مقاله

طراحی مدار پاشش هیپ مس سونگون بر اساس آزمایش‌های پایلوت لیچینگ ستونی

رحمان کیانی‌پور
کارشناس معدن ، شرکت ملی مس ایران، مجتمع مس سونگون

چکیده

معدن مس سونگون یکی از معادن مطرح در ایران و دنیاست که میزان کانسنگ اکسیدی و کم‌عیار حال حاضر آن نیز بالغ بر ۳۰ میلیون تن می‌باشد و هر ساله حدود ۱ - ۱/۵ میلیون تن نیز به آن افزوده می‌شود. مطالعات لیچینگ ستونی این کانسنگ ابتدا در مقیاس آزمایشگاهی و با ستون‌های ۲ متری انجام شد و فلودیاگرام اولیه برای کانسنگ تهیه شد. سپس این بررسی در مقیاس نیمه‌صنعی و با ستون‌های ۶ متری صورت گرفت تا فلودیاگرام پیش‌بینی دقیق‌تر گردد. نتایج در مقیاس نیمه‌صنعتی حاکی از آن بود که میزان بازیابی استحصال مس برای دوره ۱۲۰-۱۵۰ روزه، در حدود ۵۰-۵۵ درصد است. همچنین روش آگلومراسیون برای این خاک نه‌تنها مفید نیست، بلکه طی فرآیند بهره‌برداری، موجب اخلال در عملکرد کارخانه استخراج با حلال نیز خواهد شد. باتوجه به عیار پایین مس در محلول خروجی از ستون‌های نیمه‌صنعتی، محرز شد که حتماً لازم است پاشش هیپ به صورت محلول باردار (PLS) و رافینت انجام گیرد. محلول باردار بر روی پدهای قدیمی که محتوی مس اندکی دارند و رافینت بر روی پدهای جدید که کانسنگ تازه دارند، صورت گیرد. دبی PLS نهایی برای ارسال به واحد استخراج با حلال نیز در حدود ۱۷۵ مترمکعب در ساعت با مقدار مس ۲/۵ – ۳ گرم برلیتر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: مس، هیپ لیچینگ، مس، معادن مس ایران، سونگون، آزمایش‌های نیمه‌صنعتی، خاک اکسیدی، خاک کم‌عیار.

مقدمه

مس یکی از عناصر مهم در صنعت و تکنولوژی امروزی است به‌طوری‌که تقاضای مس همبستگی بسیار نزدیکی با الگوی رشد اقتصادی یک کشور دارد. نمود این سخن، اقتصاد کشور چین می‌باشد[۱]. این امر موجب شده است تا صنایع معدنی به‌شدت به فرآوری خاک‌های کم‌عیار و روش‌های کم‌هزینه همچون هیپ لیچینگ روی بیاورند[۲-۳]. ایران از جمله کشورهای مطرح در ذخایر و تولید مس می‌باشد، ولی عمده این تولید به صورت کنسانتره و مس تصفیه شده است که دارای ارزش افزوده پایینی است. میزان ارزش افزوده حاصل از کلیه فعالیت‌های شرکت ملی مس ایران و هم چنین صنایع پایین‌دستی آن در مقایسه با سهم ارزش‌افزوده صنایع مس کشور آمریکا در تولید ناخالص داخلی، بالاتر ولی در مقایسه با شیلی بسیار پایین است[۲-۳]. ایران از دیرباز به‌عنوان یکی از پتانسیل‌های مهم مس پورفیری در دنیا شناخته شده است و از نظر مس‌زایی در یکی از بهترین شرایط کانی‌زایی (منطقه کوه‌زایی آلپ-هیمالیا) قرار گرفته است. مجموع ذخایر اقتصادی مس در جهان حدود ۸۸۰ میلیون تن معادل محتوی مس خالص برآورد می‌شود که ایران با ۵۴ میلیون تن ذخیره، حدود ۶ درصد آن را در اختیار دارد[۴-۵].

استخراج اولیه مس به‌وسیله روش‌های هیدرومتالورژی

تقریباً به صورت اتفاقی صورت گرفت. بدین طریق که آب ناشی از برف و باران به داخل توده‌های معدنی نفوذ می‌کرد و در چنین محیط مرطوبی که همراه با اکسیداسیون پیریت نیز بود، اسیدسولفوریک و یون‌های فرو حاصل می‌شد که نتیجه آن فروشویی کانی‌های غیرسولفیدی مس بود. تقریباً همه ذخایر قابل انحلال مس در اثر هوازدگی و اکسیداسیون منابع اولیه آن تشکیل شده‌اند که این ذخایر، منابع مس ثانویه یا برون‌زاد نامیده می‌شوند. دیگر نهشته‌های مس با تجمع و نهشت تدریجی مسی که از محل اصلی خود شسته شده و به محل جدید منتقل شده است، تشکیل شده‌اند. در برخی موارد شاهد انتقال مس در مسافت‌های زیادی هستیم که نتیجه اکسیداسیون و انحلال صورت گرفته به وسیله منابع آب زیرزمینی است. عنصر مس در طبیعت با اکثر عناصر جدول تناوبی ترکیب می‌شود و کانی‌هایی به شکل کربنات ها، سیلیکات ها، هیدروکسیدها، اکسیدها، کلریدها، سولفات‌ها و سولفیدها تشکیل می‌دهد. این ویژگی سبب شده تا کانی‌ها و منابع متنوعی از این عنصر در طبیعت وجود داشته باشند. درحالی‌که تعداد کانی‌های شناخته شده مس در طبیعت بالغ بر یکصد کانی است، اما تعداد کانی‌های مهم و اقتصادی آن محدود می‌باشد. به تجربه ثابت شده که در یک کانسار، مقدار قابل ملاحظه‌ای از محتوی مس تنها در دو یا سه کانی مهم وجود دارد[۵-۷].

معدن مس سونگون در ۳۰ کیلومتری شهرستان ورزقان از توابع استان آذربایجان شرقی و در۱۲۰ کیلومتری شمال شرق تبریز واقع شده است. کانی‌سازی اصلی این کانسار شامل کانی‌های مس و مولیبدن است. ذخیره احتمالی این معدن بیش از یک میلیارد تن و ذخیره قابل استخراج آن (با توجه به اکتشافات انجام گرفته) حدود ۸۰۰ میلیون تن برآورد شده است که درمجموع کل ذخایر قطعی، احتمالی و ممکن در محدوده کانسار سونگون حدود ۱/۷ میلیارد تن سنگ مس با عیار ۰/۶۱ درصد است [۸-۹]. معدن مس سونگون مشابه سایر معادن بزرگ دنیا در برخی از زون‌های معدنی خود محتوی خاک کم‌عیار یا اکسیدی می‌باشد که قابلیت فرآوری به روش فلوتاسیون را ندارند. به‌طور کلی در معدن سونگون کانسنگی که محتوی مس آن در محدوده ۰/۱۵-۰/۲۲ درصد باشد به عنوان خاک کم‌عیار و کانسنگی که میزان نسبت مس اکسیدی به محتوی مس کل آن بالای ۴۰ درصد باشد، به عنوان کانسنگ اکسیدی دسته‌بندی می‌شود. هر دو دسته کانسنگ مذکور در این معدن به انباشت لیچینگ مس برای استحصال به روش هیپ لیچینگ ارسال می‌شود. در مجموع سالانه حدود ۱-۱/۵ میلیون تن خاک اکسیدی و کم‌عیار از معدن سونگون استخراج و حمل می‌شود[۸-۹].

هیپ نخستین واحد فرآیند هیدرومتالورژی مس می‌باشد. برای ساخت آن ابتدا سطح وسیع و تا حد امکان صاف و نزدیک به معدن انتخاب می‌شود و بخش‌های دارای شیب تند آن تسطیح می‌گردد. سپس لایه‌سازی‌های مختلفی بر روی این سطح انجام گرفته که در نهایت، کانسنگ مورد نظر برای فروشویی بر روی آن انباشته می‌گردد. تقسیم‌بندی هیپ بیشتر براساس میزان محتوای مس توده و ساختار آن صورت می‌گیرد که به انواع هیپ معمولی یا تخت، هیپ دره‌ای و هیپ دینامیکی تقسیم‌بندی می‌گردند. در معادنی که فضای اجرایی هیپ با محدودیت‌هایی مواجه است از فضاهای دره‌ها برای ایجاد هیپ دره‌ای استفاده شود. سیستم هیپ دره‌ای شامل آماده‌سازی محل در دره و دیواره کوه یا مکانی شیب‌دار و سپس انباشت توده کانسنگ است. مزیت این نوع هیپ این است که می‌توان آن را در هر شرایط نامناسب مکانی و یا نامساعد آب وهوایی به‌کار برد[۵-۶]. هیپ طراحی شده برای مس سونگون نیز از نوع دره‌ای است که ابتدا

شکل ۱- نمایی از هیپ معدن مس سونگون حین بارگذاری لایه اول

1- Supergene
2-Conventional Leach Pads
3-Valley Fills Pads

دیواره‌های دره برای ایجاد شکل پله‌های هیپ، خاک‌برداری شده و سپس این خاک در محل کف دره، خاکریزی شده است تا علاوه کاهش مسافت حمل، در کف هیپ سطح پایدار با مساحت مناسبی ایجاد شود. در عکس شماره(۱)، نمایی از هیپ معدن سونگون مشاهده می‌شود.

مروری بر آزمایش‌های فروشویی ستونی دو متری

در ابتدای هر پروژه فروشویی، لازم است تا رفتار انحلالی خاک به خوبی شناسایی شود و برآورد خوبی از رفتار آن در مقایس صنعتی به‌دست آید. برای این منظور در ابتدای این پروژه نیز بررسی‌های اولیه با ستون‌های دو متری انجام شد. نمونه‌های موردنیاز برای این آزمایش‌ها از طریق نمونه‌برداری از دامپ‌های مدنظر برای پروژه تهیه شده بودند که در ادامه تشریح خواهند شد. مشخصات نمونه با ابعاد استخراجی از معدن و با وزن حدودی ۱۷ تن بود که بعد از خردایش و همگن‌سازی، مقداری از آن به دانه‌بندی‌های ۲ ، ۱ و ۰/۵ اینچ خردایش یافتند و برای انجام آزمایش‌های لیچینگ ستونی وارد ستون‌های دو متری شدند. مقدار نمونه خاک در هر ستون حدود ۸۵ کیلوگرم بود. تعداد ۱۲ آزمایش ستون دو متری انجام شد که شرایط و نتایج آنها به ترتیب به شرح جداول ۱ و ۲ می‌باشند. هدف از این آزمایش‌ها، بررسی رفتار انحلالی خاک در ستون‌های ۲ متری و تهیه نقشه راهی برای بررسی آن در مقیاس نیمه‌صنعتی و پیش‌بینی دقیق رفتار خاک در واحد هیپ بود. در بررسی‌های بطری غلتان خاک مشخص شد که به دلیل عیار پایین مس خاک، پاشش هیپ با نرخ‌های پایین، جوابگو نخواهد بود. لذا این بررسی در رنج‌های بالایی از پاشش مورد بررسی قرار گرفت تا در صورت افزایش کم غلظت مس از رافنیت به PLS ، با تمهید جریان ILS بتوان خوراک با غظت مس بالا را برای کارخانه فراهم نمود.

۱-۲- نتایج آزمایش‌های لیچینگ ستونی دو متری

۱) دوره پاشش ستون‌های دو متری، ۷۵ روز بود که طی این، مدت میزان بازیابی مس ستون‌ها بین ۵۵ تا ۶۵ درصد به دست آمد. همچنین اختلاف بازیابی انحلال مس قابل ملاحظه‌ای در دانه‌بندی‌های مختلف مشاهده نشد.

۲) تمامی ستون‌ها با محلول آب و اسید (غیر رافینت) پاشش شده بودند و در واقع پاشش تمامی ستون‌ها به صورت مدار باز بود.

۳) میزان متوسط افزایش غلظت مس در محلول خروجی از هیپ به مقدار ۱/۱ گرم بر لیتر برآورد شد.

جدول ۱- نتایج کلی ستون‌های دو متری

شرایط و نتایج کلی آزمایش‌های ۲ متری														
شماره آزمایش	ستون	وزن جامد(کیلوگرم)		عیار خوراک٪			عیار پسماند جامد٪			بازیابی از جامد٪			بازیابی از محلول٪	
		خوراک	پسماند جامد	Cu	CuO	Fe	Cu	CuO	Fe	Cu	CuO	Fe	Cu	Fe
۱*	T۹	۷۵/۴	۷۴/۴	۰/۲۸	۰/۱۱۷	۴/۸	۰/۱۳۰	۰/۰۱۵	۴/۶۳	۵۴/۲۲	۸۷/۳۵	۴/۷	۵۱/۴	۸/۰
۲	T۸	۸۰/۹	۷۹/۹	۰/۲۸	۰/۱۱۷	۴/۸	۰/۱۱۹	۰/۰۰۶	۴/۴۲	۵۷/۸۸	۹۴/۹۴	۸/۹۷	۵۵/۶	۱۲/۷
۳	T۱۱	۷۳/۱	۷۲/۱	۰/۲۸	۰/۱۱۷	۴/۸	۰/۱۱۱	۰/۰۰۸	۴/۰۹	۶۰/۹	۹۳/۲۶	۱۶/۰	۵۴/۲	۱۴/۰
۴	T۱۰	۷۴/۴	۷۳/۴	۰/۲۸	۰/۱۱۷	۴/۸	۰/۱۲۰	۰/۰۱۱	۴/۳۳	۵۷/۷۲	۹۰/۷۲	۱۱/۰۹	۵۱/۷	۹/۸
۵	T۶	۷۲/۳	۷۱/۳	۰/۲۸	۰/۱۱۷	۴/۸	۰/۱۱۰	۰/۰۱۲	۴/۶۳	۶۱/۲۶	۸۹/۸۹	۴/۷۷	۵۶/۶	۱۴/۶
۶	T۴	۷۲/۶	۷۱/۶	۰/۲۸	۰/۱۱۷	۴/۸	۰/۱۳۵	۰/۰۱۶	۴/۲۸	۵۲/۴۵	۸۶/۵۱	۱۱/۹۸	۵۸/۸	۸/۰
۷	T۲	۷۲/۵	۷۱/۵	۰/۲۸	۰/۱۱۷	۴/۸	۰/۱۱۵	۰/۰۱۰	۴/۱۴۴	۵۹/۵۰	۹۱/۵۷	۱۴/۸۶	۶۸/۸	۱۵/۵
۸	T۱	۷۱/۱	۷۰/۱	۰/۲۸	۰/۱۱۷	۴/۸	۰/۱۲۰	۰/۰۱۲	۴/۴۹	۵۷/۷۵	۸۹/۸۹	۷/۷۱	۷۱/۲	۱۵/۹
۹	T۳	۷۴/۶	۷۳/۶	۰/۲۸	۰/۱۱۷	۴/۸	۰/۱۳۶	۰/۰۱۱	۴/۵۱	۵۲/۰۸	۹۰/۷۲	۷/۲	۶۰/۴	۱۰/۲
۱۰	T۵	۷۲/۰	۷۱/۰	۰/۲۸	۰/۱۱۷	۴/۸	۰/۱۱۲	۰/۰۰۹	۴/۲۹	۶۰/۵۶	۹۲/۴۱	۱۱/۸۵	۶۲/۶	۱۵/۹
۱۱	T۱۲	۷۱/۲	۷۰/۲	۰/۲۸	۰/۱۱۷	۴/۸	۰/۱۲۱	۰/۰۰۵	۴/۳۳	۵۷/۲۹	۹۵/۷۹	۱۱/۱۴	۶۱/۸	۱۶/۰
۱۲	T۷	۷۰/۶	۶۹/۶	۰/۲۸	۰/۱۱۷	۴/۸	۰/۱۲۲	۰/۰۰۹	۴/۰۲	۵۷/۰۵	۹۲/۴۲	۱۷/۴۸	۶۴/۳	۱۸/۰

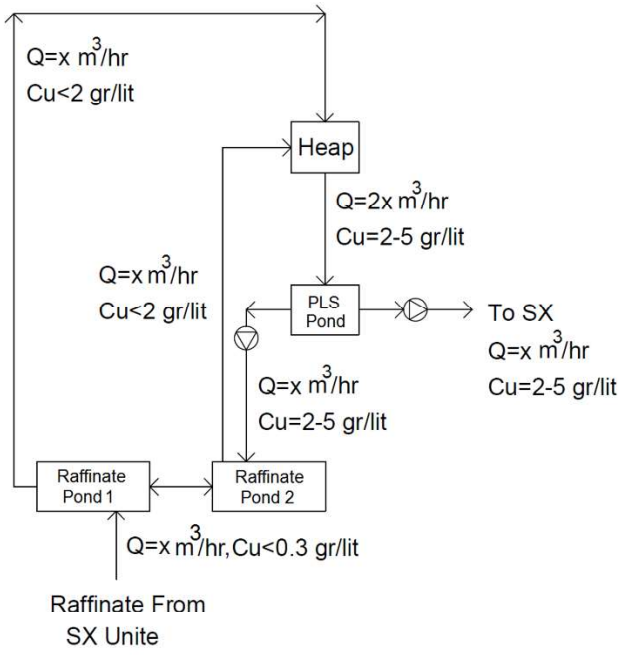
5- Run of Mine (R.O.M)

6- Pregnant Leach Solution

7- Intermediate Leach Solution

جدول ۲- شرایط آزمایش‌های لیچینگ ستونی ۲ متری

شماره ستون	ابعاد	دبی (lit/m².hr)	غلظت اسید پاششی (gr/lit)	مصرف اسید (kg/ton)	ارتفاع نشست ستون (cm)
T9	۲ inch	۶	۶	۵/۱۳	۵/۵
T8		۶	۱۲	۲/۲۰	۵/۶
T11		۶	۱۸	۷/۲۲	۶
T10		۶	پیش‌پردازی	۷/۱۵	۵/۵
T6		۱۲	۱۲	۳/۱۷	۵/۵
میانگین دانه‌بندی ۲ اینچ				**۹/۱۷**	**۸/۵**
T4	۱ inch	۶	۶	۶/۱۵	۱۲
T2		۶	۱۲	۴/۲۷	۵/۱۱
T1		۶	۱۸	۶/۲۸	۵/۱۰
T3		۶	پیش‌پردازی	۹/۱۸	۱۲
T5		12	۱۲	۶/۱۸	۱۱
میانگین دانه‌بندی ۱ اینچ				**۹/۲۱**	**۴/۱۱**
T12	۰/۵ inch	۶	۱۸	۹/۲۷	۵/۱۲
T7		۱۲	۱۲	۳/۲۵	۵/۱۳
میانگین دانه‌بندی ۰/۵ اینچ				**۶/۲۶**	**۱۳**
میانگین مصرف اسید در آزمایش‌ها با غلظت ۶ گرم بر لیتر (kg/ton)					۵/۱۴
میانگین مصرف اسید در آزمایش‌ها با غلظت ۱۲ گرم بر لیتر (kg/ton)					۲۰
میانگین مصرف اسید در آزمایش‌ها با غلظت ۱۸ گرم بر لیتر (kg/ton)					۴/۲۶



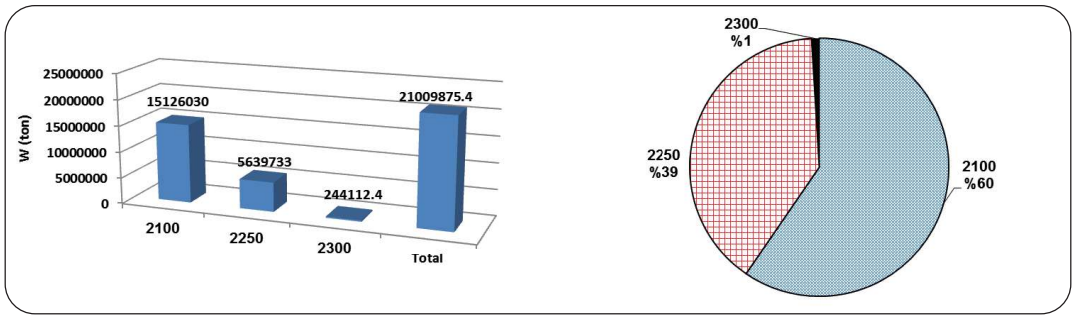
شکل ۲- فلودیاگرام طراحی گردش جریان‌های PLS و رافینت در بین واحدهای هیپ و SX پروژه لیچینگ سونگون

۴) نتیجه بسیار مهمی که در این بررسی مشخص شد این بود که حتماً لازم است هیپ به صورت Raff/ILS/PLS پاشش گردد تا میزان مس محتوی PLS ارسالی به واحد SX به مقدار غلظت حدود ۲ تا ۲/۵ گرم برلیتر برسد. لذا طرح پایه پاشش هیپ مطابق شکل(۲) پیش‌بینی شد.

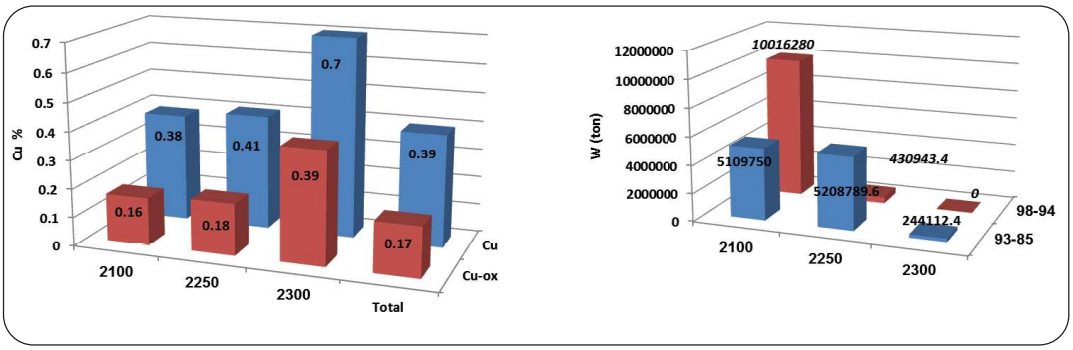
۵) میزان مصرف اسید خاک نیز برای دانه‌بندی‌های ۲ ، ۱ و ۰/۵ اینچ نیز به ترتیب برابر با حدود ۱۸، ۲۲ و ۲۶/۵ کیلوگرم بر تن خاک به دست آمد.

نمونه‌برداری

برای شروع بررسی رفتار فروشویی کانسنگ مس سونگون در مقیاس صنعتی لازم بود تـا نمونه معرفی از کلیه دامپ‌ها و زون‌های معدن تهیه شود تا بتوان طرح نهایی کارخانه را براساس خاک موجود و همچنین وضعیت آتی معدن پیش‌بینی نمود. نمونه‌ای از دامپ ۲۱۰۰ که دامپ انباشت کانسنگ‌های



شکل ۳- نمایی از توزیع نسبی و تناژ کانسنگ اکسیدی و کم‌عیار در دپوهای مختلف



شکل ۴- نمایی از تناژ و عیارهای کانسنگ اکسیدی و کم‌عیار در دپوهای مختلف طی دوره‌های انباشت

شکل ۵- نمونه‌برداری از دامپ‌های اکسیدی و کم‌عیار معدن مس سونگون

شکل ۶- نمونه‌برداری از زون‌های اکسیدی و کم‌عیار پله‌های معدن سونگون

شکل ۷- آماده‌سازی نمونه‌های برداشتی و دسته‌بندی انها

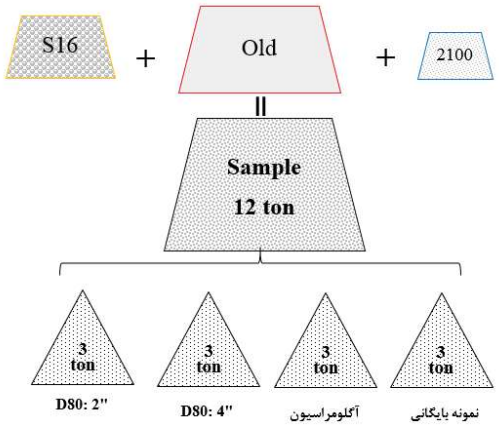
شکل ۸- آماده‌سازی و دانه‌بندی نمونه‌ها

کم‌عیار و اکسیدی بود و نسبت به سایر دامپ‌های دیگر از تناژ بیشتری نیز برخوردار بود، تهیه شد که « نمونه ۲۱۰۰» نام‌گذاری شد. پیش‌تر از کلیه دامپ‌های کم‌عیار و اکسیدی (با کدهای تراز ۲۱۰۰، ۲۲۵۰ و ۲۳۰۰)، نمونه‌هایی تهیه شده و در انبار نگهداری می‌شد. این نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های لیچینگ ۲ متری برداشت و مورد استفاده قرار گرفته بودند که با اسم « نمونه قدیمی» نام‌گذاری و در آزمایش‌های لیچینگ ستونی پایلوت ۶ متری نیز مورد استفاده قرار گرفت.

نمونه‌ای نیز از پله‌های اکسیدی و کم‌عیار معدن نیز تهیه شد و با اسم « نمونه S16» مورد استفاده قرار گرفت. معیار انتخاب این پله‌ها استعلام از واحد «کنترل عیار و تولید» امور معدن بود. چراکه این کانسنگ‌ها از نوع اکسیدی یا کم‌عیار بوده که به دامپ‌های مذکور منتقل می‌شدند و عیار اعلام شده از واحد کنترل عیار مشابه عیار به‌دست آمده برای کل دامپ‌ها و آزمایش‌های ستون‌های ۲ متری بود. لازم به‌ذکر است نمونه‌های برداشت‌شده از دامپ ۲۳۰۰ به دلیل هوازدگی بیش‌ازحد، دارای عیار بسیار پایینی بود و از طرفی دیگر به دلیل حجم کم آن، از نمونه‌برداری مستقل از آن صرف نظر شد. براساس گزارشات امور معدن، مقدار کانسنگ کم‌عیار و اکسیدی دپو شده از نظر تناژ و عیار طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۸، در شکل‌های ۳ تا ۴ نشان داده شده‌اند.

دسته‌بندی و آماده‌سازی نمونه‌های برداشت شده از قسمت‌های مختلف معدن بدین صورت بود که کلیه نمونه‌های با کامیون به یکی از سوله‌های مجتمع منتقل شده و در آنجا هر نمونه در محل‌های مناسب و جداگانه‌ای بر روی زمین پخش می‌شد تا رطوبت خود را از دست دهد. سپس از هر دسته به روش شطرنجی نمونه‌برداری به‌عمل آمد تا عیار و توزیع دانه‌بندی آن مشخص شود. در شکل‌های (۵)تا (۸) مراحل نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

به دلیل تنوع در عیار و همچنین دانه‌بندی، لازم بود تا نسبت محاسبه شده‌ای از انواع نمونه‌های مختلف با یکدیگر مخلوط گردند تا نمونه نهایی، معرف خوبی از کل توده دامپ‌ها و همچنین برآورد مناسبی از وضعیت معدن نیز باشد. این



شکل ۹- فلوچارت تهیه نمونه معرف شارژ ستون های شش متری

اختلاط باید به گونه‌ای صورت می‌گرفت تا میزان مس کل و مس اکسیدی بسیار نزدیک به گزارش امور معدن در خصوص دپوهای اکسیدی و کم‌عیار معدن باشد. شرایط و رویه اختلاط نمونه‌های برداشت‌شده از نقاط مختلف معدن و دامپ‌ها در شکل (۹) و همچنین جدول (۳) نمایش داده شده است. برای آزمایش‌های پایلوت چهار ستون در نظر گرفته شد. یک ستون با نمونه قدیمی و برداشت‌شده در تست‌های ستون ۲ متری، پر شد و سه ستون دیگر با شرایط متفاوت آماده گردیدند.

جدول ۳- نسبت اختلاط برای تهیه نمونه معرف

نسبت اختلاط نمونه‌ها				
	قدیمی	۲۱۰۰	۱۶S	مجموع
وزن نمونه (تن)	۱/۵	۰/۵	۱	۳
درصد نسبت	۵۰	۱۶/۶۷	۳۳/۳۳	۱۰۰
٪ Cu	۰/۳۴	۰/۶۱	۰/۳۷	۰/۳۹۵

نمونه‌ای از خوراک آماده‌شده برای شارژ ستون شماره ۱، جهت تعیین عیار مس و آهن به آزمایشگاه مجتمع مس سونگون ارسال شد. به منظور حصول اطمینان و سنجش صحت نتایج اعلام شده، علاوه بر ارسال نمونه تکراری و کنترلی، نمونه‌ای به آزمایشگاهی در خارج از مجتمع نیز ارسال گردید.

جدول ۴- نتایج آنالیز عیاری نمونه کانسنگ ستون ۱

آزمایشگاه	٪ Cu	٪ CuO	٪ CuO/Cu	٪ Fe
آزمایشگاه مجتمع مس سونگون	۰/۳۹۷	۰/۱۶۷	۴۲/۰۶	۴/۵
تکرار آزمایشگاه مجتمع مس سونگون	۰/۳۷۵	۰/۱۵۲	۴۰/۵۳	۴/۵
آزمایشگاه خارج از مجتمع	۰/۳۶	۰/۲۸	۷۷/۷۷	۵/۲۰
تکرار آزمایشگاه خارج از مجتمع	۰/۳۵	۰/۲۷	۷۷/۱۴	۴/۹۴
متوسط	۰/۳۸	۰/۱۶	۴۲/۱۰	۵/۰۷

نتایج آنالیز به‌صورت جدول(۴) می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، عیار مس و مس اکسیدی از میانگین نتایج آزمایشگاه سونگون به ترتیب ۰/۳۸ و ۰/۱۶ درصد و برای آهن از میانگین نتایج آزمایشگاه خارج از مجتمع ۵/۰۷ درصد لحاظ گردید.

ستون دوم آزمایش، مخلوط دپوی قدیمی و جدید می‌باشد. در جدول (۵) نتایج آنالیز آن بیان شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، عیار مس و مس اکسیدی از میانگین نتایج به ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۱۲ درصد و برای آهن نیز میانگین ۵/۲۶ درصد لحاظ گردید.

جدول ۵- نتایج آنالیز عیاری نمونه کانسنگ ستون ۲

آزمایشگاه	٪ Cu	٪ CuO	٪ CuO/Cu	٪ Fe
آزمایشگاه مجتمع مس سونگون	۰/۳۶۴	۰/۱۲۵	۳۴/۳۴	۴/۹
تکرار آزمایشگاه مجتمع مس سونگون	۰/۳۶۷	۰/۱۲۷	۳۴/۶۱	۳/۶
آزمایشگاه خارج از مجتمع	۰/۳۴	۰/۲۶	۷۶/۴۷	۵/۳۹
تکرار آزمایشگاه خارج از مجتمع	۰/۳۳	۰/۲۴	۷۲/۷۳	۵/۱۳
متوسط	۰/۳۶	۰/۱۲	۳۳/۳۳	۵/۵

ستون سوم آزمایش به‌طور کامل از نمونه دپوی قدیمی بود. در جدول شماره ۶ نتایج آنالیز آن نمایش داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، عیار مس و مس اکسیدی به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۱۷ درصد و آهن ۴/۴۵ درصد به‌دست آمد.

جدول ۶- نتایج آنالیز عیاری نمونه کانسنگ ستون ۳

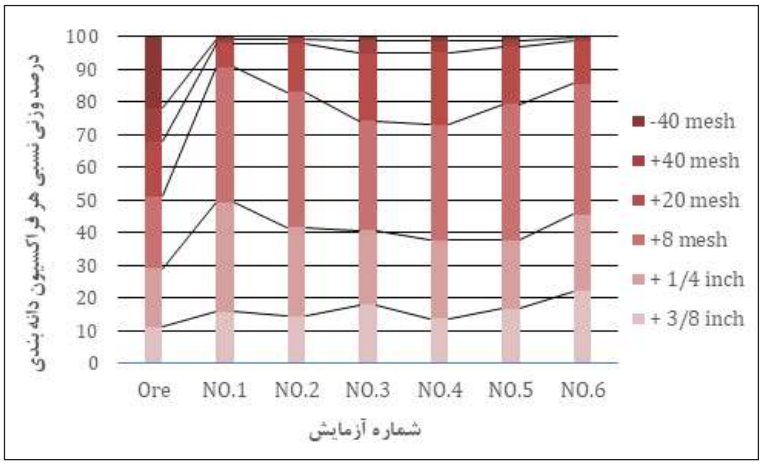
آزمایشگاه	٪Cu	٪ CuO	٪ CuO/Cu	٪ Fe
آزمایشگاه مجتمع مس سونگون	۰/۲۹	۰/۱۷	۵۸/۶۲	۴/۴۵

مشخصات نمونه ستون شماره ۴، مشابه ستون شماره ۲ که مخلوطی از دپوی قدیمی و جدید می‌باشد، انتخاب شد. با این تفاوت که نمونه ستون ۴ تحت فرآیند آگلومراسیون قرار گرفت. آگلومراسیون درحالت کلی شامل به هم چسباندن ذرات ریز و ایجاد ذرات با ابعاد بزرگ‌تر برای بهبود شرایط و رفتار ماده معدنی طی فرآیند فروشویی می‌باشد. امروزه آگلومراسیون به یکی از اجزاء ثابت بسیاری از واحدهای معدنی به‌خصوص صنعت فولاد تبدیل شده است و اکثر واحدهای معدنی بزرگ جهان از این فرآیند بهره می‌برند. در فرآیند فروشویی، آگلومراسیون با افزایش سطح دردسترس ذرات ریز و همچنین تجمیع نرمه حاصل از فرآیند خردایش، موجب بهبود نفوذپذیری، افزایش سرعت انحلالی و افزایش بازیابی می‌گردد. زمان ماند نمونه در دستگاه آگلومراسیون که خود بسته به سرعت دوران و شیب درام یا دیسک دارد، به مقدار زیادی به کانسنگ و ویژگی‌های آن نیز وابسته است. رطوبت موجود در ماده معدنی نیز تأثیر بسزایی در دستیابی به شرایط بهنیه آگلومراسیون دارد. برای تعیین رطوبت ماده معدنی، مقداری از نمونه معرف تهیه شده و رطوبت سنجی شد که میزان رطوبت ۲/۲ درصد به‌دست آمد. دلیل پایین بودن رطوبت به دلیل شرایط فصلی و همچنین نحوه انبارداری نمونه‌ها بود. اما از آنجایی که شرایط هر چهار ستون آزمایش مشابه بود، لذا این عدد ملاک عمل قرار گرفت.

آگلومراسیون با استفاده از دستگاه آگلومراسیون نوع دیسکی انجام شد که پس از تنظیم زاویه و سرعت دستگاه، نمونه به داخل آن بارگذاری می‌شد. باتوجه به رطوبت موجود در نمونه، رطوبت آگلومراسیون که مخلوطی از رافینت و اسید خالص بود (مخلوط رفینت و اسید با نسبت‌های مختلف)، با استفاده از پمپ دستی در حین آگلومراسیون اضافه می‌گردید. بعد از اتمام زمان معین، آگلومره‌های آماده شده از دیسک خارج، و به مدت ۲۴ ساعت به عنوان زمان ماند یا استراحت در دمای اتاق نگهداری می‌شوند. شرایط تعیین‌شده برای آزمایش‌های آگلومراسیون مطابق جدول(۷) بود. همان‌گونه که در شکل(۱۰) مشاهده می‌شود طی فرآیند آگلومراسیون، از وزن ذرات با دانه‌بندی ریز کاسته شده و بر وزن ذرات با دانه‌بندی درشت افزوده می‌شود. از آنجایی‌که هدف کاهش درصد وزنی ذرات با دانه‌بندی ریز است، مشاهده می‌شود که آزمایش شماره (۱) توانسته است مجموع سه فراکسیون دانه‌بندی ریز را از حدود ۵۰٪ وزنی به کمتر از ۱۰٪ وزنی پس از انجام آگلومراسیون برساند. لذا شرایط آگلومراسیون شماره ۱، مناسب‌ترین روش برای آگلومراسیون کانسنگ ستون شماره ۴ انتخاب شد. کانسنگ آماده شده برای ستون ۴ پس از آگلومراسیون به داخل ستون ریخته شده شد. در جدول (۸) نتایج آنالیز این ستون نمایش داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، عیار مس و مس اکسیدی به ترتیب ۰/۳۳۵ و ۰/۱۱ درصد و آهن ۵/۲۳ درصد به‌دست آمد.

جدول ۷- شرایط بررسی آگلومراسیون بهینه برای ستون شماره ۴

شماره آزمایش	رطوبت نهایی (%)	رطوبت نمونه (%)	رطوبت افزوده شده (%)	مقدار نمونه (kg)	مقدار اسید (kg/t Ore)	سرعت (rpm)	زاویه نسبت به افق (درجه)	زمان (s)
۱	۱۱	۲/۲	۸/۸	۵	۱۵	۱۸	۵۵	۹۰
۲	۱۱	۲/۲	۸/۸	۵	۸	۱۸	۵۵	۹۰
۳	۱۰	۲/۲	۸/۷	۵	۸	۱۸	۵۵	۹۰
۴	۹	۲/۲	۶/۸	۵	۸	۱۸	۵۵	۹۰
۵	۱۰	۲/۲	۸/۷	۵	۱۰	۱۸	۵۵	۹۰
۶	۱۰	۲/۲	۸/۷	۵	۶	۱۸	۵۵	۹۰
۷	۱۰	۲/۲	۸/۷	۵	۱۰	۱۸	۵۵	۱۸۰



شکل ۱۰- نتایج دانه بندی آگلومراسیون در شرایط مختلف

جدول ۸- نتایج آنالیز عیاری نمونه کانسنگ ستون ۴

آزمایشگاه	٪ Cu	٪ CuO	٪ CuO/Cu	٪Fe
آزمایشگاه مجتمع مس سونگون	۰/۳۳۵	۰/۱۱	۳۳	۵/۲۳

تجهیزات و رویه آزمایش

در این بررسی، ستون‌های آزمایش‌ها از نوع لوله‌های پلی‌اتیلنی دوجداره با قطر ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶ متر تهیه شدند (شکل ۱۱). این ستون‌ها بر روی سازه‌ای که راه‌پله دسترسی به بالای آن وجود داشت و کف ستون‌ها نیز از زمین به اندازه ۱ متر فاصله داشتند، قرار گرفته بودند. کف ستون‌ها بر روی نشیمنگاهی از جنس ضدزنگ قرار گرفته بود که امکان قراردادن بشکه‌های جمع‌آوری محلول برای یک دوره ۲۴ ساعته را فراهم می‌نمود. کف هر ستون نیز به ارتفاع ۴۰-۵۰ سانتی‌متر گراول شسته‌شده به عنوان لایه زهکش تعبیه شد تا علاوه‌بر ایجاد لایه زهکش، از خروج ذرات ریز داخل ستون نیز جلوگیری بعمل آید. برای هر ستون یک پمپ پریستالتیک جهت پاشش محلول، که به مخزن محلول پاششی مخصوص آن وصل شده بود، تعبیه شده بود. میزان دبی پاشش براساس دور چرخش هر پمپ تنظیم شده بود و به طور دوره‌ای در فواصل زمانی منظم هر روز کنترل می‌شد تا دبی پاشش ثابت نگه داشته شود. لازم به ذکر است که دبی پاشش ستون‌ها از روی نتایج ستون‌های ۲ متری به‌دست آمده بود و مقدار آن برابر با ۶ لیتر برساعت بر مترمربع بود.

پس از پرکردن ستون‌ها، آزمایش با پاشش ستون‌ها با نرخ پاشش ۶ لیتر بر مترمربع درساعت آغاز شد و محلول خروجی روزانه پس از جمع‌آوری هر دوره ۲۴ ساعته، نمونه‌برداری شده و نمونه‌های محلول برای تعیین مقدار مس، آهن و اسیدیته به آزمایشگاه ارسال می‌شدند. پس‌از حصول نتایج در همان روز، براساس مقدار مس در محلول خروجی ستون، محلول رافینت با افزودن آب و اسید و با هدف رساندن مقدار مس رافینت پاششی به حدود ۰/۵ گرم برلیتر و تکمیل سیکل بسته پاشش، آماده شده و روز بعد بر روی همان ستون پاشش می‌گردید. ستون سوم که به صورت سیکل باز می‌باشد، تنها آب و اسید برای روز بعد آزمایش تهیه می‌شد. شرایط و روزهای پاششی هر ستون مطابق

شکل ۱۱- ستون‌های شش متری آزمایش‌های پایلوت لیچینگ سونگون

جدول(۹) می‌باشد. مقدار بازیابی مس و آهن هرکدام از ستون‌ها به شرح جدول (۱۰) می‌باشد.

هر چهار ستون آزمایش براساس یک شرایط مشخص و معین که از نتایج آزمایش‌های ستونی ۲ متری به‌دست آمده بودند، تحت پاشش قرار گرفتند. در طول روند آزمایش در ۱۱ روز اول مشخص شد که مقدار اسید مورد نیاز برای استحصال مس از ستون‌های آزمایش اندک می‌باشد و لازم است مقدار اسید پاششی افزایش یابد. لذا مقدار غلظت اسید رافینت پاششی ستون‌ها از ۱۵ به ۲۰ گرم بر لیتر افزایش داده شد. این روند تا زمانی‌که در غلظت مس خروجی از ستون‌ها کاهش محسوسی مشاهده نشده بود، ادامه یافت.

برخلاف ستون‌های ۲ متری که دوره پاشش هر ستون حدود ۷۰ –۸۰ روز به‌دست آمد، در ستون‌های شش متری دوره پاشش بالای ۱۵۰ روز برای نمونه آگلومره شده و بالای ۲۰۰ روز برای سایر ستون‌ها به‌دست آمد که حاکی از زمان‌بر بودن فرآیند هیپ لیچینگ در مقیاس واقعی است. این جمله بدان معناست که نرخ انحلال مس کانسنگ در واقعیت پایین و کند است.

از آنجایی‌که نمونه قدیمی نیز در ستون شماره ۳ تحت شرایط مشابه با سایر ستون‌ها بود، این ستون نیز روند کند و آرام انحلال مس را نشان داد. این موضوع بیانگر این واقیت است که سرعت انحلال مس کانسنگ در مقیاس صنعتی و هیپ پایین می‌باشد.

براساس نتایج تأثیر دانه‌بندی ۲ و ۴ اینچ در مقایسه ستون‌های ۱ و ۲ نشان داد که بازیابی برای ستون ۱ (دانه‌بندی ۴ اینچ) ۵۰/۵۸ درصد است درصورتی‌که برای ستون ۲ با (دانه بندی ۲ اینچ) در حدود ۵۸/۱۴ درصد به‌دست آمد که نشان‌دهنده بهبود حدود ۸ درصدی بازیابی مس پس از سنگ‌شکنی می‌باشد. لازم به ذکر است که نیاز به بررسی

جدول ۹- پارامترها و شرایط آزمایش تست لیچینگ ستونی شش متری

شماره ستون	دبی پاشش (Lit/m².hr)	غلظت اسید محلول پاششی		مدار پاشش	وضعیت	نوع کانسنگ	D_{80} دانه‌بندی	وزن نمونه بارگذاری شده (kg)
		غلظت اسید (g/l)	تعداد روز پاشش (روز)					
۱	۶	۱۵	۱۱	بسته	بدون آگلومراسیون	قدیم (دامپ اکسیدی و کم عیار) و جدید (پله‌های استخراجی)	“۴	۳۱۷۴
		۲۰	۱۸۶					
		۳۰	۱۷					
		عدم پاشش	–					
۲	۶	۱۵	۱۱	بسته	بدون آگلومراسیون	قدیم (دامپ اکسیدی و کم عیار) و جدید (پله‌های استخراجی)	“۲	۹/۲۹۵۷
		۲۰	۱۸۶					
		۳۰	۱۷					
		عدم پاشش	–					
۳	۶	۱۵	۱۱	باز	بدون آگلومراسیون	قدیم (دامپ اکسیدی و کم عیار)	“۲	۲۹۳۱
		۲۰	۱۳۶					
		۳۰	۱۷					
		عدم پاشش	۲۰					
۴	۶	۱۵	–	بسته	آگلومراسیون	قدیم (دامپ اکسیدی و کم عیار) و جدید (پله‌های استخراجی)	“۲	۵۹/۲۶۵۹
		۲۰	۱۵۲					
		۳۰	–					
		عدم پاشش	–					

اقتصادی این فاکتور به دلیل افزایش بازیابی از یک طرف و تولید نرمه و سرمایه‌گذاری بیشتر از طرف دیگر، وجود دارد. کما اینکه دوره پاشش ستون‌ها طولانی بوده و در طی این مدت هیچ‌گونه جمع‌شدگی محلول نیز در سطح ستون‌ها مشاهده نشد، لذا از لحاظ عدم وجود مشکل انسداد جریان در هیپ، می‌توان خوش‌بین بود.

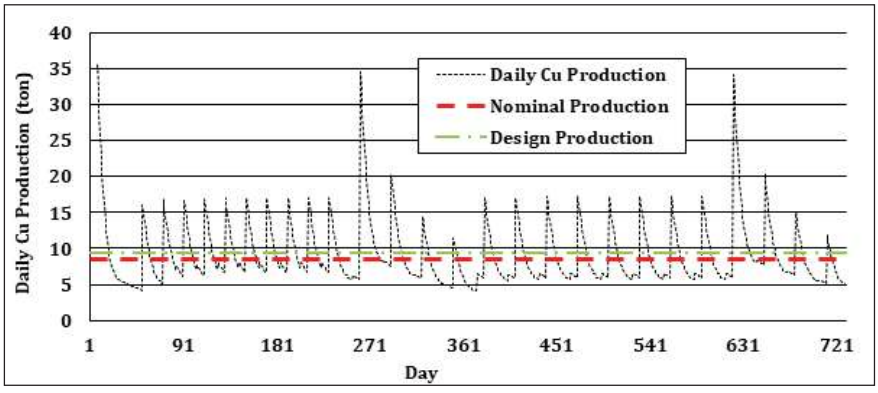
پس از اتمام پاشش ستون‌ها، بازیابی استحصال مس از دو طریق محاسبه شد. یکی براساس مقدار مس محلول در PLS خروجی از ستون‌ها که به صورت روزانه اندازه‌گیری می‌شد و دیگری براساس مقدار مس باقی‌مانده در پسماند جامد ستون‌ها. نتایج هر دو روش در جدول(۱۰) مشاهده می‌شود. هر دو میزان بازیابی و روند مشابهی را نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری و طرح مدار پاششی

مقدار غلظت مس در محلول خروجی هرکدام از ستون‌ها به قدری پایین بود که طرح پاشش پیش‌بینی شده در ستون‌های دو متری تأیید شد. این جمله بدان معناست که حتماً لازم است الگوی پاشش هیپ به صورت شکل (۲) باشد و محلول ILS (مخلوطی از محلول PLS و رافینت) بر روی هیپ پاشش شود. میزان بازیابی کلی مس در ستون آگلومره‌شده (ستون شماره ۴) با ستون آگلومره نشده (شماره ۲) اختلاف معناداری نداشت ولی از لحاظ دوره پاشش، اختلاف حدوداً ۶۰ روزه‌ای دارد که این موضوع لازم است در زمان طراحی الگوی پدهای پاششی مدنظر قرار گیرد. اما بالابودن بازیابی ستون آگلومره، دلیل منطقی برای ضرورت استفاده از آگلومراسیون در عمل نیست. همانگونه که در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود، ظرفیت تولید کارخانه

جدول ۱۰- نتایج عیارسنجی و بازیابی از ستون‌ها

	عیار پسماند (٪)			بازیابی از پسماند (٪)			بازیابی از محلول (٪)	
	Cu %	% Fe	CuO %	Cu %	% Fe	% CuO	% Cu	% Fe
ستون ۱	۲/۰	۴/۴	۰۳۶/۰	۳۷/۴۷	۱۲/۱۳	۷۶	۵۸/۵۰	۰۸/۱۰
ستون ۲	۱۷/۰	۶۵/۴	۰۲۸/۰	۴۲/۵۳	۶۰/۱۱	۲۵/۷۶	۱۴/۵۸	۰۸/۱۱
ستون ۳	۱۲/۰	۵۷/۳	۰۱۸/۰	۶۲/۵۸	۷۸/۱۹	۴۱/۸۹	۳۰/۵۰	۳۳/۱۱
ستون ۴	۱۲۶/۰	۶۳/۴	۰۲۳/۰	۳۹/۶۲	۴۷/۱۱	۰۹/۷۹	۸۱/۶۱	۷۴/۱۰

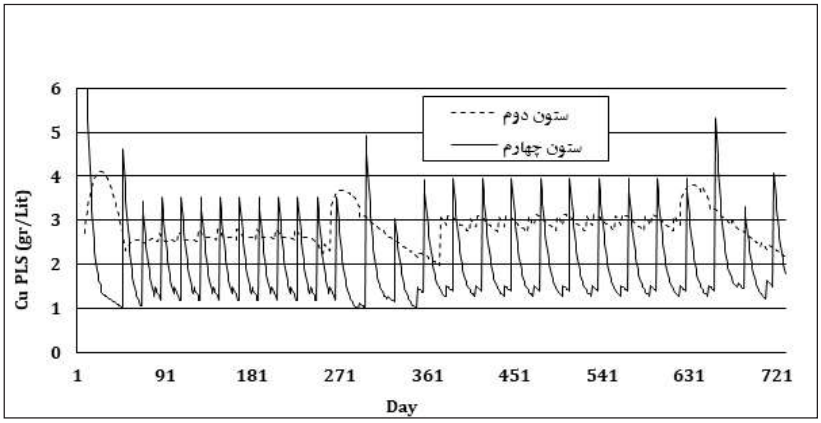


شکل ۱۲- نمودار پیش‌بینی تغییرات میزان تولید مس در هیپ براساس شرایط ستون ۴

در واحد SX/EW برای شرایط اسمی و طراحی، حدود ۹ -۱۰ تن در روز می‌باشد. اما مقدار مس تولیدی در واحد هیپ در صورت استفاده از آگلومـراسیون، به‌گونـه‌ای خواهد بود که نواسانات شدیدی وجود خواهد داشت و لازم است ظرفیت تولید کارخانه SX/EW در یک بـازه گستـرده‌ای درحدود ۵ -۳۵ تن کاتد طراحی شود تا بتواند مس محلول تولیدی در واحد هیپ را به کاتد مس تبدیل کند. چنین بازه گسترده‌ای از منظر مهندسی برای عملکرد تولیدی یک کارخانه، غیرمنطقی بوده و عملیاتی نیست.

۱- برنـامه پاشش همیشه بـاید به‌گونه ای باشد کـه غلظت یکنواختـی از مس در PLS خروجـی از هیپ به‌دست آید. این جمله بدان معناست نواسانات غلظت مس در PLS حداقل دامنه تغییرات را داشته باشند و واحد SX همیشه با کمترین نواسانات مس در محلول ورودی (PLS) روبرو شود.

۲- پاشش هیپ باید به گونه‌ای باشد که با گذشت زمان (غیر از سال شروع بهره‌برداری)، تغییرات مقدار تولید و مس محتوی PLS حالت یکنواخت و شیب تغییرات ملایمی را داشته باشد و پس از طـی دوره راه‌اندازی، به یک روند ثـابتی برسد و ظرفیت



شکل ۱۳- نمودار مقایسه پیش‌بینی تغییرات غلظت مس در PLS خروجی هیپ براساس شرایط ستون‌های ۴ و ۲

از سویی دیگر نوع هیپ مدنظر در سونگون از نوع دره‌ای یا به نوعی استاتیکی است. این جمله بدان معناست که بار ریخته شده بر روی هیپ همیشه در معرض پاشش قرار خواهد داشت. لذا محدودیت زمانی تنها برای ماه‌ها و یا دو سال اول بهره‌برداری وجود خواهد داشت و پس از آن لایه‌های خاک زیرین به بازیابی نهایی و تقریباً کامل خود خواهند رسید.

لذا براساس نتایج مشخص شد استفاده از آلگومراسیون برای کانسنگ نیاز نیست و بهترین گزینه، استفاده از خاک معدن با یک مرحله خردایش در هیپ است (شـرایط ستـون شماره ۲). بعد از حصول نتایج از آزمایش‌های پایلوت، لازم است الگوی پاشش هیپ نه‌تنها براساس این نتایج ترسیم شود، بلکه واحد پایین‌دستی هیپ، مـدار SX-EW نیز بتواند عملکرد مناسب و منطقی داشته باشد. لذا طراحی برنـامه پاشش لازم است به گونه‌ای باشد که معیارها و ضوابط عملیاتی کل واحدها مدنظر قرار گرفته باشند. برخی از این موارد عبارتنداز:

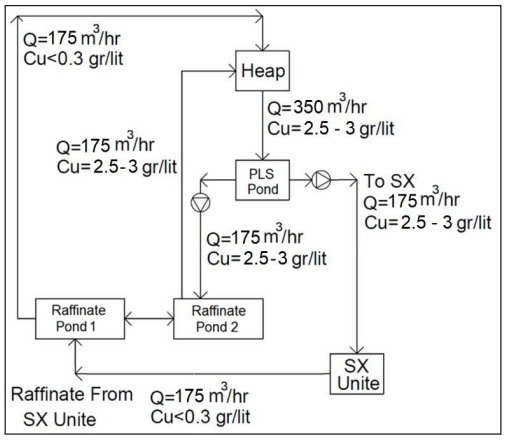
تولید ۳۰۰۰ تا ۳۳۰۰ تن مس در سال را عملیاتی کند.

۳- با توجه به شرایط بهره‌برداری واحد SX و EW، میزان دبی محلول پاششی هیپ حدود ۳۵۰ تا ۴۰۰ متر مکعب در ساعت خواهد بود و دبی محلول ورودی به واحد SX، ۱۷۵ تا ۲۰۰ مترمکعب در ساعت می‌باشد. این میزان دبی و همچنین غلظت مس در محلول خروجی از هیپ در تعیین تعداد پدهای پاششی باید مدنظر قرار گیرد.

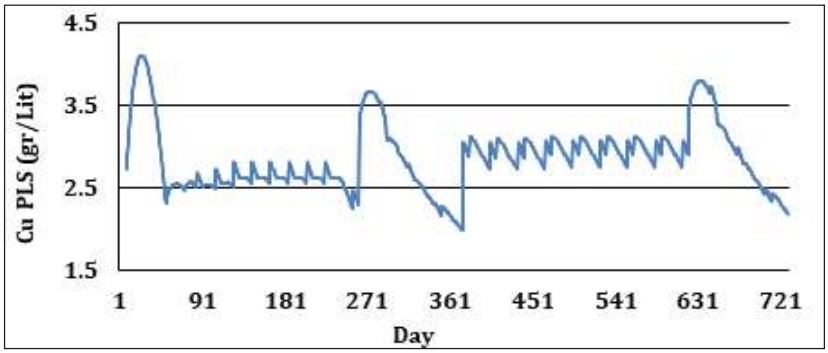
۴- به ظرفیت رسیدن یک کارخانه در یک دوره کوتاه، نکته مهم و کلیدی است که در این پروژه نیز باید مدنظر داشت. لذا در طراحی سیستم پاشش هیپ سعی شد تا به‌گونه‌ای باشد که در سال اول، کارخانه بتواند به تولید ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ تن کاتد مس برسد و در سال‌های بعد نیز این مقدار تولید بین ۳۰۰۰ تا ۳۳۰۰ تن مس حفظ شود. اگرچه در بررسی‌های فنی و اقتصادی طرح، میزان تولید در سه سال آغازین بهره‌برداری برابر با ۷۰ ، ۸۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت تولید منظور شده بود.

۵- کلیه محاسبات برای دو سال اول آغاز بهره‌برداری هیپ انجام شد و سال‌های بعدی نیز مشابه سال دوم خواهند بود.

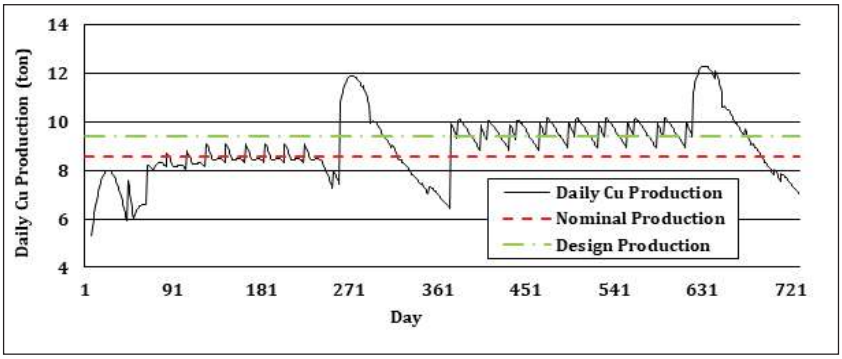
پس از تبدیل نتایج آزمایش‌ها به شرایط صنعتی، تغییرات غلظت مس در محلول خروجی و تغییرات میزان تولید مس در هیپ به ترتیب مطابق شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به‌دست آمد. همان‌گونه که از این نمودارها پیداست میزان غلظت مس در محلول خروجی از هیپ در طی دو سال اول بهره‌برداری در محدوده ۲/۵ – ۳ گرم بر لیتر خواهند بود. با توجه به مقدار تولید سالانه مدنظر از واحد EW، میزان دبی PLS برای واحد SX، حدود ۱۷۵ مترمکعب در ساعت نیاز می‌باشد. بنابراین برنامه‌ریزی پدهای پاششی هیپ بگونه‌ای خواهند بود که محلول PLS بر روی پدهای قدیمی که محتوی مس کم دارند، پاشش خواهد شد و محلول رافینت خروجی از واحد SX نیز بر روی پدهای جدید که محتوی مس بالایی دارند، پاشش خواهد شد. این فلودیاگرام نهایی در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود.



شکل ۱۶- فلودیاگرام طراحی نهایی گردش جریان‌های واحدهای هیپ پروژه لیچینگ سونگون



شکل ۱۴- نمودار پیش‌بینی تغییرات غلظت مس در محلول خروجی از هیپ براساس شرایط ستون ۲



شکل ۱۵- نمودار تغییرات میزان تولید مس در هیپ براساس شرایط ستون ۲

منابع

-"دورنمای بلند مدت قیمت مس و عوامل موثر در آن"، شرکت ملی صنایع مس ایران، امور برنامه ریزی و نظارت، آبان ماه ۱۳۹۰.

http://www.lme.com/metals/non-ferrous/copper/#tab2. 26 Dec.2013.

Schlesinger, M. E.; King, M. J.; Sole, K. C.; Davenport, W. G.; 2011,"*Extractive Metallurgy of Copper*", Elsevier, Chapter 1.

- برگرفته از « ارزیابی اثرات ارزش افزوده ایجاده شده در چرخه صنعت مس بر تولید ناخالص داخلی ایران"، شرکت ملی صنایع مس ایران، امور برنامه ریزی و نظارت، آذر ماه ۱۳۹۰.

- غلغلی، رحمان؛ و همکاران؛ "آشنایی با استحصال مس به روش فروشویی (قسمت اول)"، مجله سراسری سازمان نظام مهندسی معدن ایران، شماره ۲۵، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۱۹ تا ۲۶.

- غلغلی، رحمان؛ و همکاران؛ "آشنایی با استحصال مس به روش فروشویی (قسمت دوم)"، مجله سراسری سازمان نظام مهندسی معدن ایران، شماره ۲۶، بهار ۱۳۹۴، صفحه ۱۴ تا ۲۰.

- غلغلی، رحمان؛ و همکاران؛ "بررسی اسحصال مس از کانسنگ معدن مس نسیم به روش فروشویی (شناسایی نمونه)"، مجله سراسری سازمان نظام مهندسی معدن ایران، شماره ۳۳، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۳.

https://www.abcic.ir/ui/index.php?file=page&operation=show&id=12205

-« گزارشات تولید سالانه امور معدن مس سونگون». سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۳.