

## ارائه روشی نو جهت تعیین دنباله‌روی در فلوتاسیون بدون کلکتورکانی‌های سولفیدی

شبنم قبادی علمداری<sup>۱</sup>، محمود عبداللهی<sup>۲\*</sup>، محمدرضا خالصی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، shabnam.gobadi@modares.ac.ir  
۲. استاد گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، گروه فرآوری مواد معدنی، minmabd@modares.ac.ir  
۳. استادیار گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس، گروه فرآوری مواد معدنی، mrkhalesi@modares.ac.ir

### چکیده

### مشخصات مقاله

#### تاریخچه مقاله

دریافت: ۱ آذر ۹۱

دریافت پس از اصلاح: ۳۱ آریبهشت ۹۲

پذیرش نهایی: ۱۷ شهریور ۹۲

#### کلمات کلیدی:

فلوتاسیون بدون کلکتور

دنباله‌روی

پتانسیل پالپ

طراحی آزمایش

جدایش کانی‌ها با فلوتاسیون بر پایه تفاوت در آبرانی سطح کانی‌ها می‌باشد، اما بعضی ذرات بدون توجه به آب‌پذیری سطحشان به دنبال آب و مواد جامد، به فاز کف راه می‌یابند. مکانیزم‌های مختلفی برای دنباله‌روی ارائه شده است و پارامترهای زیادی بر آن موثرند. لذا روش‌های متفاوتی جهت اندازه‌گیری میزان دنباله‌روی ارائه شده‌اند. در این مقاله ضمن ارائه روشی جدید جهت اندازه‌گیری سهم دنباله‌روی در فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی، تاثیر پارامترهای سرعت همزن، درصد جامد پالپ، مدت زمان کف‌گیری و غلظت کفساز بر دنباله‌روی کالکوپیریت مس مزرعه بررسی شده است. در این روش، با فلوتاسیون بدون کلکتور و با حذف آبرانی کانی با کنترل Eh، سهم دنباله‌روی در فلوتاسیون این نمونه و پارامترهای موثر بر دنباله‌روی مشخص شد که به ترتیب اهمیت عبارتند از: مدت زمان کف‌گیری، درصد جامد پالپ، غلظت کفساز و دور همزن. در شرایط بهینه‌ی درصد جامد پالپ=۱۰٪، دور همزن=۹۰۸/rpm، غلظت کفساز=۲۰g/t و زمان=۱/۱min، میزان بازیابی مس با دنباله‌روی به حداقل ۰/۶٪ رسید. همچنین در شرایط درصد جامد پالپ=۳۰٪، دور همزن=۱۲۰۰rpm، غلظت کفساز=۶۰g/ton و زمان=۴min مقدار بازیابی مس به مقدار بیشینه ۱۱/۸۸٪ رسید. تمامی آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی و در سلول ۲ لیتری طرح دنور انجام گرفته است.

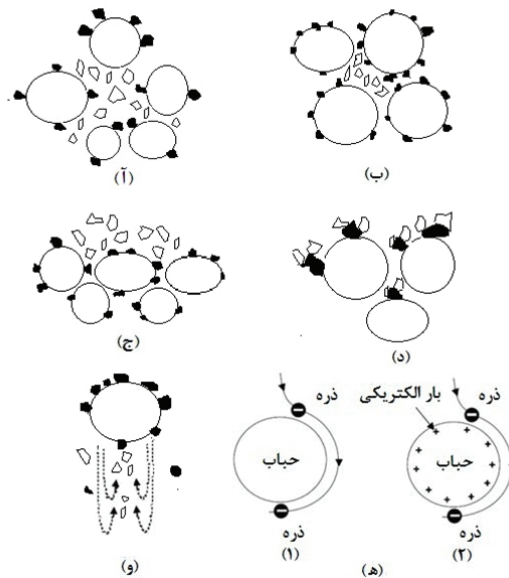
۱- مقدمه

فلوتاسیون یک فرآیند جدایش فیزیکی- شیمیایی است که از تفاوت در خصوصیات آبرانی سطحی کانی‌های بالارزش و باطله استفاده می‌کند [۱]. ذراتی که سطح آنها به وسیله کلکتور آبران شده است حباب هوا را جذب می‌کنند و تحت تاثیر نیروی ارشمیدس به فاز بالایی یعنی فاز کف منتقل می‌شوند. ذراتی که به کمک بازداشت کننده‌ها آگیر شده بودند حباب هوا را جذب نمی‌کنند و غرق می‌شوند [۲]. علاوه بر حرکت ذرات به علت چسبیدن به حباب‌های هوا، فرآیندهای دیگر انتقال ذرات به سمت بالا نیز اتفاق می‌افتند که این فرآیندها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. در فرآیند انتقال ذرات با دنباله، ذرات بدون تماس با حباب‌های هوا به کمک دنباله حباب به فاز کف وارد می‌شوند. فلوتاسیون بدون تماس یکی از روش‌های دنباله‌روی است که به دو روش تفرق - قطبی، و نیروهای الکترواستاتیکی رخ می‌دهد. مجموعه این فرآیندهای انتقال مواد به فاز کف که تحت تاثیر چسبیدن

ذرات به حباب (فلوتاسیون واقعی<sup>۱</sup>) نباشد را دنباله‌روی<sup>۲</sup> می‌نامند [۳]. طی فرآیند دنباله‌روی، ذرات وارد سطح مشترک پالپ-کف می‌شوند و به شکل سوسپانسیون در آب بین حباب‌ها به سمت بالا حمل می‌شوند و از سلول فلوتاسیون خارج می‌شوند. ذراتی که به حباب‌های هوا نچسبیده‌اند می‌توانند به کمک تلاطم پالپ و یا دنباله حباب<sup>۳</sup> به فاز کف وارد شوند، این فرآیندها به ترتیب به عنوان دنباله‌روی مکانیکی و دنباله‌روی هیدرولیکی شناخته می‌شوند. تشکیل دنباله به وسیله شرایط هیدرودینامیکی محدود می‌شود. حجم دنباله تابعی از سرعت صعود حباب و ویسکوزیته مایع می‌باشد. حجم دنباله ( $V_w$ )، به شکل زیر بیان می‌شود:

$$V_m = V_b [0.045Re^{0.649} - 0.314] \quad 20 \leq Re \leq 1400 \quad (1)$$

که در آن  $V_b$  حجم حباب و  $Re$  مقدار عدد رینولدز می‌باشد که نمایانگر میزان تلاطم سیال در داخل سلول می‌باشد.



شکل (۱) راه‌های فلوتاسیون مکانیکی (آ) حمل رو به بالا در مناطق مسطح<sup>۴</sup>، (ب) به تله افتادگی<sup>۵</sup>، (ج) supporting، (د) نر مه پوشی<sup>۶</sup>، (و) دنباله<sup>۷</sup>، (ه) فلوتاسیون بدون تماس (به دلیل تفرق<sup>۸</sup>) (۱) تفرق +، (۲) نیروها [اقتباس از مرجع ۳]

<sup>1</sup> True Flotation  
<sup>2</sup> Entrainment  
<sup>3</sup> bubble wake  
<sup>4</sup> Plateau regions  
<sup>5</sup> entrapment  
<sup>6</sup> slime coating  
<sup>7</sup> waking  
<sup>8</sup> dispersive

حاصل شده را به دنباله‌روی نسبت می‌دهد. لکن این فرض در مورد شرایطی که کانی در پتانسیل خاصی از پالپ آبران می‌شود و بدون کلکتور نیز به حباب می‌چسبد و بازیابی می‌شود صادق نیست.

در این مقاله سعی شده است که روش تراهار با کنترل و حذف آبرانی کانی ناشی از پتانسیل پالپ، اصلاح شده و روش جدیدی جهت تعیین سهم دنباله روی برای کانی‌های سولفیدی ارائه شود. به علاوه پس از تعیین این سهم و شناخت صحیح میزان دنباله روی، عوامل موثر بر آن مورد آزمایش قرار گرفته است.

## ۲- روش تحقیق، مواد و تجهیزات

نمونه مورد نیاز آزمایش‌ها از معدن مس مزرعه تهیه شد. نمونه‌برداری از دپوهای از پیش استخراج شده انجام شد. ابعاد نمونه‌های برداشت شده زیر ۳۰ cm بود. مطالعات نشان داد که نمونه مورد نظر حاوی مگنتیت، هماتیت، پیریت و کالکوپیریت می‌باشد. آنالیز جذب اتمی نمونه معرف از خوراک، مقدار مس را به میزان ۱/۱٪ نشان داد. نتایج مطالعات درجه‌ی آزادی نشان داد که ۸۰٪ کالکوپیریت موجود در بخش ۱۰۶ μm - آزاد هستند. بنابراین نمونه تا حدی خرد شد که ۱۰۰٪ ذرات تا ابعاد زیر ۱۰۶ μm برسند.

آزمایش‌ها در سلول ۲ لیتری با ماشین فلوتاسیون طرح دنور انجام شد. دو سری آزمایش فلوتاسیون انجام شد هر دو سری آزمایش‌ها در غیاب کلکتور انجام شد با این تفاوت که سری اول در Eh طبیعی پالپ و سری دوم در Eh کنترل شده، انجام شد. در سری دوم آزمایش‌ها تلاش شد با کنترل Eh و جلوگیری از آبرانی طبیعی کانی کالکوپیریت، مانع از فلوتاسیون واقعی بدون کلکتور آن شده تا بتوان تمام مس بازیابی شده در کنسانتره را به دنباله‌روی نسبت داد. نتایج سری اول آزمایش‌ها به عنوان بازیابی بدون کلکتور کالکوپیریت و نتایج سری دوم به عنوان بازیابی با دنباله‌روی در نظر گرفته شدند. چون مطالعات کانی شناسی نشان داده بود که نمونه حاوی کالکوپیریت بوده و مقدار کالکوسیت آن در مقایسه با کالکوپیریت ناچیز است، بنابراین فرض شد که تمام مس در فاز کالکوپیریت قرار دارد.

بدلیل این که امکان فلوتاسیون واقعی کالکوپیریت در غیاب کلکتور و در پتانسیل طبیعی پالپ (۶۰-۱۰ mv) در مقیاس الکتروود مرجع (Ag/AgCl) وجود دارد، Eh محیط با اضافه کردن دی‌تیونیت سدیم در بازه‌ی ۳۸۰ تا -۴۰۰ mv در مقیاس الکتروود مرجع Ag/AgCl کنترل شد، چون در این

با توجه به اینکه ذراتی که با دنباله‌روی بازیابی می‌شوند به شکل سوسپانسیون در آب به کنسانتره انتقال می‌یابند، مقدار بازیابی آب در کنسانتره نقش مهمی در میزان بازیابی ذرات با دنباله‌روی دارد و می‌توان گفت که مکانیزم‌های موثر بر انتقال آب به کنسانتره، به طور غیرمستقیم بر دنباله‌روی اثر می‌گذارند.

پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی خریدایش اجازه می‌دهد که کانه‌های عیار پایین و پیچیده برای استخراج، اقتصادی باشد. کاهش پیوسته عیار و پیچیدگی کانی‌ها معدنکاران را مجبور کرده که برای آزادی کانی‌ها، ذرات خیلی ریزی تولید کنند [۴]. ذرات ریز به علت وزن کمشان بیشتر از ذرات درشت تحت تاثیر دنباله‌روی به کنسانتره وارد می‌شوند و با توجه به این که هم ذرات هیدروفوب و هم ذرات هیدروفیلی می‌توانند با دنباله‌روی در کنسانتره بازیابی شوند، دنباله‌روی ذرات بر کارایی فلوتاسیون موثر می‌باشد. با توجه به تاثیر دنباله‌روی بر کارایی فلوتاسیون، تعیین سهم آن در فلوتاسیون و نیز شناخت پارامترهای موثر بر آن می‌تواند در جهت بهبود کارایی فلوتاسیون مفید باشد.

روش‌های مختلفی برای تعیین مقدار بازیابی ذرات با دنباله‌روی ارائه شده‌اند. وارن<sup>۶</sup> با فرض اینکه دنباله‌روی ذرات در کف خشک اتفاق نمی‌افتد و ذرات به صورت سوسپانسیون در آب می‌توانند به شکل دنباله‌روی بازیابی شوند، یک خطر گرسیون برای ارتباط بین بازیابی جامد و بازیابی آب ارائه کرد [۵]. راس و وندونتر<sup>۷</sup> (۱۹۸۸) فرض کردند که غلظت ذرات دنباله‌روی شده در کف و کنسانتر مطابق با غلظت ذرات در پالپ می‌باشد و با این فرض روشی برای محاسبه سهم دنباله روی ارائه کردند. یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای تعیین سهم دنباله‌روی روش تراهار<sup>۸</sup> می‌باشد که با در نظر گرفتن بازیابی ذرات هیدروفیل، روشی برای ارزیابی سهم مربوط به فلوتاسیون واقعی و دنباله‌روی، بوسیله اندازه‌گیری بازیابی فلوتاسیون در دانه‌بندی‌های مختلف در حضور و عدم حضور کلکتور، پیشنهاد کرد [۵]. او فرض کرد که در بازیابی ثابت آب، بازیابی ذرات با دنباله‌روی در حضور و عدم حضور کلکتور یکسان است. روش تراهار که یکی از جامع‌ترین روشها جهت تعیین سهم دنباله روی است، برای شرایطی که کانی دارای گونه‌های آبران ناشی از اکسایش جزئی سطحی نیست مناسب است، چرا که در شرایط بدون حضور کلکتور تمام بازیابی

<sup>۶</sup>Warren

<sup>۷</sup>Ross & Van Deventer

<sup>۸</sup>Trahar

محدوده از Eh، کالکوپیریت هیدروفل می‌باشد و با فلوتاسیون واقعی فلوته نمی‌شود [۷].

تمام آزمایش‌ها در  $pH=(11/00-11/5)$  انجام شد و به منظور جلوگیری از تغییرات pH ناشی از تغییرات Eh تمامی آزمایش‌ها در محلول بافر ۱۱ انجام شد. ترکیبات بکار رفته برای تهیه بافر ۱۱ در جدول ۱ آمده است. در سری دوم آزمایش‌ها که با کنترل Eh همراه بود، برای جلوگیری از اکسایش پالپ به دلیل حضور اکسیژن در هوا، از گاز نیتروژن برای هوادهی به سلول استفاده شد.

جدول ۱- ترکیبات بکار رفته برای تهیه محلول بافر ۱۱

نسبت به کار رفته	ماده
۱۰۰mL	(۰/۰۵M)NaHCO <sub>۳</sub>
۴۵/۴mL	(۰/۱M)NaOH

با توجه به مطالعه مقالات و تحقیق‌های انجام شده قبلی، متغیرهای: زمان فلوتاسیون، غلظت کفساز، سرعت همزن، درصد جامد پالپ، ارتفاع کف و نرخ هوادهی به عنوان متغیرهای تاثیرگذار بر دنباله‌روی انتخاب شدند. در آزمایش‌های اولیه امکان کنترل ارتفاع کف و نرخ هوادهی میسر نشد، چون ارتفاع کف وابسته به متغیرهای دیگری چون غلظت کفساز، نرخ هوادهی و مقدار ذرات هیدروفوب در سیستم است، بنابراین این دو پارامتر از متغیرهای آزمایش‌ها حذف گردید. با توجه به اهمیت ارتفاع کف در زهکشی مواد دنباله‌روی شده، مقدار این متغیر در ابتدا و انتهای آزمایش‌ها یادداشت شد و چون مقدار نرخ هوادهی در سلول‌های مکانیکی متناسب با سرعت همزن است، برای ثابت نگه داشتن این متغیر، از کمپرسور برای هوادهی به سلول استفاده شد تا از تغییرات این متغیر نسبت به تغییرات سرعت همزن جلوگیری شود و در تمامی آزمایش‌ها مقدار آن  $4 \text{ L/min}$  بود.

به منظور تعیین شرایط آزمایش و تفسیر صحیح نتایج و تعیین رابطه ریاضی بین متغیرها (ورودی‌ها) و بازایی با دنباله‌روی (خروجی‌ها) و کاهش تعداد آزمایش‌ها به طوری که لطمه‌ای به اعتبار نتایج وارد نشود بایستی از یک روش آماری برای طراحی آزمایش‌ها استفاده شود. در این تحقیق از نرم افزار DX7 جهت طراحی آزمایش‌ها و بررسی نتایج استفاده شد. طرح آزمایشی استفاده شده، طرح نقطه مرکزی مرکب در چهارچوب روش کلی سطح پاسخ بوده است. متغیرها یا پارامترهای ورودی در این تحقیق عبارت بودند از: زمان فلوتاسیون (min)، غلظت کفساز (g/t)، سرعت همزن (rpm) و

درصد جامد پالپ (%). پاسخ‌ها یا پارامترهای خروجی عبارتند از: بازایی مس، بازایی آب، بازایی وزنی و عیار مس. تمامی آزمایش‌ها با کفساز MIBC و در غیاب کلکتور انجام شد.

با توجه به این که درصد جامد پالپ یکی از متغیرهای ورودی فلوتاسیون در نظر گرفته شده بود، ابتدا با توجه به حجم سلول و درصد جامد در هر آزمایش، مقدار جامد مورد نیاز برای انجام آزمایش محاسبه شده و درون سلول ریخته شد. در آزمایش‌های با کنترل Eh، به جای آب، از محلول بافر استفاده شد. بعد از تنظیم دور همزن در مقدار مورد نظر، جامد به درون سلول اضافه شد. جهت کنترل Eh محلول، دی‌تیونیت سدیم به سلول اضافه شد تا مقدار Eh در بازه ۳۸۰- تا  $-400 \text{ mv}$  در مقیاس الکتروود مرجع Ag/AgCl قرار گیرد. زمانی که پتانسیل پالپ ثابت شد یا تغییرات آن جزئی بود، مقدار Eh ثبت شده، و کفساز به سلول اضافه شد، پس از ۱ دقیقه شیر هوا باز شده و هوا با دبی  $4 \text{ lit/min}$  وارد سلول شد. در این حین مقدار Eh و pH پالپ کنترل شد تا در بازه‌ی مورد نظر باشد. مقدار کف‌گیری با توجه به مقدار زمان کف‌گیری که یکی از پارامترهای متغیر آزمایش بود، انجام شد. در طول آزمایش مقادیر Eh و pH کنترل شد تا در بازه‌ی مورد نظر باشند. همچنین ارتفاع کف در ابتدا و انتهای کف‌گیری یادداشت شد. در این سری آزمایش‌ها از آب معمولی استفاده نشد مگر مواقعی که ارتفاع کف به علت کاهش آب سلول به لبه سرریز نمی‌رسید، که در این صورت مقداری آب با  $pH=11$  به قدری اضافه می‌شد که کف به لبه سرریز برسد. هر بار پس از افزودن آب مقادیر Eh و pH پالپ کنترل می‌شد.

پس از انجام فلوتاسیون، کنسانتره و باطله در دستگاه فیلترپرس آبگیری شده، سپس در آون به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت تا کاملاً خشک شد، سپس وزن آن با ترازو اندازه‌گیری شد. از کنسانتره به روش شطرنجی نمونه معرف به وزن  $20 \text{ g}$  تهیه شد. این نمونه معرف در  $20 \text{ ml}$  اسید نیتریک  $65\%$ ، به مدت ۱ ساعت در دمای  $90^\circ\text{C}$  حل شده و پس از انجام مراحل رقیق‌سازی به روش جذب اتمی برای تعیین مقدار مس آنالیز شد.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج بدست آمده از آزمایش‌های بدون کنترل Eh در جدول ۲ و نتایج آزمایش‌ها با کنترل Eh در جدول ۳ آمده است. باتوجه به نتایج آزمایش‌ها سهم بازایی با دنباله‌روی در بازایی بدون کلکتور کالکوپیریت محاسبه شده و در جدول ۴ آورده شده است.

ارائه روشی نو جهت تعیین دنباله‌روی در فلوتاسیون بدون کلکتورکانی‌های سولفیدی

جدول (۲) نتایج آزمایش‌های فلوتاسیون بدون کلکتور و بدون کنترل Eh

پارامترهای پاسخ			پارامتر پایش شده		پارامترهای عملیاتی				ردیف
عیار %	بازیابی آب %	بازیابی مس %	FH ارتفاع کف cm	Eh mv	غلظت کفساز g/t	زمان کف‌گیری min	سرعت همزن rpm	درصد وزنی جامد پالپ %	
۱۵/۹۷	۹/۸۳	۲۲/۷۲	۲/۵-۲/۵	۲۱-۴۱	۲۰	۱	۱۲۰۰	۳۰	۱
۱۰/۸۳	۱۷/۷۲	۵۴/۲	۲/۵-۲/۵	۱۰-۳۳	۲۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۲
۱۶	۱۶/۰۲	۲۸/۶۰	۱/۳-۲	۲۰-۳۵	۲۰	۴	۸۰۰	۳۰	۳
۵/۴۲	۳/۷	۷/۶۸	۲-۰/۵	۲۸-۴۵	۲۰	۴	۸۰۰	۱۰	۴
۱۵/۴۵	۲۰/۱۵	۲۸/۰۹	۲/۵-۲/۵	۱۵-۴۶	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۳۰	۵
۱۸/۵۷	۱۰/۰۷	۲۰/۷۱	۲/۳-۱/۵	۲۷-۳۷	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۱۰	۶
۹/۰۸	۱۲/۸۲	۲۷/۰۴	۲-۲	۳۵-۴۸	۶۰	۴	۸۰۰	۱۰	۷
۹/۸۹	۱۲/۳۲	۱۲/۷۹	۲-۰/۵	۲۸-۳۲/۸	۲۰	۴	۱۲۰۰	۱۰	۸
۸/۹۴	۱۰/۳۷	۲۳/۵۵	۱/۵-۱/۵	۴۱-۶۳	۴۰	۲/۵	۸۰۰	۲۰	۹
۱۷/۲۵	۹/۸۱	۳۲/۸۸	۲/۵-۲/۵	۱۶-۳۱	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۱۰
۱۷/۹۳	۱۳/۸۳	۲۴/۶۴	۳-۳	۲۰-۳۲	۶۰	۱	۸۰۰	۳۰	۱۱
۱۳/۰۵	۱۰/۲۳	۳۰/۲۷	۲/۵-۲/۵	۲۳-۲۸	۶۰	۱	۱۲۰۰	۳۰	۱۲
۱۶/۰۱	۲۱/۴۱	۳۷/۶۰	۱/۵-۰/۵	۲۰-۵۶	۲۰	۴	۱۲۰۰	۳۰	۱۳
۱۱/۳۵	۱۵/۵۲	۲۸/۱۷	۲/۵-۲/۳	۴۰-۵۶	۶۰	۴	۸۰۰	۳۰	۱۴
۹/۶۶	۲۹/۴	۴۳/۰۰	۲/۷-۲/۷	۴۹-۵۹	۶۰	۴	۱۲۰۰	۳۰	۱۵
۱۰/۶۶	۷/۸۴	۱۸/۵۵	۲/۲-۲/۵	۲۰-۲۲	۶۰	۱	۱۲۰۰	۱۰	۱۶
۱۷/۸۱	۱۳/۳۵	۳۲/۸۸	۲/۵-۲/۵	۲۵-۴۶	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۱۷
۷/۷۳	۱/۸۹	۲/۳۹	۰/۵-۰/۵	۳۰-۴۷	۲۰	۱	۱۲۰۰	۱۰	۱۸
۱۶/۶۴	۱۰/۶۵	۳۶/۷۰	۲/۵-۲/۵	۲۲-۲۸	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۱۹
۱۳/۰۵	۶/۴۹	۱۴/۵۱	۲/۵-۲/۵	۳۴-۵۸	۴۰	۱	۱۰۰۰	۲۰	۲۰
۴/۴	۲/۴۲	۳/۰۲	۱/۳-۱	۳۶-۴۳	۲۰	۱	۸۰۰	۱۰	۲۱
۱۱/۸۶	۲	۱۱/۵۱	۲-۲	۲۷-۴۰	۶۰	۱	۸۰۰	۱۰	۲۲
۶/۱۸	۱۶/۳۴	۱۸/۶۱	۲/۵-۱/۸	۴۶-۵۸	۶۰	۴	۱۲۰۰	۱۰	۲۳
۱۱/۵۸	۱۶/۹۷	۲۴/۹۹	۲/۳-۲/۳	۳۳-۴۳	۶۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۲۴
۱۶/۷۳	۱۴/۲۴	۳۱/۵۵	۲-۲	۴۱-۶۴	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۲۵
۱۶/۲۸	۲۱/۷۱	۴۶/۳۱	۲/۵-۲/۵	۱۲-۳۷	۴۰	۴	۱۰۰۰	۲۰	۲۶
۱۸/۶۸	۱۷/۳۶	۲۹/۷۸	۱/۵-۱/۵	۱۵-۵۷	۴۰	۲/۵	۱۲۰۰	۲۰	۲۷
۱۷/۰۶	۷/۶۴	۵۴/۷۳	۳-۲	۱۳-۶۴	۲۰	۱	۸۰۰	۳۰	۲۸
۱۶/۸۳	۱۰/۱	۳۱/۵۱	۲/۵-۲/۵	۱۲-۵۷	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۲۹
۱۷/۳۵	۱۲/۸۴	۳۳/۴۲	۲/۵-۲/۵	۱۳-۴۵	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۳۰

جدول (۳) نتایج آزمایش‌های بدون کلکتور با کنترل Eh

پارامترهای پاسخ				پارامتر پایش شده	پارامترهای عملیاتی				ردیف
بازیابی وزنی	عیار %	بازیابی آب %	بازیابی مس %	FH ارتفاع کف cm	غلظت کفساز g/t	زمان کف‌گیری min	سرعت همزن rpm	درصد وزنی جامد پالپ %	
۲/۴۵	۳/۷	۱۰/۵۱	۶/۸۵	۲/۵-۲/۵	۲۰	۱	۱۲۰۰	۳۰	۱
۲/۹۸	۲/۴	۱۷/۵۱	۶/۵۱	۲/۵-۲/۵	۲۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۲
۳/۶۶	۳/۶۶	۱۷/۷۹	۹/۹۲	۲/۵-۲/۵	۲۰	۴	۸۰۰	۳۰	۳
۱/۵۳	۲/۱۵	۳/۳۵	۳	۱/۵-۰/۷	۲۰	۴	۸۰۰	۱۰	۴
۵/۸۱	۱/۷	۲۱/۹۶	۸/۹۸	۲/۵-۲/۵	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۳۰	۵
۱/۰۸	۳/۵۱	۱۱/۱۳	۳/۴۵	۲-۲	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۱۰	۶
۳/۴۵	۲	۱۴/۰۷	۶/۲۷	۲/۵-۲/۵	۶۰	۴	۸۰۰	۱۰	۷
۱/۷۸	۲/۶۹	۱۳/۵	۴/۳۵	۱/۵-۰/۷	۲۰	۴	۱۲۰۰	۱۰	۸
۱/۶۸	۴/۲۴	۹/۳۸	۶/۴۸	۲/۵-۲/۵	۴۰	۲/۵	۸۰۰	۲۰	۹
۲/۴۴	۲/۴۸	۱۰/۸	۵/۵	۲/۵-۲/۵	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۱۰
۱/۴۶	۲/۹۳	۱۴/۲۱	۳/۸۸	۲/۵-۲/۵	۶۰	۱	۸۰۰	۳۰	۱۱
۳/۲۵	۲/۳۶	۹/۲۱	۶/۹۸	۲/۵-۲/۵	۶۰	۱	۱۲۰۰	۳۰	۱۲
۴/۹۴	۲/۱۴	۲۲/۰۳	۹/۶	۲/۵-۲/۵	۲۰	۴	۱۲۰۰	۳۰	۱۳
۳/۲۹	۳/۲۶	۱۶/۴۹	۹/۷۶	۲/۵-۲/۵	۶۰	۴	۸۰۰	۳۰	۱۴
۷/۵۹	۱/۷۵	۳۲/۰۵	۱۲/۰۹	۲/۵-۲/۵	۶۰	۴	۱۲۰۰	۳۰	۱۵
۱/۷۱	۲/۳۱	۷/۸۵	۳/۶	۲/۲-۲/۵	۶۰	۱	۱۲۰۰	۱۰	۱۶
۳/۳۴	۲/۱۱	۱۵/۷۶	۶/۴	۲/۵-۲/۵	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۱۷
۰/۴۶	۲/۲۲	۱/۹۵	۰/۹۳	۱/۵-۱	۲۰	۱	۱۲۰۰	۱۰	۱۸
۱/۷۳	۲/۵۶	۱۰/۷۱	۴/۰۲	۲/۵-۲/۵	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۱۹
۱/۴	۲/۲۸	۷/۰۸	۲/۹	۲/۵-۲/۵	۴۰	۱	۱۰۰۰	۲۰	۲۰
۰/۴۳	۲/۲	۲/۱۸	۰/۸۵	۱/۷-۱	۲۰	۱	۸۰۰	۱۰	۲۱
۱/۶۶	۱/۹۵	۱/۳۵	۲/۹۵	۲/۵-۲/۵	۶۰	۱	۸۰۰	۱۰	۲۲
۲/۹۶	۲/۵۱	۱۵/۳۴	۶/۷۵	۲/۵-۱/۸	۶۰	۴	۱۲۰۰	۱۰	۲۳
۴	۲/۰۸	۱۸/۹۹	۷/۵۷	۲/۵-۲/۵	۶۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۲۴
۴/۴	۲/۲۶	۱۴/۱۹	۹/۰۴	۲/۵-۲/۵	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۲۵
۴/۷۵	۲/۱۷	۲۳/۱	۹/۳۷	۲/۵-۲/۵	۴۰	۴	۱۰۰۰	۲۰	۲۶
۳/۷۴	۲/۲۳	۱۷/۹۵	۷/۵۹	۲/۵-۲/۵	۴۰	۲/۵	۱۲۰۰	۲۰	۲۷
۱/۲	۲/۷۴	۶/۸۳	۲/۹۸	۲/۵-۲/۵	۲۰	۱	۸۰۰	۳۰	۲۸
۲/۰۷	۳/۲۸	۱۰/۶۵	۶/۱۸	۲/۵-۲/۵	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۲۹
۲/۷	۲/۵	۱۴/۲	۶/۱۴	۲/۵-۲/۵	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۳۰

ارائه روشی نو جهت تعیین دنباله روی در فلوتاسیون بدون کلکتورکاتی های سولفیدی

جدول (۴) سهم دنباله روی از بازیابی کلی کالکوپیریت در غیاب کلکتور

سهم دنباله روی از بازیابی کلی کالکوپیریت در غیاب کلکتور %	پارامترهای عملیاتی				ردیف
	غلظت کفساز g/t	زمان کفگیری min	سرعت همزن rpm	درصد وزنی جامد پالپ %	
۳۰/۱۵	۲۰	۱	۱۲۰۰	۳۰	۱
۱۲/۰۱	۲۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۲
۳۴/۶۹	۲۰	۴	۸۰۰	۳۰	۳
۳۹/۰۶	۲۰	۴	۸۰۰	۱۰	۴
۳۱/۹۷	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۳۰	۵
۱۶/۶۶	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۱۰	۶
۲۳/۱۹	۶۰	۴	۸۰۰	۱۰	۷
۳۴/۰۱	۲۰	۴	۱۲۰۰	۱۰	۸
۲۷/۵۲	۴۰	۲/۵	۸۰۰	۲۰	۹
۱۶/۷۳	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۱۰
۱۵/۷۵	۶۰	۱	۸۰۰	۳۰	۱۱
۲۳/۰۶	۶۰	۱	۱۲۰۰	۳۰	۱۲
۲۵/۵۳	۲۰	۴	۱۲۰۰	۳۰	۱۳
۳۴/۶۵	۶۰	۴	۸۰۰	۳۰	۱۴
۲۸/۱۲	۶۰	۴	۱۲۰۰	۳۰	۱۵
۱۹/۴۱	۶۰	۱	۱۲۰۰	۱۰	۱۶
۱۹/۴۶	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۱۷
۳۸/۹۱	۲۰	۱	۱۲۰۰	۱۰	۱۸
۱۰/۹۵	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۱۹
۱۹/۹۹	۴۰	۱	۱۰۰۰	۲۰	۲۰
۲۸/۱۵	۲۰	۱	۸۰۰	۱۰	۲۱
۲۵/۶۳	۶۰	۱	۸۰۰	۱۰	۲۲
۳۶/۲۷	۶۰	۴	۱۲۰۰	۱۰	۲۳
۳۰/۲۹	۶۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۲۴
۲۸/۶۵	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۲۵
۲۰/۲۳	۴۰	۴	۱۰۰۰	۲۰	۲۶
۲۵/۴۹	۴۰	۲/۵	۱۲۰۰	۲۰	۲۷
۵/۴۴	۲۰	۱	۸۰۰	۳۰	۲۸
۱۹/۶۱	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۲۹
۱۸/۳۷	۴۰	۲/۵	۱۰۰۰	۲۰	۳۰

جدول (۵) آنالیز واریانس برای مدل خطی

ANOVA for Response Surface Linear Model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	190/51	4	47/63	30/2	< 0/0001	significant
A-pulp density	84/02	1	84/02	53/29	< 0/0001	
B-impeller speed	8/89	1	8/89	5/64	0/0256	
C-removal time of froth	85/33	1	85/33	54/11	< 0/0001	
D-Frother concentration	12/27	1	12/27	7/78	0.01	
Residual	39/42	25	1/58			
Lack of Fit	26/07	20	1/3	0/49	0/8849	not significant
Pure Error	13/35	5	2/67			
Cor Total	229/93	29				

میزان بازیابی مس با دنباله‌روی افزایش می‌یابد که روند قابل انتظاری است. با افزایش مدت زمان میزان بازیابی آب افزایش می‌یابد و به تبعیت از آن بازیابی با دنباله‌روی نیز افزایش می‌یابد.

#### ب- اثر درصد وزنی جامد در پالپ

شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی جامد در پالپ، بازیابی مس با دنباله‌روی افزایش می‌یابد. دلیل آن می‌تواند این باشد که در نتیجه حرکت رو به بالای حباب‌ها نیروی کششی به سمت بالا ایجاد می‌شود که اگر ذرات مناسب از نظر اندازه و چگالی در این محیط قرار بگیرند بدون آنکه به حباب هوا بچسبند، به سمت بالا حرکت می‌کنند. هرچه درصد وزنی جامد پالپ بیشتر باشد احتمال این که ذرات بیشتری در این منطقه قرار گرفته و به دنبال حباب وارد کف شوند، افزایش می‌یابد.

#### ج- اثر غلظت کفساز

شکل ۴ تغییرات مقدار بازیابی مس با دنباله‌روی را برحسب تغییرات غلظت کفساز نشان می‌دهد. همان طور که قابل مشاهده است با افزایش مقدار کفساز، بازیابی مس با دنباله‌روی افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت کفساز اندازه‌ی حباب‌ها کاهش می‌یابد، در نتیجه سطح حباب‌ها افزایش می‌یابد و این باعث افزایش آب نفوذی در فضای بین حباب‌ها می‌شود که این خود باعث افزایش بازیابی آب و افزایش دنباله‌روی می‌شود.

#### ۱-۳- تحلیل آماری نتایج

بعد از وارد کردن نتایج آزمایش‌ها در نرم افزار DX7، برای تحلیل از مدل‌های چند جمله‌ای درجه دو و سه و اندرکنش دو یا سه عاملی استفاده شد. با استفاده از رگرسیون گام به گام<sup>۱</sup>، مشخص شد که توانهای بالای پارامترهای عملیاتی و نیز تمام اندرکنش‌ها در سطح اعتماد ۰/۰۵٪ بی معنی هستند و مدل خطی زیر جهت توضیح رابطه بین متغیرها کفایت می‌کند:

$$R_{cu} = 6.03 + 2.16A + 0.70B + 2.18C + 0.83D \quad (2)$$

مقدار P value برای نقصان در برازش<sup>۲</sup> مدل خطی پیشنهادی معادله ۲ برابر ۰/۸۸۴۹ بدست آمد که این مقدار بیانگر این است که LOF در مقایسه با خطای خالص معنی‌دار نمی‌باشد و مدل خطی کفایت می‌کند و نیاز به درجات بالاتر مدل نمی‌باشد. جدول ۵ آنالیز واریانس برای مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

#### ۲-۳. بررسی اثر پارامترها

با توجه به جدول ۵ پارامترهای موثر بر دنباله‌روی مس (کالکوپیریت) به ترتیب اهمیت عبارتند از: مدت زمان کف گیری، چگالی پالپ، غلظت کفساز و سرعت همزن.

#### الف- اثر زمان

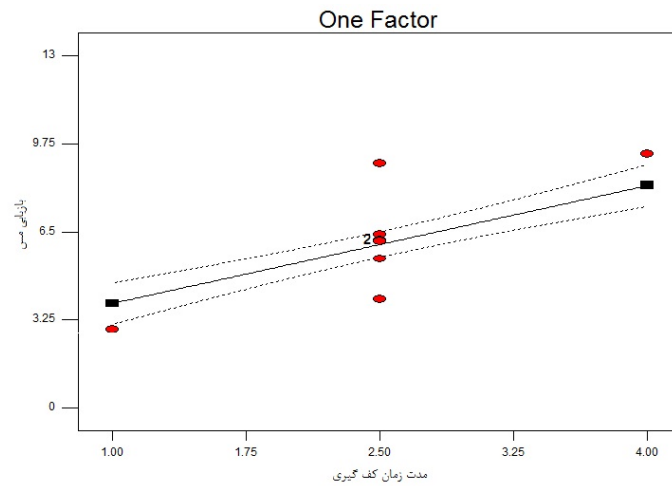
شکل ۲ تاثیر مدت زمان کف‌گیری را بر دنباله‌روی نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش مدت زمان کف‌گیری،

<sup>1</sup> Stepwise regression

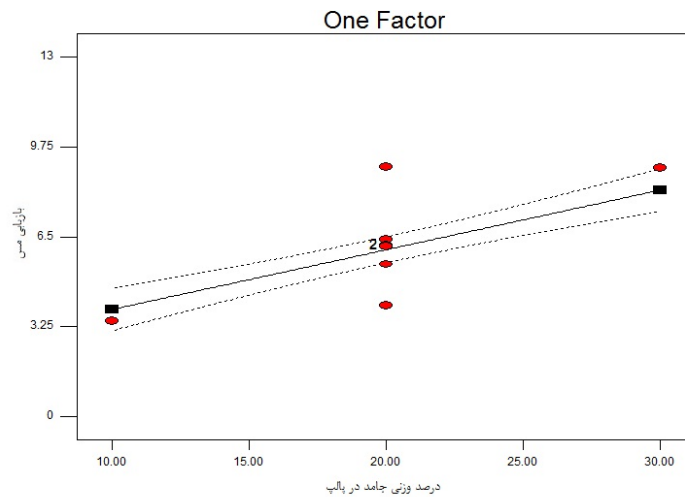
<sup>2</sup> Lack of Fit (LOF)



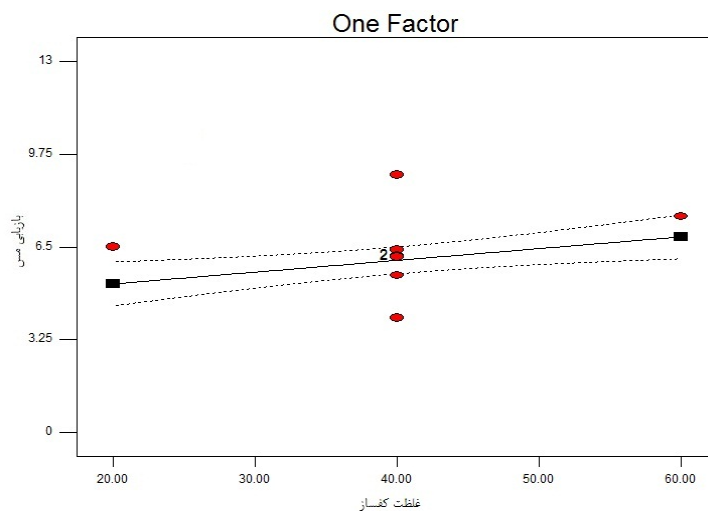
ارائه روشی نو جهت تعیین دنباله روی در فلوتاسیون بدون کلکتورکاتی‌های سولفیدی



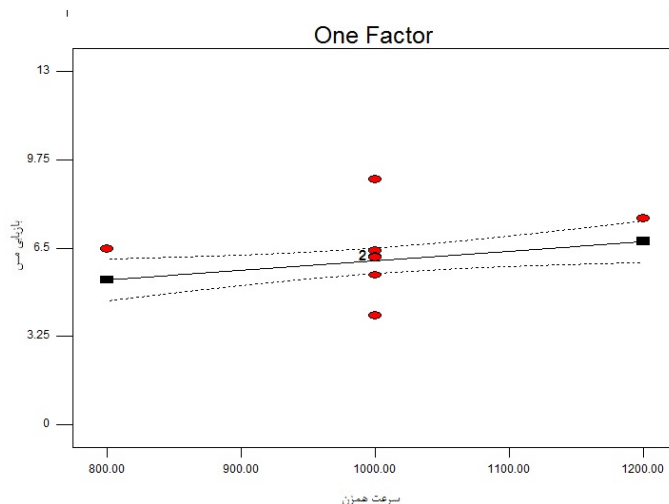
شکل (۲) تاثیر مدت زمان کف گیری بر بازایی مس با دنباله روی (چگالی پالپ: ۲۰٪ سرعت همزن: ۱۰۰۰rpm، غلظت کفساز: ۴۰g/t، نرخ هوادهی: ۴L/min، pH: ۱۱-۱۱/۵)



شکل (۳) تاثیر درصد وزنی جامد در پالپ بر بازایی مس با دنباله روی (دور همزن: ۱۰۰۰rpm، غلظت کفساز: ۴۰g/t، زمان: ۲/۵min، نرخ هوادهی: ۴L/min، pH: ۱۱-۱۱/۵)



شکل (۴) تاثیر غلظت کفساز بر میزان بازایی مس با دنباله روی (دور همزن: ۱۰۰۰rpm، درصد جامد پالپ: ۲۰٪، زمان: ۲/۵min، نرخ هوادهی: ۴L/min، pH: ۱۱-۱۱/۵)



شکل (۵) تاثیر سرعت همزن بر بازیابی مس با دنباله‌روی (درصد جامد پالپ: ۲۰٪، غلظت کفساز: ۴۰g/t، زمان: ۲/۵min، نرخ هوادهی: ۴L/min، ۱۱-۱۱) (۱۱-۱۱)

#### د- اثر سرعت همزن

به طور کلی انتظار می‌رود که با افزایش دور همزن میزان دنباله‌روی افزایش یابد، چرا که افزایش انرژی باعث افزایش مومنتم ذرات می‌شود و احتمال بازیابی غیرانتخابی ذرات را افزایش می‌دهد و همچنین با افزایش سرعت همزن اندازه حباب‌ها کاهش می‌یابد که باعث افزایش بازیابی آب می‌شود و با توجه به تاثیر مستقیم بازیابی آب بر بازیابی با دنباله‌روی انتظار می‌رود بازیابی با دنباله‌روی افزایش یابد. نتایج جدول ۵ و نیز شکل ۵ نشان می‌دهند که در آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، اثر سرعت همزن بر بازیابی با دنباله‌روی نسبت به سایر متغیرها بسیار کمتر است، اگر چه از نظر آماری در سطح اعتماد ۹۵٪ قابل اغماض نیست.

#### ۴- نتیجه‌گیری

پارامترهای عملیاتی بررسی شده در این تحقیق به ترتیب زیر بر دنباله‌روی موثر هستند: زمان کف‌گیری، درصد وزنی جامد در پالپ، غلظت کفساز و سرعت همزن. در دست داشتن مدل رابطه ۲ این امکان در اختیار می‌گذارد که با کمینه یا بیشینه کردن این معادله نقاط ماکزیمم و مینیمم و شرایط عملیاتی بهینه متناظر را به دست آورد. با انجام بهینه‌سازی بر روی مدل رابطه ۲، در شرایط درصد جامد پالپ=۱۰٪، دور همزن=۹۰۸rpm، غلظت کفساز=۲۰/۲g/t و زمان=۱/۱min، میزان بازیابی مس با دنباله‌روی به حداقل ۰/۶۳٪ و در شرایط درصد جامد پالپ=۳۰٪، دور همزن=۱۲۰۰rpm، غلظت کفساز=۶۰g/ton

و زمان=۴min مقدار بازیابی مس به مقدار بیشینه ۱۱/۸۸٪ رسید. شرایط بهینه برای کمینه شدن و بیشینه شدن بازیابی مس به ترتیب در جدول ۶ و ۷ آمده است. مسلماً در صورتی که کانی هدف در فلوتاسیون، کانی دیگری غیر از کالکوپیریت باشد و بالا رفتن کالکوپیریت به فاز کف مطلوب نباشد، می‌بایست تلاش شود تا شرایط عملیاتی جدول ۶ اعمال گردد. چنانچه بتوان شرایط را برای دنباله‌روی کانی مفید مس فراهم کرد میزان بازیابی مس بدون کلکتور در حدود ۱۲٪ قابل دسترسی است.

جدول (۶): شرایط بهینه برای کمینه شدن بازیابی مس با

##### دنباله‌روی

چگالی پالپ (%)	دور همزن (rpm)	غلظت کفساز (g/ton)	زمان (min)	بازیابی مس (%)
۱۰	۹۰۸	۲۰/۲	۱/۱	۰/۶۳

جدول (۷): شرایط بهینه برای بیشینه شدن بازیابی مس با

##### دنباله‌روی

چگالی پالپ (%)	دور همزن (rpm)	غلظت کفساز (g/ton)	زمان (min)	بازیابی مس (%)
۳۰	۱۲۰۰	۶۰	۴	۱۱/۸۸

#### تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از دانشگاه تربیت مدرس که امکانات و تجهیزات مورد نیاز این تحقیق را فراهم کرده، تشکر نمایند.

## مراجع

[5] P. George, A.V. Nguyen, G.J. Jameson, Assessment of true flotation and entrainment in the flotation of submicron particles by fine bubbles, *Minerals Engineering* 17 (2004) 847–853

[6] S.J. Neethling, J.J. Cilliers, The entrainment factor in froth flotation: Model for particle size and other operating parameter effects, *Int. J. Miner. Process*, 93 (2009) 141–148

[7] YuehuaHu, Wei Sun, Dianzuo Wang, *Electrochemistry of Flotation of Sulphide Minerals*, Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag, BerlinHeidelberg 2009, P23

[1] B.A.Wills, T.J. Napier-Munn, *Mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral*, Elsevier Science & Technology Books, 2006, P 267

[2] P. Somasundran, *Fine particles processing*, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., New York 1980

[3] Zaklina Konopacka • Jan Drzymala, Types of particles recovery—water recovery entrainment plots useful in flotation research, *Adsorption*, 16 (2010) 313–320

[4] J. Yianatos, F. Contreras, Particle entrainment model for industrial flotation cells, *Powder Technology* 197 (2010) 260–267

## A New Method to Determine Entrainment in Collectorless Flotation of Sulphide Minerals

Shabnam Ghobadi<sup>1</sup>, Mahmoud Abdollahy<sup>2,\*</sup>, Mohammad reza Khalesi<sup>3</sup>

1. Tarbiat modares University, Mineral Engineering Dept., (shabnam.gobadi@modares.ac.ir)
2. Tarbiat modares University, Mineral Engineering Dept., (minmabd@modares.ac.ir)
3. Tarbiat modares University, Mineral Engineering Dept., (mrkhalesi@modares.ac.ir)

---

### ABSTRACT

Separation of minerals by flotation is based on the differences of surface properties between the valuable minerals and the gangue. However, some particles float by entrainment mechanism which is a nonselective process. There are different methods to determine the amount of particles which is floated by entrainment. In this paper a new method applied to determine entrainment in collectorless flotation of chalcopyrite of Mazraeh mine. Effect of parameters including impeller speed, pulp density, time, frother amount was investigated for chalcopyrite entrainment. In collectorless flotation, by controlling pulp potential (Eh), the hydrophobicity of particles prevented and so the net fraction of particles moved to concentrate by entrainment were calculated. Under optimum conditions of pulp density = 10%, it was observed that impeller speed = 908rpm, frother amount = 20g/t and flotation time equal to 1.1min, chalcopyrite entrainment minimize to 0.6 %.

---

### ARTICLE INFO

#### Article history

Received: Nov. 21, 2012

Revised: May 21, 2013

Accepted: Sept. 08, 2013

---

#### Key words:

Entrainment

Collectorless flotation

Chalcopyrite

Pulp potential

---

All right reserved.

---

\* Corresponding author