

# بررسی نقش شار مساحت سطح حباب در ثابت آهنگ فلوتاسیون ذرات زغال سنگ

بهزاد شهبازی<sup>۱</sup>، بهرام رضایی<sup>۲</sup>، سید محمد جواد کلینی<sup>۳</sup> و محمد نوع پرست<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دکتر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه فرآوری مواد معدنی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>استاد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
<sup>۳</sup>دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
<sup>۴</sup>استاد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۶/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۲/۰۹

## چکیده

در این پژوهش تأثیر شار مساحت سطح حباب در آهنگ شناورسازی ذرات زغال سنگ مورد بررسی قرار گرفت، به گونه‌ای که نتایج نشان‌دهنده افزایش ثابت آهنگ فلوتاسیون ذرات با افزایش شار مساحت سطح حباب بود. بیشترین ثابت آهنگ فلوتاسیون برابر با ۳/۳۰ در دقیقه به دست آمد؛ در حالی که اندازه ذرات ۳۷- میکرون و شار مساحت سطح حباب ۲۵/۸۹ در ثانیه بود. برای تحلیل نتایج از کارایی برخورد، اتصال و انفصال حباب- ذره استفاده شد. بیشترین کارایی برخورد استوکس برابر با ۸۱/۵۷ درصد به دست آمد، در شرایطی که دانه‌بندی ذرات ۵۰۰+۴۲۰- میکرون، شار مساحت سطح حباب ۲۷/۴۳ در ثانیه و آهنگ شناورسازی ۱/۱۷ در دقیقه بود. بیشترین کارایی اتصال یون، استوکس و پتانسیل به ترتیب برابر با ۹۴/۶۶٪، ۵۶/۷۴٪ و ۴۵/۶۱٪ به دست آمد. همچنین بیشترین کارایی انفصال برابر با ۳۴/۵۷٪ به دست آمد، در شرایطی که دانه‌بندی ذرات ۵۰۰+۴۲۰- میکرون و شار مساحت سطح حباب ۱۶/۷۷ در ثانیه و آهنگ شناورسازی ۰/۸۵ در دقیقه بود. کارایی گردآوری ذرات با افزایش شار مساحت سطح حباب افزایش یافت. کارایی گردآوری ذرات در محدوده دانه‌بندی ۱۰۶+۳۷- میکرون بالا بود و در دانه‌بندی‌های بیرون از این محدوده، کارایی گردآوری ذرات به آرامی کاهش یافت. بنابراین می‌توان پایین بودن کارایی گردآوری ذرات درشت را به بالا بودن کارایی انفصال نسبت داد تا هنگامی که پایین بودن کارایی گردآوری ذرات دانه‌ریز ناشی از پایین بودن کارایی برخورد حباب- ذره بود.

**کلیدواژه‌ها:** فلوتاسیون، زغال سنگ، سطح ظاهری حباب، آهنگ فلوتاسیون، کارایی برخورد، کارایی اتصال، کارایی انفصال

E-mail: bzshahbazi@yahoo.com

\*نویسنده مسئول: بهزاد شهبازی

## ۱- پیش‌گفتار

افزایش مساحت سطحی حباب‌های هوا سبب افزایش احتمال برخورد میان حباب و ذره و در نتیجه افزایش ثابت آهنگ فلوتاسیون می‌شود. نتیجه پژوهش‌ها نشان‌دهنده وجود رابطه زیر میان ثابت آهنگ فلوتاسیون و شار مساحت سطح حباب است (Hernandez-Aguilar et al., 2005):

$$k = PS_b R_f \quad (2)$$

$P$  متغیری است که قابلیت شناورسازی ماده معدنی را مشخص می‌کند و  $R_f$  عامل بازیابی کف است که به عنوان نسبتی میان ثابت آهنگ فلوتاسیون کلی به ثابت آهنگ فلوتاسیون ناحیه گردآوری، تعریف می‌شود. رابطه خطی  $k - S_b$  در مورد ذرات دانه‌ریز (ریزتر از ۳۰ میکرون) و سولفیدی به دست آمده و درستی آن در مورد ذرات درشت‌تر (فلوتاسیون کانی‌های صنعتی و زغال سنگ) مورد تردید است. این رابطه کاربردهای مهمی در بزرگ‌نمایی سلول و مدل‌سازی و شبیه‌سازی کارخانه‌های فلوتاسیون دارد و سهم مهمی را در حل مشکلات مداوم کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی ایفا می‌کند. بنابراین در این پژوهش تلاش می‌شود که با استفاده از شار مساحت سطح حباب، کارایی فلوتاسیون ذرات زغال سنگ در سلول‌های مکانیکی بهبود یابد. برای تحلیل نتایج از کارایی برخورد، اتصال و انفصال حباب- ذره استفاده می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

آزمایش‌های فلوتاسیون در سلول فلوتاسیون مکانیکی مدل دنور انجام شد. در این آزمایش‌ها قطر همزن برابر با ۰/۰۷ متر و سلول آن با ارتفاع ۰/۱۲ متر، سطح مقطع مربعی با طول ۰/۱۳ متر داشت. برای انجام آزمایش‌ها از زغال سنگ (آب نیل کرمان) در دانه‌بندی‌های ۵۰۰+۴۲۰-، ۳۰۰+۲۱۲-، ۲۱۲+۱۰۶-، ۱۰۶+۷۵-، ۵۳+۳۷- و ۳۷- میکرون استفاده شد که ویژگی‌های زغال سنگ مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. دور همزن برابر با ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ دور در دقیقه و آهنگ هوادهی برابر با ۱۲۰ و ۱۸۰ لیتر در ساعت بود.

مطالعات نشان می‌دهد که فلوتاسیون روشی مؤثر برای جدایش کانی‌ها از یکدیگر در یک محدوده مشخص از دانه‌بندی تقریباً بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون است (Wills, 1988). تاکنون نقش دانه‌بندی ذرات در اندرکنش حباب- ذره و همچنین کارایی شناورسازی ذرات به طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته است (Anthony et al., 1975; Chehreh Chelgani et al., 2010; Gaudin et al., 1931; Shahbazi et al., 2008, 2009, 2010; Trahar, 1976, 1981). تعیین کارایی برخورد میان ذرات و حباب‌های هوا یکی از مهم‌ترین عوامل لازم برای برآورد ثابت آهنگ فلوتاسیون است. دو عامل دیگر افزون بر کارایی برخورد وجود دارند که ثابت آهنگ فلوتاسیون را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این دو عامل کارایی اتصال و انفصال هستند که توسط نیروهای سطحی فعال در محل اتصال ذره به حباب محاسبه می‌شوند (Yoon, 2000). ثابت آهنگ فلوتاسیون به طور ضعیفی با اندازه حباب ارتباط دارد و این ارتباط با ماندگی گاز و سرعت سطحی گاز بهبود می‌یابد. ماندگی گاز (مقدار هوا در واحد حجم پالپ)، نسبت به اندازه حباب وابستگی بیشتری به ثابت آهنگ فلوتاسیون دارد. عاملی که تأثیر همزمان سرعت سطحی گاز و اندازه حباب‌های هوا را در نظر می‌گیرد شار مساحت سطح حباب ( $S_b$ ) است که رابطه خطی قوی با ثابت آهنگ فلوتاسیون دارد. از نظر ریاضی شار مساحت سطح حباب از رابطه زیر برآورد می‌شود (Finch & Dobby, 1990):

$$S_b = \frac{6J_g}{d_{32}} \quad (m^2/m^2s) \quad (1)$$

$S_b$  شار مساحت سطح حباب بر حسب  $S^{-1}$ ،  $J_g$  سرعت سطحی گاز بر حسب  $m/s$  و  $d_{32}$  قطر ساتر (Sauter) حباب‌های هوا بر حسب متر است. از نظر فیزیکی، شار مساحت سطح حباب برابر با میزان سطح حباب‌های هوایی است که در واحد زمان از واحد سطح مقطع سلول عبور می‌کند (Gorain et al., 1999). ثابت آهنگ فلوتاسیون ( $k$ )، ارتباطی قوی با شار مساحت سطح حباب دارد که نشان می‌دهد

– **مدل یون-لاترل (Yoon-Luttrel):** مدل برخورد یون-لاترل طبق فرضیاتی مشابه با مدل ساترلند گسترش یافت. ذرات تحت اینرسی نیستند و خطوط جریان سیال را دنبال می کنند، بنابراین در حین حرکتشان به وسیله تابع جریان سیال شناسایی می شوند. شعاع برخورد معینی وجود دارد که ذراتی که بین این شعاع برخورد حرکت می کنند با حباب برخورد می کنند. مدل برخورد یون-لاترل تأثیر تقاطعی کارایی برخورد را نیز ایجاد می کند. این مدل از مدل برخورد ساترلند عمومی تر است زیرا شرایط جریان مختلفی را در سطح حباب در نظر می گیرد و از توابع جریان مختلفی برای شناسایی خطوط جریان استفاده می کند (Dai et al., 2000; Yoon, 2000). برای تعیین کارایی برخورد می توان از معادله عمومی زیر در شرایط مختلف جریان استفاده کرد (Girgin et al., 2006; Yoon, 2000).  $n$  و  $A$  متغیرهایی هستند که با توجه به عدد رینولدز تغییر می کنند. جدول ۳ مقادیر مختلف  $n$  و  $A$  را برای ۳ محدوده جریان های استوکس، حد وسط و پتانسیل ارائه می کند.

$$E_c = A \left( \frac{d_p}{d_b} \right)^n \quad (6)$$

در این رابطه  $d_p$  و  $d_b$  به ترتیب قطر ذره و حباب هستند. برای تعیین کارایی برخورد در شرایط حدواسط باید مقدار عدد رینولدز حباب ( $Re_{cb}$ ) مشخص باشد. مقدار عدد رینولدز حباب از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Re_{cb} = v_b d_b \rho / \eta \quad (7)$$

که در این رابطه  $v_b$  سرعت بالا آمدن حباب،  $\rho$  چگالی سیال و  $\eta$  گرانروی دینامیکی سیال است.

### ۳-۲. کارایی اتصال حباب-ذره

با استفاده از توابع جریان برآورد  $E_{at}$  امکان پذیر است؛ به گونه ای که لاترل و یون زمان سرخوردن ذرات روی سطح حباب را با استفاده از توابع جریان محاسبه کردند (Gaudin, 1957). اگر زمان سرخوردن بزرگ تر از زمان ابقا (Induction Time) باشد ذره زمان کافی برای نازک کردن و اتصال به فیلم حباب را در اختیار خواهد داشت. با استفاده از این واقعیت می توان رابطه ای را برای محاسبه  $E_{at}$  ارائه کرد (Dai et al., 2000):

$$E_{at} = \sin^2 \left[ 2 \arctan \exp \left( \frac{-(45 + 8 Re_{cb}^{0.72}) v_b t_i}{15 d_b (d_b/d_p + 1)} \right) \right] \quad (8)$$

که در آن  $t_i$  زمان ابقا است. این معادله برای محدوده اعداد رینولدز متوسط کاربرد دارد. زمان ابقا تابعی از میزان آبرانی سطح است و به طور معمول می توان آن را به صورت آزمایشگاهی اندازه گیری کرد (Yordan & Yoon, 1986). بنابراین از معادله ۷ می توان برای محاسبه  $E_{at}$  از مقادیر  $t_i$  محاسبه شده در شرایط شیمیایی مختلف استفاده کرد. افزون بر رابطه بالا رابطه مناسب تری وجود دارد که توانایی محاسبه احتمال اتصال ذره به حباب را فراهم می کند (Nguyen et al., 1998):

$$E_{at} = \text{sech}^2 \left( \frac{2 v_s A t_i}{d_p + d_b} \right) \quad (9)$$

$A$  متغیر بی بعدی است که در شرایط استوکس و پتانسیل از رابطه های زیر محاسبه می شود:

$$A_{St} = \frac{v_b}{v_s} + 1 - \frac{3}{4} \left( 1 + \frac{d_p}{d_b} \right)^{-1} - \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{d_p}{d_b} \right)^{-3} \quad (10)$$

$$A_p = \frac{v_b}{v_s} + 1 + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{d_p}{d_b} \right)^{-3} \quad (11)$$

در صورتی که سطح حباب ساکن فرض شود سرعت بالا رفتن حباب از رابطه استوکس محاسبه می شود (Schulze, 1984):

$$v_b = \frac{d_b^2}{18 \nu} g \quad (12)$$

از MIBC با غلظت  $C/CCC = 2$  به عنوان کف ساز استفاده شد در حالی که pH برابر با ۷/۲ بود. شرایط عملیاتی آزمایش های فلو تاسیون در جدول ۲ آورده شده است. پس از تنظیم دور همزن و آهنگ هوادهی، عمل کف گیری از سلول فلو تاسیون در زمان های ۱، ۲، ۳ و ۵ دقیقه انجام شد. بازیابی به عنوان تابعی از زمان رسم شد تا ثابت آهنگ فلو تاسیون تعیین شود. ثابت آهنگ فلو تاسیون با فرض معادله درجه اول برای یک سلول ناپیوسته به صورت  $R = R^* (1 - \exp(-kt))$  و با رسم  $\ln(1 - R/R^*)$  در برابر  $t$  تعیین شد، که  $R^*$  بازیابی در زمان بی نهایت است (شکل ۱).

برای تعیین زاویه تماس از روش واشبرن (Washburn) و دستگاه لاودا (Lauda) استفاده شد. در این روش اندازه گیری زاویه تماس بر پایه ویژگی های تروشوندگی ذرات استوار است. در این روش ستونی از ماده معدنی به صورت پودر خشک در تماس با آب قرار می گیرد. آهنگ نفوذ خودبه خود آب به درون ستون بیانگر میزان آب دوستی و در نتیجه زاویه تماس ذرات خواهد بود. زاویه تماس نمونه زغال سنگ برابر با ۸۹/۳ درجه به دست آمد.

توان ورودی به سامانه به صورت محاسباتی و با اندازه گیری متغیرهای شدت جریان و اختلاف پتانسیل الکتریکی تعیین شد. بدین منظور میزان شدت جریان و اختلاف پتانسیل ورودی به موتور الکتریکی سلول فلو تاسیون اندازه گیری و با استفاده از آنها توان ورودی به سامانه محاسبه شد. توان مصرفی در دو حالت یکی در حضور پالپ و دیگری در نبود آن اندازه گیری شد. توان خالص مصرفی برای همزدن پالپ از تفاضل توان مصرفی در دو حالت یادشده به دست آمد.

### ۳-۳. تئوری

در فلو تاسیون کارایی گردآوری ذره توسط حباب های هوا از رابطه زیر به دست می آید (Yoon, 2000).

$$E = E_c E_{at} (1 - E_d) \quad (3)$$

که در این رابطه  $E_c$  کارایی برخورد،  $E_{at}$  کارایی اتصال و  $E_d$  کارایی انفصال ذرات از حباب های هوا است. برای محاسبه هر یک از این کارایی ها رابطه ای ارائه شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می شود.

#### ۳-۱- کارایی برخورد حباب-ذره

یکی از مهمترین فرایندهایی که در فلو تاسیون رخ می دهد برخورد بین ذرات با حباب های هوا است. به طور کلی شرط لازم برای شناور شدن ذرات، برخورد آنها با حباب های هوا است و تا برخوردی میان ذره و حباب رخ ندهد اتصال و در نتیجه شناور شدن ذرات رخ نخواهد داد. مدل های مختلفی برای تعیین کارایی برخورد طبق موارد زیر وجود دارد.

– **مدل فلینت-هوارث (Flint-Howarth):** با توجه به محدودیت های کاربرد مدل های برخوردی که پیش تر ارائه شده بود، Flint & Howarth (1971) تلاش کردند تا تحلیل کاملی را از فرایند برخورد حباب-ذره ارائه کنند. در اعداد استوکس بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ و در حالی که از نیروهای اینرسی صرف نظر شده بود آنها خط سیر ذرات را به طور نظری با حل معادله حرکت ذره برای جریان های پتانسیل و استوکس به دست آوردند و دریافتند که وقتی اعداد استوکس به صفر نزدیک می شوند عبارت کارایی برخورد در هر دو رژیم یکسان می شود. کارایی برخورد Flint-Howarth سرعت ذره را توسط رابطه زیر به سرعت حباب ارتباط می دهد (Dai et al., 2000; Flint & Howarth, 1971):

$$E_{c-FH} = \left( \frac{v_s}{v_s + v_b} \right) \quad (4)$$

که  $v_s$  سرعت ته نشینی ذرات و  $v_b$  سرعت بالا آمدن حباب است. برای حالت هایی که  $v_b > v_s$  (ذرات خیلی ریز) باشد:

$$E_{c-FH} \approx \frac{v_p}{v_b} \quad (5)$$

سرعت ته‌نشینی ذرات نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Schulze, 1984):

$$v_s = \sqrt{\frac{3g(\rho_s - \rho)d_p}{\rho}} \quad (13)$$

که  $\rho$  چگالی سیال،  $\rho_s$  چگالی ذره و  $g$  شتاب جاذبه زمین است. برای اندازه‌گیری  $t_i$  رابطه‌ای ارائه شده است که می‌توان زمان ابقا را با توجه به قطر ذره و زاویه تماس ( $\theta$ ) به دست آورد (Koh & Schwarze, 2006; Dai et al., 1999):

$$t_i = \frac{75}{\theta} d_p^{0.6} \quad (14)$$

### ۳-۳. کارایی انفصال حباب-ذره

برخی از ذرات پس از اینکه فرایندهای برخورد و اتصال به طور موفقیت‌آمیز انجام شد ممکن است از سطح حباب جدا شوند. به طور کلی می‌توان گفت که ذراتی که انرژی جنبشی بیشتری نسبت به انرژی جدایش خود از حباب دارند، نمی‌توانند شناور شوند. به عبارت دیگر برای ایجاد اتصال بین ذره و حباب، باید کمینه انرژی به پالپ وارد شود، به گونه‌ای که اگر انرژی جنبشی ذرات کمتر از میزانی باشد که برای ایجاد اتصال لازم است ذرات شناور نخواهند شد. در این بخش پدیده انفصال ذرات از حباب‌های هوا مورد بررسی قرار می‌گیرد. (Schulze (1993) عبارت زیر را برای محاسبه کارایی انفصال حباب-ذره بیان کرد:

$$E_d = \exp\left(1 - \frac{1}{Bo^*}\right) \quad (15)$$

$$Bo^* = \frac{d_p^2 \left[ \Delta\rho_s g + 1.9\rho_s \varepsilon^{\frac{2}{3}} \left( \frac{d_p + d_b}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \right] + 1.5 d_p \left( \frac{4\sigma}{d_b} - d_b \rho g \right) \sin^2 \left( \pi - \frac{\theta}{2} \right)}{6\sigma \sin \left( \pi - \frac{\theta}{2} \right) \sin \left( \pi + \frac{\theta}{2} \right)} \quad (16)$$

که  $\sigma$  کشش سطحی و  $\Delta\rho_s = (\rho_s - \rho)$  است. (Bloom & Heindel (2003) معادله اصلاح شده زیر را پیشنهاد کردند که در آن  $A_s$  ثابت تجربی برابر با ۰/۵ است (Bloom & Heindel, 2003).

$$E_d = \exp\left[A_s \left(1 - \frac{1}{Bo^*}\right)\right] \quad (17)$$

### ۴- نتایج و بحث

نتایج نشان داد که میزان بازیابی ذرات با افزایش دانه‌بندی آنها کاهش می‌یابد (شکل ۲). با افزایش اندازه ذرات از توانایی حباب‌های هوا در انتقال ذرات به فاز کف کاسته می‌شود، بنابراین می‌توان انتظار داشت که در این شرایط بازیابی ذرات کاهش یابد. در مورد ذراتی که در محدوده دانه‌بندی  $90 < d_p < 64$  میکرون قرار دارند، با کاهش اندازه ذرات میزان بازیابی آنها به دلیل کاهش کارایی برخورد میان ذرات و حباب‌های هوا کاهش می‌یابد. برای ذرات کوچک‌تر از ۶۴ میکرون، با کاهش دانه‌بندی ذرات بازیابی دوباره افزایش می‌یابد که این افزایش در بازیابی ذرات را می‌توان به پدیده دنباله‌روی نرمه‌ها نسبت داد.

با افزایش میزان هوادهی، بازیابی ذرات افزایش می‌یابد. با افزایش هوادهی میزان سطح ظاهری حباب‌های هوا افزایش می‌یابد و این پدیده سبب افزایش کارایی برخورد ذرات به حباب‌های هوا خواهد شد. بنابراین می‌توان افزایش بازیابی ذرات را با افزایش هوادهی پیش‌بینی کرد.

منحنی‌های  $k - S_b$  مربوط به نمونه زغال‌سنگ در شکل ۳ آورده شده‌اند. در شکل ۳ هیچ رابطه خطی میان ثابت آهنگ فلوتاسیون و شار مساحت سطح حباب دیده نمی‌شود. در مورد ذرات زغال‌سنگ که نسبت به دیگر مواد معدنی اندازه‌ای درشت‌تر و جرم مخصوصی کمتر دارند، ممکن است که منحنی‌های  $k - S_b$  از حالت

خطی خارج شده و شکل منحنی به صورت توابع توانی، نمایی یا غیره باشد. بیشترین ثابت آهنگ فلوتاسیون برابر با ۳/۳۰ در دقیقه به دست آمد در حالی که اندازه ذرات ۳۷- میکرون و شار مساحت سطح حباب ۲۵/۸۹ در ثانیه بود. کمترین ثابت آهنگ فلوتاسیون برابر با ۰/۶۳ در دقیقه به دست آمد در حالی که اندازه ذرات ۴۲۰+۵۰۰- میکرون و شار مساحت سطح حباب ۱۹/۰۸ در ثانیه بود.

### ۴-۱. نقش کارایی برخورد در آهنگ شناورسازی ذرات زغال‌سنگ

کارایی برخورد ذرات کوارتز به حباب‌های هوا در شرایط هیدرودینامیکی مختلف و با توجه به میزان هوای ورودی به سامانه تعیین شد (شکل ۴). محاسبات نشان می‌دهد که وقتی از روابط حد واسط و پتانسیل برای برآورد کارایی برخورد حباب-ذره استفاده می‌شود میزان کارایی محاسبه شده اغراق‌آمیز و غیر واقعی به نظر می‌رسد و زمانی که از رابطه فلینت-هوارت استفاده می‌شود میزان کارایی برخورد بسیار اندک پیش‌بینی می‌شود و احتمالاً تنها رابطه استوکس است که توانایی ارائه برآوردی بهتر از کارایی برخورد را دارد.

بر پایه این نتایج مشخص شد که کارایی برخورد با افزایش دانه‌بندی ذرات و شار مساحت سطح حباب افزایش می‌یابد. بر پایه رابطه استوکس بیشترین کارایی برخورد برابر با ۸۱/۵۷ درصد به دست آمد، در شرایطی که دانه‌بندی ذرات ۴۲۰+۵۰۰- میکرون و شار مساحت سطح حباب ۲۷/۴۳ در ثانیه و آهنگ شناورسازی ۱/۱۷ در دقیقه بود و کمترین کارایی برخورد برابر با ۰/۰۷ درصد به دست آمد، در شرایطی که دانه‌بندی ذرات ۳۷- میکرون و شار مساحت سطح حباب ۱۶/۷۷ در ثانیه و آهنگ شناورسازی ۱/۹۸ در دقیقه بود.

بر پایه این نتایج با افزایش شار مساحت سطح حباب کارایی برخورد ذرات به حباب‌های هوا افزایش می‌یابد که می‌تواند ناشی از کاهش قطر حباب‌های هوا باشد. هر چه حباب‌های هوا کوچک‌تر باشند شمار آنها در واحد حجم سلول افزایش یافته و در نتیجه کارایی برخورد آنها با ذرات نیز افزایش می‌یابد.

### ۴-۲. نقش کارایی اتصال در آهنگ شناورسازی ذرات زغال‌سنگ

کارایی اتصال یون، استوکس و پتانسیل برای محدوده‌های مختلف دانه‌بندی محاسبه شد و مشخص شد که میزان کارایی اتصال برای ذرات بزرگ‌تر از ۱۰۶ میکرون بسیار اندک و نزدیک به صفر است (شکل ۵). در شرایطی که شار مساحت سطح حباب برابر با ۲۷/۴۳ در ثانیه، اندازه ذرات ۳۷- میکرون و ثابت آهنگ فلوتاسیون ذرات ۱/۱۷ در دقیقه بود بیشینه کارایی اتصال یون، استوکس و پتانسیل به ترتیب برابر با ۹۴/۶۶ درصد، ۵۶/۷۴ درصد و ۴۵/۶۱ درصد به دست آمد. رابطه یون مقادیر بالایی را برای کارایی اتصال حباب-ذره پیش‌بینی می‌کند و از سوی دیگر کارایی اتصال محاسبه شده توسط رابطه پتانسیل پایین‌تر از کارایی‌های اتصال یون و استوکس است. بنابراین به نظر نمی‌رسد که روابط یون و پتانسیل روش مناسبی برای محاسبه کارایی اتصال در شرایط این پژوهش (سلول‌های فلوتاسیون مکانیکی) باشند.

در این پژوهش با افزایش اندازه ذرات، کارایی اتصال حباب-ذره کاهش یافت. با افزایش سطح ظاهری حباب، ثابت آهنگ فلوتاسیون و کارایی اتصال افزایش می‌یابد، بنابراین افزایش ثابت آهنگ فلوتاسیون را می‌توان افزون بر افزایش کارایی برخورد به افزایش کارایی اتصال حباب-ذره نیز نسبت داد.

### ۴-۳. نقش کارایی انفصال در آهنگ شناورسازی ذرات زغال‌سنگ

برای بررسی نقش شار مساحت سطح حباب در کارایی شناورسازی ذرات افزون بر کارایی برخورد و اتصال حباب-ذره باید کارایی انفصال ذرات از حباب‌های هوا نیز تعیین شود. در این بخش کارایی انفصال ذرات از حباب‌های هوا محاسبه می‌شود و از این مفهوم برای تحلیل منحنی‌های  $k - S_b$  استفاده می‌شود. کارایی انفصال حباب-ذره با استفاده از رابطه ۱۷ و در نظر گرفتن  $A_s = 0.5$  محاسبه شد. بر پایه این رابطه عواملی مانند اتلاف انرژی، زاویه تماس، اندازه حباب و اندازه ذره نقش قابل توجهی در کارایی انفصال برعهده دارند.

- ثابت آهنگ فلوتاسیون با افزایش شار مساحت سطح حباب و کاهش اندازه ذرات افزایش یافت. بیشترین ثابت آهنگ فلوتاسیون برابر با  $3/30$  در دقیقه به دست آمد در حالی که اندازه ذرات  $37$ - میکرون و شار مساحت سطح حباب  $25/89$  در ثانیه بود.

- کارایی برخورد با افزایش دانه بندی ذرات و افزایش شار مساحت سطح حباب افزایش یافت. بر پایه رابطه استوکس بیشترین کارایی برخورد برابر با  $81/57$  درصد به دست آمد، در شرایطی که دانه بندی ذرات  $500+420$ - میکرون و شار مساحت سطح حباب  $27/43$  در ثانیه و آهنگ شناورسازی  $1/17$  در دقیقه بود.

- بیشترین کارایی اتصال یون، استوکس و پتانسیل به ترتیب برابر با  $94/66$  درصد،  $56/74$  درصد و  $45/61$  درصد به دست آمد. در این پژوهش با افزایش دانه بندی، کارایی اتصال حباب- ذره کاهش یافت. با افزایش شار مساحت سطح حباب، ثابت آهنگ فلوتاسیون و کارایی اتصال افزایش یافت، بنابراین افزایش ثابت آهنگ فلوتاسیون را می توان افزون بر افزایش کارایی برخورد به افزایش کارایی اتصال حباب- ذره نیز نسبت داد.

- بیشترین کارایی انفصال برابر با  $34/57$  درصد به دست آمد، در شرایطی که دانه بندی ذرات  $500+420$ - میکرون و شار مساحت سطح حباب  $16/77$  در ثانیه و آهنگ شناورسازی  $0/85$  در دقیقه بود.

- کارایی گردآوری ذرات با افزایش شار مساحت سطح حباب افزایش یافت. کارایی گردآوری ذرات در محدوده دانه بندی  $106+37$ - میکرون بالا بود و در دانه بندی های خارج از این محدوده، کارایی گردآوری ذرات به آرامی کاهش یافت.

- می توان پایین بودن کارایی گردآوری ذرات درشت زغال سنگ را به بالا بودن کارایی انفصال و پایین بودن کارایی گردآوری ذرات دانه ریز زغال سنگ را به پایین بودن کارایی برخورد ذرات به حباب های هوا نسبت داد.

### سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از دانشگاه آزاد اسلامی و دانشگاه تربیت مدرس به خاطر همکاری و مساعدت در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می نمایند.

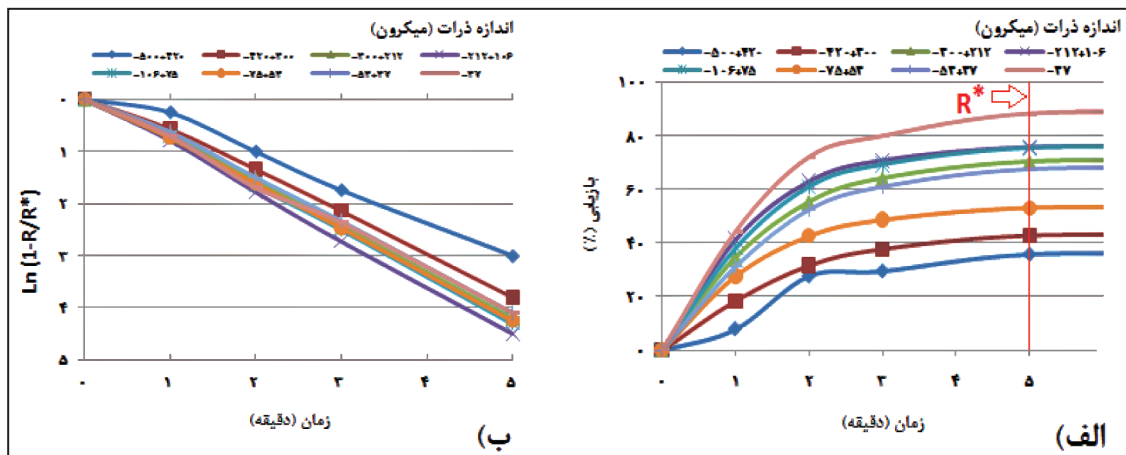
نقش شار مساحت سطح حباب در کارایی انفصال ذرات زغال سنگ در شکل ۶ آورده شده است. کارایی انفصال کمتر تحت تأثیر شار مساحت سطح حباب است که این پدیده را می توان به پایین بودن جرم مخصوص ذرات زغال سنگ نسبت داد. وقتی که اندازه ذرات بزرگ تر از  $90$  میکرون است میزان کارایی انفصال به بیشترین مقدار خود می رسد. بیشترین کارایی انفصال برابر با  $34/57$  درصد به دست آمد، در شرایطی که دانه بندی ذرات  $500+420$ - میکرون و شار مساحت سطح حباب  $16/77$  در ثانیه و آهنگ شناورسازی  $0/85$  در دقیقه بود و کمترین کارایی انفصال برابر با  $8/50$  درصد به دست آمد، در شرایطی که دانه بندی ذرات  $37$ - میکرون و شار مساحت سطح حباب  $27/43$  در ثانیه و آهنگ شناورسازی  $1/17$  در دقیقه بود.

### ۴-۴. کارایی گردآوری ذرات زغال سنگ

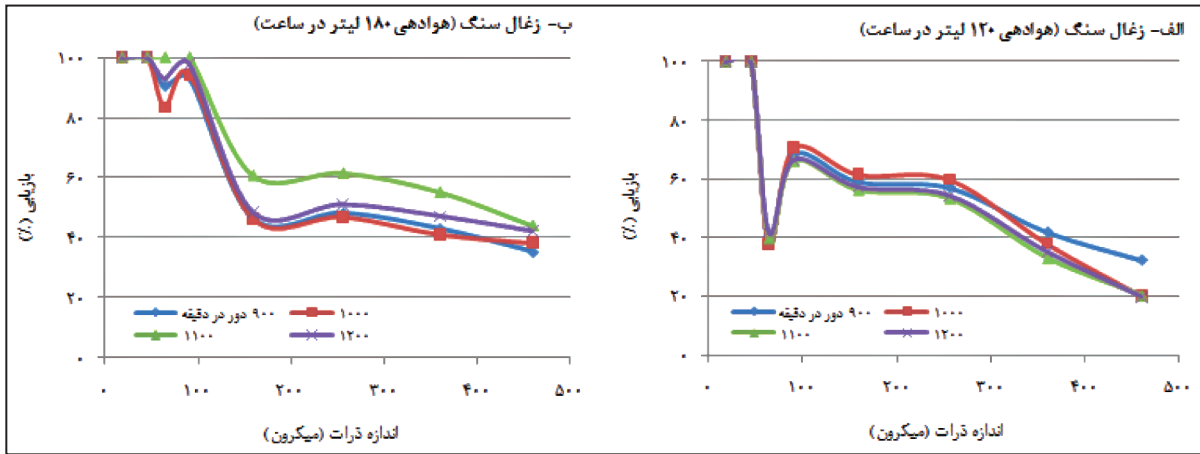
با توجه به مشخص بودن کارایی برخورد، اتصال و انفصال حباب- ذره می توان کارایی گردآوری ذرات توسط حباب های هوا را محاسبه کرد. کارایی گردآوری ذرات در شکل ۷ آورده شده است. کارایی گردآوری ذرات با افزایش سطح ظاهری حباب های هوا افزایش می یابد. کارایی گردآوری ذرات در محدوده دانه بندی  $106+37$ - میکرون بالا می باشد و در دانه بندی های خارج از این محدوده، کارایی گردآوری ذرات به آرامی کاهش می یابد. پایین بودن کارایی گردآوری ذرات درشت را می توان به بالا بودن کارایی انفصال و پایین بودن کارایی گردآوری ذرات دانه ریز را می توان به پایین بودن کارایی برخورد ذرات به حباب های هوا نسبت داد. بنابراین با استفاده از مفهوم شار مساحت سطح حباب می توان کارایی شناورسازی ذرات را بهبود داد تا آهنگ شناورسازی ذرات زغال سنگ افزایش یابد. مهم ترین عواملی که در میزان شار مساحت سطح حباب مؤثر هستند سرعت همزن و میزان هوای ورودی به سامانه است. میزان کارایی شناورسازی ذرات برای مقادیر هوادهی  $120$  و  $180$  لیتر در ساعت تقریباً با یکدیگر مساوی است ولی افزایش دور همزن تأثیر بسزایی در شار مساحت سطح حباب و کارایی شناورسازی ذرات بر عهده دارد. بنابراین برای افزایش کارایی شناورسازی ذرات، افزایش سرعت همزن نسبت به افزایش میزان هوای ورودی به سامانه مؤثرتر است.

### ۵- نتیجه گیری

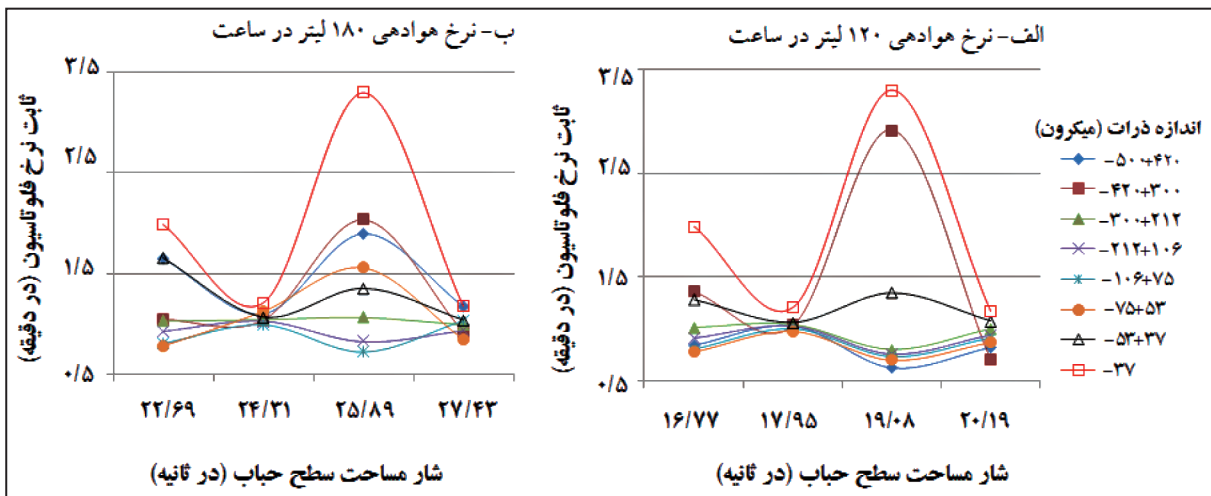
در این پژوهش تأثیر شار مساحت سطح حباب در ثابت آهنگ فلوتاسیون ذرات زغال سنگ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد:



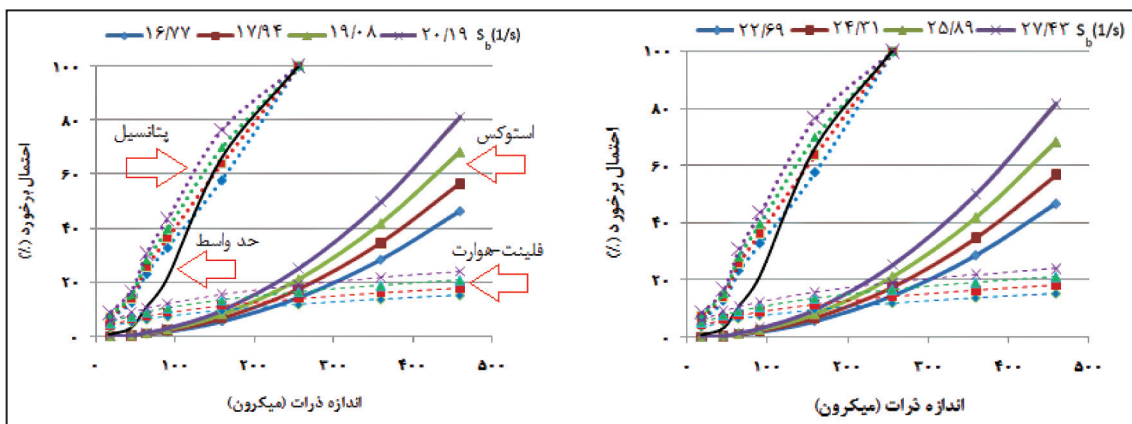
شکل ۱- چگونگی تعیین ثابت آهنگ فلوتاسیون با استفاده از بازایی در زمان بی نهایت،  $S_0 = 28/23$  1/s



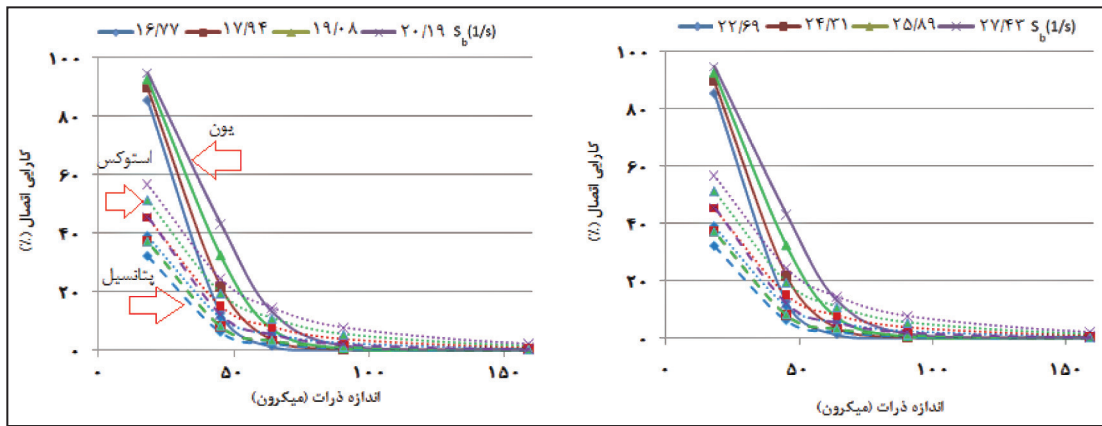
شکل ۲- بازیابی ذرات زغال سنگ در شرایط گوناگون



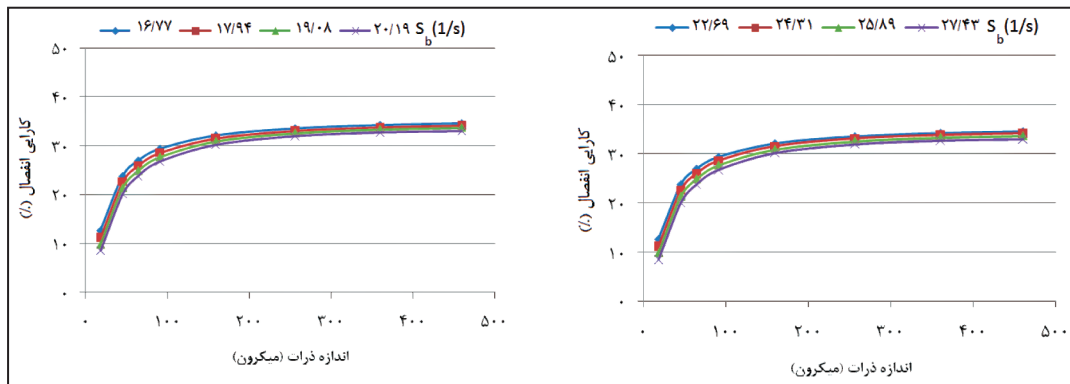
شکل ۳- نقش شار مساحت سطح حباب در ثابت آهنگ فلوتاسیون ذرات زغال سنگ



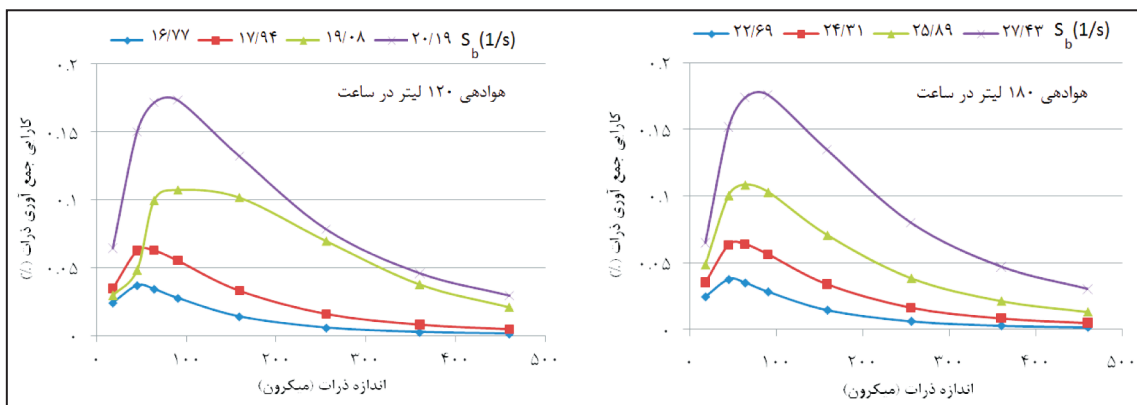
شکل ۴- کارایی برخورد حباب- ذره برای ذرات زغال سنگ



شکل ۵- کارایی اتصال حباب- ذره برای ذرات زغال سنگ



شکل ۶- کارایی انفصال حباب- ذره برای ذرات زغال سنگ



شکل ۷- کارایی گردآوری ذرات زغال سنگ

جدول ۱- تجزیه نمونه زغال سنگ کرمان (آب نیل)

متغیر	ارزش حرارتی (kcal/kg)	کربن	نیتروژن	هیدروژن	گوگرد	خاکستر	رطوبت	مواد فرار
مقدار (%)	۶۵۰۰-۷۰۰۰	۷۵/۴	۱/۷	۳/۴	۰/۱۶۵	۱۹/۳۲	۱/۰۵	۱۵/۱

جدول ۲- شرایط انجام آزمایش های فلوتاسیون

آهنگ هوادهی (لیتر در ساعت)								متغیرهای هیدرودینامیکی
۱۸۰				۱۲۰				
۱۲۰۰	۱۱۰۰	۱۰۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰	۱۱۰۰	۱۰۰۰	۹۰۰	سرعت همزن (دور در دقیقه)
۶۲۰	۶۸۰	۷۵۰	۸۲۰	۶۲۰	۶۸۰	۷۵۰	۸۳۰	قطر سائز حباب (میکرون)
۸/۱۷	۶/۶۵	۵/۲۹	۴/۰۸	۷/۳۰	۵/۹۳	۴/۷۱	۳/۶۲	ماندگی گاز (%)
۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	سرعت سطحی گاز (سانتی متر در ثانیه)
۲۷/۴۳	۲۵/۸۹	۲۴/۳۱	۲۲/۶۹	۲۰/۱۹	۱۹/۰۸	۱۷/۹۴	۱۶/۷۷	شار مساحت سطح حباب (در ثانیه)
۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۳۷	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۳۷	سرعت صعود حباب (متر در ثانیه)
۱۳۰	۱۷۰	۲۲۴	۳۰۱	۱۳۱	۱۷۱	۲۲۶	۳۰۳	عدد رینولدز حباب
۵/۹۸	۴/۱۸	۲/۹۵	۲/۱۵	۵/۹۸	۴/۱۸	۲/۹۵	۲/۱۵	اتلاف انرژی (وات در کیلوگرم)

جدول ۳- مقادیر مختلف n و A برای شرایط مختلف جریان (Reay &amp; Ratcliff, 1973)

n	A	شرایط جریان
۱	۱/۵	استوکس (Stokes)
۱	۳	پتانسیل (Potential)
۲	$\left[ \frac{3}{2} + \frac{4 Re_b^{0.72}}{15} \right]$	حد واسط (Intermediate)

## References

- Anthony, R. M., Kelsall, D. F. & Trahar, W. J., 1975- The effect of particle size on the activation and flotation of sphalerite, Proceedings of the Australian Institute of Mining and Metallurgy, 254, p.47-58.
- Bloom, F. & Heindel, T. J., 2003- Modeling flotation separation in a semibatch process. Chem Eng Sci, 58, p.353-365.
- Chehreh Chelgani, S., Shahbazi, B. & Rezai, B., 2010- Estimation of froth flotation recovery and collision probability based on operational parameters using an artificial neural network, Int. J. Min. Met. Mater, 17, p.526-534.
- Dai, Z., Fornasiero, D. & Ralston, J., 1999- Particle-bubble attachment in mineral flotation, journal of colloid and interface science, 217, p.70-76.
- Dai, Z., Fornasiero, D. & Ralston, J., 2000- Particle-bubble collision models: a review, Adv. Colloid. Interfac, 85, p.231-256.
- Finch, J. A. & Dobby, G. S., 1990 - Column flotation, Pergamon Press.

- Flint, L. R. & Howarth, W. J., 1971- The collision efficiency of small particles with spherical air bubbles, *Chem. Eng. Sci*, 26, p.1155-1168.
- Gaudin, A. M., 1957- *Flotation* (2nd edition), McGraw-Hill, New York.
- Gaudin, A. M., Groh, J. O. & Henderson, H. B., 1931- Effect of particle size on flotation, *American Institute of Mining and Metallurgical Engineering, Tech, Publ*, 414, p.3-23.
- Girgin, E. H., Do, S., Gomez, C. O. & Finch, J. A., 2006- Bubble Size as a function of impeller speed in a self-aeration laboratory flotation cell, *Minerals Engineering*, 19, p.201-203.
- Gorain, B. K., Franzidis, J. P. & Manlapig, E. V., 1999- The empirical prediction of bubble surface area flux in mechanical flotation cells from cell design and operating data, *Minerals Engineering*, No. 3, 12, p.309-322.
- Hernandez Aguilar, J. R., Rao, S. R. & Finch, J. A., 2005- Testing the k-Sb relationship at the microscale. *Minerals Engineering*, 18, p.591-598.
- Koh, P. T. L. & Schwarze, M. P., 2006- CFD modeling of bubble-particle attachments in flotation cells, *Minerals Engineering*, 19, p.619-626.
- Nguyen, A. V., Ralston, J. & Schulze, H. J., 1998- On modeling of bubble-particle attachment probability in flotation, *Minerals Engineering*, 53, p.225-249.
- Reay, D. & Ratcliff, G. A., 1973- Removal of fine particles from water by dispersed air flotation-Effects of bubble size and particle size on collision efficiency, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 51, p.178-185.
- Schulze, H. J., 1984- *Physico-chemical elementary processes in flotation*.
- Schulze, H. J., 1993- Flotation as a heterocoagulation process: Possibilities of calculating the probability of flotation. In B. Dobias (Ed.), *Coagulation and Flocculation*, New York: Dekker, p.321.
- Shahbazi, B., Rezai, B. & Koleini, S. M. J., 2008- Effect of dimensionless hydrodynamic parameters on coarse particles flotation, *Asian. J. Chem*, 3, p.2180-2188.
- Shahbazi, B., Rezai, B. & Koleini, S. M. J., 2009- The effect of hydrodynamic parameters on probability of bubble-particle collision and attachment, *Miner. Eng*, 22, p.57-63.
- Shahbazi, B., Rezai, B. & Koleini, S. M. J., 2010- Bubble-particle collision and attachment probability on fine particles flotation, *Bubble-particle collision and attachment probability on fine particles flotation, Chem. Eng. Process*, 49, p.622-627.
- Trahar, W. J., 1976- The selective flotation of galena from sphalerite with special reference to the effects of particle size, *Int. J. Miner. Process*, 3, p.151-166.
- Trahar, W. J., 1981- A rational interpretation of the role of particle size in flotation, *Int. J. Miner. Process*, 8, p.289-327.
- Wills, B. A., 1988- *Mineral processing technology*, Pergamon Press, New York 4.
- Yoon, R. H., 2000- The role of hydrodynamic and surface forces in bubble-particle interaction, *International Journal of Mineral Processing, Issues 1-4*, 58, p.129-143.
- Yordan, J. L. & Yoon, R. H., 1986- Induction time measurements for a quartz amine flotation system, 115th SME annual meeting, *Chem Techn*, p.86-105.



# The Study of Influence of Bubble Surface Area Flux on Flotation Rate Constant of Coal Particles

B. Shahbazi <sup>1\*</sup>, B. Rezai <sup>2</sup>, S. M. J. Koleini <sup>3</sup> & M. Noaparast <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D., Department of Mining Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Professor, Department of Mining & Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Mining Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

<sup>4</sup> Professor, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: 2011 August 28

Accepted: 2012 February 28

## Abstract

In this research the effect of bubble surface area flux on flotation rate constant of coal particles was investigated and the results showed that flotation rate constant increased with increasing bubble surface area flux. The obtained Maximum flotation rate constant was 3.30 /min while the particle size and bubble surface area flux were  $-37\mu\text{m}$  and 25.891/s, respectively. The bubble-particle collision, attachment and detachment efficiency were calculated in order to analyze the results. The obtained Maximum Stokes collision efficiency was 81.57% while the particle size, bubble surface area flux, and flotation rate constant were  $-500+420\mu\text{m}$ , 27.431/s, and 1.17/min, respectively. The obtained Maximum Yoon, Stokes and Potential efficiency were 94.66, 56.74 and 45.61%, respectively. Moreover, the obtained maximum detachment efficiency was 34.57% while the particle size, bubble surface area flux and flotation rate constant were  $-500+420\mu\text{m}$ , 16.771/s, and 0.85 /min. The collection efficiency increased with increasing of the bubble surface area flux. The collection efficiency was high for the particle size range of  $-106+37\mu\text{m}$  and for out of this particle size range it decreased steadily. So, the low efficiency of floating coarse particles can be attributed to the high efficiency of detachment while the low efficiency of floating of the fine particles was due to the low efficiency of collision.

**Keywords:** Flotation, Coal, Bubble Surface Area, Flotation Rate, Collision Efficiency, Attachment Efficiency, Detachment Efficiency.

For Persian Version see pages 45 to 52

\*Corresponding author: B. Shahbazi; Email: bzshahbazi@yahoo.com