

بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر بازیابی باطله سولفیدی از فاز کف در سلول فلوتاسیون مدار هماتیت سنگ آهن گل گهر

مهدی استادرحیمی^۱، خداکرم غریبی^{۱*}، علی دهقانی^۱، سعید فرخ پی^۲

۱. دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، دانشگاه یزد، ایران

۲. آزمایشگاه منابع زمین، دانشگاه لورین، فرانسه

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۶ آبان ۱۳۹۷

دریافت پس از اصلاح: ۲۶ دی ۱۳۹۷

پذیرش نهایی: ۲۲ تیر ۱۳۹۸

چکیده

فاز کف، نقش مهمی در بازیابی کانی‌ها و عیار کنسانتره تولیدی در ماشین‌های فلوتاسیون دارد. به منظور تعیین مقدار بازیابی از کف، ابتدا یک دستگاه نمونه گیری خاص طراحی و ساخته شد. سپس با تعیین مقدار ذرات ورودی به فاز کف و کنسانتره، مقدار بازیابی از کف محاسبه گردید. بر اساس بررسی‌های انجام شده، ارتفاع کف، مقدار هوادهی و غلظت کف ساز از مهمترین پارامترهای عملیاتی موثر بر بازیابی از فاز کف در سلول فلوتاسیون مدار هماتیت سنگ آهن گل گهر بود. بر اساس نتایج این تحقیق، افزایش هوادهی و مقدار کف ساز رابطه مستقیمی با افزایش بازیابی از کف داشته و افزایش ارتفاع باعث کاهش بازیابی از کف شد. به عنوان مثال هنگامی که هوادهی و مقدار کف ساز به ترتیب برابر ۱۴۶ متر مکعب بر ساعت و ۱۵۰ میلی لیتر در دقیقه در نظر گرفته شد و ارتفاع کف از ۵ سانتی متر به ۳۰ سانتی متر افزایش یافت، منجر به کاهش بازیابی از کف از ۸۴ درصد به ۳۸ درصد شد. همچنین مقدار کانی‌های سولفیدی وارد شده به فاز کف با افزایش ارتفاع کف، هوادهی و مقدار کف ساز افزایش یافت، در حالی که کاهش مقدار کانی‌های سولفیدی در کنسانتره با افزایش ارتفاع کف به علت پدیده برگشت ذرات از فاز کف مشاهده شد. افزایش هوادهی نسبت به افزایش مقدار کف ساز و افزایش ارتفاع کف بیشترین تاثیر را بر افزایش مقدار ذرات حمل شده به فاز کف داشت؛ به طوری که با افزایش مقدار هوادهی از ۴۵ به ۱۴۶ متر مکعب بر ساعت، مقدار ذرات حمل شده به فاز کف بیش از ۱/۵ برابر شد.

کلمات کلیدی:

بازیابی از کف،

ارتفاع کف،

میزان هوادهی،

غلظت کف ساز

* عهده دار مکاتبات

khgharibi@yazd.ac.ir

حقوق ناشر محفوظ است.

فاز کف، نقش مهمی در بازیابی کانی‌ها و عیار کنسانتره تولیدی در ماشین‌های فلوتاسیون دارد. به طور کلی شکل چند وجهی در ارتفاعات بالای کف یا محل زهکشی کامل آب میان حبابها اتفاق می افتد [۱]. بر این اساس می توان گفت سلول فلوتاسیون به دو بخش ناحیه جمع آوری و کف تقسیم می شود که می توان عملکرد هر بخش را به صورت جداگانه بررسی کرد. برخورد بین ذره و حباب در ناحیه جمع آوری رخ می دهد و پس از اتصال ذره به حباب هوا به سمت ناحیه کف حرکت می کند. در ناحیه کف بخشی از مواد راه یافته به فاز کف بازیابی شده و به کنسانتره را می یابد در نتیجه، کاهش بازیابی کل را به دنبال دارد [۲].

رابطه بین بازیابی کل و بازیابی نواحی کف و جمع آوری به صورت فرمول (۱) نوشته می شود [۲-۴]:

$$R_G = \frac{R_C R_f}{1 - R_C(1 - R_f)} \quad (1)$$

R_C : بازیابی ناحیه جمع آوری

R_f : بازیابی از کف

R_G : بازیابی کل سلول

بازیابی از کف به صورت نسبت مقدار کنسانتره به مقدار ذرات وارد شده به فاز کف توسط حباب تعریف می شود [۲]:

$$R_f = \frac{M_C}{M_B} \quad (2)$$

$$M_C = C \cdot X_C - E \cdot R_{Ef} \cdot X_E \quad (3)$$

M_C : دبی جرمی ذرات وارد شده به کنسانتره به وسیله فلوتاسیون حقیقی

M_B : دبی جرمی موجود در کف که به وسیله حباب ها حمل شده است

C : دبی جرمی کنسانتره

X_C : عیار کانی (یا کانی ها) در کنسانتره

R_{Ef} : بازیابی از کف از کانی های دنباله روی

E : مقدار کانی حمل شده به وسیله دنباله روی در فصل مشترک پالپ- کف

X_E : عیار کانی (یا کانی ها) موجود در کنسانتره حاصل از دنباله روی

این رویکرد بر رفتار کلی کف تمرکز می کند، که از آن برای مدل سازی در کارخانه های فلوتاسیون استفاده می کنند. تاکنون تحقیقات متعددی روی بازیابی از کف انجام شده است [۲-۱۲].

با توجه به تحقیقات یاناتوس [۲، ۹ و ۱۲] دبی جرمی کانی های حاصل از دنباله روی در مقایسه با دبی جرمی کانی های حمل شده از طریق فلوتاسیون حقیقی ناچیز بوده و عیار کانی بازیابی شده با فلوتاسیون حقیقی بسیار بیشتر از عیار کانی حاصل از دنباله روی است. با جایگذاری نرخ انتقال جرم به فاز کف در فرمول (۳) و با فرض $C \cdot X_C \gg E \cdot R_{Ef} \cdot X_E$ ، بازیابی از کف برابر است با:

$$R_f = \frac{C \cdot X_C}{B \cdot X_B} \quad (4)$$

انتقال جرم کانی های با قابلیت شناوری (حاصل از فلوتاسیون حقیقی) در فصل مشترک پالپ- کف رابطه مستقیم با ظرفیت حمل حباب (λ_B)، سرعت ظاهری گاز (J_g) و سطح سلول (A_C) در فصل مشترک به صورت رابطه (۵) دارد [۲]:

$$B = \lambda_B J_g A_C \quad (5)$$

B : نرخ انتقال جرم (ton/h)

اولین بار رابطه بازیابی از کف توسط فینچ و دابی [۱۳] در سال ۱۹۹۰ با استفاده از مفهوم ثابت سینتیک ارائه شد (فرمول (۶)):

$$R_f = \frac{k}{k_c} \quad (6)$$

k : ثابت سینتیک کلی (min^{-1})

k_c : ثابت سینتیک ناحیه جمع آوری (min^{-1})

آملونکسن^۲ و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۸ رابطه ای برای محاسبه بازیابی از کف در مقیاس آزمایشگاهی با فرض اینکه اتصال مجدد ذره به حباب وجود ندارد بر اساس بازیابی آب ارائه کردند. هر چند مدل آنها در مقیاس آزمایشگاهی نتایج مطلوبی به دنبال داشت، اما به علت فرض عدم اتصال مجدد ذره به حباب در فاز کف این مدل در مقیاس صنعتی قابل استفاده نمی باشد [۴]. بر اساس تحقیقات انجام شده [۲-۱۲]، بازیابی ناحیه جمع آوری در محدوده ۶۰ تا ۹۹٪ و بازیابی از کف در محدوده ۱۰ تا ۹۰٪ قرار می گیرد. در نتیجه، ممکن است بازیابی نهایی به دلیل عملکرد نامناسب کف به کمتر از ۵۰ درصد برسد [۵]. ناپایداری کف می تواند به عنوان عامل اصلی کاهش بازیابی از کف مطرح باشد، به ویژه در رمق گیر که در آن کف متشکل از مواد معدنی ضعیف بوده که به سرعت سقوط می کنند [۱۱]. بنابراین بازیابی از کف می تواند عملکرد کلی فلوتاسیون را تحت تاثیر قرار دهد.

تعیین مقدار بازیابی از کف به صورت تجربی با مشکلات و خطاهای زیاد همراه است. در چند سانتی متر اول ناحیه کف، بسیاری از ذرات از ناحیه کف جدا شده و به داخل ناحیه جمع آوری سقوط می کنند. در نتیجه به دلیل تغییر محیط از ناحیه پالپ به ناحیه کف (افزایش تراکم حباب)، کاهش سریع سرعت حباب اتفاق می افتد.

با توجه به مطالب بیان شده، مقدار بازیابی از کف متاثر از پایداری کف است. یکی از مهمترین عوامل موثر بر مقدار پایداری کف، حضور ذرات آبران (مقدار و خواص ذرات) می باشد

۲-۲- استفاده از روش موازنه جرم و با در نظر گرفتن

فرضیات

در سال ۱۹۹۸ ساواسی^۵ و همکاران [۱۹] روشی برای برآورد ظرفیت حمل حباب در سلول های صنعتی پیشنهاد کردند. در این روش، نمونه‌ها از زیر فصل مشترک فاز پالپ- کف با استفاده از یک کیف خلاء^۶ به شکل عمودی و افقی جمع آوری می‌شوند. علاوه بر این، با استفاده از یک دستگاه نمونه‌گیری خاص فاقد حباب هوا، نمونه دیگری از زیر سطح کف گرفته شده و با استفاده از روابط موازنه جرم، مقدار ظرفیت حمل حباب محاسبه و بازیابی از کف تخمین زده می‌شود. این روش قابلیت اعتماد خوبی برای اندازه‌گیری ظرفیت حمل حباب در سلول های صنعتی دارد. آنها دریافتند که این روش در محدوده ظرفیت حمل حباب کم (سلول های رفق گیر) یا در محدوده پالپ با عیار بالا (کلینر و ریکلینر) همراه با خطا می‌باشد [۸]. همچنین تجهیزات مورد نیاز برای جمع آوری نمونه ها نسبتا سنگین بوده و به آسانی در اطراف مدار فلوتاسیون قابل حمل نیستند [۲۰].

روش دیگری در سال ۲۰۱۳ توسط الکساندر^۷ و همکارانش [۸] براساس شیوه ساواسی [۱۹] پیشنهاد شد. این روش شامل به دست آوردن یک نمونه با استفاده از میله ماندگی گاز می باشد. فرضیات این روش عبارتند از: (۱) عیار نمونه بالای کف نشان دهنده عیار ذرات متصل شده به حباب است؛ (۲) متوسط عیار ذرات متصل شده به حباب در فاز کف تغییر نمی کند و (۳) عیار ذرات باطله معادل عیار ذرات دنباله‌روی در آب می‌باشد [۸].

۲-۳- اندازه گیری مستقیم ظرفیت حمل حباب

در اینجا از روش‌های ساده برای محاسبات استفاده می‌شود و نیاز به استفاده از فرض های سوال برانگیز، مدل های پیچیده و ایجاد تغییر در کارخانه نیست. اندازه گیری ظرفیت حمل حباب نیاز به دقت زیادی دارد. به این منظور باید فرضیات زیر مد نظر قرار گیرند:

- ۱) نمونه حباب باید نماینده واقعی کل (جامعه) حباب ها باشد؛
- ۲) هیچ ذره ای نباید در هنگام حرکت در بالا برنده^۸ از حباب جدا شود؛

[۶]. کاهش اندازه و افزایش خاصیت آبرانی ذرات باعث افزایش پایداری کف می‌شود [۵ و ۱۴]. همچنین ذرات بسیار آبران، به دلیل افزایش زاویه تماس بیش از حد باعث کاهش پایداری کف می‌شوند [۶]. مقدار و نوع کف ساز نیز بر بازیابی از کف موثر است؛ به عنوان مثال در تحقیق انجام شده روی کانسنگ مس در مقیاس آزمایشگاهی، مشخص شد که افزایش درصد جامد، عیار کانی کالکوپیریت و غلظت کف ساز باعث افزایش پایداری کف می‌شود [۱۱]. افزایش غلظت یونها در محلول می‌تواند موجب تجمع ذرات و در نتیجه، باعث پایداری کف شود [۱۵]. افزایش دما باعث کاهش پایداری کف می‌شود [۱۱]. بازیابی هوا و سرعت ظاهری گاز با پایداری کف رابطه مستقیم دارد [۱۱] و [۱۶]. در دبی هوادهی خیلی زیاد، بازیابی هوا کاهش می‌یابد [۱]. همچنین افزایش زمان ماند کف باعث کاهش بازیابی از کف می‌شود [۸].

۲- روش‌های اندازه‌گیری بازیابی از کف

۱-۲- استفاده از تغییرات عمق کف و بازیابی کلی

فلوتاسیون

این روش ابتدا توسط فتریس^۳ و همکاران [۱۷] (در سال ۱۹۸۷) و سپس ورا^۴ و همکاران [۱۸] (در سال ۱۹۹۹) در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شد. در این روش نمودار عمق کف- ثابت سینتیک رسم شده و سپس یک رابطه خطی بین آنها به دست آمده و با فرض محاسبه ثابت سینتیک ناحیه جمع آوری در لحظه ارتفاع صفر، بازیابی از کف بر اساس رابطه ورا و همکاران [۱۸] به دست می‌آید.

$$R_f = \left\{ 1 - \frac{(FD)}{(FD)_{k=0}} \right\} \quad (7)$$

FD: عمق کف

به طور کلی مقدار بازیابی از کف در این روش بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود؛ زیرا به عنوان مثال در رابطه (۷) سهم بازیابی ذرات در فاز کف در نظر گرفته نشده و همچنین رفتار ناحیه پالپ و کف به طور جداگانه فرض شده است (تعامل بین دو فاز وجود ندارد). اما این فرض همیشه درست نیست به ویژه هنگامی که در یک سیستم، تعداد زیادی از ذرات جدا شده از کف به پالپ برگشت می‌یابد (در این حالت، به احتمال زیاد، ثابت سینتیک فلوتاسیون متفاوت است) [۸].

5. Savassi
6. funnel connected to a vacuum
7. Alexander
8. Riser
۳

3. Feteris
4. Vera

برای اندازه گیری گوگرد از دستگاه LECO [۲۷] و برای آنالیز آهن از روش تیتراسیون استفاده شد [۲۸]. خوراک ورودی به کارخانه، کنسانتره سنگ آهن می باشد وکانی اصلی تشکیل دهنده آن مگنتیت است. گوگرد موجود در کنسانتره عمدتا در کانی پیریت، پیروتیت و کالکوپیریت می باشد. آنالیز شیمیایی مربوط به خوراک معرف در جدول (۱) آورده شده است. بر این اساس متوسط عیار آهن و گوگرد خوراک به ترتیب ۶۵/۷۵ و ۱/۰۲ درصد بود.

جدول (۱) آنالیز شیمیایی مربوط به خوراک معرف

عنصر	Fe	FeO	SiO ₂	P	S
درصد	۶۵/۷۵	۲۴/۰۸	۰/۷۳	۰/۰۳	۱/۰۲

همانطور که بیان شد بازیابی از کف تحت تاثیر عوامل مختلفی می باشد که با توجه به شرایط کارخانه و بررسی های انجام شده، ارتفاع کف، مقدار کف ساز و هوادهی مهمترین پارامترهای عملیاتی موثر بر بازیابی از کف می باشند. در این مطالعه، مقدار هوادهی با استفاده از شیر تنظیم هوا، ارتفاع کف با استفاده از یک سطح سنج و مقدار کف ساز با استفاده از دبی سنج تنظیم شد. برای انجام آزمایش ها، یک طرح آماری به روش فاکتوریل کامل در دو سطح و یک نقطه مرکزی با دو تکرار در نرم افزار Design Expert10 (DX10) انجام شد. پاسخ ها در این طراحی، مقدار کانی های سولفیدی ورودی به فاز کف، مقدار کانی های سولفیدی ورودی به کنسانتره و بازیابی از کف می باشند. شرایط و مشخصات خوراک فلوتاسیون برای هر آزمایش در جدول (۲) آمده است.

جدول (۲) اندازه گیری های انجام شده در قالب طراحی آزمایش ها

ردیف	غلظت کف ساز ml/min	ارتفاع کف cm	دبی هوا m ³ /h	خوراک		
				ton/h	%Fe	%S
۱	۱۵۰	۳۰	۴۵	۹۸	۶۵/۷۱	۱/۱۹
۲	۱۵۰	۵	۱۴۶	۱۱۵	۶۵/۷۵	۱/۰۶
۳	۱۱۰	۱۷/۵	۹۵/۵	۱۰۵	۶۵/۴۲	۰/۹۹
۴	۱۵۰	۵	۴۵	۱۱۰	۶۵/۰۲	۱/۰۹
۵	۷۰	۳۰	۱۴۶	۱۰۵	۶۵/۴۲	۰/۹۳
۶	۷۰	۳۰	۴۵	۱۰۸	۶۶/۱۵	۱/۰۴
۷	۷۰	۵	۴۵	۱۰۸	۶۵/۷۰	۱/۰۹
۸	۱۱۰	۱۷/۵	۹۵/۵	۱۱۰	۶۵/۵۶	۱/۱۰
۹	۱۵۰	۳۰	۱۴۶	۱۱۶	۶۶/۲۰	۰/۹۰
۱۰	۷۰	۵	۱۴۶	۱۰۴	۶۶/۶۰	۰/۸۳

۳) خصوصیات هیدرودینامیکی دستگاه جمع کننده باید تضمین کننده پایداری ذرات یا گاز حامل و همچنین مانع جمع آوری ذرات دنباله روی باشد؛

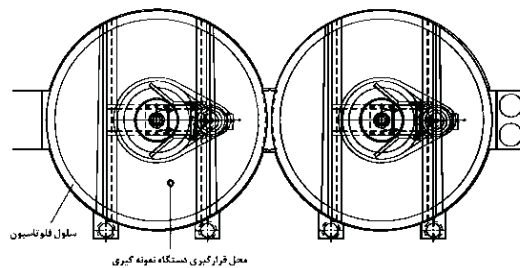
۴) به راحتی در محیط صنعتی قابل استفاده باشد.

در این روش با توجه به ظرفیت حمل حباب و کنسانتره، بازیابی از کف بدست می آید. بر اساس مطالعات انجام شده [۸-۱۱، ۱۶-۲۰، ۲۲-۲۴، ۲۶-۲۴]، دستگاه های مختلفی برای این منظور وجود دارد.

در این مطالعه، از روش سوم (اندازه گیری مستقیم ظرفیت حمل حباب) برای محاسبه بازیابی از کف استفاده شد.

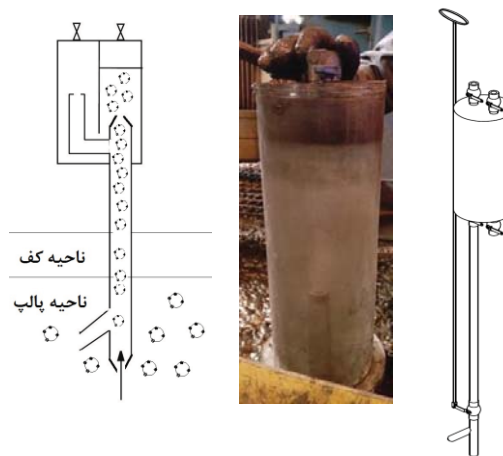
۳- مواد و روش ها

به منظور اندازه گیری بازیابی از کف و بررسی تاثیر بعضی از پارامترهای عملیاتی، از سلول های فلوتاسیون مدار گوگردزایی از کنسانتره سنگ آهن گل گهر استفاده شد. در این کارخانه از PAX (امیل گزنتات پتاسیم) و MIBC به ترتیب، به عنوان کلکتور و کف ساز استفاده می شود. مدار فلوتاسیون کارخانه فوق دارای دو خط موازی به نام خط ۱۰۰ و ۳۰۰ می باشد که به ترتیب از سلول های فلوتاسیون نوع RCS10 و RCS15، ساخت شرکت Metso استفاده شده است. همچنین هر خط شامل ۴ سلول فلوتاسیون می باشد که به صورت سری قرار گرفته است و پالپ خروجی از هر سلول وارد سلول بعدی می شود (هر مدار دارای چهار خروجی کف و یک خروجی پالپ است). بنابراین پالپ خروجی از مدار فلوتاسیون حاوی کنسانتره آهن با سولفور پایین و کف خروجی حاوی کانی های سولفوردار می باشد. آزمایش ها در اولین سلول خط ۱۰۰ که ظرفیت سلول آن ۱۰ متر مکعب است انجام شد. محل نصب دستگاه های اندازه گیری ظرفیت حمل حباب در مدار فلوتاسیون در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) محل قرار گیری دستگاه اندازه گیری ظرفیت حمل حباب در مدار فلوتاسیون (از نمای بالا)

بازیابی از کف با استفاده از روش اندازه‌گیری مستقیم ظرفیت حمل حباب انجام شد. بنابراین با الگوگیری از دستگاه یاناتوس، دستگاهی ساخته و نمونه‌گیری انجام شد (شکل ۲- الف). نازل ورودی دستگاه در حدود ۱۰ سانتی متر پایین تر از فصل مشترک کف- پالپ قرار داده شد (شکل ۲- ب).



(ب)

(الف)

شکل ۲ (الف) دستگاه ساخته شده جهت اندازه‌گیری مستقیم ظرفیت حمل حباب و (ب) نحوه قرارگیری آن در سلول فلوتاسیون

۴- نتایج و بحث

مقادیر بازیابی از کف بر اساس ظرفیت حمل حباب و کنسانتره خروجی سلول با استفاده از رابطه (۴) محاسبه و در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳) نتایج بازیابی از کف برای آزمایش‌های انجام شده

ردیف	B (t/h)	X _B (%)	C (t/h)	X _C (%)	R _f (%)
۱	۱/۱۹	۱۶/۶۷	۰/۳۰	۱۵/۴۵	۲۲/۳۷
۲	۱/۴۲	۱۶/۳۸	۱/۷۴	۱۱/۲۶	۸۴/۲۲
۳	۱/۸۴	۱۶/۱۰	۰/۹۱	۱۴/۴۵	۴۴/۶۷
۴	۰/۹۹	۱۶/۷۵	۰/۹۸	۱۲/۶۷	۷۴/۸۸
۵	۱/۹۴	۱۴/۵۵	۰/۷۷	۱۳/۲۴	۳۶/۱۲
۶	۱/۰۸	۱۵/۰۰	۰/۱۹	۱۴/۹۸	۱۷/۵۷
۷	۰/۹۴	۱۵/۰۷	۰/۷۹	۱۲/۳۵	۶۸/۸۷
۸	۱/۷۷	۱۵/۸۹	۰/۹۱	۱۴/۱۵	۴۵/۷۸
۹	۲/۳۴	۱۶/۱۱	۱/۱۰	۱۳/۱۵	۳۸/۳۷
۱۰	۱/۲۳	۱۴/۷۴	۱/۲۶	۱۱/۷۴	۸۱/۵۹

X_B: عیار گوگرد ذرات ورودی به فاز کف

X_C: عیار گوگرد ذرات ورودی به کنسانتره

B: مقدار ذرات ورودی به فاز کف

C: مقدار ذرات ورودی به کنسانتره

R_f: بازیابی از کف

طبق مطالب بیان شده، بازیابی از کف، نسبت مواد خارج شده از فاز کف به سمت کنسانتره به مواد وارد شده به فاز کف از طریق فلوتاسیون حقیقی می‌باشد. بنابراین پارامترهای ارتفاع کف، میزان کف ساز و حجم هوای ورودی به سلول برای مواد وارد شده و خارج شده به کف نیز مورد بررسی قرار گرفت.

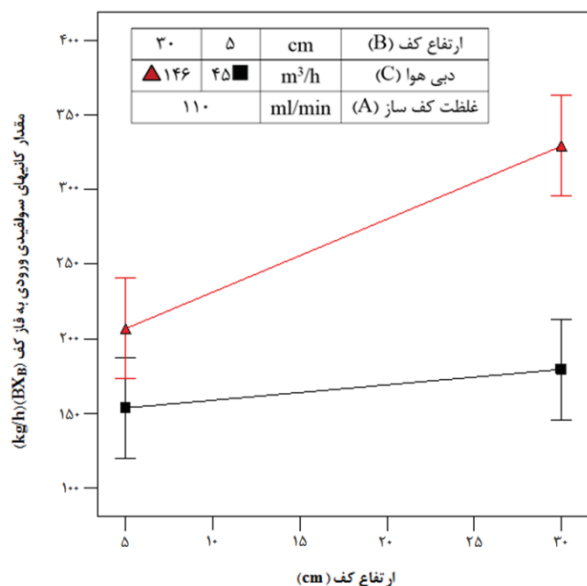
۴-۱- مقدار کانی‌های سولفیدی ورودی به فاز کف (BX_B)

برای محاسبه بازیابی کانی‌های سولفیدی، علاوه بر دبی جرمی ذرات وارد شده به فاز کف، عیار نیز در نظر گرفته می‌شود (تعیین مقدار گوگرد ورودی به فاز کف). نتایج تحلیل واریانس در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴) نتایج تحلیل واریانس بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر مقدار کانی‌های سولفیدی ورودی به فاز کف

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F Value	p-value
مدل	۴۲۹۱۲/۵۳	۶	۷۱۵۲/۰۹	۶۹/۴۰	۰/۰۱۴۳
غلظت کف- ساز	۵۴۳۲/۵۴	۱	۵۴۳۲/۵۴	۵۲/۷۲	۰/۰۱۸۴
ارتفاع کف- B	۱۰۹۷۵/۷۳	۱	۱۰۹۷۵/۷۳	۱۰۶/۵۱	۰/۰۰۹۳
دبی هوا- C	۲۰۵۵۳/۳۶	۱	۲۰۵۵۳/۳۶	۱۹۹/۴۵	۰/۰۰۵۰
AB	۳۶۴/۷۲	۱	۳۶۴/۷۲	۳/۵۴	۰/۳۰۰۷
AC	۹۲۸/۱۱	۱	۹۲۸/۱۱	۹/۰۱	۰/۰۹۵۴
BC	۴۶۵۸/۰۸	۱	۴۶۵۸/۰۸	۴۵/۲۰	۰/۰۲۱۴
Curvature	۷۹۰۲/۵۸	۱	۷۹۰۲/۵۸	۷۶/۶۹	۰/۰۱۲۸
Residual	۲۰۶/۱۰	۲	۱۰۳/۰۵		
Lack of Fit	۷۹/۷۹	۱	۱۲۶/۳۰	۱/۵۸	۰/۴۲۷۵
Pure Error	۴۲۹۱۲/۵۳	۱	۷۹/۷۹		
R-Squared				۰/۹۸۸۶	
Adj R-Squared				۰/۹۶۰۱	
Pred R-Squared				۰/۹۵۳۲	

بر این اساس، هر سه پارامتر بر مقدار ذرات وارد شده به فاز کف موثر بوده و مقدار هوادهی و مقدار کف ساز به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را داشته‌اند. همچنین افزایش هر سه عامل باعث افزایش نرخ جریان ذرات وارد شده به کف می‌شود (شکل ۳). افزایش هوادهی احتمال برخورد ذرات به حباب‌ها را افزایش می‌دهد



شکل ۴) تاثیر بر همکنش مقدار هوادهی و ارتفاع کف بر BX_B

۴-۲- مقدار کانی های سولفیدی ورودی به کنسانتره

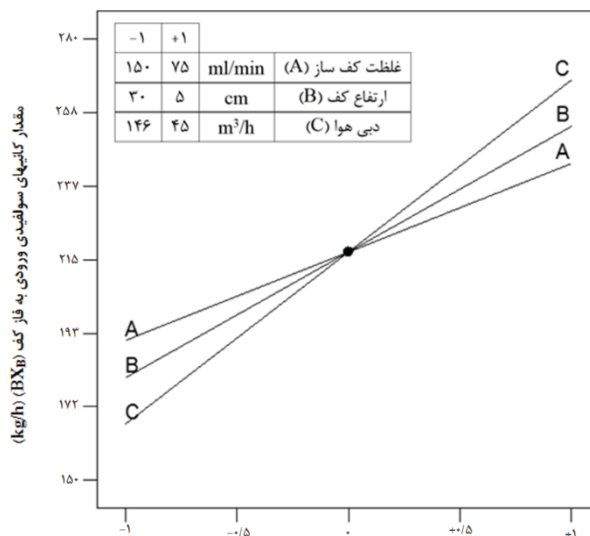
(CX_C)

با توجه به شکل (۵) نرخ هوادهی و ارتفاع کف به ترتیب باعث افزایش و کاهش نرخ جریان ذرات خارج شده از کف به سمت کنسانتره می شود. غلظت کف ساز نیز رابطه مستقیم با افزایش نرخ خارج شدن ذرات از کف دارد که یکی از دلایل آن افزایش پایداری کف است. همچنین آمار استنباطی نشان داد ضریب همبستگی مناسب است.

۴-۳- بازیابی از کف (R_f)

با توجه به نتایج تحلیل واریانس (جدول ۵)، هر سه پارامتر بررسی شده در سطح اعتماد ۹۵٪ از لحاظ آماری موثر می باشند. به طوری که مقدار ارتفاع کف و مقدار کف ساز به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر مقدار بازیابی از کف داشته اند. افزایش نرخ هوادهی و غلظت کف ساز باعث افزایش بازیابی از کف می شود البته شدت تاثیر غلظت کف ساز کمتر از نرخ هوادهی است. با توجه به شکل (۶)، بازیابی از کف به شدت تحت تاثیر ارتفاع کف قرار دارد و افزایش ارتفاع کف موجب کاهش بازیابی از کف می شود.

بنابراین مقدار اتصال ذرات به حباب و در نتیجه میزان ذرات وارد شده به فاز کف بیشتر خواهد شد. کف سازها کشش سطحی مایع را کاهش داده و با افزایش مقدار آن اندازه حباب های هوا کوچکتر می شود، بنابراین احتمال برخورد و اتصال ذره به حباب افزایش یافته و در نتیجه، حضور ذرات جامد در فاز کف بیشتر خواهد شد.



شکل ۳) تاثیر عوامل مختلف بر مقدار کانیهای سولفیدی ورودی به فاز کف (BX_B)

با توجه به اینکه نرخ جدا شدن ذرات در فاز کف با افزایش ارتفاع کف زیاد می شود، شاید مجدداً ذرات خارج شده از فاز کف به حباب ها متصل شده و وارد فاز کف شوند [۶]. بنابراین علت افزایش نرخ جریان ذرات وارد شده به کف را می توان به افزایش ارتفاع کف نسبت داد. همچنین مشاهده گردید هنگامی که حجم هوا بیشتر می شود، مقدار حجم ذرات وارد شده به فاز کف در ارتفاع زیاد کف به مراتب بیشتر از حالتی است که ارتفاع کف پایین باشد؛ شاید ذرات برگشتی از کف^۹ با افزایش ارتفاع کف بیشتر شده و هنگامی که حجم هوا زیاد می شود، احتمال اتصال افزایش و در نتیجه مقدار ذرات وارد شده به فاز کف در حجم هوادهی بالا بیشتر می شود (شکل ۶).

همانطور که گفته شد افزایش ارتفاع کف باعث افزایش مقدار ذرات ورودی به کف و کاهش ذرات خروجی فاز کف به کنسانتره به دلیل پدیده برگشت ذرات از فاز کف می‌شود. بنابراین کاهش بازیابی از کف را به دنبال دارد. همچنین نتایج نشان داد نرخ هوادهی و مقدار کف ساز تاثیر بارزی بر مقدار ذرات وارد شده به فاز کف دارد. از آنجا که با توجه به جدول (۵)، تاثیر این دو پارامتر نسبت به ارتفاع کف کمتر می‌باشد، با شدت کمتری باعث تغییر بازیابی از کف می‌شود.

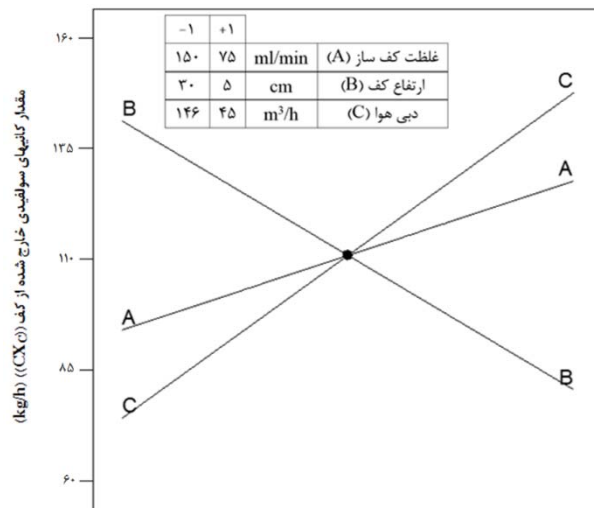
جدول ۵) نتایج تحلیل واریانس بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر

بازیابی از کف

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F Value	p-value
مدل	۵۱۵۵/۹۵	۵	۱۰۳۱/۱۹	۴۶۱۷/۷۷	<۰/۰۰۰۱
غلظت کف ساز A-	۳۴/۸۵	۱	۳۴/۸۵	۱۵۶/۰۷	۰/۰۰۱۱
ارتفاع کف-B	۴۷۱۱/۸۸	۱	۴۷۱۱/۸۸	۲۱۱۰۰/۲۵	<۰/۰۰۰۱
دبی هوا-C	۳۸۶/۷۹	۱	۳۸۶/۷۹	۱۷۳۲/۰۷	<۰/۰۰۰۱
AC	۵/۹۵	۱	۵/۹۵	۲۶/۶۷	۰/۰۱۴۱
BC	۱۶/۴۸	۱	۱۶/۴۸	۷۳/۸۰	۰/۰۰۳۳
Curvature	۹۹/۹۱	۱	۹۹/۹۱	۴۴۷/۳۹	۰/۰۰۰۲
Residual	۰/۶۷	۳	۰/۲۲		
Lack of Fit	۰/۰۴۹	۲	۰/۰۲۴	۰/۰۳۹	۰/۹۶۲۹
Pure Error	۰/۶۲	۱	۰/۶۲	۴۶۱۷/۷۷	
Cor Total	۵۲۵۶/۵۳	۹	۱۰۳۱/۱۹	۱۵۶/۰۷	
R-Squared					۰/۹۸۰۹
Adj R-Squared					۰/۹۵۶۹
Pred R-Squared					۰/۹۳۰۷

۵- نتیجه گیری

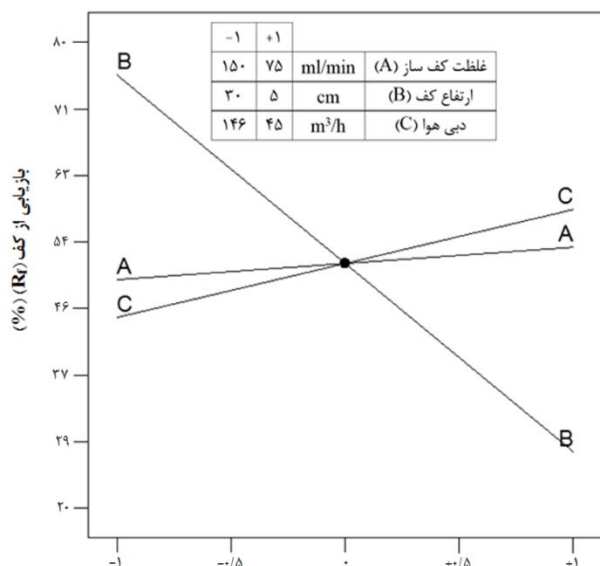
بازیابی از کف یکی از مهمترین عوامل موثر بر افزایش بازیابی سیستم فلوتاسیون بوده که وابسته به پارامترهای مختلف مانند ذرات ورودی و خروجی فاز کف است. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق، مقدار هوادهی، غلظت کف ساز و ارتفاع کف بودند. نتایج به دست آمده، نشان داد حداکثر بازیابی از کف ۸۴٪ و حداقل ۱۸٪ می‌شود که نشان از تاثیر قابل توجه بازیابی از کف در راندمان کلی فلوتاسیون دارد؛ افزایش مقدار هوادهی و کف ساز رابطه مستقیمی با افزایش بازیابی از کف دارد که شدت تاثیر هوادهی بیشتر از مقدار کف ساز بود.



شکل ۵) تاثیر عوامل مختلف بر مقدار کانیهای سولفیدی خارج شده از کف (CX_C)

۳-۴- بازیابی از کف (R_f)

با توجه به نتایج تحلیل واریانس (جدول ۵)، هر سه پارامتر بررسی شده در سطح اعتماد ۹۵٪ از لحاظ آماری موثر می‌باشند. به طوری که مقدار ارتفاع کف و مقدار کف ساز به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر مقدار بازیابی از کف داشته‌اند. افزایش نرخ هوادهی و غلظت کف ساز باعث افزایش بازیابی از کف می‌شود البته شدت تاثیر غلظت کف ساز کمتر از نرخ هوادهی است. با توجه به شکل (۶)، بازیابی از کف به شدت تحت تاثیر ارتفاع کف قرار دارد و افزایش ارتفاع کف موجب کاهش بازیابی از کف می‌شود.



شکل ۶) تاثیر عوامل مختلف بر بازیابی از کف (R_f)

[9] Yianatos. J.B, Bergh .L.G, Cortés .G.A, 1998. Froth zone modeling of an industrial flotation column. *Minerals Engineering*, 11(5), 423-435

[10] Tsatouhas.G, Grano. S.R, Vera. M, 2006. Case studies on the performance and characterization of the froth phase in industrial flotation circuits, *Minerals Engineering* 19, 774-783

[11] Farrokhpay.S, 2011. The significance of froth stability in mineral flotation - A review. *Advances in Colloid and Interface Science* 166, 1-7

[12] Yianatos. J.B., Vinnett, L., Carrasco, C., Alvarez-Silva, M., 2015. Effect of entrainment in bubble load measurement on froth recovery estimation at industrial scale. *Minerals Engineering*, 72, 31-35

[13] Finch, J.A., Dobby, G.S., 1990. *Column Flotation*, first ed. Pergamon Press, London, UK.

[14] Achaye.I, 2018. Effect of particle properties on froth stability. Ph.D Thesis, University of Cape Town, South Africa, Cape Town

[15] Farrokhpay. S, Zanin, M 2011. Effect of water quality on froth stability in flotation. *Chemeca 2011, Engineering a Better World Sydney*, New South Wales, Australia, 18-21

[16] Xuan. Qu, Wang. L, Nguyen .V, 2013. Correlation of air recovery with froth stability and separation efficiency in coal flotation. *Minerals Engineering* 41, 25-30

[17] Feteris, S.M., Frew, J.A., Jowett, A., 1987. Modelling the effect of froth depth in flotation. *International Journal of Mineral Processing* 20, 121-135.

[18] Vera, M.A., Franzidis, J.P., Manlapig, E.V., 1999. Simultaneous determination of collection zone rate constant and froth zone recovery in a mechanical flotation environment. *Minerals Engineering*, 12, 1163-1176.

[19] Savassi, O.N., Alexander, D.J., Manlapig, E.V., Franzidis, J.P., 1998. An empirical model for entrainment in industrial flotation plants. *Minerals Engineering*, 11, 243-256

[20] Runge. K, Crosbie. R, Rivett. T, McMaster. J, 2010. An evaluation of froth recovery measurement techniques. XXV international mineral processing congress, 2313-2324

[21] Bhondayi.C, 2010. Measurements of particle loading on bubbles in froth flotation. Ph.D Thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg South Africa

[22] Seaman. D.R, Franzidis. J.P, Manlapig. E.V., 2004. Bubble load measurement in the pulp zone of industrial flotation machines—a new device for determining the froth recovery of attached particles. *International Journal of Mineral Processing* 74, 1-13

[23] Falutsu, M., Dobby, G., 1992. Froth performance in commercial sized flotation columns. *Minerals Engineering* 5, 1207-1223.

[24] Bhondayi. C, Moys. M.H, 2011. Determination of sampling pipe (riser) diameter for a flotation bubble load measuring device. *Minerals Engineering* 24, 1664-1676

همچنین مشخص گردید، بازیابی از کف به شدت متاثر از ارتفاع کف است و افزایش بازیابی از کف با افزایش ارتفاع کف رابطه معکوسی دارد، به طوری که اگر ارتفاع کف را از ۳۰ سانتی متر به ۵ سانتی متر کاهش یابد، بازیابی از کف می تواند حدود ۴۰٪ افزایش یابد. تاثیر عوامل بیان شده بر ذرات حمل شده به کنسانتره شبیه بازیابی از کف می باشد با این تفاوت که شدت تاثیر ارتفاع کف کمتر و مقدار کف ساز بیشتر شده است. افزایش هوادهی نسبت به افزایش مقدار کف ساز و افزایش ارتفاع کف بیشترین تاثیر را بر افزایش مقدار ذرات حمل شده به فاز کف دارد به عنوان مثال هنگامی که هوادهی سه برابر می شود (از ۴۵ به ۱۴۶ متر مکعب بر ساعت) مقدار ذرات حمل شده به فاز کف بیش از یک و نیم برابر خواهد شد.

تشکر و قدردانی

از مدیریت و پرسنل محترم پژوهشکده سنگ آهن و فولاد شرکت گل گهر و همچنین پرسنل محترم خط فراوری هماتیت آن شرکت تشکر و قدردانی می شود.

منابع:

[1] Gorain, B, Oravainen, H., Allenius, H., Peaker, R., Weber, A., and Tracyzk, F., 2009, *Mechanical froth flotation cells*, in *Froth Flotation A Century of Innovation*. Edited Fuerstenau, M.C., Jameson, G.J., Yoon, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, SME, Colorado, pp. 709-710

[2] Yianatos. J.B, Moys. M.H, Villanueva. A. 2008. Froth recovery of industrial flotation cells. *Minerals Engineering* 21, 817- 825

[3] Amelunxen.P., Sandoval, G., Barriga, D, Amelunxen, R., 2014. The implications of the froth recovery at the laboratory scale. *Minerals Engineering* 66-68, 54- 61

[4] Amelunxen.P., LaDouceur, R., Amelunxen, R., Young, C., 2018. A phenomenological model of entrainment and froth recovery for interpreting laboratory flotation kinetics tests. *Minerals Engineering* 125, 60- 65

[5] Vera. M.A, Z.TMathe. Z.T, Franzidis. J.P, Harris. M.C, Manlapig.E.V, O'Connor.C.T, 2002. The modelling of froth zone recovery in batch and continuously operated laboratory flotation cells. *International Journal of Mineral Processing* 64, 135-151

[6] Ata. S, 2012. Phenomena in the froth phase of flotation- A review. *International Journal of Mineral Processing* 102-103, 1-12

[7] Mathe. Z.T, Harris. M.C, O'Connor. C.T, 2000. A review of methods to model the froth phase in non-steady state flotation systems. *Minerals Engineering*, 13(2), 127-140

[8] Alexander. D.J, Franzidis. J.P, Manlapig. E.V, 2003. Froth recovery measurement in plant scale flotation cells. *Minerals Engineering* 16, 1197-1203

- [25] Rahman.R.M, Ata. S, Jameson. G.J, 2013. Froth recovery measurements in an industrial flotation cell. Minerals Engineering 53, 193–202
- [26] Moys. M.H, Yianatos. J, Larenas. J, 2010. Measurement of particle loading on bubbles in the flotation process. Minerals Engineering 23, 131–136
- [27]CS230 Carbon/Sulfur determinator: Instruction manual, 2008. www.leco.com. LECO Corporation
- [28] Iron ores — Determination of total iron Content, Titrimetric method after tin(II) chloride reduction ISO 2597-1:2006(E). 2006. International Organization for Standardization Provided by IHS under license with ISO

Investigating the effect of operating parameters on the froth recovery of sulfide minerals in flotation cell of hematite circuit of Gol Gohar Iron Ore

Mahdi Ostadrahimi¹, Khodakaram Gharibi^{1*}, Ali Dehghani¹, Saeed Farrokhpay²

1. Mining & Metallurgy Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran
2. GeoResources Laboratory, University of Lorraine, France

ABSTRACT

The froth phase plays an important role in the recovery of minerals and the grade of concentrates in flotation machines. In the present work, the concept of bubble load was used to calculate the froth recovery. The results showed that the froth depth, aeration, and frother concentration are the most important operational parameters affecting the froth recovery in the flotation cell of hematite circuit of Gol Gohar Iron Ore. The results showed that increasing the aeration and frother concentration, and reducing the froth depth were caused to increase the froth recovery; For example, when aeration, frother and froth depth are respectively 146 m³/h, 150 ml/min and 5 cm, the froth recovery is more than 84%. Also, increasing the depth froth, aeration, and frother concentration were caused to increase the amount of sulfide minerals in the froth phase. Moreover increasing the aeration and frother concentration, and reducing the froth depth were caused to increase the amount of sulfide minerals in the concentrate. The aeration was the most effective parameter on the amount of carried particles to froth phase, as by increasing the aeration from 45 to 146 m³/h, the amount of carried particles to froth phase increased more than 1.5 times.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: November 17, 2018

Received in revised form: January 13, 2019

Accepted: July 13, 2019

Key words:

Froth Recovery,
Aeration,
Depth Froth,
Frother Concentration