



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۳۵ تا ۳۸  
Vol. 48, No. 1, Spring 2016, pp. 35-38



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

AmirKabir Journal of Science & Research  
Civil and Environmental Engineering  
(ASJR-CEE)

## تاثیر چگالی و ابعاد ذرات کوارتز آلفا و سیلیس آمورف بر شناورسازی آنها

جعفر شهریور قوزولو\*<sup>۱</sup>، بهرام رضایی<sup>۲</sup>، فاطمه منعمی مطلق<sup>۳</sup>، یونس شکاریان<sup>۴</sup>، محمد رضا اصلانی<sup>۵</sup>

۱- کارشناس ارشد فراآوری، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۴- کارشناس ارشد، مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۵- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۱۱، پذیرش: ۱۳۹۳/۰۳/۰۴)

### چکیده

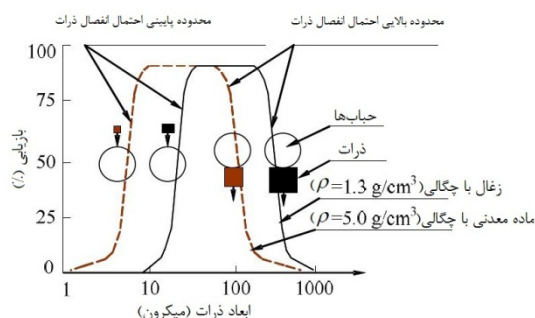
چگالی ذرات یکی از پارامترهای موثر در شناورسازی ذرات است. ذرات سنگین‌تر، نیروی گرانشی بیشتری را از نیروی چسبندگی بین حباب-ذره ایجاد می‌کنند و احتمال انفصال ذره از حباب هوا را افزایش می‌دهند. در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر چگالی ذرات بر شناورسازی، از دو ماده معدنی کوارتز آلفا و سیلیس آمورف به ترتیب با چگالی ۲/۶۷ و ۲/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شده است. نتایج حاصل از شناورسازی این ذرات نشان داد که، در محدوده ابعادی درشت (۲۱۲+۳۰۰ میکرون) با افزایش چگالی، بازیابی شناورسازی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در محدوده ابعادی میانی (۱۲۵+۱۸۰ میکرون) این کاهش بازیابی کمتر بود. در محدوده ابعادی ریزتر (۵۳+۱۰۶ میکرون) با افزایش چگالی، بازیابی شناورسازی افزایش یافت. با بررسی اندرکنش ابعاد و چگالی نشان داده شد که با افزایش ابعاد و چگالی احتمال انفصال ذرات افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش چگالی ذرات، محدوده بهینه ابعادی برای شناورسازی کاهش می‌یابد.

### کلمات کلیدی:

چگالی، ابعاد ذرات، شناورسازی

## ۱- مقدمه

نوع از صفحات پلاستیکی با چگالی‌های مختلف (PS، ABS، PET، PC، POM، PVC و PMMA) تحت شرایط یکسان به منظور مطالعات شناورسازی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهند که، ذرات با چگالی کمتر دارای زاویه تماس بزرگتر بوده و دارای قابلیت شناورسازی بیشتری هستند. همچنین ذرات با چگالی بیشتر دارای زاویه تماس نسبتاً کمی بوده و با انفصال از حباب غرق می‌شوند. همچنین در مطالعات انجام شده توسط وان در وستوزان و همکاران [۱۵] نشان داده شده است که، سرعت بحرانی ایمپلیر متاثر از عوامل ابعاد، چگالی ذرات، سرعت سیال و نرخ جریان هوای می‌باشد.



شکل ۱: تأثیر چگالی ذرات ذغال و موادمعدنی بر شناورسازی ذرات [۱۳]

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش کانی کوارتز آلفا و سیلیس آمورف، به ترتیب توسط سنگ‌شکن‌های فکی، مخروطی و استوانه‌ای خرد شدند. ابعاد خوراک برای آسیای گلوله‌ای ۸۴۱+۲۳۸۰- میکرون و وزن خوراک ۱۰۰۰ گرم بود. زمان آسیا کردن در آسیاهای میله‌ای ۳۵ دقیقه بود. همه آزمایش‌های خردایش در شرایط خشک انجام شدند. بعد از آسیا کردن، هر دو ماده معدنی توسط سرندها به مدت ۱۵ دقیقه سرندها شده و در محدوده ابعادی ۲۱۲+۲۵۰-، ۱۲۵+۱۵۰- و ۷۵+۵۳- میکرون برای انجام مراحل بعدی طبقه‌بندی شد.

آزمایش‌های فلوتاسیون در یک سلول آزمایشگاهی دنور مدل 12D و با استفاده از سلول ۱/۵ لیتری انجام شد. وزن نمونه برای انجام هر آزمایش، ۱۰۰ گرم بود. نمونه را با حدود ۱۲۰۰ میلی‌لیتر آب در سلول ۱/۵ لیتری ریخته و pH را با استفاده از هیدروکسید سدیم در ۹ تنظیم نمودیم. برای آماده‌سازی اولیه، به مدت ۲ دقیقه نمونه با سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه به هم زده می‌شود. سپس کلکتور به میزان ۱۵۰۰ گرم بر تن به پالپ افزوده می‌شود. نوع کلکتور آرمک سی و زمان آماده‌سازی ۴ دقیقه بود. پس از اندازه‌گیری و تنظیم دوباره pH پالپ در ۹، شیر هوا را باز نموده و به مدت سه دقیقه کف‌گیری انجام شد.

## ۳- نتایج و بحث

هر دو نمونه با چگالی ۲/۶۷ و ۲/۲ گرم بر سانتی متر مکعب تحت شرایط یکسان توسط آسیای گلوله‌ای خرد شد و در محدوده‌های ابعادی

روش‌های مختلف فرآوری پودر به طور قابل توجهی به (خلوص، ساختار، دانسیته و غیره) مواد، خواص حجم و مشخصات مورفولوژیکی (ابعاد، شکل، بافت و غیره) مواد بستگی دارد [۱]. از بین این خصوصیات چگالی ذرات یکی از پارمترهای تأثیرگذار بر شناورسازی ذرات است. به صورتی که احتمال کلی شناورسازی ذرات ( $P_{total}$ ) ناشی از احتمال برخورد ( $P_c$ ) بین ذرات موادمعدنی و حباب هوا، احتمال اتصال ( $P_a$ ) و احتمال انفصال ( $1-P_d$ ) ذرات از حباب هوا می‌باشد که به صورت معادله ۱ توصیف می‌شود [۲،۳]:

$$P_{Total} = P_c \times P_a \times (1 - P_d) \quad (1)$$

اندرکنش بین حباب و ذره توسط نیروهای مهمی همچون مقاومت هیدرودینامیکی، نیروهای اینرسی، نیروهای گرانشی، نیروهای سطح با دامنه کوتاه و نیروهای مویینیگی کنترل می‌شود. احتمال برخورد بین ذرات و حباب هوا توسط شرایط هیدرودینامیکی، تعریف شده است که متاثر از ابعاد ذره-حباب و توربولانس سیستم‌ها می‌باشد [۸، ۹، ۳، ۴، ۵، ۶، ۱۰، ۱۷]. احتمال اتصال عمدتاً به نیروهای سطحی موجود در سیستم و زمان لقاء بستگی دارد، همچنین احتمال انفصال ذره از حباب هوا چگالی ذره بستگی دارد [۱۱].

چگالی، ابعاد و هیدروفوبیسیته سطح ذرات نقش مهمی در شناورسازی مواد معدنی دارند [۱۲]. به طوری که در شکل (۱) نشان داده شده است، تأثیر فراکسیون‌های ابعاد ذرات به همراه چگالی‌های متفاوت موادمعدنی (با چگالی  $5 \text{ g/cm}^3$ ) و ذغال (با چگالی  $1.3 \text{ g/cm}^3$ ) بر بازیابی شناورسازی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مثال، فراکسیون ابعاد ذرات موثر بر شناورسازی برای ذرات موادمعدنی (با چگالی  $5 \text{ g/cm}^3$ ) ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون است، در حالی که فراکسیون ابعاد ذرات موثر برای ذغال (با چگالی  $1.3 \text{ g/cm}^3$ ) ۵۰ تا ۵۰۰ میکرون می‌باشد. ابعاد ریزتر از ۱۰ میکرون موادمعدنی (۵۰ میکرون برای ذغال) نسبت به ذرات موادمعدنی در محدوده بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون (۵۰-۵۰۰ میکرون برای ذغال) کمتر برای شناورسازی مناسب‌اند، زیرا این ذرات دارای اینرسی پایین تری هستند، به طوری که آنها را قادر می‌سازد تا جریان‌های هیدرودینامیکی را دنبال کرده و از گیر افتادن در حباب‌ها جلوگیری کنند. ذرات بزرگتر از ۱۰۰ میکرون برای موادمعدنی (۵۰۰ میکرون برای ذغال) به سختی شناور می‌شوند، این به دلیل انفصال حباب-ذره در جریان‌های توربولانس مجراهای شناورسازی و مشکل در انتقال ذرات از منطقه تجمع به کف می‌باشد. محدودیت ابعاد بالایی به طور عمده به احتمال انفصال ( $P_d$ ) بستگی دارد. نتایج این مطالعات نشان داد که [۱۳]:

۱. با افزایش ابعاد و چگالی ذرات احتمال انفصال ( $P_d$ ) افزایش می‌یابد.
  ۲. ماکزیمم ابعاد ذراتی که می‌توانند شناور شوند، تابعی از درجه ی هیدروفوبیسیته می‌باشد.
- در مطالعاتی که توسط هیتینگ شن و همکاران [۱۴] صورت گرفت، هفت

میکرون بازیابی شناورسازی به ترتیب از ۹۷/۷۴ به ۹۳/۴۲ درصد و از ۹۵/۳۸ به ۹۰/۲۳ درصد کاهش یافته است که این کاهش بازیابی ناشی از افزایش نیروی گرانشی وارد بر حباب بوده که منجر به کاهش زاویه تماس بین حباب و همچنین افزایش احتمال انفصال ذرات از حباب هوا می‌شود. در محدوده ابعادی میانی (۱۲۵+۱۸۰- میکرون) بازیابی شناورسازی سیلیس آمورف نسبت به کوارتز آلفا نیز افزایش می‌یابد که این افزایش بازیابی نسبت به ابعاد درشت کمتر است. این افزایش بازیابی در این محدوده ابعادی نیز ناشی از کمتر بودن چگالی ذرات سیلیس آمورف نسبت به کوارتز آلفا بوده که منجر به افزایش زاویه تماس بین حباب-ذره می‌شود.

ولی در محدوده ابعادی ریزتر (۵۳+۱۰۶- میکرون) بازیابی شناورسازی ذرات سیلیس آمورف نسبت به کوارتز آلفا کاهش یافته است که ریزترین ابعاد کاهش بازیابی قابل توجه می‌باشد. زیرا ذرات سیلیس آمورف در این محدوده ابعادی به علت کاهش چگالی نسبت به کوارتز آلفا، دارای اینرسی پایین‌تری هستند. به طوری که آنها را قادر می‌سازد تاجریان‌های هیدرودینامیکی را دنبال کرده و از گیرافتادن در حباب‌ها جلوگیری نماید. با بررسی بازیابی شناورسازی در تمام محدوده‌های ابعادی برای هر دو ماده معدنی نشان داده شد که در ابعاد فوقانی (۲۱۲+۳۰۰- میکرون) ذرات کوارتز آلفا (۲/۶۷ گرم بر سانتی متر مکعب) دارای بازیابی شناورسازی کمتری نسبت به سیلیس آمورف (۲/۲ گرم بر سانتی متر مکعب) هستند، زیرا با افزایش ابعاد و چگالی ذرات احتمال انفصال افزایش می‌یابد. در ابعاد میانی (۱۲۵+۱۸۰- میکرون) این کاهش بازیابی کمتر می‌باشد. ولی در محدوده ابعادی ریزتر (۵۳+۱۰۶- میکرون) ذرات سیلیس آمورف دارای بازیابی شناورسازی کمتری نسبت به کوارتز آلفا هستند، زیرا کاهش چگالی منجر می‌شود تا ذرات دارای اینرسی پایین‌تری شده و تابعی از جریان‌های هیدرودینامیکی شوند.

با بررسی همزمان تاثیر ابعاد و چگالی ذرات بر شناورسازی مشاهده می‌شود که در حالت کلی تاثیر ابعاد بیشتر از چگالی ذرات است و با افزایش چگالی محدوده بهینه ابعاد برای شناورسازی کاهش می‌یابد.

۳۰۰+۲۵۰، ۲۱۲+۲۵۰، ۱۵۰+۱۸۰، ۱۲۵+۱۵۰، ۷۵+۱۰۶- و ۷۵+۵۳- میکرون طبقه‌بندی شد. به منظور بررسی بازیابی شناورسازی، ۱۰۰ گرم نمونه از هریک از محدوده‌ها (تحت شرایط بهینه) مورد شناورسازی قرار گرفت. به طوری که در جدول (۱) و (۲) نشان داده شده است، نتایج بازیابی شناورسازی به ترتیب برای ذرات کوارتز آلفا و سیلیس آمورف در هر شش محدوده ابعادی نشان داده شده است.

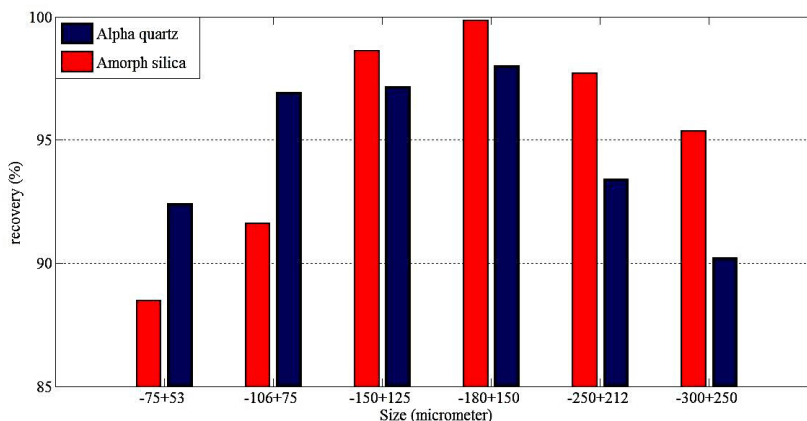
جدول ۱: نتایج شناورسازی ذرات کوارتز آلفا

ابعاد ذرات (میکرون)	بازیابی (%)
-۳۰۰+۲۵۰	۹۰/۲۳
-۲۵۰+۲۱۲	۹۳/۴۲
-۱۸۰+۱۵۰	۹۸/۰۱
-۱۵۰+۱۲۵	۹۷/۱۶
-۱۰۶+۷۵	۹۴/۹۶
-۷۵+۵۳	۹۲/۴۳

جدول ۲: نتایج شناورسازی ذرات سیلیس آمورف

ابعاد ذرات	بازیابی (%)
-۳۰۰+۲۵۰	۹۵/۳۸
-۲۵۰+۲۱۲	۹۷/۷۴
-۱۸۰+۱۵۰	۹۹/۸۶
-۱۵۰+۱۲۵	۹۸/۶۵
-۱۰۶+۷۵	۹۱/۶۵
-۷۵+۵۳	۸۸/۴۹

به طوری که در شکل ۲ نشان داده شده است، بازیابی شناورسازی در هر دو محدوده ابعادی بالای (۲۱۲+۳۰۰- میکرون) برای ذرات سیلیس آمورف (۲/۲ g/cm<sup>3</sup>) بیشتر از ذرات کوارتز آلفا (۲/۶۷ g/cm<sup>3</sup>) می‌باشد. یعنی با افزایش چگالی در محدوده ابعادی ۲۱۲+۲۵۰- و ۳۰۰+۲۵۰-



شکل ۲: بازیابی شناورسازی ذرات کوارتز آلفا و سیلیس آمورف در محدوده‌های ابعادی -۱۲۵+۱۵۰، -۱۵۰+۱۸۰، -۲۱۲+۲۵۰، -۲۵۰+۳۰۰، -۷۵+۱۰۶ و -۵۳+۷۵ میکرون متر

## ۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از شناورسازی برای هر دو ماده معدنی در محدوده های ابعادی طبقه بندی شده نشان داد که:

۱. بازیابی شناورسازی در محدوده ابعادی درشت (۲۱۲+۳۰- میکرون) برای ذرات سیلیس آمورف (چگالی  $2/2 \text{ g/cm}^3$ ) نسبت به ذرات کوارتز آلفا ( $2/67 \text{ g/cm}^3$ ) افزایش قابل توجهی می یابد. یعنی با افزایش چگالی، بازیابی شناورسازی کاهش می یابد که ناشی از افزایش نیروی گرانشی وارد بر حباب می باشد. همچنین نیروی انفصال این ذرات با حباب هوا افزایش می یابد.
۲. در محدوده ابعادی میانی (۱۲۵+۱۸۰- میکرون) بازیابی شناورسازی ذرات سیلیس آمورف نسبت به کوارتز آلفا به میزان کمتری افزایش می یابد زیرا ذرات با چگالی کمتر نیروی گرانشی کمتری بر حباب هوا وارد کرده و زاویه تماس آنها با حباب افزایش می یابد.
۳. ولی در محدوده ابعادی ریزتر (۵۳+۱۰۶- میکرون) بازیابی شناورسازی ذرات سیلیس آمورف نسبت به کوارتز آلفا، کاهش یافته است. زیرا ذرات سیلیس آمورف در این محدوده ابعادی به علت کاهش چگالی نسبت به کوارتز آلفا، دارای اینرسی پایین تری هستند. به طوری که آنها را قادر می سازد تا جریان های هیدرودینامیکی را دنبال کرده و از گیر افتادن در حباب ها جلوگیری کنند.
۴. تأثیر اندرکنش بین ابعاد و چگالی نشان داد که با افزایش ابعاد و چگالی احتمال انفصال بین حباب و ذره افزایش می یابد. با افزایش چگالی نیز محدوده بهینه ابعاد ذرات جهت شناورسازی تغییر کرده و کاهش می یابد.

## ۵- مراجع

- [5] Reay, D. and Ratcliff, G., "Removal of fine particles from water by dispersed air flotation: effects of bubble size and particle size on collection efficiency", The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 51, pp. 178-185, 1973.
- [6] Weber, M. and Paddock, D., "Interceptional and gravitational collision efficiencies for single collectors at intermediate Reynolds numbers", Journal of Colloid and Interface Science, vol. 94, pp. 328-335, 1983.
- [7] Schimmoler, B., Luttrell, G., and Yoon, R., "A combined hydrodynamic-surface force model for bubble-particle collection", in Proc. XVIII Intern. Miner. Process. Congress, Sydney, pp. 751-756, 1993.
- [8] Bustamante, H. and Warren, L., "Relation between the relative density of composite coaly grains and their flotation recovery", International Journal of Mineral Processing, vol. 10, pp. 95-111, 1983.
- [9] Yoon, R. and Luttrell, G., "The effect of bubble size on fine particle flotation", Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, vol. 5, pp. 101-122, 1989.
- [10] Małysa, E., "Wpływ uziarnienia na wyniki floatacji węgla kamiennego", Gospodarka Surowcami Mineralnymi, vol. 16, pp. 29-41, 2000.
- [11] Laskowski, J., "Wzbogacanie flotacyjne", Poradnik Górnika T. 5. Wyd. Śląsk. Katowice (in Polish), 1976.
- [12] Jowett, A., "Formation and disruption of particle-bubble aggregates in flotation", Fine Particles Processing, vol. 1, pp. 720-754, 1980.
- [13] Maoming, F., Daniel, T., HONAKER, R. and Zhenfu, L., "Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part IV): mechanical cells and specially designed column flotation of coal", Mining Science and Technology, China, vol. 20, pp. 641-671, 2010.
- [14] Shen, H., Forsberg, E., and Pugh, R., "Selective flotation separation of plastics by chemical conditioning with methyl cellulose", Resources, conservation and recycling, vol. 35, pp. 229-241, 2002.
- [15] Van der Westhuizen, A. and Deglon, D., "Solids suspension in a pilot-scale mechanical flotation cell: A critical impeller speed correlation", Minerals Engineering, vol. 21, pp. 621-629, 2008.
- [1] Ahmed, M. M., "Effect of comminution on particle shape and surface roughness and their relation to flotation process", International Journal of Mineral Processing, vol. 94, pp. 180-191, 2001.
- [2] Ahmed, P. T. and Nguyen A.V., "Validation of the generalised Sutherland equation for bubble-particle encounter efficiency in flotation: Effect of particle density", Minerals Engineering, vol. 22, pp. 176-181, 2009.
- [3] Małysa, E., "The effect of hard coal density on its flotation performance", Acta Montanistica Slovaca, vol. 10, 2005.
- [4] Yoon, R. H., "The role of hydrodynamic and surface forces in bubble-particle interaction", International Journal of Mineral Processing, vol. 58, pp. 129-143, 2000.