

## چالش‌های کاربرد صنعتی سلول فلوتاسیون ستونی در مرحله پرعیارکنی اولیه در مجتمع مس میدوک

مهدی محمدی نژاد بهار<sup>۱</sup>؛ احسان ارغوانی<sup>۱</sup>؛ عبید فرشید<sup>۱</sup>؛ محمدرضا روزبهی<sup>۲</sup>؛ محمدرضا مهدوی<sup>۲</sup>؛  
صمد بنیسی<sup>۳\*</sup>

۱- مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی کاشی گر، دانشگاه شهید باهنر کرمان Bahar@kmpc.ir  
۲- مجتمع مس شهرباک، کرمان، Mahdavi\_a@nicico.com  
۳- گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان Banisi@mail.uk.ac.ir

(دریافت ۸ بهمن ۱۳۹۳، پذیرش ۱۷ فروردین ۱۳۹۴)

### چکیده

در بخش پرعیارکنی اولیه مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ مس شهر بابک (کرمان)، ۵ عدد سلول ستونی (CISA) هر کدام به قطر ۴ متر و ارتفاع ۱۲ متر مجهز به سیستم حباب‌سازی نوع مخلوط کننده ثابت، استفاده شده است. بر اساس طرح اولیه، این ستون‌ها باید خوراکی برابر با ۶۲۵ تن بر ساعت با دانه بندی ۸۰٪ عبوری از اندازه ۹۰ میکرون و درصد جامد ۲۸ را دریافت کرده و ۸۸٪ از محصول نهایی کارخانه تغلیظ (برابر با ۲۲ تن بر ساعت) با عیار ۳۲٪ مس را تولید کنند. اما به دلیل مشکلات مکانیکی و فرآیندی این امر هرگز محقق نشد و این ستون‌ها از زمان راه‌اندازی کارخانه تغلیظ این مجتمع (سال ۱۳۸۴) خارج از مدار بودند. در سال ۱۳۹۱ تلاش‌های جدیدی با هدف بازگردانی این ستون‌ها به مدار انجام شد. نتایج مطالعات گسترده نشان داد که گرفتگی حباب‌سازها در اثر راه‌یابی مقدار اندکی (حدود ۲ کیلوگرم) ذرات درشت‌تر از ۲/۵ سانتی‌متر به داخل حباب‌سازها، اصلی‌ترین دلیل عدم فعالیت این ستون‌ها بوده است. با انجام تغییراتی در لوله ورودی پمپ برگشت باطله این ستون‌ها و جلوگیری از ورود ذرات درشت به داخل حباب‌سازها عملکرد ستون‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. تحقیقات انجام شده نشان داد که برای داشتن عملکرد پایدار در ستون‌های پرعیارکنی اولیه، نرخ خوراک ورودی به این ستون‌ها باید از ۱۲۵ تن بر ساعت (طراحی) به ۷۰ تن بر ساعت و سرعت ظاهری هوای ورودی نیز از ۱/۹ (طراحی) به ۰/۶ cm/s کاهش پیدا کند. نتایج حاصل از پایش مداوم ۱۰ روز عملکرد پیوسته این ستون‌ها نشان داد که ظرفیت حمل در این ستون‌ها ۰/۲۳ g/min/cm<sup>2</sup> است که به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از میزان ظرفیت حمل طراحی (۰/۵۸ g/min/cm<sup>2</sup>) است. ماندگی گاز در این ستون‌ها نیز قبل از انتقال به جریان آشفته که با جوشش کف همراه است، کمتر از ۱۰٪ به‌دست آمد. متوسط طول عمر حباب‌سازها نیز ۲۰ روز به‌دست آمد که به‌طور قابل توجه‌ای پایین است. متوسط بازبایی و عیار مس کنسانتره این ستون‌ها نیز به ترتیب ۶۸٪ و ۳۲٪ به‌دست آمد. نرخ سایش بالای حباب‌سازها، تعمیر و نگهداری بالا، نیاز به پایش مداوم و ناپایداری عملکرد این ستون‌ها باعث شده است که مدیران این کارخانه از ستون‌های فلوتاسیون در بخش پرعیارکنی اولیه استفاده نکنند.

### کلمات کلیدی

فلوتاسیون ستونی، پرعیارکنی اولیه، حباب‌ساز، میدوک، عمر حباب‌ساز.

\*نویسنده مسئول مکاتبات

## ۱- مقدمه

سیستم تولید حباب (حباب ساز) در مقیاس آزمایشگاهی وجود دارد را نمی توان از حباب سازهای سلول های ستونی صنعتی نیز انتظار داشت.

کارخانه تغلیظ مس میدوک که در جنوب شرقی ایران قرار دارد، اولین کارخانه ای است که از سلول ستونی در بخش پرعیارکنی اولیه استفاده کرده است. این ستون ها به خاطر مشکلات موجود که در این تحقیق به آن ها اشاره می شود از زمان راه اندازی این کارخانه (۱۳۸۴) به طور پیوسته و پایدار وارد مدار نشدند. مطالعات گزارش شده بر روی این ستون ها، بر اساس فعالیت کوتاه مدت (کمتر از یک ماه) این ستون ها بوده است [۱۱-۷، ۴]. این تحقیق نیز تلاشی دوباره برای بازگرداندن این ستون ها به مدار است.

### ۱-۲- عوامل تأثیرگذار بر استفاده از سلول ستونی در بخش پرعیارکنی اولیه

متخصصان فرآوری مواد معدنی، هنگام انتخاب مدار فلوتاسیون با گزینه های زیادی روبه رو هستند، زیرا انواع مختلفی از ماشین های فلوتاسیون از جمله سلول های مکانیکی، سلول های ستونی، سلول های پنوماتیکی و سلول های فلوتاسیون سریع در این زمینه کاربرد دارند. در بسیاری از موارد، خصوصیات ماده معدنی و در بعضی موارد دیگر، ملاحظات اقتصادی و عملکرد نیروی انسانی مشخص کننده مناسب بودن یا نبودن تجهیزات مورد استفاده است. در طی مراحل طراحی فرآیند، یک مهندس، مسئول انتخاب تجهیزات با استفاده از روش های سیستماتیک و انطباق این انتخاب با سود و زیان تکنیکی، ملاحظات اقتصادی و آنالیزهای ریسک در مقابل سود اقتصادی است [۳]. توجه فنی استفاده از سلول ستونی بسیار مهم و اغلب اوقات تعیین آن بسیار مشکل است، سلول های ستونی در اغلب موارد سودهای متالورژیکی بالایی (به خاطر انتخاب پذیری بالا) فراهم می آورند و می توان به وسیله آن ها مدارهای ساده ای را طراحی کرد. در مقابل، اگر تنوع در ترکیب یا درجه آزادی ماده معدنی یا پارامترهای عملیاتی در مرحله طراحی مدار در نظر گرفته نشود، می تواند تأثیر سوء روی عملکرد متالورژیکی بگذارد.

مزیت های متالورژیکی سلول ستونی را می توان در جنبه های مختلفی از جمله افزایش عیار کنسانتره و بازیابی و کاهش میزان مصرف مواد شیمیایی نشان داد. در بعضی موارد نیز این مزیت ها می تواند به خوبی واضح نباشند. در مواردی نیز ممکن است قسمتی از مواد با ارزش به طور مستقیم در مرحله

### ۱-۱- پیشینه و وضعیت موجود سلول ستونی در صنعت فرآوری

سلول ستونی برای اولین بار توسط Wheeler در سال ۱۹۶۶ به صنعت معرفی شد [۱]. اما مطالعات وسیع و گسترده در سال ۱۹۸۰ روی آن انجام شد. این سلول ها توانایی تولید کنسانتره با عیار بالاتر نسبت به انواع دیگر ماشین های فلوتاسیون را دارند. توانایی این ستون ها برای کار کردن در ارتفاع کف بالا و همچنین استفاده از آب شستشوی کف، دلایل اصلی برای بهبود عملکرد متالورژیکی در آن ها بوده است [۲].

امروزه در صنعت، استفاده از سلول ستونی در بخش پرعیارکنی نهایی به خوبی پذیرفته شده است، اما استفاده از این ستون ها در بخش پرعیارکنی اولیه به خوبی تأیید نشده است. این موضوع نیز به طور کلی بی دلیل نیست، موارد مختلفی وجود دارد که نشان می دهد سلول های ستونی به کار رفته در بخش پرعیارکنی اولیه، عملکرد متالورژیکی مورد انتظار را برآورده ن ساخته اند. دلایل آن نیز از یک مورد به مورد دیگر متفاوت است اما به طور کلی می توان دلایل اصلی آن را مربوط به تعیین اندازه نادرست، موقعیت نامناسب آن در مدار و عدم فهم صحیح از چگونگی ادغام سلول ستونی با مدارهای موجود یا مدارهای تازه طراحی شده، دانست [۳].

سلول های ستونی نصب شده در سرتاسر جهان در چند سال اخیر، این موضوع را تأیید می کند که اگر این تجهیزات به صورت مناسب به کار برده شوند، بسیار سودمند هستند. به عنوان مثال، فلوتاسیون معکوس سیلیس از کانه آهن در آمریکای جنوبی و فلوتاسیون فسفات، به وسیله سلول ستونی در بخش پرعیارکنی اولیه با موفقیت انجام شده است. در هر دو مورد نرمه گیری از خوراک، قبل از ورود به سلول های ستونی انجام شده است. این یک موضوع حساس است زیرا در برخی موارد، مقدار بالای رس دلیل اصلی عدم موفقیت در به کار بردن سلول ستونی در بخش پرعیارکنی اولیه بوده است. به خاطر همین مشکل، در مطالعات جدیدی که بر روی سلول ستونی به کار رفته در بخش پرعیارکنی اولیه انجام شده، موفقیت جدیدی گزارش نشده است [۴]. در زمینه استفاده از سلول ستونی در بخش پرعیارکنی اولیه در مقیاس آزمایشگاهی در زمینه بازیابی طلا [۵] و مس [۶] موفقیت هایی به دست آمده است اما این بدان معنا نیست که می توان در مقیاس صنعتی نیز به همان میزان به موفقیت دست یافت، زیرا آن عملکرد ایده آلی که در

شیمیایی در پالپ می‌شود. محیط ساکنی که در ستون‌ها وجود دارد باعث می‌شود تا شرایط مناسبی برای اضافه کردن مواد شیمیایی به‌طور مستقیم به داخل ستون فراهم نباشد. آماده‌سازی خوراک اغلب زمانی پیشنهاد می‌شود که نیاز است انرژی به سیستم وارد شود تا نرمه‌ها را پراکنده کرده و سطح مواد معدنی را شستشو دهد یا به عبارت دیگر، مواد معدنی را برای فلوتاسیون آماده کند. در نتیجه، ضروری است که از یک تانک همزن‌دار برای آماده‌سازی خوراک استفاده شود.

#### ۱-۳- کارخانه تغلیظ مس میدوک

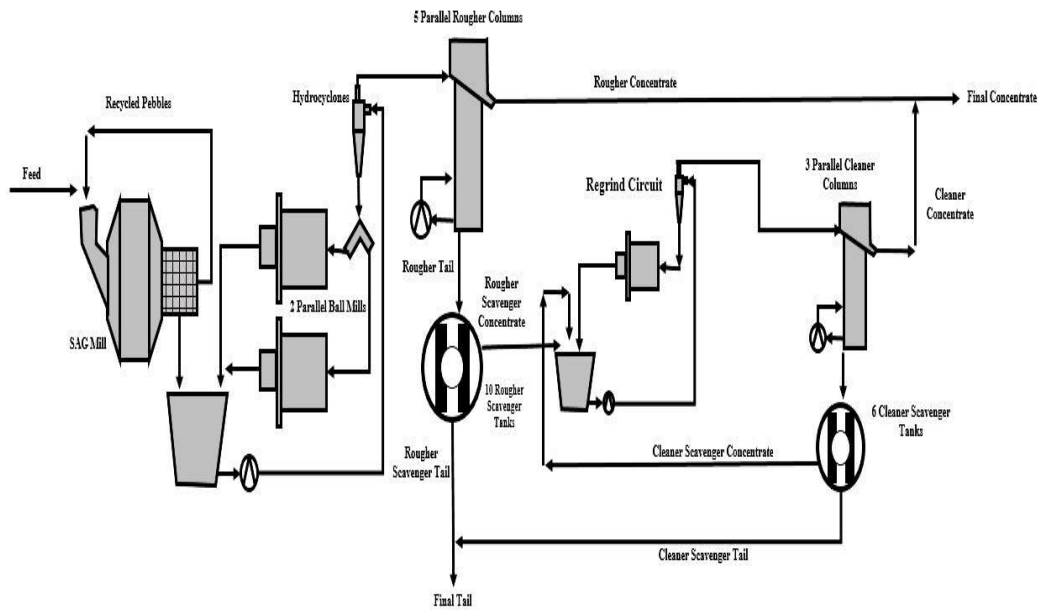
کارخانه تغلیظ مس میدوک، در جنوب شرقی ایران و در شهرستان شهر بابک قرار گرفته است و طبق طراحی اولیه روزانه ۱۸۰۰۰ تن سنگ معدن با عیار متوسط ۱/۴۹٪ مس که اغلب از جنس کالکوپیریت است را پذیرفته و کنسانتره‌ای با عیار ۳۲٪ تولید می‌کند. کارخانه مس میدوک یکی از معدود کارخانه‌های فلوتاسیون مس است که در آن از سلول ستونی در بخش پرعیارکنی اولیه استفاده شده است. در این کارخانه از یک سنگ‌شکن ژیراتور برای کاهش اندازه سنگ خروجی از معدن به کوچکتر از ۲۰ cm استفاده شده است. مدار آسیابکنی این مجتمع از یک آسیاب نیمه خودشکن و دو آسیاب گلوله‌ای که به‌صورت مدار بسته با یک دسته ۱۰ تایی هیدروسیکلون قرار دارند، تشکیل شده است (شکل ۱). بر اساس طراحی، سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه با اندازه ۸۰٪ عبوری از سرند ۹۰ میکرون وارد تانک آماده‌ساز مرحله پرعیارکنی اولیه شده و پس از آن، پالپ وارد توزیع‌کننده‌ای می‌شود که خوراک ۵ عدد سلول ستونی CISA (هر کدام به قطر ۴ متر و ارتفاع ۱۲ متر) که به‌صورت موازی با هم کار می‌کنند را تأمین می‌کند. طبق طراحی اولیه کارخانه، مرحله پرعیارکنی اولیه باید قسمت عمده کنسانتره نهایی کارخانه (۸۸٪ کنسانتره نهایی) با عیار ۳۲٪ را تولید کند. باطله این ستون‌ها وارد بخش رمق‌گیری که از ۱۰ عدد سلول تانکی (RCS50) تشکیل شده است، می‌شود. مرحله پرعیارکنی نهایی نیز از ۳ عدد سلول ستونی نوع CISA (هر کدام به قطر ۳/۲ متر و ارتفاع ۱۲ متر) و ۶ عدد سلول تانکی (RCS50) به‌عنوان رمق‌گیری پرعیارکنی نهایی، تشکیل شده است. طبق طراحی اولیه، عیار مس تولیدی از مرحله پرعیارکنی نهایی، ۲۸٪ مس است که ۱۲٪ وزنی کنسانتره نهایی را تشکیل می‌دهد. کنسانتره سلول‌های تانکی رمق‌گیر وارد یک آسیاب گلوله‌ای خردایش مجدد می‌شود که به‌صورت مدار بسته با هیدروسیکلون‌های ثانویه قرار دارند [۴].

پرعیارکنی اولیه با عیار کنسانتره بالا جدا شده و این باعث شود که اندازه مراحل بعدی فلوتاسیون به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کند.

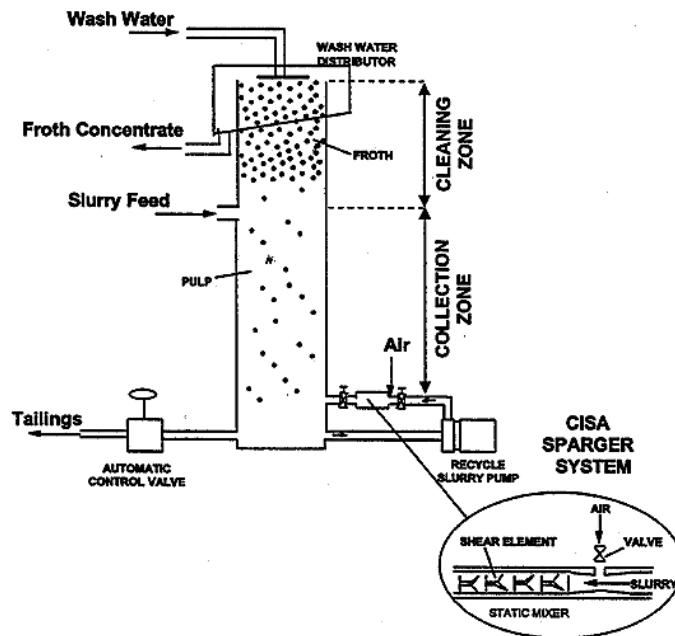
پارامترهای کانی‌شناسی ماده معدنی نقش مهمی در طراحی مدار دارد. دانستن جزئیات ترکیب ماده معدنی، گوناگونی مؤلفه‌های کانی‌شناسی و تأثیری که روی درجه آزادی می‌گذارند، ضروری است. تجربه نشان می‌دهد درجه آزادی ماده معدنی مهم‌ترین پارامتر در تعیین مناسب بودن استفاده از سلول ستونی در قسمت پرعیارکنی اولیه است.

خاصیت انتخاب‌پذیری که در ستون‌ها وجود دارد باعث شده است تا بازیابی ذرات ترکیبی و به خصوص ذراتی که در آن‌ها قسمت بارزش به‌صورت ذرات بسیار ریز در داخل یک رگه گانگی درشت قرار دارند، بسیار دشوار باشد. بسته به نسبت ذرات آزاد شده به قسمت مخلوط (ترکیبی) و سطح بازیابی مورد نظر، ممکن است از روی احتیاط یک مرحله رمق‌گیری توسط سلول‌های مکانیکی وجود داشته باشد. اگر عیار خوراک مدار فلوتاسیون بسیار متغیر باشد، ضروری است که مدار طوری طراحی شود که تمامی دامنه تغییرات را پوشش دهد. مشکلی که اغلب وجود دارد این است که طراحی‌ها بر اساس نرخ بار ورودی و عیار، بدون در نظر گرفتن دامنه نوسانات آن‌ها انجام می‌شود. یکی دیگر از موضوعات مهم، مقدار نرمه در خوراک است زیرا نرمه باعث افزایش ویسکوزیته پالپ و حساس‌تر شدن و عدم عملکرد مناسب ستون می‌شود. در یک شرایط متعادل عملیاتی، کاهش ظرفیت حمل حباب باعث کاهش ظرفیت ستون می‌شود.

حباب‌سازها نقش بسیار مهمی در عملکرد ستون‌ها دارند. باید به این موضوع توجه داشت که در مرحله پرعیارکنی اولیه اندازه ذرات نسبت به مراحل دیگر فلوتاسیون درشت‌تر است و اکثر حباب‌سازها در این شرایط عملکرد مناسبی نداشته و نرخ سایش در آن‌ها افزایش پیدا می‌کند. نتایج تحقیقات نشان داد که اصلی‌ترین دلیل برای عدم استفاده از سلول‌های ستونی بخش پرعیارکنی اولیه مجتمع مس میدوک، عمر بسیار کوتاه حباب‌سازهای آن‌ها است. زیرا تمامی تلاش‌ها برای بهبود عملکرد ستون‌ها بدون وجود سیستم حباب‌سازی مناسب بی‌فایده خواهد بود. طرز کار معمول در مورد استفاده از مواد شیمیایی، اضافه کردن آن به‌طور مستقیم به خود سلول مکانیکی است. همزن مورد استفاده در این سلول‌ها که وظیفه مخلوط کردن پالپ را بر عهده دارد، باعث پراکنده شدن مواد



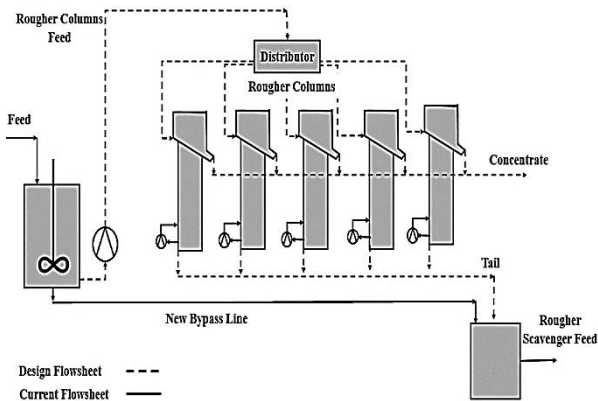
شکل ۱: نمای شماتیک مدار کارخانه تغلیظ مس میدوک



شکل ۲: شماتیکی از یک سلول ستونی CISA [۱۴]

Minnovex و Microcel<sup>TM</sup> توسعه یافته‌اند. حباب‌سازهای مورد استفاده در سلول‌های ستونی نوع CISA از نوع Microcel<sup>TM</sup> است که در شرکت VirginiaTech تولید شده است. ایده اصلی در طراحی این نوع حباب‌ساز، بهبود بازیابی پایین و غلبه بر تعمیر و نگهداری بالای مورد نیاز در حباب‌سازهای نوع متخلخل و جت در صنعت فلوتاسیون ستونی بوده است [۱۲]. حباب‌سازهای نوع

سلول‌های فلوتاسیون ستونی به‌طور کلی به وسیله حباب‌سازهایشان شناخته می‌شوند. سیستم‌های حباب‌سازی به دو دسته داخلی و خارجی تقسیم می‌شوند. در سیستم‌های حباب‌سازی جدید، از تنش برشی و ایجاد حالت جت و در انواع قدیمی حباب‌سازها از عبور دادن هوا از داخل فلزات و پارچه‌های متخلخل برای تولید حباب استفاده شده است. حباب‌سازهای نوع تنش برشی و جت توسط



شکل ۳: فلوشیت طراحی و کنونی بخش پرعیارکنی اولیه مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ مس میدوک

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- سیستم تولید حباب

از آنجایی که این ستون‌ها در مدار نبودند، در طول دوره یک ساله تحقیقات، تمام آزمایش‌های صنعتی بدون ایجاد مشکل در فرآیند، انجام شد. به عبارت دیگر، تمامی تغییرات و آماده‌سازی‌ها روی سلول‌های ستونی زمانی که ستون‌ها در مدار نبودند، انجام شد و در طول مدت انجام آزمایش‌ها بخشی از خوراک بخش فلوتاسیون به داخل این ستون‌ها هدایت می‌شد. این فرصت باعث شد تا امکان بررسی تأثیر پارامترهای گوناگون با جزئیات بیشتری امکان‌پذیر باشد. از آنجایی که تمامی آزمایش‌ها در مقیاس صنعتی انجام شد، می‌توان بدون تأمل و با دقتی بالا نتایج را به عملکرد ستون‌ها نسبت داد و تصمیم‌گیری کرد. به‌عنوان مثال، با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی روی ستون‌ها نمی‌توان به چالش‌های استفاده از حباب‌سازهای نوع مخلوط‌کننده ثابت صنعتی، پی‌برد. با وجود این که با استفاده از آزمایش‌های انجام شده روی یک سلول ستونی آزمایشگاهی نتایج رضایت‌بخشی به‌دست آمد اما وقتی از سلول‌های صنعتی استفاده شد، به‌خاطر عملکرد ضعیف سیستم حباب‌سازی آن، نتایج ناامیدکننده‌ای به جای گذاشت.

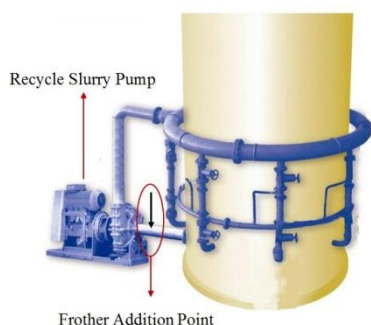
برای داشتن عملکرد مناسب سیستم تولید حباب، باید فشار پالپ و هوا قبل از ورود به داخل حباب‌سازها به دقت کنترل شود. عملکرد مناسب پمپ برگشت باطله یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر این امر است که به دقت تحت کنترل قرار گرفت و قسمت‌هایی از آن که نیاز به تعویض

Microcel™ تماس بین پالپ و هوا را تحت شرایط کنترل شده در ستون فرآهم می‌آورند (شکل ۲). در این نوع ستون‌ها از حباب‌سازهای مخلوط‌کننده ثابت برای تولید حباب استفاده می‌شود. پالپ باطله توسط پمپ گریز از مرکز گردش باطله، دوباره به داخل ستون بازگردانده می‌شود (فاصله ۲/۴ متری از کف ستون). قبل از ورود پالپ باطله مکیده شده توسط پمپ‌های گریز از مرکز به حباب‌سازهای مخلوط‌کننده ثابت، هوا با دوغاب مخلوط می‌شود. بر اثر تنش برشی اعمال شده به مخلوط پالپ و هوا هنگام عبور از درون حباب‌سازهای مخلوط‌کننده ثابت، حباب ایجاد می‌شود. مخلوط پالپ و حباب تولید شده از نزدیکی کف ستون وارد ستون می‌شود و حباب‌ها در داخل ستون و منطقه جمع‌آوری شروع به حرکت به سمت بالا می‌کنند [۱۳].

سطح مشترک پالپ و کف در سلول ستونی نوع CISA توسط دو عدد فشارسنج که در زیر سطح مشترک در ارتفاع ۱/۴ و ۲/۴ متری از بالای ستون و در یک مدار بسته با شیر خروجی باطله قرار دارند، کنترل می‌شود. آب شستشو نیز توسط ۴ حلقه لوله PVC که در فاصله ۱۰ سانتی‌متری بالای سطح کف ستون قرار دارند، تأمین می‌شود.

سلول‌های ستونی CISA نصب شده در بخش پرعیارکنی اولیه این کارخانه از همان ابتدای راه‌اندازی کارخانه (۱۳۸۴)، انتظارات پیش‌بینی شده را برآورده نساخت و از آنجایی که این ستون‌ها به‌طور پیوسته در مدار قرار ندارند، پالپ خوراک مرحله فلوتاسیون بدون عبور از این ستون‌ها به‌طور مستقیم به سلول‌های رمق‌گیری پرعیارکنی اولیه فرستاده می‌شود. شکل ۳، فلوشیت مرحله طراحی و فلوشیت تغییر یافته کنونی بخش پرعیارکنی اولیه را نشان می‌دهد. موضوع قابل توجه این است که بخش مهمی از مرحله فلوتاسیون که طراحی شده بود تا ۸۸٪ از محصول نهایی کارخانه را تأمین کند، از مدار خارج شده بود. از دلایل اصلی عدم استفاده از این ستون‌ها می‌توان ناپایداری، حساسیت بالا، کنترل سخت و تعمیر و نگهداری بالا را نام برد. هدف اصلی در این تحقیق یافتن دلایل عدم کارایی مناسب این ستون‌ها و در حد امکان حل کردن مشکلات موجود با هدف بازگرداندن این ستون‌ها به مدار بوده است.

ستون‌ها به لوله برگشت باطله قبل از وارد شدن به پمپ برگشت باطله تغییر پیدا کند (شکل ۵).



شکل ۵: مکان اضافه شدن کف‌ساز به لوله برگشت باطله قبل از ورود به پمپ

## ۲-۴- نرخ خوراک و هوای ورودی به سلول فلوتاسیون ستونی

در مراحل اول انجام آزمایش‌ها روی ستون‌ها مشخص شد که سرعت ظاهری خوراک در مرحله طراحی (۰/۸۲ cm/s) و هوای ورودی (۱/۹ cm/s) به سلول‌های ستونی فراتر از میزان پاسخگویی این ستون‌ها است. بنابراین تصمیم گرفته شد نرخ‌های جریان پایین‌تر از میزان طراحی مورد آزمایش قرار گیرند تا بتوان به یک عملکرد پایدار از ستون‌ها دست یافت. اصلی‌ترین نشانه از عدم پایداری در نرخ هوادهی بالاتر از میزان مطلوب را می‌توان اغتشاش واضح و مشخص در ستون همراه با عدم کف‌دهی دانست.

## ۳- ارزیابی و تحلیل نتایج

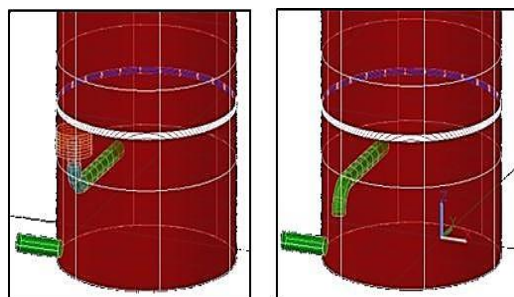
### ۳-۱- سیستم تولید حباب

یکی از موضوعات چالشی در مورد سیستم تولید حباب مربوط به راه یافتن پالپ به داخل حلقه هوا در اثر عملکرد نامناسب شیرهای یک‌طرفه دانست. این موضوع خیلی هم غیرمعمولی نیست زیرا خوراک این ستون‌ها به‌طور مستقیم از بخش خریدایش تأمین می‌شود که اکثر اوقات نیز شامل ذرات بسیار درشت نیز است. دلایل ورود ذرات درشت به خوراک واحد فلوتاسیون، پارگی قطاع سرد گردان خروجی آسیای نیمه‌خودشکن، جایی که پالپ عبور کرده از این سرد، خوراک هیدروسیکلون‌های اولیه را تأمین می‌کند و در ادامه نیز انسداد هیدروسیکلون‌های اولیه است. شکل ۶ (الف) مقطع عرضی یکی از حلقه‌های هوا را نشان می‌دهد که به‌طور کلی

داشت، به سرعت جایگزین شدند. مشاهده شد که اکثر حلقه‌های هوا بر اثر ورود پالپ دچار گرفتگی شده بودند که این گرفتگی‌ها برطرف شده و حلقه‌های هوا قابل استفاده شدند. ذرات درشتی که باعث گرفتگی حباب‌سازها شده بودند نیز از درون حباب‌سازها تخلیه، وزن و تعیین اندازه شدند.

### ۲-۲- تغییر شکل لوله ورودی پمپ برگشت باطله

نتایج تحقیقات نشان داد که دلیل اصلی عدم پایداری عملکرد ستون‌ها، گرفتگی حباب‌سازها در اثر راه‌یابی ذرات درشت به داخل آن‌ها است. نزدیکی لوله ورودی پمپ برگشت به نقطه خروجی باطله ستون و قدرت مکش بالا پمپ، باعث ورود ذرات درشت به لوله برگشت باطله و حباب‌سازها می‌شد. برای غلبه به این مشکل، راستای ورودی لوله مکش پمپ برگشت باطله، رو به بالا تغییر جهت یافت و طول آن به ۱۵۰ سانتی‌متر افزایش پیدا کرد. یک پوشش استوانه‌ای نیز برای جلوگیری از ورود مستقیم ذرات درشت به داخل لوله مکش پمپ برگشت باطله روی آن قرار داده شد (شکل ۴).



(ب)

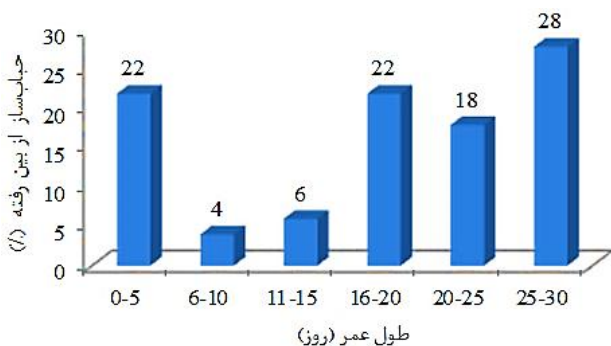
(الف)

شکل ۴: (الف) طرح اولیه لوله مکش، (ب) طرح تغییر یافته لوله مکش

### ۲-۳- نقطه جدید اضافه کردن کف‌ساز

مقدار بالای نرمه در خوراک ستون‌ها (۶۰٪ خوراک ریزتر از ۴۵ میکرون) باعث ایجاد محیطی با ویسکوزیته بالای پالپ شده و این موضوع باعث تسریع در به هم پیوستن حباب‌ها می‌شد [۱۵، ۱۶]. برای جلوگیری از اینکه این مشکل باعث ناپایداری عملکرد ستون‌ها به دلیل بزرگ شدن اندازه حباب‌ها و افزایش سرعت حرکت رو به بالای حباب‌ها نشود، تصمیم گرفته شد تا مکان اضافه شدن کف‌ساز از تانک آماده‌ساز قبل

سلول‌های ستونی، مشاهده شد که نرخ سایش حباب‌سازها بسیار بالا است، این موضوع به تنهایی باعث ناپایداری فرآیند نمی‌شود اما تعمیر و نگهداری و نیروی خدماتی زیادی را به مدار تحمیل می‌کند. شکل ۷، محدوده عمری حباب‌سازها را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، ۲۲٪ از حباب‌سازها عمر کمتر از یک هفته و ۷۲٪ از حباب‌سازها عمری کوتاه‌تر از ۲۵ روز داشته و در بازه زمانی بیشتر از ۱ ماه عملکرد مناسبی از این حباب‌سازها مشاهده نشد. اگر ۲ حباب‌ساز از ۱۲ حباب‌ساز یک ستون از کار بیفتند این بدان معنا نیست که عملکرد سلول کاهش پیدا کرده بلکه این توزیع نامناسب هوا در نرخ هوادهی است که می‌تواند آسیب بیشتری را به عملکرد سلول ستونی وارد کند.



شکل ۷: طول عمر حباب‌سازهای مخلوط‌کننده ثابت

### ۳-۳- عملکرد سلول‌های ستونی پرعیارکنی اولیه

سلول‌های ستونی بخش پرعیارکنی اولیه برای یک دوره ۱۰ روزه بعد از ۸ سال عدم فعالیت، تحت پایش شبانه‌روزی وارد مدار شدند. نتایج پایش نشان داد که این سلول‌ها در ۸۷٪ اوقات دارای کفی پایدار بودند. همچنین مشخص شد که اصلی‌ترین دلیل مختل شدن عملکرد مطلوب این سلول‌ها، حساسیت بالای آن‌ها به تغییر خصوصیات ماده معدنی است. همچنین نتایج نشان داد که نرخ خوراک و هوای وارد شده به آن‌ها نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از میزان طراحی شده برای این سلول‌های ستونی است به‌طوری که برای داشتن عملکرد پایدار در آن‌ها، نرخ ظاهری هوا و خوراک ورودی به ترتیب  $0.16 \text{ cm/s}$  و  $0.04 \text{ cm/s}$  به‌دست آمد که با میزان طراحی آن‌ها که به ترتیب  $0.19 \text{ cm/s}$  و  $0.82 \text{ cm/s}$  است، اختلاف زیادی دارد. در نرخ‌های جریان هوا و خوراک بالاتر از میزان به‌دست آمده، اغتشاش شدیدی در داخل سلول مشاهده شده که باعث کاهش بازدهی آن می‌شود. ماندگی گاز توسط فشارسنج‌های نصب شده روی بدنه سلول اندازه‌گیری و مقدار آن بین ۸ تا ۱۰ درصد به‌دست آمد که بسیار پایین‌تر از

توسط ذرات سفت شده پالپ مسدود شده است. توزیع غیریکنواخت هوا در ۱۲ حباب‌ساز یک سلول به دلیل گرفتگی در حلقه هوا باعث ایجاد اغتشاش در پالپ داخل آن شده و از بین رفتن عملکرد و کارایی مناسب آن را به همراه دارد. اولین و زیان‌بارترین نتیجه توزیع غیریکنواخت هوا در سطح مقطع سلول را می‌توان چرخش پالپ در تمام بخش‌های مقطع عرضی سلول که توسط تیغه‌هایی ایجاد شده‌اند، دانست. برای تعیین اندازه و مقدار ذراتی که موجب گرفتگی حباب‌سازها می‌شود، تعداد زیادی از حباب‌سازها در موقعیت‌های مختلف سلول که توسط ذرات درشت گرفته بودند، تخلیه و ذرات داخل آن‌ها تعیین اندازه شدند و در نهایت مشخص شد که مقدار ۲ کیلوگرم ذرات درشت‌تر از  $2/5$  سانتی‌متر برای از کار انداختن حباب‌سازهای یک سلول ستونی کافی است (شکل ۶ (ب)). این در حالی است که طبق طراحی اولیه  $d_{80}$  (اندازه ۸۰ درصد عبوری) خوراک مرحله فلوتاسیون ۹۰ میکرون و اندازه بزرگ‌ترین ذرات موجود در خوراک این مرحله باید ۳۰۰ میکرون باشد. با توجه به اینکه مقدار کمی ذرات درشت (حدود ۲ کیلوگرم) برای از کار انداختن حباب‌سازها کافی است، لذا پارگی در هر یک از سرندهای خروجی آسیای نیمه‌خودشکن و انسداد هیدروسیکلون‌های اولیه بلافاصله باعث انتقال ذرات درشت به بخش فلوتاسیون شده و از کار افتادن حباب‌سازها و در نهایت ناپایداری در عملکرد سلول‌های ستونی را به‌همراه دارد.



شکل ۶. الف) گرفتگی حلقه هوا توسط پالپ سفت شده، ب) ذرات تخلیه‌شده از حباب‌سازهای مسدود شده

### ۳-۲- تعیین عمر حباب‌سازها

حباب‌سازهای مخلوط‌کننده ثابت به شدت نسبت به ذرات درشت، سخت و ذراتی که دارای گوشه‌های تیز هستند، حساس بوده و وجود چنین ذراتی در پالپ ورودی به آن‌ها و میزان بالای سیلیس محتوا در خوراک، سایش حباب‌سازها و سوراخ شدن آن‌ها را سرعت می‌بخشد. بعد از انجام تغییرات در موقعیت و ساختار لوله ورودی پمپ برگشت باطله

میزان ۲ کیلوگرم ذرات درشت‌تر از ۲/۵ سانتی‌متر می‌تواند به‌طور کامل حباب‌سازهای یک سلول ستونی را از کار بیندازد.

- دلیل دوم در عملکرد ضعیف این سلول‌ها را می‌توان مقدار بالای نرمه، نوسانات و خصوصیات کانی شناسی خوراک آن‌ها دانست.

- مقدار بالای ذرات درشت و سیلیس محتوای خوراک این سلول‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای طول عمر حباب‌سازها را کاهش داده است، به‌طوری که متوسط طول عمر حباب‌سازها ۲۰ روز به‌دست آمد و تنها ۱۸٪ حباب‌سازها طول عمری بین ۲۵ تا ۳۰ و هیچ حباب‌سازی عمری بیشتر از یک ماه نداشت.

- نرخ ظاهری هوا و خوراک ورودی به این سلول‌ها برای داشتن یک شرایط پایدار به ترتیب  $0.06 \text{ cm/s}$  و  $0.04 \text{ cm/s}$  به‌دست آمد که مقادیر این پارامترها در مرحله طراحی به ترتیب  $0.09 \text{ cm/s}$  و  $0.082 \text{ cm/s}$  بوده است. به عبارت دیگر، دبی خوراک از مقدار  $125 \text{ t/h}$  (مرحله طراحی) به  $70 \text{ t/h}$  و دبی هوای ورودی به ستون از  $540 \text{ m}^3/\text{h}$  (طراحی) به  $300 \text{ m}^3/\text{h}$  کاهش پیدا کرد.

- ماندگی گاز و ظرفیت حمل در این سلول‌ها به ترتیب  $10 - 4\%$  و  $0.25 - 0.20 \text{ g/min/cm}^2$  به‌دست آمد که مقدار آن تقریباً نصف مقدار معمول این پارامترها در سلول‌های ستونی نصب شده در بخش پرعیارکنی نهایی است.

- عیار کنسانتره و بازیابی سلول‌های ستونی پرعیارکنی اولیه در یک بازه زمانی ۱۰ روزه به ترتیب ۳۲٪ مس و ۶۸٪ با عیار خوراک ۰/۷٪ مس، به‌دست آمد.

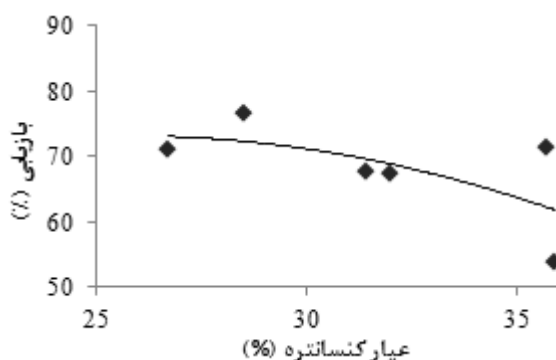
- نرخ بالای سایش در حباب‌سازها، مقدار غیرمعمول و بالای تعمیر و نگهداری، نیاز به پایش مداوم و ناپایدار بودن عملکرد این سلول‌ها موجب شده است که مدیران بخش تغلیظ این مجتمع از آن‌ها استفاده نکنند.

#### ۵- تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از مدیران مجتمع مس شهر بابک به دلیل حمایت و همکاری برای انجام این تحقیق و اجازه انتشار نتایج آن تشکر به عمل می‌آید. همچنین، نویسندگان از تمامی پرسنل بخش‌های عملیات، مکانیک و متالورژی به دلیل همکاری همه جانبه در طول انجام این پروژه تقدیر و تشکر می‌نمایند.

#### مراجع

مقدار معمول ماندگی گاز در ستون‌های فلوتاسیون (۲۵ - ۱۵ درصد) است. دلیل اصلی این موضوع نیز ویسکوزیته بالای پالپ به دلیل مقدار بالای نرمه در خوراک این ستون‌ها (۶۰٪ ذرات ریزتر از ۴۵ میکرون) است که باعث به هم پیوستن حباب‌ها و افزایش سرعت صعود حباب‌ها می‌شود. در طول دوره انجام آزمایش‌ها و به فاصله زمانی ۱ ساعته نمونه‌برداری‌هایی از جریان‌های مختلف این ستون‌ها انجام شد و بازیابی و عیار کنسانتره این ستون‌ها اندازه‌گیری شد (شکل ۸). موضوع قابل-توجه دیگر این است که در طول دوره انجام آزمایش‌ها، عیار مس خوراک ۰/۷٪ بوده که بسیار پایین‌تر از میزان در نظر گرفته برای آن در مرحله طراحی (۱/۴۹٪) است. در طول تمامی آزمایش‌ها، عمق کف ۸۰ سانتی‌متر نگه داشته شده و نرخ هوا و خوراک ورودی به این سلول‌ها به ترتیب  $0.06 \text{ cm/s}$  و  $0.04 \text{ cm/s}$  و مقدار مواد شیمیایی اضافه شده برابر با مقدار مرحله طراحی ( $44 \text{ g/t}$  و  $14 \text{ g/t}$  کف‌ساز) در نظر گرفته شد.



شکل ۸: نمودار عیار - بازیابی سلول‌های ستونی پرعیارکنی اولیه در یک بازه زمانی ۱۰ روزه

به‌طور متوسط، عیار مس کنسانتره این سلول‌ها ۳۲٪ و بازیابی آن‌ها ۶۸٪ می‌باشد و تنها ۳۰٪ محصول نهایی را تأمین کرده که به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از میزان در نظر گرفته در مرحله طراحی یعنی تولید ۸۸٪ کنسانتره نهایی است. ظرفیت حمل به‌دست آمده از این ستون‌ها نیز  $0.25 \text{ g/min/cm}^2$  به‌دست آمد که نسبت به مقدار ظرفیت حمل در مرحله طراحی ( $0.58 \text{ g/min/cm}^2$ ) بسیار کمتر بود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- مشکل اصلی سلول‌های ستونی پرعیارکنی اولیه مجتمع مس میدوک، عملکرد ضعیف حباب‌سازهای مخلوط کننده ثابت آن‌ها است که به دلیل گرفتگی این حباب‌سازها توسط ذرات درشت اتفاق می‌افتد. اندازه‌گیری‌های انجام شده نشان داد که



*characteristics of industrial and pilot columns in rougher circuit* Minerals Engineering, 22, pp. 96-99.

[10] Massinaei, M., Kolahdoozan, M., Noaparast, M., Oliazadeh, Sahafipour, M., & Finch, J.A., (2007) *Mixing characteristics of industrial columns in rougher circuit* Minerals Engineering, Vol.20, pp. 1360-1367.

[11] Bahar, A., Arghavani, A., Farshid, O., Rozebehi, M.R., Mahdavi, M. & Banisi, S., (2014) *Lesson learned from using column flotation cells as roughers: The Miduk copper concentration plant case* Chile, XXVII International Mineral Processing Congress (IMPC).

[12] Yoon, R.H., Luttrell, G.H., Adel, G.T., Mankosa, M.J., (1992) *The applications of Microcel<sup>TM</sup> column flotation to fine coal cleaning* Coal Preparation, 10, pp.177-188.

[13] Pyecha, J., Lacouture, B., Sims, S., Hope, G., Stradling, A., (2006) *Evaluation of a Microcel<sup>TM</sup> sparger in the RED Dog column flotation cells* Minerals Engineering, 10, 6-8, pp.748-757.

[14] Metso Minerals, (2001) *Operation and maintenance manual* Miduk Copper Concentrator Project.

[15] Banisi, S., Finch, J.A., Laplante, A.R., & Weber, M.E. (1995). *Effect of Solid Particles on Gas Holdup in Flotation Columns - I. Measurement* Chemical Engineering Science, Vol. 50, No. 14, pp. 2329-2334.

[16] Banisi, S., Finch, J.A., Laplante, A.R. & Weber, M.E. (1995) *Effect of Solid Particles on Gas Holdup in Flotation Columns - II. Investigation of Mechanisms of Gas Holdup Reduction in Presence of Solids* Chemical Engineering Science, Vol. 50, No. 14, pp. 2325-2342.

[1] Wheeler, D.A. (1996) *'Big flotation column mill tested'* E&M J, 167 (11), pp. 98-99.

[2] Banisi, S., Finch, J.A. (2001) *Testing a Flotation Column at the Sarcheshmeh Copper Mine* Minerals Engineering, Vol. 14, No. 7, pp. 1177-1182.

[3] Wyslouzil, H.E., (1996) *Industrial Applications for Column Cells as Roughers* Column'96, CIM.

[4] Massinaei, M., Oliazadeh, M., Zeidabadi, S., & Yarahmadi, M.R. (2011) *'A Review of Flotation Columns Application in Rougher Circuits'* Proceedings Of the 43th Annual Canadian Mineral Processors Conference, Paper 15, pp. 257-268.

[5] Furey, J.T. (1990) *'Rougher Column Flotation of Gold Tellurides'* Proceedings 22nd Annual Meeting of the CMP, Paper No. 10, pp. 242-257.

[6] Sampaio, C.H., Aliaga, W., & Villanueva, M., (2005) *'Rougher flotation of copper minerals in columns'* Minerals Engineering, Vol.18, pp. 731-733.

[7] Massinaei, M., Kolahdoozan, M., Noaparast, M., Oliazadeh, M., Yianatos, J., Shamsadini, R., & Yarahmadi, M. (2009) *'Froth zone characterization of an industrial flotation column in rougher circuit'* Minerals Engineering, Vol.22, pp. 272-278.

[8] Massinaei, M., Kolahdoozan, M., Noaparast, M., Oliazadeh, M., Yianatos, J., Shamsadini, R., & Yarahmadi, M. (2009) *'Hydrodynamic and kinetic characterization of industrial columns in rougher circuit'* Minerals Engineering, Vol.22, pp. 357-365.

[9] Massinaei, M., Kolahdoozan, M., Noaparast, M., Oliazadeh, M., Yianatos, J., Shamsadini, R., & Yarahmadi, M. (2009) *'Hydrodynamic and metallurgical*