



Experimental Study and Visualization of Particle/Bubble Collision in the Presence of Fluid

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mohammadi M.¹ MSc,
Nazari M.*¹ PhD,
Kayhani M.H.¹ PhD

How to cite this article

Mohammadi M, Nazari M, Kayhani M.H. Experimental Study and Visualization of Particle/Bubble Collision in the Presence of Fluid. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(7):1601-1611.

ABSTRACT

Flotation is the most important method for the separation of minerals. A key element of recovering valuable minerals through flotation is particles/air bubbles interaction in water. In the present paper, an experimental approach is proposed to study the collision of fixed bubble and particles. The results of this investigation are widely used in the application of plastic particle flotation. In this paper, by creating a bubble with a diameter of 5.5 mm through injection pump in fixed fluid, the plastic particles (with a diameter of 1.5 mm) are released on the surface of the bubble. The polar position of the particles on the bubble surface is changed by variations of the falling height and increasing the height of release leads to a decrease in the polar position of collision on the surface of the bubble. The initial collision angles at the release heights of 18.68mm, 13.36mm, and 10mm are 18.01, 15.15, and 18.8 degrees, respectively. In this study, the effect of forces of drag, capillary, pressure, weight, and buoyancy on the attachment and detachment of the particle on the surface of the bubble has been reported. Due to the low sliding velocity of the particle on the surface of the bubble, the drag force is negligible at the attachment and detachment case and floating and gravity forces are also constant. The main roles in effective forces of collapse are capillary and pressure forces. The effect of the three-phase contact line on the capillary and pressure forces is also analyzed, which is one of the innovations of the present study.

Keywords Flotation; Bubble-Particle Collision; Particle Sliding Velocity

¹Fluid Mechanics Department, Mechanical & Mechatronics Engineering Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

*Correspondence

Address: Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Postal Code: 3619995161
Phone: +98 (23) 32392204
Fax: +98 (23) 32392204
mnazari@shahroodut.ac.ir

Article History

Received: April 02, 2018
Accepted: December 23, 2018
ePublished: July 01, 2019

CITATION LINKS

[1] Attachment interaction between air bubbles and particles in froth ... [2] A model of particle sliding time for flotation size ... [3] Hydrodynamics of bubble-mineral particle ... [4] Bubble particle attachment ... [5] Elementary steps in particle-bubble ... [6] Particle-bubble attachment in mineral ... [7] Bubble-particle attachment and detachment ... [8] Particle-bubble collision models - a ... [9] Investigations of bubble-particl .. [10] Movement of fine particles on an air bubble surface studied ... [11] Role of bubble size in flotation of coarse and fine ... [12] Particle-bubble interaction and attachment ... [13] Collision of a small rising bubble with a large falling ... [14] Modelling the motion of a collected particle over ... [15] Bubble-particle collision interaction in ... [16] Boiling treatment of ABS and PS plastics for flotation ... [17] Flotation separation of waste plastics for ... [18] Optimization of surface treatment for flotation ... [19] Floatability, selectivity and flotation separation ... [20] Selective flotation separation of plastics by ... [21] Flotation separation of plastics using selective ... [22] Attachment of individual particles to a stationary air ... [23] Unsteady heat transfer from a reservoir fluid by employing ... [24] Experimental study of convective heat transfer of a nanofluid ... [25] Colloidal science of flotation ... [26] Axisymmetric approach of a solid sphere toward a non ... [27] Exact and global rational approximate expressions ... [28] Instantaneous bond number for a particle detaching ...

بررسی تجربی و آشکارسازی برخورد ذره کروی و حباب ساکن در حضور سیال

مینا محمدی MSc

گروه مکانیک سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

محسن نظری PhD*

گروه مکانیک سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

محمدحسن کیهانی PhD

گروه مکانیک سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده

شناورسازی مهم‌ترین روش جداسازی مواد معدنی بوده و یک عنصر کلیدی بازیابی مواد معدنی با ارزش از طریق شناورسازی، تعامل بین ذرات و حباب‌های هوا در آب است. در مقاله حاضر با رویکردی تجربی به مطالعه و آشکارسازی برخورد حباب ساکن و ذرات پلاستیکی پرداخته شده است. نتایج بررسی این برخورد در شناورسازی ذرات پلاستیکی کاربرد گسترده‌ای دارد. در این مقاله با ایجاد حباب ساکن به قطر ۵/۵ میلی‌متر از طریق پمپ تزریق در سیال ساکن، به بررسی مکانیزم برخورد ذرات پلاستیکی به قطر ۱/۵ میلی‌متر روی سطح حباب پرداخته شده است. ذرات پلاستیکی از طریق سیستم خلأ با سرعت صفر و در ارتفاع قابل تنظیم به سمت حباب رها می‌شوند. موقعیت زاویه‌ای برخورد ذره بر سطح حباب با تغییر فاصله رها سازی تغییر می‌کند، به طوری که با افزایش فاصله رها سازی، موقعیت زاویه‌ای ذره بر سطح حباب با گذشت زمان کاهش می‌یابد. زاویه برخورد اولیه در فاصله رها سازی ۱۸/۱۶۸، ۱۳/۳۶ و ۱۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۸/۰۱، ۱۵/۱۵ و ۱۸/۱۸ درجه به دست آمده است. در این مطالعه، عملکرد نیروهای پسا، مویینگی، فشاری، وزن و شناوری بر حالت‌های اتصال و جداسازی ذره بر سطح حباب گزارش شده است. به دلیل سرعت کم لغزش ذره بر سطح حباب، نیروی پسا در مراحل اتصال و جداسازی ناچیز است و نیروهای شناوری و گرانش نیز مقادیری ثابت هستند. نتایج نشان می‌دهند که نقش اصلی در نیروهای موثر در برخورد، نیروهای مویینگی و فشاری هستند. همچنین به بررسی تاثیر خط تماس سه‌فازی ذره بر نیروهای مویینگی و فشاری پرداخته شده که یکی از نوآوری‌های مطالعه حاضر است.

کلیدواژه‌ها: شناورسازی، برخورد ذره و حباب، سرعت لغزشی ذره

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۰۲

*نویسنده مسئول: mnazari@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

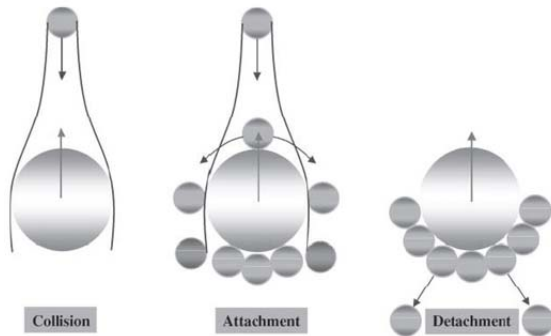
به‌طور معمول عناصر فلزی در طبیعت به‌صورت خالص یافت نمی‌شوند، بلکه به‌صورت ترکیب با عناصر دیگر در پوسته زمین وجود دارند. هدف از جداسازی، حذف مزاحمت‌ها، غلیظ کردن محلول مورد نظر یا سایر موارد است.

شناورسازی، مهم‌ترین روش تغلیظ است که به‌منظور جداسازی مواد معدنی و مواد باطله به کار گرفته می‌شود و در عین حال از دقیق‌ترین روش‌های پرعیار کردن مواد معدنی است. شناورسازی برای جداسازی زغال‌سنگ یا ذرات معدنی از سنگ معدن مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل سادگی و راندمان بالای شناورسازی، امروزه برای جداسازی ماسه‌های نفتی، بازیافت جوهر از کاغذ، تصفیه فاضلاب و همچنین برای جداسازی انواع مختلف مواد پلاستیکی و بازیافت آنها به کار برده می‌شود.

یک عنصر کلیدی از اثربخشی بازیابی مواد معدنی با ارزش از طریق شناورسازی تعامل بین ذرات و حباب‌های هوا در آب است. تعامل حباب-ذره شامل مراحل اتصال است که می‌تواند به برخورد، اتصال و چسبندگی و جدایی تقسیم شود (شکل ۱). علی‌رغم پیشرفت‌های اخیر، این مراحل از دیدگاه کمی به‌خوبی درک نشده‌اند. تعامل

حباب-ذره توسط فیزیک ذرات، حرکت حباب و هیدرودینامیک جریان مایع تعیین می‌شود^[1]. معمولاً ذرات معدنی به‌طور طبیعی آب‌گریز هستند یا آنها را توسط عوامل شیمیایی مانند سورفکتانت آب‌گریز می‌کنند، بنابراین آنها مستعد اتصال به حباب هستند.

در شناورسازی، جدایش کانی‌ها بر پایه تفاوت در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سطح آنها است. در فرآیند جداسازی، حباب‌های هوا به ذرات آب‌گریز چسبیده و باعث انتقال آنها به سطح و تشکیل یک لایه کف پایدار می‌شوند. این لایه کف توسط پاروهای که در سطح سلول شناورسازی قرار دارند، جمع‌آوری می‌شوند.



شکل ۱) تصویری از سه مرحله در شناوری

۲-۱- پیشینه تحقیق

شناورسازی امروزه یکی از مهم‌ترین روش‌های جداسازی ماده معدنی بوده که از سابقه دیرینه‌ای برخوردار است. در سال ۱۹۸۶ *دبی و فینچ*^[2]، یک مدل از زمان لغزش ذرات برای حباب‌های شناور را بررسی کردند. این مدل نتیجه مهمی را نشان می‌دهد که زمان لغزش به‌شدت به اندازه ذرات بستگی دارد. در سال ۱۹۸۹ *شولز*^[3] اثرهای هیدرودینامیک برخورد ذرات ریز با حباب را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. *شولز* به این نتیجه رسید هنگامی که یک ذره به سطح حباب نزدیک می‌شود، دو نوع تعامل رخ می‌دهد. یکی فرآیند برخورد که در این مرحله سطح حباب به‌شدت تغییر شکل می‌دهد و ذرات پرتاب می‌شوند، مگر اینکه در برخورد اول ذرات به حباب بچسبند. دیگری لغزش که این مرحله در امتداد سطح حباب با تغییر شکل ضعیف سطح حباب اتفاق می‌افتد. فرآیند برخورد معمولاً با ذرات بزرگ و سرعت نسبی بالا با سطح حباب رخ می‌دهد. یکی دیگر از عوامل، غلظت حباب‌های گاز در واحد حجم است. هر چقدر غلظت بیشتر باشد، ذرات از حباب‌ها عبور می‌کنند یا فرآیند لغزش صورت می‌گیرد. همچنین این مقاله بیان کرد که زمان برخورد مستقل از سرعت برخورد بوده و فقط وابسته به کشش سطحی مایع است. هویت و همکاران^[4] در سال ۱۹۹۴ بازده اتصال و چسبندگی ذره و حباب را به‌صورت تجربی مورد تحقیق و مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که با در نظر گرفتن نیروی یونی ثابت، بازده اتصال با افزایش قطر ذره و افزایش زاویه تماس، افزایش می‌یابد. همچنین دریافتند که در حباب با قطر کوچک‌تر، بازده اتصال بالاتر است و با افزایش نیروی یونی، بازده اتصال افزایش می‌یابد. در سال ۱۹۹۷ *نگوبین و همکاران*^[5]، مراحل ابتدایی در اتصال ذره و حباب را به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که سه مرحله ابتدایی اهمیت زیادی دارند که به‌صورت زیر هستند:

۱- نازک شدن فیلم (هنگامی که ذره و حباب در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، یک لایه نازک از جنس آب با ضخامت کمتر از

۲۰۱۱، ویریلی و همکاران^[12] برخورد و اتصال ذره و حباب را به صورت تجربی با استفاده از دوربین عکس برداری سرعت بالا بررسی کردند. آنها متوجه شدند که مسیر حرکت ذرات و سرعت قابل توجه آنها در نزدیکی خط استوایی حباب نامتقارن است. همچنین مشاهده کردند که تعدادی از ذرات بعد از پرتاب شدن به سمت حباب، روی آن می‌لغزند و در نهایت به آن متصل می‌شوند. هویکا و همکاران^[13] در سال ۲۰۱۳، برخورد حباب کوچک متحرک با ذره بزرگ را به صورت آزمایشگاهی مورد تحقیق قرار دادند. تمرکز روی خط مسیر بالآمدن حباب و تاثیر نیروی شناوری، نیروی گرانش و نیروی اینرسی بر بازده برخورد بررسی شد و دریافتند هنگامی که حباب کوچک با ذرات بزرگ برخورد می‌کند، نیروی شناوری بسیار مهم است. گائو و همکاران^[14] در سال ۲۰۱۵، حرکت یک ذره جمع‌آوری شده در سطح حباب را مدل‌سازی کردند. آنها از شبیه‌سازی برای اندرکنش بین ذرات و یک حباب در یک سیال ساکن استفاده کردند و نتایج شبیه‌سازی فاصله جدایی ذره و حباب نسبت به زمان با نتایج تجربی همخوانی داشته است. در سال ۲۰۱۵، بریکووا و همکاران^[15] اثر متقابل برخورد ذره و حباب در سیستم‌های شناوری را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آنها به مقایسه نتایج تجربی حاصل از حرکت و سرعت ذره با یک مدل توسعه‌یافته پرداختند و نتیجه گرفتند که گرانش و اینرسی به تدریج با اندازه ذره افزایش می‌یابد.

افزایش مصرف پلاستیک تا حد زیادی باعث افزایش ضایعات جامد شده و تاثیرات آنها روی محیط زیست بسیار وسیع است. با توجه به مشکلات مربوط به دفع زباله‌های پلاستیکی، تلاش‌ها در حال ساختن راه‌های کارآمد برای بازیافت این زباله‌ها هستند. استفاده روزافزون از پلاستیک‌های مهندسی در کاربردهای صنعتی مانند خودرو، صنایع الکترونیک و دقت ماشین‌کاری ضروری است. علاوه بر این، پلاستیک‌های مهندسی نسبتاً گران‌تر از پلاستیک‌های دیگر است. بنابراین نیاز به توسعه روش‌های جداسازی انتخابی در مواد پلاستیکی مختلف وجود دارد. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ یک روش فیزیکی برای جداسازی پلاستیک‌های مختلف به روش شناورسازی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که جوشش کاربرد صنعتی شناورسازی پلاستیک را آسان می‌کند و بازیافت پلاستیک به صورت راحت‌تر انجام می‌گیرد^[16]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی کلی شناورسازی پلاستیک با تمرکز روی ویژگی‌های خاص در مقایسه با شناورسازی ذرات معدنی دیگر و روش‌ها و اصول و تجهیزات شناورسازی به صورت تجربی و تئوری پرداختند. آنها دریافتند که شناورسازی پلاستیک بسیار پیچیده‌تر از ذرات دیگر است، زیرا زباله‌های پلاستیکی اغلب ناهمگن (در اندازه‌ها و ترکیب) هستند. همچنین عدم انطباق نیاز صنعت و بازیافت باعث شده است که تلاش بیشتر برای کاربرد صنعت شناورسازی پلاستیک ضروری شود^[17]. وانگ و همکاران یک فرآیند ساده برای جداسازی پلاستیک‌های مختلف را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها مشاهده کردند که اضافه کردن محلول پرمنگنات پتاسیم باعث جداسازی موثر پلاستیک با روش پیشنهادی و افزایش راندمان بازیافت پلاستیک می‌شود^[18]. در سال ۲۰۰۲، شن و همکاران جداسازی پلاستیک‌های مختلف توسط سورفکتانت با روش شناورسازی را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که شناور بودن تمام پلاستیک‌ها با افزودن سورفکتانت کاهش می‌یابد^[19]. شن و همکاران در سال ۲۰۰۱ به شناورسازی پلاستیک از طریق کنترل ذرات به صورت تجربی پرداختند و نتیجه گرفتند که شناورسازی پلاستیک نه تنها تحت

۱۰۰ نانومتر بین حباب و ذره وجود دارد که این لایه را فیلم می‌نامند.)

۲- پاره شدن فیلم و تماس سه‌فازی (تماس سه فاز گاز- آب- جامد)

۳- گسترش تماس سه‌فازی (TPC) برای ایجاد یک محیط مرطوب.

در سال ۱۹۹۹، دی و همکاران^[6] اتصال حباب و ذرات شناور معدنی را به صورت تئوری و تجربی مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. مشاهده کردند که زمان القایی حاصل از این مطالعه با یک توافق منطقی با زمان القایی تجربی به دست آمده گزارش شده است. رالستون و همکاران^[7] نیز در سال ۱۹۹۹، اتصال و جداسازی ذرات و حباب در شناورسازی را به صورت تجربی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آنها افزایش بازده اتصال با بیشتر شدن غلظت الکترولیت برای ذرات آب‌گریز را گزارش کردند. علاوه بر این دریافتند هنگامی که آب‌گریزی سطح ذرات و غلظت الکترولیت افزایش یابد، بازده اتصال، کمتر به اندازه ذرات بستگی دارد. در سال ۲۰۰۰، دی و همکاران^[8] مدل‌های برخورد ذره و حباب را به صورت تجربی و تئوری بررسی کردند و دریافتند که احتمال برخورد در حباب‌های متحرک خیلی بیشتر از حباب‌های ثابت است. نیروی بین ذره- حباب را به سه دسته نیروی گرانش، نیروی هیدرودینامیک و نیروی اینرسی ذرات تقسیم کردند که در هر مرحله، بسته به نوع آزمایش و اندازه ذرات، بعضی نیروها نادیده گرفته می‌شوند. در این تحقیق ده روش برخورد را مطالعه و بررسی کردند. در سال ۲۰۰۳، فان و همکاران^[9]، اندرکنش ذره و حباب را به صورت آزمایشگاهی مورد تحقیق و بررسی قرار دادند و به نتایج زیر دست یافتند:

الف) شناوری، مهم‌ترین مکانیزم برای اندرکنش حباب‌های کوچک و ذرات بزرگ است.

ب) انحراف از مسیر ذره، قبل از برخورد افزایش می‌یابد. آنها این آزمایش را برای حباب‌های ثابت و متحرک انجام دادند. در انجام این تحقیق از یک روش آزمایشگاهی استفاده کردند. نگوین و ایوانس^[10] در سال ۲۰۰۴، حرکت ذرات ریز بر سطح حباب را با استفاده از دوربین پرسرعت به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها پاره شدن فیلم نازک بین یک حباب و یک ذره آب‌گریز و تشکیل تماس سه‌فازی را مشاهده کردند و دریافتند که اتصال لغزشی ذره به حباب به وضوح توسط نظریه‌های موجود توصیف نمی‌شود. در سال ۲۰۰۴، نگوین و ایوانس^[11] اثر متقابل چسبندگی بین حباب هوا و ذرات را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که نیروهای سطحی، بر حرکت ذره روی سطح حباب با حضور فیلم نازک آب و تا پاره شدن آن تاثیر می‌گذارد. در این مطالعه درباره تصحیح مدل اتصال بحث کرده‌اند و دریافتند که لغزش و اتصال ذره به حباب توسط نظریه‌های موجود نتیجه رضایت‌بخشی ندارد. در سال ۲۰۰۵، تائو^[11] نقش اندازه ذرات درشت و ریز در شناوری را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داد و به نتایج زیر دست یافت:

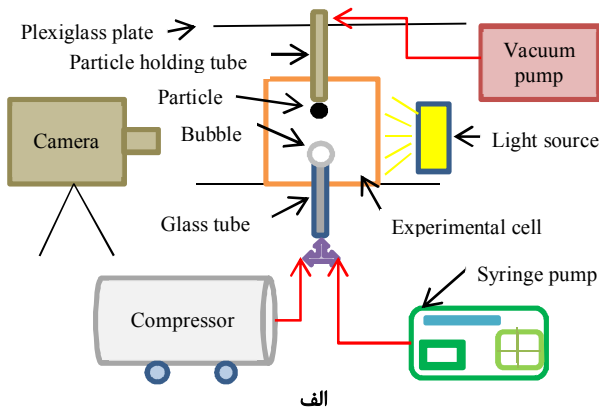
الف) استفاده از حباب‌های کوچک باعث افزایش احتمال اتصال و کاهش احتمال جداسازی می‌شود.

ب) احتمال جداسازی ذرات درشت خیلی بیشتر از ذرات کوچک است و احتمال برخورد ذرات ریز کمتر از ذرات درشت است.

ج) افزایش آب‌گریزی سطح ذرات باعث کاهش احتمال جداسازی ذره و حباب می‌شود.

د) برخورد حباب با ذرات بزرگ باعث ایجاد نوساناتی در سطح حباب می‌شود که عامل غالب جداسازی ذرات از سطح حباب است. در سال

دوربین پرسرعت مدل CMOS (pco.dimax S1) استفاده شده که در بالاترین سرعت، توانایی ثبت ۴۵۰۰ تصویر بر ثانیه را داراست.



ب

شکل ۲) دستگاه آزمایش

۲-۳- شرح آزمایش

در هر آزمایش برای تصویربرداری توسط دوربین، از سرعت ۱۵۰۰ فریم بر ثانیه استفاده شده است. رزولوشن تصاویر ضبط شده توسط دوربین پرسرعت ۱۰۰۸×۱۰۰۸ است. به همراه دوربین از یک لنز مدل Nikon (AF-S Micro-Nikkor 105mm f/2.8G IF-ED VR) برای آزمایشها استفاده شده است. این لنز ماکرو مخصوص عکاسی و فیلمبرداری از نزدیک (تا بزرگنمایی ۱:۱) و پرتنه است. لنز مذکور این قابلیت را دارد که هنگام نزدیک شدن دوربین به پدیده مورد نظر، تصویری واضح از آن را در اختیار بگذارد. همچنین دوربین در فاصله معینی نسبت به سلول آزمایش قرار دارد و در طول آزمایش، دوربین ثابت است و لنز دوربین برای به دست آوردن تصاویری با وضوح بالاتر تنظیم می شود.

در این آزمایش به دلیل اینکه فشار سیال داخل سلول از فشار هوای تزریقی توسط پمپ سرنگی در دهانه لوله شیشه‌ای بیشتر است، سیال به درون لوله وارد شده و از لوله پایین می رود و تشکیل حباب دچار مشکل می شود. برای جلوگیری از این کار از کمپرسور استفاده می شود. هنگامی که فشار سیال با فشار هوای تزریقی توسط کمپرسور در دهانه لوله شیشه‌ای برابر شد، شیر کمپرسور را بسته و هوا توسط پمپ سرنگی با دبی ۹ ml/h برای ایجاد حباب در دهانه لوله شیشه‌ای تزریق می کنیم. در مطالعات پیشین که در ارتباط با پلاستیک‌های مختلف صورت گرفته است، حباب توسط پرهایی که در پایین سلول با سرعت ثابتی می چرخند در قطرهای

تأثیر عوامل شیمیایی سطح ذرات است، بلکه به طور قابل توجهی توسط گرانش کنترل می شود [20].

در این مطالعه، رفتارهای شناوری پلاستیک پلی استیل که یکی از پلاستیک‌های مهم در مهندسی بوده، مورد بررسی قرار گرفته است. براساس این مطالعات در مورد نیروهای تأثیرگذار بر اتصال و جدایش ذره، خط تماس سه‌فازی ذره بر سطح حباب به عنوان عاملی بر بازیافت و جداسازی ذره پلاستیکی بحث شده است. علاوه بر این به بررسی موقعیت زاویه‌ای، موقعیت شعاعی ذره و سرعت لغزشی آن بر سطح حباب پرداخته شده است. داده‌ها با استفاده از عکس‌برداری سرعت بالا و پردازش تصویر تحلیل شده است.

۲- روش آزمایش

۲-۱- مواد اولیه

در انجام این آزمایش از ذرات کروی شکل پلی استیل (POM) با جذب آب پایین با قطر ۱/۵ میلی‌متر و چگالی $1/42 \text{ gr/cm}^3$ استفاده شده است. ذرات پلاستیکی در هنگام شناورسازی در صنعت در اندازه‌های بسیار بزرگ‌تر از ذرات معدنی هستند. اندازه ذرات سنگ‌های معدنی بین حدود ۱۰۰۰-۳۰ میکرومتر است. اما ذرات پلاستیکی معمولاً در حدود چندین میلی‌متر هستند [17]. با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه پلاستیک‌های مختلف، در اکثر آنها اندازه ذرات پلاستیکی بین ۵-۱ میلی‌متر است [21]. بنابراین در این مطالعه متناسب با قطر حباب، ذره با قطر ۱/۵ میلی‌متر انتخاب شده است. علاوه بر این، مطالعه حاضر یک مطالعه فیزیکی و پدیده‌شناسی بوده و قرار است اتفاقات فیزیکی، عکس‌برداری و تحلیل شود و مکانیزم برخورد و جدایش بحث شود. تمامی آزمایش‌ها با آب مقطر در دمای اتاق (23°C) انجام شده است.

۲-۲- دستگاه آزمایش

شکل ۲ دستگاه آزمایش مطالعه حاضر را نشان می دهد که شامل موارد دو صفحه پلکسی گلس، سلول مربعی، لوله نگهدارنده ذرات، لوله شیشه‌ای تولیدکننده حباب، پمپ خلأ، پمپ سرنگی، کمپرسور، دوربین پرسرعت و پروژکتور ۲۰۰۰ وات است.

به منظور انجام آزمایشها، از دو صفحه موازی از جنس پلکسی گلس استفاده شده است که توسط چهار میله رزوه شده به ارتفاع یک متر کنترل و متصل شده اند. با توجه به رزوه بودن میله‌ها می توان به راحتی فاصله صفحات نسبت به یکدیگر را تغییر داد. برای ثابت نگه داشتن صفحات و میله‌ها و حفظ تعادل آنها، صفحه‌ای بزرگ‌تر از جنس چوب به عنوان پایه در زیر این مجموعه تعبیه شده است. ظرف مورد نیاز در این آزمایش یک سلول مربعی از جنس پلکسی گلس در ابعاد $12 \times 12 \times 12 \text{ cm}^3$ است. نورپردازی در پشت سلول صورت می گیرد. همچنین سطوح این ظرف باید شفاف باشند تا در هنگام عکس‌برداری، تصاویر برخورد حباب و ذره به وضوح نشان داده شوند و پردازش تصویر را دچار مشکل نسازد. در این آزمایش برای تولید حباب از یک لوله شیشه‌ای با قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر، ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر استفاده شده است. پمپ سرنگی مدل JMS (SP-500) و کمپرسور Hyundai Silent AC-1550 برای تزریق هوا به داخل آب موجود در سلول توسط لوله شیشه‌ای به کار برده می شوند. پمپ خلأ مدل DV-42N-250 برای رهاسازی ذره استفاده می شود. مبنای تمامی آزمایش‌های صورت گرفته تصویربرداری از حرکت ذره بر سطح حباب و سپس پردازش تصاویر است. بدین منظور از یک

(میلی‌متر) است.

هر آزمایش حداقل سه بار تکرار شده و نتایجی که در قسمت‌های بعدی نشان داده می‌شود، به‌صورت بازه اطمینان (با محدوده خطا) نمایش داده می‌شود.

۳- آنالیز خطا

از آنجایی که همواره مقدار دقیق خطا را نداریم، خطا را با بازه اطمینان گزارش می‌کنیم. بازه اطمینان، نمود کمی کیفیت نتیجه اندازه‌گیری است. یعنی تا چه حد اندازه‌گیری، نشان‌دهنده مقدار واقعی مورد اندازه‌گیری شده است.

۳-۱- اندازه‌گیری انحراف معیار

میانگین حسابی یا متوسط، نوعی سنجش گرایش به مرکز بوده و عبارت از مجموع مقادیر موجود در مجموعه داده‌ها تقسیم بر تعداد آنها است. برای محاسبه میانگین حسابی (\bar{x}) از رابطه ۱ استفاده می‌شود:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

که در آن x_i مقدار داده‌ها و n تعداد تکرار یک آزمایش است. در آمار انحراف معیار یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند. در حالی که انحراف معیار بزرگ‌تر بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها است. انحراف معیار برابر با ریشه دوم واریانس است. محاسبه انحراف معیار (η) از رابطه ۲ انجام می‌شود:

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

روش آماری که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته، روشی است که در آن بتوان حدود اطمینان را در اطراف یک داده مشخص نمایش داد. در هر آزمایش این فاصله اطمینان، حدودی است که به احتمال زیاد واقعیت در آن وجود دارد. هر چقدر تعداد داده‌هایی که به‌دست می‌آوریم کمتر باشد این بازه وسیع‌تر بوده و به همان میزان نیز احتمال رسیدن به واقعیت کمتر است. در واقع وقتی تعداد داده‌ها (حجم نمونه) زیاد باشد با اطمینان بیشتری بیان خواهیم کرد عددی که به دست آورده‌ایم به واقعیت نزدیک است و فاصله اطمینان نیز کوچک‌تر خواهد بود. به‌منظور دست‌یافتن به فاصله اطمینان در مرحله اول باید مشخص کرد منظور از فاصله اطمینان چیست؟ یعنی در واقع چه حدی از فاصله اطمینان قابل قبول است؟ برای این منظور فاصله اطمینان در نظر گرفته شده در اکثر مطالعات برابر با ۹۰٪، ۹۵٪ و ۹۹٪ بوده که به این معنی است در صورتی که مطالعه مورد نظر ۱۰۰ بار تکرار شود در ۹۰، ۹۵ و ۹۹ بار آن همین محدوده به دست خواهد آمد. هر چه عدد مربوطه به فاصله اطمینان از ۱۰۰ فاصله می‌گیرد میزان دقت آن کاهش می‌یابد. به این معنی، احتمال اینکه شاخصی که با بازه اطمینان ۹۹٪ بیان شده به واقعیت نزدیک باشد، بیشتر از شاخصی است که با بازه اطمینان ۹۵٪ بیان می‌شود.

۳-۲- روش فاصله اطمینان

با توجه به معرفی روش‌های آماری، فاصله اطمینان و حد بالا و پایین این فاصله (λ)، به‌صورت رابطه ۳ نمایش داده می‌شود:

$$\lambda = \bar{x} \pm \left(B \times \frac{\eta}{\sqrt{n}} \right) \quad (3)$$

مختلفی تولید می‌شوند. اما در این پژوهش، به‌دلیل اینکه هدف بررسی رفتار ذره در برخورد با حباب بود، از حباب ثابت در دهانه لوله شیشه‌ای استفاده شده است [22]. شباهت این روش با دیگر مطالعات این است که ذره در فاصله معین و مشخصی نسبت به سطح حباب ساکن، در دهانه لوله رها می‌شود، اما با این تفاوت که در پژوهش حاضر فاصله رهاسازی ذره تا سطح حباب توسط لوله نگهدارنده ذره (به‌دلیل رزوه بودن) قابل تغییر است و تحلیل نیرویی وارد بر ذره مبتنی بر مشاهدات تجربی ارائه خواهد شد. لوله نگهدارنده ذره دارای سطح تراشکاری شده است و ابتدای رزوه‌شده آن در مرکز صفحه پلکسی‌گلس بالایی که متصل به چهار میله رزوه‌شده است، قرار گرفته و به پمپ خلا وصل می‌شود. برای تغییر فاصله رهاسازی ذره بر سطح حباب با توجه به قسمت رزوه‌شده آن کافی است با چرخاندن لوله، فاصله را تغییر داد. سلول آزمایشگاهی روی صفحه پلکسی‌گلس پایینی که به چهار میله رزوه‌شده متصل بوده، به‌صورت ثابت قرار گرفته است. انتهای سلول آزمایشگاهی در مرکز به اندازه قطر لوله شیشه‌ای سوراخ شده و لوله شیشه‌ای در پایین سلول به‌صورت عمودی تعبیه شده است. در هیچ کدام از مطالعات پیشین، مبنای مشخصی از ارتفاع لوله در داخل سلول آزمایشگاهی وجود نداشته و طول لوله در داخل سلول ذکر نشده است. بنابراین، با توجه به ابعاد ظرف و قطر لوله شیشه‌ای، ارتفاع مشخصی از لوله شیشه‌ای درون سلول قرار گرفته است. این ارتفاع با انجام آزمون، به‌صورت تجربی به دست آمده است و در نتایج نهایی اثری ندارد، چرا که حباب ساکن در دهانه آن تشکیل می‌شود. بنابراین لوله شیشه‌ای به اندازه ۳ سانتی‌متر داخل سلول قرار گرفته و انتهای آن در پایین سلول به یک شیر سه راه پنوماتیک متصل بوده که دو راه دیگر این شیر برای تزریق هوا به پمپ سرنگی و کمپرسور وصل است.

برای شروع آزمایش، ابتدا پمپ خلا را روشن می‌کنیم، سپس ذره پلاستیکی را به انتهای لوله نگهدارنده ذره که دارای سطحی صاف است، نزدیک می‌کنیم. خلا ایجادشده در لوله باعث نگه‌داشتن ذره پلاستیکی در دهانه لوله می‌شود، سپس لوله را تا سطح سیال درون سلول آزمایشگاهی پایین می‌آوریم، ولی وارد سیال نمی‌کنیم. لحظه ورود لوله به سیال، شیر پمپ خلا را بسته تا از ورود آب به درون پمپ خلا جلوگیری کنیم. لوله در ارتفاع تنظیم‌شده داخل سیال قرار می‌گیرد و ذره هم‌چنان به انتهای آن متصل است. هنگامی که حباب در سطح لوله شیشه‌ای با تزریق هوا توسط پمپ سرنگی تشکیل شد، شیلنگ رابط بین پمپ خلا و لوله نگهدارنده ذره را از سمت پمپ خلا کمی باز می‌کنیم. با این کار مقدار خیلی کمی هوا وارد لوله نگهدارنده ذره شده و ذره رها می‌شود و برخورد بین ذره با سطح حباب توسط دوربین عکس‌برداری پرسرعت ثبت و ضبط می‌شود.

قبل از انجام هر آزمایش، موازی‌بودن صفحات پلکسی‌گلس به‌وسیله تراز بررسی شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، دوربین با زاویه صفر نسبت به دهانه لوله شیشه‌ای تولیدکننده حباب قرار داده شده است و پروژکتور نیز در مقابل آن روی صفحه کاغذی سفیدی می‌تابد.

این آزمایش در سه حالت زیر انجام گرفته است:

حالت اول: فاصله رهاسازی از مرکز ذره تا سطح حباب $h=10$ (میلی‌متر) است.

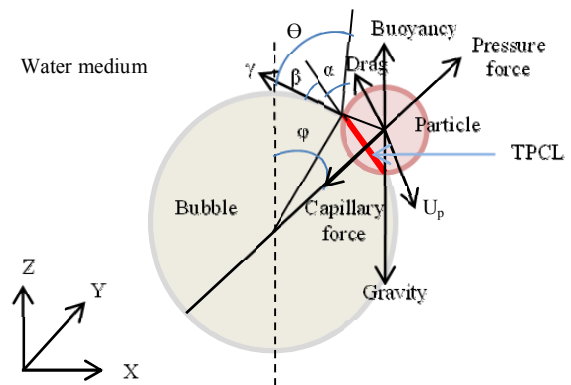
حالت دوم: فاصله رهاسازی از مرکز ذره تا سطح حباب $h=13/36$ (میلی‌متر) است.

حالت سوم: فاصله رهاسازی از مرکز ذره تا سطح حباب $h=18/68$

که در آن B ضریب تعمیم است. این پارامتر در واقع از تعداد تکرار آزمایش با میزان دقت محاسبات انتخاب می‌شود [23,24].

۴- روابط ریاضی

تمام ذرات متصل به حباب‌های هوا به مرحله جداسازی نمی‌رسند و برخی از آنها از سطح حباب جدا می‌شوند. جدا شدن ذرات زمانی اتفاق می‌افتد که نیروهایی که باعث جدایی می‌شوند خیلی بیشتر از نیروهای نگهدارنده ذرات در سطح حباب باشند. نیروهای زیادی وجود دارند که بین اتصال و چسبندگی ذره و حباب عمل می‌کنند که آنها را می‌توان مطابق شکل ۳ به چند دسته نیروی وزن (F_W)، نیروی شناوری (F_B)، نیروی پسا (F_D)، نیروی فشاری (F_P) و نیروی موینگی (F_C) تقسیم کرد که این نیروها به‌طور معمول هستند. در ادامه شرح مختصری درباره این نیروها بیان می‌شود.



شکل ۳) طرح کلی از لغزش ذره بر سطح حباب

۴-۱- نیروی وزن

نیروی وزن روی ذره و چگالی ρ_p در جهت منفی محور Z به ذره وارد می‌شود که به‌صورت رابطه ۴ نوشته می‌شود:

$$F_G = \frac{4}{3}\pi R_p^3 \rho_p g \quad (4)$$

۴-۲- نیروی شناوری

نیروی شناوری در مایع به چگالی ρ روی ذره به شعاع R_p در جهت مثبت محور Z است که به‌صورت رابطه ۵ نوشته می‌شود:

$$F_B = \frac{4}{3}\pi R_p^3 \rho g \quad (5)$$

۴-۳- نیروی پسا

نیروی هیدرودینامیک روی یک ذره کوچک ($Re_p < 1$) که در مایع حرکت می‌کند، به‌خوبی توسط قانون استوکس توضیح داده می‌شود. با این حال هنگامی که یک حباب وجود دارد، حرکت ذرات در مجاورت حباب به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌گیرد [25]. تعامل هیدرودینامیک ذره در جهت مماسی، زمانی باید در نظر گرفته شود که ذره بر سطح حباب در حال لغزش است. مدل اصلاح شده در معادلات نیروی پسا به‌صورت رابطه ۶ نشان داده می‌شود [26,27]:

$$F_{mdrag} = -f^t F_{sdrag} \quad (6)$$

$$F_{sdrag} = \begin{cases} -6\pi\mu R_p U_p, & Re_p < 1 \\ -6\pi\mu R_p U_p (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & 1 < Re_p < 1000 \end{cases} \quad (7)$$

نیروی F_{sdrag} نیروی پسی استاندارد، F_{mdrag} نیروی پسی اصلاح شده، R_p شعاع ذره، U_p سرعت لغزش ذره، μ ویسکوزیته سیال و Re_p عدد رینولدز ذره است. f^t ضریب مقاومت هیدرودینامیک در جهت مماسی است که توسط تگومین و ایوانس [26,27] برای حرکت ذره جامد در اطراف یک فاز مایع یا گاز متحرک حاصل شده است و توسط رابطه ۸ نشان داده می‌شود:

$$f^t = \frac{1.106 + \left(\frac{h - R_p}{R_p}\right)}{1.501 + \left(\frac{h - R_p}{R_p}\right)} \quad (8)$$

که در آن h فاصله مرکز ذره تا سطح حباب است.

۴-۴- نیروی موینگی

نیروی موینگی نقش مهمی در چسبندگی ذره به سطح حباب دارد. هنگامی که ذره در تماس با حباب قرار می‌گیرد یک فیلم مایع بین ذره و سطح حباب به وجود می‌آید. کشش سطحی بین سطح حباب و ذره باعث ایجاد نیروی موینگی می‌شود و این نیرو توسط رابطه ۹ تا ۱۱ مورد محاسبه قرار می‌گیرد [28]:

$$F_C = 2\pi\sigma R_p \sin \alpha \quad (9)$$

$$(F_C)_x = \frac{2\pi\sigma R_{TPC}^2 \sin(\varphi + \pi)}{R_b} \quad (10)$$

$$(F_C)_y = \frac{2\pi\sigma R_{TPC}^2 \cos(\varphi + \pi)}{R_b} \quad (11)$$

و در آن R_p شعاع ذره، σ کشش سطحی بین مایع و حباب، α زاویه تماس سه‌فازی است که از اتصال خط مرکزی ذره-حباب به مرکز خط تماس سه‌فازی اندازه‌گیری می‌شود، R_b شعاع حباب، R_{TPC} شعاع تماس سه‌فازی و φ موقعیت زاویه‌ای ذره بر سطح حباب است. در فرآیند تعامل ذره-حباب نیروی موینگی در جهت مخالف نیروی فشاری عمل می‌کند.

۴-۵- نیروی فشاری

فشار داخلی حباب بالاتر از فشار فاز مایع اطراف آن است. با در نظر گرفتن گودی تماس حباب-ذره و سپس با کاهش هیدرواستاتیک، نیروی فشاری خالص در خط تماس سه‌فازی به ذره وارد می‌شود و به‌صورت رابطه ۱۲ تا ۱۴ نشان داده می‌شود [28]:

$$F_P = \pi R_p^2 \sin^2 \alpha \left(\frac{2\sigma}{R_b} - \rho g R_b \right) \quad (12)$$

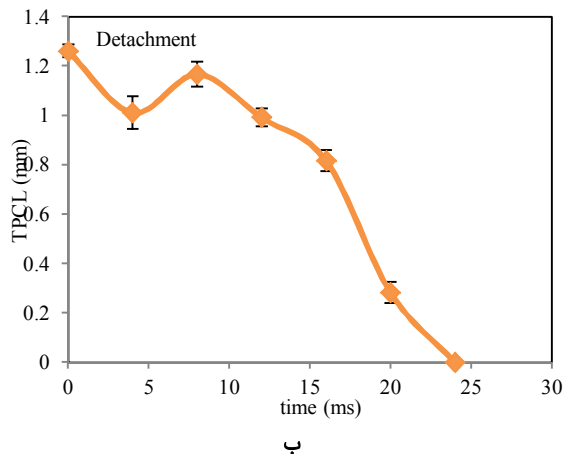
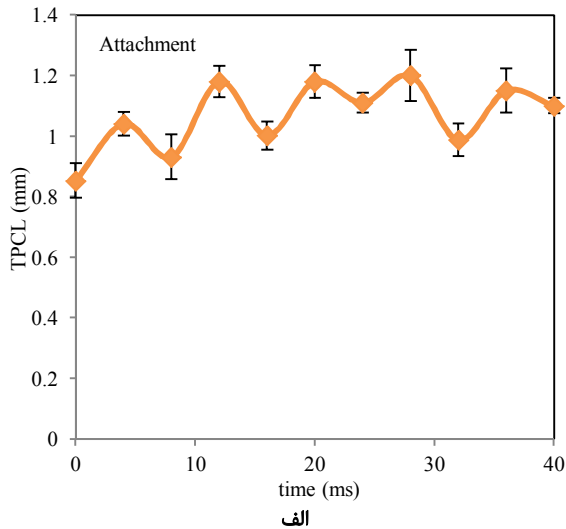
$$(F_P)_x = \pi R_p^2 \sin^2 \alpha \left(\frac{2\sigma}{R_b} - \rho g R_b \right) (1 - \sin \varphi) \quad (13)$$

$$(F_P)_y = \pi R_p^2 \sin^2 \alpha \left(\frac{2\sigma}{R_b} - \rho g R_b \right) (1 - \cos \varphi) \quad (14)$$

که R_p شعاع ذره، σ کشش سطحی بین مایع و حباب، α زاویه تماس سه‌فازی است که از اتصال خط مرکزی ذره-حباب به مرکز خط تماس سه‌فازی اندازه‌گیری می‌شود، R_b شعاع حباب و p چگالی سیال است.

علاوه بر این از ذکر نیروهای دیگر مانند نیروی اینرسی که در مقابل تغییر موقعیت حرکتی ذره نوعی مقاومت ایجاد می‌کند و تنها سرعت‌بخشیدن به ذره را مقدار خیلی کمی کاهش می‌دهد و همچنین از نیروی واندروالس بین حباب و ذره، به دلیل دارا بودن مقدار بسیار ناچیز نسبت به سایر نیروهای ذکر شده، صرف نظر شده است. مهم‌ترین نیروها در مقاله حاضر اشاره شد و سایر نیروها که از اهمیت بسیار کمتری برخوردارند، در مقالات و مطالعات پیشین بررسی شده‌اند [26-28].

می‌شود و اگر کوچک باشد نشان از اتصال ذره بر سطح حباب است. بنابراین هنگام حرکت ذره بر سطح حباب، خط تماس سه‌فازی (مطابق شکل ۳) تغییر می‌کند و این خط به صورت نوسانی در حال تغییر است (نمودار ۲). اتصال ذره به سطح حباب (نمودار ۲- الف) نشان از کوچک بودن عدد باند و غالب بودن نیروی موینگی بر نیروی وزن است. همچنین افزایش عدد باند باعث جدایش کامل ذره از سطح حباب می‌شود و خط تماس سه‌فازی ذره بر سطح حباب شروع به کاهش می‌کند (نمودار ۲- ب). بنابراین می‌توان تاثیر عدد باند را روی خط تماس سه‌فازی و نیروهای تاثیرگذار بر اتصال و جدایش ذره بر سطح حباب مشاهده کرد.



نمودار ۲) خط تماس سه‌فازی لحظه‌ای: الف) حالت اتصال ب) حالت جدا شدن

۵- نتایج و بحث

مجموعه‌ای از تصاویر لغزش ذره بر سطح حباب با گذشت زمان به‌زای اعداد بی‌بعد $Bo = 4.255$ و $Re_p = 74.82$ در شکل ۴ نشان داده شده است. دوربین روی صفحه نمایش متمرکز است و مسیر حرکت ذره را نشان می‌دهد. تصاویر نشان‌دهنده دوبعدی هستند و به‌طور مستقیم شعاع حباب و موقعیت زاویه‌ای واقعی ذره را به ما نمی‌دهد. برای این منظور، برای به‌دست‌آوردن موقعیت درست ذره، مرکز حباب به‌عنوان مرکز مختصات در نظر گرفته شده است (شکل ۵). این آزمایش‌ها بر حرکت ذره بر سطح حباب متمرکز است، بنابراین دوربین با سرعت و دقت بالا با تعداد فریم بالا به کار برده می‌شود.

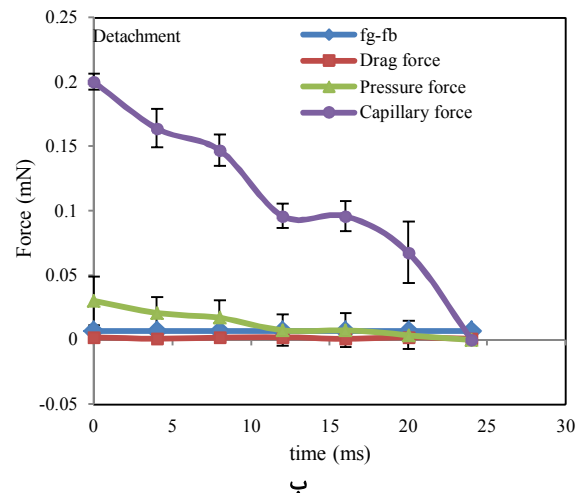
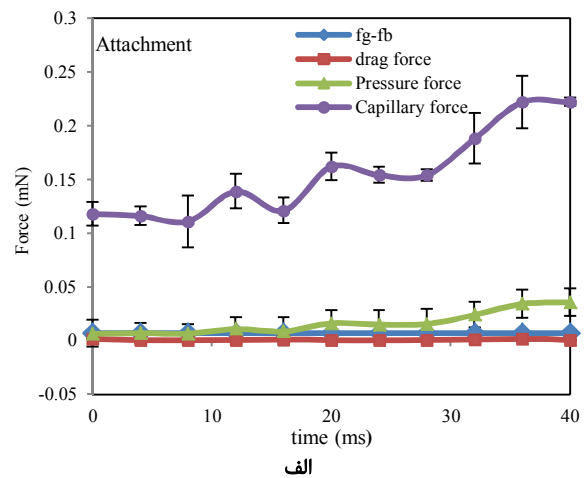
اعداد بی‌بعد استفاده‌شده در این آزمایش عدد رینولدز و عدد باند هستند.

عدد باند نسبت نیروهای وزن به کشش سطحی و عدد رینولدز نسبت نیروی اینرسی به نیروی ویسکوزیته است که توسط روابط ۱۵ و ۱۶ نشان داده می‌شوند:

$$Re_p = \frac{U_p D_p \rho}{\mu} \quad (15)$$

$$Bo = \frac{(\rho - \rho_g) D_b^2 g}{\sigma} \quad (16)$$

که D_p قطر ذره، D_b قطر حباب، σ کشش سطحی بین مایع و حباب، U_p سرعت لغزشی ذره، ρ_g چگالی هوا، ρ چگالی سیال و μ ویسکوزیته سیال است. از عدد رینولدز ذره برای به‌دست‌آوردن نیروی درگ استفاده شده است. مطابق با رابطه ۱۵، سرعت لغزشی ذره روی عدد رینولدز تاثیرگذار است و نتایج اثر رینولدز روی نیروی پسا به وضوح مشاهده می‌شود (نمودار ۱).

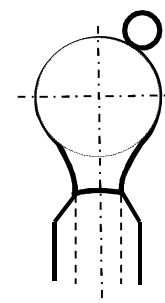
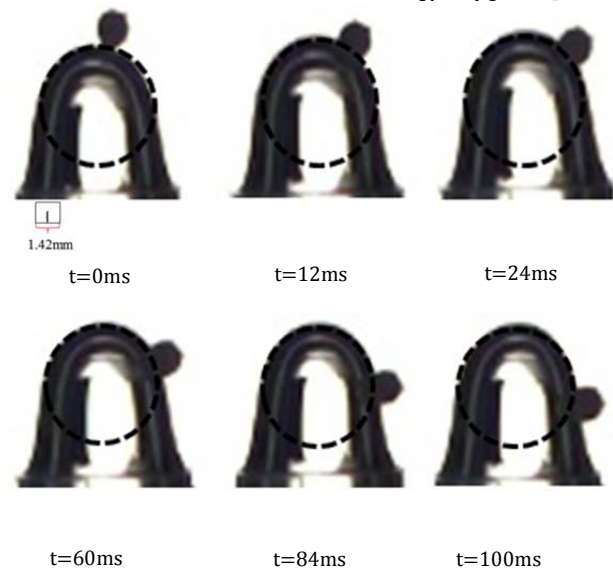


نمودار ۱) عملکرد لحظه‌ای نیروها بر ذره: الف) حالت اتصال ب) حالت جدا شدن

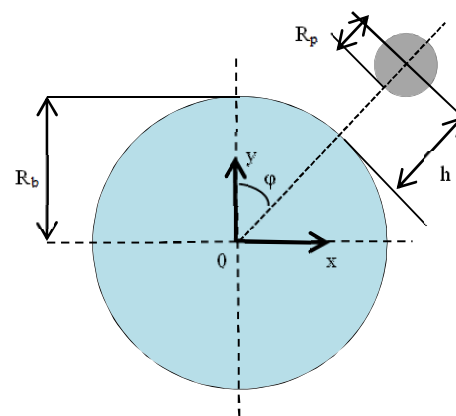
بنابراین عدد رینولدز یک عدد بی‌بعد مهم در نتایج این مطالعه است. همچنین عدد باند متناسب با تعریفی که در بالا از آن شده، معیاری برای اتصال و جدایش ذره بر سطح حباب است. زیرا کشش سطحی باعث نگه‌داشتن ذره به سطح حباب و نیروی وزن باعث جدا شدن ذره از سطح حباب می‌شود. بنابراین عدد باند تقابل بین اتصال و جدایش ذره از سطح حباب را نشان می‌دهد و بیان می‌کند هنگامی که عدد باند عدد بزرگی باشد، ذره از سطح حباب جدا

اتصال و چسبندگی، ذره معمولاً با فاصله مرکزی ثابت بر سطح حباب حرکت می‌کند^[۱].

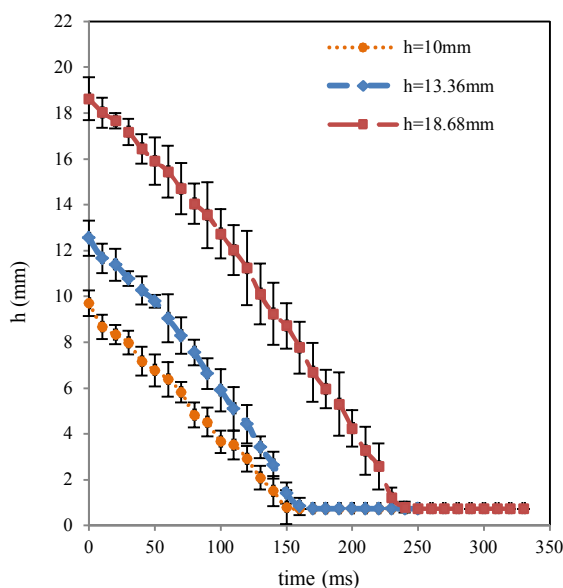
هنگامی که ذره رها می‌شود با توجه به نمودار ۳ از لحظه رها شدن و با گذشت زمان، شیب نمودار در حال کاهش است. ذره تا نزدیک شدن به سطح حباب خط مسیر یکنواختی را طی می‌کند و با حرکت چرخشی خود به سطح حباب نزدیک می‌شود و فاصله مرکز ذره تا سطح حباب کاهش می‌یابد. با افزایش زمان، نمودار به مقدار ثابتی رسیده و دلیل این اتفاق این است که ذره بر سطح حباب در حال لغزیدن به سمت پایین بوده و این فاصله با گذشت زمان ثابت است. تفاوت این دو نمودار در فاصله‌های مختلف در این است که در فاصله رها سازی کمتر، ذره زودتر به موقعیت شعاعی ثابت بر سطح حباب می‌رسد. نکته مهم و کاربردی در نمودار ۳ این است که مقدار h به دست آمده در این نمودار روی ضریب f^t مطابق با رابطه ۸ نقش بسزایی دارد و این ضریب روی نیروی پسا تاثیرگذار است. بنابراین مشاهده می‌کنیم زمانی که ذره روی سطح حباب در حال لغزش بوده، مقدار ضریب f^t مقدار ثابتی است. زیرا فاصله بین مرکز ذره تا سطح حباب (h) مقدار ثابت و برابر با شعاع ذره است. همچنین با استفاده از این نمودار همان‌طور که قبلاً بیان شد، رژیم‌های متفاوت از حرکت ذره در اطراف حباب بررسی شد که شامل سه رژیم مختلف از لحظه رها شدن ذره تا لحظه جدا شدن آن از سطح حباب است. رژیم اول همان‌طور که در بالا ذکر شد، بیان می‌کند که ذره در حال حرکت به سمت حباب به سرعت موقعیت شعاعی خود را تغییر می‌دهد که در نمودار ۳ به‌طور کامل مشخص است. علاوه بر این رژیم دوم که شامل حرکت ذره بر سطح حباب است نشان می‌دهد که نمودار در یک لحظه به صورت خط افقی و ثابتی در آمده که نشان از اتصال و لغزش ذره بر سطح حباب با فاصله شعاعی ثابت بوده که این فاصله شعاعی برابر با شعاع ذره پلاستیکی است. اما رژیم سوم نشان می‌دهد که اگر ذرات آب‌دوست باشند خط تماس سه‌فازی ایجاد نمی‌شود و ذره از سطح حباب جدا می‌شود، اما اگر ذرات آب‌گریز باشند خط تماس سه‌فازی، ایجاد و ذره به سطح حباب متصل می‌شود و تا زمان جدا شدن کامل از سطح حباب، ذره با موقعیت شعاعی ثابت بر سطح حباب حرکت می‌کند (مطابق نمودار ۳).



شکل ۴) نمایش نمونه تصاویری از لغزش ذره بر سطح حباب
 $D_b = 5.5\text{mm}, D_p = 1.5\text{mm}, \sigma = 71 \times 10^{-3}\text{N/m}, Re_p = 74.82, Bo = 4.255$



شکل ۵) تصویر ذره در حال حرکت اطراف حباب ثابت



نمودار ۳) فاصله بین مرکز ذره تا سطح حباب به صورت تابعی از زمان

یک نمونه از نتایج تجربی برای موقعیت شعاعی ذره نسبت به سطح حباب در نمودار ۳ نشان داده شده است. قطر حباب ۵/۵ میلی‌متر و قطر ذره ۱/۵ میلی‌متر بوده و آزمایش در سه حالت انجام گرفته است. سه رژیم متمایز از حرکت ذره اطراف حباب شناسایی شد. اول، قبل از برخورد ذره با سطح حباب، ذره موقعیت شعاعی خود را به سرعت تغییر می‌دهد که این تغییر مربوط به حرکت ذره در سیال است. دوم، زمانی که ذره با سطح حباب تماس برقرار می‌کند، ذره آهسته به سمت پایین می‌لغزد و موقعیت شعاعی آن برای مدت زمان طولانی تغییر نمی‌کند. سوم، اگر ذرات آب‌گریز باشند اتصال بین حباب و ذره صورت می‌گیرد و بعد از

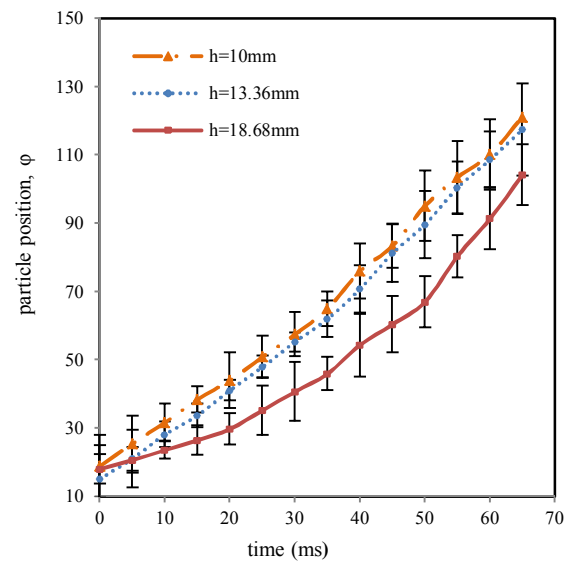
نمودار ۲ تغییرات خط تماس سه‌فازی ذره بر سطح حباب را نشان می‌دهد. هنگامی که ذره و حباب در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند یک لایه نازک از بین ذره و حباب تشکیل می‌شود که آن را فیلم می‌گویند. در این حالت، یک تماس بین سه فاز جامد-مایع-گاز می‌تواند رخ دهد که به آن تماس سه‌فازی می‌گویند و خط تماس ایجاد شده بین سه فاز را خط تماس سه‌فازی می‌نامند. می‌توان دید که ذره، موقعیت تماس سه‌فازی خود را به سرعت تحت تاثیر نیروهای اتصال و جدایش به صورت نوسانی تغییر می‌دهد. زیرا هنگامی که ذره بر سطح حباب در حال لغزش است، در واقع رفتار نوسانی کوچک به داخل و بیرون حباب از خود نشان می‌دهد. در حقیقت منطقه تماس ذره بر سطح حباب تغییر می‌کند. در فرآیند جدایش ذره (نمودار ۲-ب) به علت اینرسی بالا، خط تماس سه‌فازی به تدریج شروع به کاهش می‌کند و در آخر به صفر می‌رسد که نشان می‌دهد دیگر ذره به حباب متصل نیست و به طور کامل جدا شده است.

مهم است بدانیم که چگونه نیروها روی حرکت ذره بر سطح حباب تاثیر می‌گذارند که این فرآیند در نمودار ۱ نشان داده شده است. در مورد اتصال ذره دیده می‌شود که هر دو نیروی مویبندی و نیروی فشاری بر تعامل بین حباب-ذره نسبت به دیگر نیروها غالب هستند (نمودار ۱-الف). علاوه بر این، با توجه به سرعت کم لغزش ذره بر سطح حباب، نیروی پسا در تمام مراحل تقریباً ناچیز است. هر دو نیروی مویبندی و نیروی فشاری یک رفتار نوسانی دارند. علت این امر همان‌طور که در قسمت خط تماس سه‌فازی توضیح داده شد، این است که خط تماس به صورت نوسانی در حال تغییر است. بنابراین تغییر خط تماس سه‌فازی با تغییر نیروی فشاری و نیروی مویبندی همراه است. در مورد جدایش ذره (نمودار ۱-ب) به علت اینرسی بالای ذره، نیروی مویبندی قادر به نگه‌داشتن ذره بر سطح حباب نیست. در طول جدایی ذره از سطح حباب، به تدریج خط تماس سه‌فازی ذره و حباب کاهش می‌یابد و در نتیجه تاثیر نیروی فشاری بر حرکت ذره کاهش پیدا می‌کند. این امر نیروی مویبندی را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد، ولی نیروی مویبندی و نیروی فشاری تنها به خط تماس وابسته نیستند، بلکه به زاویه α (به شکل ۳ مراجعه شود) نیز بستگی دارند و این را می‌توان توسط رابطه‌های ۹ و ۱۲ نشان داد. درست قبل از مرحله جدایش، یعنی در لحظه ۴۰ میلی‌ثانیه، نیروی مویبندی و فشاری به حداکثر مقدار خود می‌رسد، زیرا در این لحظه زاویه α به حداکثر مقدار خود رسیده است. با این حال، پس از آن، این دو نیرو کاهش می‌یابند و به سمت صفر میل می‌کنند، زیرا خط تماس بین ذره و حباب و زاویه α صفر شده‌اند.

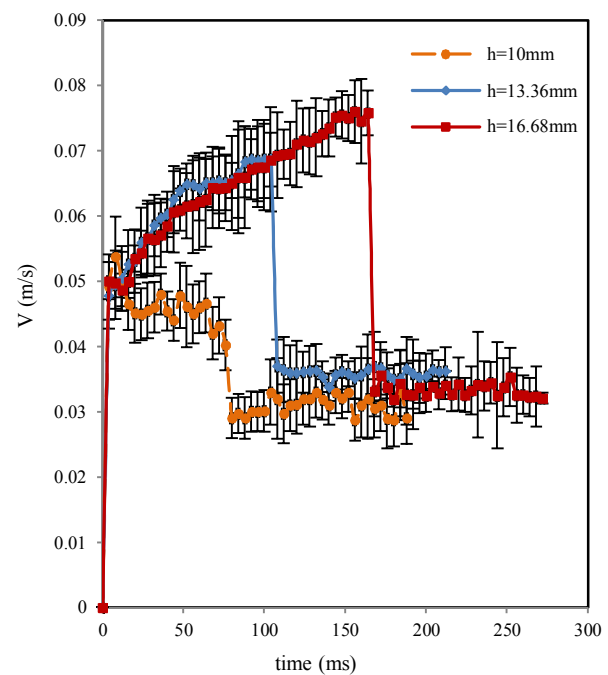
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش شد تا با انجام یک سری آزمایش، تحقیقاتی روی برخورد ذره پلاستیکی پلی‌استیل و حباب ساکن انجام شود. به منظور کاربردی‌تر شدن نتایج، آزمایش‌ها برای ذره پلاستیکی با قطر ۱/۵ میلی‌متر در سه ارتفاع رها سازی ۱۶/۶۸، ۱۳/۳۶ و ۱۰ میلی‌متر روی حباب ساکن تولید شده با قطر ۵/۵ میلی‌متر بر دهانه لوله شیشه‌ای صورت گرفت و به بررسی سرعت ذره بر سطح حباب، موقعیت زاویه‌ای ذره بر سطح حباب و موقعیت مکانی ذره بر سطح حباب و اطراف حباب پرداخته شده است. همچنین در این پژوهش، عملکرد نیروهای پسا، مویبندی، فشاری، وزن و شناوری بر حالت‌های اتصال و جدایش ذره بر سطح حباب بررسی شد و همچنین تاثیر خط تماس سه‌فازی ذره بر نیروهای مویبندی و

در نمودار ۴، موقعیت زاویه‌ای ذره به صورت تابعی از زمان در سه حالت نشان داده می‌شود. با توجه به نمودار در لحظه $t=0$ ، ذره با سطح حباب برخورد می‌کند. زاویه برخورد اولیه ($t=0$) در دو حالت با یکدیگر اختلاف اندکی دارند. پس از برخورد و با افزایش زمان، موقعیت زاویه‌ای ذره بر سطح حباب (φ)، با افزایش ارتفاع رها سازی کاهش می‌یابد. زیرا با افزایش ارتفاع، مومنتوم ذره بیشتر می‌شود. بنابراین این مومنتوم بیشتر بر نیروهای نگهدارنده ذره روی حباب غلبه می‌کند و باعث می‌شود ذره زودتر از سطح حباب جدا شود. نمودار ۵ سرعت ذره را به صورت تابعی از زمان از لحظه جدایش از میله نگهدارنده تا لحظه برخورد به سطح و لغزش روی حباب را نشان می‌دهد. این نمودارها نشان می‌دهند که سرعت ذره بر سطح حباب مقدار تقریباً ثابتی است. هنگام برخورد ذره با سطح حباب، سرعت ذره به طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد.



نمودار ۴) مقایسه نتایج تجربی موقعیت زاویه‌ای ذره به صورت تابعی از زمان لغزش برای سه فاصله رها سازی



نمودار ۵) سرعت ذره به صورت تابعی از زمان

ρ	چگالی سیال (kgm^{-3})
ρ_g	چگالی هوا (kgm^{-3})
ρ_p	چگالی ذره (kgm^{-3})
σ	کشش سطحی سیال (Nm^{-1})
φ	موقعیت زاویه‌ای ذره بر سطح حباب (درجه)
φ_0	زاویه برخورد اولیه ذره با سطح حباب (درجه)

منابع

- 1- Nguyen AV, Evans GM. Attachment interaction between air bubbles and particles in froth flotation. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2004;28(5):381-385.
- 2- Dobby GS, Finch JA. A model of particle sliding time for flotation size bubbles. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1986;109(2):493-498.
- 3- Schulze HJ. Hydrodynamics of bubble-mineral particle collisions. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 1989;5(1-4):43-76.
- 4- Hewitt D, Fornasiero D, Ralston J. Bubble particle attachment efficiency. *Minerals Engineering*. 1994;7(5-6):657-665.
- 5- Nguyen AV, Schulze HJ, Ralston J. Elementary steps in particle-bubble attachment. *International Journal of Mineral Processing*. 1997;51(1-4):183-195.
- 6- Dai Z, Fornasiero D, Ralston J. Particle-bubble attachment in mineral flotation. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1999;217(1):70-76.
- 7- Ralston J, Fornasiero D, Hayes R. Bubble-particle attachment and detachment in flotation. *International Journal of Mineral Processing*. 1999;56(1-4):133-164.
- 8- Dai Z, Fornasiero D, Ralston J. Particle-bubble collision models - a review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2000;85(2-3):231-256.
- 9- Phan CM, Nguyen AV, Miller JD, Evans GM, Jameson GJ. Investigations of bubble-particle interactions. *International Journal of Mineral Processing*. 2003;72(1-4):239-254.
- 10- Nguyen AV, Evans GM. Movement of fine particles on an air bubble surface studied using high-speed video microscopy. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004;273(1):271-277.
- 11- Tao D. Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles - a review. *Separation Science and Technology*. 2005;39(4):741-760.
- 12- Verrelli DI, Koh PTL, Nguyen AV. Particle-bubble interaction and attachment in flotation. *Chemical Engineering Science*. 2011;66(23):5910-5921.
- 13- Hubička M, Basařová P, Vejražka J. Collision of a small rising bubble with a large falling particle. *International Journal of Mineral Processing*. 2013;121:21-30.
- 14- Gao Y, Wang G, Evans GM, Wanless EJ, Sathe M, Mitra S, et al. Modelling the motion of a collected particle over a bubble surface. *Procedia Engineering*. 2015;102:1346-1355.
- 15- Brabcová Z, Karapantsios T, Kostoglou M, Basařová P, Matis K. Bubble-particle collision interaction in flotation systems. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*. 2015;473:95-103.
- 16- Wang CQ, Wang H, Wu BX, Liu Q. Boiling treatment of ABS and PS plastics for flotation separation. *Waste Management*. 2014;34(7):1206-1210.
- 17- Wang CQ, Wang H, Fu JG, Liu YN. Flotation separation of waste plastics for recycling - a review. *Waste*

فشاری مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌ها در اعداد بی‌بعد $Bo = 4.255$ و $Re_p = 74.82$ صورت گرفته است و نتایج زیر به دست آمد:

۱- موقعیت زاویه‌ای ذره در سطح حباب با تغییر فاصله رها سازی تغییر می‌کند. در نتیجه، فاصله رها سازی در موقعیت زاویه‌ای ذره بر سطح حباب نقش دارد. زیرا افزایش فاصله رها سازی باعث افزایش مومنتوم می‌شود و این امر به جدا شدن سریع ذره از سطح حباب کمک می‌کند. همچنین زاویه برخورد اولیه در فاصله رها سازی $18/68$ ، $13/36$ و 10 میلی‌متر به ترتیب $18/01$ ، $15/15$ و $18/8$ درجه به دست آمده است.

۲- سرعت لغزشی ذره بر سطح حباب تقریباً ثابت است.

۳- زاویه لغزش ذره روی حباب و زمان لغزش استخراج و تحلیل شد.

۴- خط تماس سه‌فازی ذره- حباب روی نیروی مویبندی و نیروی فشاری تاثیر می‌گذارد. هنگامی که ذره به حباب متصل است خط تماس سه‌فازی به سرعت تغییر می‌کند و باعث تغییر نیروی مویبندی و نیروی فشاری می‌شود. با کاهش خط تماس، این دو نیرو نیز کاهش می‌یابند.

۵- به دلیل سرعت کم لغزش ذره بر سطح حباب، نیروی پسا در مراحل اتصال و جدا شدن ناچیز است. همچنین نیروی شناوری و نیروی گرانش نیز مقداری ثابت است. نقش اصلی در نیروهای موثر، نیروهای مویبندی و فشاری هستند.

تشکر و قدردانی: از دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود که امکانات را برای انجام این پژوهش فراهم نمودند، تشکر می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج برعهده نویسندگان است.

تعارض منافع: مولفین مقاله، هیچ گونه تعارض منافی با فرد یا گروه دیگر ندارند.

سهم نویسندگان: مینا محمدی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۳۴٪)؛ محسن نظری (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۳٪)؛ محمدحسن کیهانی (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۳۳٪)

منابع مالی: منابع مالی خاصی برای انجام این تحقیق استفاده نشده است.

۷- پی‌نوشت

Bo	عدد باند
D_b	قطر حباب (میلی‌متر)
D_p	قطر ذره (میلی‌متر)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
h	فاصله مرکز ذره تا سطح حباب (میلی‌متر)
Re_p	عدد رینولدز ذره
R_b	شعاع حباب (میلی‌متر)
R_p	شعاع ذره (میلی‌متر)
R_{TPC}	شعاع خط تماس سه‌فازی (میلی‌متر)
U_p	سرعت لغزش ذره (ms^{-1})
V	سرعت ذره (ms^{-1})

علایم یونانی

α	زاویه تماس سه‌فازی ذره بر سطح حباب (درجه)
β	زاویه بین زاویه تماس و زاویه تماس سه‌فازی ذره بر سطح حباب (درجه)
θ	زاویه تماس ذره (درجه)
μ	ویسکوزیته سیال ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)

straight tube: A comparative experimental study. Applied Thermal Engineering. 2017;111:39-48.

24- Nazari M, Ashouri M, Kayhani MH, Tamayol A. Experimental study of convective heat transfer of a nanofluid through a pipe filled with metal foam. International Journal of Thermal Sciences. 2015;88:33-39.

25- Nguyen AV, Schultze HJ. Colloidal science of flotation. Basel: Marcel Dekker Inc; 2004.

26- Nguyen AV, Evans GM. Axisymmetric approach of a solid sphere toward a non-deformable planar slip interface in the normal stagnation flow-development of global rational approximations for resistance coefficients. International Journal of Multiphase Flow. 2002;28(8):1369-1380.

27- Nguyen AV, Evans GM. Exact and global rational approximate expressions for resistance coefficients for a colloidal solid sphere moving in a quiescent liquid parallel to a slip gas-liquid interface. Journal of Colloid and Interface Science. 2004;273(1):262-270.

28- Wang G, Gao Y, Mitra S, Li Y, Zhou Sh, Evans G. Instantaneous bond number for a particle detaching from a bubble. International Journal of Mineral Processing. 2015;142:22-29.

Management. 2015;41:28-38.

18- Wang C, Wang H, Liu Y, Huang L. Optimization of surface treatment for flotation separation of polyvinyl chloride and polyethylene terephthalate waste plastics using response surface methodology. Journal of Cleaner Production. 2016;139:866-872.

19- Shen H, Pugh RJ, Forssberg E. Floatability, selectivity and flotation separation of plastics by using a surfactant. Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects. 2002;196(1):63-70.

20- Shen H, Forssberg E, Pugh RJ. Selective flotation separation of plastics by particle control. Resources Conservation and Recycling. 2001;33(1):37-50.

21- Shibata J, Matsumoto S, Yamamoto H, Kusaka E, Pradip P. Flotation separation of plastics using selective depressants. International Journal of Mineral Processing. 1996;48(3-4):127-134.

22- Wang W, Zhou Z, Nandakumar K, Xu Z, Masliyah JH. Attachment of individual particles to a stationary air bubble in model systems. International Journal of Mineral Processing. 2003;68(1-4):47-69.

23- Nazari M, Babazadeh Baie N, Ashouri M, Shahmardan MM, Tamayol A. Unsteady heat transfer from a reservoir fluid by employing metal foam tube, helically tube and