

اثر آهنگ هوادهی و عمق کف بر کارآیی فلوتاسیون در سلول‌های خودهواده صنعتی

هادی نقوی^۱، علی دهقانی^{۲*}، محسن کریمی^۳

- ۱- دانشجوی دکتری، فراوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد
- ۲- دانشیار، فراوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد
- ۳- هیات علمی پژوهشی، بخش شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه چالمرز، گوتنبرگ، سوئد

(دریافت ۱۳۹۷/۰۶/۲۶، پذیرش ۱۳۹۷/۰۷/۱۷)

چکیده

بازیابی کلی سلول فلوتاسیون به بازیابی ناحیه پالپ و ناحیه کف بستگی دارد. از جمله عوامل اثرگذار بر بازیابی ناحیه کف، زمان ماند کف است که رابطه عکس با بازیابی کف و بازیابی کلی فلوتاسیون دارد. از سوی دیگر زمان ماند کف به آهنگ هوادهی سلول فلوتاسیون و عمق کف وابسته است. آهنگ هوادهی در سلول‌های هوادهی شده، پارامتری مستقل است اما در سلول‌های خودهواده به متغیرهای مختلفی از جمله عمق کف بستگی دارد، بنابراین تنظیم آن پیچیده‌تر و دشوارتر از سلول‌های هوادهی شده است. از اینرو در این تحقیق تلاش شده است تا تاثیر عمق کف و آهنگ هوادهی بر سرعت ظاهری گاز، زمان ماند کف و کارآیی متالورژیکی سلول فلوتاسیون (بازیابی جرمی کنسانتره و نسبت غنی‌شدگی) بررسی شود. با آشکار شدن ارتباط بین این پارامترها و محدودیت‌های تنظیم عمق کف و آهنگ هوادهی، دانش بیشتر با هدف بهره‌برداری مناسب‌تر از این نوع سلول‌ها فراهم می‌شود. آزمایش‌ها در یک سلول فلوتاسیون خودهواده ۵۰ متر مکعبی در کارخانه کنسانتره شماره ۶ سنگ آهن گل گهر سیرجان انجام شد. نتایج نشان داد که تغییرات عمق کف اگر چه سبب تغییر آهنگ هوادهی شد اما تغییرات آهنگ هوادهی اثر قابل ملاحظه‌ای بر زمان ماند کف و در نتیجه کارآیی متالورژیکی سلول فلوتاسیون نداشت. همچنین در این نوع سلول‌ها، عمق کف گزینه مناسبی برای تغییر آهنگ هوادهی و سرعت ظاهری گاز نیست زیرا محدوده تغییرات سرعت ظاهری گاز با تغییرات عمق کف در مقیاس صنعتی، کم بود.

کلمات کلیدی

سلول فلوتاسیون خودهواده، عمق کف، آهنگ هوادهی، سرعت ظاهری گاز، زمان ماند کف.

۱- مقدمه

فلوتاسیون یکی از فرآیندهای مهم پرعیارسازی مواد معدنی است که از ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی سطح ذرات برای جدایش کانی‌های با ارزش از باطله استفاده می‌کند. هر سلول فلوتاسیون به دو ناحیه مجزا تقسیم می‌شود: ناحیه پالپ و ناحیه کف. ناحیه پالپ محلی برای برخورد و اتصال حباب-ذره است در حالی که ناحیه کف نقش مهمی در افزایش عیار کنسانتره بازی می‌کند [۱]. بر این اساس بازیابی کلی فلوتاسیون بدین صورت بیان می‌شود [۲]:

$$R = \frac{R_c R_f}{1 - R_c(1 - R_f)} \quad (1)$$

که در آن:

R: بازیابی کلی فلوتاسیون

R_c : بازیابی ناحیه پالپ

R_f : بازیابی ناحیه کف است [۲].

همانطور که ملاحظه می‌شود بازیابی کف تاثیر زیادی بر بازیابی کلی فلوتاسیون دارد و تا ۵۰٪ کارایی کلی یک سلول فلوتاسیون ممکن است به دلیل کارایی ضعیف ناحیه کف از دست برود [۳].

بین ثابت آهنگ کلی فلوتاسیون و بازیابی کف رابطه خطی مستقیم وجود دارد و از سوی دیگر بازیابی کف نیز با عمق کف و زمان ماند کف رابطه خطی معکوس دارد [۴-۶]. زمان ماند کف عبارت است از:

$$\tau_f = \frac{h}{J_g} \quad (2)$$

که در آن:

τ_f : زمان ماند کف (ثانیه، s)

h: عمق کف (cm)

J_g : سرعت ظاهری گاز (cm/s) می‌باشند [۷، ۴]. سرعت ظاهری گاز مقیاسی از قابلیت هوادهی سلول است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J_g = \frac{Q_g}{A} \quad (3)$$

که در آن:

Q_g : دبی حجمی هوای ورودی به سلول

A: سطح مقطع عرضی سلول در سطح مشترک پالپ-کف

است [۸].

بر اساس معادله‌های ۲ و ۳ می‌توان گفت هر عاملی که بر آهنگ هوادهی، سطح مقطع عرضی سلول یا عمق کف تاثیر گذار باشد، بر زمان ماند کف نیز تاثیر گذار است.

با تغییر آهنگ هوای ورودی به سلول فلوتاسیون، هم در شرایط پالپ (از قبیل اندازه حباب و بارگیری ذرات بر روی حباب‌ها) و هم در فاز کف (برای مثال دنباله روی آب و زمان ماند کف) تغییرات رخ می‌دهد [۹]. افزایش آهنگ هوادهی اثر مثبت بر بازیابی دو ناحیه پالپ و کف و آهنگ سینتیک کلی فلوتاسیون دارد [۸، ۱]. کاهش زمان ماند کف (به دلیل افزایش آهنگ هوادهی یا کاهش عمق کف) موجب کاهش به هم پیوستن (coalescence) حباب‌ها و افزایش سرعت جریان کف شده و به تخلیه آن کمک می‌کند. که در نتیجه با افزایش دنباله روی ذرات گانگ و افزایش بازیابی ذرات کم عیار، بازیابی کف و بازیابی کلی فلوتاسیون افزایش و عیار کنسانتره کاهش می‌یابد [۹، ۷].

به هم پیوستن حباب‌ها یکی از پدیده‌های مهم کف است که سبب جدا شدن ذرات از حباب‌ها در ناحیه کف می‌شود [۱]. اگر آهنگ به هم پیوستن حباب‌ها افزایش یابد، تعداد ذراتی که از فاز کف از دست می‌روند و به ناحیه پالپ باز می‌گردند، بیشتر شده و بازیابی کف و بازیابی کلی فلوتاسیون کاهش می‌یابد [۳].

دنباله‌روی پدیده‌ای است که به موجب آن ذرات ریز (معمولا کوچکتر از ۵۰ میکرون) بدون اتصال به حباب‌های هوا از ناحیه پالپ وارد فاز کف می‌شوند و به صورت معلق در آب بین حباب‌ها به سمت بالا و بیرون از سلول انتقال می‌یابند. این پدیده همیشه برای کارایی فلوتاسیون، زیان بخش است زیرا منجر به کاهش عیار کنسانتره می‌شود [۱۰].

افزایش آهنگ هوادهی، دنباله روی را به دلیل افزایش آب راه یافته به کنسانتره افزایش می‌دهد در حالی که افزایش عمق کف دنباله روی را به عنوان نتیجه‌ای از زمان ماند بالاتر کف و زهکشی بیشتر ذرات آبدوست کاهش می‌دهد [۱۱].

اخیرا Rahman و همکاران (۲۰۱۵) مشاهده کردند که با افزایش J_g ، عیار کنسانتره کاهش یافت در حالی که افزایش عمق کف منجر به عیار بالاتر کنسانتره شد که نشان می‌دهد با افزایش عمق کف، غنی‌شدگی بیشتر کانی با ارزش ممکن است حاصل شود، در حالی که افزایش J_g به جمع‌آوری کانی نسبتا کم عیار در کنسانتره کمک می‌کند [۱].

تنظیمات لازم بهره‌برداری در مرحله رافر یا رمق‌گیری است. اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی تاثیر آهنگ هوادهی و عمق کف بر کارایی فلوتاسیون و پارامترهای دیگر، در سلول‌های فلوتاسیون هوادهی شده یا ستون‌های فلوتاسیون بوده است [۵، ۹، ۱۱، ۱۸، ۱۹]. از اینرو به نظر می‌رسد نیاز به مطالعاتی که چگونگی تاثیر عمق کف و آهنگ هوادهی بر بهبود کارایی سلول خودهواده را نشان دهد، ضروری است. بنابراین، در این تحقیق تلاش شد با تمرکز بر پارامتر عمق کف (به عنوان متغیر قابل کنترل) و متغیر وابسته به آن (یعنی آهنگ هوادهی)، تاثیرات آن‌ها بر سرعت ظاهری گاز، زمان ماند کف، توان‌کشی سلول و کارایی متالورژیکی یک سلول خودهواده صنعتی مورد بحث و بررسی قرار گیرد تا با آشکار شدن ویژگی‌ها و محدودیت‌های این متغیرهای کلیدی، امکان استفاده از آن‌ها به عنوان ابزاری برای دستیابی به کارایی متالورژیکی مطلوب فراهم آید.

۲- روش تحقیق

این مطالعه در اولین سلول از بانک فلوتاسیون کارخانه کنسانتره شماره ۶ گل‌گهر سیرجان انجام شد. در این کارخانه، کنسانتره سنگ آهن با ابعاد ۸۰٪ زیر ۱۰۰ میکرون برای گوگردزایی وارد مدار فلوتاسیون (متشکل از چهار سلول $50 m^3$ خودهواده) می‌شد که با استفاده از PAX و MIBC به عنوان کلکتور و کف‌ساز و انجام فلوتاسیون معکوس (شناورسازی پیریت به عنوان کانی اصلی حاوی گوگرد) کنسانتره‌ای با گوگرد مجاز (کمتر از ۰٫۷ درصد) به دست می‌آید.

در این بررسی، عمق کف با استفاده از کنترلر عمق کف، تغییر داده شد و پارامترهایی از قبیل آهنگ هوای مکش شده به داخل سلول (آهنگ هوادهی)، زمان ماند کف، سرعت ظاهری گاز، توان‌کشی سلول و معیارهای متالورژیکی اندازه‌گیری یا محاسبه شدند.

همه آزمایش‌ها در دو شیفت کاری متوالی انجام شد تا تغییرات کیفیت خوراک حداقل باشد در حالی که آهنگ خوراک‌دهی، درصد جامد خوراک فلوتاسیون و مقدار مواد شیمیایی (کلکتور و کف‌ساز) در طول آزمایش‌ها ثابت نگه داشته شد.

۲-۱- سلول فلوتاسیون صنعتی

شکل ۱ شماتیک سلول فلوتاسیون خودهواده (با ارتفاع

در سال‌های اخیر با پیش عیار کنسانتره و باطله فلوتاسیون یا با استفاده از کنترلرهای بازیابی جرمی نصب شده در بانک‌های فلوتاسیون، آهنگ هوادهی و عمق کف را به شکلی تغییر می‌دهند تا کارایی مطلوب متالورژیکی حاصل شود [۵، ۱۲].

سلول‌های مکانیکی فلوتاسیون به دو دسته تقسیم می‌شوند: سلول‌های خودهواده و سلول‌های هوادهی شده. علاوه بر برخی تفاوت‌های هندسی میان این دو سلول (از قبیل شکل ایمپلر و محل قرارگیری آن در سلول) تفاوت مهم دیگر آن‌ها در نحوه هوادهی به سلول است. به طوری که در سلول‌های هوادهی شده، هوا از طریق یک کمپرسور به سلول دمیده می‌شود و به آسانی قابل تنظیم است اما در سلول‌های خودهواده، هیچ دمنده‌ای وجود ندارد و سلول براساس مکانیزم خاص طراحی آن و با کمک چرخش ایمپلر، هوا را از محیط اطراف به داخل سلول مکش می‌کند.

برخلاف سلول‌های هوادهی شده که در آن آهنگ هوادهی، پارامتری مستقل است در سلول‌های خودهواده آهنگ هوادهی یک متغیر وابسته است که به پارامترهای عملیاتی (مانند سرعت ایمپلر و عمق کف)، خصوصیات پالپ (مانند درصد جامد و ویسکوزیته پالپ) و مواد شیمیایی اضافه شده به سلول فلوتاسیون (مانند نوع و غلظت کف‌ساز) بستگی دارد. به طوری که با افزایش سرعت ایمپلر، عمق کف یا غلظت کف‌ساز و کاهش دانسیته پالپ، دبی هوای مکش شده افزایش می‌یابد [۱۵-۱۳]. زیرا سرعت بیشتر ایمپلر موجب افزایش ظرفیت مکش هوا می‌شود [۱۶] و افزایش عمق کف یا کاهش دانسیته پالپ نیز با کاهش فشار تخلیه در محل ورود هوا سبب افزایش آهنگ هوادهی می‌شوند. همچنین افزایش غلظت کف‌ساز با کاهش اندازه حباب‌ها و در نتیجه کاهش سرعت صعود آن‌ها و افزایش ماندگی گاز در فاز پالپ موجب کاهش دانسیته پالپ و از اینرو کاهش فشار تخلیه در محل ورود هوا و در نتیجه افزایش ظرفیت مکش هوا می‌شود [۱۵].

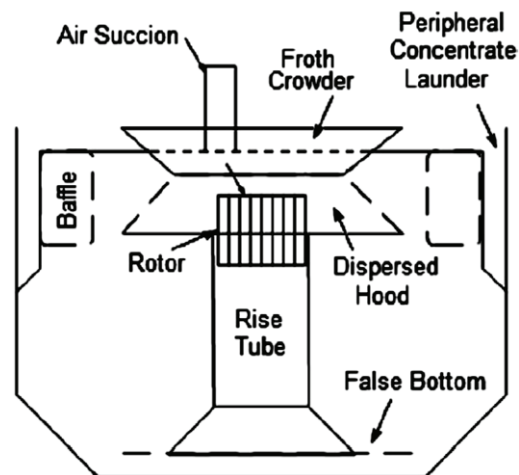
در سلول‌های خودهواده وابستگی آهنگ هوادهی به متغیرهای دیگر سبب شده است که تنظیم آن، پیچیده‌تر و دشوارتر از سلول‌های هوادهی شده باشد. به عنوان مثال اگر هدف از فلوتاسیون دستیابی به بازیابی بالا باشد (یعنی سلول فلوتاسیون در مرحله رافر یا رمق‌گیری مورد بهره‌برداری قرار گیرد) لازم است که سلول در عمق کف کم و آهنگ هوادهی بالا کار کند [۱۶، ۱۷] اما در سلول‌های خودهواده با کاهش عمق کف، آهنگ هوادهی کاهش می‌یابد. که این خلاف

نحوه عملکرد سیستم کنترل عمق کف (یا سطح پالپ) سلول فلوتاسیون به این صورت بود که یک شناور کروی (با دانسیته‌ای کمتر از دانسیته پالپ اما بیشتر از دانسیته فاز کف) در سطح مشترک پالپ-کف قرار داشت. یک صفحه فلزی دایره‌ای شکل با کمک میله‌ای به بالای این شناور متصل بود. این صفحه فلزی بیرون از سلول قرار داشت و با حرکت عمودی شناور (ناشی از تغییر سطح مشترک پالپ-کف)، جابه‌جا می‌شد. در بالای این صفحه فلزی یک سنسور التراسونیک قرار داشت که با ارسال امواج فراصوت به این صفحه فلزی و سپس دریافت موج منعکس شده از آن، موقعیت شناور را با ارسال سیگنالی به کنترلر عمق کف منتقل می‌کرد. کنترلر، موقعیت فعلی شناور (که بیان کننده عمق کف بود) را با مقدار نقطه تنظیم (Set Point) عمق کف (که توسط اپراتور مشخص شده بود) مقایسه کرده و سپس بر اساس اختلاف مثبت یا منفی بین آن‌ها، میزان باز بودن شیرهای نیزه‌ای (Dart Valve) پنوماتیکی قرار گرفته در کف سلول فلوتاسیون را تنظیم می‌کرد تا با کنترل دبی خروجی از سلول، عمق کف به Set Point نزدیک و در آن نقطه ثابت نگه داشته شود.

برای تغییر عمق کف، توسط اپراتور Set Point جدید به کنترلر داده شد. پس از آن سیستم کنترلی بر اساس اختلاف Set Point جدید و مقدار فعلی عمق کف، میزان باز بودن شیرهای نیزه‌ای را تغییر داد تا در نهایت عمق کف به مقدار تنظیم شده جدید منطبق شد. برای اطمینان از اینکه مقادیر عمق کف نشان داده شده در کنترلر، مقادیر واقعی عمق کفاند، شناور دیگری (با دانسیته مشابه با شناور اصلی سیستم کنترلی) که به یک سر آن خط کش فلزی متصل شده بود در درون سلول فلوتاسیون قرار گرفت. با مقایسه عمق کف قرائت شده با این شناور و مقدار نمایش داده شده توسط کنترلر مشخص شد که کنترلر عمق کف، مقادیر عمق کف را با دقت بالایی اندازه‌گیری و نمایش می‌دهد.

تغییرات عمق کف در بازه‌های ۱۰ سانتی‌متری انتخاب شد با حداقل و حداکثر عمق ۲۰ و ۷۰ سانتی‌متر. زیرا مشاهده شد که در مقادیر عمق کف کمتر از ۲۰ cm، فاز کف آشفته و ناپایدار بوده و به همراه کف مقادیر زیادی پالپ از سلول سرریز شده و به محصول کف راه پیدا می‌کند و در مقادیر عمق کف بیش از ۷۰ cm نیز هیچ جریانی از لبه سلول سرریز نمی‌شود.

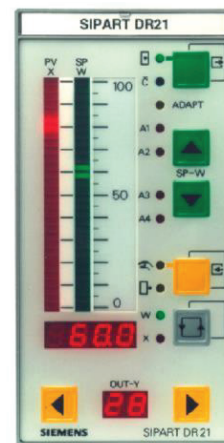
۳/۶ m و قطر ۴/۸ m) که آزمایش‌ها در آن انجام شد را نشان می‌دهد. این سلول دارای یک لاندرد محیطی و شش لاندرد شعاعی برای افزایش طول لبه سرریز بود. همچنین در بالای آن یک هدایت کننده کف (Froth Crowder) قرار داشت که امروزه از آن در سلول‌های مکانیکی بزرگ برای کاهش زمان ماند کف، بهبود انتقال کف و در نتیجه افزایش بازیابی کف استفاده می‌کنند [۲۰، ۲۱].



شکل ۱: شماتیک سلول فلوتاسیون خودهواده

۲-۲- تغییر عمق کف

تغییر عمق کف در سلول فلوتاسیون تحت بررسی با استفاده از کنترلر عمق کف (شکل ۲) که در کنار سلول قرار داشت انجام گرفت. این کنترلر حداکثر بازه تغییر عمق کف (۸۰-۰) را به صورت درصد یا سانتی‌متر نمایش می‌داد.



شکل ۲: کنترلر سطح پالپ سلول فلوتاسیون

۳-۲- اندازه‌گیری آهنگ هوادهی

در سلول‌های خودهواده، برخلاف سلول‌های هوادهی شده، معمولاً دبی هوای مکش شده اندازه‌گیری نمی‌شود و مقدار آن به هنگام بهره‌برداری، نامعلوم است. از آنجایی که در این تحقیق، لوله مکش هوای ورودی با قطر ۲۵ و طول ۷۳ cm بود (شکل ۳) عملاً امکان نصب هیچ گونه فلومتری برای اندازه‌گیری دبی هوا وجود نداشت. از اینرو سرعت هوا در این لوله با استفاده از یک سرعت‌سنج هوا (Anemometer) مدل TES 1341 (شکل ۴) با دقت ۰/۱ m/s اندازه‌گیری و سپس بر اساس سطح مقطع لوله ورودی هوا، آهنگ هوادهی محاسبه شد. این روش توسط برخی از محققین در سلول‌های خودهواده صنعتی استفاده و دقت آن در تعیین آهنگ هوادهی مناسب ارزیابی شده بود [۲۳، ۲۲، ۲].



شکل ۳: لوله ورودی هوا در بالای سلول فلوتاسیون

۴-۲- محاسبه سرعت ظاهری گاز

با توجه به شکل مخروطی Froth Crowder قرار گرفته در بالای سلول فلوتاسیون، سطح مقطع عرضی موثر سلول در سطح مشترک پالپ-کف در هر عمقی از کف، متغیر است و برای محاسبه آن باید به مشخصات هندسی سلول و Froth Crowder توجه کرد.

در این تحقیق در زمانی که سلول خاموش و خالی از مواد بود، در فواصل عمودی مختلف از لبه سلول، فاصله افقی بین دیواره سلول فلوتاسیون با بدنه Froth Crowder اندازه‌گیری شد و با کم کردن این فاصله از شعاع سلول (۲/۴ متر)، شعاع فضای اشغال شده به وسیله Froth Crowder در آن عمق به دست آمد. سپس در هر آزمایش، سطح مقطع موثر سلول با کسر مساحت دایره‌ای به قطر Froth Crowder (در عمق مورد بررسی) از مساحت دایره‌ای به قطر سلول فلوتاسیون به دست آمد.

با محاسبه سطح مقطع موثر سلول در فصل مشترک پالپ-کف و همچنین آهنگ هوادهی که پیش از این به کمک سرعت‌سنج هوا اندازه‌گیری و محاسبه شده بود سرعت ظاهری گاز در هر یک از شرایط آزمایش، بر اساس معادله ۳ محاسبه شد.

۵-۲- محاسبه زمان ماند کف

در هر آزمایش، بعد از تنظیم عمق کف و محاسبه سرعت ظاهری گاز، زمان ماند کف با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد.

۶-۲- نمونه‌گیری برای ارزیابی متالورژیکی

برای ارزیابی متالورژیکی سلول فلوتاسیون از نسبت غنی‌شدگی گوگرد (ER, Enrichment Ratio) (معادله ۴) و بازیابی جرمی کنسانتره (CMR, Concentrate Mass Recovery) (معادله ۵) به عنوان معیارهای متالورژیکی استفاده شد.

$$ER = \frac{c}{f} \quad (4)$$

$$CMR = 100 \frac{f-t}{c-t} \quad (5)$$

که در آن:

c و t: به ترتیب عیار گوگرد در باطله، کنسانتره و خوراک‌اند.



شکل ۴: سرعت‌سنج هوا (Anemometer) مدل TES 1341

افزایش هر ده سانتی متر عمق کف، آهنگ هوادهی تقریباً $15 \text{ m}^3/\text{h}$ افزایش یافت.

باید توجه داشت که در افزایش عمق کف، دو محدودیت وجود دارد. در هر دو نوع سلول مکانیکی، عمق کف را حداکثر تا نقطه‌ای می‌توان افزایش داد که محصول کف از لبه سلول به مقدار قابل قبول سرریز شود بدیهی است که با توقف سرریز کف (ناشی از افزایش بیش از اندازه عمق کف)، عملاً دیگر فرآیند جداسازی انجام نمی‌گیرد و سلول فلوتاسیون همانند یک کانال انتقال مواد عمل خواهد کرد. محدودیت دیگر که تنها در سلول‌های خودهواده وجود دارد این است که به دلیل قرارگیری ایمپلر در بخش فوقانی سلول، اگر عمق کف تا نقطه‌ای افزایش یابد که سطح مشترک پالپ-کف به مقابل ایمپلر برسد، آنگاه دیگر مکش هوا در لوله ورودی هوا ایجاد نخواهد شد و در نتیجه هیچ هوایی به داخل سلول فلوتاسیون وارد نمی‌شود و سلول کارایی خود را از دست خواهد داد.

همان گونه که از شکل ۵ ملاحظه می‌شود سلول تحت بررسی به طور متوسط $220 \text{ m}^3/\text{h}$ هوا مصرف می‌کند، از اینرو در یک بانک فلوتاسیون چهار سلولی (همانند کارخانه کنسانتره شماره ۶ گل گهر) حدود $880 \text{ m}^3/\text{h}$ هوا برای فلوتاسیون نیاز است که باید حداقل به وسیله یک کمپرسور بزرگ هوا تامین شود. این موضوع مطمئناً هزینه‌های سرمایه‌ای بالایی را نیاز دارد. از اینرو می‌توان گفت یکی از مهم‌ترین مزیت‌های سلول‌های خودهواده، کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی مدار فلوتاسیون به دلیل عدم استفاده از کمپرسور هوا است.

۳-۲- تاثیر عمق کف بر سرعت ظاهری گاز

همانطور که از شکل ۶ ملاحظه می‌شود، مشابه با آهنگ هوادهی، سرعت ظاهری گاز نیز با عمق کف، رابطه‌ای خطی و مستقیم دارد. اما برخلاف آهنگ هوادهی، میزان تغییرات J_g با تغییرات عمق کف اندک بود به طوری که در حداکثر بازه تغییر عمق کف (یعنی ۵۰ cm) سرعت ظاهری گاز تنها 0.5 cm/s تغییر کرد که بسیار ناچیز بود.

دلیل اصلی این موضوع وجود Froth Crowder در بالای سلول تحت بررسی بود (شکل ۱). به طوری که با تغییر عمق کف، سطح مقطع عرضی سلول در سطح مشترک پالپ-کف نیز تغییر می‌کرد. به عنوان مثال با کاهش عمق کف، سطح مقطع عرضی سلول در سطح مشترک پالپ-کف (A)، آهنگ هوادهی (Q_p) و سرعت ظاهری گاز، همگی کاهش یافتند. با

از آنجایی که نسبت غنی‌شدگی تاثیر نوسانات عیار خوراک فلوتاسیون را در نظر می‌گیرد از آن به عنوان معیار انتخاب‌پذیری فلوتاسیون (به جای عیار کنسانتره) استفاده شد. در هر آزمایش برای رسیدن به حالت پایدار در سلول فلوتاسیون، پس از تنظیم عمق کف و سپری شدن زمانی در حدود سه برابر زمان ماند پالپ در سلول، قرائت سرعت هوا با دستگاه سرعت سنج هوا انجام و سپس از جریان‌های خوراک، باطله و کنسانتره نمونه‌گیری شد.

۲-۷- اندازه‌گیری توان‌کشی سلول

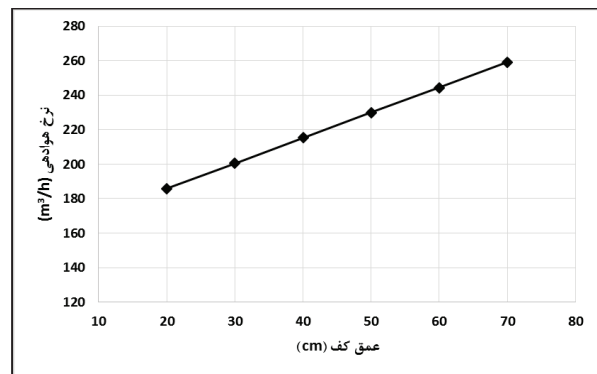
برای بررسی اثر عمق کف و آهنگ هوادهی بر توان‌کشی سلول فلوتاسیون، توان‌کشی الکتروموتور سلول مورد بررسی با استفاده از داده‌های اتاق کنترل یادداشت‌برداری شد. پایش توان‌کشی به اپراتورهای اتاق کنترل اجازه می‌داد تا هر گاه توان‌کشی فراتر از مقدار اسمی الکتروموتور رفت به اپراتور فلوتاسیون اطلاع داده تا با افزایش عمق کف، توان‌کشی را به مقداری کمتر از مقدار اسمی الکتروموتور کاهش دهد و مانع از توقف سلول فلوتاسیون شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر عمق کف بر آهنگ هوادهی

همان طور که انتظار می‌رفت با افزایش عمق کف، آهنگ هوادهی نیز افزایش یافت (شکل ۵). زیرا افزایش عمق کف (که به معنای کاهش سطح پالپ در سلول فلوتاسیون است) فشار تخلیه را در محل ورود هوا کاهش می‌دهد.

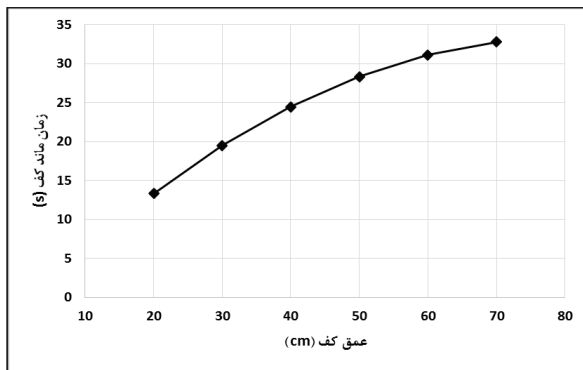
همانطور که از شکل ۵ مشخص است عمق کف و آهنگ هوادهی رابطه‌ای خطی و مستقیم دارند به طوری که به ازای



شکل ۵: تغییرات آهنگ هوادهی با عمق کف

جدول ۱: مقادیر زمان ماند کف در عمق‌های مختلف کف

عمق کف (cm)	سرعت ظاهری گاز (cm/s)	زمان ماند کف (s)
۲۰	۱,۴۶	۱۳,۷
۳۰	۱,۵۷	۱۹,۱
۴۰	۱,۶۸	۲۳,۸
۵۰	۱,۷۸	۲۸,۱
۶۰	۱,۸۹	۳۱,۷
۷۰	۱,۹۹	۳۵,۲



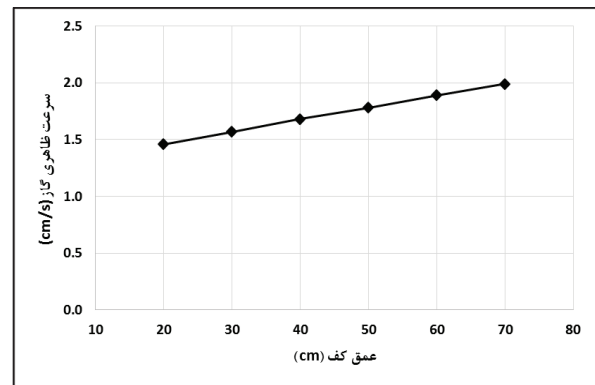
شکل ۷: تغییرات زمان ماند کف با عمق کف

توضیح داد که تاثیر عمق کف بر زمان ماند کف بسیار بیشتر از تاثیر سرعت ظاهری گاز بود. این یک یافته مهم است زیرا پیشنهاد می‌کند که تغییرات عمق کف اگر چه سبب تغییرات سرعت ظاهری گاز می‌شود، اما این موضوع اثر قابل ملاحظه‌ای بر زمان ماند کف و در نتیجه کارآیی فاز کف و بازیابی کلی فلوتاسیون نخواهد داشت.

در این آزمایش‌ها، مشاهدات سطح کف نشان داد که با افزایش عمق کف (و افزایش متعاقب زمان ماند کف) به دلیل به هم پیوستن حباب‌ها، اندازه آن‌ها افزایش یافت. زیرا هر چه حباب‌ها در فاز کف زمان ماند بیشتری داشته باشند آنگاه زمان زهکشی لایه آب بین حباب‌ها بیشتر بوده و با نازک شدن این لایه آب، احتمال به هم پیوستن حباب‌ها و افزایش اندازه آن‌ها بیشتر می‌شود [۴].

البته لازم به یادآوری است که زمان ماند کف به تنهایی بر به هم پیوستن حباب‌ها تاثیرگذار نیست و عوامل دیگر نیز مانند مقدار مواد شیمیایی (کلکتور و کف‌ساز)، ویژگی‌های

در نظر گرفتن معادله ۳ مشخص شد که تغییر آهنگ هوادهی نسبت به تغییر سطح مقطع عرضی سلول در سطح مشترک پالپ-کف، تاثیر بیشتری در محاسبه J_p داشت.



شکل ۶: تغییرات سرعت ظاهری گاز با عمق کف

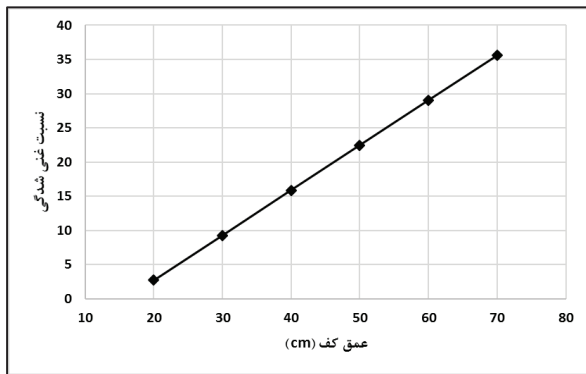
واضح است که عمق کف گزینه مناسبی برای بهبود سرعت ظاهری گاز در سلول‌های خودهواده نیست زیرا با افزایش عمق کف، به دلیل افزایش سطح مقطع عرضی سلول در سطح مشترک پالپ-کف، اثر افزایش آهنگ هوادهی تا میزان زیادی خنثی شده و تنها موجب بهبود اندک J_p می‌شود.

محدوده رایج مقادیر J_p در سلول‌های مکانیکی صنعتی (خودهواده و هوادهی شده) معمولاً ۰,۵-۲ cm/s است [۲۴]. مقادیر J_p بسیار بالا (بیش از ۲,۵ cm/s) منجر به افزایش دنباله روی از ناحیه پالپ به ناحیه کف و همچنین کاهش پایداری سطح مشترک پالپ-کف خواهد شد، عواملی که منجر به کاهش کارآیی سلول می‌شوند [۱۷، ۲۵]. همچنین سرعت ظاهری گاز کمتر از مقدار معمول نیز ظرفیت حمل را به شدت محدود می‌کند [۲۵]. شکل ۶ نشان داد که در عمق‌های مختلف بررسی شده، مقادیر J_p به دست آمده، در محدوده متداول سلول‌های صنعتی بود.

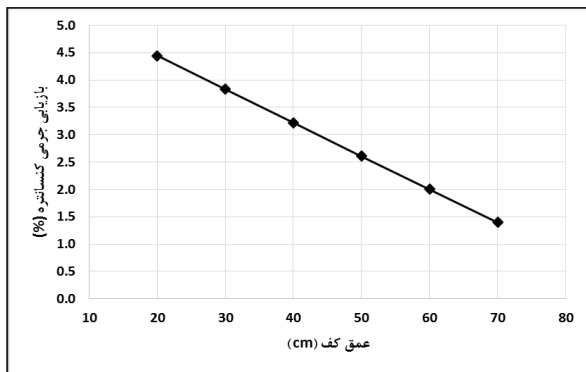
۳-۳- تاثیر عمق کف بر زمان ماند کف

با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت ظاهری گاز در عمق‌های مختلف کف، زمان ماندهای کف براساس معادله ۲ محاسبه و در جدول ۱ نشان داده شده است.

مشخص شد که با افزایش عمق کف (و با وجود افزایش سرعت ظاهری گاز)، زمان ماند کف افزایش می‌یابد (شکل ۷). دلیل این پدیده را با توجه به معادله ۲ این گونه می‌توان



شکل ۸: تغییرات نسبت غنی‌شدگی با عمق کف



شکل ۹: تغییرات بازایی جرمی کنسانتره با عمق کف

و عیار محصول سرریز کف کاهش یابد [۱]. نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۸ و ۹ این موضوع را تایید کردند. زیرا کاهش عمق کف، با وجود کاهش آهنگ هوادهی و J_p موجب کاهش زمان ماند ناحیه کف شد (شکل ۷). از اینرو در فاز کف؛ زهکشی کمتری از آب و ذرات متصل نشده، از قبیل گانگ دنباله‌روی شده یا ذرات با آبرانی ضعیف، رخ می‌دهد [۹] که در نتیجه آن، دنباله‌روی مواد به دلیل افزایش آب راه یافته به کنسانتره افزایش یافته و موجب کاهش عیار و درصد غنی‌شدگی می‌شود [۵].

بنابراین آشکار است که در سلول‌های خودهواده، تغییر عمق کف با وجود تاثیراتی که بر آهنگ هوادهی دارد تنها به واسطه تغییر زمان ماند کف بر کارایی متالورژیکی تاثیرگذار است نه تغییر آهنگ هوادهی.

سلول‌های فلوتاسیون اگر به عنوان رافر و رمق‌گیر بهره‌برداری شوند در عمق‌های کف نسبتاً کم و دبی‌های هوادهی بالا (برای رسیدن به بازایی بالا) کار می‌کنند در حالی

سطح ذرات جامد و توزیع ابعادی ذرات نیز در به هم پیوستن حباب‌ها تاثیرگذاراند [۲۶]، اما از آنجایی که در این مطالعه تلاش شد که مقدار مواد شیمیایی و کیفیت خوراک ثابت نگه داشته شوند، می‌توان بیان کرد که تنها دلیل به هم پیوستن حباب‌ها با افزایش عمق کف، افزایش زمان ماند کف بود.

۳-۴- تاثیر عمق کف بر کارایی متالورژیکی فلوتاسیون

نتایج آنالیز گوگرد خوراک، کنسانتره و باطله فلوتاسیون در جدول ۲ نشان داده شده است. از آنجایی که در این تحقیق، هدف از فلوتاسیون، گوگردزایی از کنسانتره آهن است، پیریت (به عنوان کانی اصلی حاوی گوگرد) شناور می‌شود. از اینرو در اینجا منظور از کنسانتره، محصول شناور شده غنی از گوگرد به صورت کف است.

جدول ۲: نتایج آنالیز گوگرد خوراک، کنسانتره و باطله فلوتاسیون

عمق کف (cm)	خوراک (%)	کنسانتره (%)	باطله (%)
۲۰	۱,۲۹	۳,۵۳	۱,۱۹
۳۰	۱,۳۱	۱۲,۱۸	۰,۸۸
۴۰	۱,۱۲	۱۷,۸۰	۰,۵۷
۵۰	۱,۲۶	۲۸,۳۰	۰,۵۴
۶۰	۱,۳۸	۴۰,۰۸	۰,۵۹
۷۰	۱,۲۷	۴۵,۲۱	۰,۶۵

با افزایش عمق کف، نسبت غنی‌شدگی گوگرد افزایش و بازایی جرمی کنسانتره کاهش یافت (شکل‌های ۸ و ۹). پیش از این مشاهده شد که با افزایش عمق کف، J_p به میزان اندک افزایش یافت و با توجه به رابطه مستقیم J_p با سینتیک و بازایی کلی فلوتاسیون [۸، ۱] انتظار می‌رفت که بازایی جرمی کنسانتره افزایش یابد در حالی که نتایج پیشنهاد می‌کنند که این موضوع در سلول خودهواده لزوماً صادق نیست. زیرا در بخش‌های قبل مشخص شد که در سلول خودهواده، عمق کف در مقایسه با J_p تاثیر بیشتری بر زمان ماند کف داشت و با توجه به ارتباط زمان ماند کف با بازایی کلی فلوتاسیون بدیهی است که در اینجا نیز عمق کف نسبت به J_p تاثیر بیشتری بر کارایی متالورژیکی سلول خودهواده دارد.

از اینرو انتظار می‌رفت که با کاهش عمق کف، بازایی کلی فلوتاسیون (به عنوان نتیجه‌ای از افزایش بازایی کف) افزایش

که با افزایش سرعت ایمپلر یا درصد جامد پالپ، توان کشی نیز افزایش می‌یابد [۲۸، ۲۷]. به نظر می‌رسد در مواردی که افزایش توان کشی به مقادیر فراتر از محدوده نرمال مشاهده می‌شود، بهتر است درصد جامد خوراک ورودی به فلوتاسیون کاهش داده شود تا اینکه عمق کف افزایش یابد. بدیهی است که تغییرات عمق کف، به شدت بر کارایی متالورژیکی سلول تاثیرگذار است و سلول را از شرایط مناسب بهره‌برداری دور می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- تغییرات عمق کف و آهنگ هوادهی، رابطه‌ای خطی و مستقیم داشتند.

- مشخص شد با تغییر عمق کف، تغییرات آهنگ هوادهی نسبت به تغییرات سطح مقطع عرضی سلول در سطح مشترک پالپ-کف، تاثیر بیشتری در تعیین سرعت ظاهری گاز داشت.
- نتایج پیشنهاد می‌کنند که عمق کف، گزینه مناسبی برای تغییر سرعت ظاهری گاز نیست. زیرا به دلیل تغییرات سطح مقطع عرضی سلول در سطح مشترک پالپ-کف همراه با تغییرات عمق کف، محدوده تغییرات سرعت ظاهری گاز اندک بود.

- تغییرات عمق کف اگر چه سبب تغییرات سرعت ظاهری گاز شد، اما این موضوع اثر قابل ملاحظه‌ای بر زمان ماند کف و در نتیجه کارایی فلوتاسیون (بازیابی جرمی کنسانتره و نسبت غنی‌شدگی) نداشت. از اینرو پیشنهاد می‌شود در هنگام بهره‌برداری برای دستیابی به عیار و بازیابی مطلوب، عمق کف (بدون توجه به اثر آن بر آهنگ هوادهی و سرعت ظاهری گاز) تغییر داده شود.

- در تشریح رفتار متالورژیکی سلول‌های خودهواده، بهتر است از زمان ماند کف که تاثیر هر دو متغیر آهنگ هوادهی و عمق کف را در نظر می‌گیرد، استفاده کرد.

- به دلیل وابستگی آهنگ هوادهی به عمق کف، در مواردی که لازم است آهنگ هوادهی بدون تغییر عمق کف، تنظیم شود، این کار بهتر است با کمک پارامترهای دیگر از قبیل تغییر سرعت ایمپلر انجام شود.

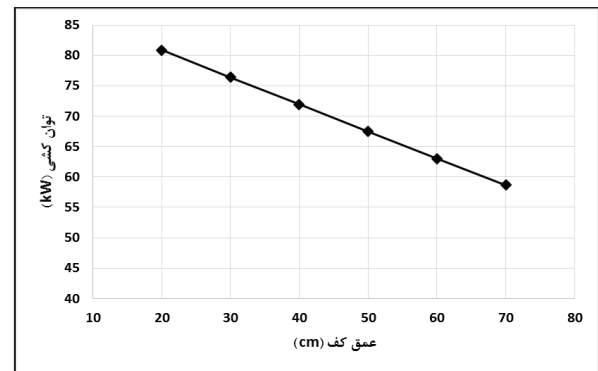
- مشاهده شد که با افزایش عمق کف به سبب افزایش آهنگ هوادهی، توان کشی سلول کاهش یافت، اگر چه آهنگ

که به عنوان کلینر در عمق‌های کف بیشتر و دبی‌های هوادهی کمتر برای افزایش عیار کار می‌کنند [۱۷، ۱۸]، در سلول‌های خودهواده دستیابی همزمان به عمق کف بالا و آهنگ هوادهی کم (یا بالعکس) تنها با تغییر عمق کف عملاً امکان‌پذیر نیست و در این حالت باید آهنگ هوادهی را به کمک پارامترهای دیگر از قبیل سرعت ایمپلر تنظیم کرد.

۳-۵- تاثیر عمق کف بر توان کشی سلول

توان مصرفی نه تنها از لحاظ کارایی متالورژیکی فلوتاسیون اهمیت دارد بلکه از لحاظ بهینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی فلوتاسیون نیز اهمیت دارد. زیرا توان کشی یکی از مولفه‌های اصلی هزینه‌های عملیاتی فلوتاسیون است [۱۷، ۲۷].

شکل ۱۰ مقادیر توان کشی سلول فلوتاسیون را بر حسب کیلو وات (kW) برای محدوده عمق کف بررسی شده نشان می‌دهد. به طوریکه با افزایش عمق کف، به دلیل افزایش آهنگ هوادهی، توان کشی سلول کاهش یافت. البته میزان تغییرات توان کشی در بازه ۵۰ سانتی‌متری از عمق کف، محدود و تنها ۲۰ kW بود. به طوری که در کم‌ترین عمق کف، توان کشی سلول هرگز به مقدار فراتر از توان اسمی الکتروموتور (kW ۱۱۰) که موجب توقف آن می‌شود، نرسید.



شکل ۱۰: تغییرات توان کشی سلول فلوتاسیون با عمق کف

از اینرو به نظر می‌رسد روش فعلی بهره‌برداری در خط تولید کنسانتره شماره ۶ گل‌گهر، که طی آن برای مقابله با افزایش توان کشی در مقادیر فراتر از توان اسمی الکتروموتور، عمق کف افزایش داده می‌شود، نادرست باشد. زیرا توان کشی سلول فلوتاسیون تنها به آهنگ هوادهی بستگی ندارد بلکه به سرعت ایمپلر و درصد جامد پالپ نیز وابسته است به طوری

تغییرات توان کشی محدود بود.

۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر و پژوهشکده سنگ آهن و فولاد به خاطر همکاری صمیمانه، تشکر و سپاس‌گزاری کنند.

۶- مراجع

- purposes". Minerals Engineering, 14(9): 1033-1046.
- [14] Gomez, C. O., Acuna, C., and Finch, J. A. (2007). "Forcing Air Into Self-Aspirating Flotation Machines". CIM, Toronto, Canada, 159-172.
- [15] Girgin, E. H., Do, S., Gomez, C. O., and Finch, J. A. (2006). "Bubble size as a function of impeller speed in a self-aeration laboratory flotation cell". Minerals Engineering, 19: 201-203.
- [16] Kind, P. (1976). "Design criteria and recent developments in large-capacity Wemco flotation cells". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 76(8): 345-358.
- [17] Power, A., Franzidis, J. -P., and Manlapig, E. V. (2000). "The characterization of hydrodynamic conditions in industrial flotation cells". 7th Mill Operators' Conference, Kalgoorlie, Western Australia, 243-256.
- [18] Shean, B. J., and Cilliers, J. J. (2011). "A review of froth flotation control". International Journal of Mineral Processing, 100: 57-71.
- [19] Vera, M. A., Franzidis, J. -P., and Manlapig, E. V. (1999). "Simultaneous determination of collection zone rate constant and froth zone recovery in a mechanical flotation environment". Minerals Engineering, 12(10): 1163-1176.
- [20] Harris, A., Venkatesan, L., and Greyling, M. (2013). "A practical approach to plant scale flotation optimization". The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 13: 263-272.
- [21] Gorain, K., Franzidis, J. P., and Manlapig, E. V. (2000). "Flotation Cell Design: Application of Fundamental Principles". Encyclopedia of Separation Science, Vol II, Academic Press, 1502-1512.
- [22] Yianatos, J. B., Larenas, J. M., Moys, M. H., and Diaz, F. J. (2008). "Short time mixing response in a big flotation cell". International Journal of Mineral Processing, 89: 1-8.
- [23] Yianatos, J., Contreras, F., and Diaz, F. (2010). "GAS holdup and RTD measurement in an industrial flotation cell". Minerals Engineering, 23: 125-130.
- [24] Vinnett, L., Contreras, F. and Yianatos, J., 2012. "Gas dispersion pattern in mechanical flotation cells". Minerals Engineering, 26: 80-85.
- [25] Yianatos, J. B., and Henriquez, F. (2007). "Boundary conditions for gas rate and bubble size at the pulp-froth interface in flotation equipment". Minerals Engineering, 20: 625-628.
- [26] Pérez-Garibay, R., Estrada-Ruiz, R. H., and Gallegos-Acevedo, P. M. (2010). "Relationship between the bubble surface flux that overflows and the mass flow rate of solids in the concentrate of flotation processes". Minerals Engineering, 23: 541-548.
- [27] Deglon, D. A., Egya-Mensah, D., and Franzidis, J. P. (2000). "Review of Hydrodynamics and Gas Dispersion in Flotation cells on South African Platinum Concentrators". Minerals Engineering, 13(2): 235-244.
- [28] Shabalala, N. Z. P., Harris, M., Leal Filho, L. S., and Deglon, D. A. (2011). "Effect of slurry rheology on gas dispersion in a pilot-scale mechanical flotation cell". Minerals Engineering, 24: 1448-1453.
- [1] Rahman, R. M., Ata, S., and Jameson, G. J. (2015). "Study of froth behavior in a controlled plant environment – Part 1: Effect of air flow rate and froth depth". Minerals Engineering, 81: 152-160.
- [2] Yianatos, J. B., Moys, H. M., Contreras, F., and Villanueva, A. (2008). "Froth recovery of industrial flotation cells". Minerals Engineering, 21: 817-825.
- [3] Rahman, R. M., Ata, S., and Jameson, G. J. (2015). "Study of froth behavior in controlled plant environment – Part 2: Effect of collector and frother concentration". Minerals Engineering, 81: 161-166.
- [4] Massinaei, M. (2008). "Hydrodynamic and Kinetic Characterization and Modeling of Industrial Columns in Rougher Flotation Circuits". Ph.D. Thesis, Department of Mining Engineering, University of Tehran, Iran.
- [5] Venkatesan, L., Harris, A., and Greyling, M. (2014). "Optimization of air rate and froth depth in flotation using a CCRD factorial design – PGM case study". Minerals Engineering, 66-68: 221-229.
- [6] Gorain, B. K., Franzidis, J. -P., and Manlapig, E. V. (1999). "The empirical prediction of bubble surface area flux in mechanical flotation cells from cell design and operating data". Minerals Engineering, 12 (3): 309-322.
- [7] Vinnett, L., Yianatos, J., and Alvarez, M. (2014). "Gas dispersion measurements in mechanical flotation cells: Industrial experience in Chilean concentrators". Minerals Engineering, 57: 12-15.
- [8] Schwarz, S., and Alexander, S. (2006). "Gas dispersion measurements in industrial flotation cells". Minerals Engineering, 19: 554-560.
- [9] Hadler, K., Greyling, M., Plint, N., and Cilliers, J. J. (2012). "The effect of froth depth on air recovery and flotation performance". Minerals Engineering, 36-38: 248-253.
- [10] Franzidis, J. -P., and Manlapig, E. V. (1999). "A new, comprehensive and useful model for flotation". Proc. Proceedings of a Symposium held at the Annual SME Meeting, 413-423.
- [11] Zheng, X., Johnson, N. W., and Franzidis, J. -P. (2006). "Modelling of entrainment in industrial flotation cells: Water recovery and degree of entrainment". Minerals Engineering, 19: 1191-1203.
- [12] Yianatos, J., Henriquez, F. H., and Oroz, A. G. (2006). "Characterization of large size flotation cells". Minerals Engineering, 19: 531-538.
- [13] Yianatos, J., Bergh, L., Condori, P., and Aguilera, J. (2001). "Hydrodynamic and metallurgical characterization of industrial flotation banks for control