



بررسی عوامل موثر بر ظرفیت حمل فلوتاسیون ستونی سولفیدهای مس در مقیاس آزمایشگاهی

مهدی ایران نژاد*، رحمان سلطان پور، فردیس نخعی

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۰ بهمن ۱۳۹۵
بازنگری: ۲ دی ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۳ دی ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۷ دی ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

ظرفیت حمل
فلوتاسیون ستونی
حباب
متغیرهای عملیاتی
مس سونگون

چکیده: ظرفیت حمل (C_a) یکی از پارامترهای لازم در طراحی و بزرگ‌مقیاس کردن ستون‌های فلوتاسیون است که بر اساس جرم جامد کنسانتره به ازای واحد زمان در واحدی از سطح مقطع ستون تعیین می‌شود. مدل‌های تخمین ظرفیت حمل حباب برای یک فرآیند فلوتاسیون، به طور معمول با استفاده از یک بیان تجربی مبتنی بر اندازه و دانسیته‌ی ذرات کانی قابل شناور با در نظر گرفتن چندین فرض در دامنه‌ی محدودی از داده‌ها حاصل می‌شود. در تعیین ظرفیت حمل بایستی تأثیر متغیرهای عملیاتی نظیر ابعاد ذرات، نرخ جامد پالپ، قطر حباب، نرخ جریان هوا، محتوای جامد پالپ، مقدار کف‌ساز و ارتفاع کف در نظر گرفته شود. در این مطالعه، تأثیر این عوامل بر ظرفیت حمل حباب‌ها در فلوتاسیون ستونی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه مورد استفاده در این مطالعه از کنسانتره مدار رافر واحد فلوتاسیون مس سونگون تهیه شد. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ جریان پالپ تا $1/4 \text{ cm/s}$ ، با راه‌یابی بیشتر ذرات جامد به ستون سطح بیشتری از حباب‌ها پوشیده شده و C_a افزایش می‌یابد ولی در نرخ‌های بالاتر ظرفیت حمل کاهش می‌یابد. در سرعت‌های پایین پالپ ورودی، افزایش میزان کف‌ساز منجر به ظرفیت حمل بالاتر شد، ولی در نرخ‌های پالپ بالاتر از $1/2 \text{ cm/s}$ ، حداکثر ظرفیت حمل ($2/54 \text{ g/min.cm}^2$) در غلظت کف‌ساز 45 ppm به دست آمد. با کاهش ارتفاع کف و افزایش درصد جامد (تا ۳۰ درصد)، C_a افزایش یافت. همچنین نتایج بررسی آزمایش‌ها با ذرات با دانه‌بندی مختلف نشان داد که پالپ ورودی با ابعاد $63-44$ میکرون از بالاترین ظرفیت حمل برخوردار است.

۱- مقدمه

فرآیند فلوتاسیون رایج‌ترین روش در جدایش کانی‌های با ارزش از باطله در فرآوری مواد معدنی است و تقریباً برای تمام کانی‌های سولفیدی، کانی‌های صنعتی و زغال‌سنگ، به کار برده می‌شود [۱]. کاربرد صنعتی سلول‌های ستونی از اوایل سال ۱۹۸۰ شروع شد و در حال حاضر به صورت یک واحد متداول در مدارهای فرآوری کانی‌های فلزی و غیرفلزی در آمده است. این ستون‌ها به دلیل هزینه‌ی سرمایه‌ای و عملیاتی پایین‌تر و توانایی تولید کنسانتره با عیار و بازیابی بالاتر در مقایسه با سلول‌های مکانیکی، به طور وسیعی در صنعت فرآوری مورد استقبال قرار گرفتند [۲]. پس از کاربرد گسترده و موفقیت‌آمیز ستون‌های فلوتاسیون در صنایع زغال، کانه‌های آهن و مس در تصفیه فاضلاب‌های صنعتی، تصفیه آب، جوهرزدایی از کاغذ و پلاستیک به کار گرفته شدند [۳-۸]. مزایای استفاده از ستون‌های فلوتاسیون توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶-۸].

به جرم جامد حمل شده به کنسانتره در واحد زمان و سطح مقطع ستون، ظرفیت حمل حباب اطلاق می‌شود که با نماد C_a نشان داده می‌شود و واحد آن g/min.cm^2 است. میزان نرخ حمل ذرات جامد توسط حباب‌ها و انتقال آن‌ها به بخش کنسانتره ستون فلوتاسیون تابع شرایط عملیاتی فرآیند است.

نرخ‌های جریان پالپ و هوای ورودی، ابعاد حباب‌ها، توزیع ابعادی پالپ، نرخ اضافه کردن مواد شیمیایی و ارتفاع کف عواملی هستند که تأثیر بارزی بر کارایی و ظرفیت حمل سلول‌های فلوتاسیون دارند [۱۷ و ۱۸].

مدل‌های مختلفی برای تخمین ظرفیت حمل توسط محققان ارائه شده است [۱۹]. مطالعات اولیه در مورد ظرفیت حمل حباب‌ها در فرآیند فلوتاسیون توسط گومز و فینچ در سال ۱۹۸۷ صورت گرفت. آن‌ها ظرفیت حمل را به صورت تابعی از دانسیته و اندازه ذرات پالپ، بیان کردند [۲۰]:

$$C_a \propto d_p \rho_p \quad (1)$$

در این رابطه d_p و ρ_p به ترتیب قطر و دانسیته ذرات جامد در کنسانتره‌ی فلوتاسیون است.

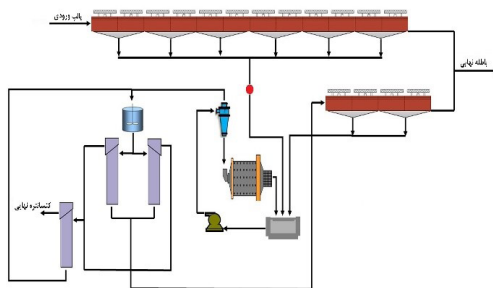
ظرفیت حمل حباب منفرد از طریق متغیرهای هندسی به صورت سطح ظاهری حباب (مستعد برای جمع‌آوری ذرات) و سطح اشغال شده توسط ذرات تعیین می‌شود. بنابراین با در نظر گرفتن این موضوع که ذرات تمام سطح ظاهری حباب را اشغال می‌کنند، میتوان C_a نظری را به صورت رابطه (۲) تعریف کرد [۲۰]:

$$C_a = (\pi d_p \rho_p J_g) / d_b \quad (2)$$

که در آن C_a ظرفیت حمل (g/s.cm^2)؛ d_p و ρ_p به ترتیب قطر (cm)

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: iranajad@aut.ac.ir

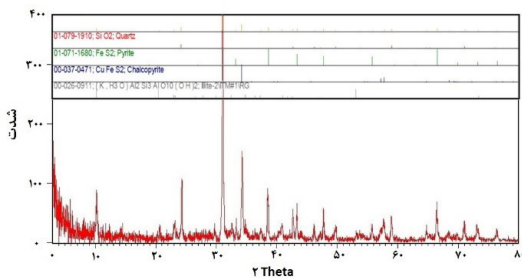
محصول مدار نرم‌کنی (سر ریز سیکلون‌های اولیه) با d_{80} حدود ۱۰۰ میکرون به مخزن آماده‌ساز منتقل و سپس به ۱۲ سلول فلوتاسیون رافر جریان می‌یابد. آهک، کلکتورهای Z_{11} (سدیم ایزوپروپیل گزنتات) و R407 (ترکیبی از مرکاپتو بنزوتیازول و دیتیوفسفات) به پالپ آسیای گلوله‌ای افزوده می‌شوند. کف‌سازهای AF65 (پروپیلن گلیکول) و MIBC (متیل ایزو بوتیل کربونیل) به مخزن آماده‌سازی اضافه می‌شود. باطله سلول‌های فلوتاسیون رافر و رمق‌گیر باطله نهایی واحد را تشکیل می‌دهند. کنسانتره‌های رافر و رمق‌گیر به خوشه‌های هیدروسیکلون انتقال می‌یابند و ته‌ریز هیدروسیکلون پس از افزودن آهک به آسیای گلوله‌ای ثانویه هدایت می‌شود. سبزیز هیدروسیکلون (با d_{80} حدود ۵۰ میکرون) به دو ستون فلوتاسیون منتقل می‌شود. کنسانتره این مرحله برای شستشوی ثانویه به یک ستون وارد می‌شوند. بدین ترتیب کنسانتره‌ی نهایی با عیار حدود ۳۰٪ مس و بازیابی ۸۵٪ تولید می‌شود.



شکل ۱. مدار فلوتاسیون واحد فرآوری مس سونگون

Fig. 1. Flotation circuit of Sungun copper concentrator plant

نتایج تحلیل دانه‌بندی نشان داد که به طور متوسط در حدود ۸۰ درصد وزنی از نمونه معرف، سهم ذرات کوچکتر از ۱۰۰ میکرون است. نتایج تحلیل فلوتورسانس اشعه ایکس (XRF) و پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه‌ی مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول ۱ و شکل ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد کالکوپیریت ($CuFeS_2$) مهمترین کانی سولفیدی با ارزش و سیلیس و پیریت اصلی‌ترین کانی‌های باطله‌ی تشکیل‌دهنده‌ی نمونه می‌باشد.



شکل ۲. تحلیل XRD نمونه مورد مطالعه

Fig. 2. XRD spectrum of mentioned sample

و دانسیته (g/cm^3) ذره؛ d_b قطر حباب (cm) و J_g سرعت ظاهری گاز است. برخی محققان، ظرفیت حمل را با استفاده از همبستگی‌های آماری و مدل‌های نیمه‌تجربی مبتنی بر روابط فیزیکی و عملی مورد مطالعه قرار دادند و رابطه خطی بین C_a و d_{80} محصول (μm) و دانسیته‌ی ذره-جامد شناور شده (g/cm^3) پیشنهاد دادند [۲۱ و ۲۲]. d_{80} برابر اندازه سرندهی است که ۸۰ درصد مواد از آن عبور می‌کنند.

$$C_a = 0.068 d_{80} \rho_p \quad (۳)$$

در تحقیقات بعدی با برازش بهتر داده‌ها، معادله تخمین C_a در ستون‌های فلوتاسیون اصلاح شد، به گونه‌ای که ضریب رابطه (۳) به ۰/۰۵ تغییر یافت [۲۳]. بنابراین پیش‌بینی ظرفیت حمل برای یک فرآیند فلوتاسیون با استفاده از یک بیان ساده ریاضی مبتنی بر ابعاد و دانسیته‌ی ذرات کانی حاصل شد. این معادله با در نظر گرفتن چندین فرض و دامنه‌ی محدودی از داده‌ها به دست آمده است که دقت آن را برای تمام مواد و شرایط عملیات محدود می‌سازد. به طور معمول این رابطه در ذرات کوچکتر از ۴۵ میکرون صدق می‌کند.

پاتواردها و هوناگر (۲۰۰۰) مدل دیگری برای تخمین ظرفیت حمل پیشنهاد دادند که شکل نهایی این مدل به صورت زیر است [۲۴]:

$$C_a = k d_{50}^a \cdot \sigma^d \cdot (n_p \cdot d_{50}^3 \cdot \rho_p) / (d_b^3) \cdot J_g \quad (۴)$$

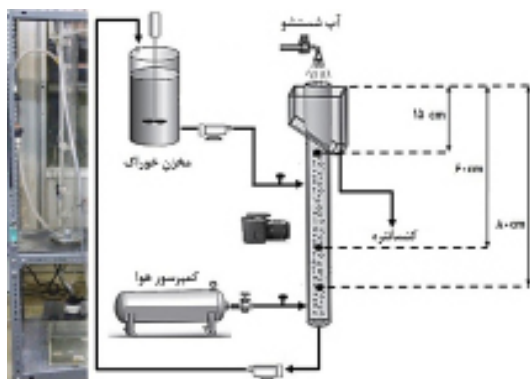
$$n_p = (2d_b) / (d_b - \sqrt{(d_b^2 - d_{50}^2)}) \quad (۵)$$

$$d_b = b_c \cdot J_g^c \quad (۶)$$

k, a, b, c, d مقادیر ثابت‌اند. متوسط ابعاد ذرات d_{50} بر حسب μm ، سرعت ظاهری گاز J_g بر حسب cm/s و دانسیته ویژه محصول ρ_p بر حسب gr/cm^3 است و C_a بر حسب ton/hm^2 به دست می‌آید. ظرفیت حمل حداکثر (C_{amax}) یک عامل مهم در پرعیارسازی با استفاده از ستون‌های فلوتاسیون است و در تعیین آن بایستی تأثیر متغیرهای عملیاتی در نظر گرفته شوند. از آنجایی که در مطالعات پیشین بیشتر به بحث تئوری و ارائه مدل یا تنها به بررسی تأثیر یک عامل پرداخته شده است، هدف این مقاله بررسی تأثیر پارامترهای حائز اهمیت فلوتاسیون ستونی نظیر محتوای جامد پالپ، نرخ جریان پالپ، غلظت کف‌ساز، نرخ جریان گاز، ارتفاع کف و ابعاد ذرات پالپ بر ظرفیت حمل حباب است.

۲- آزمایش‌ها

جهت انجام آزمایش‌های مربوطه در این تحقیق از کنسانتره سلول‌های فلوتاسیون رافر مجتمع مس سونگون نمونه‌برداری شد. بر اساس طرح معدن و برنامه تولید، کل کانه قابل استخراج برابر با ۴۰۰ میلیون تن با عیار متوسط Cu برابر ۰/۶۲٪ است [۲۵]. شکل ۱ مدار فلوتاسیون مجتمع مس سونگون و محل نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.



شکل ۳. روند آزمایش فلوتاسیون ستونی

Fig. 3. Column flotation set-up used for the experimental study

پس از ۸ دقیقه زمان آماده‌سازی و برقراری شرایط پایدار، ۳ دقیقه از جریان کنسانتره نمونه برداری شد. سپس این نمونه‌ها فیلتر، خشک و توزین شدند. باید یادآور شد که به منظور دستیابی به تأثیر هر متغیر بر C_a ، آزمایش‌ها در شرایط عملیاتی مشابه انجام گرفت. نرخ حمل در این آزمایش‌ها با استفاده از رابطه (۷) تعیین شد:

$$C_a = \frac{\text{Concentrate solid rate (g/min)}}{\text{Cross sectional area (cm}^2\text{)}} \quad (7)$$

مهمترین عوامل موثر بر ظرفیت حمل حباب شامل غلظت کف‌ساز، نرخ جریان هوا، درصد جامد پالپ، نرخ جریان پالپ، ارتفاع کف و ابعاد ذرات مورد بررسی قرار گرفتند.

شرایط اولیه فلوتاسیون ستونی به کار گرفته شده برای تمام آزمایش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. در همه آزمایش‌ها یک یا دو عامل تغییر داده شد و عوامل دیگر به طور ثابت نگه داشته شدند.

به منظور بررسی تأثیر توزیع ابعادی پالپ بر C_a ، نمونه‌هایی در هفت دامنه‌ی ابعادی (۱۵۰+ و ۱۵۰-۱۰۵، ۱۰۵-۸۸، ۸۸-۶۳، ۶۳-۴۴، ۴۴-۲۰، ۲۰-۰-۲۰ میکرون) با وزن یکسان آماده‌سازی شدند.

برای آزمایش تأثیر غلظت کف‌ساز و نرخ جریان گاز بر ظرفیت حمل حبابها، تغییرات اندازه حباب در یک سیستم دو فازی به طور مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از یک دوربین دیجیتال کانن (Canon Digital EOS 550D) مجهز به یک لنز ماکروکانن MP-E65 mm استفاده شد که این سیستم در مرکز منطقه جمع‌آوری به همراه یک منبع نوری نصب شد. اندازه‌گیری قطر حباب‌ها با استفاده از نرم‌افزار Image J انجام گرفت. ابتدا تصویر رنگی (RGB) اصلی گرفته شده از حباب‌ها به مقیاس خاکستری ۸ بیتی تبدیل شد. سپس به منظور شناسایی دقیق لبه‌ها، عملیات فیلترینگ (فیلتر متوسط) و حذف نویز بر روی تصویر انجام گرفت. در نهایت با اعمال آستانه و توابع مورفولوژیکی اقدام به تعیین ابعاد حباب‌ها شد (شکل ۴).

جدول ۱. نتایج تحلیل XRF نمونه مورد مطالعه

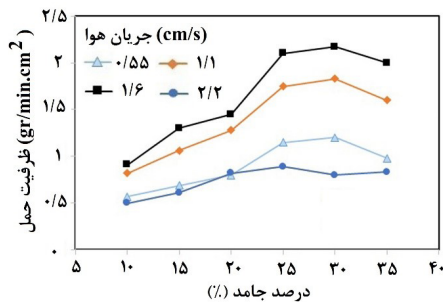
Table 1. Results of XRF spectrum of mentioned sample

عبار	ترکیب
۴/۸۳	(%) CuO
۱/۲	(%) MgO
۱۰/۸	(%) Fe ₂ O ₃
۰/۴	(%) TiO ₂
۳/۴	(%) K ₂ O
۳۲/۴	(%) SiO ₂
۱۷/۴	(%) Al ₂ O ₃
۱۵/۸	(%) SO ₃
۰/۳۶	(%) P ₂ O ₅
۰/۴۴	(%) CaO
۱۰/۸	(%) L.O.I

آزمایش‌ها در ستون فلوتاسیون آزمایشگاهی از جنس پلاکسی‌گلاس شفاف با ارتفاع ۹۰ cm و سطح مقطع ۲۸/۲۶ سانتیمتر مربع انجام شد. جهت تأمین بار اولیه از یک مخزن ۲۰ لیتری مجهز به یک همزن استفاده شد، تا ضمن آماده‌سازی از ته‌نشینی مواد جلوگیری نماید. پالپ آماده شده از طریق یک پمپ پرستالتیک به درون سلول پمپاژ شد. در این ستون برای اندازه‌گیری ماندگی گاز و ارتفاع کف از سه فشارسنج استفاده شد، به طوری که دو حسگر در ناحیه پالپ (ناحیه جمع‌آوری) و یک حسگر در ناحیه کف (ناحیه شستشو) قرار داشت. برای کنترل ارتفاع کف ستون، دور موتور پمپ باطله به صورت دستی بر اساس موقعیت سطح مشترک نسبت به مقدار مطلوب، تغییر یافت. برای اندازه‌گیری و تنظیم نرخ جریان هوا و آب شستشو از فلومتر استفاده شد.

pH پالپ در مخزن آماده ساز پالپ ورودی در طول آزمایش به طور پیوسته اندازه‌گیری شد. از اسید سولفوریک و NaOH برای تنظیم pH استفاده شد. پس از تنظیم pH و آماده‌سازی پالپ با مواد شیمیایی (۸ دقیقه)، پالپ به ستون ارسال شد. از Z_{11} و R407 به عنوان کلکتور و از MIBC به عنوان کف ساز استفاده گردید. شمای کلی روند انجام آزمایش در شکل ۳ نشان داده شده است.

به یک مقدار ثابت افزایش می‌یابد ولی در نهایت با کاهش همراه می‌شود. با افزایش درصد جامد پالپ، مقدار ذرات متصل شده به حباب‌های هوا افزایش می‌یابد، در نتیجه C_a در ابتدا روند صعودی دارد. با افزایش درصد جامد پالپ از ۲۵ درصد به ۳۰٪، C_a به دلیل اشباع حباب‌ها با ذرات پالپ، دارای یک افزایش ناچیز است. افزایش محتوای جامد و بالا رفتن ویسکوزیته‌ی پالپ، منجر به کاهش حباب‌های بالارونده شده و در نهایت مقدار C_a کاهش می‌یابد. به علاوه در درصد جامدهای بالای ۳۰، ناکافی بودن غلظت کلکتور برای پوشش سطحی کامل ذرات پالپ، می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت حمل شود.



شکل ۵. تأثیر محتوای جامد بر C_a در چهار سرعت ظاهری گاز مختلف

Fig. 5. The influence of the feed solid concentration on the carrying capacity at four different air rates

نرخ جریان گاز، از عوامل مهم در تعیین ظرفیت حمل حداکثر و همچنین عملکرد فلوتاسیون ستونی است. این عامل در سیستم‌های دو فاز (هوا-آب) و سه فاز (گاز-آب-کانی) مستقیماً بر اندازه‌ی قطر حباب و ماندگی گاز تأثیر می‌گذارد [۲۶-۲۸].

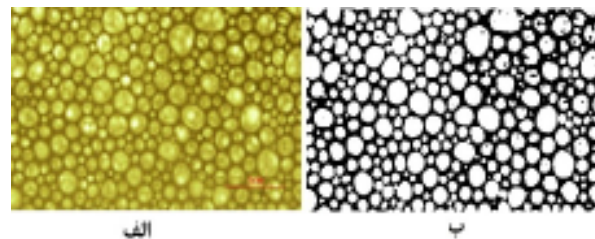
نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش نرخ جریان گاز، C_a ابتدا افزایش و سپس به شدت کاهش می‌یابد. برای مثال، در نرخ جریان گاز ۱/۶ cm/s و درصد جامد ۲۰ درصد، C_a برابر ۱/۴۵ g/min.cm² به دست آمد که با افزایش سرعت ظاهری گاز به ۲/۲ cm/s، C_a به ۰/۲۸۳ g/min.cm² تنزل یافت. برای توجیه این رویداد به بررسی تأثیر نرخ جریان هوا بر ماندگی گاز و ابعاد حباب پرداخته شد.

ماندگی گاز یکی از مهمترین عوامل برای تعیین نوع رژیم جریان ستون و ویژگی‌های هیدرودینامیکی حباب است که ارتباط اندازه حباب و سرعت گاز را به صورت ترکیبی بیان می‌کند. تغییرات میزان ماندگی گاز با افزایش سرعت ظاهری هوا در ستون مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که ماندگی گاز، با افزایش نرخ هوا تا ۱/۶ cm/s تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد ولی در نرخ‌های هوای بالاتر به دلیل تشکیل حباب‌های بزرگتر و تسریع سرعت صعود آن‌ها، ماندگی گاز کاهش یافته و جریان حبابی به مغشوش تبدیل می‌شود.

جدول ۲. شرایط عملیاتی اولیه در آزمایش‌های فلوتاسیون

Table 2. Operating conditions in flotation tests

مقدار	متغیر
۱۱/۷	pH
۴۰	غلظت کلکتور، R407، Z_{110} ، ۱:۱ (ppm)
۳۰	غلظت کف‌ساز، MIBC (ppm)
۲۰	عمق کف (cm)
۲۰	درصد جامد پالپ (%)
۱/۶	نرخ جریان هوا (cm/s)
۱/۴	نرخ جریان پالپ (cm/s)
۰/۵	نرخ جریان آب شستشو (cm/s)
۱۰۰	d_{80} (μ m)
۳/۱	دانسیته ویژه پالپ (gr/cm^3)



شکل ۴. نمونه‌ای از تصویر واقعی (الف) و باینری (ب) حباب‌ها به منظور اندازه‌گیری ابعاد حباب

Fig. 4. An example of (a) the actual image and (b) binary image to measure bubble size distribution

از قطر حباب ساتر (d_{32}) برای بیان متوسط ابعاد حباب استفاده شد. این قطر به وسیله رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (8)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر درصد جامد پالپ و نرخ جریان گاز

تأثیر درصد جامد پالپ بر ظرفیت حمل حباب‌ها، در نرخ‌های مختلف جریان گاز (۰/۵۵، ۱/۱، ۱/۶، ۲/۲ cm/s) در شکل ۵ نشان داده شده است. نرخ جریان هوا به ازای واحد سطح مقطع ستون (یعنی سرعت ظاهری گاز) گزارش می‌شود:

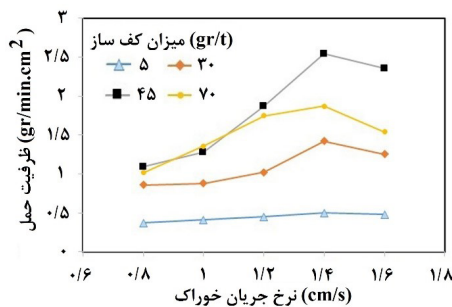
$$J_g = Q_g / A \quad (9)$$

واحد معمول برای این سرعت، cm/s است.

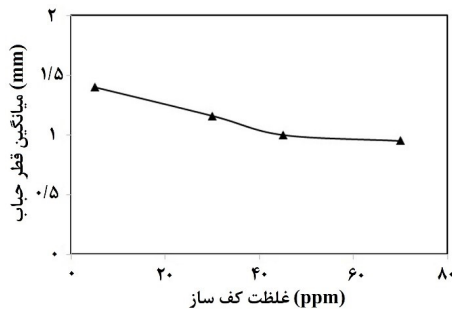
از شکل ۵ مشاهده می‌شود که C_a با افزایش درصد جامد پالپ تا رسیدن

بالارونده توجیه نمود. همچنین به دلیل جداشتن ذرات از حباب‌های با بار مازاد و سقوط آن‌ها به منطقه جمع‌آوری نرخ جامد کنسانتره کاهش می‌یابد [۲۹ و ۳۰].

از شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد که افزایش غلظت کف‌ساز، باعث افزایش C_a می‌شود. دلیل این امر کاهش اندازه حباب در حضور کف‌ساز است (شکل ۹). افزایش سطح ویژه حباب فرصت بیشتری را در اختیار ذرات قرار می‌دهد تا محلی را برای خود در سطح حباب بیابند و بدین ترتیب نرخ جامد کنسانتره بالاتری حاصل می‌شود. شکل ۹ تأثیر میزان کف‌ساز بر اندازه حباب در سیستم دو فازی را نشان می‌دهد. با افزایش میزان MIBC، قطر حباب‌ها به دلیل کاهش ائتلاف حباب‌ها با شیب تندی کاهش می‌یابد و سپس در مقدار معینی ثابت می‌مانند.

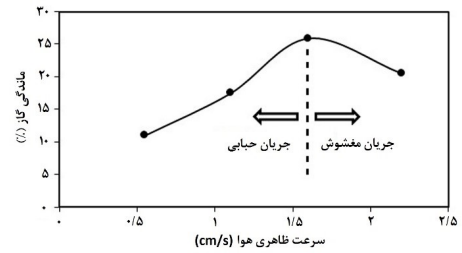


شکل ۸. تأثیر غلظت کف‌ساز و سرعت ظاهری پالپ بر C_a
 Fig. 8. Effect of frother dosage and feed rate on carrying capacity



شکل ۹. رابطه بین مقدار MIBC و قطر ساتر حباب‌ها (فاز هوا-آب)
 Fig. 9. Relationship between MIBC dosage and Sauter diameter of the bubbles (air/water phase)

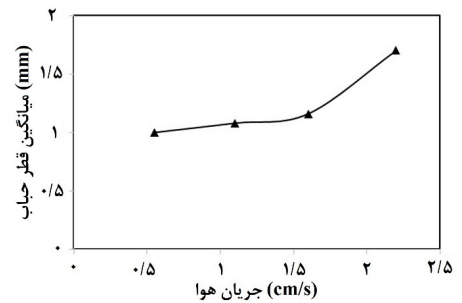
برای یک سرعت پالپ ثابت، مقدار کف‌ساز بالاتر به ظرفیت حمل بالاتر منتهی می‌شود؛ با این حال نمی‌توان این مسأله را به غلظت کف‌ساز ppm ۷۰ تعمیم داد به طوری که در نرخ‌های پالپ بالاتر از ۱/۲ cm/s حداکثر ظرفیت حمل (۲/۵۴ g/min.cm²) در غلظت کف‌ساز ۴۵ ppm به دست آمد. نکته قابل توجه ظرفیت‌های حمل برابر در نرخ‌های پالپ پایین‌تر از ۱ cm/s با مقدار کف‌ساز ۷۰ و ۴۵ ppm است.



شکل ۶. تأثیر سرعت ظاهری هوا بر روی ماندگی گاز

Fig. 6. The Influence of superficial air velocity on gas hold-up

ارتباط بین قطر حباب و نرخ جریان گاز نقش مهمی در عملکرد فرآیند فلوتاسیون دارد. نتایج تحلیل تصاویر گرفته شده نشان داد که با افزایش نرخ جریان گاز، ابعاد حباب به تدریج و با نرخ آهسته‌ای افزایش می‌یابند ولی در سرعت‌های بالا (حدود ۲ cm/s) با شیب تندی افزایش می‌یابند (شکل ۷).



شکل ۷. رابطه میان قطر حباب ساتر و نرخ جریان گاز (هوا-آب)
 Fig. 7. Relationship between Sauter bubble diameter and air flowrate (air/water phase)

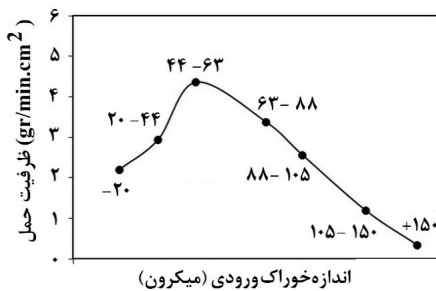
همان‌گونه که از نتایج اندازه‌گیری ماندگی گاز و ابعاد حباب مشاهده شد، در نرخ جریان گاز ۲/۲ cm/s، شرایط جریان معشوش به همراه حباب‌های بزرگتر ایجاد می‌شود که این وضعیت تأثیر منفی بر C_a دارد. نتایج نشان داد بالاترین نرخ جامد کنسانتره در نرخ جریان هوای ۱/۶ cm/s و محتوای جامد ۳۰ - ۲۵ درصد به دست می‌آید.

۳-۲- تأثیر نرخ جریان پالپ و مقدار کف‌ساز

نتایج تأثیر نرخ‌های مختلف جریان پالپ ستون فلوتاسیون (۱/۶ cm/s و ۱/۴، ۱/۲، ۱، ۰/۸) بر ظرفیت حمل حباب‌ها در چهار غلظت کف‌ساز (۵، ۳۰، ۴۵ و ۷۰ ppm) در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت پالپ تا ۱/۴ cm/s، C_a افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. روند تأثیر تغییرات نرخ جریان پالپ بر ظرفیت حمل ذرات مشابه درصد جامد پالپ است. با افزایش سرعت پالپ ورودی ذرات جامد بیشتری وارد ستون می‌شوند و با پوشش بیشتر سطح حباب، C_a افزایش می‌یابد. کاهش ظرفیت حمل در نرخ پالپ برابر با ۱/۶ cm/s را می‌توان با کاهش سرعت حباب‌های

ذرات بزرگتر از $10.5 \mu\text{m}$ به شدت کاهش می‌یابد. این ذرات به دلیل جرم بالا، سبب گسیختگی فیلم نازک حباب‌ها و در نتیجه انهدام و ناپایداری حباب می‌شوند و ذرات درشت جدا شده از فاز کف در نتیجه زه‌کشی به فاز پالپ باز می‌گردند.

نکته قابل توجه کاهش ظرفیت حمل در پالپ با ذرات بسیار ریز (μm ۲۰-) است. در حالی که ذرات ریز پایداری حباب‌ها را افزایش می‌دهند، ذرات بسیار ریز (μm ۲۰-) سبب ناپایداری کف شده و بر روی میزان جامد انتقال یافته به کنسانتره تأثیر منفی دارد. همچنین بخشی از کاهش ظرفیت حمل می‌تواند به جرم کم این ذرات مربوط باشد.



شکل ۱۱. رابطه بین ابعاد ذرات و C_a

Fig. 11. Relationship between particle size and carrying capacity

۴- نتیجه‌گیری

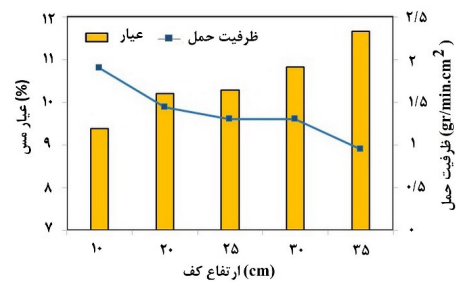
ظرفیت حمل یکی از شاخص‌های مهم در طراحی و بزرگ مقیاس کردن ستون‌های فلوتاسیون است. این مطالعه با هدف ارزیابی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر ظرفیت حمل حباب‌ها (C_a) در فلوتاسیون ستونی کانی‌های مس انجام شد. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

۱. نرخ پالپ ورودی، نرخ کف‌ساز، درصد جامد پالپ، نرخ جریان هوا، ابعاد ذرات و ارتفاع کف ظرفیت حمل را مستقیماً تحت تأثیر قرار می‌دهند.
۲. نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون در ابعاد مختلف پالپ نشان داد که بالاترین میزان ظرفیت حمل در فلوتاسیون با ذرات با اندازه ۶۳-۴۴ میکرون حاصل شد.
۳. در سرعت‌های پایین پالپ ورودی، افزایش میزان کف‌ساز منجر به ظرفیت حمل بالاتر شد، ولی در نرخ‌های پالپ بالاتر از $1/2 \text{ cm/s}$ ، حداکثر ظرفیت حمل ($2/54 \text{ g}/\text{min}\cdot\text{cm}^2$) در غلظت کف‌ساز 45 ppm به دست آمد که این مقدار برای کف‌ساز 70 ppm برابر $1/87 \text{ g}/\text{min}\cdot\text{cm}^2$ بود.
۴. با افزایش نرخ جریان پالپ تا $1/4 \text{ cm/s}$ ، با راه‌یابی ذرات جامد بیشتر به ستون سطح بیشتری از حباب‌ها پوشیده شده و بنابراین C_a افزایش یافت. کاهش ظرفیت حمل در نرخ پالپ بالاتر از

زمانی که بار مازاد حباب رخ می‌دهد (مانند دانسیته پالپ بالا و نرخ جریان بالا)، یک کاهش در اندازه حباب که از غلظت بالای کف‌ساز (مانند 70 ppm) ناشی می‌شود، یک تأثیر منفی بر بازیابی جامد در پی دارد. در غیاب پدیده بار مازاد، یک کاهش در ابعاد حباب باعث بهبود بازیابی ذرات جامد می‌شود.

۳-۳- تأثیر عمق کف

تأثیر ارتفاع کف ستون فلوتاسیون بر C_a در شکل ۱۰ نشان داده شده است. میزان C_a با افزایش ارتفاع کف کاهش می‌یابد. این کاهش در ارتفاع کف برابر با 35 cm ، بارزتر بود. این مسئله را میتوان با افزایش تأثیر آب شستشو در اثر زیاد شدن ارتفاع کف و همچنین افزایش زمان ماند ذرات در فاز کف توجیه نمود. از شکل ۱۰ مشاهده میشود که عیار مس کنسانتره با افزایش ارتفاع کف افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش زمان ماند ذرات در فاز کف، دنباله‌روی و گیرافتادگی ذرات کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰. تأثیر عمق کف بر C_a و عیار مس کنسانتره

Fig. 10. Effect of froth height on carrying capacity and copper grade

۳-۴- تأثیر اندازه ذرات

ابعاد ذرات پالپ ورودی یکی از مهم‌ترین عوامل در فرآیند فلوتاسیون است، به طوری که در یک محدوده‌ی ابعادی بهینه (معمولاً $100-300$ میکرون) بالاترین کارایی فرآیند حاصل می‌شود [۳۱]. برای مطالعه تأثیر ابعاد پالپ بر ظرفیت حمل حباب‌ها، هفت محدوده ابعادی به طور مجزا مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که به طور کلی ظرفیت حمل ذرات ریز بیشتر از ذرات درشت است، به طوری که بالاترین میزان ظرفیت حمل در زمان استفاده از ذرات با ابعاد ۶۳-۴۴ میکرون ($4/4 \text{ g}/\text{min}\cdot\text{cm}^2$) حاصل شد (شکل ۱۱). با توجه به اینکه ذرات با ابعاد $20-44 \mu\text{m}$ میکرون به راحتی سطح حباب را اشغال می‌کنند، میزان C_a در ذرات ۶۳-۴۴ و $88-63$ میکرون بالاتر بود، زیرا حتی اگر کل سطح حباب اشغال نشده باشد، ممکن است مقدار کمتری از ذرات درشت در مقایسه با ذرات ریز جرم بزرگتری داشته باشند.

از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که ظرفیت حمل در عملیات فلوتاسیون با

- [8] T. P. Meloy, Analysis and optimization of mineral processing and coal cleaning circuit- circuit analysis. *International Journal of Mineral Processing*, 10 (1), (1983): 61-80.
- [9] R. Amelunxen, The mechanics of operation of column flotation machines. *Proceedings of 17th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors; CIM, Ottawa*, (1985), 13-18
- [10] T. F. Al-Fariss, K. A. El-Nagdy, F. A. Abd El-Aleem, A. A. El-Midany, Column versus mechanical flotation for calcareous phosphate fines upgrading. *Particulate Science and Technology*, 31 (5), (2013): 488-493
- [11] K. N. Subramanian, D. E. G. Lonnelly, K. Y., Wong, Commercialization of a column flotation circuit for gold sulphide ore. *Society of Mining Engineers, Littleton, Colorado*, (1988): 13-18
- [12] S. Dey, S. Pani, R. Singh, G. M. Paul, Response of process parameters for processing of iron ore slime using column flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 140, (2015): 58-65
- [13] D. Tao, G. H. Luttrell, R. H. Yoon, A parametric study of froth stability and its effect on column flotation of fine particles. *International Journal of Mineral Processing*, 59, (2000): 25-43.
- [14] P. S. R. Reddy, S. G. Kumar, K. K. Bhattacharyya, S. R. S. Sastri, K. S. Narasimhan, Flotation column for fine coal beneficiation. *International Journal of Mineral Processing*, 24, (1988): 161-172
- [15] J. A. Finch, G. S. Dobby, *Column Flotation*, Vol. 180. Pergamon Press, Oxford, 1990.
- [16] S. T. Hall, The treatment of industrial minerals by column flotation. *Indian Mineral Processing Supply* (1990): 30-36.
- [17] A. Uribe-Salas, R. Pérez-Garibay, F. Nava-Alonso, Operating parameters that affect the carrying capacity of column flotation of a zinc sulfide mineral. *Mineral Engineering*, 20 (7), (2007): 710-715.
- [18] V. Martinez-Gomez, R. Pérez-Garibay, J. Rubio, Factors involving the solids-carrying flotation capacity of microbubbles. *Minerals Engineering*, 53, (2013): 160-166.
- [19] J. B. Yianatos, F. A. Contreras, On the Carrying capacity limitation in large flotation cells. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 49 (4), (2010): 345-352
- [20] R. P. King, T. A. Hatton, D. G. Hulbert, Bubble loading during flotation. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, (1974):112-115

۱/۴ cm/s را می‌توان از طریق کاهش سرعت بالاروی حباب‌های با بار مازاد و جدا شدن ذرات از حباب‌ها و سقوط آن‌ها به منطقه جمع‌آوری توجیه نمود.

۵. مقدار C_a با کاهش ارتفاع کف ستون، افزایش یافت. این مسأله را می‌توان با کاهش تأثیر آب شستشو در اثر کم‌شدن ارتفاع کف و همچنین کاهش زمان ماند ذرات در فاز کف توجیه نمود.

۶. مقدار C_a با افزایش درصد جامد پالپ (۳۰ درصد) افزایش و پس از آن کاهش یافت.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت ملی صنایع مس ایران، به ویژه مجتمع مس سونگون که در انجام تحقیق حاضر همکاری بی‌شائبه داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- [1] A. Azizi, A study on the modified flotation parameters and selectivity index in copper flotation. *Particulate Science and Technology*, 35 (1), (2017): 38-44
- [2] Y. Liao, J. Liu, Y. Wang, Y. Cao, Simulating a fuzzy level controller for flotation columns. *Mining Science and Technology*, 21, (2011): 815-818
- [3] H. A. M. Ahmed, G. M. A. Mahran, Processing of iron ore fines from Alswaween Kingdom of Saudi Arabia. *Physicochemical problems of mineral processing*, 49 (2), (2013): 419-430
- [4] M. S. Jena, S. K. Biswal, S. P. Das, and P. S. R. Reddy, Comparative study of the performance of conventional and column flotation when treating coking coal fines. *Fuel Processing Technology*, 89, (2008): 1409-1415
- [5] H. Hacifazlioglu, Recovery of coal from cyclone overflow waste coals by using a combination of jameson and column flotation, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 33, (2011): 2044-2057.
- [6] O. Dalahmetoglu, M. Kemal, Optimisation of enrichment conditions of Zonguldak hardcoal with column flotation.; In: Kemal, Arslan, Akar & Canbazoglu (eds.) *Changing Scopes in Mineral Processing*, Balkema, Rotterdam, (1996): 355-360
- [7] T. C. Eisele, S. K. Kawatra, Stabilization of flotation column performance by horizontal baffle columns. *Minerals & Metallurgical Processing*, 24 (2), (2007): 61-66.

- [26] U. P. Veera, K. L. Kataria, J. B. Joshi, Effect of superficial gas velocity on gas holdup profiles in foaming liquids in bubble column reactors. *Chemical engineering journal*, 99, (2004): 53–58.
- [27] J. A. Finch, J. Xiao, C. Hardie, C. O. Gomez, Gas Dispersion Properties: Bubble Surface Area Flux and Gas Holdup, *Minerals Engineering*, 13 (4), (2000): 365-372.
- [28] R. Pérez-Garibay, E. Martínez-Ramos, J. Rubio, Gas dispersion measurements in microbubble flotation systems. *Minerals Engineering*, 26 (15), (2012): 34–40.
- [29] R. Pérez Garibay, A. P. M. Gallegos, S. A. Uribe, A. F. Nava, Effect of collection zone height and operating variables on recovery of overload flotation columns. *Minerals Engineering*, 15, (2002): 325-331
- [30] H. Kursun, Determination of carrying capacity using talc in column flotation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 36, (2011): 703-711
- [31] R. M. Rahman, S. Ata, G. J. Jameson, The effect of flotation variables on the recovery of different particle size fractions in the froth and the pulp. *International Journal of Mineral Processing*, 106-109, (2012): 70–77
- [21] P. M. Gallegos-Acevedo, R. Pérez-Garibay, A. Uribe-Salas, Maximum bubble loads: experimental measurements vs. analytical estimation. *Minerals Engineering*, 19, (2006):12-18
- [22] R. Espinosa-Gomez, J. A. Finch, J. B. Yianatos, G. S. Dobby, Column carrying capacity: particle size and density effects. *Minerals Engineering*, 1 (1), (1998): 77-79.
- [23] K. V. S. Sastri, Technical note: Carrying capacity in flotation columns. *Minerals Engineering*, 9 (4), (1996): 465-468.
- [24] A. Patwardhan, R Q. Honaker, Development of a carrying-capacity model for column froth flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 59, (2000): 275–293.
- [25] Y. Vazifeh, E. Jorjani, A. Bagherian, Optimization of reagent dosages for copper flotation using statistical technique, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, (2010): 2371-2378.

Please cite this article using:

M. Irannajad, R. Soltanpour, F. Nakhaei, Evaluation of factors affecting carrying capacity of laboratory flotation column treating copper sulfides, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(4) (2019) 725-732.

DOI: 10.22060/ceej.2018.12464.5218

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

