییر ارتفاع به صورت خطی تغییر می‌کند. با مقایسه نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها و مقادیر محاسبه شده از روابط موجود متداول برای افت فشار بستر، معلوم می‌شود که انحراف زیادی بین این مقادیر وجود ندارد. این بدان معنی است که اغلب روابط مذکور از عمومیت قابل قبولی برخوردارند.

#### 6- فهرست علائم

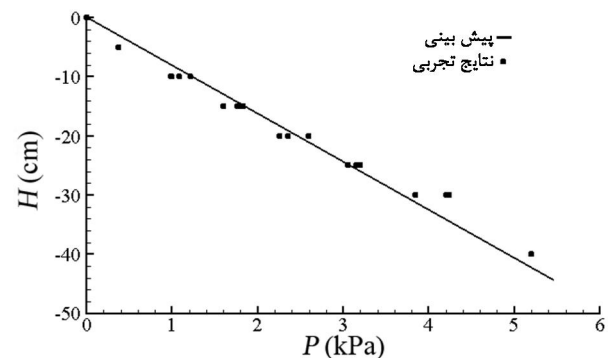
$A$	مساحت سطح مقطع ( $m^2$ )
$d$	قطر ذرات (m)
$H$	ارتفاع بستر (m)
$\Delta P$	افت فشار بستر ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )
$Re$	عدد رینولدز
$A_r$	عدد ارشمیدس
$u$	سرعت هوای ورودی ( $ms^{-1}$ )
$g_c$	ضریب تبدیل شتاب ثقل در دستگاه آحاد بریتانیایی
<b>علائم یونانی</b>	
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\varepsilon$	جزء تهی بستر
$\varphi_s$	میزان کروییت ذرات

#### زیرنویس‌ها

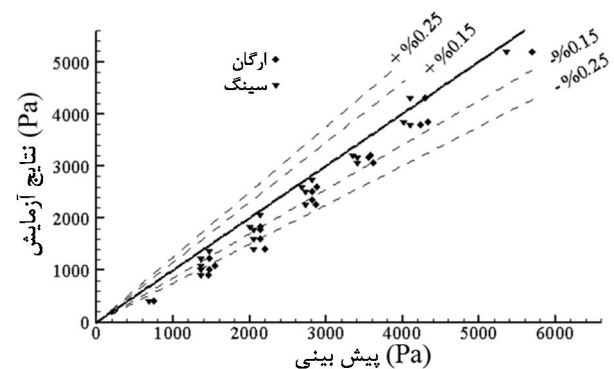
b بستر ذرات



شکل 12 تغییرات حداقل سرعت سیالیت با تغییر ارتفاع بستر



شکل 13 تغییرات افت فشار بستر با تغییر ارتفاع آن



شکل 14 مقایسه‌ی مقادیر پیش‌بینی شده با نتایج آزمایش برای افت فشار بستر

شکل 12 تغییرات حداقل سرعت سیالیت با تغییر ارتفاع بستر را برای ذرات شن با سه اندازه مختلف نشان می‌دهد. در این شکل افزایش جزئی سرعت مذکور را با افزایش ارتفاع بستر می‌توان مشاهده نمود. میزان افزایش در بسترهایی با ذرات مختلف متفاوت است، اما در محدوده‌ی ذرات استفاده شده نمی‌توان نتیجه‌ای در مورد تاثیر اندازه بر مقدار این افزایش گرفت. بنابراین در این محدوده‌ی ذرات، به طور کلی افزایش ارتفاع بستر سبب افزایش حداقل سرعت سیالیت می‌گردد. اما این تاثیر به صورت خطی نبوده و میزان افزایش نیز چشم‌گیر نمی‌باشد. بنابراین ممکن است قابل توجه نبودن میزان افزایش این سرعت با افزایش ارتفاع بستر سبب شده باشد تا برخی از محققین عدم وابستگی حداقل سرعت سیالیت به ارتفاع بستر را نتیجه بگیرند.

#### 4-4- افت فشار بستر

رفتار افت فشار بستر نیز یکی از مطالعات انجام شده در این تحقیق می‌باشد. با مقایسه مقادیر افت فشار بستر در شکل 6، برای اندازه‌های مختلف ذرات بستری با ارتفاع معین، می‌توان نتیجه گرفت که اندازه ذرات تاثیری بر روی

- [5] R. K. Singh, A. Suryanarayana and G. K. Roy. Prediction Of Minimum Fluidization Velocity And Bed Pressure Drop In Non-circular Gas-solid Fluidized Bed, *Indian Chem. Engr.*, Section A. Vol. 37, Nos. 1, 2, pp.17-22, 1995.
- [6] Wen CY, Yu YH. Mechanics of fluidization. *Chem Eng Prog Symp*, Ser 62(62), pp. 100-111, 1966.
- [7] D. C. Sau, S. Mohanty, and K. C Biswa. Minimum fluidization velocities and maximum bed pressure drops for gas-solid tapered fluidized beds. *Chemical Engineering Journal*, pp. 132, 151-157, 2007.
- [8] H. J. Ryu, N. Y. Lim, D. H. Bae and G.T Jin. Minimum Fluidization Velocity and Transition Velocity to Fast Fluidization of Oxygen Carrier Particle for Chemical-Looping Combustor. *Hwahakkonghak*, 41, pp.624-631, 2003.
- [9] M. Leva, T. Shirai, C.Y. Wen. Prediction of onset fluidization in beds of granular Solids, *Genie Chimique*, 75 (2), pp. 33, 1956.
- [10] A. Abrahamsen, D. Geldart, Behaviour of gas-fluidized beds of fine powders. Part II, *Power Technol.*, 26, pp. 47-55, 1980.
- [11] C.S. Chyang, W.C. Huang, Characteristics of large particle fluidization. *Journal of The Chinese Institution of Chemical Engineers*, 19 (2), pp. 81-89, 1988.
- [12] D. J. Gunn and N Hilal. The expansion of gas-fluidised beds in bubbling fluidisation. *Chemical Engineering Science*, 52(16), pp. 2811-2822, 1997.
- [13] David Roberto Escudero. Bed height and material density effects on fluidized bed hydrodynamics. *Chemical Engineering Science*, 66(6), pp. 3648-3655, 2011.
- [14] A. Johari, M. R. TAIB. effect of sand sizes on the fluidization behavior in circular and rectangular columns. *Journal of Chemical and Natural Resources Engineering*, 2, pp. 14-21, 2007.
- [15] D. Geldart, The effect of particle size and size distribution on the behavior of gas-fluidized beds. *Powder Technol*, pp. 201-205, 1972.

mf حالت حداقل سیالیت

p ذره جامد

g سیال عامل

m متوسط

## 7- تشکر و قدردانی

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

## 8- مراجع

- [1] S. N. Oka. *Fluidized Bed Combustion*. Monticello, NY: Marcel Dekker, Inc., pp. iii, 2004.
- [2] G. Ramos, M Garcia Ruiz, Prieto Marqués, J. J., and Guardiola Soler, J. Minimum fluidization velocities for gas-solid 2d beds. *Chemical Engineering and Processing*, 41(9), pp. 761-764, 2002.
- [3] C. K. Gupta, D. Sathiyamoorthy. *Fluid Bed Technology in Materials Processing*. Florida: CRC Press LLC, pp. 25, 1999.
- [4] D. Kunii, and O. Levenspiel. *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)