

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی

پایان نامه کارشناسی ارشد

## بررسی تأثیر کانی‌های اکسیدی مس بر بازیابی مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ مس سونگون و ارائه راهکارهایی جهت افزایش بازیابی

نگارنده: احد زارع ورزقان

اساتید راهنما:

دکتر محمد کارآموزیان

دکتر اصغر عزیزی

تیر ۱۳۹۶

شماره: ۳۹۹۴/۱۹۹۳-  
تاریخ: ۹۶/۶/۱۳

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای احد زارع ورزقان با شماره دانشجویی ۹۴۰۸۶۵۴ رشته مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی تحت عنوان بررسی تأثیرکانی های اکسیدی مس بر بازیابی مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ مس سوتگون و ارائه راهکارهایی جهت افزایش بازیابی که در تاریخ ۱۳۹۶/۴/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: خیلی خوب)  مردود   
نوع تحقیق: نظری  عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر محمد کاراموزیان	۱- استاد راهنمای اول
	استادیار	دکتر اصغر عزیزی	۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر رامین رفیعی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر کیومرث سیف پناهی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر محمد جهانی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده



تیسره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر از هیأت ممتحنین می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع

مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به

مادرم، دریای بی‌کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه

مهر

و به برادرم که همواره در طول تحصیل متحمل زحماتم بود و تکیه‌گاه من در مواجهه با

مشکلات و وجودش مایه دلگرمی من می‌باشد.

## تقدیر و تشکر

سپاس مخصوص خداوند مهربان است که به انسان توانایی و دانایی بخشید تا به بندگانش شفقت ورزد، مهربانی کند و در حل مشکلات یاریشان نماید. شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم و در این راه از اساتید با کمالات و شایسته؛ جناب آقایان دکتر محمد کارآموزیان و دکتر اصغر عزیزی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی‌شان، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛ از جناب آقای مهندس اصغر باقریان، مدیر محترم امور تغلیظ مجتمع مس سونگون که انجام این پروژه مدیون همکاری و همیاری صمیمانه ایشان بود نهایت قدردانی را دارم. از اساتید محترم داور، جناب آقایان دکتر کیومرث سیف پناهی و دکتر محمد جهانی که زحمت داوری پایان نامه را بر عهده داشتند و از تمامی مهندسان و کارکنان زحمت‌کش واحد متالورژی مجتمع مس سونگون بخصوص آقایان مهندسان علیزاده، فتحزاده، دانش، گلی‌زاده، رضوی، خدایی، سعدی، قهرمانی، ادیب‌زاده و دوست عزیزم اکبر تقی‌پور که نهایت همکاری را با بنده در طی انجام پروژه داشته‌اند تشکر و سپاسگزاری می‌کنم.

## تعهدنامه

اینجانب احد زارع ورزقان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تأثیر کانی‌های اکسیدی مس بر بازیابی مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ مس سونگون و ارائه راهکارهایی جهت افزایش بازیابی

متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا افراد دیگر برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته
- یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

امضاء:

تاریخ:

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

خوراک ورودی کارخانه تغلیظ مس سونگون ترکیبی از مس اکسیدی و سولفیدی است که حدود ۵ تا ۲۵ درصد از مس کل را مس اکسیدی تشکیل می‌دهد. رفتار فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی مس با توجه به ماهیت آن‌ها با کانی‌های سولفیدی مس متفاوت است که در این حالت بازیابی آنها پایین‌تر است. مهم‌ترین اهداف این تحقیق بررسی چگونگی رفتار کانی‌های اکسیدی مس در مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سونگون و ارائه راهکارهایی جهت بهبود بازیابی این کانی‌ها است. در مرحله اول به ارزیابی عوامل مؤثر بر بازیابی مس اکسیدی در مراحل رافر و رمق‌گیر کارخانه تغلیظ ۱ پرداخته شد. برای این منظور نمونه‌برداری‌هایی از نقاط مختلف مدار رافر و رمق‌گیر و همچنین خوراک، باطله و کنسانتره نهایی انجام شد. در مرحله دوم به منظور ارائه راهکارهایی جهت بهبود بازیابی مس اکسیدی پارامترهای مختلفی مانند نوع و مقدار عامل سولفیداسیون، نوع و مقدار کلکتور، متفرق‌کننده، زمان آماده‌سازی، pH، سرعت همزنی و پتانسیل مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بازیابی مس اکسیدی هم در مدار رافر و هم در مدار رمق‌گیر به دلیل قابلیت کم کلکتور و کف‌سازهای مورد استفاده، در شناورسازی کانی‌های اکسیدی مس، پایین است. برای بازیابی کانی‌های اکسیدی مس دو روش سولفیداسیون و استفاده از کلکتورهای آنیونی به کار برده شد. در سولفیداسیون به روش حلزونی استفاده از سولفید آمونیوم به مقدار ۳۰۰ گرم بر تن در مرحله اول با زمان آماده‌سازی ۲ دقیقه و  $pH=11$  و سرعت همزنی ۱۲۵۰ دور در دقیقه بازیابی مس اکسیدی را با ۹/۴۶ درصد بهبود به ۷۷/۱۲ درصد رساند. در این حالت بازیابی مس سولفیدی نیز به‌طور چشم‌گیری افزایش یافت. در روش کنترل پتانسیل سولفیداسیون که با استفاده از سولفید آمونیوم انجام شد، در محدوده پتانسیل ۴۰- تا ۵۰- بهترین پاسخ به دست آمد. به طوری که بازیابی مس اکسیدی به ۷۸ درصد و بازیابی مس کل به ۸۶/۶ درصد رسید. نتایج استفاده از کلکتورهای آنیونی نشان داد که از بین هیدروکسیمات‌ها استفاده از ۱۰ گرم بر تن پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات بدون تأثیر منفی روی بازیابی

مس سولفیدی، بازیابی مس اکسیدی را به ۷۴/۴۶ درصد رساند. استفاده هم‌زمان از Z6 و Z11 به دلیل زنجیر کربنی طولانی Z6 باعث شد بازیابی مس اکسیدی با بهبود ۳/۶۳ درصدی به ۷۱/۲۹ درصد برسد. استفاده از ۴۰۰ گرم بر تن سیلیکات سدیم به عنوان متفرق کننده علاوه بر بهبود ۲/۳۴ درصدی بازیابی مس اکسیدی، بازیابی مس سولفیدی را نیز به مقدار ۳/۵۱ درصد بهبود بخشید. از سولفید آمونیوم، Z6، پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات و سیلیکات سدیم در ترکیب‌های مختلفی استفاده شد که در این حالت بهترین نتیجه در مورد بازیابی مس اکسیدی در حضور ۴۰۰ گرم بر تن سولفید آمونیوم و ۱۰ گرم بر تن پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات به دست آمد که مقدار بازیابی مس اکسیدی ۷۷/۳۱ درصد بود.

**واژه‌های کلیدی:** مجتمع مس سونگون، فلوتاسیون، کانی‌های اکسیدی مس، سولفیداسیون، هیدروکسیمات.



## فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه و بیان مسئله	۲
۲-۱- معرفی مجتمع مس سونگون	۳
۱-۲-۱- زمین‌شناسی سونگون	۳
۱-۱-۲-۱- کانی‌شناسی ناحیه فروشست	۴
۲-۱-۲-۱- کانی‌شناسی ناحیه سوپرژن	۵
۲-۱-۲-۱- کانی‌شناسی ناحیه سوپرژن - هیپوژن	۵
۲-۱-۲-۱- کانی‌شناسی ناحیه هیپوژن	۵
۲-۲-۱- اکتشافات معدن مس سونگون	۶
۲-۳-۱- کارخانه تغلیظ مس سونگون	۶
۲-۳-۱- مواد شیمیایی مورد استفاده در کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سونگون	۸
۳-۱- منابع مس	۹
۴-۱- فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی	۱۱
۵-۱- فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی مس	۱۲
۱-۵-۱- تأثیر پتانسیل زتا در فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی	۱۳
۲-۵-۱- انواع روش‌های فلوتاسیون مس اکسیدی	۱۵
۱-۲-۵-۱- استفاده از کلکتورهای کاتیونی برای فلوتاسیون مس اکسیدی	۱۶
۲-۲-۵-۱- استفاده از اسیدهای چرب برای فلوتاسیون مس اکسیدی	۱۶
۳-۲-۵-۱- استفاده از گزنتات‌ها با زنجیر کربنی بلند برای فلوتاسیون مس اکسیدی	۱۷
۴-۲-۵-۱- استفاده از یک عامل کی‌لیتی مانند هیدروکسیمات‌ها برای فلوتاسیون مس اکسیدی	۱۹
۵-۲-۵-۱- علت استفاده کم از هیدروکسیمات در مقیاس صنعتی	۲۱

۲۱.....	۱-۵-۲-۶- استفاده از روش سولفیداسیون در فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی.....
۲۳.....	۱-۵-۲-۷- معایب روش سولفیداسیون .....
۲۳.....	۱-۵-۲-۸- تأثیر نوع کانی و خصوصیات آن در سولفیداسیون .....
۲۴.....	۱-۵-۲-۹- انتخاب عامل سولفیداسیون .....
۲۷.....	۱-۵-۲-۱۰- روش‌های انجام سولفیداسیون .....
۲۸... ۶-۱	عملیات صنعتی فرآوری کانسنگ‌های مخلوط مس اکسیدی - سولفیدی به روش فلوتاسیون ...
۳۲.....	۱-۷- ضرورت انجام تحقیق.....
۳۳.....	۱-۸- سازمان‌دهی فصل‌ها .....
۳۵.....	فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته و مبانی نظری تحقیق .....
۳۶.....	۲-۱- مقدمه .....
۳۶.....	۲-۲- مروری بر تحقیقات انجام گرفته .....
۴۷.....	فصل سوم: روش، تجهیزات و مواد شیمیایی .....
۴۸.....	۳-۱- مقدمه .....
۴۸.....	۳-۲- نمونه‌برداری .....
۴۸.....	۳-۲-۱- نمونه‌گیری نوبت اول .....
۴۹.....	۳-۲-۲- نمونه‌گیری نوبت دوم .....
۵۰.....	۳-۳- آنالیز نمونه .....
۵۳.....	۳-۴- مواد شیمیایی مصرف‌شده در آزمایش‌های فلوتاسیون .....
۵۴.....	۳-۴-۱- حذف کلکتور از سطح کانی.....
۵۵.....	۳-۵- روش انجام آزمایش‌ها .....
۵۵.....	۳-۶- روش‌های مورد استفاده برای فلوتاسیون مس اکسیدی.....
۵۶.....	۳-۶-۱- استفاده از گزنتات‌ها برای بهبود بازیابی مس اکسیدی .....
۵۶.....	۳-۶-۲- استفاده از هیدروکسیمات‌ها به‌عنوان کلکتور برای بهبود بازیابی مس اکسیدی .....
۵۷.....	۳-۶-۳- استفاده از فرآیند سولفیداسیون برای بهبود بازیابی مس اکسیدی.....

۵۷.....	۳-۶-۱- سولفیداسیون حلزونی
۵۸.....	۳-۶-۲- کنترل پتانسیل سولفیداسیون (CPS)
۶۰.....	۳-۶-۴- استفاده از متفرق کننده‌ها برای بهبود بازیابی مس اکسیدی
۶۰.....	۳-۷- محاسبات متالورژیکی
۶۳.....	<b>فصل چهارم: ارائه یافته‌ها و تحلیل نتایج</b>
۶۴.....	۴-۱- بررسی هدرروی مس اکسیدی در مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ
۶۴.....	۴-۱-۱- بررسی هدرروی مس اکسیدی در سلول‌های رافر بر اساس نتایج نمونه‌گیری
۶۵.....	۴-۱-۲- تأثیر مس اکسیدی بر بازیابی و عیار نهایی مس در سلول‌های رافر
۶۷.....	۴-۱-۳- بررسی هدرروی مس اکسیدی در سلول‌های رمق‌گیر بر اساس نتایج نمونه‌گیری
۶۸.....	۴-۱-۴- ارزیابی کلی از مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ ۱ بر اساس نتایج نمونه‌گیری
	۴-۱-۵- ارزیابی کلی از مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ ۱ بر اساس داده‌های متالورژیکی کارخانه
۶۹.....	تغلیظ ۱
۷۰.....	۴-۲- ارزیابی پارامترهای عملیاتی مؤثر بر بهبود عملکرد فلوتاسیون مس اکسیدی
۷۲.....	۴-۳- فرآیند سولفیداسیون
۷۲.....	۴-۳-۱- انتخاب عامل سولفیداسیون
۷۳.....	۴-۳-۲- سولفید سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون
۷۵.....	۴-۳-۳- هیدروسولفید سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون
۷۶.....	۴-۳-۴- سولفید آمونیوم به عنوان عامل سولفیداسیون
۷۸.....	۴-۳-۵- انتخاب مکان مناسب برای اضافه کردن سولفید آمونیوم
	۴-۳-۶- بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر سولفیداسیون کانی‌های اکسیدی مس با سولفید
۸۲.....	آمونیوم
۸۲.....	۴-۳-۷- تأثیر زمان آماده‌سازی
۸۳.....	۴-۳-۸- تأثیر pH
۸۴.....	۴-۳-۹- تأثیر اغتشاش پالپ
۸۶.....	۴-۳-۱۰- کنترل پتانسیل پالپ

۸۷.....	۴-۳-۱۱- تأثیر کلکتور پتاسیم آمیل گزنات بر روی بازیابی مس اکسیدی
۹۰.....	۴-۴- اثر هیدروکسیمات‌ها بر روی بازیابی مس اکسیدی
۹۳.....	۴-۴-۱- اثر تغییر pH در حضور پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات بر روی بازیابی مس اکسیدی
۹۴.....	۴-۵- اثر سیلیکات سدیم بر روی بازیابی مس اکسیدی
۹۵.....	۴-۶- تأثیر استفاده هم‌زمان از مواد شیمیایی بر روی بازیابی مس اکسیدی
۹۹.....	فصل پنجم: خلاصه و نتیجه گیری
۱۰۰.....	۵-۱- خلاصه و نتیجه‌گیری
۱۰۲.....	۵-۲- پیشنهادها
۱۰۳.....	منابع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- وضعیت ناحیه‌های فروشست، سوپرژن و هیپوژن کانسار مس سونگون در یک مقطع قائم ..... ۴
- شکل ۱-۲- فلوشیت کلی کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سونگون ..... ۸
- شکل ۱-۳- ساختار سدیم اولئات ..... ۱۸۵
- شکل ۱-۴- تأثیر طول زنجیر کربنی گزنتات‌ها در بازیابی اکسید نیکل ..... ۱۸
- شکل ۱-۵- تأثیر افزایش غلظت اوکتیل گزنتات بر مقدار بازیابی اکسیدهای مختلف ..... ۱۸
- شکل ۱-۶- ساختارهای اصلی سازنده هیدروکسیمات‌ها ..... ۱۹
- شکل ۱-۷- ساختار مولکولی پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات ..... ۲۰
- شکل ۱-۸- دیاگرام Eh - pH سیستم S - H<sub>2</sub>O با غلظت گونه‌های محلول 10<sup>-3</sup>M ..... ۲۶
- شکل ۱-۹- فلوشیت فرآوری کانسنگ‌های مخلوط مس اکسیدی - سولفیدی ..... ۲۹
- شکل ۱-۱۰- فلوشیت مدار فلوتاسیون رافر و رمق‌گیر برای کانسنگ مخلوط مس اکسیدی - سولفیدی معدن مس کانساشی ..... ۲۹
- شکل ۲-۱- تأثیر غلظت هیدروکسیمات در بازیابی مس ..... ۴۱
- شکل ۲-۲- تأثیر انواع کلکتورها روی بازیابی مس اکسیدی ..... ۴۱
- شکل ۲-۳- تأثیر غلظت سولفید سدیم بر بازیابی مس اکسیدی ..... ۴۲
- شکل ۳-۱- فلوشیت نقاط نمونه برداری ..... ۵۰
- شکل ۳-۲- آنالیز ابعادی نمونه اخذ شده جهت انجام آزمایش‌های فلوتاسیون ..... ۵۲
- شکل ۳-۳- مراحل انجام آزمایش فلوتاسیون در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱ ..... ۵۶
- شکل ۳-۴- شرایط استفاده از کلکتور Z6 در آزمایش‌ها ..... ۵۶
- شکل ۳-۵- شرایط استفاده از کلکتور هیدروکسیمات‌ها در آزمایش‌ها ..... ۵۷
- شکل ۳-۶- شرایط استفاده از عوامل سولفیداسیون در آزمایش‌های فلوتاسیون ..... ۵۸
- شکل ۳-۷- شرایط استفاده از سیلیکات سدیم در آزمایش‌های فلوتاسیون ..... ۶۰
- شکل ۳-۸- نمایش شماتیک از روش، مواد و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها ..... ۶۱
- شکل ۴-۱- تأثیر افزایش عیار مس اکسیدی در خوراک، بر بازیابی مس اکسیدی و مس کل در مدار رافر ..... ۶۶

- شکل ۴-۲- تأثیر افزایش عیار مس اکسیدی در خوراک، بر بازیابی نهایی مس ..... ۷۰
- شکل ۴-۳- نتایج استفاده از سولفید سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون در بازیابی مس اکسیدی ..... ۷۰۸
- شکل ۴-۴- نتایج استفاده از هیدروسولفید سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون در بازیابی مس اکسیدی ..... ۶۹
- شکل ۴-۵- استفاده از سولفید آمونیوم به عنوان عامل سولفیداسیون در بازیابی مس اکسیدی ..... ۷۶
- شکل ۴-۶- مقایسه نتایج بازیابی هیدروسولفید سدیم، سولفید سدیم و سولفید آمونیوم با بازیابی در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱ ..... ۷۸
- شکل ۴-۷- نقاطی که در مدار رافر کارخانه تغلیظ ۱ مواد شیمیایی به پالپ اضافه می شود ..... ۸۱۲
- شکل ۴-۸- مقایسه نتیجه استفاده از سولفید آمونیوم در نقطه ۱ با شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱ ..... ۸۱
- شکل ۴-۹- تأثیر زمان آماده سازی سولفیداسیون بر بازیابی مس اکسیدی ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۰- تأثیر pH در زمان آماده سازی سولفیداسیون بر بازیابی مس اکسیدی ..... ۸۴
- شکل ۴-۱۱- تأثیر سرعت همزن در زمان آماده سازی سولفیداسیون بر بازیابی مس اکسیدی ..... ۸۵
- شکل ۴-۱۲- نتایج روش سولفیداسیون کنترل پتانسیل ..... ۷۹
- شکل ۴-۱۳- مقایسه نتایج روش CPS با شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ..... ۸۷
- شکل ۴-۱۴- تأثیر پتاسیم آمیل گزنتات بر بازیابی مس اکسیدی و سولفیدی ..... ۸۸
- شکل ۴-۱۵- نتایج استفاده از پتاسیم آمیل گزنتات در مرحله ۳ و ۴ ..... ۹۰
- شکل ۴-۱۶- تأثیر پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات و سدیم اکتیل هیدروکسیمات روی بازیابی مس اکسیدی ..... ۹۲
- شکل ۴-۱۷- تأثیر استفاده از ۱۰ گرم بر تن پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات بر بازیابی مس اکسیدی ..... ۹۲
- شکل ۴-۱۸- تأثیر pH بر بازیابی مس اکسیدی ..... ۹۳
- شکل ۴-۱۹- نتایج استفاده از سیلیکات سدیم به عنوان متفرق کننده ..... ۹۴
- شکل ۴-۲۰- نتایج استفاده هم زمان از مواد شیمیایی در فلوتاسیون مس اکسیدی ..... ۹۶

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱- مشخصات مهمترین کانی‌های سولفیدی مس ..... ۹
- جدول ۱-۲- مشخصات کانی‌های مس اکسیدی دارای ارزش اقتصادی ..... ۱۰
- جدول ۱-۳- زاویه تماس انواع کانی‌های مس در حضور پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات در pH های مختلف ..... ۲۰
- جدول ۱-۴- ترکیب مواد شیمیایی مورد استفاده در فرآوری کانسنگ مخلوط مس اکسیدی - سولفیدی در معادن مختلف ..... ۳۰
- جدول ۱-۵- نتایج واحد های صنعتی فرآوری کانسنگ مس مخلوط اکسیدی - سولفیدی ..... ۳۰
- جدول ۱-۲- مشخصات هیدروکسیمات‌های استفاده شده در انجام آزمایش ..... ۴۴
- جدول ۲-۲- خلاصه ای از مروری بر تحقیقات پیشین ..... ۴۵
- جدول ۱-۳- نتایج آنالیز XRD نمونه اخذ شده جهت انجام آزمایش‌های فلوتاسیون ..... ۵۱
- جدول ۲-۳- نتایج آنالیز XRF نمونه اخذ شده جهت انجام آزمایش‌های فلوتاسیون ..... ۵۱
- جدول ۳-۳- توزیع دانه‌بندی نمونه و نتایج آنالیز عیاری هر محدوده ..... ۵۲
- جدول ۳-۴- مشخصات مواد شیمیایی مورد استفاده در آزمایش‌ها ..... ۵۳
- جدول ۳-۵- شرایط انجام آزمایش‌ها به روش کنترل پتانسیل سولفیداسیون ..... ۵۹
- جدول ۴-۱- نتایج نمونه‌گیری از سلول‌های رافر کارخانه تغلیظ ۱ ..... ۵۹
- جدول ۲-۴- نتایج آنالیز عیاری نمونه اکسید پایین و اکسید بالا در سلول‌های رمق‌گیر کارخانه تغلیظ ۱ ..... ۶۸
- جدول ۳-۴- نتایج آنالیز عیاری و بازیابی نمونه‌های اخذ شده از سه نقطه خوراک، کنسانتره و باطله نهایی کارخانه تغلیظ ۱ ..... ۶۹
- جدول ۴-۴- شرایط و مراحل انجام آزمایش فلوتاسیون در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱ ..... ۷۱
- جدول ۵-۴- نتایج آزمایش‌های اولیه در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱ ..... ۷۲
- جدول ۶-۴- شرایط استفاده از عوامل سولفیداسیون برای انتخاب مناسب‌ترین عامل سولفیداسیون ..... ۷۳
- جدول ۷-۴- مقدار سولفید آمونیوم اضافه شده در آزمایش‌های فلوتاسیون ..... ۷۹
- جدول ۸-۴- شرایط استفاده از سولفید آمونیوم در نقطه ۱ ..... ۸۱
- جدول ۹-۴- شرایط استفاده از پتاسیم‌آمیل‌گزنتات برای بازیابی مس اکسیدی ..... ۸۸

- جدول ۴-۱۰- شرایط اضافه کردن پتاسیم آمیل گزنات در مرحله سه و چهار ..... ۸۹
- جدول ۴-۱۱- شرایط استفاده از هیدروکسیمات ها برای بهبود بازیابی مس اکسیدی ..... ۹۱
- جدول ۴-۱۲- شرایط استفاده از سیلیکات سدیم در آزمایش ها ..... ۹۵
- جدول ۴-۱۳- مقادیر پارامترهای کنترل شده در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱ ..... ۹۶



## فصل اول

### کلیات

## ۱-۱ - مقدمه و بیان مسئله

بیش از ۱۷۰ نوع کانی مس دار شناخته شده است که ۱۰ تا ۱۵ نوع آن‌ها برای استخراج مس اقتصادی هستند. یکی از رایج‌ترین روش‌های فرآوری کانی‌های مس، فلوتاسیون است. این روش به‌عنوان یک فرآیند انتخابی وابسته به ویژگی‌های سطح کانی است و برای بازیابی کانی‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. منابع مس در طبیعت به‌صورت خالص، سولفیدی، کربناته و اکسیدی هستند. بیش از ۹۰ درصد منابع مس سولفیدی توسط فرآیند فلوتاسیون فرآوری می‌شوند. پیش از این به دلیل وجود منابع زیاد کانی‌های سولفیدی و بازیابی راحت‌تر مس از کانی‌های سولفیدی، استفاده از منابع اکسیدی مس غیراقتصادی به حساب می‌آمد و بنابراین کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ اما امروزه به دلیل افزایش تقاضا و نیز با توجه به اینکه بسیاری از صنایع وابستگی مستقیم و غیرمستقیم به فلز مس دارند و نیز به دلیل کاهش منابع سولفیدی، بازیابی و استخراج مس از منابع اکسیدی جنبه اقتصادی به خود گرفته است. از طرفی فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی مس با کلکتورهای مورد استفاده برای کانی‌های سولفیدی، به دلیل حلالیت بالای کانی‌های اکسیدی، همراه بودن با کانی‌های رسی، تولید نرمه زیاد، همراه بودن با اکسیدهای آهن و مصرف زیاد کلکتور، کارایی مناسبی ندارند. در حالت کلی برای فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی مس دو روش مرسوم است: (۱) استفاده مستقیم از اسیدهای چرب، آمین‌ها و هیدروکسیمات‌ها به‌عنوان کلکتور ( بدون واکنش فعال‌سازی) (۲) فعال‌سازی با استفاده از مواد مختلف مانند سولفید سدیم، سولفید آمونیوم، سولفید سیانور و هیدروسولفید سدیم. روش اول یعنی فلوتاسیون مستقیم با کلکتورها انتخابیت خوبی ندارد و تنها می‌تواند برای تعداد اندکی از مواد استفاده شود؛ اما روش دوم یعنی سولفیداسیون سطح نسبت به روش اول مؤثرتر است. مشکل اصلی فرآیند سولفیداسیون این است که غلظت مناسب و بهینه عامل سولفیداسیون وابستگی شدیدی به زمان آماده‌سازی، روش‌های مخلوط کردن و متغیرهای دیگر دارد. ضمناً رفتار فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی مس وابسته به ترکیب مواد معدنی، ساختار کریستالی و ترکیب یونی پالپ است. بنابراین،

تحقیق حاضر بر فلوتاسیون کانسنگ اکسیدی مس و شناخت پارامترهای مؤثر بر فلوتاسیون هم‌زمان کانی‌های اکسیدی و سولفیدی مس، تعیین نوع کلکتور مناسب و میزان مصرف بهینه آن، بهبود عملکرد سلول‌های فلوتاسیون و بهبود بازیابی کانی‌های اکسیدی مس در فلوتاسیون هم‌زمان با کانی‌های سولفیدی مس متمرکز شده است.

## ۱-۲- معرفی مجتمع مس سونگون

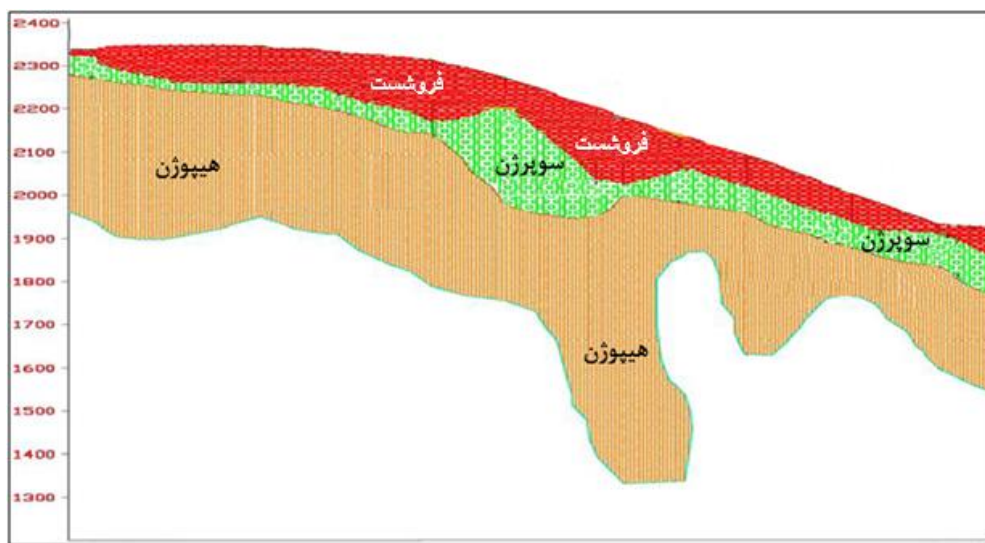
معدن مس سونگون در شمال غرب کشور در استان آذربایجان شرقی، ۱۳۰ کیلومتری شمال شرقی تبریز و ۳۰ کیلومتری شمال ورزقان و در نزدیکی مرز کشورهای آذربایجان و ارمنستان قرار دارد. مختصات جغرافیایی منطقه، ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی می‌باشد. معدن مس سونگون در یک منطقه کوهستانی واقع شده است. این ناحیه در ناحیه آتش‌فشانی ارومیه - دختر و بر روی کمربند کوهزایی آلپ - هیمالیا قرار داشته و دارای آب و هوای سرد تا معتدل و مرطوب با پوشش گیاهی متراکم می‌باشد. حداکثر ارتفاع محدوده معدن از سطح دریا ۵۱۱۱ متر است. راه دسترسی اصلی معدن از طریق جاده تبریز- ورزقان- سونگون می‌باشد [۱].

### ۱-۲-۱- زمین‌شناسی سونگون

کانسار مس سونگون از کانسارهای پورفیری نوع مونزونیتی است که سطح توده کانسار در شبکه اکتشافات تفصیلی در حدود یک کیلومترمربع است. کانی‌های سولفیدی موجود در کانسار مس سونگون شامل پیریت، مولیبدنیت، گالن، اسفالریت، مارکازیت، پیروتیت و سولفیدهای مس (کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت و کوولیت) هستند. فلزات اصلی شامل طلا، نقره و اکسیدها شامل ایلمنیت، رتیل، مگنتیت و گوتیت می‌باشد. همانند سایر معادن پورفیری سه ناحیه فروشست<sup>۱</sup>، سوپرژن<sup>۲</sup> و هیپوژن<sup>۳</sup> در معدن مس

۱- Leach zone  
۲- Supergene  
۳- Hypogene

سونگون قابل‌رؤیت می‌باشد که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. ضخامت ناحیه فروشت از ۲۰ تا ۱۵۰ متر در نوسان بوده و ناحیه سوپرژن دارای ضخامت متغیر از صفر تا ۲۰۰ متر می‌باشد. ضخامت بخش هیپوژن تا حدود ۶۰۰ متر برآورد شده است. کانی‌زایی سولفور به دو بخش سوپرژن و هیپوژن محدود می‌باشد. ناحیه سوپرژن خود به دو زیر مجموعه سوپرژن - اکسید و سوپرژن - سولفیدی تقسیم می‌شود؛ و ضمناً ناحیه انتقالی سوپرژن - هیپوژن را نیز در اغلب گمانه‌ها می‌توان ملاحظه کرد [۱،۲].



شکل ۱-۱- وضعیت ناحیه‌های فروشت، سوپرژن و هیپوژن کانسار مس سونگون در یک مقطع قائم [۱]

#### ۱-۱-۲-۱- کانی‌شناسی ناحیه فروشت

ناحیه فروشت که با پاراژنز کانی‌شناسی مالاکیت، آزوریت، کالکانتیت، کریزوکولا، تنوریت و اکسیدهای آهن و منگنز مشخص می‌شود، در همه جای کانسار به‌طور یکسانی توزیع نشده است و بررسی‌های اولیه نشان می‌دهد که این ناحیه از گسترش ناچیزی در این کانسار برخوردار است و در برخی از نقاط عملاً تشکیل نشده است. رنگ سنگ در این ناحیه قرمز قهوه‌ای تا قهوه‌ای روشن بوده و با فراوانی

کربنات‌های مس (مالاکیت و آزوریت)، کالکانتیت و تنوریت (به‌صورت لکه‌های سیاه و افشان) و گاهی به فرم پرکننده سیستم درزه و شکاف مشخص می‌شود. این ناحیه گاهی مرز تدریجی با ناحیه سوپرژن نشان می‌دهد و در این صورت یک ناحیه انتقالی بنام سوپرژن - اکسید تشکیل می‌شود [۲].

#### ۱-۲-۱-۲- کانی‌شناسی ناحیه سوپرژن

رنگ سنگ در این ناحیه به واسطه وجود مقادیر متفاوتی از کالکوسیت از خاکستری روشن تا تیره در نوسان است و با افزایش میزان کالکوسیت، رنگ سنگ تیره می‌شود. گسترش ناحیه سوپرژن و ضخامت آن در کانسار مس سونگون بسیار متغیر بوده و در نوسان سطح و ضخامت آن، سطح آب‌های زیرزمینی، مورفولوژی منطقه، تراکم سیستم درزه و شکاف، وجود گسل‌ها و نوع آن‌ها دخالت دارند. کانی‌سازی سولفیدی در این ناحیه عموماً شامل کالکوسیت به همراه پیریت است [۲].

#### ۱-۲-۱-۳- مینرالوژی ناحیه سوپرژن - هیپوژن

حداصل دو ناحیه سوپرژن و هیپوژن در کانسار مس سونگون را اغلب یک ناحیه انتقالی تشکیل می‌دهد که مجموعه کانی‌های سوپرژن و هیپوژن در کنار هم دیده می‌شوند. ضخامت این ناحیه تابعی از ضخامت ناحیه سوپرژن، ناحیه شسته شده، مورفولوژی منطقه، سطح آب زیرزمینی و میزان تراکم سیستم درز و شکاف سنگ است. در این ناحیه انتقالی مقادیر کانه‌های کالکوپیریت، بورنیت و مولیبدنیت از بالا به پایین در حال افزایش بوده و از میزان کالکوسیت و کوولیت کاسته می‌شود [۲].

#### ۱-۲-۱-۴- مینرالوژی ناحیه هیپوژن

کانی‌های سولفیدی مس در این ناحیه غالباً شامل کالکوپیریت و بورنیت هست که با مولیبدنیت همراهی می‌شوند. بعلاوه محصولات دگرسانی سولفیدی مس از جمله کالکوسیت و کوولیت نیز ممکن است در کنار آن‌ها مشاهده شوند [۲].

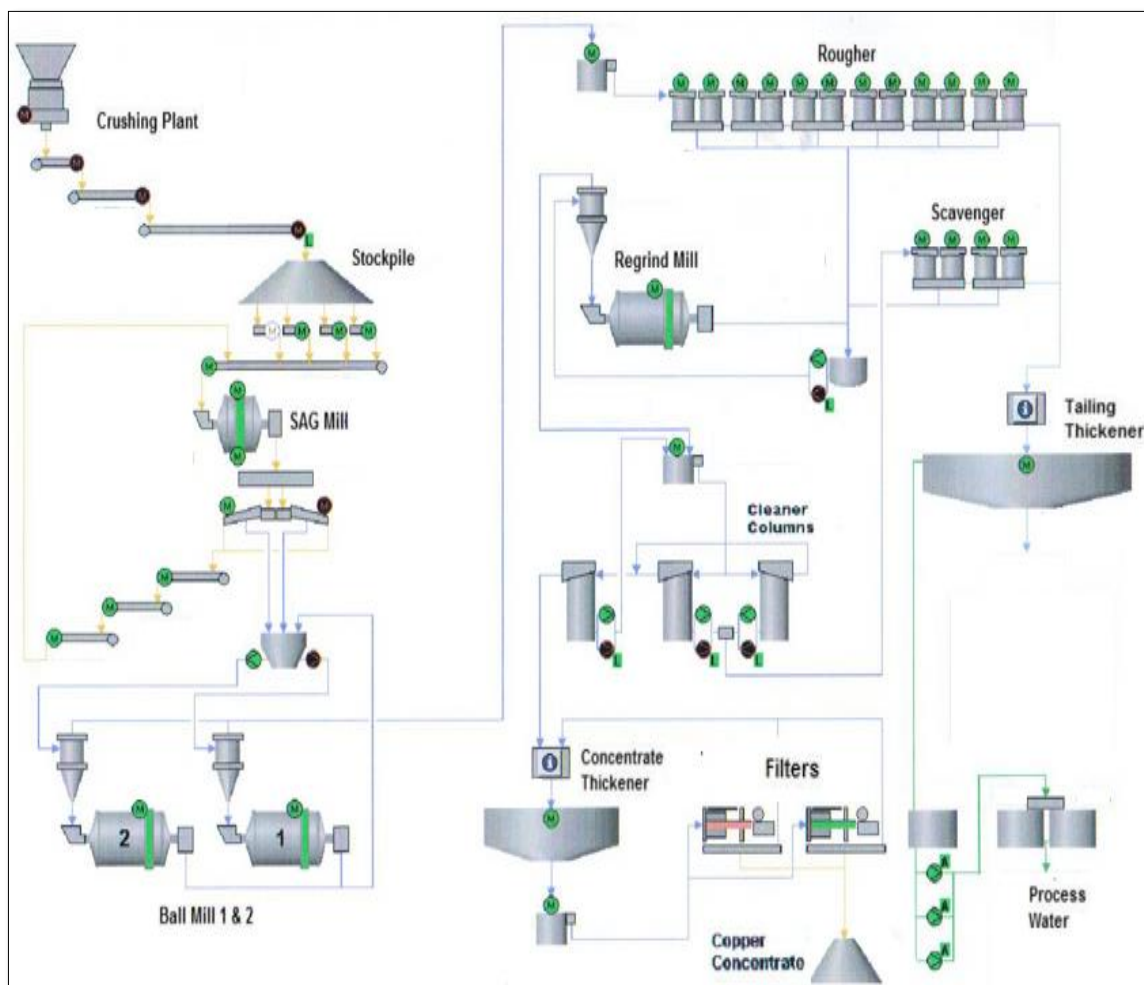
## ۱-۲-۲- اکتشافات معدن مس سونگون

کانی‌سازی اصلی کانسار شامل کانی‌های مس و مولیبدن است و دومین تولیدکننده مس ایران است. ذخیره قطعی کانسار مس سونگون حدود ۷۹۶ میلیون تن با عیار ۰/۶۱ درصد، ذخیره قابل استخراج حدود ۳۸۸ میلیون تن با عیار ۰/۶۱ درصد برآورد شده است. همچنین در این کانسار حدود ۱۸/۵ میلیون تن مس اکسیدی با عیار مس ۰/۴ درصد وجود دارد. عمر معدن بر اساس برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت ۳۱ سال در نظر گرفته شده است [۱،۳].

## ۱-۲-۳- کارخانه تغلیظ مس سونگون

کارخانه تغلیظ مس سونگون در دو فاز و هرکدام با ظرفیت ۷ میلیون تن خوراک در سال ۳۰۰ هزار تن کنسانتره با عیار ۳۰ درصد در سال تولید می‌نماید. فرآیند تغلیظ مس در مجتمع مس سونگون، به این صورت است که سنگ معدن پس از خردایش اولیه با سنگ‌شکن ژیراتوری وارد انبار دانه‌درشت شده و ذخیره می‌شود و سپس با تناژ ۹۰۰ تن در ساعت وارد کارخانه تغلیظ می‌شود. در کارخانه تغلیظ پس از طی فرآیند خردایش ثانویه در آسیای نیمه خودشکن و آسیاهای گلوله‌ای اولیه، عملیات پرعیارسازی در سلول‌های فلوتاسیون انجام و در نهایت کنسانتره مس با عیار ۳۰ درصد به‌عنوان محصول نهایی به انبار کنسانتره ارسال می‌گردد. باطله نیز پس از آبیگری در تیکتر باطله، به سد باطله منتقل می‌شود [۱]. خوراک ورودی به کارخانه تغلیظ مس سونگون پس از خردایش در آسیای نیمه خودشکن و آسیای گلوله‌ای اولیه وارد هیدروسیکلون‌های اولیه می‌شود. سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه که دانه‌ریز می‌باشد وارد مخزن آماده‌سازی می‌شود. در داخل مخزن، شیر آهک (جهت تنظیم pH) و کفساز مورد نیاز به محلول اضافه می‌گردد. خروجی مخزن آماده‌سازی وارد ۱۲ عدد سلول فلوتاسیون اولیه (رافر<sup>۱</sup>) از نوع RCS۱۳۰ می‌شود. در این نوع سلول‌ها سطح پالپ و همچنین میزان هوا به‌صورت خودکار کنترل می‌گردد. این سلول‌ها به‌صورت سری

کار می‌کنند و باطله آخرین سلول رافر به تیکنر باطله جریان پیدا می‌کند و کنسانتره سلول‌های رافر جهت خردایش مجدد وارد مسیر بسته هیدروسیکلون‌های ثانویه می‌شود. ته ریز هیدروسیکلون‌های ثانویه جهت خردایش مجدد وارد آسیای ثانویه می‌شود و سرریز آن به سمت ۲ سلول شست‌وشوی اولیه (کلینر<sup>۲</sup>) که از نوع ستونی هستند، جریان می‌یابد. باطله ستون‌های کلینر جهت رمق‌گیری به ۴ سلول فلوتاسیون رمق‌گیر (اسکونجر<sup>۳</sup>) از نوع RCS۵۰ هدایت می‌گردد. باطله سلول‌های رمق‌گیر به همراه باطله سلول‌های رافر، باطله نهایی را تشکیل و به سمت تیکنر باطله پمپ می‌شود و کنسانتره سلول‌های رمق‌گیر وارد مخزن آماده‌سازی قبل از هیدروسیکلون ثانویه می‌شود. کنسانتره حاصل از ۲ ستون کلینر، جهت شست‌وشوی مجدد و تولید محصول نهایی به داخل ستون فلوتاسیون شست‌وشوی ثانویه (کلینر ثانویه) جریان می‌یابد. باطله ستون کلینر ثانویه به مخزن آماده‌سازی ماقبل ستون‌های کلینر اولیه برگشت داده می‌شود و کنسانتره آن نیز به‌عنوان کنسانتره نهایی به داخل تیکنر کنسانتره جریان می‌یابد. در شکل ۱-۲ فلوشیت کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سونگون قابل مشاهده است.



شکل ۱-۲- فلوشیت کلی کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سونگون [۱]

۱-۳-۲-۱- مواد شیمیایی مورداستفاده در کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سونگون

مواد شیمیایی مورداستفاده در کارخانه تغلیظ ۱ شامل دو نوع کلکتور Z11 (سدیم ایزوپروپیلین گزنتات) و فلومین C۷۲۴۰ و همچنین کف‌سازهای A65 (پلی پروپیلین گیلکول) و A70 (متیل ایزوبوتیل کاربونیل) و شیر آهک برای تنظیم pH در حدود ۱۱ در نظر گرفته شده است.



### ۱-۳- منابع مس

در حالت کلی کانی‌های مس را می‌توان به دو گروه کانی‌های سولفیدی و اکسیدی مس تقسیم کرد که در جداول ۱-۱ و ۱-۲ به ترتیب مهمترین کانی‌های سولفیدی و اکسیدی مس همراه با مشخصات آنها آورده شده است.

جدول ۱-۱- مشخصات مهمترین کانی‌های سولفیدی مس [۴،۵]

کانی	فرمول شیمیایی	درصد مس محتوا (%Cu)	رنگ	دگرسانی
کالکوپیریت	CuFeS <sub>2</sub>	۳۴	زرد برنجی	مالاکیت و آزوریت
کالکوسیت	Cu <sub>2</sub> S	۸۰	سربی تیره	کوپریت، مالاکیت و آزوریت
کولیت	CuS	۶۷	آبی نیلی	-
بورنیت	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	۶۴	برنزی تا مسی	کالکوسیت و کولیت

جدول ۱-۲- مشخصات کانی‌های مس اکسیدی دارای ارزش اقتصادی [۴،۵،۶،۷]

نوع گروه	رفتار فلوتاسیون	درصد مس (%Cu) محتوا	فرمول شیمیایی	کانی
اکسیدی	مصرف عامل سولفیداسیون بالا	۸۸/۸	Cu <sub>2</sub> O	کوپریت
اکسیدی	خواص فلوتاسیون تنوریت شبیه به کوپریت است	۸۰	CuO	تنوریت
کربناته	-	۵۷/۴	Cu <sub>2</sub> (OH)CO <sub>3</sub>	مالاکیت
کربناته	خواص فلوتاسیون آن شبیه مالاکیت است	۵۵/۳	Cu <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	آزوریت
سولفاته	-	۵۶/۶	Cu <sub>4</sub> (OH) <sub>6</sub> SO <sub>4</sub>	بروچانتیت
کلریتی	از نظر اقتصادی ارزش کمتری دارد و اطلاعات کمی در مورد خواص فلوتاسیون وجود دارد	۴۴/۶	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> Cl	آناکامیت
سولفاته	-	۵۴	Cu <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	آنتلریت
سیلیکاته	قابلیت فلوتاسیون با فرآیند سولفیداسیون یا با کلکتور هیدروکسیمات را دارد	۱۰-۳۶	CuO·SiO <sub>2</sub>	کریزوکولا

## ۱-۴- فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی

فلوتاسیون به عنوان یک فرآیند انتخابی برای بازیابی کانی‌های سولفیدی مورد استفاده قرار گرفته است. بیش از ۹۰ درصد کانی‌های سولفیدی با استفاده از روش فلوتاسیون فرآوری می‌شود. با این حال فرآیند فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی، یک فرآیند بسیار پیچیده است. کانی با ارزش، تحت چندین واکنش شیمیایی و فیزیکی قرار می‌گیرد. جدایش کانی‌های سولفیدی مبتنی بر دو اصل بسیار مهم است؛ ۱- شناخت کامل از ترکیب کانی‌شناسی، درجه آزادی مطلوب و حد جدایش. ۲- کنترل شیمی پالپ. لازمه کنترل شیمی پالپ، تسلط کامل بر ماهیت واکنش‌ها از دو دیدگاه ترمودینامیکی و سینتیکی هست. کانی‌های سولفیدی توسط کلکتورهای سولفیدریلی که ممکن است زنجیر کربنی کوتاهی داشته باشند، قابلیت شناور شدن را دارند. علت آن را می‌توان در اثر عوامل مختلفی دانست. نخست آنکه یون سولفور موجود در سطح، در زمان آماده‌سازی و فلوتاسیون، کمتر توسط اکسیژن اکسید می‌شود. در این حالت آبرانی این کانی‌ها بیشتر از کانی‌های اکسیدی می‌شود. همچنین بین یون‌های فلزات سنگین و کلکتورهای سولفیدریلی با زنجیر کربنی کوتاه، در غلظت‌های کم، نمک‌های نامحلولی ایجاد می‌گردد. سرانجام بعضی از کلکتورهای سولفیدریلی در اثر واکنش اکسیداسیون، تشکیل ترکیباتی مثل دی گزنتوزن و دی فسفاتوزن را در سطح بعضی از کانی‌های سولفیدی می‌دهند. مکانیسم جذب کلکتور روی سطح سولفیدها جذب شیمیایی و الکتروشیمیایی است [۸،۹].

بیشتر کانی‌های سولفیدی مس مثل کالکوپیریت و کالکوسیت به راحتی با استفاده از روش فلوتاسیون قابل جدایش هستند. کانی‌های بورنیت، انارژیت و کوولیت که جزو کانی‌های مس می‌باشند، نسبت به کانی‌های اصلی مس یعنی کالکوپیریت و کالکوسیت کمتر در سنگ معدن مس دیده می‌شوند. کانی‌های سولفیدی مس معمولاً با پیریت همراه بوده و گانگ همراه سیلیس، کلسیت و انواع کانی‌های سیلیکاته می‌باشد. روش جدایش این کانی‌ها از باطله همراه و مخصوصاً از پیریت، از مهم‌ترین مراحل جدایش مس

است. برای پرعیارسازی کانی‌های سولفیدی مس از کلکتورهای سولفیدریلی استفاده می‌شود و گزنتات‌های سدیم‌ایزوبوتیل و پتاسیم‌آمیل از بهترین نوع کلکتورهای مس می‌باشند. برای فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی مس pH باید قلیایی ( $pH > 8$ ) باشد. برای تنظیم pH بیشتر از آهک استفاده می‌شود. نقش دیگر آهک بازداشت کننده پیریت ( $pH = 10$ ) می‌باشد. از کف‌سازهای روغن کاج، اسید کریزیلیک، کف‌سازهای الکلی و پلی‌گلیکول برای فلوتاسیون این کانی‌ها استفاده می‌شود [۸،۹].

## ۱-۵- فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی مس

انتخاب ترکیب واکنش‌گرها برای فلوتاسیون مس اکسیدی به عوامل مختلفی بستگی دارد که مهم‌ترین آن‌ها به صورت زیر است:

- نوع کانی مس اکسیدی
- نوع کانی‌های باطله همراه مس اکسیدی: برخی کانسنگ‌ها که حاوی باطله سیلیکاته بوده و بدون نرمه هستند، قابلیت فلوتاسیون مناسبی دارند. کانسنگ‌هایی که باطله دولومیتی دارند را صرفاً به روش سولفیداسیون می‌توان فرآوری کرد. برخی از کانسنگ‌های اکسیدی، حاوی تالک، هیدروکسید و اکسید آهن هستند. در حالت کلی هر نوع کانسنگ، به ترکیب واکنشگرهای خاصی نیاز دارد.
- درجه آزادی: در کانسنگ‌هایی که حاوی مس ریزدانه‌اند، نسبت به کانسنگ‌هایی که در آن‌ها کانی‌های مس به صورت پراکنده هستند، فلوتاسیون بهتر انجام می‌شود، زیرا پراکنده بودن کانی‌های مس مستلزم انجام خردایش بیشتر است.
- ترکیب شیمیایی و ساختار فیزیکی کانی‌های مس، اثر مهمی در قابلیت فلوتاسیون مس اکسیدی دارد. کانی‌های مس اکسیدی غالباً متخلخل بوده و در آب حل می‌شوند. به همین دلیل، در مراحل آسیا کنی، کانی‌های مس اکسیدی تبدیل به نرمه می‌شوند [۶].

کانی‌های مس اکسیدی در مقابل مواد شیمیایی مورد استفاده برای جدایش کانی‌های سولفیدی مس پاسخ مناسبی نمی‌دهند. در این حالت مقدار مصرف کلکتور بالا بوده و انتخابیت و بازیابی پایین است. انحلال‌پذیری کانی‌های مس اکسیدی و سولفیدی به‌طور قابل توجهی باهم متفاوت می‌باشد که در این میان کانی‌های مس اکسیدی انحلال‌پذیری بیشتری دارند [۱۰، ۱۱]. ساختار کریستالی بر قابلیت شناورسازی کانی‌های اکسیدی تأثیر می‌گذارد. مقاومت مکانیکی، نسبت انحلال‌پذیری، هیدراتاسیون و قابلیت دسترسی به یون مس، مشتقات ساختار کریستالی کانی‌ها هستند [۱۲]. مقاومت مکانیکی پایین سطح این کانی‌ها را می‌توان با شناورسازی مالاکیت با استفاده از گزنتات نشان داد. در این حالت مقدار بازیابی مالاکیت بسیار پایین است. البته برای این کار باید تلاطم در داخل سلول فلوتاسیون حداقل باشد [۱۰]. فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی به پارامترهای زیادی مثل خواص الکتریکی سطح کانی، وزن مولکولی کلکتور، حلالیت کانی، امکان تشکیل نمک کلکتور و حلالیت این نمک، بستگی دارد [۸، ۱۳]. قابلیت فلوتاسیون این کانی‌ها به دلیل همراه بودن با مقادیر بالای رس، تولید نرمه زیاد، همراه بودن با اکسیدهای آهن و در تماس بودن با ذخایر سولفیدی، پایین است. یکی از مهم‌ترین مشکلات فلوتاسیون مس اکسیدی در مقیاس صنعتی این است که قابلیت شناورسازی این کانی‌ها وابستگی شدیدی به کانی‌شناسی کانسار و ترکیب باطله دارد. قابلیت شناورسازی مس اکسیدی که دارای باطله کربناته و دولومیتی هستند به‌طور قابل ملاحظه‌ای با مس اکسیدی که دارای باطله سیلیکاته است، متفاوت می‌باشد. با وجود این مشکلات، در سال‌های اخیر به دلیل کاهش منابع مس، استفاده از ذخایر اکسیدی مس مورد توجه قرار گرفته است [۶، ۱۴].

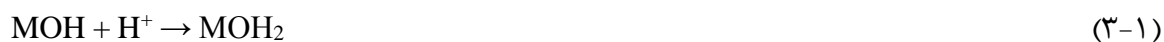
#### ۱-۵-۱- تأثیر پتانسیل زتا در فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی

جذب کلکتور و تنظیم‌کننده‌ها، روی سطح کانی‌های اکسیدی و سیلیکاته به وسیله دولایه الکتریکی کنترل می‌شود [۱۵]. در کانی‌های اکسیدی و سیلیکاته وقتی سطح کانی در تماس با آب قرار می‌گیرد به

علت ضعیف بودن پیوندهای یونی، سطح جامد با آب به شدت وارد فعل و انفعالات شیمیایی می شود که طی آن طبق واکنش (۱-۱)، یون فلزی هیدرولیز شده و گروهی از هیدروکسیدها را به وجود می آورد.



سپس مانند اسیدها ( $H^+$ ) و یا بازهای ( $OH^-$ ) ضعیف تجزیه شده و ترکیبات زیر پدید می آورد:



واکنشهای (۲-۱) و (۳-۱) نشان می دهند که در محیط، یونهای  $H^+$  و  $OH^-$  به وجود می آید و در نتیجه سطح ذرات با افزایش و یا کمبود بارهای منفی و مثبت ( $H^+$ ،  $OH^-$ ) مواجه می شود که طی آن در سطح ذرات بار مشخصی به وجود می آید و در یک pH مشخص بار سطحی ذرات به صفر می رسد که نقطه بار صفر<sup>۱</sup> (ZPC) گفته می شود. نقطه بار صفر یکی از فاکتورهای مهم در فلوتاسیون کانیهای اکسیدی و سیلیکاته است. از اهمیت مطالعه مبحث بار سطحی می توان به موارد زیر اشاره کرد [۸]:

۱- علامت و میزان بار سطحی و انتخاب کلکتور

۲- پدیده فلوکولاسیون و پراکندگی ذرات در پالپ

۳- پوشش سطحی ذرات جامد که به وسیله نرمه ها پوشیده شده است.

۴- سینتیک فلوتاسیون

کانسارهای مس اکثراً حاوی مس سولفیدی هستند و گاهی با مس اکسیدی نیز همراه می باشند علاوه بر مشکل فلوتاسیون مس اکسیدی، اکسیدی شدن مس سولفیدی در طول عملیات معدنکاری، موجب ایجاد مشکل در فلوتاسیون کانیهای مس می شود. رفتار فلوتاسیون کانیهای سولفیدی که در طول عملیات استخراج و فرآوری دچار اکسیداسیون می شوند، شبیه کانیهای اکسیدی است. واکنشهای انحلال کانیهای

سولفیدی در pH های مختلف منجر به تشکیل اکسیدهای فلزی و گونه‌های سولفوکسی نظیر  $S_2O_3^{2-}$  و  $SO_4^{2-}$  می‌شود که ممکن است دوباره روی سطح کانی جذب شده و منجر به آب‌دوستی سطح کانی شوند؛ بنابراین اکسیداسیون در سیستم کانی‌های سولفیدی نقش مهمی در فلوتاسیون آن‌ها ایفا می‌کند و لذا با کنترل به‌موقع اکسیداسیون در طی مراحل خردایش، آماده‌سازی و فلوتاسیون، می‌توان شرایط را برای انجام یک فلوتاسیون بهینه فراهم نمود. عواملی که موجب اکسید شدن ثانویه کانی‌های سولفیدی می‌شوند عبارتند از [۱۶، ۱۷]:

- هوازدگی در کانسار
- عملیات استخراج
- عملیات خردایش توسط سنگ‌شکن و آسیا
- ذخیره‌سازی
- عملیات فلوتاسیون

#### ۱-۵-۲- انواع روش‌های فلوتاسیون مس اکسیدی

##### ۱- فلوتاسیون با کلکتورهای کاتیونیک

- فلوتاسیون با آمین‌ها
- فلوتاسیون با کلکتورهای آنیونیک
- فلوتاسیون با اسیدهای چرب
- فلوتاسیون با گزنتات‌ها
- فلوتاسیون با یک عامل کی‌لیتی مانند هیدروکسیمات‌ها

۳- سولفیدی کردن سطح کانی‌های اکسیدی و سپس فلوتاسیون با گزنتات‌ها [۱۳، ۱۴، ۱۸].

- سولفیداسیون حلزونی<sup>۱</sup>
- سولفیداسیون کنترل پتانسیل (CPS)<sup>۲</sup>
- استفاده از گاز نیتروژن در طول فرآیند سولفیداسیون<sup>۳</sup>

۲-۵-۲-۱- استفاده از کلکتورهای کاتیونی برای فلوتاسیون مس اکسیدی

مهم‌ترین مواردی که در فلوتاسیون کاتیونی اکسیدها و سیلیکات‌ها باید در نظر گرفته شود شامل:

- ۱- نیروی الکترواستاتیکی اصلی‌ترین عامل در واکنش بین کلکتور و کانی است.
- ۲- از کلکتورها با طول زنجیر کربنی بزرگ‌تر از ۱۰ باید استفاده شود.
- ۳- غلظت کلکتور باید متوسط باشد.
- ۴- اتصال بین کانی و کلکتور بسیار ضعیف است.
- ۵- زمان آماده‌سازی قبل از فلوتاسیون، کم است.
- ۶- حساسیت به نرمه زیاد است.
- ۷- کلکتورهای مورد استفاده قدرت کف‌سازی دارند.

مهم‌ترین کلکتورهای مورد استفاده در فلوتاسیون اکسیدها، آمین‌ها هستند. این کلکتورها از مشتقات آمونیاک‌اند. از مهم‌ترین ویژگی آمین‌ها تشکیل میسل است. در محدوده pH ۹ تا ۱۱ آمین‌ها خاصیت کف‌سازی دارند، با این حال در محیط اسیدی و قلیایی قوی، فعال نیستند. در حالت کلی این کلکتورها خاصیت انتخابی پایینی دارند [۸].

۱-۲-۵-۲- استفاده از اسیدهای چرب برای فلوتاسیون مس اکسیدی

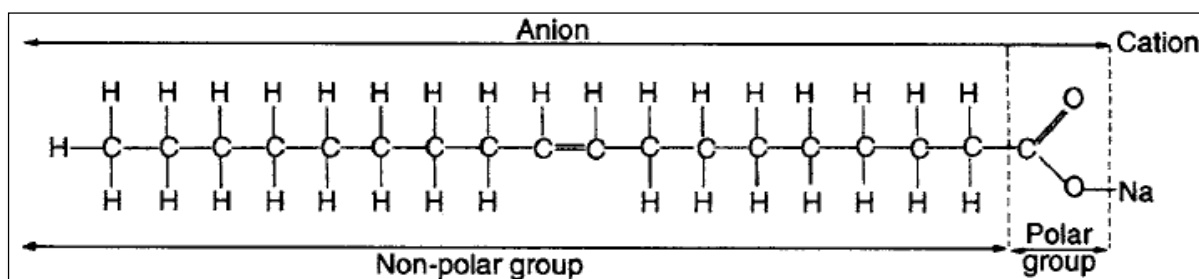
کربوکسیلات‌ها که با عنوان اسیدهای چرب شناخته می‌شوند، به‌طور طبیعی از روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی به دست می‌آید. نمک‌های اسید اولئیک مانند سدیم اولئات و لینولئیک اسید از رایج‌ترین اسیدهای چرب هستند. با توجه به شکل ۱-۳ سدیم اولئات دارای زنجیر کربنی طولانی می‌باشد.

۱- Slug sulphidisation

۲- Control potential sulphidization

۳- Maxifloat™



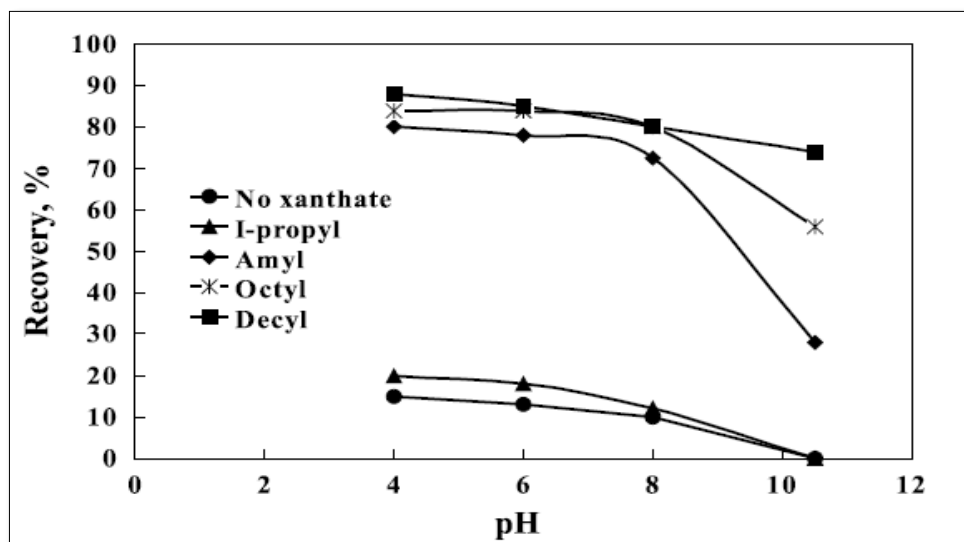


شکل ۱-۳- ساختار سدیم اولئات [۱۹]

از این کلکتورها برای فلوتاسیون باریم، استرانسیوم، منیزیم، جداسازی کربنات‌ها از فلزات غیر آهنی، جداسازی نمک‌های محلول از فلزات قلیایی و فلزات قلیایی خاکی استفاده می‌شود. در pH ۴ تا ۸ کربوکسیلات‌ها، هم خاصیت کف‌سازی و هم خاصیت کلکتوری دارند [۱۹]. اسیدهای کربوکسیلیک، بیش از ۵۰ سال است که در آفریقا با عنوان، فرآیند روغن پالم، استفاده می‌شود. حدود ۵ میلیون تن سنگ معدن مس اکسیدی سالانه توسط این فرآیند مورد فرآوری قرار می‌گیرد و کنسانتره مس، با عیار ۲۵ درصد تولید می‌شود. کلکتورهای کربوکسیلات انتخابیت پایینی دارند، بخصوص زمانی که سنگ معدن حاوی باطله کربناته مانند کلسیت و دولومیت باشد. این کلکتورها علاوه بر کانی‌های کربناته مس مانند مالاکیت و آزوریت، باطله‌های کربناته را نیز شناور می‌کند؛ بنابراین از اسیدهای چرب زمانی می‌توان استفاده کرد که باطله اصلی سنگ معدن سیلیکاته باشد و یا به مقدار جزئی، باطله کربناته وجود داشته باشد [۲۰].

۱-۵-۲-۳- استفاده از گزنتات‌ها با زنجیر کربنی بلند برای فلوتاسیون مس اکسیدی

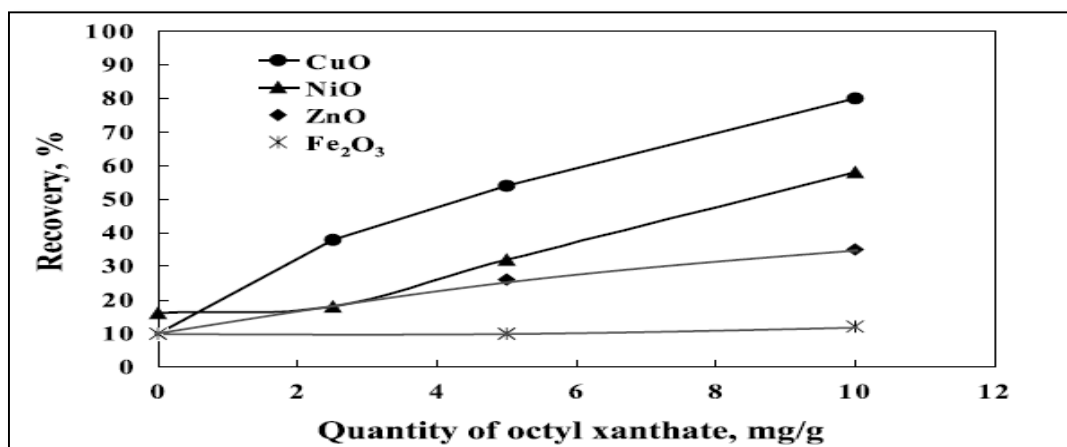
استفاده از گزنتات‌ها با طول زنجیر کوتاه (اتیل، ایزوپروپیل)، پاسخ مناسبی در بازیابی کانی‌های اکسیدی ندارد، بنابراین استفاده از گزنتات‌ها با زنجیر کربنی طولانی، می‌تواند در بازیابی این کانی‌ها مؤثر باشند. شکل ۱-۴ تأثیر گزنتات‌های مختلف در بازیابی اکسید نیکل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱-۴ هرچه از گزنتات با طول زنجیر کربنی بلند استفاده می‌شود، مقدار بازیابی بیشتر می‌شود.



شکل ۴-۱- تأثیر طول زنجیر کربنی گزنتات‌ها در بازیابی اکسید نیکل [۲۱]

غلظت گزنتات‌ها با طول زنجیر کربنی بلند، رابطه مستقیمی با مقدار بازیابی کانی‌های اکسیدی دارند.

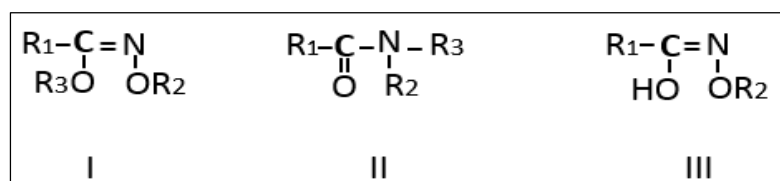
شکل ۵-۱ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت اوکتیل گزنتات، مقدار بازیابی اکسیدهای مختلف در  $\text{pH}=10$  افزایش می‌یابد. مقدار افزایش بازیابی برای اکسید مس بیشتر از سایر اکسیدها می‌باشد.



شکل ۵-۱- تأثیر افزایش غلظت اوکتیل گزنتات بر مقدار بازیابی اکسیدهای مختلف [۲۱]

۱-۵-۲-۴- استفاده از یک عامل کی لیتی مانند هیدروکسیمات‌ها برای فلوتاسیون مس اکسیدی

عامل کی لیتی<sup>۱</sup> می‌تواند بدون نیاز به فعال کننده، سطح کانی‌های اکسیدی، مخصوصاً اکسیدهای مس را آبران کرده و موجب شناور شدن این کانی‌ها شود. همچنین توانایی شناورسازی هم‌زمان کانی‌های اکسیدی و سولفیدی را دارد [۲۲]. هیدروکسیمات‌ها با اینکه متعلق به گروه کلکتورهای کی لیت‌ساز هستند، اما در گروه کلکتورهای اکسیدریل دسته‌بندی می‌شوند. کلکتورهای نوع هیدروکسیمات با سنتز آلکیل هیدروکسیمات تهیه می‌شوند. شکل ۱-۶ ساختارهای اصلی که هیدروکسیمات‌ها از آن‌ها ساخته شده‌اند را نشان می‌دهد.

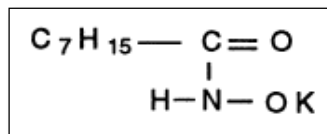


شکل ۱-۶- ساختارهای اصلی سازنده هیدروکسیمات‌ها [۶]

R1 معمولاً لیگاند آلی است (آلکیل، استیل و بنزوئیل)، در حالی که R2 و R3 ممکن است آلی یا غیر عالی باشند. آلکیل هیدروکسیمات اسید که در ساختار (III) نمایش داده است در سنتز هیدروکسیمات‌ها استفاده گسترده‌ای دارد. هیدروکسیمات‌ها در فلوتاسیون کانی‌های مس اکسیدی توانایی بسیار خوبی دارند. در شکل ۱-۷ ساختار مولکولی پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات قابل مشاهده می‌باشد. پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات توانایی خوبی در فلوتاسیون کانی‌های مس اکسیدی دارد. جدول ۱-۳ زاویه تماس انواع کانی‌های مس با حباب هوا در حضور پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات در pH های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۳- زاویه تماس انواع کانی‌های مس در حضور پتاسیم اکتیل هیدروکسید در pH های مختلف [۲۲]

کانی									
pH	مالاکیت	آزوریت	کریزوکولا	کوپریت	تنوریت	مس	کالکوپیریت	کولیت	عامل کی لیتی
۴	۷۰	۱۰۰	۷۵	۰	۰	۹۵	۰	۰	
۵	۸۵	۹۵	۶۵	۷۰	۱۰۵	۹۰	-	-	
۶	۱۰۰	۹۵	۸۰	۸۰	۱۰۵	۹۰	۰	۰	
۷	۹۵	۹۵	۸۰	۸۰	۱۰۵	۹۰	۰	۰	پتاسیم اکتیل
۸	۹۵	۹۵	۹۰	۹۰	۱۰۵	۸۵	-	-	هیدروکسید
۹	۹۰	۹۰	۱۰۰	۹۰	۸۵	۹۰	۰	۰	
۱۰	۸۵	۸۵	۳۰	۸۵	۹۰	۹۰	-	-	
۱۱	۹۰	۹۰	۲۰	۸۰	۱۰۵	۵۵	۰	۰	



شکل ۱-۷- ساختار مولکولی پتاسیم اکتیل هیدروکسید [۲۲]

۱-۵-۲-۵- علت استفاده کم از هیدروکسیمات در مقیاس صنعتی

از مهم‌ترین عواملی که باعث می‌شود از هیدروکسیمات به‌طور گسترده در مقیاس صنعتی استفاده نشود،

می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۸،۲۳،۲۴]:

۱- نبودن راهنمای عملی برای استفاده از هیدروکسیمات‌ها در یک کارخانه که منابع خیلی کم در این

راستا وجود دارد.

۲- ممکن است اکسیدهای مس موجود در شاید قابلیت فلوتاسیون را نداشته باشند.

۳- تلاش‌های کمی برای نشان دادن مزایای استفاده از هیدروکسیمات در کارخانه‌های صنعتی وجود

دارد.

۴- به‌طور کلی استفاده از روش سولفیداسیون ارجحیت دارد.

۱-۵-۲-۶- استفاده از روش سولفیداسیون در فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی

در فلوتاسیون اگر یک کانی به هر دلیلی توسط کلکتوری آبران نشود و یک ماده شیمیایی به‌منظور

آماده‌سازی کانی، به محیط اضافه شود و سپس توسط همان کلکتور آبران شود، در این صورت گفته می‌شود

که سطح کانی فعال شده است. فعال‌کننده‌ها موادی هستند که خاصیت شناور شدن بعضی از مواد معدنی را

تقویت می‌کنند [۲۲]. در فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی عموماً از عوامل سولفیدکننده مثل سولفید

سدیم، هیدروسولفید سدیم و سولفید آمونیوم برای فعال کردن سطح کانی استفاده می‌شود که استفاده از

این مواد برای فعال کردن سطح کانی اکسیدی، با عنوان فرآیند سولفیداسیون شناخته می‌شود. عوامل

سولفیداسیون علاوه بر اینکه در زمینه فعال‌کنندگی کانی‌های اکسیدی استفاده می‌شوند در بازداشت

کانی‌های سولفیدی به‌ویژه مس و آهن به‌کاربرده می‌شوند. برای مثال یکی از کاربردهای صنعتی این مواد

در فلوتاسیون مولیبدن برای بازداشت کانی‌های مس می‌باشد. در مورد نقش فعال‌کنندگی عوامل

سولفیداسیون تحقیقات فراوانی انجام شده و مکانیسم‌های مختلفی ارائه شده است برخی از این مکانیسم‌ها شامل سولفیدی کردن مجدد سطح کانی، افزایش پایداری کف به دلیل کشش سطحی در فصل مشترک حباب-آب، حذف محصولات اکسیداسیون و پاک کردن سطح کانی، تشکیل گوگرد عنصری و ترسیب هیدروکسیدهای فلزی آب‌پذیر به صورت سولفیدهای فلزی نامحلول می‌باشد. تحقیقات مختلفی در زمینه فعال‌سازی سطح کانی اکسیدی صورت گرفته و دلایل مختلفی که باعث فعال شدن سطح کانی اکسیدی می‌شود، ذکر شده است. برای مثال، عمل سولفیداسیون باعث می‌شود که یون‌های گوگرددار به داخل شبکه بلور کانی‌های اکسیدی نفوذ کرده و یک پوشش سولفیدی کاذب نامحلول روی سطح کانی ایجاد کند. همچنین علت فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی در اثر سولفیداسیون، عدم توانایی یون‌های سولفیدی در شبکه سطح کانی در تشکیل پیوند هیدروژنی با مولکول‌های آب ذکر شده است.

در مورد نقش بازداشت‌کنندگی عوامل سولفیداسیون مکانیسم‌های مختلفی مطرح شده است برای مثال، استفاده از این مواد باعث کاهش پتانسیل پالپ شده و لذا از اکسیداسیون کلکتور (گزنات) و تشکیل دی‌گزنوژن جلوگیری می‌شود که این شرایط مانع از فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی در حضور کلکتور می‌گردد. مکانیسم پیشنهادی دیگر در این زمینه، افزایش بار منفی سطح به دلیل جذب یون‌های  $HS^-$  روی سطح کانی بیان شده است که مانع از جذب کلکتور آنیونی می‌گردد. در حالت کلی مکانیسم با مقبولیت عام در رابطه با نقش بازدارندگی عوامل سولفوراسیون، پدیده حذف کلکتور از سطح کانی می‌باشد [۱۶].

سولفیداسیون رایج‌ترین روش فرآوری کانی‌های اکسیدی است. این روش برای اولین بار برای فلوتاسیون سرب کربناته به کار برده شد و هم‌اکنون به‌طور گسترده در فلوتاسیون مس اکسیدی به کار می‌رود. این روش نسبت به روش‌های دیگر فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی، مثل استفاده از اسیدهای چرب، انتخابیت بیشتری دارد و نوع باطله موجود در کانسنگ محدودیتی در به کار بردن سولفیداسیون ندارد [۲۰].

#### ۱-۵-۲-۷- معایب روش سولفیداسیون

از معایب روش سولفیداسیون می‌توان موارد زیر را ذکر کرد [۲۵، ۲۰]:

- سولفیداسیون در مورد کانسنگ‌های اکسیدی مختلف، پاسخ متفاوتی می‌دهد.
- به دلیل حلالیت بالای کانی‌های اکسیدی، مصرف عامل سولفیدکننده سطح کانی، به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش این مواد، موجب مصرف اکسیژن محلول در پالپ شده و کمبود اکسیژن موجب می‌شود کارایی جذب کلکتور روی سطح کانی کاهش پیدا کند.
- مشکل اصلی فرآیند سولفیداسیون این است که غلظت مناسب و بهینه عامل سولفیداسیون وابستگی شدیدی به زمان آماده‌سازی، روش‌های مخلوط کردن و متغیرهای دیگر دارد.
- بوی نامطبوع دارند.

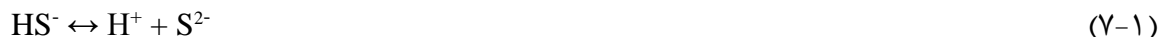
#### ۱-۵-۲-۸- تأثیر نوع کانی و خصوصیات آن در سولفیداسیون

در فرآیند سولفیداسیون هر یک از کانی‌های مس اکسیدی به دلیل متفاوت بودن ساختار سطح کانی، رفتار متفاوتی در مقابل عامل سولفیداسیون دارد. مطالعات روی ناحیه سطح بروچانتیت و کریزوکولا نشان می‌دهد که مساحت سطح بروچانتیت در حضور عامل سولفیداسیون کاهش می‌یابد و موجب بهبود شناورسازی این کانی می‌شود. در مورد سولفیداسیون کریزوکولا خصوصیات سطح تأثیر کمتری در فلوتاسیون این کانی دارد [۲۶].

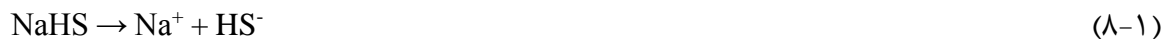
### ۱-۵-۲-۹- انتخاب عامل سولفیداسیون

سولفید سدیم ( $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ )، هیدروسولفید سدیم ( $\text{NaHS}$ ) و سولفید آمونیوم ( $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ ) از مهم‌ترین عوامل سولفیدکننده می‌باشند که در فلوتاسیون مس اکسیدی استفاده می‌شوند. این مواد به دلیل حلالیت نسبتاً بالای کانی‌های اکسیدی ممکن است تا مقادیر ۱۰ کیلوگرم بر تن استفاده شود [۲۷].

سولفید سدیم رایج‌ترین عامل سولفیدکننده‌ای است که در فلوتاسیون مس اکسیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. وقتی سولفید سدیم به پالپ اضافه می‌شود مطابق واکنش‌های (۱-۴) تا (۱-۷)، اول هیدرولیز شده و سپس تجزیه می‌شود.



چون ثابت تجزیه معادله‌های (۱-۶) و (۱-۷) برخلاف معادله (۱-۵) خیلی کم است، در نتیجه غلظت  $\text{OH}^-$  نسبت به  $\text{H}^+$  با نرخ بیشتری اضافه می‌شود و در نتیجه پالپ قلیایی می‌شود. هیدروسولفید سدیم در پالپ مطابق واکنش زیر هیدرولیز می‌گردد و تولید هیدروسولفید می‌کند.



وجه اشتراک واکنش‌های هیدرولیز سولفید سدیم و هیدروسولفید سدیم تولید گونه فعال باردار  $\text{HS}^-$  است. این یون در اثر اکسیداسیون مطابق واکنش‌های (۱-۹ و ۱-۱۰) منجر به تولید گوگرد عنصری و سولفات می‌گردد.







یون هیدروسولفید در اثر افزایش فعالیت یون هیدروژن (کاهش pH) مطابق واکنش (۱۱-۱) به سولفید هیدروژن تبدیل می‌گردد و برعکس. تبدیل این دو گونه به همدیگر در pH حدود ۷ اتفاق می‌افتد.



سولفید هیدروژن ناشی از واکنش (۱۱-۱) و یا ناشی از هیدرولیز سولفید سدیم در پالپ در اثر اکسیداسیون طبق واکنش‌های (۱۲-۱ تا ۱۴-۱) به ترتیب به گوگرد عنصری، سولفات و هیدروژن سولفات تبدیل می‌شود.



مطابق واکنش (۷-۱) با کاهش فعالیت یون هیدروژن (افزایش pH)، یون هیدروسولفید ( $\text{HS}^-$ ) به یون سولفید ( $\text{S}^{2-}$ ) تبدیل می‌گردد و برعکس. تبدیل این دو گونه به همدیگر در pH های بسیار قلیایی (بالای ۱۲) اتفاق می‌افتد. یون سولفید نیز طبق واکنش‌های (۱۵-۱ و ۱۶-۱) به ترتیب به گوگرد عنصری و سولفات، اکسید می‌گردد.



گوگرد عنصری با افزایش پتانسیل طبق واکنش‌های (۱۷-۱ و ۱۸-۱) به ترتیب به سولفات و هیدروژن سولفات، اکسید می‌گردد.

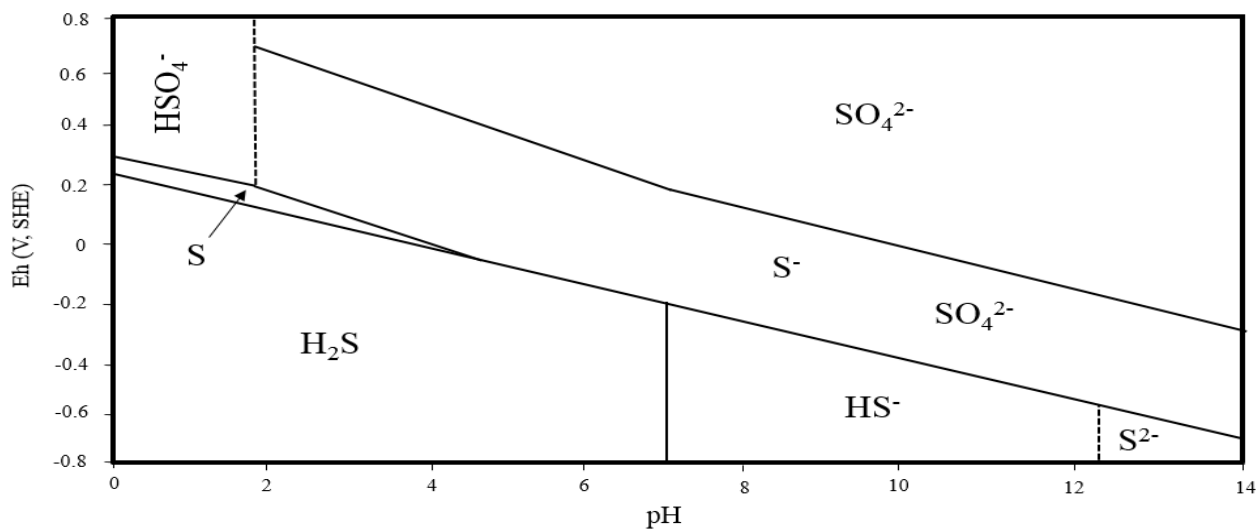




یون سولفات نیز در pH های اسیدی مطابق واکنش (19-1) به هیدروژن سولفات تبدیل می‌شود [8، 19 و 16].



دیاگرام Eh - pH تبدیل گونه های ذکر شده به همدیگر در شکل 8-1 قابل مشاهده است [16].



شکل 8-1- دیاگرام Eh - pH سیستم S - H<sub>2</sub>O با غلظت گونه های محلول 10<sup>-3</sup>M [16]

وجود یون های OH<sup>-</sup>، HS<sup>-</sup> و S<sup>2-</sup> در پالپ باعث واکنش دادن آن‌ها با سطح کانی می‌شود. ورود یون های سولفور به شبکه کریستالی کانی های اکسیدی، باعث ایجاد یک لایه غیرقابل حل شبه سولفیدی می‌شود که آبران کردن توسط کلکتورهای سولفیدریلی را عملی می‌سازد. به عنوان مثال سولفیداسیون سریسیت (PbCO<sub>3</sub>) طی واکنش های زیر انجام می‌شود.





این واکنش‌ها در شرایط سینتیکی نسبتاً سریع و در شرایط صنعتی در دمای معمولی با غلظت کم یون‌های  $\text{S}^{2-}$  انجام می‌گیرند. مطابق واکنش زیر، سولفید سدیم بیش از حد، اکسیژن محلول در پالپ را مصرف کرده و در نتیجه با کمبود اکسیژن، کارایی جذب کلکتورهای سولفیدریل کاهش پیدا می‌کند.



به‌طور کلی مصرف سولفید سدیم به pH پالپ بستگی دارد و وقتی pH زیاد شود، یون‌های  $\text{HS}^-$  و  $\text{S}^-$  در محیط نیز زیاد شده در نتیجه هیدرولیز می‌شود و pH را بالا می‌برد. به همین دلیل در بعضی مواقع به‌جای سولفید سدیم از هیدروسولفید سدیم یا سولفید آمونیوم استفاده می‌شود.

#### ۱-۵-۲-۱۰- روش‌های انجام سولفیداسیون

##### ۱- سولفیداسیون حلزونی

در این روش از عامل سولفید کننده صرفاً جهت ایجاد یک لایه سولفیدی آبران روی سطح کانی اکسیدی استفاده می‌شود.

##### ۲- سولفیداسیون کنترل پتانسیل

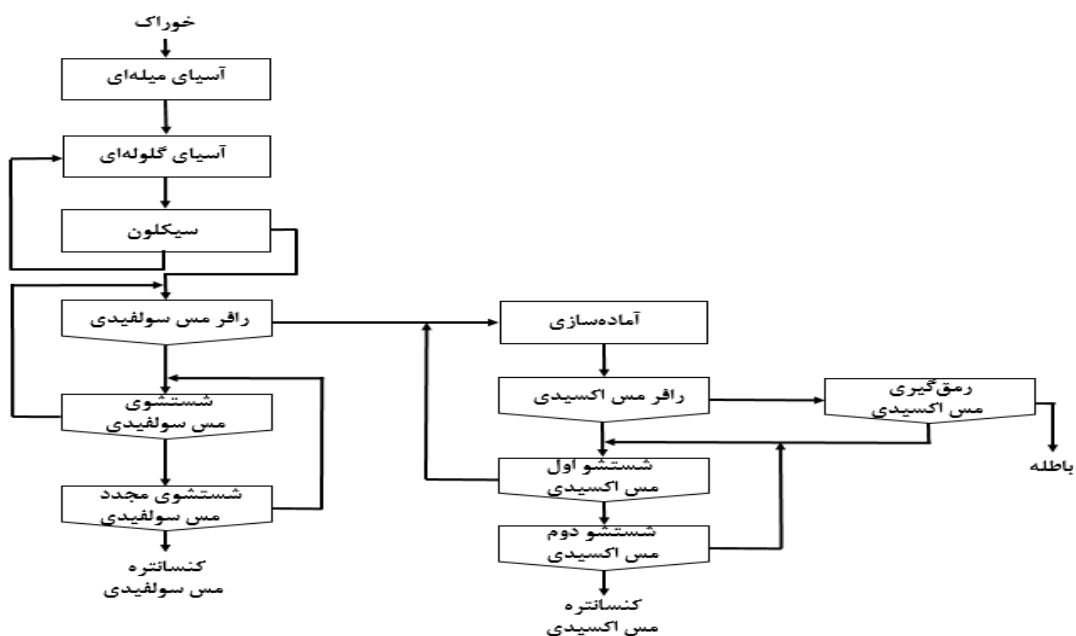
در این روش با استفاده از عامل سولفید کننده پتانسیل پالپ کنترل می‌شود. این روش به دلیل کنترل یکی از تاثیرگذارترین پارامترهای فلوتاسیون یعنی پتانسیل پالپ، پاسخ خوبی در فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی می‌دهد و نسبت به روش سولفیداسیون حلزونی ارجحیت دارد. عموماً دو روش عمده برای کنترل پتانسیل پالپ در سیستم فلوتاسیون به کار می‌رود، یکی استفاده از یک منبع تغذیه خارجی است که در

این روش با اعمال پتانسیل خارجی توسط یک پتانسیواستات، می‌توان پتانسیل پالپ را در یک مقدار دلخواه، تنظیم و کنترل نمود. دیگری استفاده از مواد شیمیایی اکسنده و کاهنده از جمله سولفید سدیم، هیدروسولفید سدیم و سولفید آمونیوم است که برای تنظیم پتانسیل پالپ در یک محدوده خاص بکار می‌روند. برخلاف روش اعمال پتانسیل خارجی تغییر ظرفیت یون‌ها و گونه‌های مختلف که عوامل تغییر پتانسیل هستند، وابسته به کارایی تماس ذره و الکتروود است، کنترل شیمیایی پتانسیل در ارتباط مستقیم با عملیات کارخانه بوده و لذا در عملیات صنعتی کاربرد بیشتری دارد اما انعطاف کمتری نسبت به روش اعمال پتانسیل خارجی دارد [۱۶].

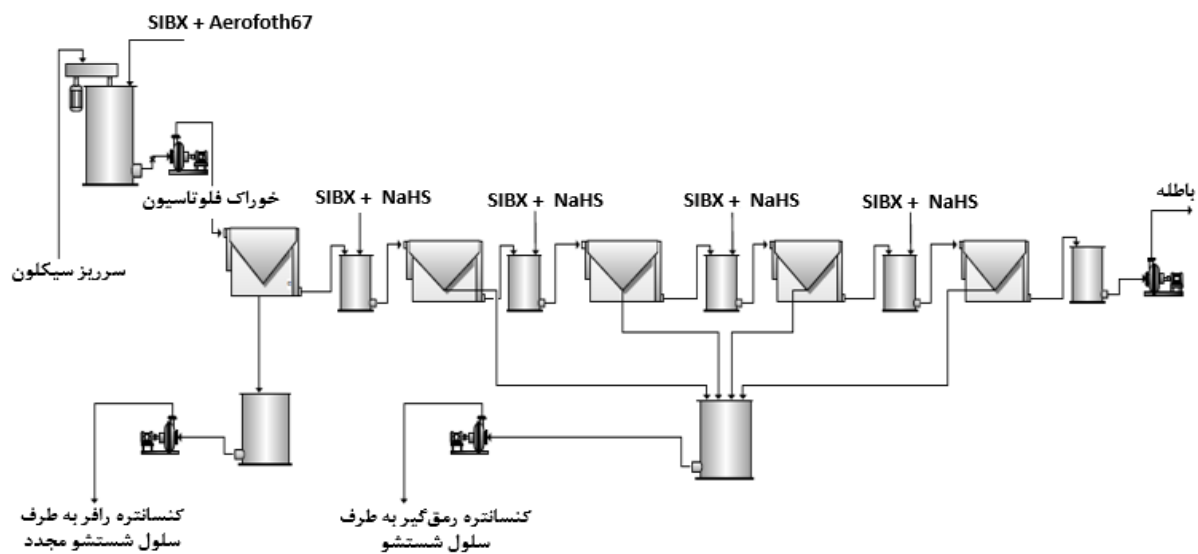
## ۱-۶- عملیات صنعتی فرآوری کانسنگ‌های مخلوط مس اکسیدی - سولفیدی به

### روش فلوتاسیون

در کانسنگ‌های مخلوط مس اکسیدی - سولفیدی معمولاً چندین کانی سولفیدی و اکسیدی مس مثل کالکوپیریت، کالکوسیت، کوپریت، مالاکیت و آزوریت وجود دارند. نوع مواد شیمیایی مورد استفاده در واحد صنعتی، بسته به نوع کانی مس موجود در کانسنگ و ترکیب کانی‌شناسی باطله متفاوت است. مدار فلوتاسیون این نوع کانسنگ‌ها عموماً از دو مرحله تشکیل شده است. در مرحله اول مس سولفیدی شناور شده و جداسازی می‌شود و در مرحله دوم مس اکسیدی با استفاده از روش سولفیداسیون فرآوری می‌شود. در شکل‌های ۱-۹ و ۱-۱۰ فلوشیت فرآوری کانسنگ مخلوط مس اکسیدی-سولفیدی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱-۹- فلوشیت فرآوری کانسنگ های مخلوط مس اکسیدی - سولفیدی [۶]



شکل ۱-۱۰- فلوشیت مدار فلوتاسیون رافر و رفق گیر برای کانسنگ مخلوط مس اکسیدی- سولفیدی معدن مس کانسازشی

در اکثر موارد قابلیت فلوتاسیون مس اکسیدی در کانسنگ مخلوط مس اکسیدی - سولفیدی، بهتر از قابلیت فلوتاسیون آن در کانسنگ مس اکسیدی است. نوع عامل سولفیداسیون و نوع کلکتور از مهمترین تغییرات ترکیب مواد شیمیایی هستند. ترکیب مواد شیمیایی مورد استفاده و نتایج حاصل چند واحد صنعتی مهم که کانسنگ‌های مخلوط مس اکسیدی - سولفیدی را فرآوری می‌کنند، در جدول ۴-۱ و ۵-۱ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱- ترکیب مواد شیمیایی مورد استفاده در فرآوری کانسنگ مخلوط مس اکسیدی - سولفیدی در معادن مختلف

[۶]

جدول	مدار سولفیدی		مدار اکسیدی	
	ماده شیمیایی	مصرف (g/t)	ماده شیمیایی	مصرف (g/t)
۵-۱	کوموتو، کنگو	۳۰۰	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	۲۰۰
نتایج	اتیل گزنتات	۱۰۰	NaHS	۱۳۵۰
واحد	CaO	۴۶۰	نفت خام	۵۰
	کفساز 41G	۱۵	پتاسیم آمیل گزنتات	۲۱۰
			کفساز 41G	۲۰
	دیما، کنگو	۶۰	پتاسیم آمیل گزنتات	۶۰۰
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	۲۰۰	NaHS	۳۰۰۰
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	۳۰۰	روغن معدنی	۹۰
	کفساز 41G	۱۰	کفساز 41G	۱۵
	چانگا، زامبیا	۱۵	PM290	۳۰۰
	سدیم آمیل گزنتات	۳۰	Na <sub>2</sub> S	۱۲۰۰
	روغن کاج	۱۰	PM290	۴۰
			سدیم آمیل گزنتات	۱۰۰
			کروزین	۱۰۰

های صنعتی فرآوری کانسنگ مس مخلوط اکسیدی- سولفیدی [۶]

توزیع (%)		عیار (%)		وزن (%)	محصول	واحد صنعتی
CO	Cu	CO	Cu			
۷۴/۲۶	۶۸/۸۳	۳/۶۱	۴۳/۶	۷/۱۱	کنسانتره مس سولفیدی	کوموتو کنگو، آفریقا
۱۱/۳۰	۱۲/۵۵	۱/۵۲	۲۲	۲/۵۷	کنسانتره مس اکسیدی	
۱۲/۴۴	۱۸/۶۲	۰/۰۶	۰/۹۳	۹۰/۳۲	باطله فلوتاسیون مس	
۱۰۰	۱۰۰	۰/۳۵	۴/۵۰	۱۰۰	خوراک (محاسباتی)	
۱۸/۲۴	۳۷/۶۵	۲/۲۳	۵۵/۳۱	۲/۷۸	کنسانتره مس سولفیدی	دیما کنگو، آفریقا
۳۹/۸۴	۴۴/۶۴	۱/۵۸	۲۱/۲۴	۸/۵۹	کنسانتره مس اکسیدی	
۴۱/۹۳	۱۷/۷۱	۰/۱۶	۰/۸۲	۸۸/۶۳	باطله فلوتاسیون مس	
۱۰۰	۱۰۰	۰/۳۴	۴/۰۹	۱۰۰	خوراک (محاسباتی)	
-	۳۰/۳	-	۴۷/۵	۱/۸۲	کنسانتره مس سولفیدی	چنگا ZCCM، زامبیا
-	۴۵/۸	-	۳۷	۳/۵۳	کنسانتره مس اکسیدی	
-	۲۳/۹	-	۰/۷۲	۹۴/۶۵	باطله فلوتاسیون مس	
-	۱۰۰	-	۲/۸	۱۰۰	خوراک (محاسباتی)	

## ۱-۷- ضرورت انجام تحقیق

معدن مس سونگون شامل ذخایر مس سولفیدی و اکسیدی بوده و حدود ۱۸/۵ میلیون تن مس اکسیدی با عیار متوسط ۰/۴ درصد در این معدن وجود دارد. روش معمول فرآوری مس از منابع اکسیدی کم‌عیار، فروشویی به روش توده‌ای، استخراج با حلال و الکترووینینگ است. در معدن مس سونگون ذخایر مس اکسیدی برای استحصال مس به روش فروشویی توده‌ای در یک محل ذخیره‌سازی می‌شود. ذخایر سولفیدی نیز به روش فلوتاسیون در این مجتمع فرآوری می‌شود [۳]. تغییرات مینرالوژیکی خاک معدن و همچنین توسعه محدوده معدن، باعث می‌شود خوراک کارخانه تغلیظ از نظر کانی‌شناسی تغییر کند و همراه مس سولفیدی، مس اکسیدی نیز وارد خوراک فلوتاسیون شود. در کارخانه تغلیظ مجتمع مس سونگون، از کل مس موجود در خوراک ۵ تا ۲۵ درصد را مس اکسیدی تشکیل می‌دهد. در اثر تغییرات مینرالوژیکی و همچنین عدم کارآیی مناسب فلوتاسیون هم‌زمان مس سولفیدی و اکسیدی، بازیابی مس اکسیدی پایین بوده و بخش قابل‌توجهی از مس اکسیدی به باطله منتقل می‌شود. لذا بررسی پارامترهای مؤثر بر روی عملکرد فرآیند فلوتاسیون هم‌زمان مس سولفیدی و مس اکسیدی، از قبیل نوع کلکتور، مقدار مصرف کلکتور، فعال‌کننده و غیره بر بهبود عملکرد فلوتاسیون و افزایش عیار و بازیابی مس، لازم و ضروری است.

این تحقیق مشتمل بر دو بخش به شرح زیر است:

الف- بررسی تأثیر نوع و مقدار مس اکسیدی موجود در خوراک بر عملکرد مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ

۱

- نمونه‌برداری از کارخانه‌ی تغلیظ ۱ مجتمع مس سونگون
- تعیین نتایج متالورژیکی در دوره نمونه‌برداری
- بررسی داده‌های متالورژیکی هشت ماه اخیر کارخانه تغلیظ ۱



ب- ارائه راهکارهایی برای بهبود بازیابی مس اکسیدی در مدار فلوتاسیون کارخانه‌ی تغلیظ ۱

- نمونه‌برداری از کارخانه‌ی تغلیظ ۱
- مطالعات کانی‌شناسی، XRF و XRD
- انجام آزمایش‌های فلوتاسیون با استفاده از مواد شیمیایی توصیه شده برای فلوتاسیون هم‌زمان مس اکسیدی و مس سولفیدی

## ۱-۸- سازمان‌دهی فصل‌ها

این پایان‌نامه مشتمل بر پنج فصل است که در فصل اول، کلیات و تئوری تحقیق آورده شده است. در فصل دوم به مرور تحقیقات انجام شده در این زمینه پرداخته شده است. در فصل سوم، مواد و تجهیزات مورد استفاده، روش انجام آزمایش‌ها و نحوه نمونه‌برداری ارائه شده است. در فصل چهارم نیز یافته‌ها و نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها، آورده شده است. نهایتاً در فصل پنجم نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادهایی برای تغییر در مدار و پیشنهاد تحقیقات بعدی ارائه شده است.



## فصل دوم

### مروری بر تحقیقات گذشته و مبانی نظری تحقیق

## ۲-۱- مقدمه

روش فرآوری کانی‌های اکسیدی و سولفیدی مس با توجه به ماهیت آنها متفاوت است اما در حالت مخلوط بیشتر از روش فلوتاسیون استفاده می‌شود. در این حالت از کلکتورهای خاصی استفاده می‌شود که توانایی شناورسازی همزمان کانی اکسیدی و سولفیدی را داشته باشد، همچنین برای فعال‌سازی سطح کانی اکسیدی از فعال‌کننده‌های خاصی با عنوان عوامل سولفیدکننده استفاده می‌شود تا کلکتورهای مورد استفاده برای فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی بتواند کانی اکسیدی را نیز شناور کند. در این بخش از پایان نامه به مرور کارهای انجام گرفته از ابتدای شروع فرآیند فلوتاسیون مس اکسیدی در ایران و خارج از کشور، پرداخته می‌شود.

## ۲-۲- مروری بر تحقیقات انجام گرفته

دانیلوا و همکاران (۱۹۷۵) از آلکیل هیدروکسیمات به عنوان کلکتور برای فلوتاسیون مس اکسیدی (کریزوکولا) استفاده کردند. این بررسی نشان داد که با استفاده مستقیم از این کلکتور می‌توان کریزوکولا را به راحتی بازیابی کرد [۲۹].

جونز و وودکوک (۱۹۷۹) در تحقیقی برای بازیابی کانی‌های اکسیدی سرب دو روش سولفیداسیون حلزونی و CPS به کار بردند. در سولفیداسیون به روش حلزونی با استفاده از سولفید سدیم نشان دادند که به دلیل عدم کنترل پتانسیل پالپ بازیابی کانی‌های اکسیدی سرب نسبتاً ضعیف است. در روش CPS به دلیل کنترل پتانسیل پالپ به نتایج بهتری دست یافتند به طوری که در پتانسیل ۶۰۰- میلی ولت و زمان آماده سازی بهینه ۳ دقیقه با مصرف کم سولفید سدیم به بهترین پاسخ دست یافتند. در روش CPS بدلیل حضور بیشتر یون  $S^{2-}$  و واکنش با سطح کانی اکسیدی شناور سازی کانی اکسیدی بهبود می‌یابد [۳۰].

راکوان و همکاران (۱۹۸۴) در تحقیقی به بررسی بازیابی کانی‌های کریزوکولا و تنوریت با استفاده از فرآیند سولفیداسیون پرداختند. در این تحقیق از سولفید آمونیوم به عنوان عامل سولفیداسیون استفاده کردند و برای بهینه‌سازی فرآیند، پارامترهایی مانند pH، سرعت همزنی، زمان آماده‌سازی و غلظت سولفید آمونیوم مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که واکنش یون سولفید در pHهای اسیدی با سطح کانی اکسیدی به شدت افزایش می‌یابد در حالی که در pHهای خنثی این واکنش کاهش می‌یابد. تاثیرگذاری فرآیند سولفیداسیون روی تنوریت بیشتر از کریزوکولا بود. به دلیل سطح متخلخل بیشتر کریزوکولا تأثیرگذاری فرآیند سولفیداسیون روی این کانی کمتر بوده اما در مقابل سطح کانی تنوریت با سولفید آمونیوم به راحتی فعال می‌شود. فلوتاسیون با استفاده از گزنتات‌ها بعد از فرآیند سولفیداسیون بازیابی تنوریت را به مقدار قابل توجهی بهبود بخشید اما بازیابی کریزوکولا در این شرایط نسبتاً کم بود. pH اسیدی در زمان آماده‌سازی سولفید آمونیوم در قابلیت شناورسازی کریزوکولا بیشترین تاثیر را داشت. همچنین نشان دادند که اندازه ذرات نقش مهمی در واکنش با مواد شیمیایی دارد به طوری که با کاهش اندازه ذرات واکنش سریع‌تر رخ می‌دهد [۳۱].

هانسون و فیوریستینو (۱۹۹۱) بر روی رفتار الکتروشیمیایی و شناورسازی کالکوسیت و مخلوطی از مواد معدنی سولفیدی و اکسیدی مطالعاتی انجام دادند. در این بررسی از هیدروکسیمات به‌عنوان کلکتور استفاده شد. این مطالعه نشان داد که هیدروکسیمات توانایی شناورسازی هم‌زمان کانی‌های سولفیدی، اکسیدی و سیلیکاته مس را دارد [۳۲].

کارگر و همکاران (۱۹۹۵) به بررسی عوامل مؤثر در کاهش درصد مس در باطله کارخانه تغلیظ مجتمع مس سرچشمه پرداخت که با انجام نمونه‌گیری‌های متعدد از مدار کارخانه و مطالعه آنها نتیجه گرفتند که بخش قابل توجهی از مس اعم از مس اکسیدی و مس سولفیدی از بخش باطله مرحله رافر خارج می‌شود و هدر روی مس در بخش باطله مرحله رمق‌گیر ناچیز است. همچنین نشان دادند که غیر از عوامل تجهیزاتی

و عملیاتی حاکم بر کارکرد کارخانه تغلیظ، سه عامل مهم که باعث تلفات مس در باطله و کاهش بازیابی کارخانه می‌شود شامل کاهش درصد مس در خوراک کارخانه تغلیظ، افزایش نسبت مس اکسیدی به مس کل در خوراک و غالب شدن مینرال کالکوپیریت بر کالکوسیت خوراک است. برای بهبود بازیابی مس اکسیدی در شرایطی که نسبت مس اکسیدی در خوراک ورودی بیشتر بود، فرآیند سولفیداسیون را به کار بردند. از سولفید سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون و پتاسیم آمیل گزنتات به عنوان کلکتور استفاده شد و به نتایج قابل قبولی دست یافتند [۳۳].

کلارک و همکاران (۲۰۰۰) تحقیقی در مورد بازیابی کانی‌های اکسیدی مس با استفاده از فرآیند سولفیداسیون انجام دادند در این مطالعه، برای افزایش بازیابی مس از گاز نیتروژن به جای هوا استفاده کردند. استفاده از گاز نیتروژن در غیاب حضور اکسیژن و با کنترل شرایط فرآیند سولفیداسیون بازیابی کالکوسیت، کالکوپیریت و بونیت را افزایش داد. حضور نیتروژن در پالپ دسترسی به یون سولفید را برای فرآیند سولفیداسیون راحت‌تر نموده و شکل‌گیری لایه سولفیدی روی سطح کانی را بهبود می‌بخشد در این حالت با مصرف کم سولفید سدیم به حداکثر بازیابی برای کانی‌های اکسیدی مس دست یافتند [۱۷].

کونکولو و همکاران (۲۰۰۳) بر روی بازیابی نمونه اکسیدی مس- کبالت با استفاده از فرآیند سولفیداسیون مطالعاتی به عمل رساندند. در این مطالعه از هیدروسولفید سدیم و سولفید آمونیوم به عنوان عامل سولفیداسیون استفاده شد وقتی از ترکیب هیدروسولفید سدیم و سولفید آمونیوم با نسبت ۱/۱ استفاده شد، بهترین پاسخ به دست آمد [۳۴].

لی و همکاران (۲۰۰۸) از هیدروکسیمات به عنوان کلکتور در فلوتاسیون مس اکسیدی که مخلوط با مس سولفیدی بود استفاده کردند. هیدروکسیمات بدون تأثیر منفی روی بازیابی مس سولفیدی، مس اکسیدی را به خوبی شناور کرد [۲۵].

عطفی و همکاران (۲۰۰۹) مطالعاتی روی پرعیارسازی کانسنگ سولفیدی- اکسیدی سرب کم عیار با استفاده از فرآیند سولفیداسیون انجام دادند. در این مطالعه از سولفید سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون، از سیلیکات سدیم به عنوان متفرق کننده و از پتاسیم آمیل گزنتات به عنوان کلکتور استفاده کردند. آنها نشان دادند بعد از سولفیدی شدن، سطح کانی بسیار کمتر آب پذیر شده و در نتیجه بصورت مؤثرتری شناور می گردد. همچنین تحت این شرایط مصرف کلکتور بصورت قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. در این مطالعه مقدار بهینه سولفید سدیم، سیلیکات سدیم و پتاسیم آمیل گزنتات به ترتیب ۲۰۰۰، ۵۰۰ و ۲۰۰ گرم بر تن تعیین شد [۳۵].

فتلا و موزندا (۲۰۱۰) مطالعاتی روی فلوتاسیون مس اکسیدی انجام دادند. عیار مس کل ۴/۵ درصد و از این مقدار ۸۸ درصد آن ها مس اکسیدی و ۱۲ درصد را مس سولفیدی تشکیل می داد. از هیدروسولفور سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون، از اکتیل هیدروکسیمات، سدیم کربنات به عنوان کلکتور برای مس اکسیدی و از پتاسیم آمیل گزنتات به عنوان کلکتور برای مس سولفیدی استفاده کردند. عیار مس ۱۳ درصد و بازیابی ۴۸ درصد به دست آمد که علت عیار و بازیابی پایین، به دلیل وجود مس سیلیکاته به مقدار نسبتاً زیاد در نمونه بود [۳۶].

اوبی و بین (۲۰۱۲) بر روی فلوتاسیون نمونه ای که حاوی کبالت و مس (هم اکسیدی و هم سولفیدی) بود مطالعاتی را انجام دادند. از سولفید سدیم و هیدروسولفید سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون و از پتاسیم آمیل گزنتات به عنوان کلکتور در سلول های رافر، رمق گیر و شستشو استفاده شد. عیار مس در نمونه ۲/۶۳ و عیار کبالت ۰/۰۴ درصد بود و مقدار بازیابی و عیار به دست آمده برای مس به ترتیب ۸۸/۵۵ و ۲۱/۲ درصد بود [۳۷].

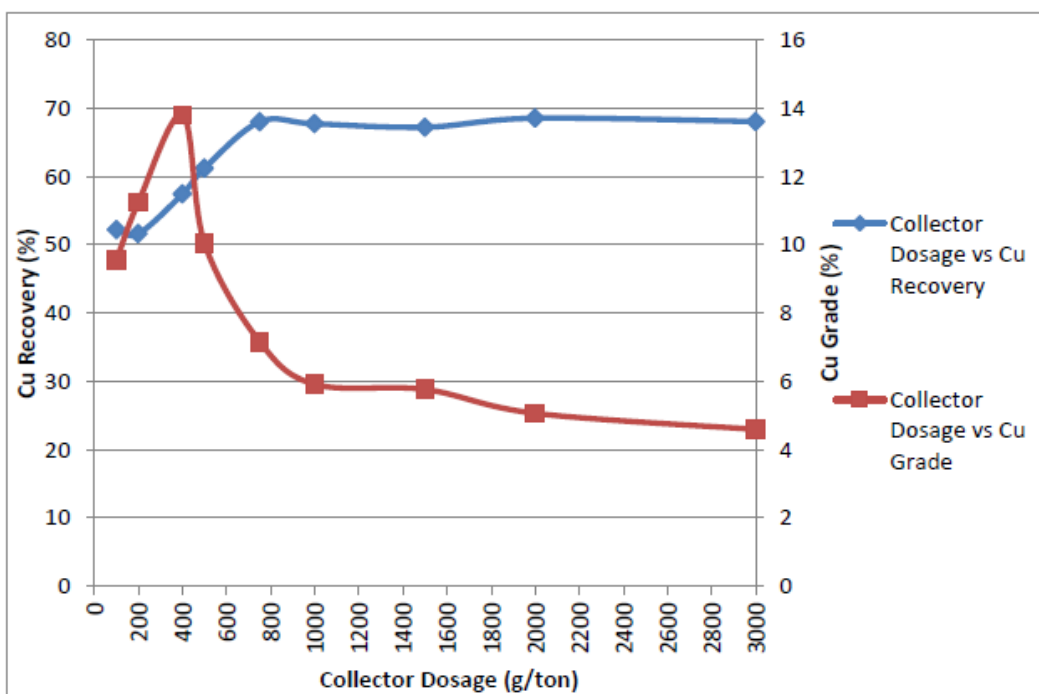
هوپ و همکاران (۲۰۱۲) مطالعاتی روی فلوتاسیون کریزوکولا با استفاده از کلکتور اکتیل هیدروکسیمات انجام دادند که نتایج حاصل نشان داد اکتیل هیدروکسیمات به خوبی کریزوکولا را شناور کرده و بازیابی به ۹۰ درصد رسید [۳۸].

زونگ و همکاران (۲۰۱۳) در مورد فلوتاسیون مس اکسیدی مربوط به نمونه‌ای که عیار مس کل ۱/۰۲ درصد و عیار مس اکسیدی ۰/۵۶ درصد بود مطالعاتی را انجام دادند. از پتاسیم آمیل گزنتات و هیدروکسیمات به عنوان کلکتور استفاده شد و عیار و بازیابی به دست آمده به ترتیب ۳/۱۹ و ۳۸/۴ درصد بود [۳۹].

جی و همکاران (۲۰۱۳) بر روی فلوتاسیون مس اکسیدی با عیار مس ۰/۷۷ درصد مس، مطالعاتی به انجام رساندند. از سولفید سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون، بوتیل گزنتات به عنوان کلکتور و روغن کاج به عنوان کف‌ساز استفاده شد. مقدار بازیابی به دست آمده ۸۰/۸۱ درصد و با عیار ۱۸/۰۶ درصد بود [۴۰].

کایراز (۲۰۱۴) در تحقیقی به بررسی بازیابی مس اکسیدی با استفاده از دو روش فلوتاسیون و لیچینگ پرداخت. در روش فلوتاسیون از سولفیداسیون، هیدروکسیمات و پتاسیم آمیل گزنتات استفاده شد. در نمونه مورد استفاده عیار مس اکسیدی ۴/۲۱ درصد بوده و حاوی کانی‌های با ارزش کوپریت، تنوریت، مالاکیت و مس طبیعی بوده و کانی‌های کوارتز، کلسیت، ایلیت، کلریت و پلاژیوکلاز مهمترین کانی‌های باطله موجود در نمونه بود. از هیدروکسیمات در مقادیر مختلف استفاده شد که نتایج آن در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.

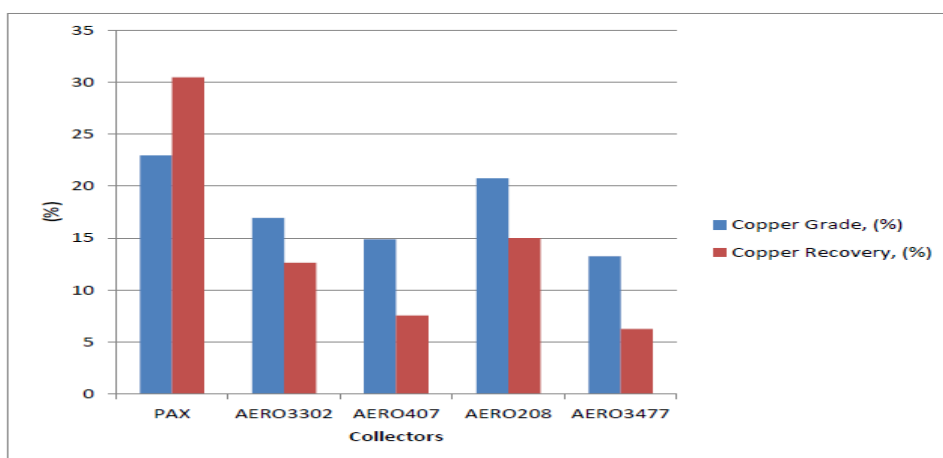




شکل ۲-۱- تأثیر غلظت هیدروکسیمات در بازیابی مس [۴۱]

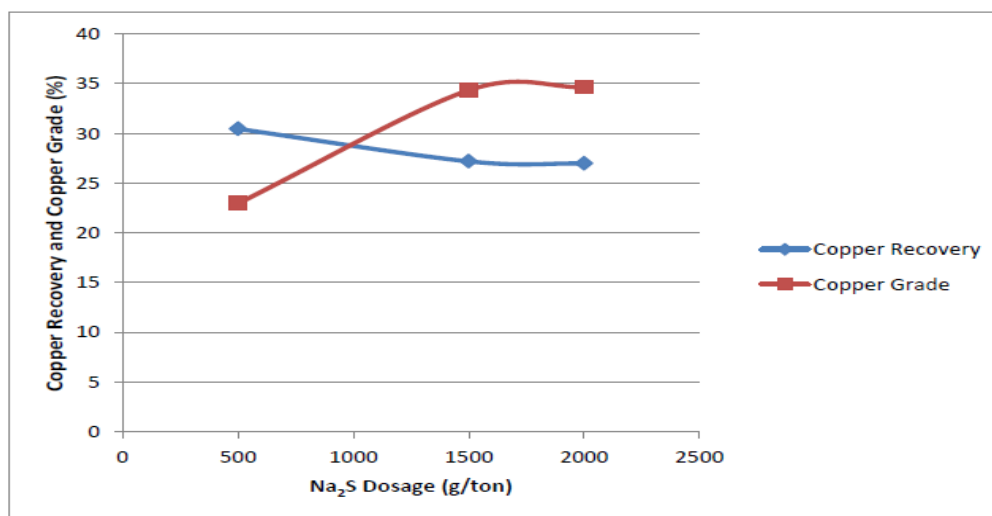
در این تحقیق از ۵ نوع کلکتور رایج برای فلوتاسیون مس استفاده شد که مطابق شکل ۲-۲

کارآمدترین آن‌ها PAX (پتاسیم آمیل گزنتات) می‌باشد.



شکل ۲-۲- تأثیر انواع کلکتورها روی بازیابی مس اکسیدی [۴۱]

برای سولفیداسیون از سولفید سدیم استفاده شد که نتایج آن در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. در آزمایش‌های سولفیداسیون از پتاسیم آمیل گزنتات به عنوان کلکتور، روغن کاج به عنوان کف‌ساز استفاده شد. زمان آماده‌سازی سولفیداسیون و زمان آماده‌سازی کلکتور هر دو ۵ دقیقه بود.



شکل ۲-۳- تأثیر غلظت سولفید سدیم بر بازیابی مس اکسیدی [۴۱]

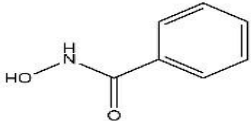
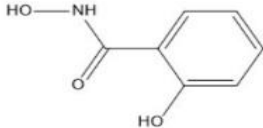
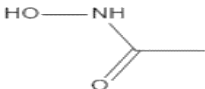
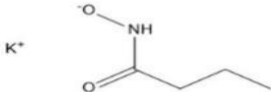



معادن کانسانشی واقع در آفریقای جنوبی، حاوی کانی‌های سولفیدی و اکسیدی مس همراه با طلا می‌باشد. تا سال ۲۰۰۹ مس سولفیدی و اکسیدی به صورت جداگانه مورد فرآوری قرار می‌گرفت. مس سولفیدی با استفاده از فلوتاسیون با گزنتات‌ها و مس اکسیدی با استفاده از لیچینگ فرآوری می‌شد. بخشی از کانسنگ که در آن مس اکسیدی و مس سولفیدی به صورت مخلوط بوده و قابل جدایش از هم نبودن به دلیل نبود روش فرآوری اقتصادی، ذخیره می‌شد. روش فلوتاسیون برای این نوع کانسنگ پاسخ ضعیف می‌دهد و روش لیچینگ به دلیل مصرف بالای اسید غیر اقتصادی می‌باشد. از سال ۲۰۰۹ به بعد در این معدن برای فرآوری این نوع کانسنگ از فرآیند سولفیداسیون (CPS) استفاده شده است. پاکوت و نولوب

(۲۰۱۵) برای بهینه سازی مدار فلوتاسیون- سولفیداسیون در معدن کانسازشی از هیدروسولفید سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون و از پتاسیم آمیل گزنتات و سدیم ایوبوتیل گزنتات به عنوان کلکتور استفاده کرده و به نتایج نسبتاً خوبی دست یافتند [۴۲].

کورین و همکاران (۲۰۱۶) مطالعاتی روی نمونه خاک معدن کانسازشی که ترکیبی از مس اکسیدی و سولفیدی است انجام دادند. در این مطالعه برای فرآوری مس اکسیدی با استفاده از هیدروسولفید سدیم از دو روش CPS و سولفیداسیون به روش حلزونی استفاد شد که روش CPS نسبت به روش حلزونی پاسخ بهتری داد [۴۳].

ماریون و همکاران (۲۰۱۷) تحقیقی در مورد ارزیابی انواع کلکتورهای هیدروکسیمات روی فلوتاسیون مالاکیت انجام دادند. در این تحقیق ۷ نوع هیدروکسیمات در آزمایش‌ها به کار رفت که مشخصات آن‌ها در جدول ۱-۲ آورده شده است. در این تحقیق برای بررسی جذب کلکتور روی سطح کانی مالاکیت پتانسیل زتا اندازه‌گیری شده است که نشان می‌دهد هر ۷ نوع هیدروکسیمات روی سطح مالاکیت جذب می‌شود. هیدروکسیمات نوع بنزو و پتاسیم اکتیل نسبت به سایر هیدروکسیمات‌ها انتخابیت بیشتری داشته و بیشترین بازیابی مالاکیت در حضور این نوع کلکتورها بوده است [۴۴].

جدول ۱-۲- مشخصات هیدروکسیمات‌های استفاده شده در انجام آزمایش [۴۴]

ساختار	مخفف	هیدروکسیمات
	BHA	Benzo
	SHA	Salicyl
	AHA	Aceto
	PBH	K-Butyl
	OHA	Octyl
	POH	K-Octyl
	THA	Tetradecyl

جدول ۲-۲- خلاصه ای از مروری بر تحقیقات پیشین

سال	نویسنده	پارامترهای مورد بررسی
۱۹۷۵	Danilova	بازیابی کریزوکولا با استفاده از هیدروکسیمات
۱۹۷۹	Jones	بازیابی کانی‌های اکسیدی سرب با سولفیداسیون
۱۹۸۴	Raghavan	بررسی بازیابی کریزوکولا و تنوریت با استفاده از فرآیند سولفیداسیون
۱۹۹۵	کارگر	بررسی عوامل مؤثر بر کاهش درصد مس در باطله کارخانه تغلیظ مجتمع مس سرچشمه
۲۰۰۰	Clarke	بررسی تاثیر گاز نیتروژن در فرآیند سولفیداسیون
۲۰۰۳	Kongolo	بازیابی نمونه اکسیدی مس- کبالت با استفاده از فرآیند سولفیداسیون
۲۰۰۸	Lee	بازیابی مس اکسیدی با استفاده از هیدروکسیمات
۲۰۰۹	عطفی	بازیابی کانی‌های سرب با استفاده از فرآیند سولفیداسیون
۲۰۱۰	Phetla	بررسی بازیابی مس اکسیدی با استفاده از فرآیند سولفیداسیون و کلکتور هیدروکسیمات
۲۰۱۲	Ou	بازیابی نمونه اکسیدی مس و کبالت با استفاده از فرآیند سولفیداسیون
۲۰۱۳	Xiong	بازیابی مس اکسیدی با استفاده از فرآیند سولفیداسیون
۲۰۱۳	Ge	تأثیر سولفیداسیون، گزنتات‌ها روی بازیابی مس اکسیدی
۲۰۱۴	KIRAZ	بازیابی مس اکسیدی با استفاده از سولفیداسیون، هیدروکسیمات‌ها و لیچینگ
۲۰۱۵	Paquot	بهینه سازی فرآیند سولفیداسیون در کارخانه تغلیظ معدن کانسانشی
۲۰۱۶	Corin	بررسی سولفیداسیون حلزونی و CPS در معدن کانسانشی
۲۰۱۷	Marion	بررسی تأثیر انواع کلکتورهای هیدروکسیمات روی بازیابی مس اکسیدی



## فصل سوم

### روش‌ها، تجهیزات و مواد شیمیایی

### ۳-۱- مقدمه

در این فصل به توصیف عملیات نمونه برداری، آماده سازی نمونه جهت انجام آزمایش ها و روش های مورد استفاده برای کانی شناسی و عیارسنجی نمونه، پرداخته می شود. همچنین نوع مواد و روش هایی که در انجام آزمایش ها، از آن ها استفاده شده است، مشخص می شود.

### ۳-۲- نمونه برداری

برای کنترل عملیات در یک کارخانه فرآوری و تنظیم آن به منظور دستیابی به شرایط مناسب، لازم است بار موجود در مسیرهای مختلف کارخانه تغلیظ طبق برنامه از نظر کیفی و کمی تحت بررسی قرار گیرد. این امر مستلزم در اختیار داشتن نمونه هایی است که معرف بار موجود در آن مسیرها باشد. بنابراین، به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی و انجام آزمایش های فلوتاسیون برای تعیین پارامترهای مؤثر و شرایط بهینه فلوتاسیون کانی های اکسیدی مس و جلوگیری از انتقال آن ها به بخش باطله، نمونه گیری در دو نوبت انجام شد.

### ۳-۲-۱- نمونه گیری نوبت اول

به منظور بررسی علل هدرروی مس اکسیدی در مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سونگون، نمونه گیری در ۴ سری جداگانه انجام شد. هر ۴ سری نمونه گیری بر اساس عیار مس اکسیدی در خوراک ورودی کارخانه تغلیظ بود. به این صورت که در دو سری از نمونه گیری ها، عیار مس اکسیدی در خوراک ورودی کارخانه، بالا بود و در دو سری بعدی، عیار مس اکسیدی در خوراک ورودی کارخانه تغلیظ، پایین بود. نمونه گیری ها در چهار روز مختلف و هر روز به مدت چهار ساعت، با فاصله زمانی حدود ۳۰ دقیقه در نقاط مختلف مدار که در شکل ۳-۱ مشخص شده انجام شد. برای به دست آوردن نمونه های معرف، از هر یک از نقاط مشخص شده، از ظرف نمونه گیر مخصوص استفاده شد. بعد از انجام نمونه گیری به منظور تهیه



نمونه معرف، نمونه‌ها با عیار مس اکسیدی پایین باهم و نمونه‌ها با عیار مس اکسیدی بالا باهم مخلوط شد. نمونه‌های مربوط به هر نقطه برای مطالعات آزمایشگاهی، پس از آب‌گیری و خشک‌کردن، همگن‌سازی شد.

### ۳-۲-۲- نمونه‌گیری نوبت دوم

نمونه‌گیری نوبت دوم برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون، مطابق شکل ۳-۱ از نقطه ۱ یعنی سرریز سیکلون‌های اولیه، قبل از ورود به مخزن آماده‌سازی انجام شد. این نمونه‌گیری در طول یک ماه در چهار سری انجام شد. با توجه به اینکه برای انجام آزمایش‌ها به نمونه‌ای با عیار مس اکسیدی نسبتاً بالایی نیاز بود، بنابراین نمونه‌گیری در روزهایی انجام شد که عیار مس اکسیدی خوراک ورودی کارخانه تغلیظ ۱ نسبتاً بالا بود. همه چهار نمونه پس از خشک‌کردن به منظور تهیه نمونه معرف برای انجام آزمایش‌ها، باهم مخلوط شدند. با توجه به شکل ۳-۱ نمونه تهیه شده از نقطه ۱ برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون و همچنین جهت مطالعات اولیه، نمونه‌های گرفته شده از نقاط ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ جهت مطالعات اولیه مورد استفاده قرار گرفت. آماده‌سازی نمونه در آزمایشگاه متالورژی مجتمع مس سونگون انجام شد. نمونه‌ها پس از آب‌گیری و خشک‌کردن، همگن‌سازی شد و نمونه معرفی حدود ۲۰۰ کیلوگرم جهت انجام آزمایش‌های فلوتاسیون، تهیه گردید.



خشک شد. پس از خشک شدن، مواد باقی مانده روی سرنده به روش خشک با سرندهای ۱۰۶، ۷۵، ۵۳ و ۳۸ میکرون با استفاده از سیکلوسایزر دانه بندی شد و هر محدوده ای برای تعیین عیار مس اکسیدی و سولفیدی، به آزمایشگاه کانی شناسی مجتمع مس سونگون ارسال گردید. با توجه به نتایج آنالیز XRD، عمده ترین کانی های مزاحم موجود در نمونه، مطابق جدول ۳-۱ کوارتز، ایلیت، پیریت، آلبیت، شاموسیت و آلونیت می باشد.

جدول ۳-۱- نتایج آنالیز XRD نمونه اخذ شده جهت انجام آزمایش های فلوتاسیون

عنوان نمونه	فرمول شیمیایی	عیار (%)
کوارتز	SiO <sub>2</sub>	۳۸/۵
ایلیت	(K,H <sub>3</sub> O)(Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> [(OH) <sub>2</sub> ,(H <sub>2</sub> O)]	۲۴/۹
پیریت	FeS <sub>2</sub>	۱۲/۷
آلبیت	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	۸/۵
چاموسیت	(Fe <sup>2+</sup> ,Mg) <sub>۶</sub> Al(AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>8</sub>	۶/۹
آلونیت	KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	۴/۳
آمورف	-	۴/۱

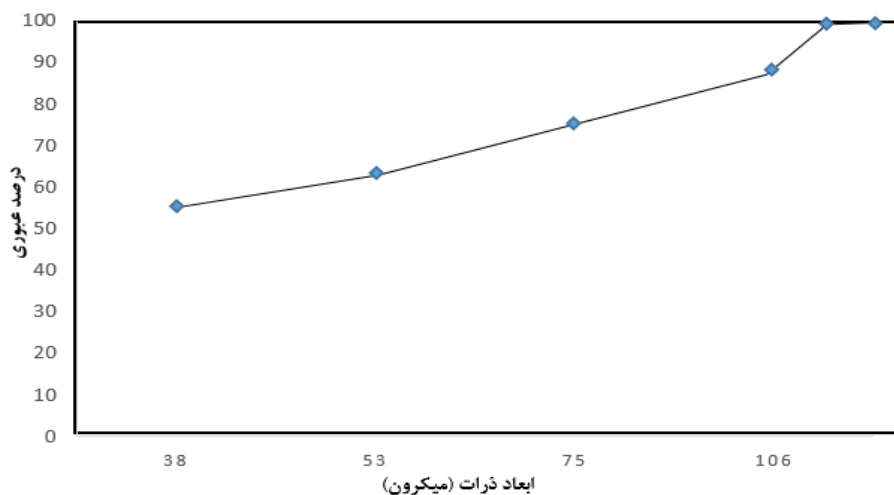
نتایج حاصل از آنالیز XRF، میزان عناصر و ترکیبات موجود در کانه را به صورت کمی مطابق جدول ۳-۲ نشان می دهد.

جدول ۳-۲- نتایج آنالیز XRF نمونه اخذ شده جهت انجام آزمایش های فلوتاسیون

عناصر	عیار (%)	عناصر	عیار (%)	عناصر	عیار (%)
K <sub>2</sub> O	۷/۲۸	CuO	۰/۱۵	Cu	۰/۶۴
TiO <sub>2</sub>	۰/۶۲	SiO <sub>2</sub>	۶۲/۸۴	Fe	۳/۸۴
CaO	۰/۹۷	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۶/۴۳	Mo	۰/۰۲
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۴۵	MgO	۱/۹۵	S	۴/۸۱

نتایج آنالیز دانه‌بندی و کانی‌شناسی نمونه مورد استفاده برای آزمایش‌ها در شکل ۳-۲ و جدول ۳-۳ آورده

شده است که نشان می‌دهد  $d_{80}$  نمونه در حدود ۷۰ میکرون قرار دارد.



شکل ۳-۲- آنالیز ابعادی نمونه اخذ شده جهت انجام آزمایش‌های فلوتاسیون

جدول ۳-۳- توزیع دانه‌بندی نمونه و نتایج آنالیز عیاری هر محدوده

Cu	CuO	CuS	Fe	درصد وزنی عبوری	ابعاد ذرات (میکرون)
۰/۱۷	۰/۰۴	۰/۱۳	۱/۶۲	۱۴/۲۲	+۱۰۶
۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۲	۲/۳	۱۱/۳۱	-۱۰۶+۷۵
۰/۴	۰/۰۸	۰/۳۲	۳/۲۹	۱۲/۵۲	-۷۵+۵۳
۰/۷۵	۰/۱۲	۰/۶۳	۵/۵۸	۶/۶۸	-۵۳+۳۸
۰/۸	۰/۱۹	۰/۶۱	۴/۳۶	۵۵/۲۶	-۳۸
۰/۶۴	۰/۱۵	۰/۴۹	۳/۸		عیار کل

### ۳-۴- مواد شیمیایی مصرف شده در آزمایش‌های فلوتاسیون

در این تحقیق برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از مواد شیمیایی مشخص شده در جدول ۳-۴ استفاده شد که همه آن‌ها از واحد مواد شیمیایی مجتمع مس سونگون تهیه شده است.

جدول ۳-۴- مشخصات مواد شیمیایی مورد استفاده در آزمایش‌ها

نقش ماده شیمیایی	فرمول	ماده شیمیایی
تنظیم کننده pH	CaCO <sub>3</sub>	آهک
کلکتور	C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> NaOS <sub>2</sub>	سدیم ایزوپروپیل گزنتات (SIPX)
کمک کلکتور		نمک دی تیوفسفات در آب (Flomin C۷۲۴۰)
کف‌ساز	H[OCH(CH <sub>3</sub> )CH <sub>2</sub> ] <sub>n</sub> OH	پلی پروپیلین گلیکول (A۶۵)
کف‌ساز	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH.CH <sub>2</sub> CH(OH)CH <sub>3</sub>	متیل ایزوبوتیل کربونیل (A۷۰)
عامل سولفیدکننده	Na <sub>2</sub> S	سولفید سدیم
عامل سولفیدکننده	NaHS	هیدروسولفید سدیم
عامل سولفیدکننده	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S	سولفید آمونیوم
کلکتور	C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> KOS <sub>2</sub>	پتاسیم آمیل گزنتات (Z6)
متفرق کننده	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	سیلیکات سدیم
کلکتور	(C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> O <sub>2</sub> N) <sub>2</sub> (H,K)	پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات
کلکتور	(C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> O <sub>2</sub> N) <sub>2</sub> (H,Na)	سدیم اکتیل هیدروکسیمات

### ۳-۴-۱- حذف کلکتور از سطح کانی

نمونه مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از بخش سرریز سیکلون‌های اولیه تهیه شد. با توجه به اینکه بخشی از کلکتور مورد استفاده در مدار رافر، در ته ریز سیکلون‌های اولیه اضافه می‌شود و این مواد طی بار برگشتی به ذرات سرریز نیز برخورد کرده و با آن‌ها واکنش می‌دهند و در نتیجه نمونه‌های تهیه شده از سرریز سیکلون‌ها برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون آغشته به کلکتور است. برای جلوگیری از تأثیرگذاری احتمالی این مواد در آزمایش‌های فلوتاسیون، لازم بود که کلکتور جذب شده بر روی سطح ذرات حذف گردد. تحقیقات نشان می‌دهد که برای حذف کلکتور از سطح کانی از روش‌های مختلفی مانند عمل‌آوری حرارتی و شستشو با مواد شیمیایی مختلف از جمله آب اکسیژنه، استون، سولفید سدیم، هیدروسولفید سدیم، سیانید سدیم و محلول اسید نیتریک استفاده می‌شود. سولفید سدیم و هیدروسولفید سدیم از مواد تأثیرگذار بر فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی و سولفیدی مس می‌باشند که به دلیل استفاده از این واکنش‌گرها در آزمایش‌های بعدی، از این مواد برای شستشو و حذف کلکتور از سطح کانی استفاده نشده است. از طرفی روش عمل‌آوری حرارتی به دلیل سادگی عملیات و عدم تأثیرگذاری بر نتایج آزمایش‌های بعدی متداول‌تر است. طاهری و همکاران (۲۰۱۳) از روش‌های مختلف برای حذف کلکتور از سطح کانی استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از آنالیز FTIR نشان دادند که با روش عمل‌آوری حرارتی (در دمای جوش آب) تا مقدار زیادی پیک‌های مربوط به پیوند کلکتور-کانی حذف می‌شود [۶]. از این رو در این تحقیق نیز از روش عمل‌آوری حرارتی در دمای نزدیک به جوش آب برای حذف کلکتور از سطح کانی استفاده شد. بدین صورت که نمونه بعد از آبگیری توسط فیلتر پرس، در داخل آون با دمای ۹۵ تا ۱۱۰ درجه قرار داده شد و سپس در ظرف‌های مناسب برای انجام آزمایش‌ها ذخیره‌سازی گردید.

## ۳-۵- روش انجام آزمایش‌ها

همه آزمایش‌ها در آزمایشگاه پایلوت مجتمع مس سونگون و با استفاده از سلول فلوتاسیون مدل Metso، با حجم ۲۷۰۰ میلی‌لیتری انجام شد. برای آگیری نمونه‌ها از دستگاه فیلتر پرس، برای اندازه‌گیری pH، از pH متر مدل Metrohm، از Eh متر با الکتروود پلاتینی برای اندازه‌گیری پتانسیل پالپ و برای خشک کردن نمونه‌ها از دستگاه اون<sup>۱</sup> مدل Atbin استفاده گردید. وزن نمونه مورد استفاده در هر آزمایش ۱۰۰۰ گرم و با درصد جامد ۳۲/۵ بود. درصد جامد و مصرف مواد شیمیایی بر اساس متوسط مقدار مصرف ۴ ماه کارخانه تغلیظ ۱ تنظیم شد. برای تنظیم درصد جامد و انجام آزمایش‌ها از آب برگشتی کارخانه تغلیظ استفاده شد.

## ۳-۶- روش‌های مورد استفاده برای فلوتاسیون مس اکسیدی

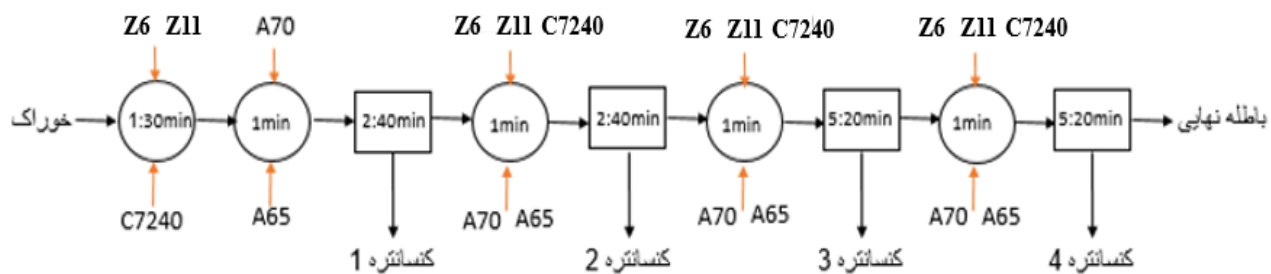
مهم‌ترین مسئله در همه روش‌های مورد استفاده برای بهبود بازیابی مس، افزایش بازیابی مس اکسیدی و جلوگیری از افت بازیابی مس سولفیدی می‌باشد. برای جلوگیری از افت بازیابی مس سولفیدی در آزمایش‌های فلوتاسیون، همه پارامترها، اعم از نوع و مقدار مواد شیمیایی، درصد جامد، pH و سرعت همزن در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱ در نظر گرفته شد و برای بهبود بازیابی مس اکسیدی، هم‌زمان از مواد شیمیایی دیگر استفاده شد. مواد شیمیایی مورد استفاده در کارخانه تغلیظ ۱ که در آزمایش‌ها نیز استفاده شد، عبارتند از: سدیم ایزوپروپیل گزنتات (Z11) و فلومین C7240، به‌عنوان کمک کلکتور و پلی پروپیلین گلیکول (A65) و متیل ایزوبوتیل کربونیل (A70) به‌عنوان کف‌ساز. از آهک نیز برای تنظیم pH استفاده شد. مراحل انجام آزمایش در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱ در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. در پایان هر آزمایش، کنسانتره هر چهار مرحله کف‌گیری و باطله نهایی، آب‌گیری و در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید و در نهایت برای تعیین عیار مس و آهن به آزمایشگاه کانی‌شناسی ارسال شد.



شکل ۳-۳- مراحل انجام آزمایش فلوتاسیون در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱

### ۳-۶-۱- استفاده از گزنتات‌ها برای بهبود بازیابی مس اکسیدی

در فلوتاسیون مس اکسیدی کلکتورهایی که دارای زنجیر کربنی طولانی‌تری هستند، بازیابی بهتری نسبت به کلکتورها با زنجیر کربنی کوتاه دارند. از بین گزنتات‌ها، پتاسیم‌آمیل‌گزنتات (Z6) به دلیل زنجیر کربنی نسبتاً طولانی برای فلوتاسیون کانی‌های مس اکسیدی مورد استفاده قرار گرفت. مطابق شکل ۳-۴ از Z6 در مراحل مختلف و در وزن‌های ۱ تا ۲۰ گرم بر تن در آزمایش‌ها استفاده شد.



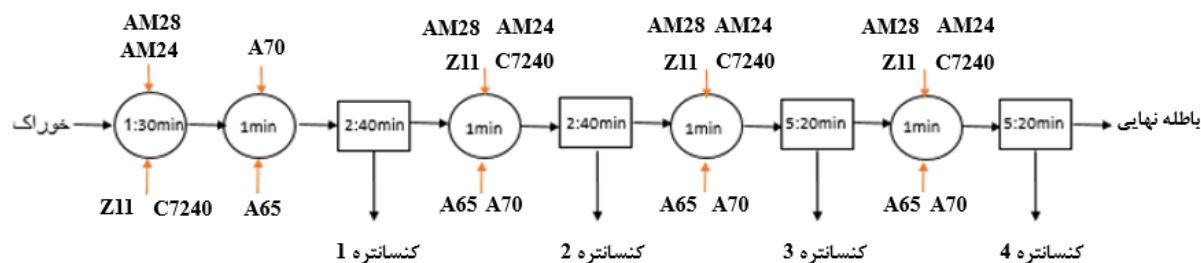
شکل ۳-۴- شرایط استفاده از کلکتور Z6 در آزمایش‌ها

### ۳-۶-۲- استفاده از هیدروکسیمات‌ها به‌عنوان کلکتور برای بهبود بازیابی مس اکسیدی

از بین هیدروکسیمات‌ها پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات (AM24) و سدیم اکتیل هیدروکسیمات (AM28) به‌عنوان کلکتور برای فلوتاسیون مس اکسیدی مورد استفاده قرار گرفت. مقدار مصرف هر دو



کلکتور بین ۱۰ تا ۵۰ گرم بر تن (با توجه به مقدار مصرف شده در تحقیقات گذشته) بود. شرایط استفاده از هیدروکسیمات‌ها مطابق شکل ۳-۵ می‌باشد. با توجه به این که هیدروکسیمات‌ها نسبت به pH حساس هستند در آزمایش‌ها، علاوه بر وزن هیدروکسیمات‌ها، در مواردی مقدار pH نیز به‌عنوان یک پارامتر تأثیرگذار، مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۳-۵- شرایط استفاده از کلکتور هیدروکسیمات‌ها در آزمایش‌ها

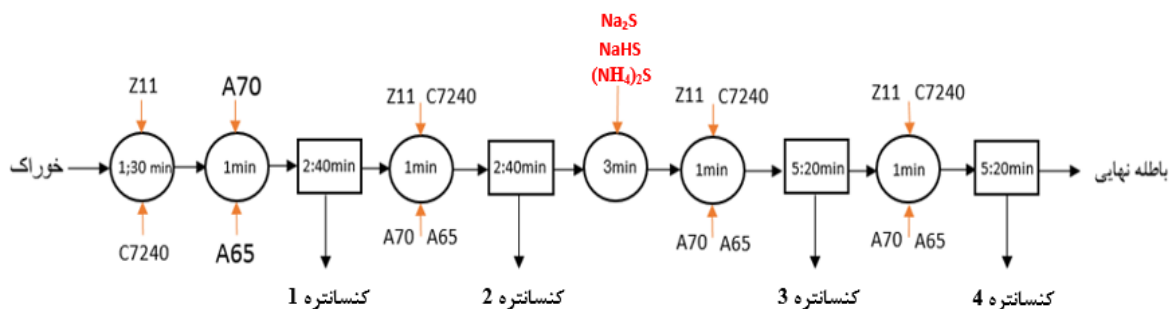
### ۳-۶-۳- استفاده از فرآیند سولفیداسیون برای بهبود بازیابی مس اکسیدی

در این تحقیق سولفیداسیون به دو روش حلزونی و کنترل پتانسیل سولفیداسیون (CPS) انجام شد.

#### ۳-۶-۳-۱- سولفیداسیون حلزونی

در این روش از سه عامل سولفید کننده سولفید سدیم، هیدروسولفید سدیم و سولفید آمونیوم استفاده شد. برای انتخاب کارآمدترین عامل سولفید کننده، مطابق شکل ۳-۶ هر سه ماده به‌صورت جداگانه در مرحله سوم به سلول فلوتاسیون اضافه شد تا مقدار بازیابی به‌دست آمده مورد ارزیابی قرار گیرد. پس از انتخاب مناسب‌ترین عامل سولفیداسیون، این ماده در مراحل مختلف به سلول اضافه شد تا ایده‌آل‌ترین مکان برای اضافه کردن عامل سولفیداسیون مشخص شود. همچنین برای بهینه‌سازی فرآیند سولفیداسیون پارامترهایی

همچون زمان آماده‌سازی برای فرایند سولفیداسیون، pH و سرعت چرخش همزن نیز مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۳-۶- شرایط استفاده از عوامل سولفیداسیون در آزمایش‌های فلوتاسیون

### ۳-۶-۳- کنترل پتانسیل سولفیداسیون (CPS)

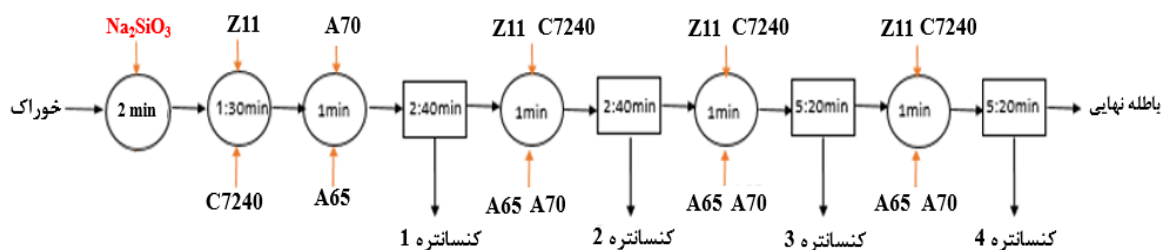
در این روش از عامل سولفیداسیون جهت کنترل پتانسیل پالپ استفاده می‌شود. مطابق جدول ۳-۵ عامل سولفیداسیون در هر چهار مرحله اضافه شد. مقدار تغییرات پتانسیل در سه محدوده (۲۰- تا ۳۰-)، (۳۰- تا ۴۰-) و (۴۰- تا ۵۰-) بررسی شد.

جدول ۳-۵- شرایط انجام آزمایش‌ها به روش کنترل پتانسیل سولفیداسیون

Z11(g/t)	C7240(g/t)	A70(g/t)	A65(g/t)	سولفید آمونیموم(g/t)	پتانسیل (mV)	pH	زمان (min)	
							۵	آماده‌سازی اولیه
					-۵۰ تا -۴۰ -۴۰ تا -۳۰ -۳۰ تا -۲۰		۸	آماده‌سازی سولفیداسیون
۵/۸۲	۴/۶۷					۱۱	۱:۳۰	آماده‌سازی
		۱/۸۶	۰/۸۱			۱۱	۱	آماده‌سازی
							۲:۴۰	کف‌گیری مرحله ۱
					-۵۰ تا -۴۰ -۴۰ تا -۳۰ -۳۰ تا -۲۰			آماده‌سازی سولفیداسیون
۵/۸۲	۴/۶۷	۱/۸۶	۰/۸۱			۱۱	۱	آماده‌سازی
							۲:۴۰	کف‌گیری مرحله ۲
					-۵۰ تا -۴۰ -۴۰ تا -۳۰ -۳۰ تا -۲۰			آماده‌سازی سولفیداسیون
۴/۸۵	۳/۸۹	۱/۵۵	۰/۶۸			۱۱	۱	آماده‌سازی
							۵:۲۰	کف‌گیری مرحله ۳
					-۵۰ تا -۴۰ -۴۰ تا -۳۰ -۳۰ تا -۲۰			آماده‌سازی سولفیداسیون
۲/۹۱	۲/۳۳	۰/۹۳	۰/۴۱			۱۱	۱	آماده‌سازی
							۵:۲۰	کف‌گیری مرحله ۴
۱۹/۴۲	۱۵/۵۸	۶/۲	۲/۷۳	۲۰ -۵			۲۶/۵۰	مجموع (g/t)

### ۳-۶-۴- استفاده از متفرق کننده‌ها برای بهبود بازیابی مس اکسیدی

از سیلیکات سدیم به‌عنوان متفرق کننده در آزمایش‌های فلوتاسیون استفاده شد. روش استفاده از سیلیکات سدیم مطابق شکل ۳-۷ بدین صورت بود که در مرحله اول، قبل از اضافه کردن کلکتور و کف‌ساز در سه مقدار ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر تن به پالپ اضافه شد.



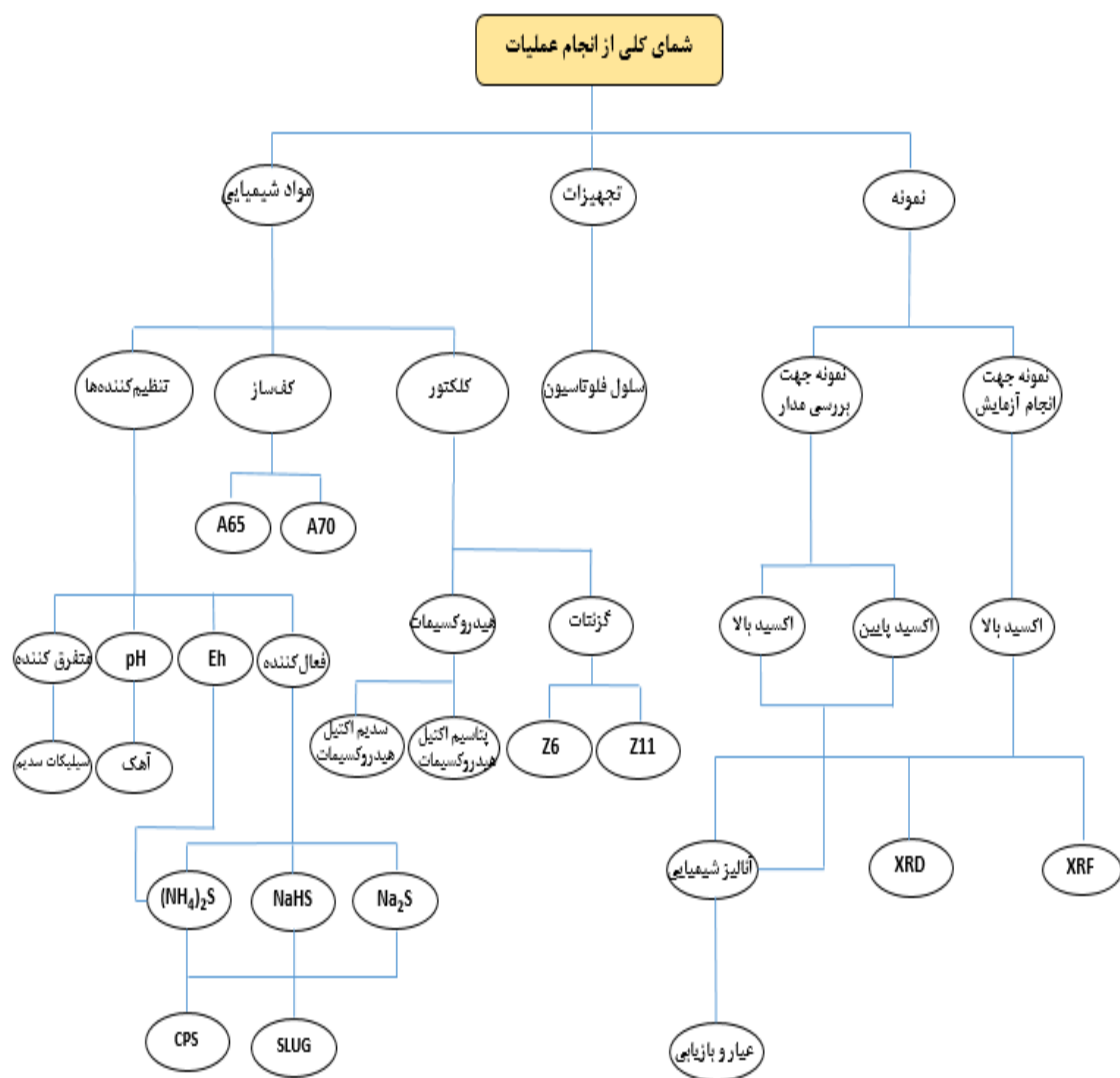
شکل ۳-۷- شرایط استفاده از سیلیکات سدیم در آزمایش‌های فلوتاسیون

### ۳-۷- محاسبات متالورژیکی

برای محاسبه بازیابی فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی و اکسیدی مس به صورت ترکیبی از فرمول زیر استفاده شد.

$$R = \frac{C c}{F f} \times 100 \quad (۳-۱)$$

که  $C$ ،  $F$ ،  $c$  و  $f$  به ترتیب بیانگر وزن کنسانتره، وزن خوراک، عیار کنسانتره و عیار خوراک می‌باشند، که مقادیر موازنه شده آن‌ها استفاده شد. در شکل ۳-۸ شمای کلی از روش و تجهیزات به کار رفته در این تحقیق آورده شده است.



شکل ۳-۸- نمایش شماتیک از روش، مواد و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها



## فصل چهارم

### ارائه یافته‌ها و تحلیل نتایج

#### ۴-۱- بررسی هدرروی مس اکسیدی در مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ

##### ۴-۱-۱- بررسی هدرروی مس اکسیدی در سلول‌های رافر بر اساس نتایج نمونه‌گیری

برای بررسی رفتار مس اکسیدی در سلول‌های رافر کارخانه تغلیظ ۱، توزیع مس اکسیدی در سه نقطه خوراک ورودی، کنسانتره و باطله رافر مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در فصل ۳ ذکر شد از نقاط مختلف مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ ۱ در چهار نوبت نمونه‌گیری انجام شد. در دو نوبت عیار مس اکسیدی در خوراک ورودی کارخانه تغلیظ ۱ پایین بود (به عنوان نمونه اکسید پایین) و در دو نوبت دیگر عیار مس اکسیدی در خوراک ورودی بالا بود (به عنوان نمونه اکسید بالا). نتایج حاصل از این نمونه‌برداری در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱- نتایج نمونه‌گیری از سلول‌های رافر کارخانه تغلیظ ۱

(CuO/Cu)*۱۰۰	Fe	CuO	CuS	Cu		
۱۰	۳/۸۸	۰/۰۶۵	۰/۵۸۵	۰/۶۵	خوراک	اکسید پایین
۲/۷۱	۱۲/۲۹	۰/۱۵	۵/۵۹	۵/۷۵	کنسانتره	
۳۹/۶۸	۲/۹۴	۰/۰۳۶	۰/۰۵۶	۰/۰۹۳	باطله	
-	۳۱/۸۴	۵۶/۶۲	۹۱/۳۲	۸۷/۱۰	بازیابی	
۱۷/۶۶	۳/۸۱	۰/۱۲	۰/۵۵	۰/۶۷	خوراک	اکسید بالا
۴/۸۶	۲۴/۸۲	۰/۴۴	۸/۵۶	۹	کنسانتره	
۵۵/۸۵	۳/۱۹	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۱۱	باطله	
-	۱۸/۶۷	۵۶/۷۷	۹۱/۸۵	۸۴/۸۷	بازیابی	

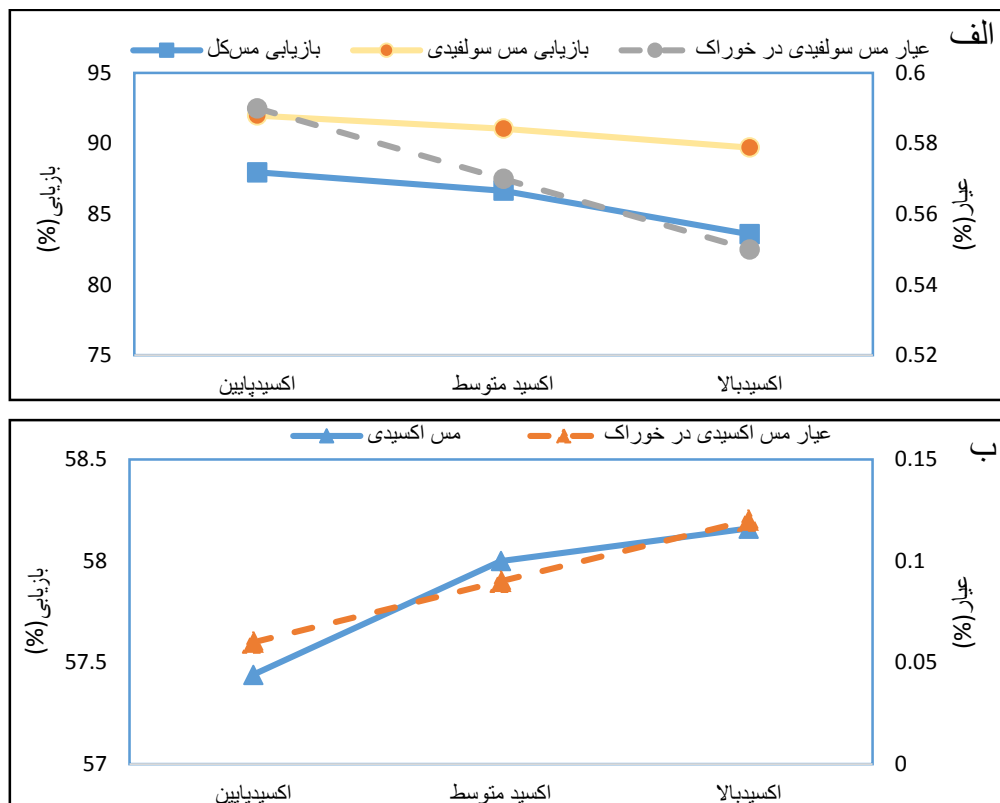


مطابق جدول ۴-۱ در هر دو نمونه اکسید پایین و اکسید بالا میزان هدرروی کانی‌های اکسیدی در بخش باطله زیاد می‌باشد. در نمونه اکسید پایین بازیابی مس اکسیدی با عیار ۰/۰۶۵ درصد در خوراک به ۵۶/۶۲ درصد رسیده و در نمونه اکسید بالا بازیابی مس اکسیدی با عیار ۰/۱۲ درصد به مقدار ۵۶/۷۷ درصد رسیده است. مقادیر کم بازیابی مس اکسیدی نشان می‌دهد که کلکتورهای استفاده شده در سلول‌های رافر کارخانه تغلیظ ۱ کارآیی خوبی در فلوتاسیون این نوع از کانی‌های مس ندارد.

#### ۴-۱-۲- تأثیر مس اکسیدی بر بازیابی و عیار نهایی مس در سلول‌های رافر بر اساس داده‌های

##### متالورژیکی کارخانه تغلیظ ۱

داده‌های متالورژیکی ۸ ماه کارخانه تغلیظ ۱ بر اساس عیار مس اکسیدی و مس سولفیدی در خوراک ورودی، مطابق شکل ۴-۱ در سه دسته اکسید پایین (نسبت مس اکسیدی به مس کل کمتر از ۱۲ درصد)، اکسید متوسط (نسبت مس اکسیدی به مس کل بین ۱۲ تا ۱۶ درصد) و اکسید بالا (نسبت مس اکسیدی به مس کل بزرگ‌تر از ۱۶ درصد) تقسیم‌بندی شدند.



شکل ۴-۱- تأثیر افزایش عیار مس اکسیدی در خوراک، بر بازیابی مس اکسیدی و مس کل در مدار رافر (الف. عیار و بازیابی مس سولفیدی- ب. عیار و بازیابی مس اکسیدی)

همان‌طور که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود، با افزایش عیار مس اکسیدی در خوراک، بازیابی مس اکسیدی به‌صورت جزئی افزایش می‌یابد اما در این شرایط، بازیابی مس سولفیدی روند نزولی دارد. کاهش بازیابی مس سولفیدی و متعاقباً کاهش بازیابی مس کل به این علت است که در محدوده‌ی اکسید بالا، عیار مس سولفیدی در خوراک ورودی، نسبت به محدوده‌ی اکسید متوسط و اکسید پایین کمتر است و بخش قابل توجهی از کل مس موجود در خوراک را، مس اکسیدی تشکیل می‌دهد. بنابراین، در این حالت بدیهی است که بازیابی مس سولفیدی و مس کل کمتر خواهد بود. دلیل دیگر کاهش بازیابی مس سولفیدی، احتمالاً درگیری کانی‌های اکسیدی و سولفیدی مس می‌باشد. با افزایش عیار مس اکسیدی، درگیری کانی

مس اکسیدی با کانی مس سولفیدی بیشتر می‌شود و چون کلکتور مورد استفاده، توانایی خوبی در آبران کردن کانی مس اکسیدی ندارد، بازیابی مس کاهش می‌یابد.

#### ۴-۱-۳- بررسی هدرروی مس اکسیدی در سلول‌های رمق‌گیر بر اساس نتایج نمونه‌گیری

نتایج آنالیز عیاری و بازیابی نمونه‌های تهیه شده از سلول‌های رمق‌گیر در جدول ۴-۲ آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، بازیابی مس اکسیدی و مس سولفیدی در نمونه اکسید پایین به ترتیب ۶۴/۹۸ و ۹۷/۵۰ درصد به دست آمد و در نمونه اکسید بالا، مقدار بازیابی مس اکسیدی و سولفیدی به ترتیب ۷۷/۸۱ و ۹۵/۳۹ درصد به دست آمد. مقایسه عیار و بازیابی مس اکسیدی در دو نمونه اکسید پایین و اکسید بالا نشان می‌دهد در مدار رمق‌گیر نیز بازیابی مس اکسیدی نسبت به مس سولفیدی کمتر است و بخش قابل توجهی از مس اکسیدی به بخش باطله منتقل می‌شود.

جدول ۴-۲- نتایج آنالیز عیاری نمونه اکسید پایین و اکسید بالا در سلول‌های رمق‌گیر کارخانه تغلیظ ۱

(CuO/Cu)*۱۰۰	Fe	CuO	CuS	Cu		
۴/۵۰	۱۸/۴	۰/۲۱۳	۴/۵۱	۴/۷۳	خوراک	اکسید پایین
۳/۷۰	۳۳/۷۳	۰/۵۶	۱۴/۶۱	۱۵/۱۸	کنسانتره	
۳۸/۰۸	۱۰/۳۷	۰/۰۹	۰/۱۶	۰/۲۶	باطله	
-	۶۳/۰۱	۶۴/۹۸	۹۷/۵۰	۹۶/۱۵	بازیابی	
۱۳/۹۵	۳۰/۴۱	۰/۶۵	۴/۰۱	۴/۶۶	خوراک	اکسید بالا
۶/۷۷	۳۲/۳۴	۱/۱۰	۱۵/۱۵	۱۶/۲۵	کنسانتره	
۵۱/۹۴	۲۳/۵۵	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۵۱	باطله	
-	۸۳	۷۷/۸۱	۹۵/۳۹	۹۱/۸۷	بازیابی	

بازیابی کم مس اکسیدی در هر دو نمونه اکسیدی بالا و اکسید پایین نشان می‌دهد که کلکتور و کفساز استفاده شده در سلول‌های رمق‌گیر کارآیی خوبی برای شناور سازی مس اکسیدی ندارند به طوری که با توجه به جدول ۴-۲ از کل مس منتقل شده به بخش باطله در نمونه اکسید بالا و اکسید پایین به ترتیب ۵۱/۹۴ و ۳۸/۰۸ درصد را مس اکسیدی تشکیل می‌دهد.

#### ۴-۱-۴- ارزیابی کلی از مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ ۱ بر اساس نتایج نمونه‌گیری

برای این کار از سه نقطه خوراک ورودی، کنسانتره نهایی و باطله نهایی کارخانه تغلیظ نمونه‌گیری شد که نتایج در جدول ۴-۳ آورده شده است. عیار مس کل در هر دو نمونه اکسیدی پایین و اکسید بالا تقریباً یکسان است اما تغییر عیار مس اکسیدی در خوراک از ۰/۰۶۵ به ۰/۱۱ درصد موجب می‌شود که بازیابی مس کل به مقدار ۵/۴۷ درصد کاهش یابد. با مقایسه نتایج بازیابی دو نمونه اکسید پایین و اکسید بالا می

توان پی برد که مواد شیمیایی مورد استفاده قابلیت کمی در شناور سازی مس اکسیدی دارند و بخش قابل توجهی از مس اکسیدی به بخش باطله منتقل می شود.

جدول ۴-۳- نتایج آنالیز عیاری و بازیابی نمونه های اخذ شده از سه نقطه خوراک، کنسانتره و باطله نهایی کارخانه تغلیظ ۱

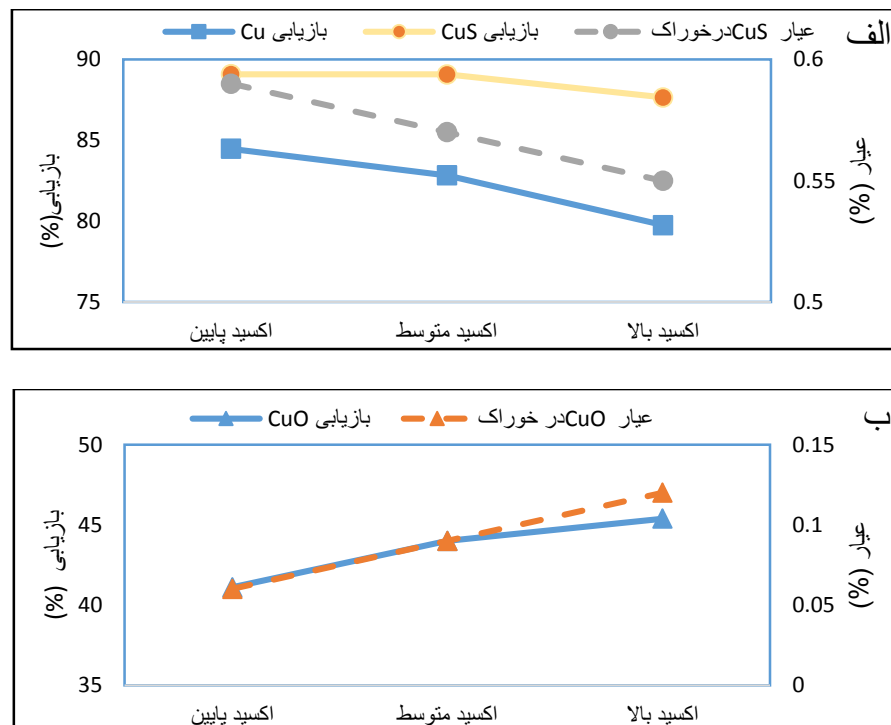
(CuO/Cu)*۱۰۰	Fe	CuO	CuS	Cu		
۱۰	۳/۸۸	۰/۰۶۵	۰/۵۸	۰/۶۵	خوراک	اکسید پایین
۲/۷۷	۲۸/۵۶	۰/۷۲	۲۵/۲۹	۲۶/۰۲	کنسانتره نهایی	
۴۳/۷۵	۳/۴۳	۰/۰۳۵	۰/۰۴۵	۰/۱	باطله نهایی	
	۱۳/۱۸	۴۸/۵۱	۹۲/۴۷	۸۴/۹۴	بازیابی	
۱۷/۹	۳/۸۱	۰/۱۱	۰/۵۴	۰/۶۶	خوراک	اکسید بالا
۵/۰۸	۳۰/۱۸	۱/۲۳	۲۳/۰۵	۲۴/۲۸	کنسانتره نهایی	
۳۶/۱۱	۳/۱۹	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۱۴	باطله نهایی	
	۱۸/۲۰	۶۰/۱۱	۸۳/۹۹	۷۹/۴۷	بازیابی	

#### ۴-۱-۵- ارزیابی کلی از مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ ۱ بر اساس داده های متالورژیکی

##### کارخانه تغلیظ ۱

با توجه به شکل ۴-۲ در هر سه حالت اکسید پایین، اکسید متوسط و اکسید بالا بازیابی مس اکسیدی پایین است. حضور کانی های اکسیدی مس در خوراک، بازیابی مس کل را نیز تحت تأثیر قرار می دهد، به طوری که با افزایش عیار مس اکسیدی در خوراک، بازیابی مس کل کاهش پیدا می کند. کلکتور Z11 مورد استفاده در کارخانه تغلیظ، یک کلکتور زنجیر کوتاه بوده و تأثیر خوبی در بازیابی مس سولفیدی دارد اما در حالتی که مس اکسیدی نیز در خوراک وجود داشته باشد، به دلیل ماهیت کانی های اکسیدی مس که در

فصل ۱ ذکر شد، کلکتور Z11 تأثیر کمتری در فلوتاسیون این کانی‌ها داشته و موجب می‌شود بازیابی مس اکسیدی پایین باشد.



شکل ۴-۲- تأثیر افزایش عیار مس اکسیدی در خوراک، بر بازیابی نهایی مس (الف. عیار و بازیابی مس سولفیدی - ب. عیار و بازیابی مس اکسیدی)

#### ۴-۲- ارزیابی پارامترهای عملیاتی مؤثر بر بهبود عملکرد فلوتاسیون مس اکسیدی

به منظور تعیین محدوده‌ی پارامترهای مؤثر و نیز مقایسه نتایج آزمایشگاهی حاصل از تأثیر فاکتورهای مهم بر عملکرد فلوتاسیون، ابتدا ۴ تست آزمایشگاهی تحت شرایط عملیاتی بهینه‌ی مدار فلوتاسیون کارخانه

تغلیظ ۱ انجام شد که شرایط انجام آزمایش‌ها و نتایج حاصل به ترتیب در جداول ۴-۴ و ۴-۵ گزارش شده‌اند.

مقدار میانگین نتایج آزمایش‌ها در شرایط بهینه عملیاتی کارخانه تغلیظ بدست آمد و نتایج حاصل از روش‌های مورد استفاده در بازیابی مس اکسیدی نسبت به این مقادیر مقایسه شد.

جدول ۴-۴- شرایط و مراحل انجام آزمایش فلوتاسیون در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱

Z11(g/t)	C7240(g/t)	A70(g/t)	A65(g/t)	pH	زمان (min)	
				۷/۸	۵	آماده‌سازی اولیه
۵/۸۲	۴/۶۷			۱۱	۱:۳۰	آماده‌سازی
		۱/۸۶	۰/۸۱	۱۱	۱	آماده‌سازی
					۲:۴۰	کف گیری مرحله ۱
۵/۸۲	۴/۶۷	۱/۸۶	۰/۸۱	۱۱	۱	آماده‌سازی
					۲:۴۰	کف گیری مرحله ۲
۴/۸۵	۳/۸۹	۱/۵۵	۰/۶۸	۱۱	۱	آماده‌سازی
					۵:۲۰	کف گیری مرحله ۳
۲/۹۳	۲/۳۳	۰/۹۳	۰/۴۱	۱۱	۱	آماده‌سازی
					۵:۲۰	کف گیری مرحله ۴
۱۹/۴۲	۱۵/۵۸	۶/۲	۲/۷۳		۲۶/۵۰	مجموع

جدول ۴-۵- نتایج آزمایش‌های اولیه در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱

انحراف معیار	میانگین	آزمایش ۴	آزمایش ۳	آزمایش ۲	آزمایش ۱		
۰/۰۱	۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۳۴	۰/۳۸	۰/۳۴	عیار کنسانتره	مس
۰/۷۴	۶۷/۶۶	۶۷/۰۱	۶۸/۷۹	۶۷/۸۷	۶۶/۹۸	بازیابی	اکسیدی
۰/۲۲	۳/۸۱	۳/۶۵	۳/۶۴	۴/۱۹	۳/۷۸	عیار کنسانتره	مس
۰/۸۹	۸۸/۳۴	۸۹/۲۹	۸۷/۴۳	۸۷/۰۲	۸۹/۰۲	بازیابی	سولفیدی
۰/۶۶	۱۸/۱۱	۱۷/۳۰	۱۶/۷۳	۱۸/۵۰	۱۷/۹۴	عیار کنسانتره	آهن
۰/۵۹	۶۱/۵۴	۶۱/۷۲	۶۰/۶۵	۶۱/۴۹	۶۲/۳۱	بازیابی	
۰/۲۳	۴/۱۷	۴/۰۱	۳/۹۹	۴/۵۷	۴/۱۳	عیار کنسانتره	
۰/۶۸	۸۲/۱۲	۸۲/۶۸	۸۱/۶۵	۸۱/۲۷	۸۲/۹۱	بازیابی	مس کل
۰/۸۹	۱۳/۰۴	۱۳/۶۶	۱۳/۸۵	۱۱/۵۷	۱۳/۰۸	بازیابی وزنی	

#### ۴-۳- فرآیند سولفیداسیون

#### ۴-۳-۱- انتخاب عامل سولفیداسیون

از آنجایی که در مراحل اول (معادل رافر شماره ۱ و ۲) و دوم (معادل رافر شماره ۳ و ۴) بخش قابل توجهی از مس سولفیدی شناور می‌شود و مس اکسیدی به دلیل تأثیرگذاری کم کلکتور بیشتر به بخش باطله که خوراک مرحله سه است، منتقل می‌گردد، این واکنش‌گرها با مقادیر مختلف در آزمایش‌های فلوتاسیون در مرحله سوم (معادل رافر شماره ۵، ۶، ۷ و ۸ در کارخانه تغلیظ ۱) به پالپ اضافه شدند. جدول ۴-۶ شرایط استفاده از عوامل سولفیداسیون در مرحله سه را نشان می‌دهد.



جدول ۴-۶- شرایط استفاده از عوامل سولفیداسیون برای انتخاب مناسب‌ترین عامل سولفیداسیون

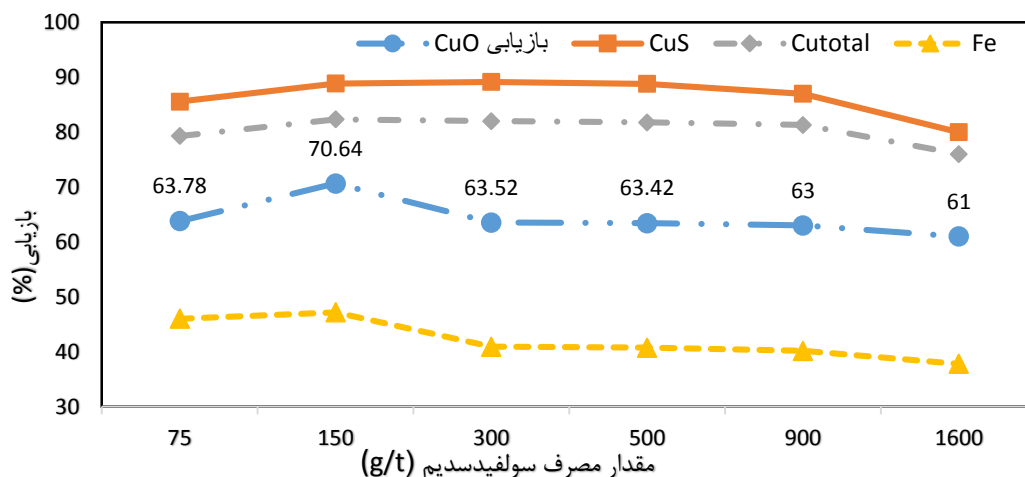
Z11(g/t)	C7240(g/t)	A70(g/t)	A65(g/t)	عامل سولفیدکننده (g/t)	pH	زمان (min)	
					۸	۵	آماده‌سازی اولیه
۵/۸۲	۴/۶۷				۱۱	۱:۳۰	آماده‌سازی کلکتور
		۱/۸۶	۰/۸۱		۱۱	۱	آماده‌سازی کفساز
						۲:۴۰	کفگیری مرحله ۱
۵/۸۲	۴/۶۷	۱/۸۶	۰/۸۱		۱۱	۱	آماده‌سازی کلکتور
						۲:۴۰	کفگیری مرحله ۲
				۱۶۰۰-۷۵		۳	آماده‌سازی سولفیداسیون
۴/۸۵	۳/۸۹	۱/۵۵	۰/۶۸		۱۱	۱	آماده‌سازی کلکتور
						۵:۲۰	کفگیری مرحله ۳
۲/۹۱	۲/۳۳	۰/۹۳	۰/۴۱		۱۱	۱	آماده‌سازی کلکتور
						۵:۲۰	کفگیری مرحله ۴
۱۹/۴۲	۱۵/۵۸	۶/۲	۲/۷۳			۲۶/۵۰	مجموع (g/t)

#### ۴-۳-۲- سولفید سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون

سولفید سدیم در شش مقدار در محدوده‌ی بین ۷۵ تا ۱۶۰۰ گرم بر تن استفاده شد. مطابق شکل ۴-

۳ بهترین پاسخ در مقدار ۱۵۰ گرم بر تن به دست آمد. در این شرایط بازیابی مس اکسیدی، مس سولفیدی

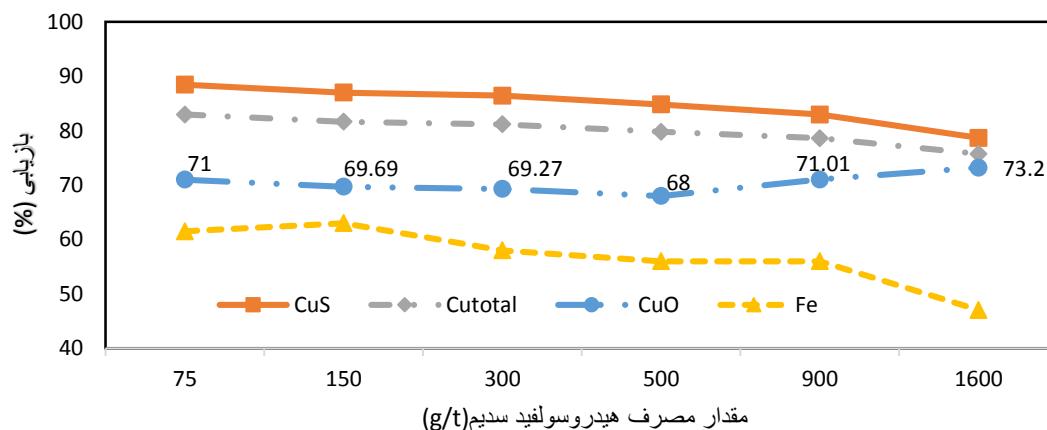
و مس کل به ترتیب ۷۰/۶۴، ۸۸/۸۶ و ۸۲/۳۱ بدست آمد. در اثر واکنش سولفید سدیم در پالپ، گونه‌های سولفوکسی مانند یون‌های سولفات ( $SO_4^{2-}$ ) و سولفات هیدروژن ( $HSO_4^-$ ) و گوگرد عنصری ( $S^0$ ) تشکیل می‌شود. گونه سولفوکسی و گوگرد عنصری به ترتیب به‌عنوان گونه‌های آب‌پذیر و آبران شناخته می‌شوند. علت افزایش بازیابی مس اکسیدی به مقدار ۲/۹۸ درصد، به دلیل تشکیل چند لایه‌ای گوگرد عنصری روی سطح کانی مس اکسیدی است. بازیابی مس سولفیدی نیز به مقدار ۰/۵۲ درصد افزایش یافت که نشان می‌دهد کانی‌های سولفیدی نیز به‌طور جزئی تحت تأثیر گوگرد عنصری ناشی از واکنش سولفیدی سدیم در پالپ قرار گرفته است. استفاده از مقادیر بالای ۹۰۰ گرم بر تن سولفید سدیم موجب بازداشت کانی‌های مس شد که نشان می‌دهد سولفید سدیم اثر دوگانه یعنی بازداشت‌کننده در غلظت‌های بالا و فعال‌کننده در غلظت‌های پایین بر رفتار فلوتاسیون کانی‌های مس دارد. همچنین این رفتار برای فلوتاسیون کانی‌های آهن‌دار که بخش عمده‌ای از آن‌ها را پیریت تشکیل می‌دهد، مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۴- نتایج استفاده از سولفید سدیم به‌عنوان عامل سولفیداسیون در بازیابی مس اکسیدی

### ۳-۳-۴- هیدروسولفید سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون

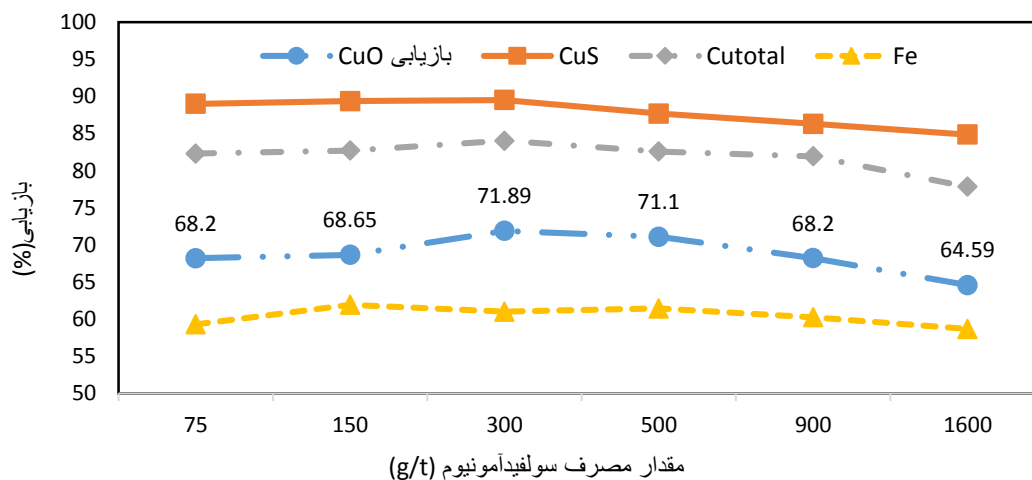
از هیدروسولفید سدیم مطابق شکل ۴-۴ در شش مقدار در محدوده‌ی بین ۷۵ تا ۱۶۰۰ گرم بر تن استفاده شد. در اثر واکنش هیدروسولفید سدیم در پالپ گونه‌های سولفوکسی که آب‌دوست هستند و گونه آبران گوگرد عنصری ایجاد می‌شوند. هیدروسولفید سدیم همانند سولفید سدیم اثر مشابهی بر روی مس اکسیدی دارد با این تفاوت که نقش فعال‌کنندگی هیدروسولفید سدیم برای مس اکسیدی، بیشتر از سولفید سدیم است و در مقابل نقش بازداشت‌کنندگی ضعیف‌تری دارد. وقتی از هیدروسولفید سدیم به مقدار ۷۵ گرم بر تن استفاده شد، بیشترین بازیابی مس به دست آمد. در این مقدار، بازیابی مس اکسیدی، مس سولفیدی و مس کل به ترتیب ۷۱، ۸۸/۴۵ و ۸۲/۹۶ درصد به دست آمد. همچنین وقتی از هیدروسولفید سدیم در مقادیر بالای ۱۱۰۰ گرم بر تن استفاده شد، بازیابی مس اکسیدی روند صعودی داشت ولی بازیابی مس سولفیدی روند نزولی داشت. رفتار فلوتاسیون کانی‌های آهن‌دار نیز در حضور هیدروسولفید سدیم همانند رفتار مس سولفیدی مشاهده شد. هرچند اثر فعال‌کنندگی هیدروسولفید سدیم روی کانی‌های آهن‌دار کمتر از مس سولفیدی است.



شکل ۴-۴- نتایج استفاده از هیدروسولفید سدیم به عنوان عامل سولفیداسیون در بازیابی مس اکسیدی

#### ۴-۳-۴- سولفید آمونیوم به عنوان عامل سولفیداسیون

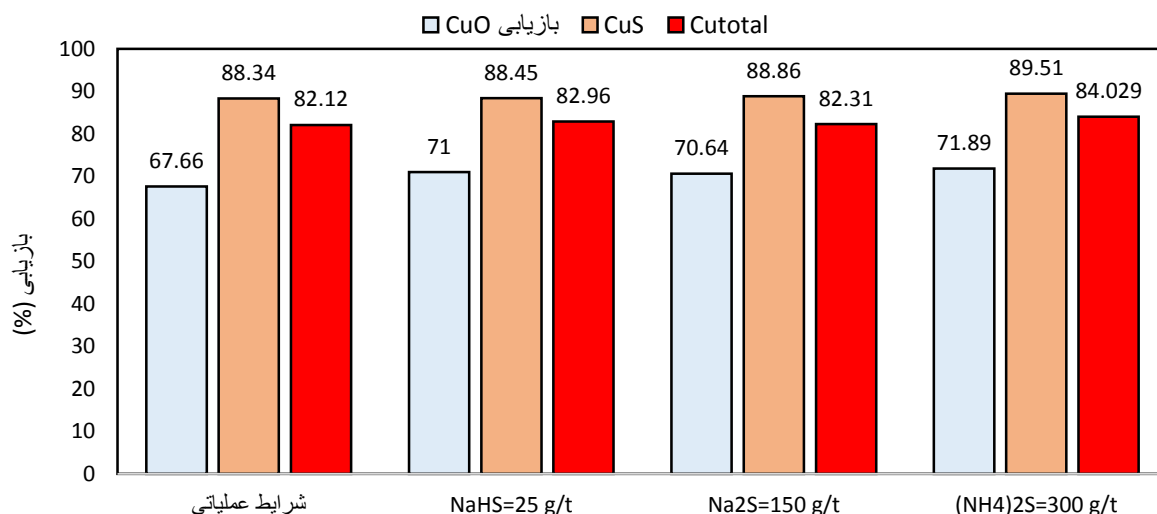
مطابق شکل ۴-۵ از سولفید آمونیوم نیز در شش مقدار در محدوده‌ی بین ۷۵ تا ۱۶۰۰ گرم بر تن به‌عنوان عامل سولفیداسیون استفاده شد. بهترین پاسخ در مقدار ۳۰۰ گرم بر تن به دست آمد که بازیابی مس اکسیدی، مس سولفیدی و مس کل به ترتیب ۷۱/۸۹، ۸۹/۵۱ و ۸۴/۰۲ درصد به دست آمد. رفتار فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی مس در حضور این واکنشگر به‌طور چشم‌گیری بهبود می‌یابد و در مورد کانی‌های آهن‌دار اثر فعال‌کنندگی سولفید آمونیوم نسبت به دو واکنش‌گر قبلی بیشتر می‌شود.



شکل ۴-۵- استفاده از سولفید آمونیوم به عنوان عامل سولفیداسیون در بازیابی مس اکسیدی

برای انتخاب مناسب‌ترین عامل سولفیداسیون، مطابق شکل ۴-۶ نتایج هر سه عامل سولفیداسیون با شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱ مقایسه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین بازیابی مس اکسیدی و مس سولفیدی در حضور سولفید آمونیوم به دست آمد، به طوری که استفاده از ۳۰۰ گرم بر تن سولفید

آمونیم، بازیابی مس اکسیدی را ۴/۲۳ درصد و بازیابی مس سولفیدی را ۱/۱۷ درصد بهبود بخشید و بازیابی نهایی مس کل با ۱/۹ درصد افزایش به ۸۴/۰۲ درصد رسید. در حالی که استفاده از ۷۵ گرم بر تن هیدروسولفید سدیم باعث بهبود ۳/۳۴ درصدی بازیابی مس اکسیدی و بهبود جزئی بازیابی مس سولفیدی شد. همچنین استفاده از ۱۵۰ گرم بر تن سولفید سدیم، بازیابی مس اکسیدی و سولفیدی به ترتیب به مقدار ۲/۹۸ و ۰/۵ درصد بهبود بخشید و بازیابی نهایی مس کل ۸۲/۳۱ درصد به دست آمد بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده سولفید آمونیم علاوه بر اینکه کارآیی بهتر در بازیابی کانی‌های اکسیدی داشت، در بازیابی کانی‌های سولفیدی مس هم کارآیی خوبی نشان داد. سولفید آمونیم در مقایسه با هیدروسولفید سدیم و سولفید سدیم اثر فعال‌کنندگی بیشتری بر روی کانی‌های مس از خود نشان می‌دهد در مقابل سولفید سدیم و هیدروسولفید سدیم اثر بازدارندگی بهتری نسبت به سولفید آمونیم روی کانی‌های مس دارند. علت چنین رفتاری احتمالاً به دلیل واکنش‌های هیدرولیز و تجزیه این واکنش‌گرها در محیط آبی می‌باشد؛ یعنی گونه‌های آبران به وجود آمده در حضور سولفید آمونیم بیشتر از سولفید سدیم و هیدروسولفید سدیم است و گونه‌های آب‌دوست به ترتیب در حضور سولفید سدیم، هیدروسولفید سدیم و سولفید آمونیم، بیشتر تولید می‌شوند؛ بنابراین سولفید آمونیم به‌عنوان مناسب‌ترین عامل سولفیداسیون برای فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی مس انتخاب شد.

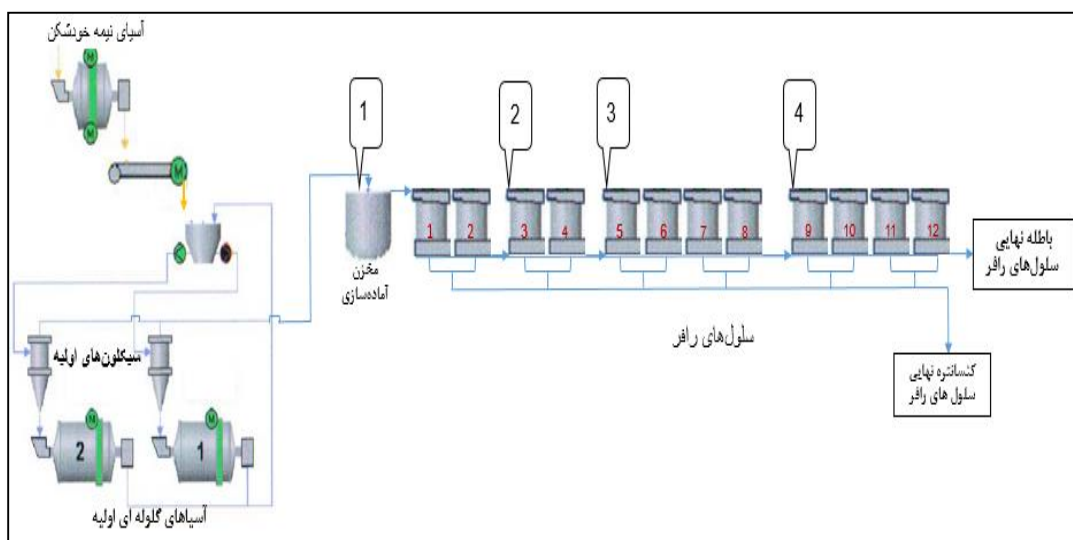


شکل ۴-۶- مقایسه نتایج بازیابی هیدروسولفید سدیم، سولفید سدیم و سولفید آمونیوم با بازیابی در شرایط عملیاتی کارخانه

تغلیظ ۱

#### ۴-۳-۵- انتخاب مکان مناسب برای اضافه کردن سولفید آمونیوم

در مدار فلوتاسیون کارخانه تغلیظ مس سونگون در قسمت سلول‌های رافر مطابق شکل ۴-۱۰، مواد شیمیایی در چهار نقطه به مدار اضافه می‌شود. در آزمایش‌های فلوتاسیون در آزمایشگاه نیز این اصول رعایت شده است. برای مشخص شدن ایده‌آل‌ترین مکان برای اضافه کردن سولفید آمونیوم، در هر چهار نقطه مشخص شده در شکل ۴-۷ در آزمایش‌های فلوتاسیون، سولفید آمونیوم به پالپ اضافه شد. با توجه به این که مقدار عیار مس اکسیدی و سولفیدی در هر چهار نقطه مشخص شده متفاوت است، برای جلوگیری از تأثیر منفی سولفید آمونیوم بر روی بازیابی مس اکسیدی و مس سولفیدی، مطابق جدول ۴-۷ از مقادیر مختلف این واکنش‌گر در هر نقطه استفاده شد.



شکل ۴-۷- نقاطی که در مدار رافر کارخانه تغلیظ ۱ مواد شیمیایی به پالپ اضافه می‌شود

جدول ۴-۷- مقدار سولفید آمونیوم اضافه شده در آزمایش‌های فلوتاسیون

نقطه ۴	نقطه ۳	نقطه ۲	نقطه ۱	محل اضافه شدن $(NH_4)_2S$
۲۵۰ و ۳۰۰	۱۶۰۰-۷۵	۳۵۰ و ۳۰۰	۳۵۰ و ۳۰۰	$(NH_4)_2S$ (g/t)

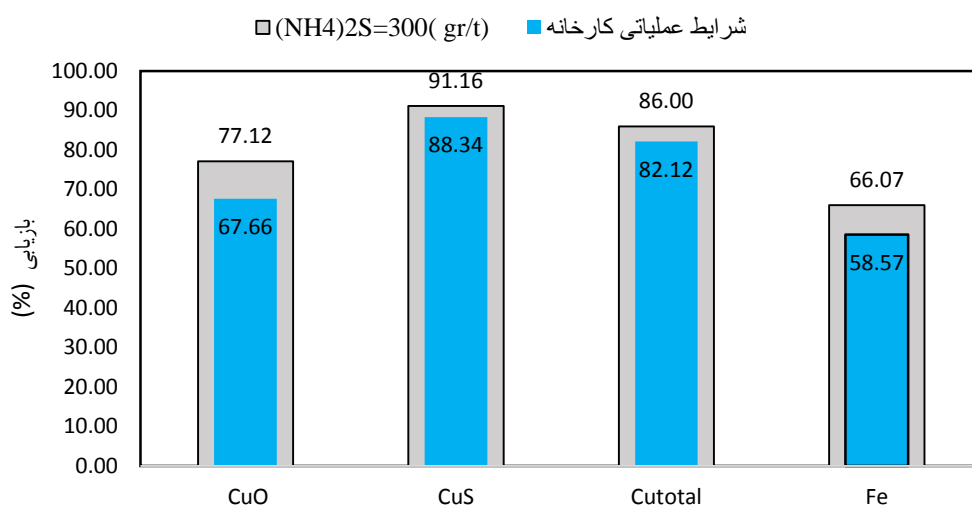
نتایج حاصل، نشان داد که مناسب‌ترین محل برای اضافه کردن عامل سولفیداسیون (سولفید آمونیوم) نقطه یک در سلول‌های رافر و مرحله اول در آزمایش‌های فلوتاسیون می‌باشد. مطابق جدول ۴-۸ و شکل ۴-۸ وقتی از سولفید آمونیوم به مقدار ۳۰۰ گرم بر تن در مرحله اول استفاده می‌شود، بازیابی مس اکسیدی ۹/۴۶ درصد و بازیابی مس سولفیدی ۲/۸۲ درصد بهبود می‌یابد و بازیابی نهایی مس کل از ۸۲/۱۲ به ۸۶ درصد می‌رسد. استفاده از سولفید آمونیوم موجب می‌شود که علاوه بر بازیابی مس اکسیدی، بازیابی مس سولفیدی نیز به مقدار قابل توجهی افزایش یابد. علت افزایش بازیابی کانی‌های مس سولفیدی، احتمالاً به دلیل خاصیت متفرق‌کنندگی سولفید آمونیوم برای این نوع از کانی‌ها می‌باشد. با اضافه کردن سولفید

آمونیم در مرحله اول، زمان ماند سولفید آمونیم در داخل سلول بیشتر شده است، بنابراین تأثیرگذاری آن روی بازیابی کانی‌های اکسیدی و سولفیدی مس افزایش می‌یابد. در مورد کانی‌های آهن سولفید آمونیم تا حدودی موجب افزایش بازیابی این کانی‌ها نیز می‌شود. در نقطه ۲ مقدار بازیابی برای کانی‌های اکسیدی و سولفیدی مس در هر دو مقدار ۳۰۰ و ۳۵۰ گرم در تن نسبت به نقطه ۱ پایین بود. در نقطه ۴ مقدار عیار مس اکسیدی و سولفیدی نسبت به سایر نقاط کمتر است و استفاده بیش از حد از سولفید آمونیم به دلیل خاصیت بازداشت‌کنندگی آن، می‌تواند بر روی بازیابی کانی‌های مس تأثیر منفی داشته باشد، بنابراین مقدار سولفید آمونیم استفاده شده در این نقطه کمتر از سایر نقاط بود. نتایج نشان داد که استفاده از سولفید آمونیم در نقطه ۴ بر بازیابی کانی‌های اکسیدی مس تأثیر منفی دارد و به صورت جزئی بازیابی کانی‌های سولفیدی را افزایش می‌دهد.



جدول ۴-۸- شرایط استفاده از سولفید آمونیوم در نقطه ۱

Z11(g/t)	C7240(g/t)	A70(g/t)	A65(g/t)	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S (g/t)	pH	زمان(دقیقه)	
					۷/۸۰	۵	آماده‌سازی اولیه
				۳۰۰	۱۱	۳	آماده‌سازی (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S
۵/۸۲	۴/۶۷				۱۱	۱:۳۰	آماده‌سازی کلکتور
		۱/۸۶	۰/۸۱		۱۱	۱	آماده‌سازی کف‌ساز
						۲:۴۰	کف‌گیری مرحله ۱
۵/۸۲	۴/۶۷	۱/۸۶	۰/۸۱		۱۱	۱	آماده‌سازی
						۲:۴۰	کف‌گیری مرحله ۲
۴/۸۵	۳/۸۹	۱/۵۵	۰/۶۸		۱۱	۱	آماده‌سازی
						۵:۲۰	کف‌گیری مرحله ۳
۲/۹۱	۲/۳۳	۰/۹۳	۰/۴۱		۱۱	۱	آماده‌سازی
						۵:۲۰	کف‌گیری مرحله ۴
۱۹/۴۲	۱۵/۵۸	۶/۲	۲/۷۳	۳۰۰		۲۶/۵۰	مجموع



شکل ۴-۸- مقایسه نتیجه استفاده از سولفید آمونیوم در نقطه ۱ با شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱

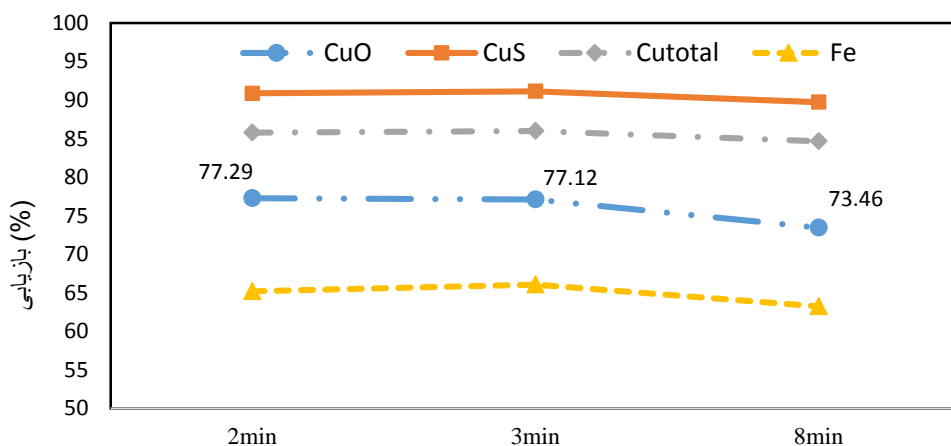
#### ۴-۳-۶- بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر سولفیداسیون کانی‌های اکسیدی مس با سولفید

##### آمونیم

قبلاً بیان شد که در فرآیند سولفیداسیون کانی‌های اکسیدی مس، عامل سولفیداسیون مورد استفاده موجب جذب شدن کلکتور روی سطح کانی اکسیدی می‌شود. از مهم‌ترین عواملی که موجب می‌شود کلکتور روی سطح کانی پایدار بماند، می‌توان به غلظت عامل سولفیداسیون، pH، اغتشاش پالپ و زمان آماده‌سازی اشاره کرد. غلظت سولفید آمونیم که در بخش پیشین مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که در ۳۰۰ گرم بر تن سولفید آمونیم بیشترین مقدار بازیابی مس بدست می‌آید. در ادامه پارامترهای عملیاتی شامل pH، اغتشاش در پالپ (سرعت همزنی) و زمان آماده‌سازی برای بهینه‌سازی فرآیند سولفیداسیون، به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

#### ۴-۳-۷- تأثیر زمان آماده‌سازی

زمان آماده‌سازی از این نظر حائز اهمیت است که شکل‌گیری لایه سولفیدی روی سطح کانی اکسیدی وابسته به زمان است و باید یک زمان آماده‌سازی بهینه در نظر گرفته شود تا لایه سولفیدی روی کانی تشکیل شود. بهینه‌ترین زمان آماده‌سازی را این گونه می‌توان تعریف کرد که کمترین مدت زمانی که در آن لایه سولفیدی روی سطح کانی اکسیدی شکل می‌گیرد. در این تحقیق برای به دست آوردن بهینه‌ترین زمان آماده‌سازی سولفیداسیون، آزمایش‌ها در سه زمان ۲، ۳ و ۸ دقیقه انجام شد که نتایج در شکل ۴-۹ قابل مشاهده می‌باشد.

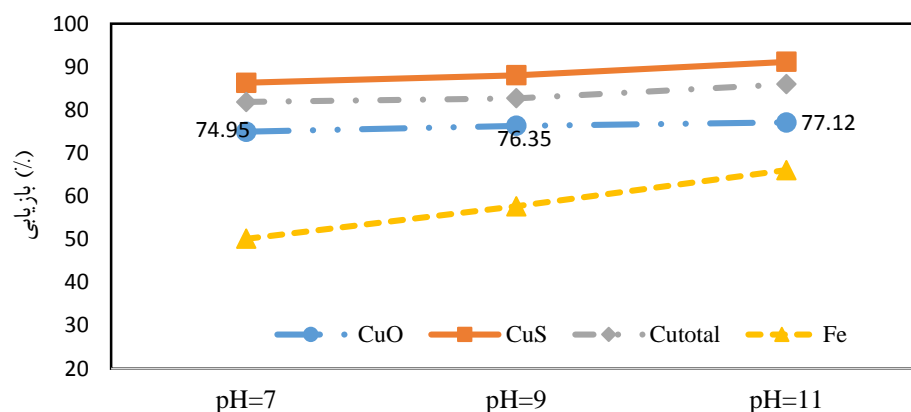


شکل ۴-۹- تأثیر زمان آماده‌سازی سولفیداسیون بر بازیابی مس اکسیدی

بازیابی مس اکسیدی در زمان‌های آماده‌سازی ۲ و ۳ دقیقه تغییر ناچیزی داشته اما با افزایش زمان آماده‌سازی تا ۸ دقیقه مقدار بازیابی مس اکسیدی و سولفیدی به مقدار قابل توجهی کاهش یافت. علت کاهش بازیابی را می‌توان این چنین عنوان کرد که با افزایش زمان آماده‌سازی سولفیداسیون، لایه سولفیدی تشکیل شده روی سطح کانی اکسیدی، در اثر تماس با اکسیژن، اکسید می‌شود و اتصال کلکتور با لایه سولفیدی موجود در سطح کانی کاهش می‌یابد و در نتیجه بازیابی کاهش می‌یابد [۲۸]. با توجه به نتایج، زمان آماده‌سازی ۲ دقیقه به‌عنوان زمان بهینه آماده‌سازی برای سولفیداسیون انتخاب شد به سبب آنکه در مدت‌زمان کوتاه‌تر، می‌توان به بازیابی مورد نظر دست یافت.

#### ۴-۳-۸- تأثیر pH

برای کانی‌های اکسیدی، pH در زمان آماده‌سازی سولفیداسیون بسیار مهم‌تر از pH در زمان فلوتاسیون می‌باشد. pH بر جذب سولفور روی سطح کانی اکسیدی تأثیر گذاشته و به تشکیل لایه آبران کمک می‌کند. در این تحقیق pH در زمان آماده‌سازی سولفیداسیون، در سه مقدار ۹، ۱۰ و ۱۱ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.



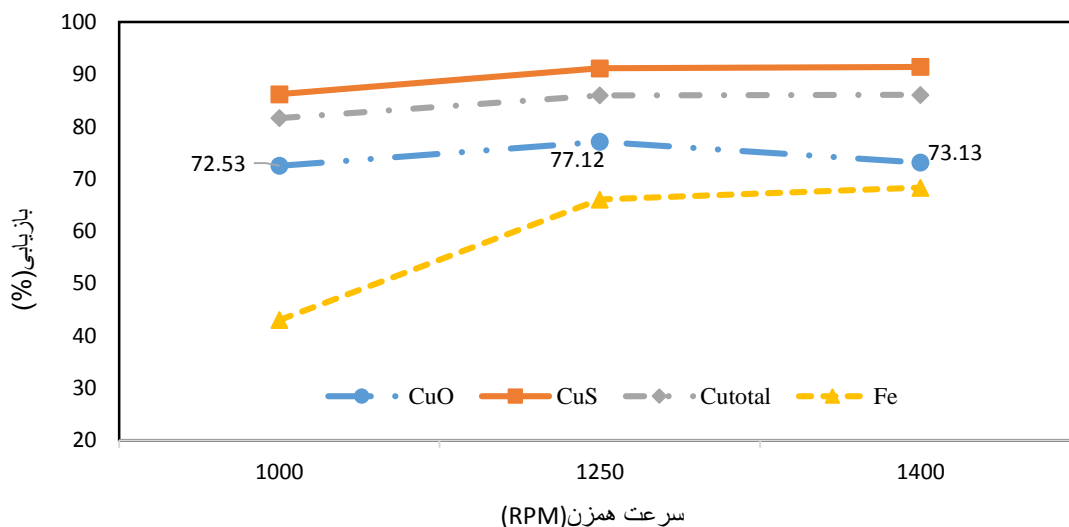
شکل ۴-۱۰- تأثیر pH در زمان آماده‌سازی سولفیداسیون بر بازیابی مس اکسیدی

همان‌طور که در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود، با کاهش pH، بازیابی مس اکسیدی و سولفیدی کاهش می‌یابد. بازیابی مس اکسیدی در pH های ۱۱، ۹ و ۷ به ترتیب ۷۷/۱۲، ۷۶/۳۵ و ۷۴/۹۵ به دست آمد؛ بنابراین مقدار بهینه pH، ۱۱ است.

#### ۴-۳-۹- تأثیر اغتشاش پالپ

اغتشاش پالپ ناشی از سرعت چرخش همزن در داخل سلول می‌باشد. برای بررسی چگونگی تأثیرگذاری اغتشاش پالپ بر بازیابی مس اکسیدی و سولفیدی، سرعت همزنی در زمان آماده‌سازی سولفیداسیون در سه سرعت ۱۰۰۰، ۱۲۵۰ و ۱۴۰۰ دور در دقیقه مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج در شکل ۴-۱۱ آورده شده است. افزایش سرعت همزنی در زمان آماده‌سازی سولفیداسیون از مقدار ۱۰۰۰ به ۱۲۵۰ دور در دقیقه موجب افزایش بازیابی مس اکسیدی می‌شود. اما با افزایش بیشتر تا ۱۴۰۰ دور در دقیقه میزان بازیابی مس اکسیدی کاهش می‌یابد. کاهش بازیابی در سرعت همزنی پایین‌تر از ۱۲۵۰ دور در دقیقه ممکن است به این دلیل باشد که ذرات انرژی کمی برای تعلیق و متصل شدن به مواد شیمیایی را دریافت می‌کنند. علاوه بر این، در سرعت‌های پایین همزنی احتمال برخورد عامل سولفیداسیون با کانی اکسیدی کاهش می‌یابد.

هرچند کاهش اغتشاش پالپ موجب بهبود در شکل‌گیری لایه آبران سولفیدی روی سطح کانی می‌شود، اما این شرایط در حالتی اتفاق می‌افتد که عیار مس اکسیدی بیشتر باشد و زمان و انرژی لازم برای متصل شدن با عامل سولفیداسیون را داشته باشد؛ اما کاهش بازیابی مس اکسیدی در سرعت همزنی بالا (بیش از ۱۲۵۰ دور در دقیقه) به دلیل اکسید شدن لایه سولفیدی و جدا شدن لایه از سطح کانی مس اکسیدی می‌باشد.



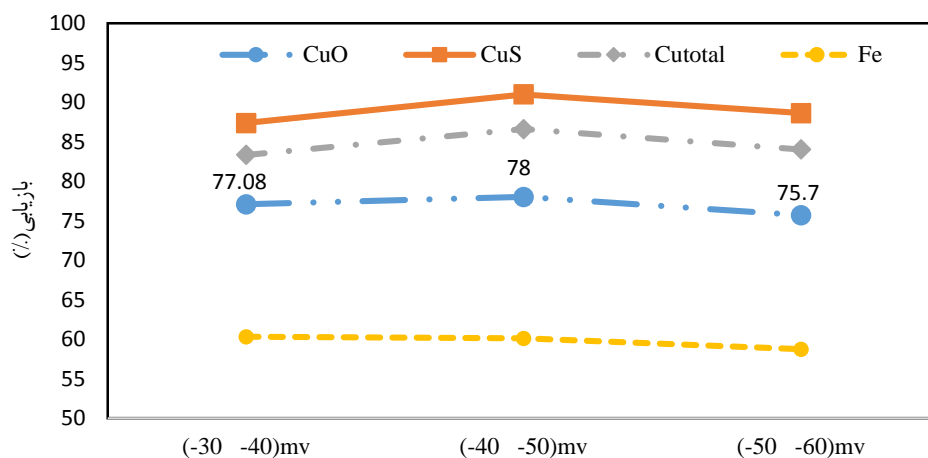
شکل ۴-۱۱- تأثیر سرعت همزن در زمان آماده‌سازی سولفیداسیون بر بازیابی مس اکسیدی

علاوه بر این در شکل ۴-۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت همزنی تا ۱۴۰۰ دور در دقیقه، بازیابی مس سولفیدی افزایش می‌یابد. علت افزایش بازیابی به دلیل افزایش آگلومره شدن ذرات ریز کانی‌های مس در سرعت بالای همزنی است. با توجه به جدول آنالیز دانه‌بندی بیش از ۵۰ درصد از ذرات، زیر ۳۸ میکرون قرار دارند و عیار کانی‌های مس در این محدوده بیشتر از سایر محدوده‌ها می‌باشد. با افزایش سرعت همزن، ذرات ریز انرژی بیشتری دریافت کرده و احتمال برخورد ذرات با یکدیگر افزایش یافته و به عبارتی آگلومره شده و در مرحله فلوتاسیون راحت‌تر به حباب هوا متصل می‌شوند و موجب افزایش بازیابی می‌شود.

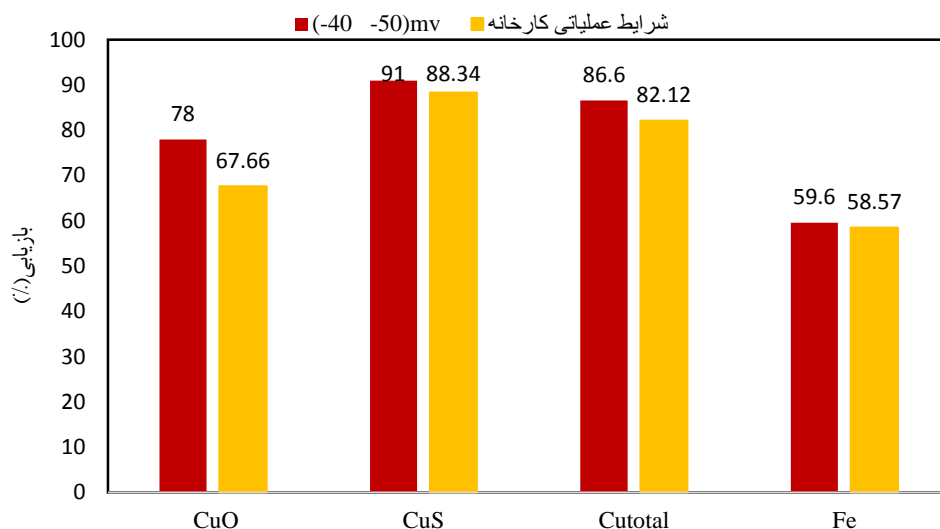
رفتار فلوتاسیون کانی‌های آهن در هر سه آزمایش تأثیر زمان آماده‌سازی، pH و اغتشاش پالپ شبیه به رفتار کانی‌های سولفیدی مس می‌باشد.

#### ۴-۳-۱۰- کنترل پتانسیل پالپ

روش CPS در سه محدوده (۳۰- تا ۴۰-)، (۴۰- تا ۵۰-) و (۵۰- تا ۶۰-) میلی ولت انجام شد که نتایج آن در شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ آورده شده است. بهترین نتیجه در محدوده پتانسیل ۴۰- تا ۵۰- به دست آمد به طوری که بازیابی مس اکسیدی با ۱۰/۳۴ درصد بهبود به ۷۸ درصد و بازیابی مس کل با ۴/۴۸ درصد به ۸۶/۶ درصد رسید. بازیابی آهن نیز در این روش به مقدار جزئی افزایش یافت. علت افزایش بازیابی مس اکسیدی در محدوده پتانسیل ۴۰- تا ۵۰- میلی ولت و  $\text{pH}=11$  به دلیل تولید گونه‌های آبران بیشتر است. مطابق شکل ۱-۹ در محدوده پتانسیل و pH ذکر شده گونه‌های  $\text{HS}^-$  و  $\text{S}^{2-}$  تولید شده و سپس به گوگرد عنصری تجزیه و موجب شکل‌گیری لایه آبران سولفیدی در سطح کانی اکسیدی شده و بازیابی آن را بالا می‌برد. مقایسه نتایج روش‌های CPS و حلزونی نشان می‌دهد در روش CPS با مصرف کمتر عامل سولفیداسیون می‌توان به نتایج بهتری نسبت به روش حلزونی دست یافت.



شکل ۴-۱۲- نتایج روش سولفیداسیون کنترل پتانسیل



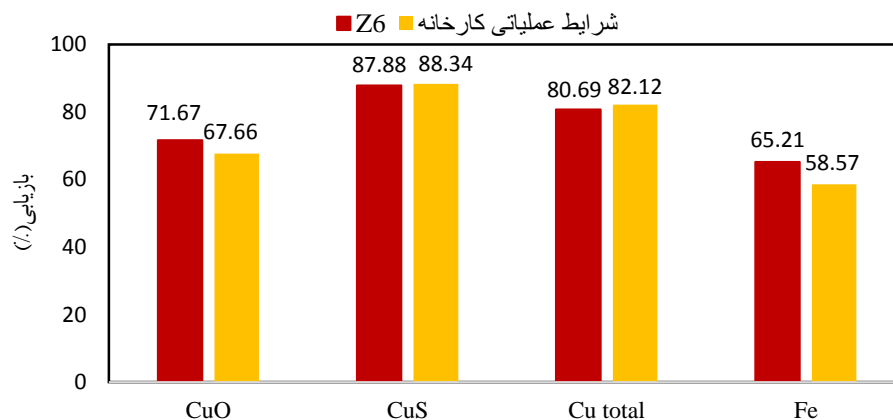
شکل ۴-۱۳- مقایسه نتایج روش CPS با شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ

#### ۴-۳-۱۱- تأثیر کلکتور پتاسیم آمیل گزنتات بر روی بازیابی مس اکسیدی

برای بررسی تأثیر کلکتور بر روی بازیابی مس اکسیدی و سولفیدی، مطابق جدول ۴-۹ در شرایط عملیاتی کارخانه‌ی تغلیظ ۱ به جای کلکتور Z11 از پتاسیم آمیل گزنتات استفاده شد. با توجه به شکل ۴-۱۴، استفاده از پتاسیم آمیل گزنتات، بازیابی مس اکسیدی را به مقدار ۴ درصد بهبود می‌بخشد. علت افزایش بازیابی مس اکسیدی را می‌توان به دلیل طولانی بودن زنجیر کربنی پتاسیم آمیل گزنتات نسبت به Z11 نسبت داد. در مورد مس سولفیدی، استفاده از پتاسیم آمیل گزنتات موجب کاهش ۰/۴۶ درصدی بازیابی می‌شود.

جدول ۴-۹- شرایط استفاده از پتاسیم آمیل گزنات برای بازیابی مس اکسیدی

C7240(g/t)	A70(g/t)	A65(g/t)	Z6(g/t)	pH	زمان (min)	
				۸	۵	آماده سازی اولیه
۴/۶۷			۵/۸۲	۱۱	۱:۳۰	آماده سازی
	۱/۸۶	۰/۸۱		۱۱	۱	آماده سازی
					۲:۴۰	کف گیری مرحله ۱
۴/۶۷	۱/۸۶	۰/۸۱	۵/۸۲	۱۱	۱	آماده سازی
					۲:۴۰	کف گیری مرحله ۲
۳/۸۹	۱/۵۵	۰/۶۸	۴/۸۵	۱۱	۱	آماده سازی
					۵:۲۰	کف گیری مرحله ۳
۲/۳۳	۰/۹۳	۰/۴۱	۲/۹۱	۱۱	۱	آماده سازی
					۵:۲۰	کف گیری مرحله ۴
۱۵/۵۸	۶/۲	۲/۷۳	۱۹/۴۲			مجموع (g/t)



شکل ۴-۱۴- تأثیر پتاسیم آمیل گزنات بر بازیابی مس اکسیدی و سولفیدی

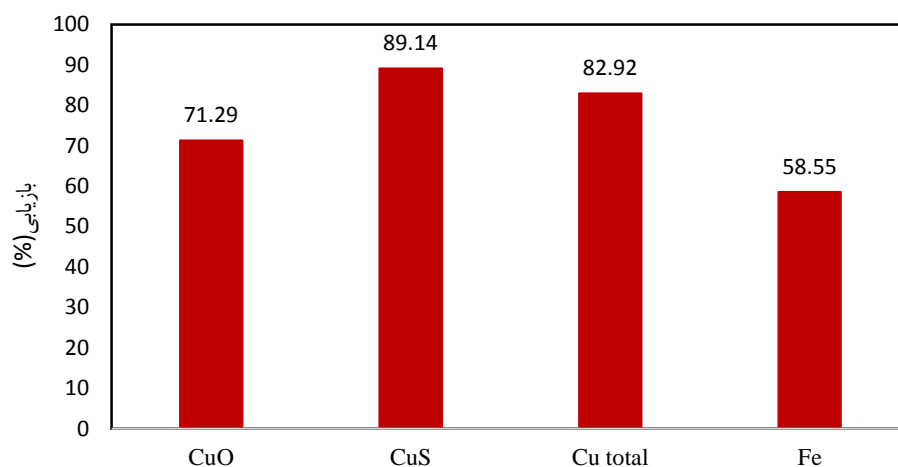
برای جلوگیری از افت بازیابی مس سولفیدی، مقدار مصرف کلکتور Z11 در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱ در نظر گرفته شد و هم زمان از پتاسیم آمیل گزنات در مقادیر مختلف و در مراحل مختلف استفاده شد. همان طور که در جدول ۴-۱۰ ملاحظه می شود، بهترین پاسخ زمانی به دست آمد که پتاسیم آمیل گزنات در مرحله سوم و چهارم به پالپ اضافه شد.



جدول ۴-۱۰- شرایط اضافه کردن پتاسیم آمیل گزنتات در مرحله سه و چهار

Z11(g/t)	C7240(g/t)	A70(g/t)	A65(g/t)	Z6(g/t)	pH	زمان (min)	
					۷/۸	۵	آماده سازی اولیه
۵/۸۲	۴/۶۷				۱۱	۱:۳۰	آماده سازی
		۱/۸۶	۰/۸۱		۱۱	۱	آماده سازی
						۲:۴۰	کف گیری مرحله ۱
۵/۸۲	۴/۶۷	۱/۸۶	۰/۸۱		۱۱	۱	آماده سازی
						۲:۴۰	کف گیری مرحله ۲
۴/۸۵	۳/۸۹	۱/۵۵	۰/۶۸	۲	۱۱	۱	آماده سازی
						۵:۲۰	کف گیری مرحله ۳
۲/۹۳	۲/۳۳	۰/۹۳	۰/۴۱	۱/۱۸	۱۱	۱	آماده سازی
						۵:۲۰	کف گیری مرحله ۴
۱۹/۴۲	۱۵/۵۸	۶/۲	۲/۷۳	۳/۱۸		۲۶/۵۰	مجموع

مطابق شکل ۴-۱۵، بازیابی مس اکسیدی و سولفیدی در شرایطی که پتاسیم آمیل گزنتات در مرحله سه و چهار همراه با Z11 به پالپ اضافه شد به ترتیب ۷۱/۲۹ و ۸۹/۱۴ درصد به دست می آمد که نسبت به شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱، مس اکسیدی ۳/۶۳ درصد و مس سولفیدی ۰/۸ درصد افزایش بازیابی داشتند. بازیابی مس کل نیز با ۰/۸ درصد بهبود به ۸۲/۹۲ درصد رسید.



شکل ۴-۱۵- نتایج استفاده از پتاسیم آمیل گزنتات در مرحله ۳ و ۴

دلیلی که باعث می‌شود پتاسیم آمیل گزنتات علاوه بر بهبود بازیابی مس اکسیدی، بازیابی مس سولفیدی را نیز افزایش دهد، این است که Z11 یک کلکتور زنجیر کوتاه است و پتاسیم آمیل گزنتات یک کلکتور زنجیر بلند می‌باشد. هر چه زنجیر هیدروکربنی کلکتور بلندتر باشد، غلظت کمتری از کلکتور برای رسوب نمک آن لازم است و همچنین طولانی بودن زنجیر هیدروکربنی رابطه مستقیمی با آبرانی سطح کانی داشته و موجب افزایش بازیابی می‌شود [۳۹]. استفاده از پتاسیم آمیل گزنتات روی بازیابی کانی‌های آهن تأثیر نمی‌گذارد و بازیابی این کانی‌ها ثابت می‌ماند.

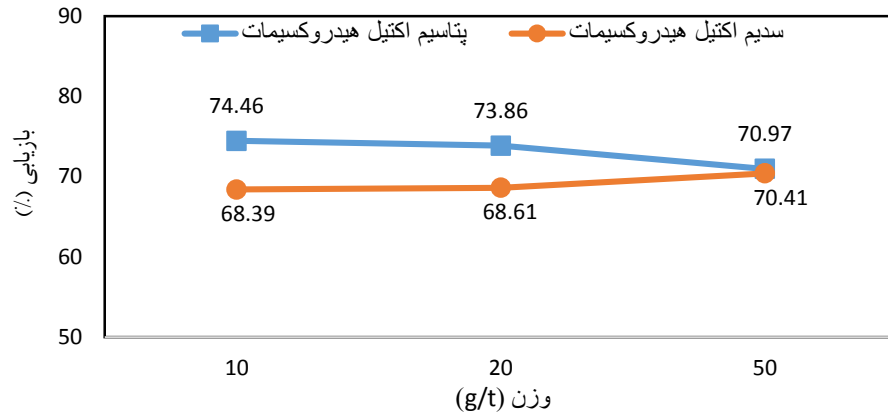
#### ۴-۴- اثر هیدروکسیمات‌ها بر روی بازیابی مس اکسیدی

در این سری از آزمایش‌ها مطابق جدول ۴-۱۱ از دو نوع کلکتور، شامل پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات (AM24) و سدیم اکتیل هیدروکسیمات (AM28) در سه مقدار ۱۰، ۲۰ و ۵۰ گرم بر تن استفاده شد. با توجه به این‌که هیدروکسیمات‌ها بیشتر برای کانی‌های اکسیدی مؤثر هستند، بر بازیابی کانی‌های سولفیدی تأثیر کمتری دارند، بنابراین برای جلوگیری از افت بازیابی مس سولفیدی، آزمایش‌ها در شرایط عملیاتی کارخانه‌ی تغلیظ ۱ انجام شد و هم‌زمان از کلکتور هیدروکسیمات استفاده شد. مطابق

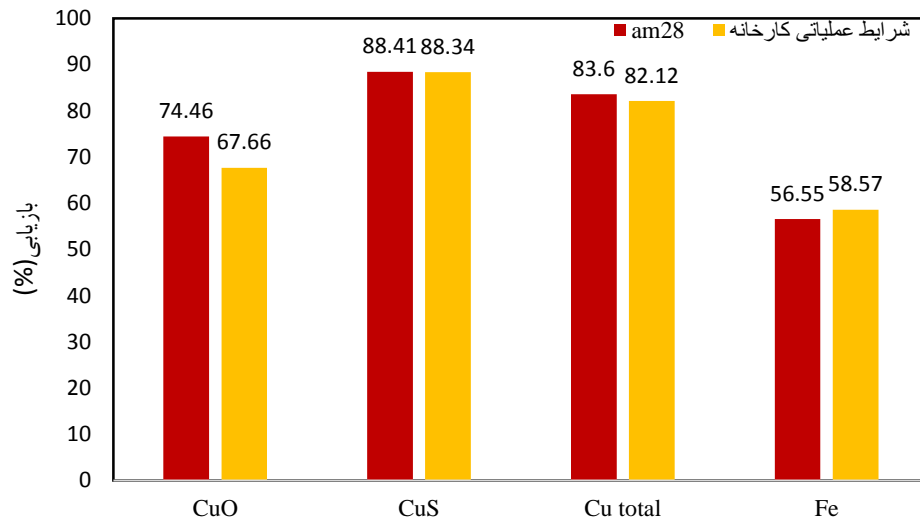
شکل ۴-۱۶ در بازیابی مس اکسیدی، هیدروکسیمات نوع پتاسیمی نتیجه بهتری نسبت به نوع سدیمی دارد، بنابراین در انجام آزمایش‌های بعدی از پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات استفاده شد. با مقایسه مقادیر به کار رفته پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات در آزمایش‌ها، بیشترین بازیابی برای کانی‌های اکسیدی مس، در مقدار ۱۰ گرم بر تن به دست آمد. نتایج بازیابی مس در شرایطی که از ۱۰ گرم بر تن پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات استفاده شد در شکل ۴-۱۷ قابل مشاهده می‌باشد. بازیابی مس اکسیدی با ۶/۸ درصد بهبود، به ۷۴/۴۶ رسید و بازیابی مس سولفیدی به صورت جزئی افزایش داشت. همچنین بازیابی مس کل با ۱/۴۸ درصد بهبود به ۸۳/۶ درصد رسید. بازیابی کانی‌های آهن در این حالت به مقدار ۲ درصد کاهش می‌یابد. در حالت کلی هیدروکسیمات‌ها در بازیابی مس اکسیدی انتخابیت بالایی دارند.

جدول ۴-۱۱- شرایط استفاده از هیدروکسیمات‌ها برای بهبود بازیابی مس اکسیدی

Z11(g/t)	C7240(g/t)	A70(g/t)	A65(g/t)	هیدروکسیمات (g/t)	pH	زمان (min)	
					۷/۸۰	۵	آماده‌سازی اولیه
۵/۸۲	۴/۶۷				۱۱	۱:۳۰	آماده‌سازی
		۱/۸۶	۰/۸۱	٪۳۰	۱۱	۱	آماده‌سازی
						۲:۴۰	کف‌گیری مرحله ۱
۵/۸۲	۴/۶۷	۱/۸۶	۰/۸۱	٪۳۰	۱۱	۱	آماده‌سازی
						۲:۴۰	کف‌گیری مرحله ۲
۴/۸۵	۳/۸۹	۱/۵۵	۰/۶۸	٪۲۵	۱۱	۱	آماده‌سازی
						۵:۲۰	کف‌گیری مرحله ۳
۲/۹۱	۲/۳۳	۰/۹۳	۰/۴۱	٪۱۵	۱۱	۱	آماده‌سازی
						۵:۲۰	کف‌گیری مرحله ۴
۱۹/۴۲	۱۵/۵۸	۶/۲	۲/۷۳	۱۰-۵۰		۲۶/۵۰	مجموع (g/t)



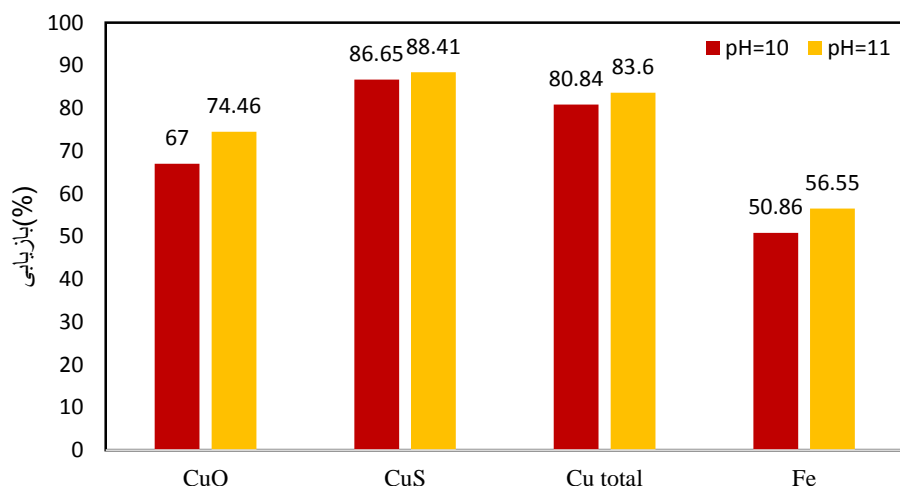
شکل ۴-۱۶- تأثیر پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات و سدیم اکتیل هیدروکسیمات روی بازیابی مس اکسیدی



شکل ۴-۱۷- تأثیر استفاده از ۱۰ گرم بر تن پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات بر بازیابی مس اکسیدی

#### ۴-۴-۱- اثر تغییر pH در حضور پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات بر روی بازیابی مس اکسیدی

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که بیشترین بازیابی مس اکسیدی در حضور هیدروکسیمات‌ها زمانی به دست می‌آید که فلوتاسیون در pH های محدوده‌ی ۸ تا ۱۰ انجام شود [۲۲]. از این رو، تأثیر pH در حضور پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات بر روی بازیابی مس اکسیدی در دو مقدار pH، ۱۰ و ۱۱ در حضور ۱۰ گرم بر تن هیدروکسیمات مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۴-۱۸ آورده شده است.

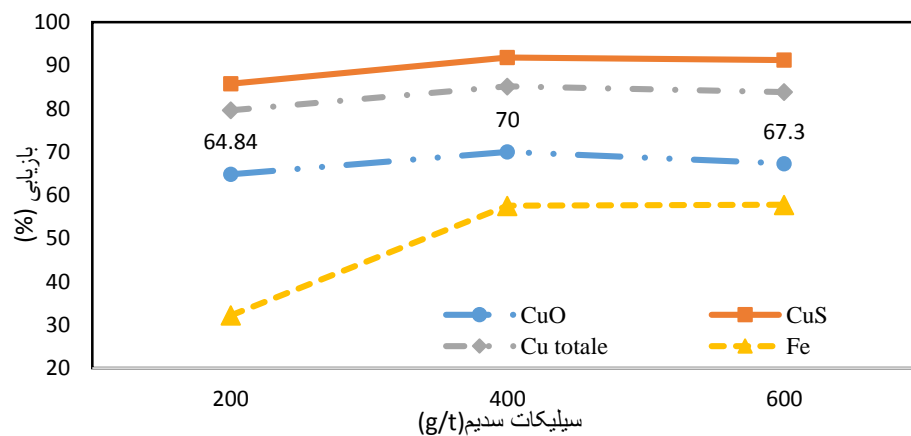


شکل ۴-۱۸- تأثیر pH بر بازیابی مس اکسیدی

کاهش pH تأثیر منفی روی بازیابی مس اکسیدی و مس سولفیدی دارد، به طوری که با کاهش pH از ۱۱ به ۱۰ بازیابی مس اکسیدی به اندازه ۷/۴۶ درصد و بازیابی مس سولفیدی به اندازه ۱/۷۶ درصد کاهش یافت. کاهش بازیابی مس اکسیدی، احتمالاً می‌تواند به دلیل عیار کم کانی‌های اکسیدی همچون وجود چندین نوع کانی اکسیدی مس در خوراک باشد.

#### ۴-۵- اثر سیلیکات سدیم بر روی بازیابی مس اکسیدی

مطابق جدول ۴-۱۲ از سیلیکات سدیم به عنوان متفرق کننده در سه مقدار ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ گرم بر تن استفاده شد که نتایج در شکل ۴-۱۹ قابل مشاهده می باشد. بهترین پاسخ در مقدار ۴۰۰ گرم بر تن به دست آمده است که در این مقدار هم بازیابی مس سولفیدی و هم بازیابی مس اکسیدی بهبود پیدا می کند. استفاده از ۴۰۰ گرم بر تن سیلیکات سدیم، بازیابی مس اکسیدی را ۲/۳۴ درصد و بازیابی مس سولفیدی را ۳/۵۱ درصد بهبود می بخشد و بازیابی مس کل از ۸۲/۱۲ درصد به ۸۵/۱۴ درصد می رسد. افزایش بازیابی کانی های مس در حضور سیلیکات سدیم به این دلیل است که سیلیکات سدیم در پالپ موجب افزایش بار روی سطح ذرات می شود و در نتیجه باعث تفرق نرمه های روی ذرات می شود و ذرات با ارزش مس به راحتی شناور می شوند [۲۷]. بازیابی کانی های آهن در این شرایط به مقدار ۱ درصد کاهش می یابد. کاهش بازیابی آهن یک مزیت در آزمایش ها محسوب می شود.



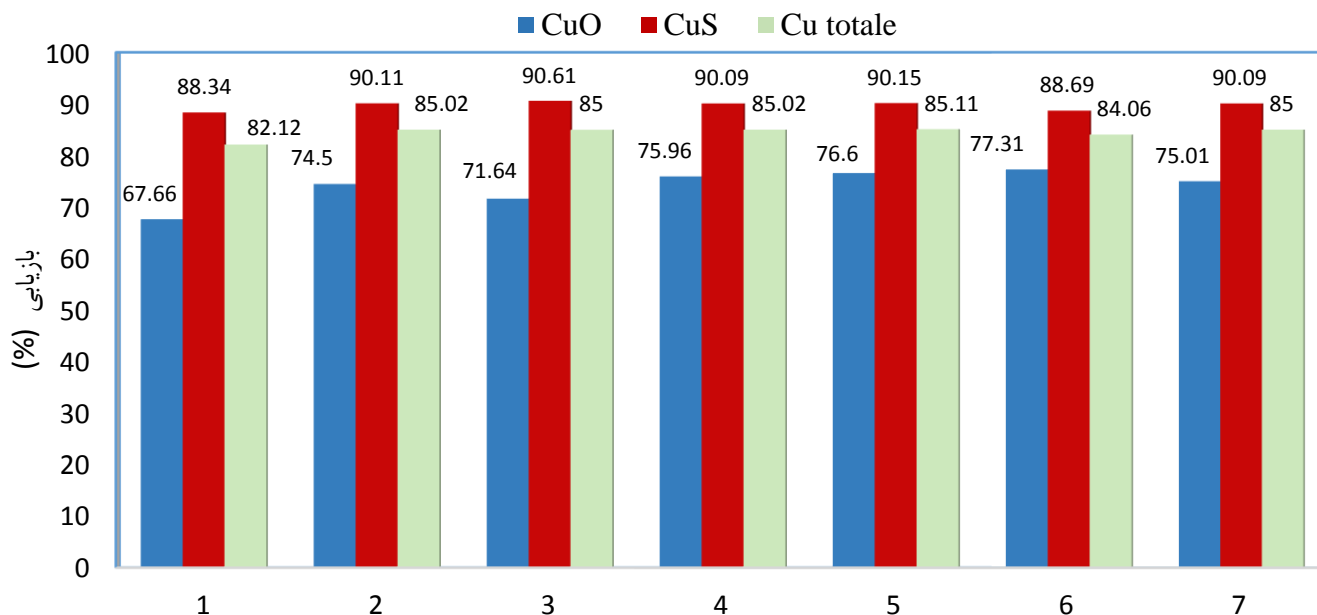
شکل ۴-۱۹- نتایج استفاده از سیلیکات سدیم به عنوان متفرق کننده

جدول ۴-۱۲- شرایط استفاده از سیلیکات سدیم در آزمایش‌ها

Z11(g/t)	C7240(g/t)	A70(g/t)	A65(g/t)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g/t)	pH	زمان (min)	
					۸	۵	آماده‌سازی اولیه
				۲۰۰			
				۴۰۰		۲	آماده‌سازی سیلیکات سدیم
				۶۰۰			
۵/۸۲	۴/۶۷				۱۱	۱:۳۰	آماده‌سازی
		۱/۸۶	۰/۸۱		۱۱	۱	آماده‌سازی
						۲:۴۰	کفگیری مرحله ۱
۵/۸۲	۴/۶۷	۱/۸۶	۰/۸۱		۱۱	۱	آماده‌سازی
						۲:۴۰	کفگیری مرحله ۲
۴/۸۵	۳/۸۹	۱/۵۵	۰/۶۸		۱۱	۱	آماده‌سازی
						۵:۲۰	کفگیری مرحله ۳
۲/۹۱	۲/۳۳	۰/۹۳	۰/۴۱		۱۱	۱	آماده‌سازی
						۵:۲۰	کفگیری مرحله ۴
۱۹/۴۲	۱۵/۵۸	۶/۲	۲/۷۳			۲۸/۵۰	مجموع (g/t)

#### ۴-۶- تأثیر استفاده هم‌زمان از مواد شیمیایی بر روی بازیابی مس اکسیدی

در این تحقیق برای بهبود بازیابی مس اکسیدی، از کلکتور و فعال‌کننده‌های مختلفی استفاده شد که نتایج هرکدام به‌طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی تأثیر استفاده هم‌زمان از کلکتور و فعال‌کننده‌ها بر روی بازیابی مس اکسیدی، آزمایش‌های مختلفی انجام شد که نتایج در شکل ۴-۲۰ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۴-۲۰- نتایج استفاده هم‌زمان از مواد شیمیایی در فلوتاسیون مس اکسیدی (۱- شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱، ۲- سیلیکات سدیم + پتاسیم آمیل گزنتات، ۳- سیلیکات سدیم + سولفید آمونیوم، ۴- سولفید آمونیوم + پتاسیم آمیل گزنتات، ۵- سیلیکات سدیم + پتاسیم آمیل گزنتات + سولفید آمونیوم، ۶- سولفید آمونیوم + پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات، ۷- سیلیکات سدیم + سولفید آمونیوم + پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات)

آزمایش شماره ۱ مربوط به شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱ مس سونگون می‌باشد که پارامترهای کنترل شده و مقادیر آنها در جدول ۴-۱۳ آورده شده است. در شرایط عملیاتی کارخانه بازیابی مس اکسیدی، مس سولفیدی و بازیابی مس کل به ترتیب ۶۶/۶۷، ۳۴/۸۸ و ۱۲/۸۲ می‌باشد.

جدول ۴-۱۳- مقادیر پارامترهای کنترل شده در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱

سرعت همزن (rpm)	A۶۵(g/t)	A۷۰(g/t)	C۷۲۴۰(g/t)	Z11(g/t)	درصد جامد(%)	pH
۱۲۵۰	۲/۷۳	۶/۲	۱۵/۵۸	۱۹/۴۲	۳۲/۵	۱۱



در آزمایش شماره ۲ از ترکیب سیلیکات سدیم (۴۰۰ گرم بر تن) و پتاسیم آمیل گزنات (۳/۱۸ گرم بر تن) استفاده شد که بازیابی مس اکسیدی، مس سولفیدی و مس کل به ترتیب ۷۴/۵، ۹۰/۱۱ و ۸۵/۰۲ درصد به دست آمد. در آزمایش شماره ۳ از ترکیب سیلیکات سدیم (۴۰۰ گرم بر تن) و سولفید آمونیوم (۳۰۰ گرم بر تن) استفاده شد. ترتیب اضافه کردن به پالپ به این صورت بود که در مرحله اول، ابتدا سیلیکات سدیم با زمان آماده‌سازی ۲ دقیقه اضافه شد و سپس سولفید آمونیوم با زمان آماده‌سازی ۲ دقیقه به پالپ اضافه شد. بازیابی مس اکسیدی، مس سولفیدی و مس کل به ترتیب ۷۱/۶۴، ۹۰/۶۱ و ۸۵ درصد به دست آمد. در آزمایش شماره ۴ از ترکیب سولفید آمونیوم (۳۰۰ گرم بر تن) و پتاسیم آمیل گزنات (۳/۱۸ گرم بر تن) استفاده شد. سولفید آمونیوم مطابق جدول ۴-۱۱ در مرحله اول اضافه شد و پتاسیم آمیل گزنات در مرحله سوم و چهارم به پالپ اضافه شد. بازیابی مس اکسیدی، مس سولفیدی و مس کل به ترتیب ۷۵/۹۶، ۹۰/۰۹ و ۸۵/۰۲ درصد به دست آمد. در آزمایش شماره ۵ از ترکیب سیلیکات سدیم (۴۰۰ گرم بر تن)، سولفید آمونیوم (۳۰۰ گرم بر تن) و پتاسیم آمیل گزنات (۳/۱۸ گرم بر تن) استفاده شد. ترتیب اضافه کردن این مواد به پالپ به این صورت بود که در مرحله اول ابتدا سیلیکات سدیم با زمان آماده‌سازی ۲ دقیقه سپس سولفید آمونیوم با زمان آماده‌سازی ۲ دقیقه به پالپ اضافه شد. پتاسیم آمیل گزنات نیز در مرحله سوم و چهارم به پالپ اضافه شد. بازیابی مس اکسیدی، مس سولفیدی و مس کل به ترتیب ۷۹/۶، ۹۰/۱۵ و ۸۵/۱۱ درصد به دست آمد. در آزمایش شماره ۶ از ترکیب پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات (۱۰ گرم بر تن) و سولفید آمونیوم (۳۰۰ گرم بر تن) استفاده شد. سولفید آمونیوم در مرحله اول با زمان آماده‌سازی ۲ دقیقه به پالپ اضافه شد و پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات مطابق جدول ۳-۳ به پالپ اضافه شد. بازیابی مس اکسیدی، مس سولفیدی و مس کل به ترتیب ۷۷/۳۱، ۸۸/۶۹ و ۸۴/۰۶ درصد به دست آمد. در آزمایش شماره ۷ از ترکیب سولفید آمونیوم (۳۰۰ گرم بر تن)، سیلیکات سدیم (۴۰۰ گرم بر تن) و پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات (۱۰ گرم بر تن) استفاده شد؛ که بازیابی مس اکسیدی، مس سولفیدی و مس کل به ترتیب

۷۵/۰۱، ۹۰/۰۹ و ۸۵ درصد به دست آمد؛ بنابراین با استفاده از آزمایش شماره ۵ که در آن از سیلیکات سدیم، پتاسیم آمیل گزنتات و سولفید آمونیوم استفاده شد، می‌توان به حداکثر بازیابی مس کل و اکسیدی در حالت استفاده ترکیبی از مواد شیمیایی دست یافت.

## فصل پنجم

### خلاصه و نتیجه گیری

## ۵-۱- خلاصه و نتیجه‌گیری

کارایی پایین مواد شیمیایی مورد استفاده در کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سونگون موجب می‌شود بخش قابل توجهی از مس اکسیدی به بخش باطله انتقال یابد. با توجه به اهمیت موضوع از نظر اقتصادی این تحقیق به مطالعه علل هدرروی و ارائه راهکارهایی برای بهبود بازیابی کانی‌های اکسیدی مس پرداخته شد. برای رسیدن به شرایط بهینه بازیابی مس اکسیدی بررسی آنالیز دانه‌بندی، آنالیز شیمیایی، مطالعات کانی‌شناسی، انجام آزمایش‌های فلوتاسیون در حالت‌های مختلف و بررسی روش‌های جدید در بازیابی مس اکسیدی در مرحله رافر صورت گرفت. در این فصل، نتیجه‌گیری بررسی‌های انجام شده در فصل چهارم، به همراه پیشنهادهایی برای کارهای آینده ارائه شده است.

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که:

- ۱- با توجه به اینکه مدار کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سونگون و مواد شیمیایی مورد استفاده در آن برای مس سولفیدی طراحی شده است، فلوتاسیون هم‌زمان مس اکسیدی و سولفیدی با افت بازیابی مس اکسیدی همراه است و بخش قابل توجهی از مس اکسیدی به قسمت باطله منتقل می‌شود. بیشترین هدر روی مس اکسیدی به دلیل حجم بالای باطله تولید شده در مرحله رافر اتفاق می‌افتد.
- ۲- در روش سولفیداسیون حلزونی، از بین عوامل سولفیداسیون مورد استفاده، سولفید آمونیوم به دلیل تولید گونه‌های آبران بیشتر در پالپ، پاسخ بهتری در بازیابی مس اکسیدی نشان داد. مناسب‌ترین محل برای اضافه کردن سولفید آمونیوم مرحله اول یعنی قبل از رافر شماره یک است در این حالت با افزودن ۳۰۰ گرم بر تن سولفید آمونیوم بازیابی مس اکسیدی به مقدار ۹/۴۶ درصد بهبود می‌بخشد. به دلیل خاصیت متفرق‌کنندگی سولفید آمونیوم برای کانی‌های بورنیت و کوولیت و همچنین خاصیت فعال‌کنندگی آن بازیابی مس سولفیدی نیز در مرحله ۱ به مقدار ۲/۸۸ درصد

بهبود می‌یابد. شرایط بهینه در مرحله آماده‌سازی سولفید آمونیوم در  $\text{pH}=11$ ، سرعت همزنی  $1250$  دور در دقیقه و زمان آماده‌سازی  $2$  دقیقه به دست آمد.

۳- استفاده از Z6 در مرحله ۳ و ۴ که به ترتیب معادل رافر ۵ و ۹ است موجب شد بازیابی مس اکسیدی به مقدار  $3/63$  درصد بهبود یابد. علت افزایش بازیابی مس اکسیدی در این حالت به دلیل طولانی بودن زنجیر کربنی Z6 است.

۴- به کارگیری هیدروکسیمات‌ها به عنوان کلکتور، بدون اینکه تأثیر منفی روی بازیابی مس سولفیدی داشته باشد، موجب بهبود بازیابی مس اکسیدی می‌شود. از بین هیدروکسیمات، پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات نسبت به سدیم اکتیل هیدروکسیمات پاسخ خوبی در بازیابی مس اکسیدی داشته به طوری که استفاده از  $10$  گرم بر تن از آن بازیابی مس اکسیدی به مقدار  $6/8$  بهبود بخشید.

۵- از سیلیکات سدیم به عنوان متفرق کننده نرمه‌ها در این تحقیق استفاده شد که به کارگیری  $400$  گرم بر تن سیلیکات سدیم هم بازیابی مس اکسیدی و هم مس سولفیدی را بهبود بخشید. در این حالت بازیابی کانی‌های آهن که به عنوان کانی‌های باطله شناخته می‌شود کاهش پیدا می‌کند.

۶- به منظور بررسی تأثیر استفاده هم‌زمان از مواد شیمیایی بر روی بازیابی مس اکسیدی، این مواد در ترکیب‌های مختلفی در آزمایش‌ها استفاده شد. بهترین پاسخ در حالت استفاده هم‌زمان از مواد شیمیایی، زمانی به دست آمد که از ترکیب سولفید آمونیوم ( $300$  گرم بر تن) و پتاسیم اکتیل هیدروکسیمات ( $10$  گرم بر تن) در شرایط عملیاتی کارخانه تغلیظ ۱ استفاده شد که در این حالت بازیابی مس اکسیدی با  $9/65$  درصد بهبود به  $77/31$  درصد رسید.

۷- در این تحقیق بیشترین بازیابی مس اکسیدی با استفاده از روش کنترل پتانسیل پالپ به دست آمد. در این حالت بازیابی مس اکسیدی با  $10/34$  درصد بهبود به  $78$  درصد و بازیابی مس کل با

۴/۴۸ درصد بهبود به ۸۶/۶ درصد رسید. مقدار مصرف عامل سولفیداسیون در این روش نسبت به روش حلزونی کمتر است.

## ۵-۲- پیشنهادهای

مطالعات زیر جهت بهبود شرایط تولید پیشنهاد می‌شود:

- ۱- مطالعه روی مکانیسم سولفیداسیون کانی‌های اکسیدی مس می‌تواند یک بینش کامل از رفتار فلوتاسیون انواع کانی‌های اکسیدی بدهد.
- ۲- بررسی و مطالعه فلوتاسیون مس اکسیدی با استفاده از کلکتورهای اسید چرب و آمین‌ها
- ۳- بررسی و مطالعه فرآیند سولفیداسیون در مرحله رمق‌گیر کارخانه تغلیظ
- ۴- بررسی اثر گاز نیتروژن در فرآیند سولفیداسیون روی بازیابی مس اکسیدی

## منابع

- ۱- باقریان، ا. " فرآیند پرعیارسازی مس در کارخانه تغلیظ مس سونگون " گزارش طرح مس سونگون، امور کارخانه، ۱۳۸۵.
- ۲- گزارش زمین‌شناسی شرکت پارس اولنگ، ۱۳۸۴.
- ۳- اولیازاده، م و همکاران. " بررسی پارامترهای مؤثر در فروشویی توده‌ای کانسنگ اکسیدی مس سونگون." نشریه دانشکده فنی، ۱۳۸۳.
- 4- Salazar Martínez, Arturo. "Rougher flotation optimization using response surface methodology".(2015).
- 5- Biswas, Anil Kumar, and William George Davenport. Extractive Metallurgy of Copper: International Series on Materials Science and Technology. Vol. 20. Elsevier, 2013.
- ۶- بولاتویچ، س.[۲۰۰۷]. راهنمای واکنش‌گرهای فلوتاسیون. ترجمه کلینی، م. ۱۳۹۲. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- 7- Jacobs, Tamzon Talisa. Process mineralogical characterisation of the Kansanshi copper ore, nw zambia. diss. university of cape town, 2016.
- ۸- رضایی، ب. "فلوتاسیون". دانشگاه هرمزگان، ۱۳۸۵.
- ۹- نعمت الهی، ح. " کانه‌آرایی". دانشگاه تهران، ۱۳۷۱.
- 10- Numprasanthai, A. " an inevestigation of chrysocolla flotation using n-octanohydroxamate collector". Phd diss. , griffith university, 2013.
- 11- Miller, J. D. et al. "Flotation chemistry and technology of nonsulfide minerals." Froth Flotation: A Century of Innovation,(MC Fuerstenau, G. Jameson, and RH Yoon, Eds.), New York: SME (2007): 465-466.

- 12- Raghavan, S. and D. W. Fuerstenau. "Characterization and pore structure analysis of a copper ore containing chrysocolla." *International Journal of Mineral Processing* 4.4 (1977): 381-394.
- 13- Wen, Ya, et al. "Flotation of a refractory copper oxide ore using ammonium bicarbonate as activator." *Advanced Materials Research*. Vol. 581. Trans Tech Publications, 2012.
- 14- Chen, Dai-xiong, et al. "Copper Oxide Flotation using Collector Mixture of Benzohydroxamic Acid and Butylxanthate: Fundamentals to Application." (2011).
- 15- Fuerstenau, D. W. "Zeta potentials in the flotation of oxide and silicate minerals." *Advances in Colloid and Interface Science* 114 (2005): 9-26.
- ۱۶- طاهری، ب. "فلوتاسیون با کنترل پتانسیل کانی‌های سولفیدی مس با استفاده از واکنش‌گرهای گوگرددار" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ۱۳۹۲.
- 17- Clark, D. W. et al. "Improving flotation recovery of copper sulphides by nitrogen gas and sulphidisation conditioning." *Minerals Engineering* 13.12 (2000): 1197-1206.
- 18- Lee, J. S. D. R. Nagaraj, and J. E. Coe. "Practical aspects of oxide copper recovery with alkyl hydroxamates." *Minerals Engineering* 11.10 (1998): 929-939.
- 19- Wills, Barry A., and Tim Napier-Munn. *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Butterworth-Heinemann, 2015.
- 20- Phetla, Tebogo P., and Edison Muzenda. "A multistage sulphidisation flotation procedure for a low grade malachite copper ore." *World Academy of Science, Engineering and Technology* 70 (2010): 255-261.
- 21- Rao, S. R., and J. A. Finch. "Base metal oxide flotation using long chain xanthates." *International Journal of Mineral Processing* 69.1 (2003): 251-258.



- 22- Fuerstenau, D. W., R. Herrera-Urbina, and D. W. McGlashan. "Studies on the applicability of chelating agents as universal collectors for copper minerals." *International journal of mineral processing* 58.1 (2000): 15-33.
- 23- Parker, Gretel K., et al. "The interaction of the flotation reagent, n-octanohydroxamate, with sulfide minerals." *Minerals Engineering* 36 (2012): 81-90.
- 24- Chowdhury, Ratan, and Frank Antolasic. "Structural analysis of hydroxamate reagents by X-ray diffraction." *Journal of Earth Science and Engineering* 2.10 (2012): 584.
- 25- Lee, K., et al. "Flotation of mixed copper oxide and sulphide minerals with xanthate and hydroxamate collectors." *Minerals Engineering* 22.4 (2009): 395-401.
- 26- Zhou, R., and S. Chander. "Kinetics of sulfidization of malachite in hydrosulfide and tetrasulfide solutions." *International journal of mineral processing* 37.3-4 (1993): 257-272.
- ۲۷- بنیسی ص. "مسائل کاربردی فرآوری مواد معدنی." دانشگاه هرمزگان، ۱۳۸۸.
- 28- Kalichini, Monica Shamvuse. A study of the flotation characteristics of a complex copper ore. Diss. University of Cape Town, (2015).
- 29- Danilova, E. V., L. A. Otrozhdenova, and I. V. Mikheeva. "Flotation of oxidized copper minerals by hydroxamic acids." *Obogashchenie Rud* 20 (1975): 5-8.
- 30- Jones, M.H. and Woodcock, J.T. Optimization and control of laboratory sulphidization of oxidized copper ores with an ion selective electrode. *Proceedings of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, (1978).
- 31- Raghavan, Srini, E. Adamec, and L. Lee. "Sulfidization and flotation of chrysocolla and brochantite." *International Journal of Mineral Processing* 12.1-3 (1984): 173-191.

32- Hanson, James S., and Douglas W. Fuerstenau. "The electrochemical and flotation behavior of chalcocite and mixed oxide/sulfide ores." *International journal of mineral processing* 33.1-4 (1991): 33-47.

۳۳- کارگر، ع. "شناسایی عوامل مؤثر در کاهش درصد مس در باطله تغلیظ مس سرچشمه و بازیابی این عنصر از باطله" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۷۴.

34- Kongolo, K., et al. "Improving the efficiency of oxide copper-cobalt ores flotation by combination of sulphidisers." *Minerals engineering* 16.10 (2003): 1023-1026.

۳۵- عطرفی آ و همکاران. "مطالعه و بررسی پرعیارسازی کانسنگ سولفیدی-اکسیدی سرب کم‌عیار به روش‌های فلوتاسیون و ثقلی." ۳۹-۴۹، ۱۳۸۸.

36- Phetla, T. P., & Muzenda, E. A Multistage Sulphidisation Flotation Procedure for a Low Grade Malachite Copper Ore. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Materials Science and Engineering*, (2010).

37- Ou, L.-m., & Yin, B.-y. A Flotation Technique for a Sulfide-Oxidized Cu-Co Mixed Ore. *Advanced Materials Research*, (2012).

38- Hope, Gregory Alan, et al. "Bench-scale flotation of chrysocolla with n-octanohydroxamate." *Minerals Engineering* 36 (2012): 12-20.

39- Xiong, F., Li, Y., Zhang, Z., & Lan, Y. Flotation Response of the Refractory Yangla Copper Oxide Ores with Hydroxamate Collectors. *Advanced Materials Research*, (2013) 131-136.

40- Ge, B., Fu, Y., & Li, Q. A Copper Oxide Ore Treatment by Flotation. *Advanced Materials Research*. (2013) 230-233.

41- kiraz, emirhan. recovery of copper from oxide copper ore by flotation and leaching. diss. middle east technical university, 2014.

- 42- Paquot, F. X., and C. Ngulube. "Development and optimization of mixed sulphide/oxide copper ore treatment at Kansanshi." *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 115.12 (2015): 1253-1258.
- 43- Corin, K. C., et al. "The recovery of oxide copper minerals from a complex copper ore by sulphidisation." *Minerals Engineering* 102 (2017): 15-17.
- 44- Marion, Christopher, et al. "An evaluation of hydroxamate collectors for malachite flotation." *Separation and Purification Technology* 183 (2017): 258-269.

## Abstract

The input feed of the copper concentration unit of Sungun concentrator plant is composed of a combination of oxide and sulfide copper, as about 5-25% of the total produced copper is composed of the oxide phase. Due to their nature, floatation behavior of oxide copper mineralogy differs from their sulfide phases, as in such conditions recovery of oxide copper is low. The most important goal of this study is to determine the behavior of oxide copper in the flotation circuit of the copper concentration unit 1 in the Sungun copper concentrator plant and provide the solutions for modification of oxide copper mineralogy recovery together with stabilization or recovery of sulfide copper. In the first phase, the effective factors on the recovery of oxide copper in the rougher and scavenger stages of the concentration unit 1 have been investigated. To do this, some samples have been taken from different points of rougher and scavenger circuit, as well as feed, waste and final concentrates. In the second phase, in order to provide solutions for recovery of oxide copper, different parameters including the type and amount of sulfidation factors, type and amount of collector, dispersed, preparation time, pH, stirring rate and Eh have been also studied. The results revealed that the recovery of oxide copper both in rougher and scavenger circuits was low, due to the low efficiency of the collector and foam makers for floatation of oxide copper mineralogy. Two methods including Sulphidisation and application of anionic collectors have been used then for recovery of oxide copper mineralogy. In the slug sulphidisation approach taken in a spiral manner, application of  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  as 300g/t in the first step and for the preparation time of 2minutes, pH=11 and stirring rate of 1250RPM, recovery of oxide copper was improved as about 9.46% and reached to 77.12%. In this case, recovery of sulfide copper was also improved significantly. Results of application of anionic collectors showed that among the hydroximates, using 10g/t of Potassium Octylhydroximates, without any negative effect on the recovery of sulfide copper, improved the recovery of oxide copper as 74.47%. Simultaneous application of Z11 and Z6, due to the long carbon chain of Z6 caused that recovery of oxide copper improves as 3.63% and reaches to 71.29%. Application of 400g/t of sodium silicate as a disperser improved the recovery of sulfide copper 3.51% and also modified the value for oxide copper as 2.34%.  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ , Z6, Potassium octylhydroximates and sodium silicate were also used in different combinations, as the best result was obtained to be for recovery of oxide copper in the presence of 400g/t of  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  and 10g per ton of Potassium octylhydroximates, as the value of recovery for oxide copper was 77.31%. The highest oxide copper recovery was obtained by using CPS method. In this case oxide copper recovery 10.34% increased.

Keywords: Sungun Copper Complex, Floatation, Copper oxide mineralogy, Sulphidization, Hydroximate



**Shahrood University of Technology**

**School of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering**

**MSc Thesis in Mineral Engineering of mineral processing**

**Investigation on the effect of copper oxide minerals on flotation  
circuit recovery of the sungun copper complex  
concentration plant and introducing solutions to increase  
recovery**

By: Ahad Zare Varzeghan

Supervisor:

Dr. Mohammad. Karamoozian

Dr. Asghar. Azizi

July 2017