



Experimental Study of Impacting a Spherical Hydrophobic Particle on an Air-Water Interface

M. Ramezani, M. Nazari*, M. Shahmardan

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Review History:

Received: 25 Nov. 2017
Revised: 9 May. 2018
Accepted: 17 July 2018
Available Online: 23 July 2018

Keywords:

Particle impact
Critical impact velocity
Contact angle
Multi-phase flow

ABSTRACT: In this study, the impact of spherical hydrophobic particles on an air-water interface was analyzed experimentally. The aim of this study is to obtain a critical impact velocity in which the hydrophobic particle remains on the liquid surface so that it penetrates completely at higher velocities than the critical velocity. A mathematical model was developed based on energy balance to predict the critical velocity. The Teflon particles of diameter 3-5 mm were used. Distilled water with a density of 1000.71 kg/m³ was used as the fluid. Particle falls into the fluid were captured by using a high-speed video camera with the rate of 4500 fps. For Teflon spherical hydrophobic particles, two floatation and penetration regimes were observed from experiments. After processing of sequential images, the motion of a particle inside the fluid was obtained and for the first time, the maximum penetration depth, rebound depth, rebound height and the pinch off depth were determined for each particle and it was found that, at critical velocities, particle penetration is associated with oscillations, and at higher velocities than the critical number, the number of oscillations is decreased. The dependence of maximum penetration depth on drop height was studied and it was found that with increasing drop height, the maximum penetration depth is also increased. Also, the effect of particle size on critical velocity was investigated and it was observed that with increasing the particle size, the critical velocity is decreased. In addition, the particle velocity and the velocity of the three-phase contact line were plotted at critical conditions. The developed mathematical model was also compared with the experimental observations, and it was found that there is a good agreement with the measured values.

1- Introduction

Most studies on the particle impact with the gas-fluid surface focused on the flow above or below the main surface. The most important applications that can be mentioned are refined gas-containing particles, evaporated droplets in contact with catalyst particles (FCC) [1], the spray dryer system [2], particle coloring, the movement of fine objects on liquid surfaces [3], the recovery of valuable minerals using film flotation [4] and etc.

In this study, for simulation of the Film flotation process, the impact of spherical hydrophobic particles on a gas-liquid interface was studied experimentally. We focused on comparing the impact of spherical hydrophobic Teflon particles at low velocities, on a planar surface of a Newtonian fluid, which has been underestimated. After processing of sequential images, the motion of a particle inside the fluid was obtained and for the first time, the maximum penetration depth, rebound depth, rebound height and the pinch-off depth was determined for each particle.

2. Mathematical Modeling

A mathematical model based on the energy balance was

presented to predict the behavior of particle penetration in the fluid. Fig. 1 illustrates a spherical particle of diameter d impacting on the gas-liquid interface with a critical velocity v_c . The particle penetrates into the liquid and reaches zero velocity. Critical velocity of the particle can be predicted using the energy balance between the initial and the final states as defined in Eq. (1).

$$\begin{aligned}\Delta E &= Q - W \\ \Delta E &= -W \\ \Delta E &= \Delta E_p + \Delta E_l + \Delta E_g\end{aligned}\quad (1)$$

Where ΔE is the total energy change, W is total work associated with all the resistance forces (drag, buoyancy, and capillary) and Q is heat change that for an adiabatic system is zero.

$$\begin{aligned}\Delta E_p &= -\frac{1}{2}mv_c^2 - mgbd \\ \Delta E_l &= \frac{1}{30}\pi\rho_l g r_c^2 [(b-1)d]^2 \\ \Delta E_g &= 0\end{aligned}\quad (2)$$

Assuming that the temperature of the system stays

*Corresponding author's email: mnazari@shahroodut.ac.ir



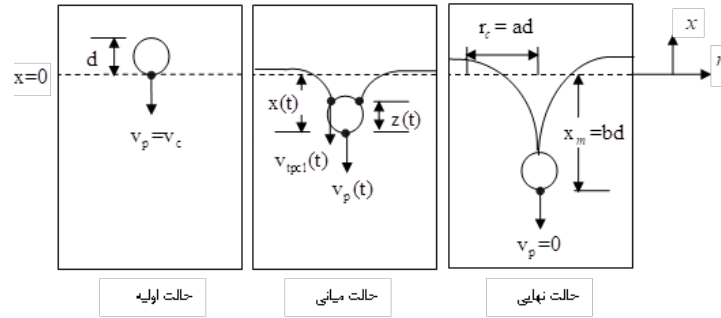


Fig. 1. The particle impact on the gas-liquid interface with a critical velocity v_c

constant during the process, we consider the internal energy changes of the system to be zero. It is also assumed that there is no change in the gas phase energy. Due to the small size of particle in compare with the volume of fluid and the low impact velocity, kinetic energy change of fluid can be ignored. Therefore, the energy change of liquid is equal to the potential energy change [4].

Where b is a dimensionless constant that is used to define

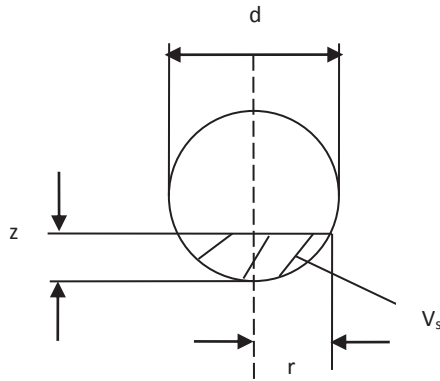


Fig. 2. Part of particle submerged in the fluid

the maximum depth of penetration of particle. The work term is obtained by integrating each of resistance forces over the distance traveled by the particle. The work due to buoyancy is obtained by integrating the buoyancy force for partially submerged particle over the distance traveled by the particle. V_s is the volume of the part of the particle that is submerged in the fluid (Fig. 2) as defined in Eq. (3).

$$V_s = -\frac{1}{6}\pi z(3r^2 + z^2)$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2} + z\right)^2}$$

$$V_s = \pi z^2 \left(\frac{d}{2} + \frac{z}{3}\right), z = x - x_{TPCL}$$
(3)

Where r is the radius of wettability and z is the depth of wettability of the particle in the fluid, x is the distance of the particle stagnation point to the initial surface of the fluid and x_{TPCL} is the distance of three-phase contact line on the particle to the initial surface of the fluid. A quadratic fit to the measurements of x and x_{TPCL} is obtained for all particle sizes according to the Eq. (4).

$$x_{tpcl} = -\frac{b-1}{b} \frac{1}{bd} x^2$$
(4)

By combining Eq. (3) and Eq. (4), the relation for the particle's wettability depth is obtained according to Eq. (5). By substituting each of the work and energy terms into Eq. (1), the final equation to define the critical impact velocity was obtained according to the Eq. (6).

$$z = \left(1 + \frac{b-1}{b} \frac{x}{bd}\right)x$$

$$\frac{1}{2}mv_c^2 + mgbd$$
(5)

$$= -\int_0^{-bd} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \frac{1}{2} \rho_l |v - v_{TPCL}|^2 \frac{18.5}{Re_p^{0.6}} dx - \int_0^{-bd} \pi d \sigma_{gl} \left(\frac{-2z}{d} - 1 - \cos \theta_s\right) dx$$

$$- \int_0^{-bd} \rho_l g \pi z^2 \left(\frac{d}{2} + \frac{z}{3}\right) + \frac{1}{30} \pi \rho_l g (ad)^2 [(b-1)d]^2$$
(6)

3. Results and Discussion

Fig. 3 shows the particle motion in the fluids both at the critical condition and near it. As can be seen, the velocity of particles that penetrated the fluids has a very small difference in critical velocity.



Penetration: $d = 3\text{mm}, v_l = 0.4390\text{m/s}$



Floating: $d = 3\text{mm}, v_c = 0.4389\text{m/s}$

Figure 3. Spherical Teflon particle colliding with the air-water interface

The data sets for the relative velocity of the particle and the contact line (v_{rel}) is approximated by a quadratic curve according to Eq. (7)

$$v_{rel} = v_p - v_{TPCL} = v_c \left[\frac{1}{b^2} \left(\frac{x}{d}\right)^2 + \frac{2}{b} \left(\frac{x}{d}\right) + 1 \right]$$
(7)

Finally, for estimating the accuracy of the predicted model, Eq. (6) and the measured critical velocity as a function of particle diameter are plotted in Fig. 4. As can be seen, the critical velocity decreases with increasing particle diameter. That is, larger particles require less kinetic energy to float. It is also observed that the data are consistent with the predicted mathematical model.

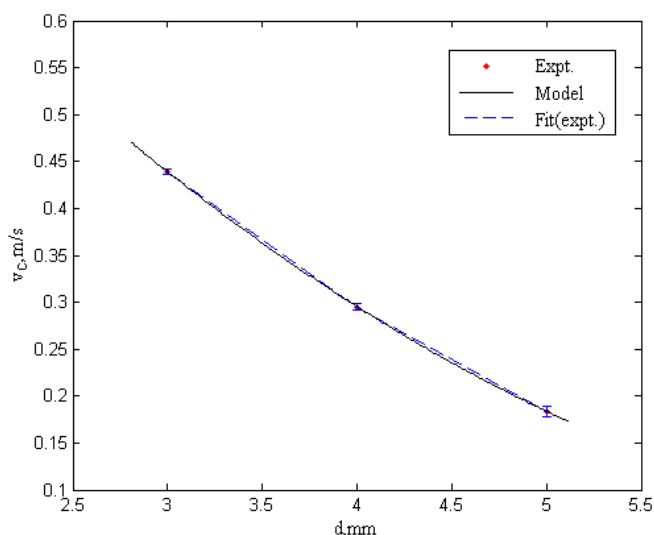


Fig. 4. Critical velocity vs. particle diameter

4. Conclusion

In this study, the penetration behavior of spherical hydrophobic particles on collision with the surface of pure was investigated. It was found that the collision of these particles has two regimes: flotation and penetration. The particle continues to move inside the fluids, and eventually, it separates from the surface and at a lower velocity, reaches a stable state (the penetration regime) or oscillates at a critical condition and then floats on the surface of the fluid (floatation regime). It was also observed that if the particle's impact velocity is less than the critical value, even if it is denser than the liquid, does not penetrate. This is due to the surface tension and buoyancy forces on the particle. By image processing, the motion of a particle inside the fluid was obtained and for the first time, the maximum penetration depth, rebound depth, rebound height and the pinch-off depth were determined for each particle and It was found that, at higher velocities than the critical, the number of oscillations decreases, so that the particle gets separated from the liquid surface without any oscillations.

References

- [1] S. Mitra, E. Doroodchi, V. Pareek, J. B. Joshi, and G. M. Evans, "Collision behaviour of a smaller particle into a larger stationary droplet," *Advanced Powder Technology*, vol. 26, pp. 280-295, 2015.
- [2] M. van der Hoeven, "Particle-droplet collisions in spray drying," 2008.
- [3] D. Vella, D.-G. Lee, and H.-Y. Kim, "The load supported

by small floating objects," *Langmuir*, vol. 22, pp. 5979-5981, 2006.

- [4] D. Liu, Q. He, and G. Evans, "Penetration behaviour of individual hydrophilic particle at a gas-liquid interface," *Advanced Powder Technology*, vol. 21, pp. 401-411, 2010.



بررسی تجربی برخورد ذره کروی آب‌گریز با سطح مشترک هوا - آب

مریم رمضانی، محسن نظری^{*}، محمد محسن شاه مردان

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۴
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۲/۱۹
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۵/۰۱

کلمات کلیدی:

برخورد ذره،
آب‌گریز،
سرعت بحرانی برخورد،
زاویه تماس،
جریان چند فاز

خلاصه: فیلم‌فلوتاسیون یک روش برای جداسازی ذرات معدنی آب‌گریز از ذرات آب‌دوست است. در این مقاله به منظور شبیه‌سازی این روش، برخورد ذرات آب‌گریز کروی با سطح مشترک هوا - آب، مورد آزمایش قرار گرفت. هدف پژوهش حاضر، به دست آوردن سرعت بحرانی برخورد است که ذره آب‌گریز در آن روی سطح مایع شناور می‌ماند. در سرعت‌های بالاتر از سرعت بحرانی به طور کامل در مایع نفوذ می‌کند. برای پیش‌بینی سرعت بحرانی، یک مدل ریاضی بر اساس موازنه انرژی ارائه شده است. ذرات از جنس تفلون در اندازه‌های ۳ - ۵ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفتند. از آب مقطر با چگالی $1000/71 \text{ kg/m}^3$ به عنوان سیال آزمایش استفاده شد. با استفاده از یک دوربین پرسرعت ۴۵۰۰ فرم در ثانیه، سقوط ذرات در مایع عکس‌برداری شد. از آزمایش‌ها برای ذرات کروی آب‌گریز تفلون دو رژیم شناوری و نفوذ مشاهده شد و سرعت‌های بحرانی برای همه اندازه‌ها محاسبه گردید و پس از پردازش تصاویر متوالی چگونگی حرکت ذره درون سیال به دست آمد. برای اولین بار ماکزیمم عمق نفوذ، عمق برگشتی، ارتفاع برگشتی و عمق شکست برای هر ذره تعیین شد و از مقایسه آن‌ها مشخص شد که در سرعت‌های بحرانی و نزدیک آن نفوذ ذره با نوساناتی همراه است و هرچه سرعت از مقدار بحرانی بیشتر شود تعداد نوسانات کاهش یافته تا این که در سرعت‌های بالاتر، ذره بدون هیچ نوسانی از سطح مایع جدا می‌شود. وابستگی ماکزیمم عمق نفوذ به ارتفاع سقوط مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش ارتفاع سقوط، ماکزیمم عمق نفوذ نیز افزایش می‌یابد. همچنین به بررسی تأثیر اندازه ذرات بر سرعت بحرانی پرداخته شد و مشاهده شد که با افزایش اندازه ذرات سرعت بحرانی کاهش می‌یابد. علاوه بر این تغییرات سرعت ذره و سرعت خط تماس سه فازی طی نفوذ در سیال در شرایط بحرانی رسم شد. مشاهده شد سرعت ذره در حین نفوذ، کاهش می‌یابد تا این‌که در بیشترین عمق نفوذ، به صفر می‌رسد و ذره شروع به حرکت به سمت بالا می‌کند. در حین حرکت به سمت بالا، مقدار سرعت تا رسیدن به یک مقدار ماکزیمم افزایش یافته و مجدداً کاهش می‌یابد و ذره تا یک ارتفاع مشخص پیش می‌رود تا این که در نهایت سرعتش به صفر می‌رسد و نیروی گرانش، ذره را دوباره به سمت پایین هدایت می‌کند. مدل ریاضی توسعه داده شده با مشاهدات آزمایش مقایسه شد و مشخص شد که در محدوده مدل‌سازی با مقادیر داده‌های به دست آمده هم‌خوانی خوبی دارد.

۱- مقدمه

درک برخورد ذرات با سطح مشترک گاز - مایع کلید طراحی‌های بهینه و موفق بسیاری از کارهای مهندسی است و مورد توجه بسیاری از مطالعات علمی بوده است [۹-۱]. پاک کردن گردوغبار از گازها، اسپری‌درآیینگ^۱ [۱]، بازیابی مواد معدنی ارزشمند با استفاده از فلوتاسیون معدنی^۲ [۲] و بسیاری از کاربردهای دیگر. در همه این برخوردها دو هندسه مجزا برای سطح مشترک می‌تواند وجود داشته باشد؛ سطح مشترک مسطح و سطح مشترک منحنی [۳]. با توجه به هندسه مسئله و جنس ذرات خروجی‌های مختلفی مشاهده می‌شود. مطالعات بسیاری درباره برخورد ذرات استوانه‌ای [۴] و کروی [۵-۷] روی سطح مشترک مسطح انجام شده است. به طور کلی برای ذرات کروی

آب‌دوست در برخورد با سطح مسطح مایع دو رژیم شناوری^۳ و نفوذ^۴ و برای ذرات آب‌گریز رژیم‌های نوسانی^۵، برگشتی^۶ و نفوذ مشاهده شدند. لی و همکاران [۷] به بررسی برخورد ذرات فوق آب‌گریز در آب پرداختند و در آن تأثیر ویسکوزیته را بر رژیم‌های برخورد مطالعه کردند و دریافتند که برای ذرات کروی فوق آب‌گریز اگر ویسکوزیته سیال از مقدار بحرانی ۳ mpa.s فراتر رود، رژیم برگشتی اتفاق نمی‌افتد و فقط دو رژیم نوسانی و نفوذ مشاهده می‌شود. اوزا و موری [۸] شرایط بحرانی یک ذره آب‌گریز با چگالی کمتر از مایع را مطالعه کردند. ایوانس و همکاران [۲] و [۹] رفتار نفوذ یک ذره کروی آب‌دوست را بررسی کردند و در آن سرعت بحرانی ذره را در برخورد با سطح مشترک سیالات مختلف با هوا به دست آوردند و همچنین دینامیک حرکت یک ذره کروی آب‌دوست را در برخورد با

3 Floating
4 Sinking
5 Oscillation
6 Bouncing

1 Spray drying
2 Mineral flotation

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mnazari@shahroodut.ac.ir



در این مقاله به منظور شبیه سازی برخورد ذرات آب‌گریز با سطح مایع در فیلم فلوئتاسیون، برخورد ذرات کروی از جنس تفلون مورد آزمایش و مطالعه قرار گرفت. با استفاده از یک دوربین پرسرعت، سرعت ذره و سرعت خط تماس سه فازی^۲ به دست آمد و از یک مدل ریاضی براساس موازنه انرژی برای پیش بینی سرعت بحرانی ذره استفاده شد. هدف از این مطالعه به دست آوردن یک سرعت بحرانی است که ذره آب‌گریز در آن روی سطح باقی می‌ماند طوری که در سرعت‌های بالاتر از سرعت بحرانی ذره در مایع نفوذ می‌کند. همچنین به عنوان نوآوری کار، برای اولین بار مشخص شد که در سرعت‌های بحرانی و نزدیک آن نفوذ ذره با نوساناتی همراه است و مکان بیشترین عمق نفوذ ذره با مکان گسیختگی ذره از سطح سیال متفاوت است. هرچه سرعت از مقدار بحرانی بیشتر شود تعداد نوسانات حرکت ذره کاهش یافته تا این که در سرعت‌های بالاتر، بدون هیچ نوسانی از سطح مایع جدا می‌شود یعنی ذره در مکان بیشترین عمق نفوذ از سطح سیال گسیخته می‌شود. نشان داده شد که مدل ریاضی با مشاهدات آزمایش هم‌خوانی خوبی دارد و همچنین به بررسی تأثیر اندازه ذرات بر سرعت بحرانی پرداخته شد.

۲- مدل ریاضی

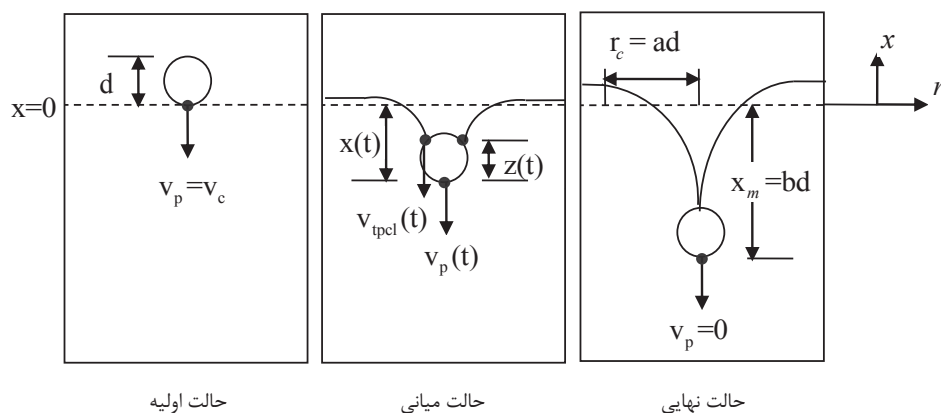
در شکل ۱ ذره‌ای به قطر d با سرعت بحرانی v_c به سطح مشترک گاز - مایع برخورد می‌کند و پس از نفوذ درون مایع سرعتش به صفر می‌رسد. با استفاده از موازنه انرژی بین حالت ابتدایی و انتهایی رفتار نفوذ ذره را می‌توان پیش‌بینی نمود.

۲-۱- موازنه انرژی

معادله انرژی را برای سیستم ذره، گاز و مایع بین حالت اولیه و

فیلم معلق مایع مطالعه کردند. لیو و همکاران [۱۰ و ۱۱] برای شبیه سازی تأثیر محیط ذره بر سرعت بحرانی، تأثیر حجم فاز مایع را روی حرکت ذره مطالعه کردند و همچنین ارتفاع بحرانی ربایش ذره را در فلوئتاسیون بررسی کردند.

فلوئتاسیون یکی از رایج‌ترین روش‌های پرمیارسازی مواد معدنی آسیاب شده است. در این روش می‌توان با استفاده از خواص آب‌گریزی مواد معدنی برای جداسازی آن‌ها از ناخالصی‌ها استفاده کرد. به این ترتیب که مواد معدنی ارزشمند را آب‌گریز کرد و آن‌ها را با حباب‌هایی که در سلول فلوئتاسیون به وجود می‌آیند، گیر انداخت. این حباب‌ها به سطح آب می‌آیند و یک لایه کف تشکیل می‌دهند که در انتها این کف را از محلول جدا می‌کنند. عملکرد فلوئتاسیون به چند عامل مهم بستگی دارد. یک این که لازم است ذرات آب‌گریز با استفاده از کلکتورهایی به سمت حباب‌ها منتقل شوند تا به سطح حباب - مایع بچسبند. دوم این که برای تولید حباب‌ها و برخوردشان با ذرات، نیاز به ایجاد اغتشاش است که در سلول‌های مکانیکی با همزن، در ستون‌ها با حباب‌ساز و در سلول جیمسون با ایجاد خلاء تولید می‌شود. اغتشاش ایجاد شده از یک طرف باعث چسبیدن ذرات آب‌گریز به حباب‌ها می‌شود و از طرف دیگر عامل جداسازی ذرات چسبیده به حباب نیز است، بنابراین لازم است که از یک مقدار بحرانی کمتر باشد تا باعث جدایش ذرات از حباب‌ها نگردد [۱۵-۱۲]. به منظور عدم وابستگی فرآیند به اغتشاش یک روش دیگر به نام فیلم فلوئتاسیون^۱ [۱۶ و ۱۷] وجود دارد که در آن همه ذرات در ابتدا در فاز گاز هستند و از یک ارتفاع مشخص به سطح مشترک گاز - مایع برخورد می‌کنند تا ذرات آب‌گریز روی سطح مایع باقی بمانند و سایر ذرات به طور کامل در مایع نفوذ کنند.



شکل ۱ برخورد ذره با سرعت بحرانی به سطح مشترک گاز - مایع

Fig. 1. Particle impact with critical velocity on the gas - liquid interface

سیال (عمق نفوذ ذره درون سیال)، v_p سرعت نقطه سکون ذره و v_{TPCL} سرعت حرکت مرز مشترک سه فاز روی ذره است که سرعت خط تماس سه فازی نام دارد و $v_p - v_{TPCL}$ اختلاف سرعت ذره و سرعت خط تماس سه فازی است. ضریب درگ ذره طی نفوذ متغیر است و اطلاعاتی از ضریب درگ ذره‌ای که به طور جزئی غوطه‌ور است، نداریم. اما با توجه به این که در این مطالعه عدد رینولدز ذره از 0.3 بیشتر است، می‌توان از مقدار ضریب درگ غوطه‌وری کامل ذره استفاده کرد.

$$C_D = 18.5 / \text{Re}^{0.6} \quad (7)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_l d |v_p - v_{TPCL}|}{\mu} \quad (8)$$

از بررسی عکس‌های متوالی برخورد ذره با سطح و پردازش تصاویر، مقادیر v_p و v_{TPCL} اندازه‌گیری و به ترتیب در شکل ۱۱ و شکل ۱۳ به عنوان تابعی از x رسم شدند. در این مقاله سرعت ذره را از شروع برخورد به سطح تا رسیدن به بیشترین عمق نفوذ، می‌توان با یک تابع درجه دو مدل‌سازی کرد (با توجه به اندازه‌گیری‌های تجربی که در قسمت‌های جلوتر تشریح خواهد شد، این برازش منحنی انجام شده است).

$$v_p(x) = v_c \left[1 - \frac{1}{b^2} \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right] \quad (9)$$

همچنین می‌توان اختلاف سرعت ذره با سرعت خط تماس سه فازی را با یک تابع درجه دو تقریب زد. این تقریب با توجه به اندازه‌گیری‌های تجربی که در قسمت‌های جلوتر تشریح خواهد شد، انجام شده است. داده‌های تجربی در عکس‌برداری برخورد ذره با سطح آزاد، با تابع زیر برازش شده‌اند.

$$v_{rel} = v_p - v_{TPCL} = v_c \left[\frac{1}{b^2} \left(\frac{x}{d} \right)^2 + \frac{2}{b} \left(\frac{x}{d} \right) + 1 \right] \quad (10)$$

با ترکیب معادلات (۹) و (۱۰) داریم؛

$$v_{TPCL} = -2v_c \left[\frac{1}{b^2} \left(\frac{x}{d} \right)^2 + \frac{1}{b} \left(\frac{x}{d} \right) \right] \quad (11)$$

منحنی معادله (۹) در شکل ۱۱، معادله (۱۰) در شکل ۱۲ و معادله (۱۱) در شکل ۱۳ رسم شده‌اند که مشاهده می‌شود با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش هم‌خوانی خوبی دارند.

۲-۲-۲-۲-۲ شناوری

با انتگرال‌گیری نیروی شناوری (F_B) برای ذره‌ای که به طور جزئی

حالت نهایی می‌نویسیم. تغییرات انرژی کل برابر مجموع تغییرات انرژی ذره، مایع و گاز است. برای سیستم آدیاباتیک $Q = 0$ است.

$$\begin{aligned} \Delta E &= Q - W \\ \Delta E &= -W \\ \Delta E &= \Delta E_p + \Delta E_l + \Delta E_g \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن ΔE کل تغییرات انرژی، Q گرما و W کار است تغییرات انرژی ذره، مایع و گاز برابر مجموع انرژی‌های جنبشی، پتانسیل و داخلی آن‌هاست. با فرض این که دمای سیستم طی فرآیند ثابت بماند، تغییرات انرژی داخلی سیستم صفر است. از طرفی به دلیل اندازه کوچک ذره و سرعت برخورد کم، از تغییر انرژی جنبشی مایع می‌توان صرف نظر کرد. همچنین فرض می‌شود که تغییری در انرژی فاز گاز رخ نمی‌دهد و سرعت ذره در حالت نهایی به صفر می‌رسد. بنابراین داریم:

$$\Delta E_p = -\frac{1}{2} m v_c^2 - mgbd \quad (2)$$

که در آن m جرم ذره، v_c سرعت بحرانی برخورد، g شتاب گرانش، d قطر ذره و b ثابت بی‌بعدی است که تعیین‌کننده بیشترین عمقی^۱ است که ذره درون سیال نفوذ می‌کند (شکل ۱).

$$\Delta E_l = \frac{1}{30} \pi \rho_l g r_c^2 [(b-1)d]^2 \quad (3)$$

که در آن ρ_l چگالی سیال و r_c عرض حفره^۲ است. از تقریب انحنای سطح مشترک با یک معادله درجه دو به دست می‌آید [۲].

$$\Delta E_g = 0 \quad (4)$$

۲-۲-۲-۲-۲ کار در معادله انرژی

W به نیروهای درگ، شناوری و کشش سطحی به دست می‌آید.

$$W = W_D + W_B + W_S \quad (5)$$

۲-۲-۲-۱-۲-۲ درگ سیال

کار مربوط به درگ سیال، با انتگرال‌گیری نیروی درگ حول مسیری که ذره طی می‌کند، به دست می‌آید.

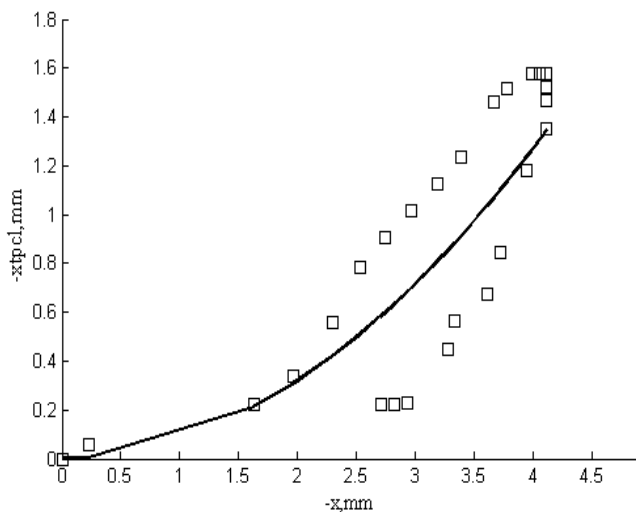
$$W_D = -\frac{1}{2} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \rho_l \int_0^{bd} |v_p - v_{TPCL}|^2 C_D dx \quad (6)$$

که در آن C_D ضریب درگ، x فاصله نقطه سکون ذره تا سطح اولیه

1 Cavity depth

2 Cavity radius

از طرفی با بررسی عکس‌های متوالی از حرکت ذره با استفاده از نرم‌افزار متلب، مجموعه مقادیر x و x_{TPCL} در طول حرکت محاسبه گردید به این ترتیب که در هر عکس فاصله سطح مشترک تا مکان نقطه سکون ذره و مکان خط تماس سه فازی روی ذره برحسب پیکسل اندازه‌گیری شد و پس از تبدیل واحد، مجموعه داده‌ها برای مسیر حرکت ذره رسم شد که در شکل ۳ نشان داده شده است. می‌توان نشان داد که برای ناحیه مربوط به مدلسازی، این دو مقدار به طور تقریبی با معادله مرتبه دو (۱۷) به هم مربوط می‌شوند.



شکل ۳ مکان خط تماس سه فازی روی ذره به قطر x_{TPCL} (۳ mm) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x)

Fig. 3. Particle front stagnation point position (x) vs. three-phase contact line position (x_{TPCL}).

$$x_{TPCL} = -\frac{b-1}{b} \frac{1}{bd} x^2 \quad (17)$$

از ترکیب معادلات (۱۶) و (۱۷) داریم؛

$$z = \left(1 + \frac{b-1}{b} \frac{x}{bd}\right) x \quad (18)$$

با جایگذاری معادله (۱۸) در معادله (۱۵) و سپس انتگرال‌گیری داریم؛

$$W_B = \frac{1}{420} \pi \rho_l g b d^4 [11(2+b) + b^2(3-b)] \quad (19)$$

۲-۲-۳- کشش سطحی

کار مربوط به کشش سطحی با انتگرال‌گیری نیروی کشش سطحی (F_s) حول مسیری که ذره طی می‌کند، به دست می‌آید.

وارد مایع قرار دارد، حول مسیری که ذره طی می‌کند، می‌توان کار نیروی شناوری را به دست آورد.

$$W_B = \int_0^{-bd} -F_B dx \quad (12)$$

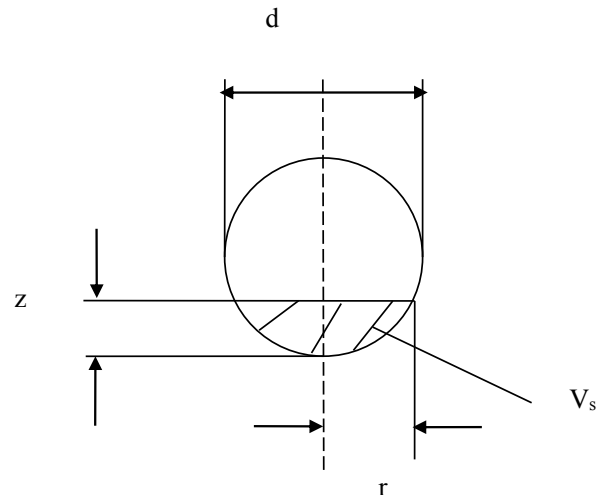
$$F_B = \rho_l g V_s \quad (13)$$

$$V_s = -\frac{1}{6} \pi z (3r^2 + z^2) \quad (14)$$

$$r = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2} + z\right)^2}$$

$$V_s = \pi z^2 \left(\frac{d}{2} + \frac{z}{3}\right)$$

که در آن V_s حجم قسمتی از ذره است که درون سیال غوطه ور می‌باشد. در شکل ۲ حجم غوطه وری نشان داده شده است.



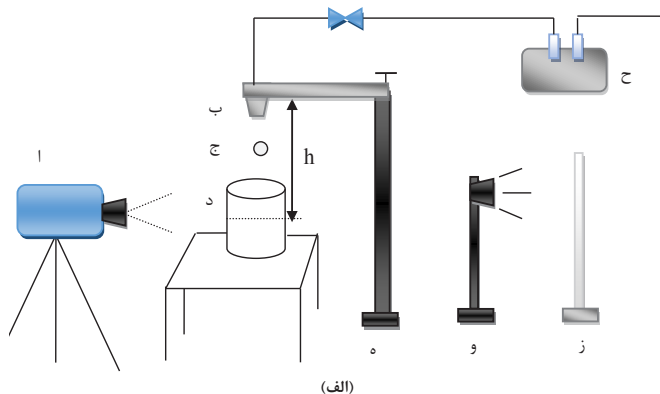
شکل ۲ حجم جزئی ذره غوطه ور در سیال
Fig. 2. Partial volume of particle submerged in the liquid

که در آن r شعاع ترشوندگی و z عمق ترشوندگی ذره درون سیال است (شکل ۱). با ترکیب معادلات (۱۳) و (۱۴) و جایگذاری در معادله (۱۲) داریم؛

$$W_B = -\pi \rho_l g \int_0^{-bd} z^2 \left(\frac{d}{2} + \frac{z}{3}\right) dx \quad (15)$$

همانطور که گفته شد x فاصله نقطه سکون ذره تا سطح اولیه سیال است و x_{TPCL} فاصله خط تماس سه فازی روی ذره تا سطح اولیه سیال است. از اندازه‌گیری‌ها رابطه‌ای برای عمق ترشوندگی ذره به دست آمد.

$$Z = x - x_{TPCL} \quad (16)$$



(الف)



شکل ۴: (الف) طرح شماتیک تجهیزات آزمایش مورد استفاده جهت مشاهده برخورد ذرات با سطح مشترک هوا - آب. ا- دوربین پر سرعت ۴۵۰۰ fps ب-نازل آزادساز ذره ج- ذره تفلونی د-ظرف کریستالی حاوی مایع ه- مکانیزم تنظیم ارتفاع و- سیستم نورپردازی ز- صفحه پخش نور ح-پمپ خلأ (ب) طرح واقعی تجهیزات در آزمایشگاه

Fig. 4. (a) Schematic of experimental setup used to see particle collision to the gas – liquid interface (b)high speed camera, light source, particle release nozzle, spherical particles, vacuum pump

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مراحل آزمایش به این صورت بود که در هر تست ابتدا برای تعیین ارتفاع قرارگیری نازل که درواقع همان ارتفاع سقوط ذره است، از مکانیزم تغییر ارتفاع استفاده شد که این مکانیزم قابلیت حرکت در راستای عمودی را داراست. سپس برای این که ذره درون نازل ثابت شود، پمپ و نازل با استفاده از یک رابط به هم متصل شدند. طوری که با روشن شدن پمپ، از آنجایی که قطر خروجی نازل از ذرات مورد استفاده در آزمایش کمتر انتخاب شد، در اثر مکش ایجاد شده، ذره درون نازل ثابت می ماند و به خروجی نازل متصل می شود. سپس با خاموش شدن پمپ ذره از ارتفاع تعیین شده رها شد و درون ظرف مایع سقوط کرد. در حین سقوط، برای آشکار سازی مسیر حرکت ذره درون سیال، دو پروژکتور به یک صفحه دیفیوزر تابیده شدند

$$W_s = \int_0^{-bd} -F_s dx \quad (20)$$

که در آن برای نیروی کشش سطحی از رابطه ای که در [۱۸] مطرح شد، استفاده می شود. یعنی؛

$$F_s = \pi d \sigma_{gl} \left(\frac{-2z}{d} - 1 - \cos \theta_a \right) \quad (21)$$

که θ_a زاویه تماس پیشروی و σ_{gl} کشش سطحی آب در دمای ۲۹۳ کلوین است.

۳-۲- ترکیب معادلات

با قرار دادن روابط کار و انرژی در معادله (۲۰) داریم؛

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} m v_c^2 + m g b d \\ & = - \int_0^{-bd} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \frac{1}{2} \rho_l |v - v_{TPCL}|^2 \frac{18.5}{Re_p^{0.6}} dx - \int_0^{-bd} \pi d \sigma_{gl} \left(\frac{-2z}{d} - 1 - \cos \theta_a \right) dx \quad (22) \\ & - \int_0^{-bd} \rho_l g \pi z^2 \left(\frac{d}{2} + \frac{z}{3} \right) + \frac{1}{30} \pi \rho_l g (ad)^2 [(b-1)d]^2 \end{aligned}$$

که در آن a ثابت بی بعدی است که تعیین کننده عرض حفره است (شکل ۱). با حل معادله (۲۲) می توان سرعت بحرانی را به دست آورد. برای حل این معادله a ، b و θ_a مجهولند. a و b مستقیم از مشاهدات آزمایش به دست می آید و θ_a از برازش معادله (۲۲) با مقادیر سرعت بحرانی اندازه گیری شده از مشاهدات به دست می آید.

۳- تجهیزات آزمایش

در شکل ۴ تجهیزات آزمایش نشان داده شده است که شامل یک مکانیزم تنظیم ارتفاع با قابلیت حرکت در راستای عمودی، یک نازل آزاد ساز ذره، یک ظرف کریستالی شفاف پر از مایع، پمپ خلأ، یک دوربین پرسرعت (PCO DIMAX S1) با قابلیت عکس برداری ۴۵۰۰ فرم در هر ثانیه و قابلیت ذخیره حداکثر ۸۰۰۰ عکس در هرثانیه و یک سیستم نورپردازی است. به منظور نورپردازی از دو پروژکتور ۲۰۰۰ وات شرکت UNIMAT استفاده شده است هر کدام از این پروژکتورها توانایی تأمین ۲۰۰۰ وات انرژی را دارند. ذرات مورد استفاده، کروی از جنس تفلون در اندازه های ۳ - ۵ میلی متر مورد استفاده قرار گرفتند. از آب مقطر با چگالی $1000/71 \text{ kg/m}^3$ به عنوان سیال آزمایش استفاده شد. خلاصه ای از شرایط آزمایش در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- شرایط آزمایش.
Table 1. Experimental conditions

آزمایش	d (mm)	m (gr)	ρ_p (kg/m ³)	نوع سیال	ρ_l (kg/m ³)	μ (mpa.s)	σ_{gl} (mN/m)
۱	۳	۰/۰۱۹۶	۱۳۸۶/۴۱				
۲	۴	۰/۰۴۶۷	۱۳۹۳/۶۰	آب مقطر	۱۰۰۰/۷۱	۱/۰۰۲	۷۰/۴۷
۳	۵	۰/۰۸۸۸	۱۳۶۱/۳۴				

و نورپردازی مستقیم صورت نگرفت^۱. آن گاه برخورد ذره با سطح سیال و مسیر حرکت آن درون سیال با استفاده از دوربین پرسرعت با سرعت عکسبرداری ۱۰۰۰ فرم در ثانیه ضبط شد. این مراحل برای هرذره با تغییر ارتفاع آزادسازی، تکرار شد به این ترتیب که پس از هر بار سقوط ذره، ارتفاع نازل برای سقوط بعدی کاهش پیدا کرد تا این که ارتفاع بحرانی (سرعت بحرانی) برای هر کدام از اندازه ذرات به دست آمد. برای ارتفاع‌های بیشتر از ارتفاع بحرانی، ذره درون مایع به طور کامل نفوذ می‌کند. تا این که در ارتفاع بحرانی روی سطح شناور می‌ماند.

با بررسی عکس‌ها در حالت بحرانی، سرعت ذره، سرعت خط تماس سه فازی، چگونگی نفوذ ذره و شکل حفره سطح آزاد به دست می‌آید. برای تعیین شرایط بحرانی هر کدام از ذرات هر تست حداقل سه بار تکرار شده است و اختلاف مقادیر اندازه گیری شده در هر تکرار بسیار ناچیز و در حدود ۰/۰۰۱ بوده است. مقدار میانگین داده‌ها و مقادیر خطا در جدول ۳ گزارش می‌شود.

برای محاسبه چگالی ذره، جرم آن با استفاده از ترازوی شرکت RADWAG مدل PS ۵۱۰/C/۱ با دقت ۰/۰۰۱ اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری ویسکوزیته سیال از ویسکومتر کاربرپسند کمپانی Brookfield مدل DVE-LV استفاده شد که محدوده مجاز این دستگاه ۱-۲۰۰۰۰۰۰ سانتی‌پویز^۲ است و برای اندازه‌گیری چگالی و کشش سطحی سیال دستگاه Datis Energy مدل I.F.T(AO۶) مورد استفاده قرار گرفت.

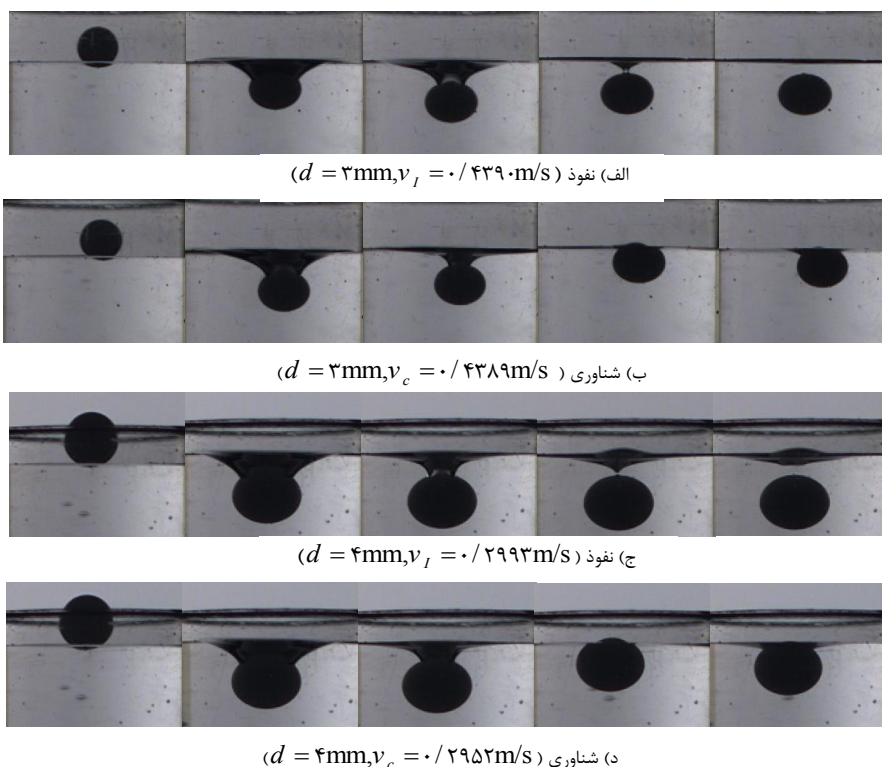
۴- نتایج و بحث

با فرض این که ذره‌ای از ارتفاع مشخص h به سطح مشترک گاز - مایع برخورد کند، انرژی پتانسیل آن در ارتفاع h ، برابر با انرژی جنبشی آن در سطح سیال است. بنابراین سرعت برخورد ذره به سطح با استفاده از رابطه $v_i = \sqrt{2gh}$ محاسبه می‌شود. بیشترین سرعت برخوردی که

۱ Backlighting
۲ Centipoise

در آن ذره بتواند روی سطح شناور بماند، سرعت بحرانی ذره است. در آزمایش‌ها با تغییر سرعت برخورد برای هر ذره، سرعت بحرانی به دست می‌آید به این ترتیب که با کاهش ارتفاع آزادسازی، اولین سرعتی که در آن ذره روی سطح مایع شناور بماند، سرعت بحرانی و ارتفاع معادل آن نیز ارتفاع بحرانی است. بنابراین اگر سرعت برخورد کمتر از مقدار سرعت بحرانی مورد نیاز برای غلبه بر کشش سطحی باشد، حتی اگر ذره چگال‌تر از مایع باشد، شناور باقی می‌ماند. در این مطالعه برای ذره آب‌گریز تفلون دو رژیم برخورد مشاهده شد. در سرعت‌های کمتر از بحرانی، ذره پس از نوسان کوتاهی روی سطح مایع شناور ماند و در سرعت‌های بیشتر از بحرانی، به طور کامل درون مایع نفوذ کرد. شکل ۵ تصاویر متوالی برخورد ذره تفلونی به سطح مشترک هوا - آب را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود همگی ذرات در اختلاف سرعت ناچیز با حالت بحرانی درون سیال نفوذ کردند. یعنی رژیم نفوذ در شرایط نزدیک به بحرانی است و ذره به سطح سیال برخورد کرده و قبل از این که نیروهای مقاومتی حرکتش را متوقف کنند، تا یک عمق مشخص به سمت پایین حرکت می‌کند و سپس تغییر جهت داده به سمت بالا حرکت می‌کند. و پس از یک یا چند نوسان بسیار کوتاه از سطح سیال جدا شده و به طور کامل نفوذ می‌کند. اما در رژیم شناوری که ذره با سرعت بحرانی بر روی سطح سقوط می‌کند، این نوسانات تکرار می‌شوند و در هر تکرار دامنه نوسانات کاهش می‌یابد تا این که ذره در نهایت روی سطح سیال ثابت می‌ماند.

در شرایط بحرانی ذره پس از سقوط از یک ارتفاع مشخص روی سطح سیال، در حین حرکت به سمت پایین سرعتش به تدریج کاهش می‌یابد تا این که انرژی جنبشی آن به طور کامل صرف غلبه بر نیروهای مقاومتی یعنی درگ، شناوری و کشش سطحی شود و سرعتش به صفر برسد. سپس رو به بالا حرکت کرده و تا یک ارتفاع مشخص پیش می‌رود تا در نهایت نیروی گرانش، ذره را دوباره به سمت پایین هدایت می‌کند. در شکل ۶ مکان نقطه سکون ذره یا همان عمق نفوذ بر حسب زمان طی حرکت ذره درون سیال در شرایط بحرانی رسم شده است. مشاهده

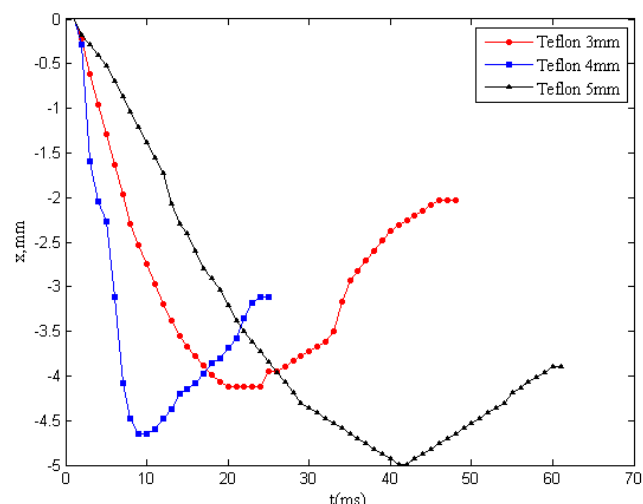


شکل ۵: برخورد ذره کروی از جنس تفلون با سطح مشترک هوا - آب.
Fig. 5. Spherical Teflon particle colliding with the air – water interface

به انرژی جنبشی ذره تبدیل می‌شود. اگر ذره با سرعت بحرانی بر روی سطح سقوط کند، این نوسان تا زمانی که انرژی جنبشی اولیه به طور کامل تلف شود ادامه دارد، تا این که ذره در نهایت روی سطح سیال ثابت می‌ماند و اما در شرایط غیر بحرانی ذره پس از یک یا چند نوسان کوتاه از سطح سیال جدا شده و به طور کامل نفوذ می‌کند.

در شکل ۷ برخی پارامترهای مهم طی نفوذ ذره نشان داده شده‌اند. یکی از پارامتر مهم قابل بررسی ماکزیمم عمق نفوذ ذره (x_m) است که در واقع فاصله‌ای از سطح است که در آن ذره توسط نیروهای مقاومتی متوقف می‌شود و سرعتش به صفر می‌رسد. پارامتر مهم دیگر عمق برگشتی^۱ (x_R) است که در آن ذره در انتهای حرکت رو به بالا، سرعتش برای بار دوم صفر شده و در حال شروع به حرکت مجدد به سمت پایین است. اختلاف بیشترین عمق نفوذ ذره و عمق برگشتی آن، ارتفاع برگشتی^۲ ($h_R = x_m - x_R$) نام دارد که در واقع فاصله‌ای است که ذره در حرکت رو به بالا طی می‌کند. پارامتر مهم دیگر که تنها مربوط به شرایطی است که ذره به طور کامل نفوذ می‌کند، عمق شکست^۳ (z_p) است و در واقع مکانی است که ذره از سطح سیال به طور کامل جدا

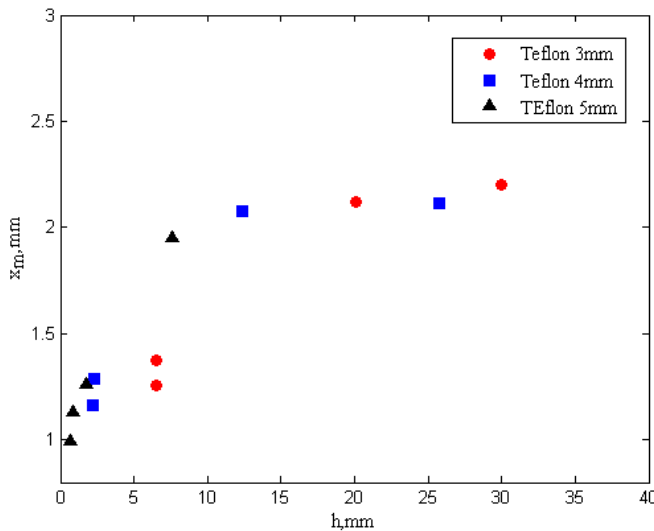
شده است که برای هر سه اندازه ذرات تفلونی حرکت نوسانی وجود دارد. یعنی ذره به سطح سیال برخورد کرده و درحین نفوذ مجموع مقادیر نیروهای مقاومتی به تدریج افزایش می‌یابد و ذره قبل از این که نیروهای مقاومتی حرکتش را متوقف کنند، تا یک عمق مشخص به سمت پایین حرکت می‌کند. در واقع انرژی جنبشی اولیه ذره به انرژی پتانسیل ذره و سیال تبدیل می‌شود و با رسیدن به سرعت صفر تغییر جهت داده به سمت بالا حرکت می‌کند. در واقع انرژی پتانسیل مجدداً



شکل ۶: حرکت ذرات کروی طی نفوذ درون سیال
Fig. 6. Dynamics of spherical particles during penetration in the fluid

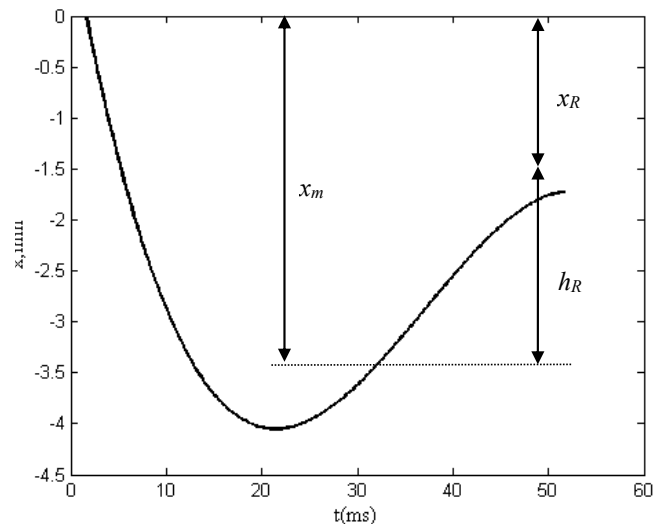
- 1 The position of first rebound
- 2 The rebound height
- 3 The position of pinch off

است. واضح است که با افزایش ارتفاع سقوط، ماکزیمم عمق نفوذ نیز افزایش می‌یابد زیرا که انرژی جنبشی بیشتر به ذره اجازه می‌دهد که مسیر طولانی‌تری را قبل از متوقف شدن توسط نیروهای مقاومتی طی کند. همانطور که در شکل نیز مشخص است، تغییرات x_m با h به صورت منحنی‌هایی ظاهر شده که شکل کلی آن‌ها برای قطرهای متفاوت، مشابه است.



شکل ۸: تغییرات ماکزیمم عمق نفوذ ذرات (x_m) بر حسب ارتفاع سقوط (h).
Fig. 8. Dependence of maximum penetration depth of particles (x_m) on the initial drop height (h)

آزمایش‌ها به ازای هر کدام از قطرهای سه مرتبه تکرار شد که در انتها مقدار سرعت بحرانی ($v_c = \sqrt{2gh_c}$) برای ذره کروی از جنس تفلون برای قطر ۳mm، ۰/۴۳۸۹m/s، قطر ۴mm، ۰/۲۹۵۲ m/s و قطر ۵mm، ۰/۱۸۳۷ m/s به دست آمد که نشان می‌دهد سرعت



شکل ۷: پارامترهای نفوذ طی نوسان ذرات
Fig. 7. Penetration parameters during oscillations of particles

می‌شود. آزمایش‌ها نشان داد که هر چه سرعت برخورد ذره از شرایط بحرانی فاصله داشته باشد؛ یعنی حالتی که اختلاف سرعت برخورد ذره با سرعت بحرانی بیشتر شود، مقدار x_m ، x_R و z_p تقریباً برابر است و به این معنی که فقط در سرعت‌های بحرانی و نزدیک بحرانی نوسانات قابل مشاهده است. و برای حالتی که ذره با ارتفاع خیلی بیشتر از بحرانی روی سطح سقوط کند، بدون هیچ گونه نوسانی درون سیال نفوذ می‌کند. در جدول ۲ مقادیر این پارامترها برای چندین برخورد مختلف نشان داده شده است.

به طور کلی ماکزیمم عمق نفوذ تابعی از قطر، چگالی و ارتفاع سقوط ذره است. در شکل ۸ تغییرات ماکزیمم عمق نفوذ با ارتفاع سقوط برای ذرات تفلونی در اندازه‌های مختلف برای سیال آب مقطر رسم شده

جدول ۲: مقادیر داده‌های مربوط به پارامترهای نفوذ برای ذرات کروی از جنس تفلون در سرعت‌های برخورد مختلف
Table 2. The data of penetration parameters for spherical Teflon particles at different impact velocities

h_R	x_R	z_p	x_m	V_i (m/s)	h (mm)	شرایط	d (mm)
۲/۰۸۸۴	۲/۰۳۰۲	-	۴/۱۱۸۶	۰/۴۳۸۹	۹/۸۱۸۴	بحرانی	۳
۰/۸۴۶۰	۳/۴۳۹۰	۳/۷۷۸۰	۴/۲۸۵۰	۰/۴۳۹۰	۹/۸۲۴۱	نزدیک به بحرانی	۳
.	۶/۳۷	۶/۳۷	۶/۳۷	۰/۷۶۹۲	۳۰/۱۵۸	غیربحرانی	۳
.	۶/۶	۶/۶	۶/۶	۰/۹۳۹۶	۴۵	غیربحرانی	۳
۲/۲	۳/۱۱۹۷	-	۵/۳	۰/۲۹۵۲	۴/۴۴۱۹	بحرانی	۴
۰/۱۵	۵/۱۶	۵/۱۶	۵/۳۱	۰/۲۹۸۳	۴/۵۳۶۳	نزدیک به بحرانی	۴
.	۸/۳۰۷۶	۸/۳۰۷۶	۸/۳۰۷۶	۰/۶۹۵۵	۲۴/۶۶	غیربحرانی	۴
.	۸/۴۶۱۵	۸/۴۶۱۵	۸/۴۶۱۵	۱	۵۱/۴۶	غیربحرانی	۴
۲/۷۵۴	۳/۸۹۹۴	-	۶/۶	۰/۱۸۳۷	۱/۷۲۰۳	بحرانی	۵
۱/۰۴۸۹	۵/۶۶۱۱	۵/۶۶۱۱	۶/۷۱	۰/۲	۲/۰۵۸۵	نزدیک به بحرانی	۵
.	۶/۳۱۸۰	۶/۳۱۸۰	۶/۳۱۸۰	۰/۲۹۰۵	۴/۳۰۱۶	غیربحرانی	۵
.	۹/۷۷۲۷	۹/۷۷۲۷	۹/۷۷۲۷	۰/۶۱۰۵	۱۹	غیربحرانی	۵

جدول ۳: عدم قطعیت و تکرارپذیری داده‌ها
Table 3. Absolute error and data repeatability

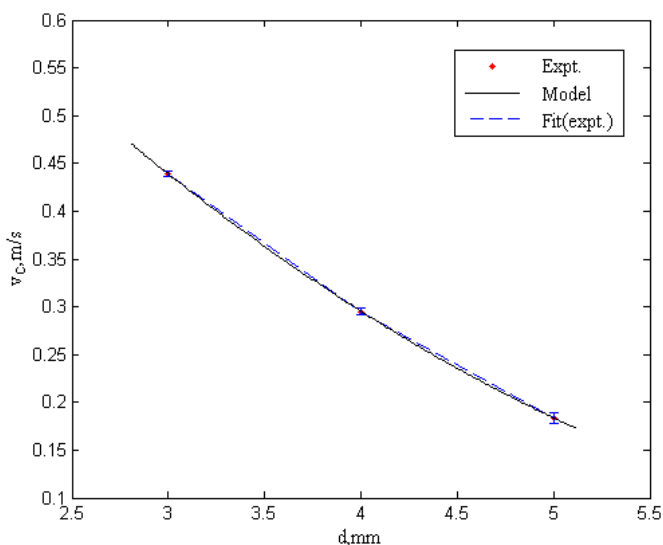
تکرار اول	تکرار دوم	تکرار سوم	مقدار میانگین	خطای مطلق	انحراف معیار	عدم قطعیت
v_c	v_c	v_c	v_c	Error	σ	σ_E
۰/۴۳۸۶	۰/۴۴۱۰	۰/۴۳۷۲	۰/۴۳۸۹	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱۹۲	۰/۰۰۰۱۱
۰/۲۹۵۸	۰/۲۹۳۸	۰/۲۹۶۲	۰/۲۹۵۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱۱۵	۰/۰۰۰۶۶
۰/۱۸۲۴	۰/۱۷۹۷	۰/۱۸۹۰	۰/۱۸۳۷	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۴۷۷	۰/۰۰۲۷۵

بحرانی با افزایش قطر ذره کاهش می‌یابد. در جدول ۳ عدم قطعیت و تکرار پذیری داده‌های مربوط به سرعت بحرانی در تست‌ها ارائه شده است. در این آزمایش با دوربین پرسرعت و پردازش تصویر مواجه هستیم و می‌بایست تنظیمات و دقت پیکسلی عکس برداری ملاحظه شود (تبدیل پیکسل‌ها به واحدهای فیزیکی). این کار با تکرار تست‌ها صورت گرفته و مراحل تبدیل مقادیر به واحدهای فیزیکی به دقت در آزمایش لحاظ شده است. تکرار پذیری و خطای متناظر در جدول ۳ ارائه شده است.

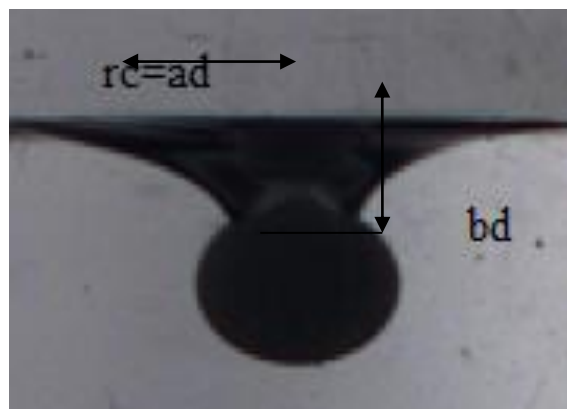
جدول ۴: ثابت‌های بی بعد از مشاهدات آزمایش برای هر سه قطر ذره
Table 4. Dimensionless constants from experimental observations for all three particle diameters

آزمایش	$d(\text{mm})$	a	b	θ_a
۱	۳	۱/۱۷	۱/۳۹	۱۴۹/۳۳
۲	۴	۱/۳۸	۱/۳۳	۱۷۴/۱۷
۳	۵	۱/۴	۱/۳۳۰۸	۱۷۸

با حل معادله (۲۲) می‌توان سرعت بحرانی را برای یک سیستم مشخص ذره و سیال به دست آورد که در این معادله سه مجهول وجود دارد. مقادیر a و b و زاویه تماس پیشروی θ_a . شعاع حفره و عمق نفوذ ذره در شرایط بحرانی ضرایبی از قطر ذره در نظر گرفته شده‌اند که از مشاهدات آزمایش مقادیر این ضرایب (a, b) به دست می‌آید. در شکل ۹ تصویر ذره در شرایط بحرانی نشان داده شده است که در آن سرعت ذره در انتها به صفر رسیده و زمان شروع حرکت آن به سمت بالا است. با اندازه‌گیری عرض حفره و عمق نفوذ ذره مقادیر a و b برای هر سه قطر ذرات آزمایش مطابق جدول ۴ به دست آمد. همچنین مقدار زاویه تماس پیشروی، از برازش معادله (۲۲) با مقادیر سرعت بحرانی اندازه‌گیری شده برای هر کدام از قطرها به دست آمد که در جدول ۴ ارائه شده است (۴).

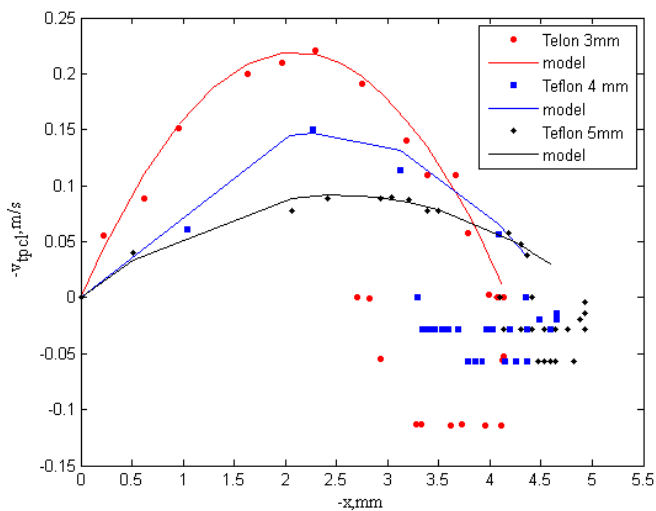


شکل ۱۰. تغییرات سرعت بحرانی با قطر ذره.
Fig. 10. Critical velocity vs. particle diameter



شکل ۹: شعاع حفره و عمق نفوذ ذره در شرایط بحرانی برای قطر ۳mm
Fig. 9. Cavity radius and penetration depth of the particle at critical condition ($d=3\text{mm}$)

مشخص پیش می‌رود تا این که در نهایت سرعتش به صفر می‌رسد و نیروی گرانش، ذره را دوباره به سمت پایین هدایت می‌کند. سرعت ذره یک برهم کنش پیچیده‌ای از نیروهای درگ، شناوری و کشش سطحی است و بررسی مدل تئوری این نیروها دشوار است. بنابراین سرعت ذره از هنگام برخورد به سطح تا بیشترین عمق نفوذ آن درون سیال، طبق معادله (۹) با یک معادله درجه دو تقریب زده شد. و در شکل ۱۱ نشان داده شده است که برای هر سه اندازه ذرات، مدل پیش‌بینی شده اختلاف چندانی با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها ندارد.



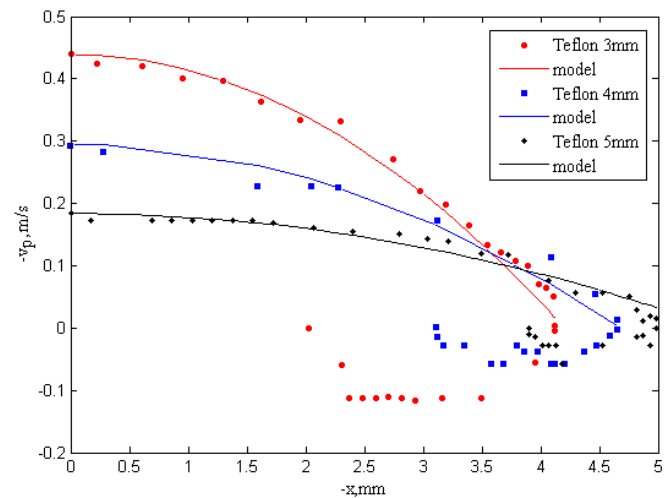
شکل ۱۳. تغییرات سرعت خط تماس سه فازی روی ذره (vTPCL) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط بحرانی برای ذره کروی از جنس تفلون.
Fig. 13. The velocity of three-phase contact line (vTPCL) vs. particle front stagnation point position (x) at critical condition for spherical Teflon particle

در شکل ۱۲ داده‌های مربوط به اختلاف سرعت نقطه سکون و خط تماس سه فازی روی ذره نشان داده شده است که طبق معادله (۱۰) فقط برای مقادیر مثبت سرعت، اختلاف سرعت ذره با سرعت خط تماس سه فازی با یک منحنی درجه دو تقریب زده شد که مشخص است مدل برای هر سه اندازه ذرات با داده‌ها هم‌خوانی دارد. بنابراین معادله (۱۱) نیز برای سرعت خط تماس سه فازی به دست آمد.

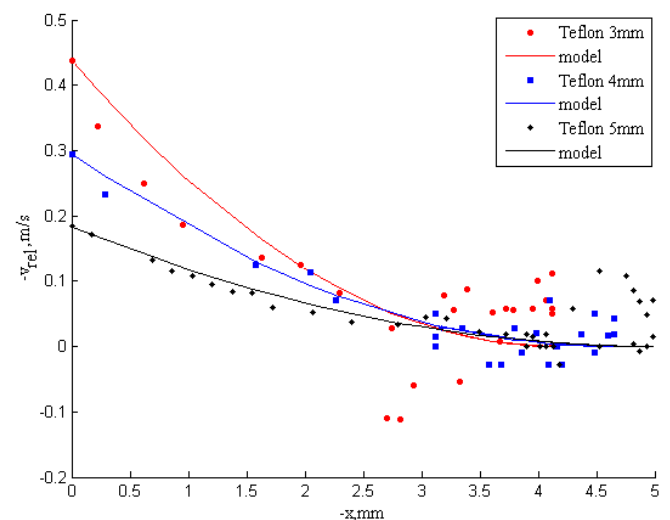
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار نفوذ ذرات کروی آب‌گریز از جنس تفلون در برخورد با سطح مشترک هوا - آب مطالعه شد. از مشاهدات و داده‌ها مشخص شد که برخورد این ذرات در آب دو رژیم شناوری و نفوذ دارد. به طور کلی دینامیک برخورد ذرات صلب کروی و چگونگی تشکیل کویتی

سرعت‌های اندازه‌گیری شده برای ذره و خط تماس سه فازی به عنوان تابعی از x به ترتیب در شکل ۱۱ و شکل ۱۳ رسم شده‌اند. همانطور که مشخص است، ذره با سرعت بحرانی به سطح مایع برخورد می‌کند. در حین نفوذ، سرعتش کاهش می‌یابد تا این که در ماکزیمم عمق نفوذ (x_m) سرعت آن به صفر می‌رسد و شروع به حرکت به سمت بالا می‌کند. وقتی ذره به سمت بالا حرکت می‌کند به معنی مقدار منفی برای سرعت است. در حین حرکت به سمت بالا، مقدار سرعت ذره تا رسیدن به یک مقدار ماکزیمم افزایش یافته و مجدداً کاهش می‌یابد و تا یک ارتفاع



شکل ۱۱. تغییرات سرعت ذره (vp) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط بحرانی برای ذره کروی از جنس تفلون
Fig. 11. Particle velocity (vp) vs. particle front stagnation point position (x) at critical condition for spherical Teflon particle



شکل ۱۲. تغییرات نسبی سرعت (vrel) برحسب مکان نقطه سکون ذره (x) در شرایط بحرانی برای ذره کروی از جنس تفلون.
Fig. 12. Relative velocity vs. particle front stagnation point position (x) at critical condition for spherical Teflon particle

روند تکرار می‌شود. نشان داده شد که می‌توان سرعت ذره و همچنین سرعت نسبی ($v_{rel} = v_p - v_{TPCL}$) را با معادلات درجه دو مدل‌سازی کرد. طوریکه با مجموعه داده‌های آزمایش هم‌خوانی داشته باشد و سپس با ترکیب معادلات، رابطه‌ای برای سرعت خط تماس سه فازی روی ذره به دست آورد که مشاهده شد با اندازه‌گیری‌ها هم‌خوانی دارد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی	
a	ثابت بی بعد
b	ثابت بی بعد
C_D	ضریب درگ
d	قطر ذره، m
ΔE	تغییرات انرژی سیستم بین حالت اولیه و حالت نهایی، kgm^2/s^2
ΔE_g	تغییرات انرژی فاز گاز بین حالت اولیه و حالت نهایی، kgm^2/s^2
ΔE_l	تغییرات انرژی مایع بین حالت اولیه و حالت نهایی، kgm^2/s^2
ΔE_p	تغییرات انرژی ذره بین حالت اولیه و نهایی، kgm^2/s^2
F_B	نیروی شناوری، kgm/s^2
F_D	نیروی درگ، kgm/s^2
F_s	نیروی کشش سطحی، kgm/s^2
h	ارتفاع سقوط، m
h_c	ارتفاع سقوط بحرانی، m
m	جرم ذره، kg
Q	تغییر حرارت سیستم بین حالت اولیه و حالت نهایی، kgm^2/s^2
r_c	شعاع حفره، m
r	شعاع تر شوندگی ذره، m
Re	عدد ریتولدز ذره
v_c	سرعت بحرانی برخورد ذره، m/s
v_p	سرعت ذره، m/s
v_l	سرعت برخورد ذره، m/s
v_{TPCL}	سرعت خط تماس سه فازی روی ذره، m/s
V_s	حجم قسمت غوطه ور ذره، m^3
x	مکان ذره، m
x_m	ماکزیمم عمق نفوذ ذره، m
x_{TPCL}	مکان خط تماس سه فازی، m
W	کل کار مربوط به نیروهای مقاوم، kgm^2/s^2
W_B	کار نیروی شناوری، kgm^2/s^2
W_D	کار نیروی درگ، kgm^2/s^2
W_S	کار نیروی کشش سطحی، kgm^2/s^2
z	عمق ترشوندگی، m
علائم یونانی	
μ	لزجت سیال، kg/ms
θ_a	زاویه تماس پیشروی ذره روی مایع، °
ρ_l	چگالی سیال، kg/m^3
ρ_p	چگالی ذره، kg/m^3
σ_{gl}	کشش سطحی آب در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد

تابعی از اندازه، چگالی و سرعت برخورد ذره است. ذرات در حین نفوذ درون سیال یک کویتی از هوا ایجاد می‌کنند که این کویتی بسته شده و مقداری هوا را حمل می‌کند سپس ذره به حرکت خود ادامه می‌دهد و در نهایت یا از سطح جدا شده و در یک سرعت کمتر به یک حالت پایدار سرعت می‌رسد (رژیم نفوذ) و یا این که در شرایط بحرانی با نوساناتی در حرکت روبرو می‌شود و سپس روی سطح سیال شناور می‌ماند (رژیم شناوری). همچنین مشاهده شد برای ذرات آب‌گریز، مانند آنچه که قبلاً برای ذرات آب‌دوست مشاهده شده بود، در یک سیستم مشخص ذره، سیال و هوا، اگر سرعت برخورد ذره به سطح مایع از مقدار بحرانی کمتر باشد، حتی اگر ذره چگال‌تر از مایع باشد، درون آن نفوذ نمی‌کند. مقدار سرعت بحرانی برای ذره کرووی از جنس تفلون برای قطر ۳ mm، ۰/۴۳۸۹ m/s، قطر ۴ mm، ۰/۲۹۵۲ m/s و قطر ۵ mm، ۰/۱۸۳۷ m/s به دست آمد که مشخص شد سرعت بحرانی برخورد با افزایش قطره ذره، کاهش می‌یابد.

با پردازش تصاویر متوالی چگونگی حرکت ذره درون سیال به دست آمد و برای اولین بار ماکزیمم عمق نفوذ (x_m)، عمق برگشتی (x_R)، ارتفاع برگشتی ($h_R = x_m - x_R$) و عمق شکست (z_p) برای هر ذره تعیین شد و مورد مقایسه قرار گرفت و مشخص شد که در سرعت‌های بحرانی و نزدیک آن حرکت ذرات با نوساناتی همراه است و هرچه سرعت از مقدار بحرانی بیشتر شود تعداد نوسانات کاهش یافته تا این که در سرعت‌های بالاتر، ذره بدون هیچ نوسانی از سطح مایع جدا می‌شود؛ یعنی حالتی که اختلاف سرعت برخورد ذره با سرعت بحرانی بیشتر شود، مقدار x_m ، x_R و z_p تقریباً برابر است. تغییرات ماکزیمم عمق نفوذ با ارتفاع سقوط برای ذرات تفلونی در اندازه‌های مختلف برای سیال آب مقرر رسم شد و مشاهده شد که با افزایش ارتفاع سقوط، ماکزیمم عمق نفوذ نیز افزایش می‌یابد زیرا که انرژی جنبشی بیشتر به ذره اجازه می‌دهد که مسیر طولانی‌تری را قبل از متوقف شدن توسط نیروهای مقاوم‌تی طی کند.

تغییرات سرعت ذرات (v_p) و سرعت خط تماس سه فازی روی ذره (v_{TPCL}) برحسب مکان نقطه سکون (x) در شرایط بحرانی رسم شد و مشاهده شد که سرعت ذره از یک مقدار بحرانی تا رسیدن به صفر در بیشترین عمق نفوذ (x_m) کاهش می‌یابد و سپس با شروع حرکت به سمت بالا که به معنی مقدار منفی برای سرعت است، دوباره افزایش یافته تا در انتها پس از نوسان کوتاهی روی سطح سیال ساکن می‌ماند. سرعت خط تماس سه فازی روی ذره از صفر تا یک مقدار بیشینه افزایش یافته و دوباره به صفر می‌رسد و با شروع حرکت ذره به سمت بالا این

- [13] J. Drzymala, Characterization of materials by Hallimond tube flotation. Part 2: maximum size of floating particles and contact angle, *International journal of mineral processing*, 42(3-4) (1994) 153-167.
- [14] B. Shahbazi, B. Rezai, S.J. Koleini, The effect of hydrodynamic parameters on probability of bubble-particle collision and attachment, *Minerals Engineering*, 22(1) (2009) 57-63.
- [15] S. Fosu, W. Skinner, M. Zanin, Detachment of coarse composite sphalerite particles from bubbles in flotation: Influence of xanthate collector type and concentration, *Minerals Engineering*, 71 (2015) 73-84.
- [16] H. Bradford, Method of saving floating materials in ore-separation, in, *Google Patents*, 1886.
- [17] D.N. Tran, C.P. Whitby, D. Fornasiero, J. Ralston, Selective separation of very fine particles at a planar air-water interface, *International Journal of Mineral Processing*, 94(1) (2010) 35-42.
- [18] T. Engh, Silicon deoxidation of steel by injection of slags with low silica activity, *Scand. J. Metallurgy*, 1(3) (1972) 103-114.
- [1] Hoeven van der MJ. Particle-Droplet Collisions in Spray Drying. PhD Thesis. Australia: School of Engineering, University of Queensland, 2008.
- [2] D. Liu, Q. He, G. Evans, Penetration behaviour of individual hydrophilic particle at a gas-liquid interface, *Advanced Powder Technology*, 21(4) (2010) 401-411.
- [3] S. Mitra, E. Doroodchi, V. Pareek, J.B. Joshi, G.M. Evans, Collision behaviour of a smaller particle into a larger stationary droplet, *Advanced Powder Technology*, 26(1) (2015) 280-295.
- [4] D. Vella, D.-G. Lee, H.-Y. Kim, Sinking of a horizontal cylinder, *Langmuir*, 22(7) (2006) 2972-2974.
- [5] D. Vella, D.-G. Lee, H.-Y. Kim, The load supported by small floating objects, *Langmuir*, 22(14) (2006) 5979-5981.
- [6] D.-G. Lee, H.-Y. Kim, Impact of a superhydrophobic sphere onto water, *Langmuir*, 24(1) (2008) 142-145.
- [7] D.-G. Lee, H.-Y. Kim, Sinking of small sphere at low Reynolds number through interface, *Physics of Fluids*, 23(7) (2011) 072104 .
- [8] Y. OZAWA, K. MORI, Critical condition for penetration of solid particle into liquid metal, *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 23(9) (1983) 769-774.
- [9] S. Mitra, E. Doroodchi, G.M. Evans, V. Pareek, J.B. Joshi, Interaction dynamics of a spherical particle with a suspended liquid film, *AIChE Journal*, 62(1) (2016) 295-314.
- [10] D. Liu, Q. He, G. Evans, Capture of impacting particles on a confined gas-liquid interface, *Minerals Engineering*, 55 (2014) 138-146.
- [11] D. Liu, G. Evans, Q. He, Critical fall height for particle capture in film flotation: Importance of three phase contact line velocity and dynamic contact angle, *Chemical Engineering Research and Design*, 114 (2016) 52-59.
- [12] H. Schulze, New theoretical and experimental investigations on stability of bubble/particle aggregates in flotation: a theory on the upper particle size of floatability, *International Journal of Mineral Processing*, 4(3) (1977) 241-259.