

Research Article



DOI: 10.22034/ijche.2022.320305.1164



DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.125.4.4



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

Experimental Investigation of Bubble Growth in a Semi-Cylindrical Gas-Solid Fluidized Bed

N. Nikjou¹, R. Sotudeh-Gharebagh^{2*}, N. Mostoufi², R. Zarghami²

1- M. Sc in Chemical Engineering, University of Tehran

2- Professor of Chemical Engineering, University of Tehran

Email: sotoudeh@ut.ac.ir

Abstract

Fluidized beds are widely used in various processes such as mixing, catalytic and non-catalytic reactions, etc. In this article, the hydrodynamic properties of the gas-solid semi-cylindrical fluidized bed, which are affected by bubble properties including shape, size and rising velocity, are investigated for glass beads of 420 μm . For this purpose, a digital image analysis technique was employed to study the bubble behavior. The experiments were carried out in a semi-cylindrical fluidized bed with a diameter of 14 cm at ambient pressure and temperature. The static bed height was 21 cm ($L/D=1.5$) in all cases and the superficial velocity of the gas was varied in the range of 0.2 to 0.8 m/s. All properties of bubbles were investigated by increasing the superficial gas velocity and the height of the bed. The results showed that aspect ratio, size and rising velocity of bubbles increase with increasing the superficial gas velocity. The values of bubble size and its rising velocity, which were obtained experimentally, were in good agreement with the values calculated through the proposed equations and the relative errors were 3.5% and 7 %, respectively. Besides, all mentioned properties of bubbles increased by increasing the height of the bed. The advantage of a semi-cylindrical bed over a cylindrical one is that through its flat surface, the phenomena inside the bed can be observed by a non-intrusive method. The results of these experiments can help to understand the complicated hydrodynamic behavior of fluidized beds.

Received: 18 December 2021

Accepted: 16 March 2022

Page Number: 69-78

Keywords:

Fluidized Bed,
Bubble,
Semi-Cylindrical,
Digital Images

Please Cite this Article Using:

Nikjou, N., Sotudeh-Gharebagh, R., Mostoufi, N., Zarghami, R., "Experimental Investigation of Bubble Growth in a Semi-Cylindrical Gas-Solid Fluidized Bed", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 21, No. 125, pp. 69-78, In Persian, (2023).



مطالعه تجربی رشد حباب در یک بستر سیال گاز - جامد نیم استوانه‌ای

نفسه نیکجو^۱، رحمت ستوده قره‌باغ^{۲*}، نوید مستوفی^۱، رضا ضرغامی^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

پیام نگار: sotoudeh@ut.ac.ir

چکیده

بسترهای سیال شده در فرایندهای مختلفی نظیر خشک کردن، مخلوط کردن، انجام واکنش‌های کاتالیستی و غیر کاتالیستی استفاده می‌شوند. در این مقاله، ویژگی‌های هیدرودینامیکی یک بستر سیال نیم استوانه‌ای گاز- جامد که متأثر از ویژگی‌های حباب شامل اندازه، شکل و سرعت بالارفتن حباب است، به صورت تجربی در سرعت‌های ظاهری مختلف گاز برای ذرات ۴۲۰ میکرومتر به وسیله تصویربرداری دیجیتال مطالعه شده است. آزمایش‌ها در یک بستر سیال نیم استوانه‌ای به قطر ۱۴ سانتی‌متر در فشار و دمای محیط انجام شدند. ارتفاع بستر پر شده در حالت ایستا ۲۱ سانتی‌متر ($L/D = 1/5$) و سرعت ظاهری گاز در محدوده ۰/۲ تا ۰/۸ متر بر ثانیه متغیر بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش سرعت ظاهری گاز و ارتفاع، متوسط اندازه و سرعت بالارفتن حباب‌ها در بستر افزایش می‌یابد. مقادیر به دست آمده به روش تجربی با مقادیر حساب شده از معادلات تجربی، انطباق قابل قبولی داشتند و میانگین درصد خطای حساب شده اندازه حباب و سرعت بالارفتن آن به وسیله آزمایش‌ها و روابط موجود به ترتیب برابر ۳/۵ و ۷ درصد به دست آمد. برتری بستر نیم استوانه‌ای نسبت به استوانه‌ای این است که از راه وجه مسطح آن می‌توان به صورت غیرتداخلی، پدیده‌های درون بستر را مشاهده کرد. نتایج این آزمایش‌ها می‌تواند به درک رفتار پیچیده هیدرودینامیکی بسترهای سیال کمک کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۵

شماره صفحات: ۶۹ تا ۷۸

کلیدواژه‌ها:

بستر سیال،

حباب،

نیم استوانه‌ای،

تصاویر دیجیتال

* تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه چندانازی

استناد به مقاله:

نیکجو، ن.، ستوده قره‌باغ، ر.، مستوفی، ن.، ضرغامی، ر.، "مطالعه تجربی رشد حباب در یک بستر سیال گاز - جامد نیم استوانه‌ای"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست و یکم، شماره ۱۲۵، صص. ۷۸-۶۹، (۱۴۰۱).

یک بستر سیال گاز- جامد واحدی عملیاتی است که در آن ذرات جامد با معلق شدن در یک گاز یا مایع به یک شبه سیال تبدیل می شوند. سامانه های بستر سیال کاربردهای وسیعی در فرایندهای فیزیکی و شیمیایی نظیر تبادل حرارت، خشک کردن، جذب سطحی، واکنش های شیمیایی، کراکینگ (خردایش) هیدروکربن ها، احتراق، و غیره دارند. هم چنین این بسترها نقشی کلیدی در بسیاری از صنایع نظیر نفت، گاز، پتروشیمی، شیمیایی، معدنی، داروسازی، غذایی و غیره ایفا می کنند. با وجود برتری های بسیار زیاد بسترهای سیال، کمبود اطلاعات درباره هیدرودینامیک این سامانه ها، کاربرد وسیع آن ها را در مقیاس صنعتی محدود کرده است. به همین دلیل، محققان تلاش های زیادی در راستای درک ساختارهای هیدرودینامیکی این سامانه برای طراحی مناسب، بهینه سازی و کنترل راکتورهای بستر سیال انجام داده اند [۲]. به طور کلی هیدرودینامیک بسترهای سیال با سرعت سیال ورودی و مشخصات فیزیکی ذرات تغییر می کند [۳]. تقریباً تمام ویژگی های بسترهای سیال از جمله میزان نرخ تبادل گاز بین فازها، حرکت ذرات، زمان اقامت گاز و ذرات، میزان تبدیل واکنش و نرخ انتقال جرم و گرما به طور قابل توجهی تحت تأثیر ویژگی های حباب، نظیر اندازه، شکل و سرعت بالارفتن آن ها، در طول بستر است [۴].

به دلیل تقارن در هندسه و توزیع یک نواخت جریان، بیشتر بسترهای سیال در صنایع فرایندی به صورت استوانه ای ساخته می شوند [۵]. اما مطالعه رشد حباب در بستر سیال استوانه ای کار دشواری است و حتماً باید برای این کار ساده سازی های متعددی را در نظر گرفت. از این روی، کانی و لون اشپیل [۱] از بسترهای دوعده ای به عنوان روشی جایگزین به منظور مطالعه سیالیت گاز- جامد نام برده اند [۲]. از طرفی به نظر می رسد که طبق آزمایش ها، خصوصیات هیدرودینامیکی دو بستر سیال استوانه ای و نیم استوانه ای مشابه هستند [۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰]. بنابراین می توان بستر سیال نیم استوانه ای را مطالعه کرد و در نهایت نتایج آن را به بستر سیال استوانه ای تعمیم داد. از برتری های بستر سیال نیم استوانه ای می توان به مشاهده پدیده هایی نظیر تشکیل، بالارفتن، به هم پیوستن و شکستن حباب ها از وجه مسطح اشاره کرد که مطالعه پدیده ها را در این نوع بستر آسان تر و عملی می کند. در کار حاضر سعی شده است که در

راستای درک هیدرودینامیک درون بستر، علاوه بر بررسی ویژگی های حباب بر حسب افزایش سرعت، این ویژگی ها بر حسب ارتفاع هم بررسی شوند.

برای پیش بینی اندازه حباب در بستر یا صحت سنجی نتایج به دست آمده از آزمایش ها می توان از معادله موری و ون [۱۱] بهره برد:

$$\frac{D_{BM}-D_b}{D_{BM}-D_{B0}} = \exp(-0.3h/D) \quad (1)$$

که در آن D_{B0} ، D_b ، D و h به ترتیب نشان دهنده حداکثر قطر حباب به دلیل به هم پیوستن کل حباب ها، اندازه حباب، قطر اولیه حباب به هنگام خروج از توزیع کننده، قطر و ارتفاع بستر هستند. هم چنین، مقادیر D_{BM} و D_{B0} را در شرایطی که توزیع کننده از نوع سوراخ دار باشد، به ترتیب می توان از روابط زیر حساب کرد:

$$D_{B0} = 0.347 \left\{ A_t (u - u_{mf}) / n_d \right\}^{2/5} \quad (2)$$

$$D_{BM} = 0.652 \{ A_t (u - u_{mf}) \}^{2/5} \quad (3)$$

که در آن A_t ، n_d و u به ترتیب نشان دهنده سطح مقطع بستر سیال، تعداد اوربیس های بستر سیال، سرعت سطحی گاز و حداقل سرعت سیالیت هستند.

برای پیش بینی سرعت بالارفتن حباب در بستر یا صحت سنجی نتایج به دست آمده از آزمایش ها می توان از معادله دیویدسون [۱۲] که در رابطه زیر ذکر شده است، استفاده کرد:

$$U_b = u_{excess} + 0.35\sqrt{gD} \quad (4)$$

که در آن u_{excess} و D به ترتیب برابرند با سرعت اضافی گاز و قطر بستر.

۲. روش آزمایش

همه آزمایش ها در یک بستر سیال سرد نیم استوانه ای با قطر = ۱۴

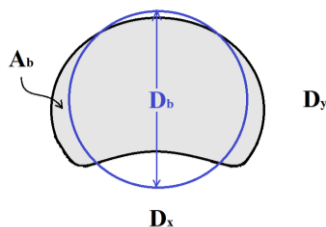
دیجیتال استفاده شد. وضوح این دوربین ۱۰۸۰ پیکسل بود و تصاویر را با سرعت ۱۲۰ تصویر در ثانیه ثبت می‌کرد. دوربین فیلم‌برداری روبه‌روی قسمت تخت بستر قرار داده شده بود تا به دلیل نبود انحنای فیلم‌برداری راحت‌تر انجام گیرد. مدت زمان هر فیلم‌برداری در هر آزمون ۱۰۰ ثانیه بود.

۳. پردازش داده‌ها

در پژوهش حاضر، تصاویری که با دوربین فیلم‌برداری از قسمت مسطح بستر نیم‌استوانه‌ای به دست آمد، به صورت دیجیتالی پردازش شد تا اندازه و سرعت حباب‌ها مشخص شود. در مرحله نخست به کمک نرم‌افزار^۱ Video to JPG Converter، ویدئوی ضبط‌شده به دسته‌ای متوالی از تصاویر تبدیل شد. سپس از نرم‌افزار^۲ ImageJ برای تجزیه و تحلیل تصاویر استفاده شد. برای تشخیص مرز بین حباب‌ها و امولسیون از تنظیم آستانه برای ایجاد تضاد رنگی با نرم‌افزار ImageJ استفاده شد. بنابراین تصویر اصلی با در نظر گرفتن مقدار آستانه برای شدت پیکسل تصاویر، مقیاس خاکستری به یک تصویر سیاه و سفید تبدیل شد. برای اطمینان از مقایسه مناسب بین ویژگی‌های حباب در بستر نیم‌استوانه‌ای، تصاویر به دست آمده از بستر در سرعت‌های مختلف به چند بخش، تقسیم و ویژگی حباب‌ها در آن بخش بررسی شد. بدین ترتیب، ویژگی‌های حباب علاوه بر افزایش سرعت سطحی گاز، بر حسب افزایش ارتفاع هم حساب شد. نسبت ابعاد حباب با این رابطه تعریف می‌شود:

$$AR = \frac{D_y}{D_x} \quad (5)$$

که در آن D_x و D_y به ترتیب طول‌های عمودی و افقی حباب هستند که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.



شکل ۲: ابعاد حباب.

Figure 2. Bubble dimensions.

سانتی متری که جنس آن پلکسی گلس بود در فشار اتمسفریک انجام شد. به منظور بررسی تأثیر سرعت ظاهری و ارتفاع بستر بر خواص حباب، از ذرات شیشه‌ای در اندازه ۴۲۰ میکرومتر (متعلق به گروه گلدارت B) در آزمایش‌ها استفاده شد. در این بستر، هوا از راه یک صفحه توزیع‌کننده گاز به بستر، وارد و میزان جریان آن با یک کنترل‌کننده جریان جرمی کنترل می‌شود. یک سیکلون در بالای بستر قرار داشت تا مانع خروج ذرات از بستر شود. ابعاد و مشخصات این بستر نیم‌استوانه‌ای در جدول (۱) آمده است. در ادامه، تصویری از این بستر در شکل (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های بستر سیال نیم‌استوانه‌ای

Table 1. Characteristics of semi-cylindrical fluidized bed.

Internal diameter (cm)	Height (m)	Distributor plate	Holes	Triangle pitch (mm)
14	1	Perforated	217	7

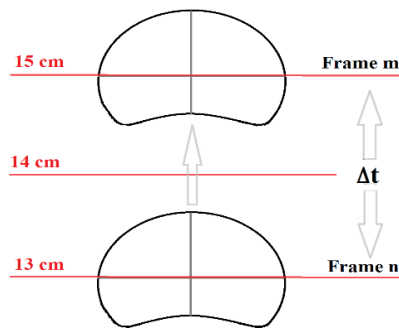


شکل ۱. عکس بستر سیال نیم‌استوانه‌ای

Figure 1. Image of Semi-Cylindrical Fluidized Bed

در تمام آزمایش‌ها، ارتفاع اولیه بستر ۲۱ سانتی‌متر ($H/D=1/5$) و سرعت ظاهری گاز در محدوده ۰/۲ تا ۰/۸ متر بر ثانیه تغییر داده شد و بستر در در حالت سیالیت حبابی قرار داشت. از دوربین فیلم‌برداری GoPro (مدل Hero 4 black) برای اندازه‌گیری حباب و سرعت بالا رفتن حباب در بستر سیال با تجزیه و تحلیل تصاویر

1. <https://www.dvdvideosoft.com/products/dvd/Free-Video-to-JPG-Converter.htm>
2. <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>



شکل ۳. محاسبه سرعت بالارفتن حباب.

Figure 3. Bubble velocity calculation.

۴. نتایج

شکل (۴)، متوسط اندازه حباب اندازه‌گیری شده را در ۱۴ سانتی‌متر بالاتر از توزیع کننده، به‌عنوان تابعی از سرعت ظاهری در یک بستر سیال نیم‌استوانه‌ای با ذرات ۴۲۰ میکرومتر و هم‌چنین مقادیر مربوطه را که از رابطه موری و ون [۱۱] ارزیابی شده است، نشان می‌دهد. چنان‌که در این شکل دیده می‌شود، اندازه به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها با ارقام برآورد شده با معادله موری و ون [۱۱] مطابقت قابل قبولی دارد و مقدار خطای نسبی ۳/۵ درصد حساب شد. این شکل نشان می‌دهد که افزایش سرعت ظاهری گاز، منجر به افزایش اندازه حباب در بستر سیال - به‌دلیل افزایش نرخ ادغام حباب‌ها - می‌شود [۱۳، ۱۴].

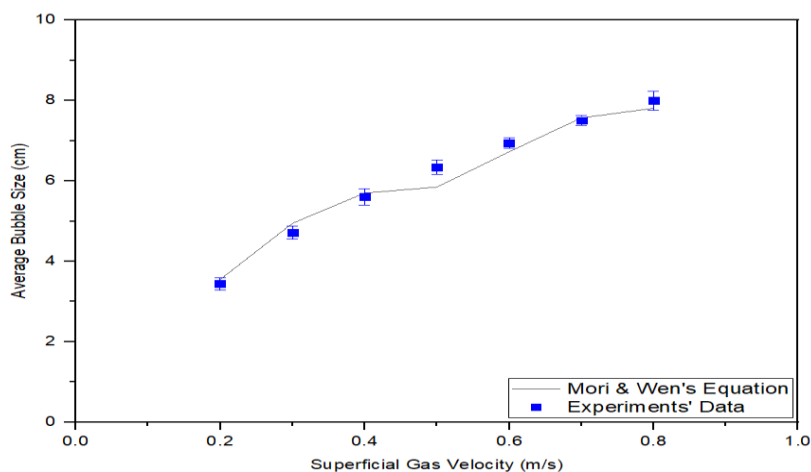
ناحیه اشغال شده به‌وسیله حباب، A_b ، به شکل یک دایره فرض شده است و با به‌دست‌آوردن سطح حباب، می‌توان قطر معادل آن یا به‌عبارتی اندازه حباب، D_b ، را حساب کرد. برای محاسبه اندازه حباب از این رابطه استفاده شد:

$$D_b = \sqrt{4A_b/\pi} \quad (6)$$

چنان‌که در شکل (۳) نشان داده شده، سرعت بالآمدن حباب در طول بستر، U_b ، با تفاوت زمانی بین فریم‌ها هنگام حرکت مرکز حباب از نقطه اول به نقطه دوم تعیین شد؛ به‌عبارتی مرکز حباب، مبنای محاسبات در نظر گرفته و حرکت حباب در طول بستر نسبت به این نقطه حساب شد. بنابراین سرعت بالآمدن حباب در طول بستر از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$U_b = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (7)$$

پس از محاسبه مقادیر اندازه و سرعت بالارفتن حباب با داده‌های آزمایشگاهی و مقایسه آن‌ها با معادلات موری و ون [۱۱] و دیویدسون [۱۲]، درصد خطای نسبی حساب شد. هم‌چنین برای صحت‌سنجی نتایج، آزمایش‌ها سه بار تکرار شدند.



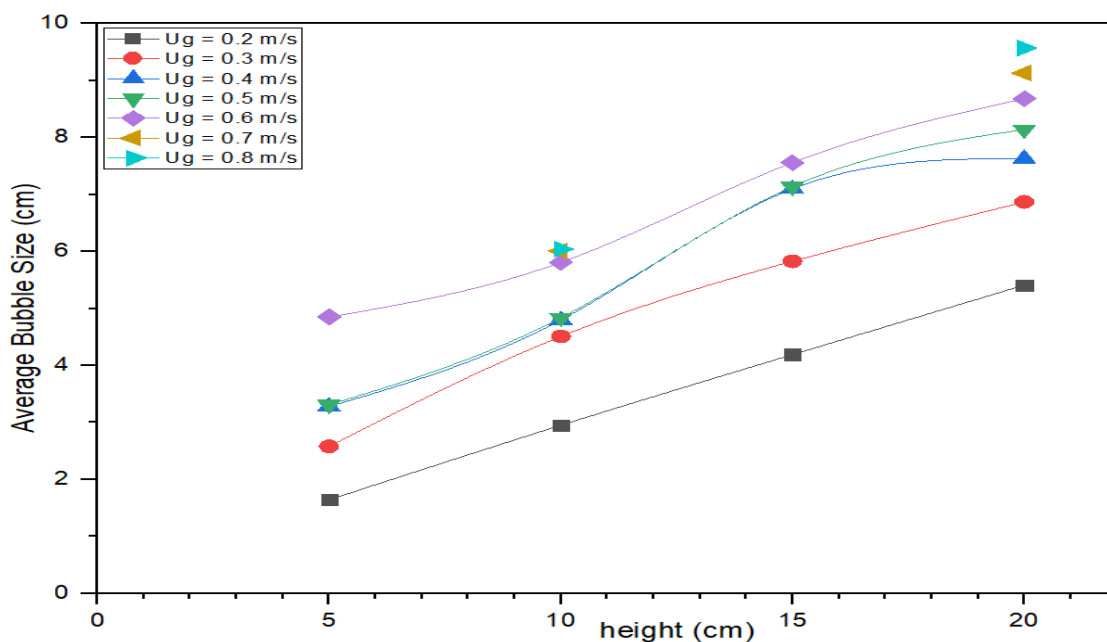
شکل ۴. متوسط اندازه حباب در بستر سیال نیم‌استوانه‌ای با ذرات ۴۲۰ میکرومتر برحسب سرعت‌های سطحی گاز (۰/۸ - ۰/۲ m/s). ارتفاع بستر در حالت ایستا برابر ۲۱ cm ($L/D=1.5$) بود.

Figure 4. Average bubble size against superficial gas velocities of 0.2 - 0.8 m/s in semi-cylindrical fluidized bed of 420 μ m particles. The static bed height was 21 cm ($L/D = 1.5$).

به دست آمده از معادله دیویدسون [۱۲] مقایسه شده است. بدیهی است که با افزایش سرعت ظاهری گاز، سرعت بالارفتن حباب در بستر سیال افزایش می‌یابد [۶]. افزایش سرعت ظاهری گاز منجر به تشکیل تعداد بیشتری از حباب‌ها با اندازه‌های بزرگتر می‌شود که دلیل آن تماس بیشتر با حباب‌های دیگر و تجمع حباب‌هاست [۱۶]. در نتیجه، با افزایش سرعت ظاهری گاز در نتیجه افزایش نیروی شناوری روی حباب، سرعت بالارفتن حباب در بستر افزایش می‌یابد. علاوه بر این، حباب‌هایی که سریع‌تر در طول بستر حرکت می‌کنند، باعث افزایش برخورد بین آن‌ها و منجر به ادغام سریع‌تر حباب‌ها و در نهایت تولید حباب‌های بزرگتر می‌شوند. بزرگ‌تر شدن اندازه حباب‌ها موجب افزایش سرعت بالا رفتن آن‌ها می‌شود [۶]. از این رو می‌توان خطاهای بیشتر را برای سرعت افزایش حباب در سرعت‌های سطحی گاز بالاتر انتظار داشت. در شکل (۶) مشاهده می‌شود که سرعت تجربی بالارفتن حباب در بستر سیال با سرعت پیش‌بینی شده دیویدسون [۱۲] مطابقت خوبی دارد و خطای نسبی ۷ درصد حساب شد.

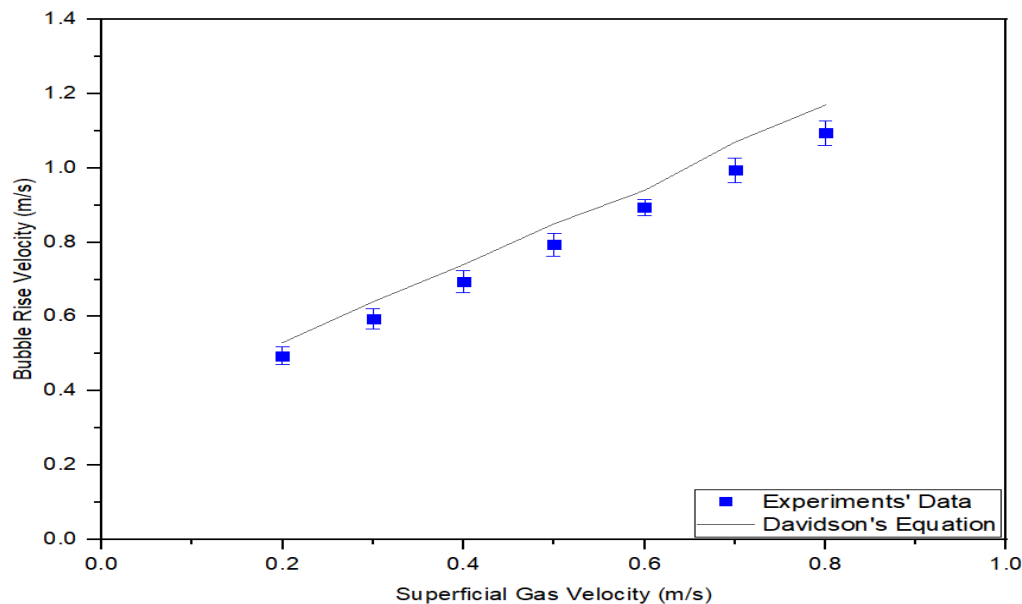
میانگین اندازه حباب بر حسب ارتفاع بستر در شکل (۵) نمایش داده شده است. به منظور بررسی رفتار حباب‌ها، اعم از اندازه، سرعت بالارفتن و شکل حباب‌ها، در ارتفاع‌های مختلف، بستر در سرعت‌های کم (تا 0.6 m/s) به ۴ بخش ۵-۱۰، ۱۰-۱۵ و ۱۵-۲۰ سانتی‌متر و در سرعت‌های بیشتر (0.8 m/s - 0.7 m/s) به دو بخش ۱۰-۲۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متر تقسیم شد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، اندازه حباب‌ها در ارتفاع‌های بالاتر بزرگ‌تر است و دلیل آن را چنین می‌توان پنداشت که با بالآمدن حباب در طول بستر، آن‌ها به هم می‌پیوندند و حباب‌های بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند.

به گفته کریمی‌پور و پاگسلی [۱۳]، معادله پیشنهادی دیویدسون [۱۲] بهترین برآورد سرعت بالارفتن حباب را در بسترهای سیال سه‌بعدی گاز- جامد برای ذرات گلدات B ارائه می‌دهد. سرعت افزایش حباب در بستر سیال نیم‌استوانه‌ای که با ذرات ۴۲۰ میکرومتر پر شده است، در سرعت‌های سطحی مختلف گاز در شکل (۵) نشان داده شده و خطای نسبی آن‌ها با مقادیر



شکل ۵. متوسط اندازه حباب بر حسب ارتفاع‌های متفاوت در بستر سیال نیم‌استوانه‌ای با ذرات ۴۲۰ میکرومتر. ارتفاع بستر در حالت ایستا برابر ۲۱ cm ($L/D=1.5$) بود.

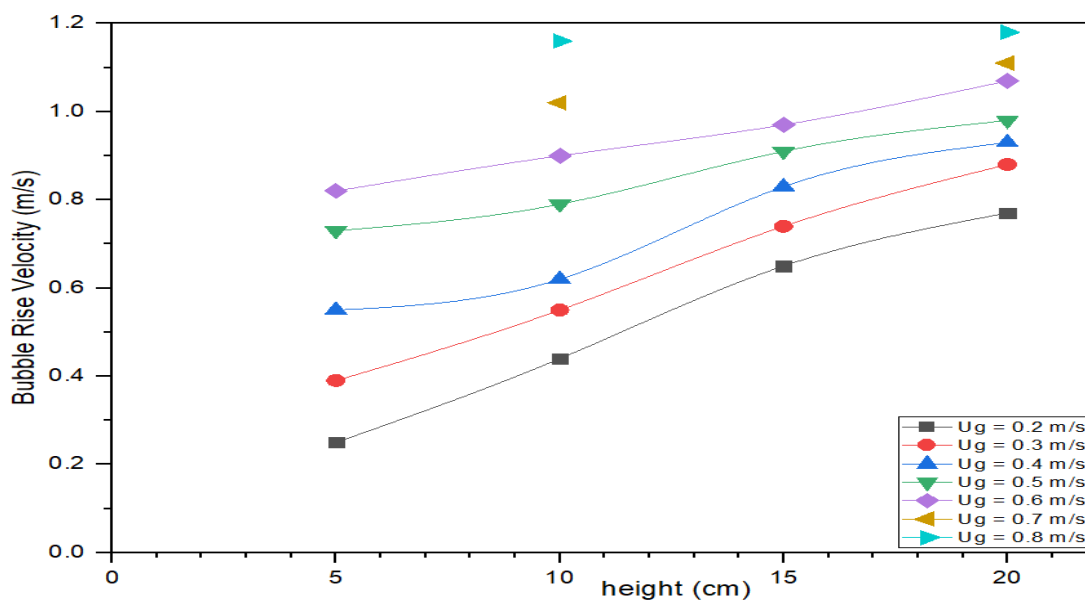
Figure 5. Average bubble size against different heights in semi-cylindrical fluidized bed of 420 μm particles. The static bed height was 21 cm ($L/D = 1.5$).



شکل ۶. سرعت بالارفتن حباب بر حسب سرعت سطحی گاز (۰/۲ - ۰/۸ m/s) در بستر سیال نیم استوانه‌ای با ذرات ۴۲۰ میکرومتر. ارتفاع بستر در حالت ایستا برابر ۲۱ cm ($L/D=1.5$) بود.

Figure 6. Bubble rise velocities against superficial gas velocities of 0.2 – 0.8 m/s in semi-cylindrical fluidized bed of 420 μ m particles. The static bed height was 21 cm ($L/D = 1.5$).

سرعت بالارفتن حباب بر حسب ارتفاع بستر در شکل (۷) حباب‌ها در ارتفاع‌های بالاتر با سرعت بیشتری در طول بستر حرکت نمایش داده شده است. چنان‌که در شکل نشان داده شده است، می‌کنند.



شکل ۷. نمودار سرعت بالا رفتن حباب بر حسب ارتفاع‌های متفاوت در بستر سیال نیم استوانه‌ای با ذرات ۴۲۰ میکرومتر. ارتفاع بستر در حالت ایستا برابر ۲۱ cm ($L/D=1.5$) بود.

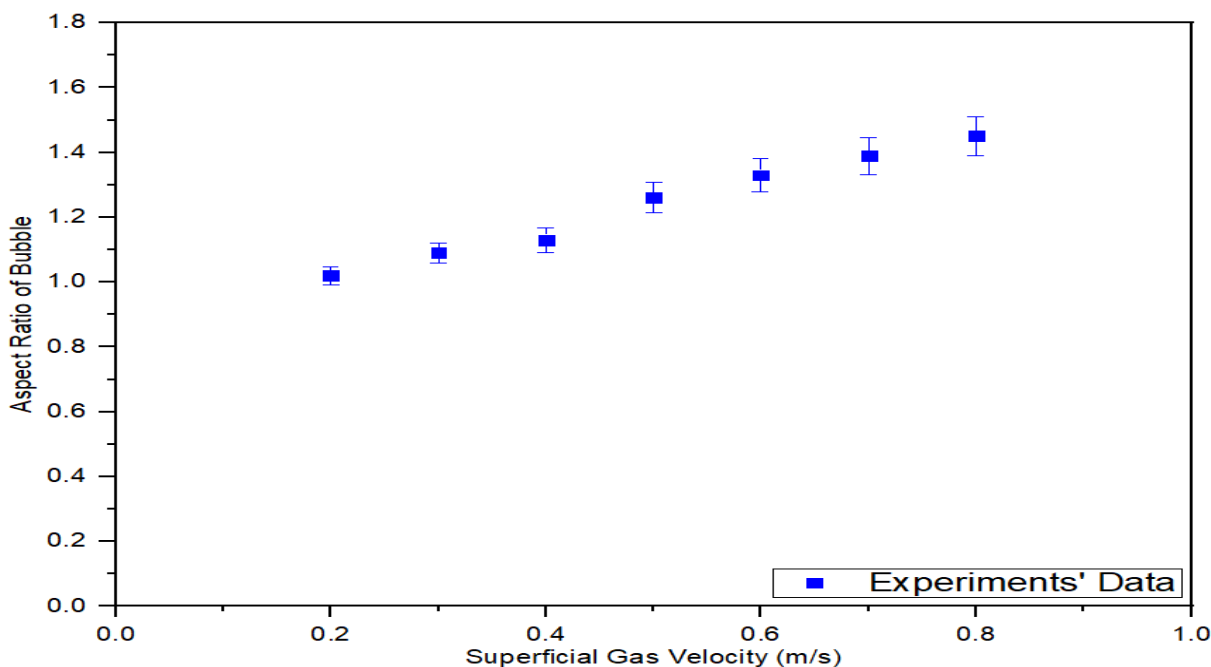
Figure 7. Bubble rise velocities against different heights in semi-cylindrical fluidized bed of 420 μ m particles. The static bed height was 21 cm ($L/D = 1.5$).

کروی شکل هستند و با افزایش سرعت گاز در جهت عمودی کشیده می‌شوند. این تغییر ناشی از برهم‌کنش بیشتر حباب‌ها و به هم پیوستن آن‌ها با افزایش سرعت گاز است. حباب‌های کوچک کروی شکل‌اند و حباب‌های بزرگ‌تر دستخوش تغییر شده، کشیده‌تر می‌شوند تا نیروی پسای کم‌تری را تجربه کنند [۶].

نسبت ابعاد حباب بر حسب ارتفاع بستر در شکل (۹) نمایش داده شده است. از شکل پیداست که نسبت ابعاد حباب‌ها در ارتفاع‌های بالاتر بیشتر است و به عبارتی حباب‌ها شکل کشیده‌تری دارند؛ به این دلیل که نیروی پسای وارد شده به حباب باعث تغییر شکل آن می‌شود. به تدریج که حباب بالا می‌رود، برای کاهش این نیرو، حباب‌ها کشیده‌تر می‌شوند تا سطح مقطع کمتر و در نتیجه نیروی پسای کم‌تری را متحمل شوند.

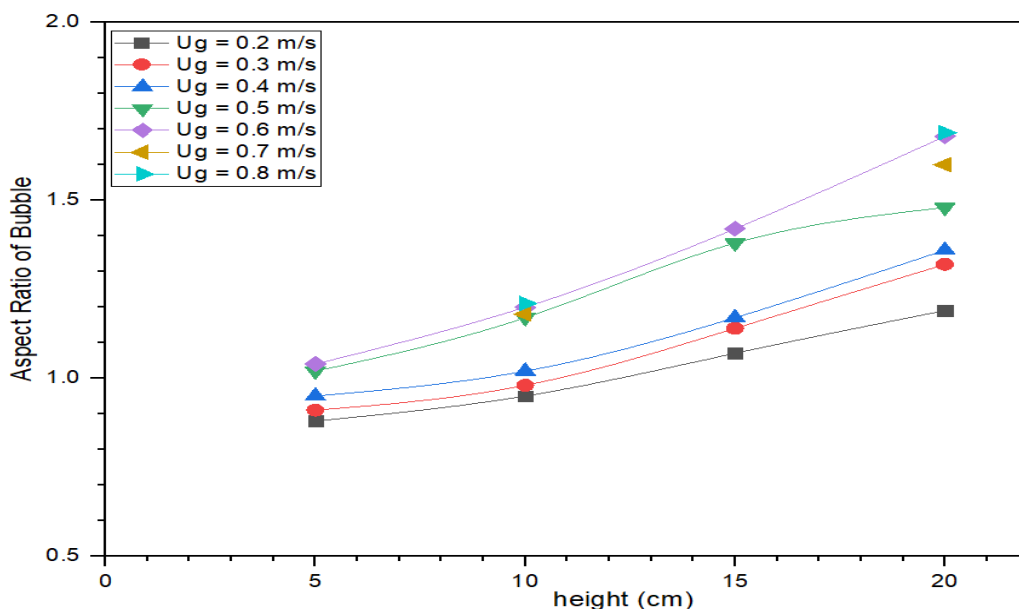
یکی از شاخص‌هایی که می‌تواند شکل تقریبی حباب‌ها را مشخص و بر پویایی آن‌ها تأثیر بگذارد، نسبت ابعاد است [۱۷]. شکل حباب‌ها در یک بستر سیال حبابی به دلیل وجود دنباله در پشت حباب، به شکل قارچ است [۶]. چون نسبت ابعاد به صورت نسبت قطر عمودی به قطر افقی حباب تعریف شده است، یک حباب کشیده عمودی نسبت ابعادی بزرگ‌تر از یک خواهد داشت؛ برعکس، یک حباب کشیده افقی نسبت ابعادی کمتر از یک دارد.

نسبت ابعاد حباب بر حسب سرعت‌های سطحی گاز در بستر سیال نیم‌استوانه‌ای برای ذرات ۴۲۰ میکرومتر در شکل (۸) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که نسبت ابعاد با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. روندهای مشابهی در بستر سیال استوانه‌ای و نیم‌استوانه‌ای در پژوهش‌های پیشین [۲،۶،۷،۸،۹،۱۰]، مشاهده شد. با توجه به نمودارهای مذکور، در سرعت‌های کم، حباب‌ها



شکل ۸. نسبت ابعاد حباب بر حسب سرعت سطحی گاز (۰/۸ - ۰/۲ m/s) در بستر سیال نیم‌استوانه‌ای با ذرات ۴۲۰ میکرومتر. ارتفاع بستر در حالت ایستا برابر ۲۱ cm ($L/D = 1.5$) بود.

Figure 8. Aspect ratio of bubbles against superficial gas velocities of 0.2 – 0.8 m/s in semi-cylindrical fluidized bed of 420 μ m particles. The static bed height was 21 cm ($L/D = 1.5$).



شکل ۹. نسبت ابعاد حباب بر حسب ارتفاع‌های متفاوت در بستر سیال نیم‌استوانه‌ای با ذرات ۴۲۰ میکرومتر. ارتفاع بستر در حالت ایستا برابر ۲۱ cm ($L/D=1.5$) بود.

Figure 9. Aspect ratio of bubble against different heights in semi-cylindrical fluidized bed of 420 μ m particles. The static bed height was 21 cm ($L/D = 1.5$).

افزایش ارتفاع بستر هم مشاهده شد؛ به عبارتی حباب‌های موجود در ارتفاع‌های بالاتر بزرگ‌تر هستند. بررسی‌های انجام شده در بستر سیال نشان داد که با افزایش سرعت ظاهری گاز سرعت بالارفتن حباب‌ها در طول بستر، بیشتر می‌شود. مقادیر به‌دست‌آمده با معادله دیویدسون مطابقت قابل قبولی داشتند. هم‌چنین، این روند با افزایش ارتفاع بستر هم مشاهده شد؛ یعنی حباب‌های موجود در ارتفاع‌های بالاتر با سرعت بیشتری در طول بستر حرکت می‌کنند.

مراجع

- [1] Kunii, D., Levenspiel, O., Fluidization Engineering, 2nd Ed.: Butterworth-Heinemann, pp. 1-50, (1991).
- [2] Okhovat-Alavian, S. M., Behin, J., Mostoufi, N., "Investigating the flow structures in semi-cylindrical bubbling fluidized bed using pressure fluctuation signals", Adv. Powder Technol., 30, pp. 1247-1256, (2019).
- [3] Vishwanath, P., Das, S., Fabijanic, D., Hodgson, P., "Qualitative comparison of bubble evolution in a two dimensional gas-solid fluidized bed using image analysis and CFD model", Mater. Today Proc., 4, pp. 5290-5305, (2017).

۵. نتیجه‌گیری

خلاصه یافته‌های اصلی این کار که با نتایج حاصل از کار اخوت و همکاران [۲] انطباق دارد، چنین است:

- از یک بستر سیال نیم‌استوانه‌ای می‌توان برای مشاهده بصری مستقیم دینامیک حباب از راه دیوار مسطح آن استفاده کرد.
- برای بررسی شکل حباب، نسبت ابعاد حباب، حساب و بررسی شد. مطالعه نسبت ابعاد حباب در بستر سیال نشان داد که در سرعت‌های پایین گاز، حباب‌ها کروی شکل است. در حالی که در سرعت‌های بالاتر، حباب‌ها شکل کشیده‌تری دارند. هم‌چنین، این روند با افزایش ارتفاع بستر هم مشاهده شده است؛ به عبارتی حباب‌های موجود در ارتفاع‌های بالاتر نسبت ابعادی بزرگ‌تری دارند و کشیده‌تر هستند.
- مطالعه متوسط اندازه حباب در بستر سیال نیم‌استوانه‌ای نشان داد که در سرعت‌های کم گاز، حباب‌ها کوچک‌تر هستند و با افزایش سرعت ظاهری گاز حباب‌ها بزرگ‌تر می‌شوند. مقادیر به‌دست‌آمده با معادله موری و ون مطابقت قابل قبولی داشتند. هم‌چنین، این روند با

- [4] Dechsiri, C., Particle Transport in Fluidized Beds: Experiments and Stochastic Models. PhD Thesis, University of Groningen, Groningen, Netherlands, (1973).
- [5] Li, T., "Validation of a 2.5D CFD model for cylindrical gas - solids fluidized beds", 286, pp. 817-827, (2015).
- [6] Okhovat-Alavian, S. M., Behin, J., Mostoufi, N., "Investigating bubble dynamics in a semi-cylindrical gas-solid fluidized bed", Powder Technol., 370, pp. 129-136, (2020).
- [7] Hatate, Y., King, D. F., Migita, M., Ikari, A., "Behavior of bubbles in a semi-cylindrical gas-solid fluidized bed", J. Chem. Eng. Japan, Vol. 18, No. 2, pp. 99-104, (1985).
- [8] Singh, R. K., Suryanarayana, A., Roy, G. K., "Prediction of Bed Expansion Ratio for Gas-solid Fluidization in Cylindrical and Non-cylindrical Beds", J. Inst. Eng. Chem. Eng. Div., 79, pp. 51-54, (1999).
- [9] Singh, R. K., Roy, G. K., "Prediction of minimum bubbling velocity, fluidization index and range of particulate fluidization for gas-solid fluidization in cylindrical and non-cylindrical beds", Powder Technol., 159, pp. 168-172, (2005).
- [10] Singh, R. K., Roy, G. K., "Prediction of bed fluctuation ratio for gas-solid fluidization in cylindrical and non-cylindrical beds", Indian J. Chem. Technol., 13, pp. 139-143, (2006).
- [11] Mori, S., Wen, C. Y., "Estimation of bubble diameter in gaseous fluidized beds", AIChE J., 21, pp. 109-115, (1975).
- [12] Davidson, J. F., "Fluidized Particles", Mob. Part. Syst., pp. 173-196, (1995).
- [13] Karimipour, S., Pugsley, T., "A critical evaluation of literature correlations for predicting bubble size and velocity in gas-solid fluidized beds", Powder Technol., 205, pp. 1-14, (2011).
- [14] Padhi, R. K., Mohanty, Y. K., Roy, G. K., Sarangi, B., "Hydrodynamics Studies of Gas-Solid Fluidization in Non Cylindrical Conduits for Spherical and Non-Spherical Particles -A review", Int. J. Sci. Res. Publ., 4, pp. 1-8, (2014).
- [15] Jamshidi, N., Mostoufi, N., "Measurement of bubble size distribution in activated sludge bubble column bioreactor", Biochem. Eng. J., 125, pp. 212-220, (2017).
- [16] Busciglio, A., Vella, G., Micale, G., Rizzuti, L., "Analysis of the bubbling behaviour of 2D gas solid fluidized beds. Part II. Comparison between experiments and numerical simulations via Digital Image Analysis Technique", Chem. Eng. J., 148, pp. 145-163, (2009).
- [17] Asegehegn, T. W., Schreiber, M., Krautz, H. J., "Investigation of bubble behavior in fluidized beds with and without immersed horizontal tubes using a digital image analysis technique", Powder Technol., 210, pp. 248-260, (2011).