

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

بهینه‌سازی عیار و بازیابی مولیبدن در مدار فلوتاسیون مس - مولیبدن

مطالعه موردی: مجتمع مس سونگون

دانشجو:

حسین صبوری اینجار

اساتید راهنما:

دکتر محمد کارآموزیان

دکتر سید ضیاءالدین شفائی تنکابنی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی

خرداد ۱۳۹۳



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسین صبوری اینچار رشته مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی

تحت عنوان بهینه‌سازی عیار و بازیابی مولیبدن در مدار فلوتاسیون مس - مولیبدن

مطالعه موردی: مجتمع مس سونگون

که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۳/۰۹ ..... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

<input type="checkbox"/> قبول (با درجه : عالی - امتیاز ۱۹)	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
--	------------------------------------	--------------------------------

۲- بسیار خوب ( ۱۸ - ۱۸/۹۹ )

۱- عالی ( ۱۹ - ۲۰ )

۴- قابل قبول ( ۱۴ - ۱۵/۹۹ )

۳- خوب ( ۱۶ - ۱۷/۹۹ )

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار استاد	دکتر محمد کارآموزیان دکتر سید ضیال‌الدین شفائی تنکابنی	۱- استاد راهنما
			۲- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر فرهنگ سرشکی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	دکتر فرهنگ سرشکی	۴- استاد ممتحن
	استادیار	دکتر اصغر عزیزی	۵- استاد ممتحن

تأیید رئیس دانشکده :

تقدیم به آنان که وجودم جز هدیه وجودشان نیست

پدر بزرگ و مادر بزرگ عزیزم

تقدیم به او که آموخت مرا تا بیاموزم

استاد گرامی جناب آقای محمد کارآموزیان

تقدیم به دوست مهربانم که مسیح وار با صبرش در تمامی لحظات رفیق راه است

جناب آقای حسین حسین پور

تشکر و قدردانی

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 محمدکارآموزیان و دکتر سید ضیاءالدین شفائی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی-شان، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛ از جناب آقای مهندس اصغر باقریان رئیس محترم تغلیظ مجتمع مس سونگون، که زحمت مشاوره را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید؛ و از تمامی مهندسان و پرسنل زحمت‌کش واحد متالورژی مجتمع مس سونگون و مجتمع مس سرچشمه؛ و از کارشناس دلسوز آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشگاه شاهرود؛ جناب آقای مهندس مصطفی نادری که در انجام آزمایش‌ها همواره راهنمای بنده بودند؛ و از اساتید محترم داور، جناب آقایان دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر اصغر عزیزی که زحمت داوری پایان نامه را بر عهده داشتند؛ و در انتها از تمام دوستانی که در انجام این پروژه مرا تشویق کردند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب حسین صبوری اینجار دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه بهینه سازی عیار و بازیابی مولیبدن در مدار فلوتاسیون مس – مولیبدن (مطالعه موردی: مجتمع مس سونگون) تحت راهنمایی دکتر محمدکارآموزیان و دکتر سید ضیاءالدین شفائی تنکابنی متعهد می شوم.

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 فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارایه نشده است .

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .

حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد. در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی 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 .

## تاریخ:

## امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه 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

مولیبدنیت یک محصول جنبی با ارزش در فرآیند فلوتاسیون مس پورفیری است که بازیابی آن به دلیل ارزش بالای اقتصادی مورد توجه کارخانه‌های فرآوری مس می‌باشد. مهم‌ترین اهداف این تحقیق شناسایی علت کم بودن بازیابی در مدار فلوتاسیون مس - مولیبدن و همچنین ارائه راهکارهایی جهت افزایش عیار و بازیابی مولیبدن به همراه ثابت نگه داشتن عیار و بازیابی مس است. در این تحقیق عوامل و فرآیندهای مؤثر به منظور بهینه‌سازی عیار و بازیابی مولیبدن در مراحل رافر، شستشو و رمق‌گیر کارخانه فرآوری مس سونگون مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور نمونه‌هایی از کل مدار گرفته شد تا به بررسی کانی‌شناسی و متالورژیکی مدار پرداخته شود. سپس در مطالعات آزمایشگاهی تأثیر عواملی نظیر کانی‌شناسی، میزان خردایش، درصد جامد، مقدار مواد شیمیایی، pH فرآیند در مرحله رافر و همچنین دبی آب شستشو، دبی هوا و ارتفاع کف در مرحله شستشو و نوع فرآیند فلوتاسیون در مرحله رمق‌گیر بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین هدرروی مولیبدن در باطله رافر به میزان ۳/۴۴٪ اتفاق می‌افتد. پارامترهای عملیاتی برای بهینه‌سازی عیار و بازیابی مولیبدن در این مرحله به صورت ابعاد خوراک (۹۵- میکرون)، درصد جامد (۲۵)، مقدار گازوئیل (۲۵ گرم بر تن)، pH (۱۰/۵)، مقدار کلکتورها (۳۱ گرم بر تن)، مقدار کف‌سازها (۱۲ گرم بر تن) تعیین شدند. در شرایط بهینه، عیار و بازیابی مس به ترتیب ۸/۲٪ و ۹۰/۸٪ و همچنین برای مولیبدن به ترتیب ۸۹۰ ppm و ۷۱/۲٪ بدست آمدند که نسبت به نتایج فعلی کارخانه ۴٪ افزایش برای بازیابی مولیبدن و ۱۸٪ افزایش برای عیار حاصل شد. بهینه‌سازی کلیرها نشان دادند که به طور کلی با افزایش دبی آب و دبی هوا عیار مولیبدن کاهش، و هم‌چنین با افزایش دبی آب و ارتفاع کف عیار مس افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی مرحله رمق‌گیر نیز نشان داد که با افزایش دور همزن سلول‌ها (از ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه)، عیار مولیبدن در کنسانتره به مقدار ۸۸۲۳ ppm و بازیابی ۹۰٪ حاصل شد که این مقدار افزایش عیار نسبت به شرایط فعلی کارخانه ۳۲٪ بهبود را در پی داشت. راهکار دیگری که در این تحقیق به منظور جلوگیری از هدرروی مولیبدن به باطله بررسی شد، بازداشت مولیبدن در مرحله رمق‌گیر با اضافه کردن دکسترین است. در این حالت مقدار عیار مولیبدن در باطله رمق‌گیر با مقدار ۶۰۰ گرم بر تن دکسترین، از ۲۳۴ ppm به ۱۴۷۱ ppm افزایش پیدا کرد. سپس با انجام یک مرحله فلوتاسیون مولیبدن بر روی باطله رمق‌گیر، مولیبدن با عیار ۶۹۰۶ ppm بدست آمد. از ترکیب کنسانتره تولید شده در این مرحله با کنسانتره نهایی کارخانه فرآوری، از هدرروی مولیبدن جلوگیری شده و مولیبدن محصول نهایی حدود ۲/۳ برابر نسبت به شرایط فعلی کارخانه افزایش یافت.

**کلمات کلیدی:** فلوتاسیون - بهینه‌سازی - مس - مولیبدن - سونگون

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1- Sabouri, H.; Karamoozian, M.; shafaei, S.Z.; "optimization of molybdenite recovery in copper/molybdenum flotation circuit using statistical techniques" International Journal of Mining and Geo-Engineering (IJMGE), 1393.

۲- صبوری، حسین؛ کارآموزیان، محمد؛ شفائی، ضیالالدین. "بررسی فرآیند فلوتاسیون مس - مولیبدن کارخانه سونگون به منظور بهبود عیار و بازیابی مولیبدن در مرحله رافر." مجله علمی - پژوهشی مهندسی معدن ۱۳۹۳.

۳- صبوری، حسین؛ کارآموزیان، محمد؛ شفائی، ضیالالدین؛ باقریان، اصغر؛ نادری، مصطفی. "بهینه-سازی عوامل مؤثر بر بازیابی فلوتاسیون مس - مولیبدن مرحله رافر در مقیاس آزمایشگاهی (مطالعه موردی: مجتمع مس سونگون)" اولین کنفرانس بین المللی مهندسی معدن، فرآوری مواد معدنی، متالورژی و محیط زیست، دانشگاه زنجان، ۱۳۹۲.



## فهرست مطالب

۱	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ معرفی مجتمع مس سونگون.....
۶	۳-۱ ضرورت تحقیق.....
۷	۴-۱ اهداف تحقیق.....
۸	۵-۱ سازماندهی فصل‌ها.....
۹	فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته
۱۰	۱-۲ مقدمه.....
۱۱	۲-۲ مروری بر تحقیقات انجام گرفته.....
۲۸	فصل سوم: مواد و روش تحقیق
۲۹	۱-۳ مقدمه.....
۲۹	۲-۳ نمونه برداری.....
۳۰	۱-۲-۳ نمونه برداری برای ارزیابی متالورژیکی کل مدار.....
۳۱	۲-۲-۳ نمونه برداری برای بررسی سلول‌های فلوتاسیون رافر.....
۳۲	۳-۲-۳ نمونه برداری برای بررسی سلول‌های فلوتاسیون شستشو.....
۳۳	۴-۲-۳ نمونه برداری برای بررسی سلول‌های فلوتاسیون رمق گیر.....
۳۳	۳-۳ موازنه داده‌ها.....
۳۴	۴-۳ مواد شیمیایی مورد استفاده.....
۳۴	۱-۴-۳ کلکتورها.....
۳۵	۲-۴-۳ کف‌سازها.....
۳۵	۳-۴-۳ بازداشت کننده‌ها.....
۳۶	۴-۴-۳ تنظیم کننده‌ها.....
۳۷	۵-۳ تجهیزات مورد استفاده.....
۳۸	۶-۳ روش انجام آزمایش‌ها.....
۳۸	۱-۶-۳ آزمایش‌های شناورسازی سینتیک.....
۳۹	۲-۶-۳ آزمایش‌های مرحله رافر.....
۳۹	۳-۶-۳ آزمایش‌های مرحله رمق گیر.....

## فصل چهارم: ارائه یافته‌ها و تحلیل نتایج

۴۲	..... ۱-۴ مقدمه
۴۲	..... ۲-۴ ارزیابی شرایط فعلی کارخانه
۴۲	..... ۱-۲-۴ بررسی متالورژیکی کل مدار
۴۹	..... ۲-۲-۴ نتایج حاصل از مطالعات کانی‌شناسی مدار
۵۲	..... ۳-۴ بررسی و بهینه‌سازی مرحله رافر
۵۲	..... ۱-۳-۴ بررسی کارآیی متالورژیکی سلول‌های رافر
۵۵	..... ۲-۳-۴ تعیین سینتیک فلوتاسیون مس و مولیبدن
۵۶	..... ۳-۳-۴ تأثیر خردایش بر عملکرد فلوتاسیون
۵۹	..... ۴-۳-۴ تأثیر غلظت پالپ بر عیار و بازیابی در فلوتاسیون مس و مولیبدن
۶۱	..... ۵-۳-۴ تأثیر مقدار گازوئیل بر عیار و بازیابی در فلوتاسیون مس و مولیبدن
۶۲	..... ۶-۳-۴ تأثیر pH بر عیار و بازیابی در فلوتاسیون مس و مولیبدن
۶۴	..... ۷-۳-۴ اعتبارسنجی نتایج بدست آمده
۶۵	..... ۴-۴ بررسی متالورژیکی سلول‌های شستشو
۶۷	..... ۱-۴-۴ بررسی کارآیی متالورژیکی سلول‌های شستشو و شستشوی مجدد
۷۱	..... ۲-۴-۴ بررسی عملکرد سلول‌های شستشو
۷۳	..... ۳-۴-۴ تعیین پارامترهای مؤثر بر عیار و بازیابی سلول‌های شستشو
۷۳	..... ۱-۳-۴-۴ آب شستشو
۷۵	..... ۲-۳-۴-۴ دبی هوا
۷۶	..... ۳-۳-۴-۴ ارتفاع کف
۷۸	..... ۵-۴ بررسی و بهینه‌سازی مرحله رمق‌گیر
۷۹	..... ۱-۵-۴ بررسی متالورژیکی سلول‌های رمق‌گیر
۸۱	..... ۲-۵-۴ بهینه‌سازی عیار و بازیابی سلول‌های رمق‌گیر
۸۲	..... ۱-۲-۵-۴ نتایج آزمایش‌ها با تغییر پارامترهای عملیاتی کارخانه
۸۴	..... ۲-۲-۵-۴ نتایج آزمایش‌های بازداشت مولیبدن با استفاده از دکسترن

## فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۹۰	..... ۱-۵ خلاصه و نتیجه‌گیری
۹۳	..... ۲-۵ پیشنهادها

منابع

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): فلوشیت کلی کارخانه فرآوری مس سونگون ..... ۵
- شکل (۲-۱): نمودار سه ماهه عیار و بازیابی مس در سونگون ..... ۶
- شکل (۳-۱): نمودار سه ماهه عیار و بازیابی مولیبدن در سونگون ..... ۷
- شکل (۱-۲): نمونه‌ای از مولیبدنیت انتشاری همراه با کالکوپیریت ..... ۱۶
- شکل (۲-۲): مولیبدنیت رگه‌ای ..... ۱۶
- شکل (۳-۲): بازیابی ذره به ذره برای مس ..... ۱۸
- شکل (۴-۲): بازیابی ذره به ذره برای مولیبدن ..... ۱۸
- شکل (۵-۲): تأثیر منفی تالک، اندرادیت، کلسیت و آمفیبول بر بازیابی مولیبدنیت ..... ۱۹
- شکل (۶-۲): تأثیر مثبت پلاژیوکلاز، مونتموریلونیت، بیوتیت و فلدسپار پتاسیم بر بازیابی مولیبدنیت ..... ۲۰
- شکل (۷-۲): رابطه عیار و بازیابی برای مس و مولیبدن در مقیاس صنعتی ..... ۲۱
- شکل (۸-۲): رابطه عیار و بازیابی برای مس و مولیبدن در مقیاس آزمایشگاهی ..... ۲۲
- شکل (۹-۲): مقادیر زاویه تماس ذرات در pHهای مختلف و در مقادیر مختلف  $Ca^{2+}$  ..... ۲۳
- شکل (۱-۳): فلوشیت نقاط نمونه‌برداری ..... ۳۰
- شکل (۲-۳): انواع ظرف‌های نمونه‌گیر مورد استفاده ..... ۳۷
- شکل (۳-۳): فلوشیت انجام آزمایش‌ها بدون بازداشت‌کننده‌ها ..... ۴۰
- شکل (۴-۳): فلوشیت انجام آزمایش‌ها با بازداشت‌کننده ..... ۴۰
- شکل (۱-۴): آنالیز دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره کل مدار ..... ۴۳
- شکل (۲-۴): بازیابی ذره به ذره مس و مولیبدن در کل مدار ..... ۴۳
- شکل (۳-۴): کارآیی جدایش ذره به ذره مس و مولیبدن در کل مدار ..... ۴۴
- شکل (۴-۴): عیار خوراک، باطله و کنسانتره مس در هر مرحله کارخانه (%) ..... ۴۵
- شکل (۵-۴): عیار خوراک، باطله و کنسانتره مولیبدن در هر مرحله کارخانه (ppm) ..... ۴۵
- شکل (۶-۴): بازیابی مس و مولیبدن در مرحله‌های مختلف کارخانه (%) ..... ۴۶
- شکل (۷-۴): نسبت غنی‌شوندگی مس و مولیبدن در مرحله‌های مختلف کارخانه ..... ۴۶
- شکل (۸-۴): فلوشیت موازنه مدار کارخانه فرآوری مس سونگون ..... ۴۷
- شکل (۹-۴): تصویر SEM از خوراک کارخانه ..... ۴۹
- شکل (۱۰-۴): تصویر SEM از باطله رافر کارخانه ..... ۵۰
- شکل (۱۱-۴): تصویر SEM از باطله نهایی کارخانه ..... ۵۰
- شکل (۱۲-۴): تصویر SEM از کنسانتره نهایی کارخانه ..... ۵۰
- شکل (۱۳-۴): نمایی از سلول‌های رافر (چپ) و سلول‌های رمق‌گیر (راست) ..... ۵۲

- شکل (۴-۱۴): آنالیز دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره سلول‌های رافر..... ۵۳
- شکل (۴-۱۵): بازیابی ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله رافر..... ۵۴
- شکل (۴-۱۶): کارآیی جدایش ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله رافر..... ۵۴
- شکل (۴-۱۷): نتایج آزمایش‌های سینتیکی مس و مولیبدن..... ۵۶
- شکل (۴-۱۸): آنالیز دانه بندی نمونه‌های خوراک..... ۵۷
- شکل (۴-۱۹): تغییرات d80 نمونه‌های خوراک..... ۵۷
- شکل (۴-۲۰): تأثیر اندازه ذرات بر عیار و بازیابی مس..... ۵۸
- شکل (۴-۲۱): تأثیر اندازه ذرات بر عیار و بازیابی مولیبدن..... ۵۸
- شکل (۴-۲۲): تأثیر درصد جامد بر عیار و بازیابی مس..... ۶۰
- شکل (۴-۲۳): تأثیر درصد جامد بر عیار و بازیابی مولیبدن..... ۶۰
- شکل (۴-۲۴): تأثیر میزان گازوئیل بر عیار و بازیابی مس..... ۶۱
- شکل (۴-۲۵): تأثیر میزان گازوئیل بر عیار و بازیابی مولیبدن..... ۶۲
- شکل (۴-۲۶): تأثیر pH بر عیار و بازیابی مس..... ۶۳
- شکل (۴-۲۷): تأثیر pH بر عیار و بازیابی مولیبدن..... ۶۴
- شکل (۴-۲۸): سلول شستشوی مورد استفاده در کارخانه فرآوری مس سونگون..... ۶۶
- شکل (۴-۲۹): آنالیز دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره مرحله شستشو..... ۶۷
- شکل (۴-۳۰): بازیابی ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله شستشو..... ۶۸
- شکل (۴-۳۱): کارآیی جدایش ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله شستشو..... ۶۸
- شکل (۴-۳۲): آنالیز دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره مرحله شستشوی مجدد..... ۶۹
- شکل (۴-۳۳): بازیابی ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله شستشوی مجدد..... ۷۰
- شکل (۴-۳۴): کارآیی جدایش ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله شستشوی مجدد..... ۷۰
- شکل (۴-۳۵): نتایج حاصل از بررسی عملکرد سلول‌های شستشو..... ۷۲
- شکل (۴-۳۶): تأثیر دبی آب بر عیار و بازیابی مس..... ۷۴
- شکل (۴-۳۷): تأثیر دبی آب بر عیار و بازیابی مولیبدن..... ۷۴
- شکل (۴-۳۸): تأثیر دبی هوا بر عیار و بازیابی مس..... ۷۵
- شکل (۴-۳۹): تأثیر دبی هوا بر عیار و بازیابی مولیبدن..... ۷۶
- شکل (۴-۴۰): تأثیر ارتفاع کف بر عیار و بازیابی مس..... ۷۷
- شکل (۴-۴۱): تأثیر ارتفاع کف بر عیار و بازیابی مولیبدن..... ۷۷
- شکل (۴-۴۲): آنالیز دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره سلول‌های رمق‌گیر..... ۷۹
- شکل (۴-۴۳): بازیابی ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله رمق‌گیر..... ۸۰

- شکل (۴-۴۴): کارآیی جدایش ذره به ذره مس و مولیبدن در سلول‌های رمق‌گیر..... ۸۰
- شکل (۴-۴۵): تأثیر دور همزن بر عیار و بازیابی مس..... ۸۳
- شکل (۴-۴۶): تأثیر دور همزن بر عیار و بازیابی مولیبدن..... ۸۴
- شکل (۴-۴۷): تأثیر مقدار بازداشت کننده دکسترین بر بازیابی مس و مولیبدن..... ۸۵
- شکل (۴-۴۸): تأثیر مقدار بازداشت کننده دکسترین بر عیار مس و مولیبدن..... ۸۶
- شکل (۴-۴۹): تأثیر میزان گازوئیل بر عیار و بازیابی مولیبدن در باطله رمق‌گیر..... ۸۷
- شکل (۴-۵۰): عیار خوراک، باطله و کنسانتره مولیبدن در مقادیر مختلف گازوئیل..... ۸۷

## فهرست جدول‌ها

۲۱	جدول (۱-۲): مقادیر بازیابی مس و مولیبدن در کارخانه و آزمایشگاه.....
۲۷	جدول (۲-۲): خلاصه‌ای از تحقیقات انجام گرفته.....
۵۱	جدول (۱-۴): درصد وزنی کانی‌های موجود در مرحله‌های مختلف مدار.....
۵۲	جدول (۲-۴): مشخصات فنی سلول‌های رافر.....
۵۵	جدول (۳-۴): اطلاعات مربوط به مرحله رافر.....
۶۵	جدول (۴-۴): نتایج آزمایش‌های اعتبارسنجی.....
۶۶	جدول (۵-۴): اطلاعات مربوط به سلول‌های ستونی.....
۷۱	جدول (۶-۴): اطلاعات مربوط به مرحله شستشو و شستشوی مجدد.....
۷۹	جدول (۷-۴): مشخصات فنی سلول‌های رمق‌گیر.....
۸۱	جدول (۸-۴): اطلاعات مربوط به مرحله رمق‌گیر.....
۸۳	جدول (۹-۴): عوامل ثابت آزمایش‌ها.....
۸۵	جدول (۱۰-۴): عوامل ثابت آزمایش‌ها.....
۸۶	جدول (۱۱-۴): عوامل ثابت آزمایش‌ها در فلوتاسیون باطله رمق‌گیر.....

## فصل اول

# كليات

مولیبیدن یکی از فلزات پر مصرف در صنعت محسوب می‌شود و کانسارهای مس پورفیری از مهم‌ترین منابع آن به شمار می‌روند. در کانسنگ‌های مس پورفیری، مولیبدن به صورت مولیبدنیت ( $\text{MoS}_2$ ) و مس اغلب در کانی‌هایی نظیر کالکوپیریت ( $\text{CuFeS}_2$ ) و کالکوسیت ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) یافت می‌شوند (Bulatovic 2007). بازیابی مولیبدنیت از این نوع کانسنگ‌ها، به روش فلوتاسیون انجام می‌شود. روش بازیابی مولیبدن به طور معمول بدین صورت است که ابتدا کانی‌های مس و مولیبدن به صورت تجمعی شناور می‌شوند. سپس روش مورد استفاده در جدایش کانی‌های مس و مولیبدن از یکدیگر براساس فلوتاسیون تفریقی است. در طی فرآیند فلوتاسیون تجمعی، کانی‌های مس و مولیبدن با افزودن مواد شیمیایی مناسب، شناور شده و به بخش شناور سلول فلوتاسیون منتقل می‌شوند. از کنسانتره مس - مولیبدن بدست آمده، برای فلوتاسیون مولیبدن در طی چند مرحله استفاده می‌شود که کنسانتره هر مرحله، به مرحله بعد انتقال یافته و باطله هر مرحله به خوراک مرحله قبل هدایت می‌شود تا بتوان به بازیابی و عیار مطلوب دست یافت. بازیابی مولیبدنیت به عوامل زیادی اعم از نوع کانی‌های حاوی مولیبدنیت و مس، آبرانی ذاتی و پارامترهای عملیاتی نظیر نوع مواد شیمیایی، مدار فرآوری و همچنین خردایش و آزادسازی وابسته است (Triffett et al., 2008). درجه آزادی کانی‌ها یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در فلوتاسیون به شمار می‌رود و به صورت درصدی از کانی مورد نظر که به صورت آزاد ظاهر می‌شود، تعریف می‌شود. با توجه به نوع کانسنگ که پورفیری است، مطالعه ارتباط میزان ابعاد ذرات و درجه آزادی کانی‌ها اهمیت خاصی دارد. به دلیل درجه آزادی پایین‌تر مولیبدنیت نسبت به کانی‌های مس‌دار، مولیبدنیت نیاز به خردایش بیشتری دارد که در این صورت ذرات نرمه مس بیشتر شده و سبب هدرروی بخشی از مس با ارزش به باطله می‌شود. مواد شیمیایی مورد استفاده در مرحله فلوتاسیون، کلکتورها، کف‌سازها و تنظیم‌کننده‌های pH هستند (Crozier, 1979).

در مرحله اولیه فلوتاسیون تجمعی مس - مولیبدن (رافر) معمولاً عیار مس بین ۶ تا ۱۳٪ و عیار مولیبدن نیز ۰/۱ تا ۰/۳٪ متغیر است. در حالت کلی بیشترین هدرروی مولیبدنیت در این مرحله است که تقریباً



۴۸٪ از مولیبدن موجود در خوراک ورودی را شامل می‌شود (Gupta, 1997). علت از دست رفتن مولیبدنیت در این مرحله می‌تواند، ذرات نرمه مولیبدنیت، تفاوت pH فرآیند مولیبدنیت و مس، وجود پوشش اکسیدی روی سطح مولیبدنیت، و وجود پولک‌های درشت مولیبدنیت که به راحتی از کف سقوط می‌کنند، باشد (Ametov et al., 2008). عیار مس کنسانتره نهایی معمولاً بین ۲۳ تا ۳۲٪ است. در مرحله پرعیارکنی نهایی هم‌زمان با مس، عیار مولیبدن نیز افزایش یافته و به مقدار ۰/۲ تا ۰/۲٪ می‌رسد. البته با توجه به اینکه مولیبدنیت همراه با کانسنگ مس به صورت محصول جانبی یافت می‌شود، عیار نهایی آن می‌تواند در صورت بکارگیری روش‌های مناسب در مراحل شستشو به بیش از ۳ تا ۴٪ برسد. کنسانتره بدست آمده از مراحل نهایی توسط تیکنر ته‌نشین شده تا مواد شیمیایی آنها از بین رفته و آماده جداسازی مولیبدن از مس در کارخانه فرآوری مولیبدن شود.

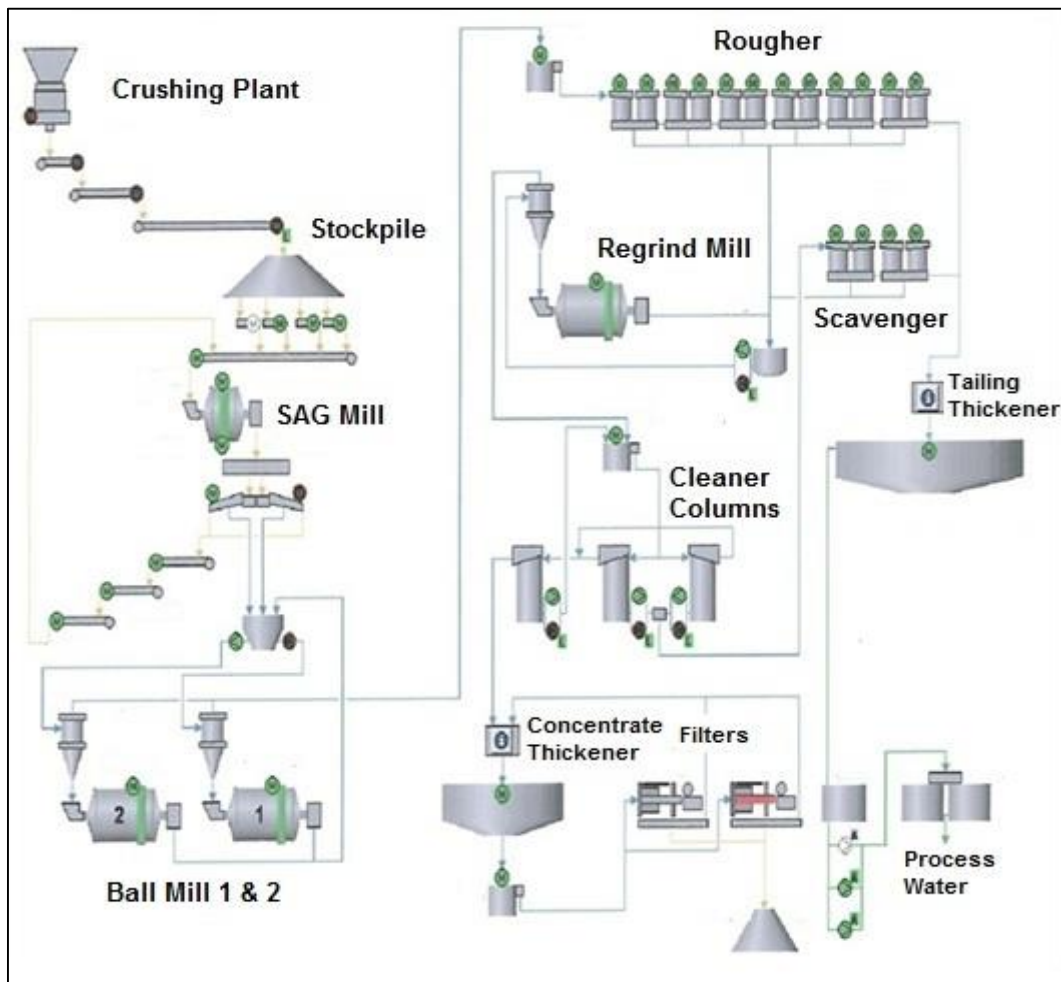
## ۲-۱. معرفی مجتمع مس سونگون

مجتمع مس سونگون آذربایجان در ۱۳۰ کیلومتری شمال شرقی تبریز و ۷۵ کیلومتری غرب شهرستان اهر قرار دارد. مختصات جغرافیایی این منطقه ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی است. کانسار مس سونگون در یک منطقه کوهستانی واقع شده که حداکثر ارتفاع محدوده معدن از سطح دریا ۲۷۰۰ متر است. کانسار مس سونگون از کانسارهای پورفیری نوع مونزونیتی است که سطح توده کانسار در شبکه اکتشافات تفصیلی در حدود یک کیلومتر مربع است. سنگ‌های درون‌گیر این توده مونزونیتی را واحدهای آهکی کرتاسه بالا و سری‌های آتشفشانی آندزیتی - لاتریتی تشکیل داده‌اند. کانی‌های سولفیدی موجود در کانسار مس سونگون شامل پیریت، مولیبدنیت، گالن، اسفالریت، مارکازیت، پیروتیت و سولفیدهای مس (کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت و کولیت) هستند. زون‌های قابل رؤیت در معدن سونگون به سه نوع فروشست، سوپرزن و هیپوزن هستند (باقریان، ۱۳۸۵). کانی‌سازی اصلی کانسار شامل کانی‌های مس و مولیبدن است و دومین تولیدکننده مس ایران است. ذخیره احتمالی این معدن بیش از یک میلیارد تن و ذخیره قابل استخراج آن (با توجه به اکتشافات

انجام گرفته) حدود ۷۹۶ میلیون تن برآورد شده است که در مجموع کل ذخایر قطعی، احتمالی و ممکن در محدوده کانسار سونگون حدود ۱/۷ میلیارد تن سنگ مس با عیار ۰/۶۱٪ است. کارخانه‌های پرعیارسازی در معدن مس سونگون، شامل تولید کنسانتره مس و مولیبدنیت است. کارخانه مس، سالانه ۱۵۰ هزار تن کنسانتره مس و مولیبدن به ترتیب با عیار متوسط ۳۰٪ و ۰/۲٪ تولید می‌کند. کنسانتره مس - مولیبدن تولید شده، برای جداسازی مولیبدنیت از مس، به کارخانه پرعیارسازی مولیبدن انتقال یافته و کنسانتره مولیبدنیت با عیار متوسط ۴۶٪ تولید می‌شود. کارخانه فرآوری مس سونگون دارای سه مرحله کلی خردایش، فلوتاسیون و آبگیری می‌باشد. در مرحله خردایش، سنگ معدن پس از عملیات استخراج توسط کامیون به سنگ شکنی، که از نوع ژیراتوری است انتقال داده می‌شود. ابعاد خوراک ورودی کمتر از ۱۲۰۰mm بوده و مواد معدنی پس از خردشدن به ابعاد زیر ۲۵۰mm، به آسیای نیمه خودشکن فرستاده می‌شود. محصول آسیای نیمه خودشکن به هیدروسیکلون‌های اولیه هدایت شده که سرریز سیکلون‌های اولیه با ابعاد ۱۰۰ میکرون به سمت سلول‌های فلوتاسیون رافر هدایت شده و ته‌ریز آنها جهت خردایش مجدد وارد آسیاهای گلوله‌ای اولیه می‌شود. فلوشیت کلی کارخانه فرآوری مس سونگون در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

مواد شیمیایی مربوط به فلوتاسیون شامل کلکتورها، تنظیم کننده‌ها و شیرآهک به ته‌ریز سیکلون‌های اولیه اضافه می‌شود. سپس پالپ به داخل ۱۲ عدد سلول فلوتاسیون اولیه (رافر) از نوع مکانیکی (RCS130) جریان می‌یابد. باطله خروجی از آخرین سلول رافر مستقیماً به تیکر باطله جریان یافته و کنسانتره سلول‌های رافر جهت خردایش مجدد وارد یک مسیر بسته سیکلون ثانویه و آسیای گلوله‌ای ثانویه می‌شود. ته‌ریز سیکلون ثانویه جهت خردایش مجدد وارد آسیای گلوله‌ای ثانویه شده و سرریز آن به سمت ۲ سلول فلوتاسیون شستشوی اولیه (کلینر) که از نوع ستونی هستند، جریان می‌یابد. باطله سلول‌های شستشو جهت رمق‌گیری به ۴ سلول فلوتاسیون رمق‌گیری (اسکاونجر) از نوع مکانیکی (RCS50) هدایت شده، که باطله سلول‌های رمق‌گیر به همراه باطله سلول‌های رافر، باطله نهایی را تشکیل و به سمت تیکر باطله پمپ شده و کنسانتره سلول‌های رمق‌گیر وارد مخزن آماده‌سازی قبل از

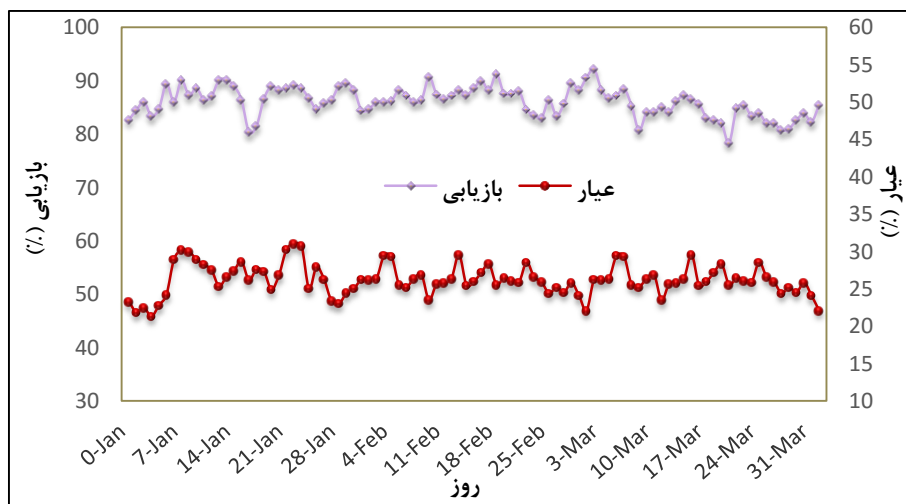
سیکلون ثانویه می‌شود. کنسانتره حاصل از ۲ ستون کلینر، جهت شستشوی مجدد و تولید محصول نهایی به داخل سلول فلوتاسیون شستشوی مجدد (ری کلینر) جریان می‌یابد. باطله سلول شستشوی مجدد به داخل مخزن آماده‌سازی ستون‌های شستشوی اولیه برگشت داده می‌شود و کنسانتره آن نیز به عنوان کنسانتره نهایی به داخل تیکنر کنسانتره جریان می‌یابد. سپس کنسانتره نهایی بدست آمده در یک مخزن جمع شده و به داخل تیکنر کنسانتره جریان می‌یابد. سرریز تیکنر به داخل مخزن انتقال آب بازیافتی منتقل و ته‌ریز آن با ۳۰٪ آب به داخل مخزن پالپ ریخته و از آنجا نیز به داخل فیلتر فشاری پمپ می‌شود.



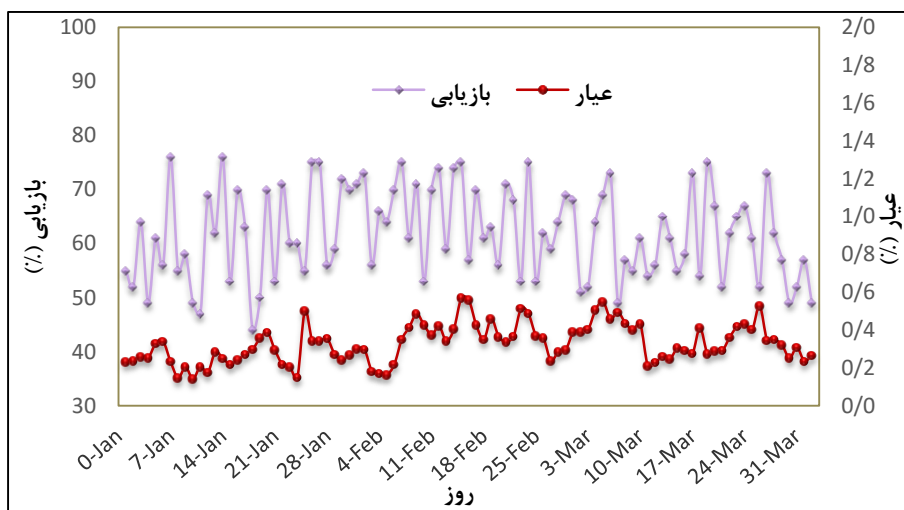
شکل (۱-۱): فلوشیت کلی کارخانه فرآوری مس سونگون

### ۳-۱. ضرورت تحقیق

در کارخانه‌های فرآوری فلوئوراسیون مس پورفیری، علی‌رغم خاصیت آبرانی قوی مولیبدن، در بازیابی کنسانتره نهایی نوسانات زیادی وجود دارد. بازیابی کالکوپیریت معمولاً بین ۸۰ تا ۹۰ درصد است، در حالی که بازیابی مولیبدن بین ۲۵ تا ۸۵ درصد متغیر می‌باشد (Bulatovic, 2007). دلیل این امر را می‌توان به طراحی اولیه کارخانه با توجه به نمونه شاخص مورد مطالعه، که برای بازیابی بهینه مس صورت گرفته است، اشاره کرد که نقش مهم و مستقیمی را در افزایش یا کاهش بازیابی فلوئوراسیون مولیبدنیت دارد (Zanin et al., 2009). از دیگر عوامل پایین بودن بازیابی مولیبدنیت می‌توان به تشکیل پوشش نرماه‌ای و میزان pH اشاره کرد. به دلیل نوسانات ایجاد شده در بازیابی مولیبدن در مدار فلوئوراسیون کارخانه تغلیظ مس سونگون، میزان مولیبدن محصول ارسالی به کارخانه مولیبدن تغییرات زیادی داشته و در نتیجه راندمان تولید مولیبدن کاهش پیدا کرده است. با توجه به قیمت بالای مولیبدن (در حال حاضر ۸۵۰۰۰ تومان بر کیلوگرم) و ظرفیت بالای کارخانه، حتی در صورت افزایش جزئی بازیابی مولیبدن، صرفه اقتصادی بسیاری برای مجتمع مس سونگون خواهد داشت. شکل‌های (۱-۲) و (۱-۳) به ترتیب نشان دهنده‌ی وضعیت عیار و بازیابی مس و مولیبدن در مدار فرآوری مجتمع مس سونگون می‌باشند که در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۱-۲): نمودار سه ماهه عیار و بازیابی مولیبدن در سونگون (باقریان، ۱۳۹۲)



شکل (۳-۱): نمودار سه ماهه عیار و بازیابی مولیبدن در سونگون (باقریان، ۱۳۹۲)

چنانچه در شکل‌های (۲-۱) و (۳-۱) مشاهده می‌شود عیار و بازیابی مولیبدن نسبت به مس دارای نوسانات زیادی است، به طوری که میانگین عیار و بازیابی مس در روزهای مختلف به ترتیب ۲۹٪ و ۸۹٪، هم‌چنین عیار و بازیابی مولیبدن به ترتیب ۰/۳٪ و ۰/۶۰٪ می‌باشد.

#### ۴-۱. اهداف تحقیق

در این تحقیق سعی شده است ابتدا با شناسایی نقاط هدرروی مولیبدنیت در مدار فلوتاسیون، برای بررسی علل این هدرروی و پایین بودن بازیابی مولیبدنیت نسبت به مس، آزمایش‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شود. سپس با استفاده از نتایج آزمایش‌ها شرایط مناسب برای افزایش هم‌زمان بازیابی مولیبدن و مس در کنسانتره نهایی واحد تغلیظ، طرحی را فراهم کرد تا علاوه بر افزایش راندمان تولید واحد تغلیظ، خوراک مناسبی نیز برای کارخانه مولیبدن فراهم شده و از هدرروی مولیبدن جلوگیری شود.

## ۵-۱. سازماندهی فصل‌ها

در پایان‌نامه ارائه شده و در فصل اول این تحقیق، کلیات و تئوری تحقیق ارائه شده است. سپس در فصل دوم به مرور تحقیقات انجام شده در این زمینه پرداخته شده است. فصل سوم مواد و تجهیزات مورد استفاده و روش انجام آزمایش‌ها و نمونه‌برداری از کارخانه توضیح داده شده است. در فصل چهارم نیز یافته‌ها و نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها و بررسی آورده شده است. در نهایت در فصل پنجم نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادهایی برای تغییر در مدار و پیشنهاد تحقیقات بعدی ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات  
گذشته

## ۲-۱. مقدمه

در سال ۱۹۳۳ شرکت آناکوندا<sup>۱</sup> در مکزیکو، فرآیندی را جهت فلوتاسیون انتخابی مولیبدنیت از کانه‌های پورفیری مس توسعه داد. شرکت مس کنکات<sup>۲</sup> بلافاصله در معدن یوتا از این روش استفاده نمود. این تکنولوژی سپس تا شیلی گسترش یافت و در معادن ال تنینت<sup>۳</sup> مربوط به شرکت کنکا و چوکی کوماتا (متعلق به شرکت آناکوندا) استفاده شد. بدین ترتیب عصر تولید مولیبدن به عنوان محصول فرعی مس آغاز شد. بعد از جنگ جهانی دوم با پیشرفت تکنولوژی فلوتاسیون و نیاز صنایع مختلف به فلز مولیبدن، مقادیر زیادی از مولیبدن دنیا با عیار خوراک ۰/۵-۰/۲ درصد از کانسنگ‌های مس پورفیری بازیابی شدند. البته امروزه در اکثر کارخانه‌های فرآوری مس دنیا، عیار قابل فرآوری مولیبدن ۰/۰۳-۰/۰۱ درصد است (Weiss, 1985).

از ابتدای بازیابی مولیبدنیت در مدار فلوتاسیون مس - مولیبدن، یکی از مشکلات اساسی کارخانه‌ها کم بودن و متغیر بودن بازیابی مولیبدنیت نسبت به مس می‌باشد. برای بررسی علل این مشکل در مدارهای فرآوری مس - مولیبدن، تحقیقات زیادی از سال ۱۹۶۱ انجام شده است (Herlund, 1961). فاکتورهای تأثیرگذار بر فلوتاسیون مولیبدنیت در مقیاس صنعتی عبارتند از: (۱) نوع کانی محتوای مولیبدنیت در کانسنگ‌ها (۲) پوشش نرمه‌ای، (۳) خردایش و درجه آزادی، (۴) مواد شیمیایی مورد استفاده، (۵) نوع فلوشیت کارخانه (Shirley and Sutulov, 1985). همچنین در تحقیق‌های زیادی که در این مورد انجام شده است، به مطالعه عواملی نظیر مورفولوژی ذرات مولیبدنیت، شناسایی نوع گانگ موجود در کانسنگ، پیدایش یون‌های پوشش دهنده ذرات مولیبدنیت در آب فرآیند فلوتاسیون، اکسایش سطحی ذرات و ثابت سینتیک شناور شدن ذرات مولیبدن در فلوتاسیون تجمعی مس - مولیبدن پرداخته شده است

---

<sup>1</sup> Anaconda

<sup>2</sup> Kennecott

<sup>3</sup> El Teniente



(Triffett et al., 2008). در این فصل تحقیقات انجام گرفته در این زمینه و نتایج بدست آمده از هر بررسی، به طور خلاصه بیان شده است.

## ۲-۲. مروری بر تحقیقات انجام گرفته

در این بخش از پایان نامه به مرور کارهای انجام گرفته از ابتدای شروع فرآیند فلوتاسیون مس - مولیبدن در ایران و خارج از کشور پرداخته می‌شود.

**هرنلاند (Hernlund, 1961)**، به مطالعه ساختار مولیبدنیت در کانسنگ‌های مس پورفیری پرداخت که نشان داد مولیبدنیت بلورین به طور قابل توجهی شناورتر از دیگر آمورف‌های مولیبدنیت است که معمولاً غیر شناور یا کند شناور می‌شوند.

**چاندر و فورستنا (Chander and Fuerstenau, 1972)**، آبرانی طبیعی (ذاتی) ذرات مولیبدنیت را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که آبرانی ذرات مولیبدنیت بستگی به شکل ذرات دارد که در آن نسبت سطح به لبه درجه آبرانی را تعیین می‌کند.

**وای و فورستنا (Wie and Fuerstenau, 1974)**، تأثیر انواع یون‌ها بر روی سطح مولیبدنیت در فلوتاسیون مس - مولیبدن را بررسی کرده و نشان دادند مولیبدنیت دارای پتانسیل زتای منفی در یک محدوده گسترده‌ای از **pH** است. به طوری که جذب بارهای یونی مثبت در لبه‌های ذرات مولیبدنیت ممکن است مقدار پتانسیل زتا را کاهش داده و حتی علامت آن را نیز تغییر دهد.

**کروزیر (Crozier, 1979)**، با بررسی فلوتاسیون مس - مولیبدن نشان داد که بازیابی مولیبدنیت نسبت به مس متغیر و کمتر است. به طوری که معمولاً بازیابی مس بین ۸۰ تا ۹۰ درصد است، درحالی‌که بازیابی مولیبدنیت ممکن است بین ۲۵ تا ۸۵ درصد باشد.

**مالهوترا و همکاران** (Malhotra et al., 1980)، به تأثیر هوادهی و همزدن در فلوتاسیون مولیبدنیت پرداختند. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های فلوتاسیون که با ثابت نگه داشتن مقادیر pH، سرعت همزدن و زمان ماند همراه بود، نشان دادند که افزایش نسبت جریان هوا بر روی عیار مولیبدنیت، و همزدن نیز بر روی بازیابی مولیبدنیت مؤثر است. بنابراین نتیجه گرفتند، زمانی که سرعت همزدن زیاد می‌شود مواد کم ارزش موجود در گوشه‌های ظرف شناور شده و در نتیجه باعث افزایش بازیابی می‌شوند. در حالی که تغییر چندانی در عیار ایجاد نکرده ولی با افزایش نرخ هوادهی، ارتفاع کف نیز بیشتر شده و در نتیجه عیار افزایش می‌یابد.

**تراهر** (Traher, 1981)، به بررسی رابطه اندازه ذرات با بازیابی مولیبدنیت می‌پردازد که در این مطالعه با نشان دادن نمودارهای بازیابی جز به جز مولیبدنیت، نتیجه می‌گیرد که بیشترین بازیابی مربوط به اندازه ذرات میانی و کم‌ترین بازیابی مربوط به اندازه ذرات درشت‌تر و ریزتر است. هم‌چنین نتیجه می‌گیرد که بیشترین بازیابی مولیبدنیت در محدوده ابعاد ۳۸ تا ۷۵ میکرون و بیشترین بازیابی مس در محدوده ابعادی بین ۳۸ تا ۱۰۶ میکرون بدست می‌آید.

**رغوان و هسو** (Raghavan and Hsu, 1984)، تحقیقی در مورد فاکتورهای تأثیرگذار بر بازیابی مولیبدنیت از کانسنگ‌های مس پورفیری شامل خصوصیات بار سطحی مولیبدنیت و تأثیر جذب یون کلسیم در اندازه ذرات متفاوت را انجام دادند. نتیجه بررسی نشان داد که ذرات مولیبدنیت در pH معمولی حدود (۸-۱۰) دارای بار منفی هستند اما به صورت عمده pH در حدود ۱۱ است. ذرات درشت مولیبدنیت (۱۲۰\*۲۰۰) مش به صورت کامل بدون تغییر بار سطح ذره شناور می‌شوند، ذرات زیر ۲۰۰ مش نیز تحت عمل تغییر بار سطح قرار می‌گیرند. ذرات درشت مولیبدنیت به سرعت شناور می‌شوند و یون کلسیم و سیلیکات بر روی آن تأثیری ندارند ولی ذرات ریز مولیبدنیت که همراه با یون کلسیم و سیلیکات در فلوتاسیون پالپ هستند، به کندی شناور شده و اندازه ذرات مولیبدنیت یکی از عوامل مؤثر بر روی بازیابی است. هم‌چنین در این تحقیق نشان دادند که ذرات درشت‌تر کانی مولیبدنیت به صورت

قفل شده با گانگ بوده و شناورسازی آن مشکل است و برای شناورسازی ذرات ریز می‌توان از متفرق کننده استفاده کرد.

**ساواسسی و همکاران** (Savassi et al., 1997)، دلیل بازیابی پایین مولیدنیت را شکل ذرات مولیدن بیان کردند. با توجه به اینکه شکل ذرات مولیدن به صورت ورقه‌ای و گوشه‌دار است، در نتیجه نمی‌تواند به فاز کف منتقل شده و در حین فلوتاسیون با مس به صورت باطله از بین می‌رود.

**اورو و همکاران** (Orwe et al., 1998)، در تحقیقی به بررسی کانی‌های مس و مولیدن از نظر شناوری پرداختند و نشان دادند که از بین کانی‌های مس سولفیدی، کالکوپیریت معمولاً نرخ شناوری بالاتری نسبت به کالکوزیت، بورنیت، دیژنیت و کوولیت دارد. در حالی که بازیابی مولیدن ممکن است در هر عملیاتی به طور قابل توجهی متفاوت باشد.

**بولاتوویچ و همکاران** (Bulatovic et al., 1999)، به بررسی تأثیر انواع کانی‌های رسی از قبیل کائولینیت، برامولیت، ایلیت و مونت مورینیت بر شناورسازی مس و مولیدن در کانسار پورفیری پرداختند. نتایج بدست آمده نشان دادند که حضور رس در شناورسازی مس و مولیدن در طول فرآیندهای فلوتاسیون مس - مولیدن مؤثر بوده و مصرف معرف‌ها در حضور رس آزاد افزایش می‌یابد. همچنین راه‌های مؤثر در جهت کاهش تأثیر نرمة‌های رس بر فلوتاسیون را سه فاکتور تغییر فلوشیت، کاهش دانسیته پالپ و استفاده از مواد شیمیایی مناسب معرفی کردند.

**لاینس و فرانترز** (Lince and Frantz, 2000)، ساختار بلورین مولیدنیت را بررسی کردند و علت بازیابی متغیر مولیدن را در فلوتاسیون مس - مولیدن به خصوصیات ساختاری و تشکیل آن نسبت دادند. آنها نشان دادند که ساختار بلورین مولیدن شامل لایه‌های هگزاگونال بوده که بین اتم‌های سولفور قرار گرفته‌اند و لایه‌ها توسط نیروی ضعیف واندروالس بین اتم‌های S-S چسبیده شده‌اند.

**زیدآبادی** (زیدآبادی، ۱۳۸۴)، به بررسی بازیابی مرحله به مرحله مولیبدن در مرحله پرعیارکنی مس سرچشمه پرداخت که با انجام نمونه‌گیری‌های متعدد از مدار کارخانه و مطالعه آنها نتیجه گرفت که بیش از ۹۰ درصد مس و مولیبدن راه یافته به باطله نهایی ناشی از باطله سلول‌های رافر می‌باشد. همچنین نشان داد که سینتیک بازیابی مولیبدن نسبت به مس کندتر بوده و بنابراین احتمال اینکه ذرات مولیبدن به درجه آزادی مطلوب جهت شناور شدن نرسیده باشند، وجود دارد. نتایج آنالیز شیمیایی بر حسب طبقات در باطله رافر و شستشو نشان می‌دهد که بخش عمده مس و مولیبدن راه یافته به باطله در طبقات ۱۰۶+ میکرون و ۵- میکرون قرار دارد. اما منحنی بازیابی بر حسب طبقات بیانگر کاهش شدید بازیابی برای ذرات بزرگتر از ۷۴ میکرون می‌باشد.

**عادلی** (عادلی، ۱۳۸۴)، گونه‌های مختلف مولیبدنیت را در کنسانتره و باطله کارخانه پرعیارسازی سرچشمه شناسایی و نتیجه گرفت که نسبت مولیبدنیت توده‌ای به تیغه‌ای در باطله شش ماهه اول و دوم به ترتیب ۶ و ۱/۶ است که این امر احتمالاً بدلیل کم بودن میزان کف‌ساز و یا تغییر نوع آن است. همچنین نشان داد که ۳۵ درصد از مولیبدنیت هدر رفته در شش ماهه اول به صورت آزاد بوده که در شش ماه دوم به ۸۵ درصد رسید. در بررسی‌های انجام گرفته بر روی مقاطع صیقلی شش ماهه دوم، یک کانی جدید مولیبدن دار مشاهده شد که میزان آن به طور متوسط ۳۰ درصد دانه‌ها را تشکیل می‌داد.

**شهرآشویی** (شهرآشویی، ۱۳۸۵)، نحوه شناورسازی مس و مولیبدن در سلول‌های پرعیارکنی اولیه که شامل ۸ سلول است، مورد بررسی قرار داد که نتایج حاصل از مطالعه مقاطع و نمونه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که ذرات در محدوده ۲۵ تا ۳۸ میکرون در همه شرایط عملیاتی دارای بیشترین بازیابی هستند. به طور متوسط بیشترین هدرروی ذرات مس و مولیبدن به صورت ذرات درشت بزرگتر از ۱۰۶ میکرون، به ترتیب با مقادیر ۴۰ و ۷۳ درصد است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با تنظیم دبی هوا (۱۲۵۰ مترمکعب بر ساعت) و ارتفاع کف (۱۷۰ میلی متر) در واحد ۱، بیشترین بازیابی بدست می‌آید.

بنابراین مصرف کلکتور حداقل به مقدار ۲۵ گرم برتن، اضافه کردن حداقل ۴ درصد کلکتور در واحد ۳ و خردایش حداقل به میزان ۷۰ درصد زیر ۷۵ میکرون از راهکارهای افزایش بازیابی در مرحله پرعیارکنی اولیه پیشنهاد شد.

**نوول و گرانو** (Newell and Grano, 2007)، در بررسی تأثیر فاکتورهای هیدرودینامیکی بر فلوتاسیون، نشان دادند که در فلوتاسیون، سرعت ذرات در پالپ در یک زمان مشخص به وسیله حباب‌های هوا از بین می‌روند که در فرمول (۱-۲) دیده می‌شود.

$$\frac{dN_p}{dt} = kN_p = -Z_{pb} * E_{coll} \quad (1-2)$$

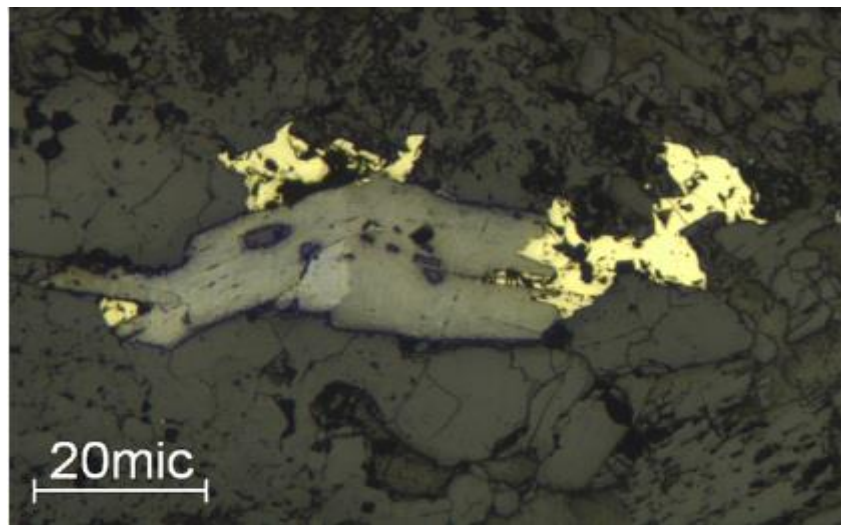
در فرمول فوق  $N_p$  تعداد ذرات پالپ در یک زمان،  $K$  ثابت نرخ شناوری ذرات،  $Z_{pb}$  تعداد برخوردها و  $E_{coll}$  کارایی جمع‌آوری ذرات توسط حباب‌ها است. هم‌چنین کارایی جمع‌آوری نیز می‌تواند با استفاده از فرمول (۲-۲) بدست آید که در آن  $E_c$  کارایی برخورد،  $E_a$  کارایی چسبیدن ذرات به حباب‌ها و  $E_s$  کارایی پایداری حباب‌ها است.

$$E_{coll} = E_c * E_a * E_s \quad (2-2)$$

بنابراین نتیجه گرفتند که شرایط هیدرودینامیکی تأثیر مستقیم بر تعداد برخوردها و شناوری آنها دارند که از پارامترهای مهم هیدرودینامیکی می‌توان به قطر حباب‌ها، ویسکوزیته پالپ، انرژی و تلاطم پالپ اشاره کرد.

**نلسون** (Nelson, 2007)، کانسار مس یوتا را مورد بررسی قرار داد که در آن دو نوع مولیبدنیت رگه‌ای و پراکنده را شناسایی کرد. در شکل (۱-۲) مولیبدنیت نوع پراکنده یا انتشاری دیده می‌شود که کمتر معمول است، در حالی که بخش قابل توجهی از کانسار از این نوع است. مولیبدنیت نوع پورفیری در درون سنگ میزبان به صورت ذرات خیلی ریز دیده می‌شود که اغلب همراه با کانی‌های مس سولفیدی می‌باشد. نوع رگه‌ای مولیبدنیت که بیشتر معمول بوده و با توجه به نحوه پیدایش رگه‌ها در اندازه‌های

مختلف، در لایه‌های درون کوارتز دیده می‌شود. رگه‌های مولیبدنیت موجود در بین رگه‌های کوارتز معمولاً شکل گسترده و بزرگتری نسبت به بلورهای ریز مولیبدنیت دارند که به حالت پوشش نازکی در سطح سنگ میزبان ایجاد می‌شوند. در شکل (۲-۲) مولیبدنیت نوع رگه‌ای در دو حالت الف) مولیبدنیت رگه‌ای در درون کوارتز، ب) مولیبدنیت رگه‌ای که در نمونه‌های حاصل از مغزه‌های حفاری بدست آمده، دیده می‌شود.



شکل (۱-۲): نمونه‌ای از مولیبدنیت انتشاری همراه با کالکوپیریت (Nelson, 2007)



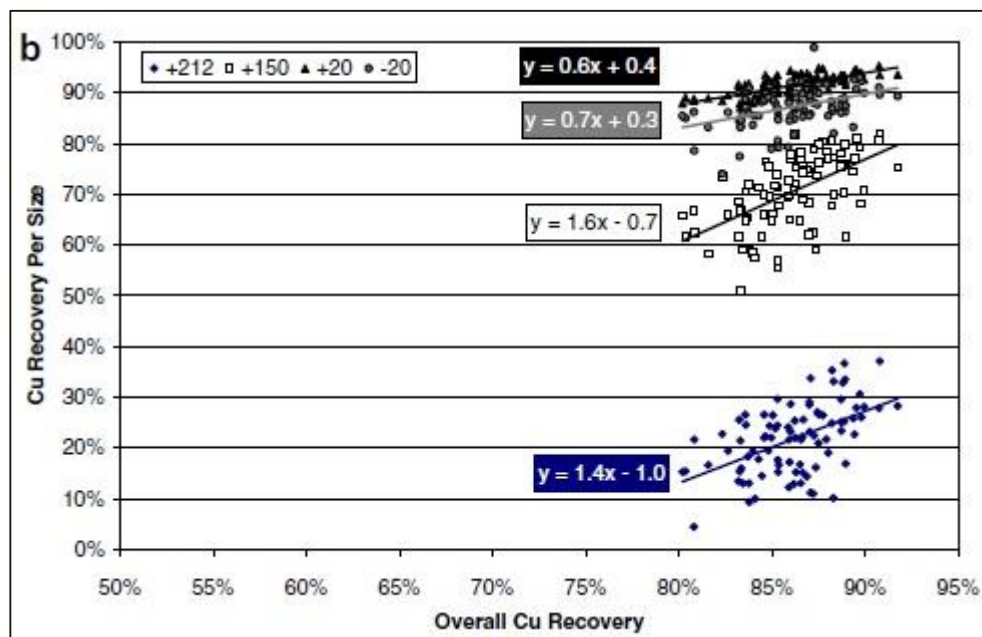
شکل (۲-۲): مولیبدنیت رگه‌ای (Nelson, 2007)

**بوچاروو و همکاران** (Bocharov et al., 2008)، استفاده از معرف‌هایی در جهت افزایش بازیابی مولیبدنیت در فلوتاسیون مس - مولیبدن را بررسی کردند. آزمایش‌هایی در زمینه عوامل مؤثر بر فلوتاسیون از جمله نفت و Berafлот به عنوان کلکتور و OPSB به عنوان کف‌ساز و تنظیم کردن کربوکسی متال (CMC) صورت گرفت که منجر به بازیابی ۸۷٪ و ۸۲٪ مولیبدن شد. هم‌چنین استفاده از CMC مصرف سولفید سدیم را ۱/۵ تا ۲ برابر کاهش داده و با کاهش دادن هزینه جابجایی پالپ، بازیابی مولیبدنیت بدون اینکه بر روی عوامل دیگر تأثیر منفی داشته باشد، بهبود بخشد.

**تریفت و همکاران** (Triffett et al., 2008)، فاکتورهای مؤثر بر بازیابی مولیبدنیت در مدار فلوتاسیون معدن مس بینگهام کانیون<sup>۴</sup> را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق فاکتورهای از جمله مورفولوژی ذرات مولیبدنیت، نوع خوراک، بررسی بازیابی و آزادسازی در اندازه ذرات مختلف، تأثیر گانگ، حضور انواع متفاوت گانگ، سطح اکسیدی و تأثیر آن بر نسبت کف‌ساز و کلکتور مطالعه شد. نتایج نشان دادند که چندین نوع مولیبدنیت در کانسار بینگهام کانیون وجود دارند که ویژگی بافتی تعدادی از این نوع مولیبدنیت‌ها با آنالیز شیمیایی در خوراک و کنسانتره و باطله مشخص نشدند. از بازیابی در اندازه‌های مختلف کانی‌های مس و مولیبدن در بررسی خصوصیات فرآوری آنها استفاده شد. شکل‌های (۲-۳) و (۲-۴) بازیابی ذره به ذره هر یک از مس و مولیبدن را نشان می‌دهند. از منحنی‌های بازیابی ذره به ذره مس و مولیبدن مشاهده می‌شود که بیشترین هدرروی در ذرات ریز و درشت است و هم‌چنین بیشترین بازیابی نیز در ذرات میانی ۲۰ تا ۱۵۰ میکرون اتفاق می‌افتد. ذرات درشت مولیبدنیت ممکن است به علت اینکه به درجه آزادی مطلوب نرسیده‌اند کمتر شناور شوند و ذرات ریز به علت یک نیروی الکترواستاتیکی که بین آنها و نرمه‌ها ایجاد می‌شود، باعث رسوب در سطح مولیبدنیت شده و از شناورسازی آنها جلوگیری می‌شود.

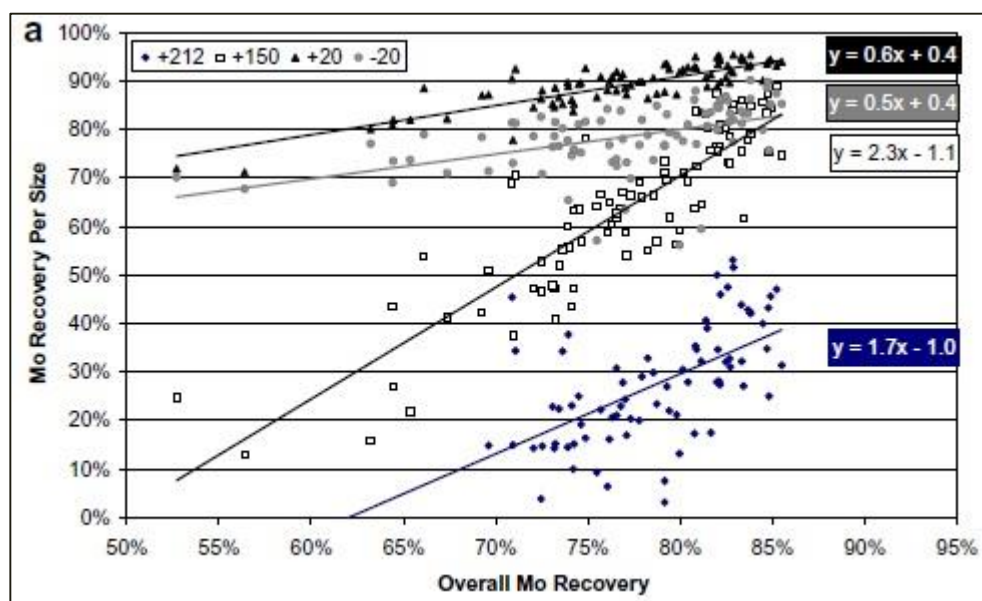
---

<sup>4</sup> Bingham canyon



شکل (۲-۳): بازیابی ذره به ذره برای مس (Triffett et al., 2008)

از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به آنالیز سطحی که بر روی کنسانتره، باطله و رافر صورت گرفت، اشاره کرد که طی آن کانی‌های اکسیدی و یون کلسیم در کنسانتره کمتر و در باطله بیشتر است و این کانی‌ها کمتر شناور می‌شوند (Triffett et al., 2008).

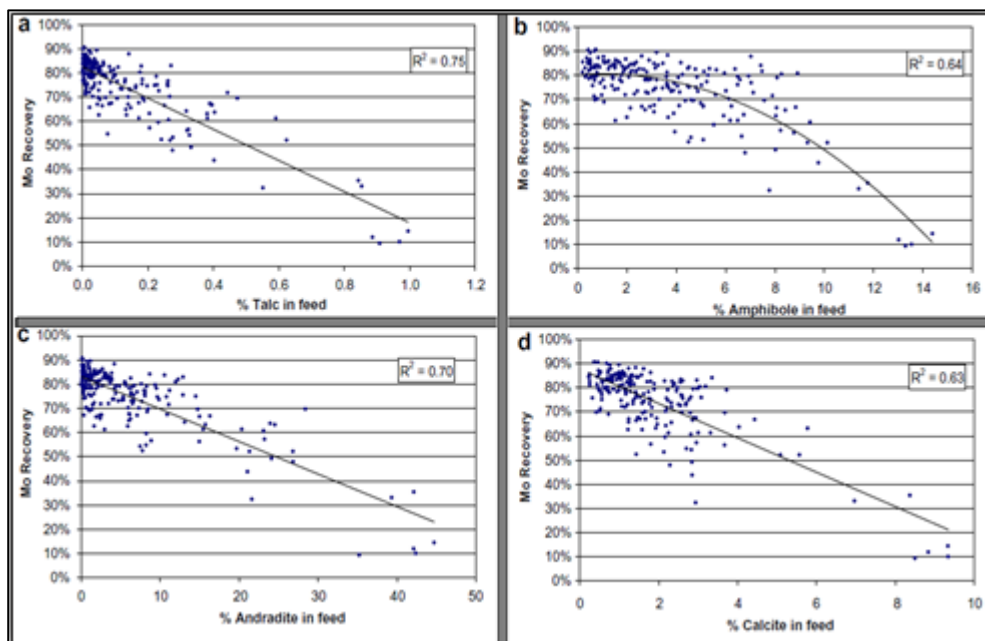


شکل (۲-۴): بازیابی ذره به ذره برای مولیبدن (Triffett et al., 2008)

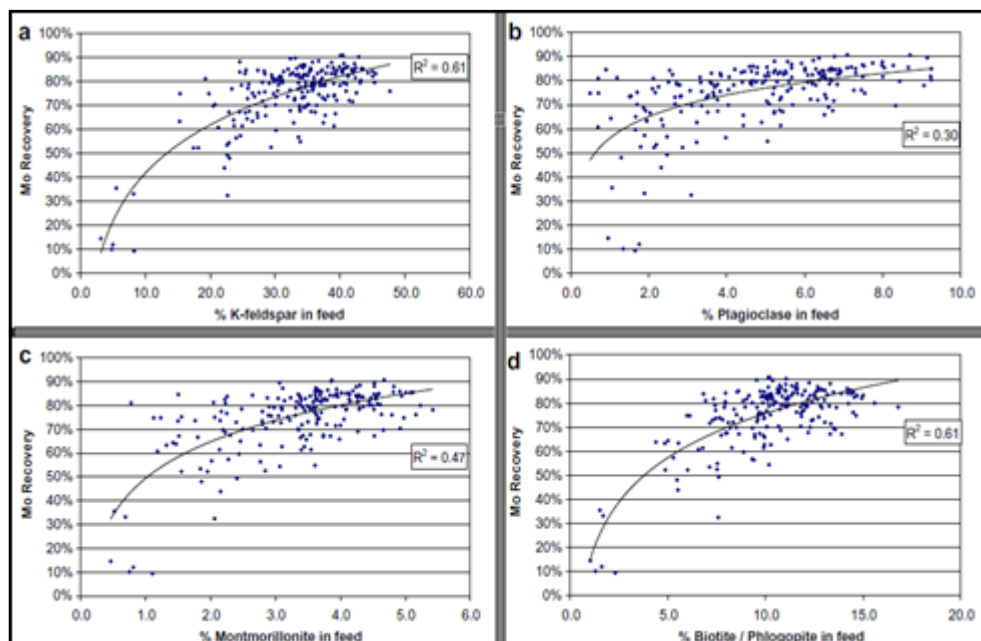


از نظر مورفولوژی، مولیبدن در دو نوع رگه‌ای و توده‌ای وجود دارد. رگه‌های پهن‌تر پر شده از کوارتز بلورهای مولیبدنیت درشت‌تر و شفاف‌تری را تشکیل می‌دهند، در حالی که رگه‌های باریک‌تر منجر به پوشش مولیبدنیت‌های خیلی ریزتری روی سطوح شکست که می‌تواند ظاهری کدر به علت جابجایی در شکستگی نشان دهد، می‌شود.

از کانی‌های گانگ که معمولاً همراه مولیبدن است می‌توان به تالک، اندرادیت، کلسیت، آمفیبول، پلاژیوکلاز، مونت موریلونیت، بیوتیت و فلدسپار پتاسیم را نام برد. از بین این کانی‌ها، تالک، اندرادیت، کلسیت و آمفیبول تأثیر منفی بر روی بازیابی مولیبدن دارند که در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. کانی‌های دیگری مثل پلاژیوکلاز، مونت موریلونیت، بیوتیت و فلدسپار پتاسیم تأثیر مثبتی بر روی بازیابی مولیبدنیت در مدار فلوتاسیون مس - مولیبدن دارد که در شکل (۲-۶) نشان داده شده است (Triffett et al., 2008)



شکل (۲-۵): تأثیر منفی تالک، اندرادیت، کلسیت و آمفیبول بر بازیابی مولیبدنیت (Triffett et al., 2008)



شکل (۲-۶): تأثیر مثبت پلاژیوکلاز، مونت موریلونیت، بیوتیت و فلدسپار پتاسیم بر بازیابی مولیبدنیت (Triffett et al., 2008)

در سال ۲۰۰۸ مؤسسه بین المللی تحقیقات فرآوری مواد معدنی AMIRA<sup>۶</sup>، پروژه‌ای ۶ میلیون دلاری تحت عنوان AMIRA P260E در مؤسسه تحقیقاتی یان وارک<sup>۶</sup> دانشگاه استرالیای جنوبی، تعریف کرد که هدف از این پروژه، بهینه‌سازی فلوتاسیون مس سولفیدی بود که در آن علل پایین بودن بازیابی مولیبدنیت در کنسارهای پورفیری نیز بررسی و راهکارهایی جهت افزایش بازیابی مولیبدن ارائه کردند. این تحقیق که توسط گرانو<sup>۷</sup>، زانین و آمتوو انجام گرفت، به بررسی پارامترهای تأثیرگذار از جمله مطالعات مینرالوژی و فاکتورهای عملیاتی نظیر درصد جامد، pH، مواد شیمیایی و هم‌چنین نوع مدار فرآوری در مقیاس آزمایشگاهی و صنعتی پرداخته شد. از مطالعه بر روی چندین کارخانه فرآوری از جمله کنکات یوتا<sup>۸</sup> نتایج قابل توجهی گرفتند که به صورت خلاصه در زیر آورده شده است

(Zanin et al., 2009) (Ametov et al., 2008) (Zanin et al., 2010).

<sup>6</sup> Ian Wark

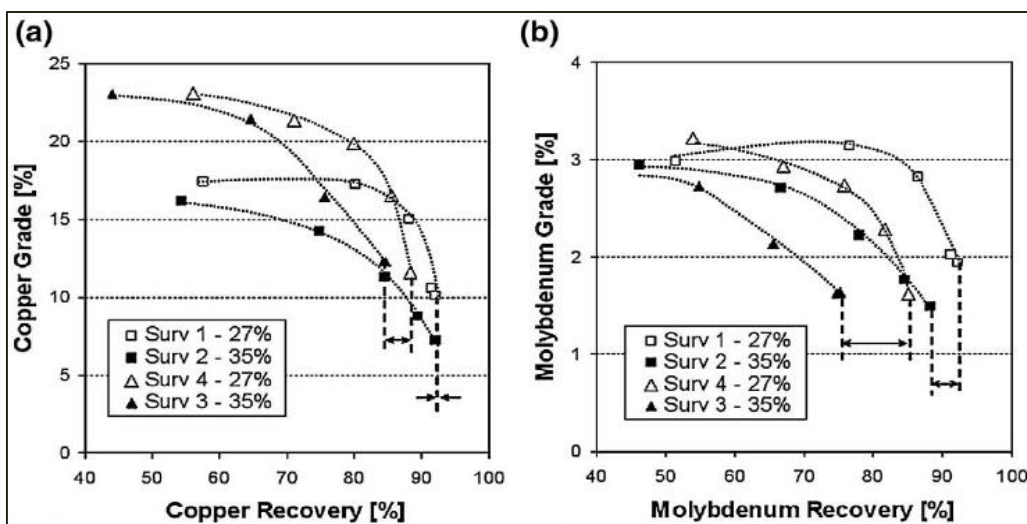
<sup>8</sup> kenecote Utah

(۱) ذرات مولیبدنیت با نسبت سطح به لبه بالا بیشتر در کنسانتره هستند و ذرات درشت با نسبت محیط به مساحت بیشتر به سمت باطله هدایت می‌شوند (Zanin et al., 2009).

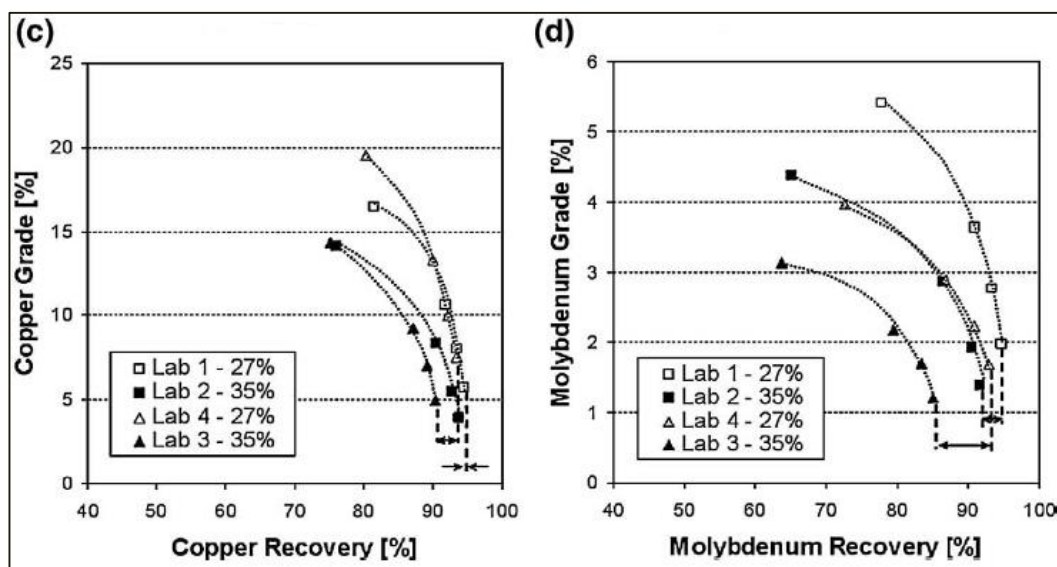
(۲) با کاهش درصد جامد از ۳۵ به ۲۷، بازیابی مولیبدن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که این کار بر روی بازیابی مس تأثیرگذار نبود. جدول (۱-۲) و شکل‌های (۷-۲) و (۸-۲) نشان‌دهنده نتایج حاصل از این بررسی می‌باشند. البته این مسئله باید مدنظر باشد که کاهش زیاد درصد جامد از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد (Zanin et al., 2009).

جدول (۱-۲): مقادیر بازیابی مس و مولیبدن در کارخانه و آزمایشگاه (Zanin et al., 2009)

Ore blend type	Survey	Solids [%]	Plant recovery		Lab recovery	
	#		Cu [%]	Mo [%]	Cu [%]	Mo [%]
High quartzite	1	27	92	92	95	95
	2	35	92	88	94	92
High skarn	3	35	85	75	90	85
	4	27	88	85	93	93



شکل (۷-۲): رابطه عیار و بازیابی برای مس و مولیبدن در مقیاس صنعتی (Zanin et al., 2009).



شکل (۲-۸): رابطه عیار و بازیابی برای مس و مولیبدن در مقیاس آزمایشگاهی (Zanin et al., 2009).

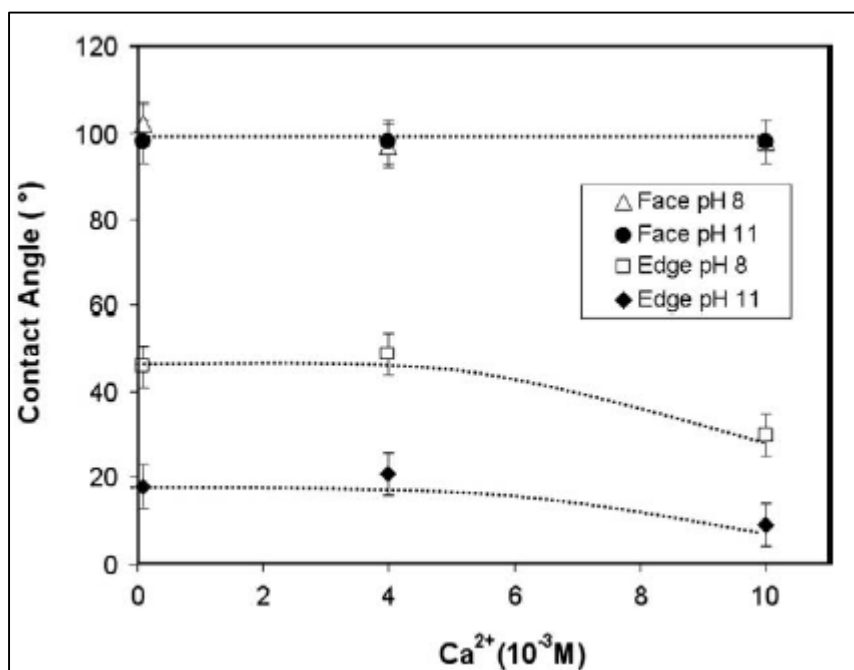
(۳) آنالیز سطحی (*TOF-SIMS*) برای ذرات ۱۵۰ میکرون انجام شد و از سلول ۱ تا ۱۱، فلوتاسیون کانی‌ها را بررسی کرده و متوجه شدند که در سلول ۱ سرعت فلوتاسیون تند و در سلول ۱۱ سرعت فلوتاسیون کند است و به این نتیجه رسیدند که یک همبستگی بین سطح ترکیب و فلوتاسیون وجود دارد (Zanin et al., 2009).

(۴) با افزایش اندازه زاویه تماس یا همان نسبت سطح به لبه، بازیابی مولیبدنیت نیز بیشتر می‌شود. با افزایش pH به دلیل پوشش نرمه‌ای ذرات مولیبدنیت که توسط یون‌های  $Ca^{2+}$  با اضافه کردن آهک جهت تنظیم pH بوجود می‌آید، زاویه تماس کمتر می‌شود. طی بررسی و اندازه‌گیری معلوم شد که زاویه تماس بیشتر (در حدود ۱۰۰ درجه) وابسته به pH محلول است. در سطح زاویه تماس بیشتر از ۱۰۰ درجه و در مقابل زاویه تماس در لبه‌ها کمتر (حداکثر ۴۵ درجه) است و این با افزایش pH و غلظت یون کلسیم کاهش می‌یابد. به صورت خلاصه کاهش دانسیته پالپ برهم‌کنش بین ذرات و کاهش پوشش نرمه‌ای، باعث افزایش زاویه تماس شده و موجب افزایش مقدار کمی در زاویه تماس می‌شود که ذرات

درشت غیر شناور به ذرات شناور تبدیل می‌شوند. جذب یون کلسیم و منیزیم در لبه‌ها ممکن است بر روی آبرانی ذرات تأثیر داشته و آبرانی کلی را کاهش دهد (Zanin et al., 2009).

(۵) در سلول‌های ستونی به دلیل وجود ارتفاع زیاد برای رسیدن به عیار بالای مس، ذرات مولیبدن فرصت کافی برای رسیدن به فاز کف را پیدا نکرده و همراه با کانی‌های گانگ دنباله‌روی داشته که موجب کم شدن بازیابی مولیبدن در این سلول شده است (Zanin et al., 2010).

(۶) یکی دیگر از نتایج مهمی که از این پروژه بدست آمد، این بود که با توجه به اینکه در طراحی مدار فرآوری مس - مولیبدن به دلیل اهمیت بیشتر بالا بودن عیار مس از لحاظ اقتصادی، از سلول‌های ستونی استفاده می‌کنند. در سلول‌های ستونی ذرات مولیبدن همراه با کانی‌های مس نمی‌توانند به فاز کف انتقال یابند، بنابراین در این پروژه پیشنهاد می‌شود که ممکن نیست که در سلول‌های ستونی، مولیبدن نیز همراه با مس به عیار و بازیابی بالایی برسد و برای این امر باید در مراحل اولیه طراحی سلول‌ها اقدام کرد (Zanin et al., 2009).



شکل (۲-۹) مقادیر زاویه تماس ذرات درشت‌تر از ۱۵۰ میکرون در pHهای مختلف و در مقادیر مختلف Ca<sup>2+</sup> (Zanin et al., 2009)

**بالنده** (بالنده، ۱۳۸۹)، انواع فرم‌های مولیبدنیت در کانسار مس پورفیری سرچشمه را مورد بررسی قرار داد و نتایج نشان داد که مولیبدنیت در ۵ فرم مختلف تشکیل شده است که عبارتند از: (۱) مولیبدنیت در رگه‌های کوارتز، (۲) مولیبدنیت در رگه‌های کوارتز که توسط رگه‌های پیریت پر شده‌اند، (۳) مولیبدنیت در رگه‌های کوارتز - پیریت - کالکوپیریت، (۴) رگه‌های مولیبدنیت با مقادیر بسیار پایین کوارتز و (۵) مولیبدنیت انتشاری. با انجام آزمایش‌های فلوتاسیون برای بررسی رفتار متالورژیکی هر یک از این فرم‌ها، نتیجه گرفتند که آنچه باعث کاهش شدید بازیابی مولیبدنیت در برخی روزها شده، وجود مولیبدنیت‌های انتشاری است. این نوع مولیبدنیت‌ها به دلیل ریز دانه بودن در مرحله خردایش به درجه آزادی مطلوب نمی‌رسند و در صورت خردایش مناسب نیز در مراحل شناورسازی مانند یک کانی هیدروفیل رفتار کرده و در فاز باطله تجمع می‌یابند

**میرشمسی** (میرشمسی، ۱۳۸۹)، به منظور بررسی علل اختلاف عیار و بازیابی در کارخانه‌های قدیم و جدید مس سرچشمه تحقیقی را انجام داد که در آن تأثیر عوامل مختلفی از جمله عیار خوراک ورودی، کانی‌شناسی، مواد شیمیایی، میزان خردایش، درجه آزادی و ثابت سینتیک را بررسی نمود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که عیار مولیبدن در خوراک ورودی با بازیابی مولیبدن رابطه مستقیم دارد و بیشترین هدرروی مولیبدن از باطله رافر به واسطه قفل شدگی مولیبدن با کانی‌های درگیر می‌باشد. بازیابی مولیبدن با حضور کانی ایزومورف ( $CuFe_2S_7$ ) در کنسانتره، رابطه معکوس دارد. شرایط بهینه برای بیشینه بازیابی مس و مولیبدن در  $pH=12.29$  و مقدار  $R407=5$ ،  $Gasoil=6$ ،  $Z11=$  9.64،  $C4132=12.5$  و  $DF250=5$  گرم بر تن پیش بینی شد. در این شرایط بازیابی مولیبدن ۶۶/۶۲ درصد و بازیابی مس ۸۸/۴۳ درصد بدست آمد. هم‌چنین بررسی‌های سینتیکی نشان دادند که با کاهش ظرفیت از ۹۵۰ به ۷۸۸ تن بر ساعت یا با افزایش تعداد سلول‌های رافر از ۸ به ۱۰، بازیابی مولیبدن در مرحله رافر به ۹۰ درصد خواهد رسید.

**جمالزاده** (جمال زاده، ۱۳۹۰)، به بررسی نحوه بازیابی مولیبدن در مدار پرعیارکنی مس سونگون پرداخته است. با ارزیابی کل مدار نتیجه گرفت که در سلول‌های رافر، با کاهش اندازه ذرات خوراک ورودی، استفاده از کمک کلکتور گازوئیل، توزیع مناسب کف‌ساز، جایگزینی Z11 با Z6، استفاده از کمک کلکتور X231 یا Flomin C4132 امکان دستیابی به بازیابی بالاتری از مس و مولیبدن در این سلول‌ها نسبت به شرایط موجود در کارخانه، وجود دارد.

**بارانی** (بارانی، ۱۳۹۱)، برای مقایسه دو کارخانه قدیم و جدید مس سرچشمه از نظر اختلاف بازیابی مولیبدن به مطالعه مینرالوژی و عملیاتی از قبیل درجه آزادی، قفل‌شدگی ذرات، پوشش نرمه‌ای، درصد جامد و نسبت سطح به لبه پرداخت. نتایج نشان دادند که با توجه به دو سیستم خردایش متفاوت، میزان مواد شیمیایی در دو کارخانه تغلیظ متغیر است که بازیابی مولیبدنیت به میزان کمی به درجه آزادی و قفل‌شدگی وابسته است و با عواملی مانند شکل و مورفولوژی ذرات، آبرانی ذرات، برهم‌کنش بین ذرات مولیبدنیت و گانگ، قفل‌شدگی ذرات مولیبدنیت با گانگ و کانی‌های با ارزش تحت تأثیر قرار می‌گیرد. ذرات مولیبدنیت که به شکل توده‌اند و قفل‌شدگی با کالکوپیریت دارند سبب افزایش بازیابی و ذرات تیغه‌ای سبب پاره کردن حباب هوا و کاهش بازیابی می‌شوند. بیشترین هدرروی در هر دو کارخانه مربوط به ذرات خیلی ریز و خیلی درشت است و علت هدرروی ذرات مربوط به کمبود مواد شیمیایی است.

**کینبو و همکاران** (Qinbo et al., 2013)، در بررسی بهبود بازیابی مولیبدن در مدار فلوتاسیون مس - مولیبدن کانسنگ‌های پورفیری پرداختند که در این تحقیق عوامل مؤثر بر بازیابی شامل خردایش، درصد جامد، مقدار گازوئیل و کلکتور را مورد مطالعه قرار دادند. آنها با انجام آزمایش‌هایی نتیجه گرفتند که در شرایط بهینه هر یک از عوامل ذکر شده، کنسانتره مس - مولیبدن با ۳/۰۲ درصد عیار و بازیابی ۹۳/۴ درصد مولیبدن بدست آمد.

**بوالیانگ و همکاران (Baoliang et al., 2013)**، برای نشان دادن رابطه خردایش و عملکرد فلوتاسیون مس - مولیبدن، آزمایش‌هایی انجام دادند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان دادند که خردایش یک مرحله‌ای مستقل در طول فلوتاسیون به عنوان یک فاکتور کلیدی برای افزایش بازیابی مولیبدن به شمار می‌رود. در این تحقیق یک فلوشیت بسیار ساده با یک مرحله آسیاکنی، یک مرحله فلوتاسیون تجمعی، دو مرحله شستشو و یک مرحله رمق‌گیر را طراحی کردند و با استفاده از این فلوشیت خوراکی حاوی ۰/۵ درصد مس و ۰/۱۹ درصد مولیبدن را به کنسانتره‌ای با عیار ۱۹/۲۳ درصد و بازیابی ۸۵/۵ درصد برای مس و هم‌چنین مولیبدن با عیار ۴۸/۵۳ درصد و بازیابی ۹۰/۹۶ درصد بدست آوردند.



جدول (۲-۲): خلاصه‌ای از تحقیقات انجام گرفته

پارامترهای مورد بررسی	نویسنده	سال
ساختار مولیبدنیت در کانسنگ‌های پورفیری	Hernlund	۱۹۶۱
آبرانی طبیعی ذرات مولیبدنیت	Chander	۱۹۷۲
تأثیر انواع یون‌ها بر روی سطح مولیبدنیت	Wie	۱۹۷۴
بررسی عملکرد فلوتاسیون مس - مولیبدن	Crozier	۱۹۷۹
تأثیر هوادهی و هم‌زدن در فلوتاسیون مس - مولیبدن	Malhotra	۱۹۸۰
رابطه اندازه ذرات با بازیابی مولیبدنیت	Traher	۱۹۸۱
تأثیر فاکتورهای بار سطحی، جذب یون کلسیم بر بازیابی مولیبدن	Raghavan	۱۹۸۴
مطالعه شکل ذرات مولیبدن	Savassi	۱۹۹۷
بررسی کانی‌های مس و مولیبدن از نظر شناوری	Orwe	۱۹۹۸
تأثیر انواع کانی‌های رسی (کائولینیت، ایلیت، مونت موریلونیت، برامولیت)	Bulatovic	۱۹۹۹
مطالعه ساختار بلورین	lince	۲۰۰۰
بررسی بازیابی مرحله به مرحله در کارخانه مس سرچشمه	زیدآبادی	۲۰۰۵
شناسایی گونه‌های مختلف در کنسانتره و باطله کارخانه مس سرچشمه	عادلی	۲۰۰۵
بررسی نحوه شناورسازی مس و مولیبدن در سلول‌های اولیه	شهرآشوبی	۲۰۰۶
بررسی تأثیر فاکتورهای هیدرودینامیکی بر فلوتاسیون	Newell	۲۰۰۷
بررسی کانسار مس یوتا و شناسایی انواع مولیبدنیت در آن	Nelson	۲۰۰۷
بررسی معرف‌ها در جهت افزایش بازیابی مولیبدنیت	Bocharov	۲۰۰۸
تأثیر فاکتورهای مورفولوژی ذرات مولیبدنیت، نوع خوراک، درجه آزادی	Triffett	۲۰۰۸
بهینه‌سازی فلوتاسیون کانسنگ‌های سولفیدی مس	P260E project	۲۰۰۸
بررسی فلوتاسیون مس و مولیبدن در مقیاس آزمایشگاهی مرحله رافر	Ametov	۲۰۰۸
بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر فلوتاسیون مس و مولیبدن	Zanin	۲۰۰۹
بررسی فلوتاسیون مس و مولیبدن از نظر مدار و روش انجام کار	Zanin	۲۰۱۰
معرفی انواع گونه‌های مولیبدنیت و تأثیر آنها بر بازیابی فلوتاسیون مولیبدن	بالنده	۲۰۱۰
بررسی علل اختلاف عیار و بازیابی در کارخانه‌های جدید و قدیم	میرشمسی	۲۰۱۰
بررسی نحوه بازیابی مولیبدن در مدار پرعیارکنی مس سونگون	جمال‌زاده	۲۰۱۱
تعیین علل اختلاف بازیابی مولیبدن در دو کارخانه از نظر کانی شناسی	بارانی	۲۰۱۲
بررسی بهبود بازیابی مولیبدن در مدار فلوتاسیون مس - مولیبدن	Cao	۲۰۱۳
بررسی رابطه خردایش و عملکرد فلوتاسیون مس - مولیبدن	Boaliang	۲۰۱۳

فصل سوم

# مواد و روش تحقیق

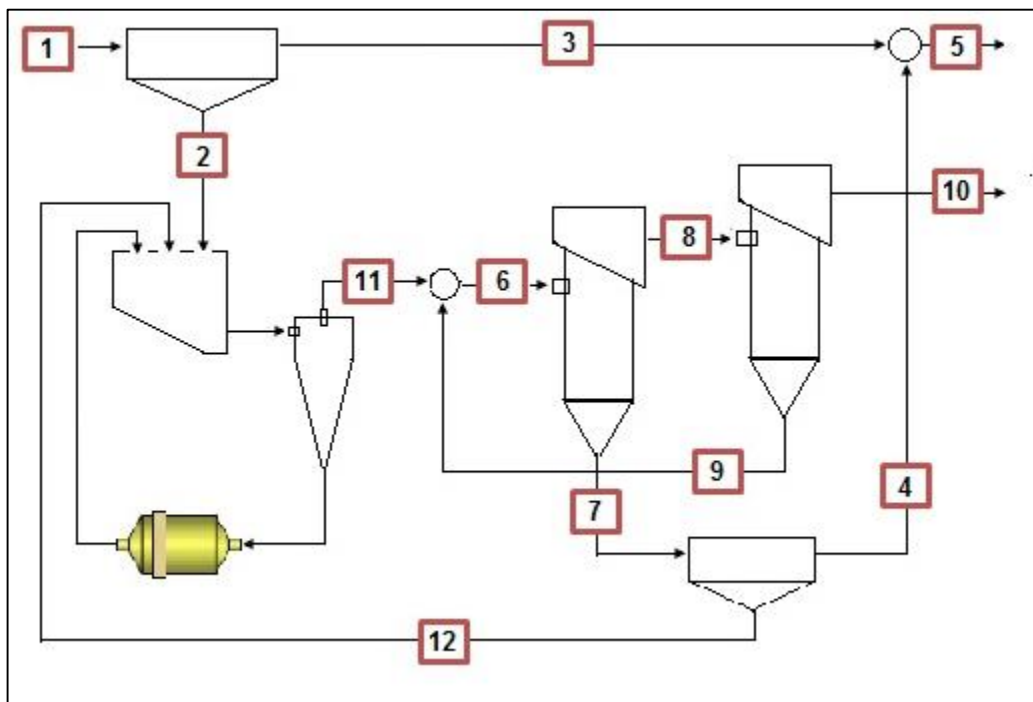
با توجه به ضرورت و اهداف تحقیق که در فصل اول تشریح شد، ابتدا نمونه‌هایی برای ارزیابی کل مدار کارخانه و شناسایی نقاط هدرروی مولیدنیت، در طی سه ماه گرفته و بررسی شد. سپس با مشخص شدن نقاط هدرروی و علل پایین بودن عیار و بازیابی مولیدن، راهکارهایی برای افزایش و بهینه‌سازی آن صورت گرفت. برای همین منظور جهت بررسی جداگانه هر کدام از مراحل فلوتاسیون رافر، رمق گیر و شستشو، نمونه‌گیری و آزمایش‌هایی انجام شد. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها و آنالیزهای دانه‌بندی و شیمیایی، عناصر مس و مولیدن مورد بررسی قرار گرفته، داده‌ها موازنه، بازیابی و کارایی جدایش هر یک از بخش‌های مختلف مدار محاسبه شد. هم‌چنین با استفاده از نمونه‌های گرفته شده، مقاطع صیقلی تهیه و مطالعات کانی‌شناسی از قبیل تعیین درجه آزادی و ترکیب‌های آنها توسط XRD و تصویربرداری SEM انجام شد.

### ۲-۳. نمونه‌برداری

هدف از نمونه‌برداری در هر واحد کانه‌آرایی، کنترل کیفیت خوراک، باطله و محصول (کنسانتره) از لحاظ عیار و مشخصات فیزیکی (دانه‌بندی) و نیز راندمان واحد کانه‌آرایی است. روش نمونه‌برداری و فاصله زمانی دو برداشت متوالی به عیار ماده معدنی و ارزش آن، ابعاد ذرات، توزیع ماده معدنی در سنگ، همگنی و یا ناهمگنی ماده معدنی، روش کانه‌آرایی و ظرفیت واحد بستگی دارد. اصولاً نمونه‌برداری در کارخانه‌های بزرگ و ظرفیت‌های بالا به صورت مکانیکی و خودکار و در ظرفیت‌های کم و واحدهای کوچک، با استفاده از روش‌های دستی انجام می‌شود. در نمونه‌گیری، مناسب‌ترین نمونه از محلی است که مواد به حالت آزاد در حال سقوط هستند و برای جلوگیری از خطای بوجود آمده از نظر ابعاد یا ترکیب شیمیایی، نمونه برداشت شده باید در برگیرنده تمام مقطع جریان باشد (نعمت‌اللهی، ۱۳۸۴). برای انجام این تحقیق چند سری نمونه‌گیری به عمل آمد که هر یک از آنها برای بررسی قسمت‌های مختلف مدار می‌باشند.

### ۳-۲-۱. نمونه برداری برای ارزیابی متالورژیکی کل مدار

نمونه گیری از قسمت های مختلف مدار به منظور بررسی علل هدرروی مولیبدن، براساس یک برنامه منظم زمانی و با مشخص کردن نقاط مختلف نمونه برداری طبق فلوشیت نشان داده شده در شکل (۳-۳).  
(۱) انجام گردید.



شکل (۳-۱): فلوشیت نقاط نمونه برداری

نقاط نمونه برداری عبارتند از: ۱- خوراک رافر، ۲- کنسانتره رافر، ۳- باطله رافر، ۴- باطله رمق گیر، ۵- باطله نهایی، ۶- خوراک شستشو، ۷- باطله شستشو (خوراک رمق گیر)، ۸- کنسانتره شستشو (خوراک شستشو مجدد)، ۹- باطله شستشو مجدد، ۱۰- کنسانتره شستشوی مجدد (کنسانتره نهایی)، ۱۱- سرریز سیکلون های ثانویه، ۱۲- کنسانتره رمق گیر

برای بدست آوردن نمونه های معرف، از هر یک از نقاط تعیین شده بر اساس شرایط جریان، از ظرف های نمونه گیری مخصوص استفاده شد که در بعضی از نقاط به دلیل عدم وجود نمونه گیر مناسب، اقدام به ساخت ظرف نمونه گیر شد. بررسی شرایط متالورژیکی کارخانه در مدت ۳ ماهه (۱۵ اسفند ۹۱ تا ۱۵

خرداد ۹۲) صورت گرفت. در این مدت ۶ سری نمونه برداری در هر ۱۵ روز (طبق استاندارد ASTM) و شرایط پایدار مدار، به مدت ۴ ساعت و در فاصله زمانی ۳۳ دقیقه انجام شد. همچنین سایر شرایط عملیاتی مورد نیاز، همزمان با نمونه برداری در اتاق کنترل یادداشت شد.

پس از نمونه برداری از قسمت‌های مذکور مدار، نمونه‌ها فیلتر و خشک شده و برای تهیه نمونه معرف توسط تقسیم کننده مجرایبی، هر سری از نمونه‌گیری‌ها و نمونه‌های ترکیبی، آماده‌سازی شدند. سپس نمونه‌های هر ۶ سری برای تعیین مقادیر عناصر موجود برای آنالیز شیمیایی، به آزمایشگاه شیمی فرستاده شد و از نمونه‌های ترکیبی نیز برای هر یک از نقاط نمونه برداری به مقدار ۶۰۰ گرم نمونه جهت آنالیز سردی و سیکلوسایزر با استفاده از تقسیم کننده مجرایبی آماده‌سازی گردید. نمونه‌های آماده شده را ابتدا بر روی سرند ۴۰۰ مش (۵۳ میکرون) به روش تر دانه‌بندی کرده (در محدوده‌های ابعادی ۲۹۷، ۲۱۰، ۱۴۹، ۱۰۵، ۷۴ و ۵۳ میکرون)، و سپس مواد کوچکتر از ۴۰۰ مش را جهت انجام آنالیز سیکلوسایزر برای ذراتی در محدوده ابعادی ۴۴، ۳۳، ۲۳، ۱۵، ۱۱ و کوچکتر از ۱۱ میکرون مورد استفاده قرار گرفت.

### ۳-۲-۲. نمونه برداری برای بررسی سلول‌های فلوتاسیون رافر

سری دوم نمونه برداری برای بررسی تأثیر عوامل مختلفی از قبیل مواد شیمیایی، میزان خردایش، درصد جامد و pH فرآیند بر کارایی عملیات فلوتاسیون مس و مولیبدن انجام شد. ابتدا قبل از شروع نمونه‌گیری، در طی یک شیفت مقادیر pH، دانسیته پالپ، درصد جامد، میزان مواد شیمیایی مورد مصرف در سلول‌های رافر، تناژ و سایر اطلاعات موجود در واحد متالورژی و کنترل کیفی تهیه و بررسی شدند. نمونه‌گیری از سلول‌های فلوتاسیون رافر، از ناوهای جمع‌آوری کنسانتره هر سلول انجام گرفت. برای تعیین اندازه ابعاد خوراک سلول‌های رافر به مدت یک هفته از پالپ ورودی سلول‌های رافر نمونه‌گیری شد و نمونه‌ها مورد آنالیز دانه‌بندی قرار گرفتند. پس از مخلوط کردن نمونه‌ها، ابتدا درصد جامد آن

تعیین و سپس نمونه‌ها خشک شدند. هم‌زمان با این نمونه‌برداری، از مواد ورودی به آسیای نیمه-خودشکن نیز نمونه‌هایی به وزن ۲۰۰ کیلوگرم برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون رافر، تهیه شد. برای خردایش نمونه‌های خوراک کارخانه، از سنگ‌شکن فکی استفاده شد تا ابعاد مورد نظر خوراک آزمایش‌های فلوتاسیون آماده‌سازی شوند. جهت تعیین زمان خردایش لازم برای نمونه‌ها، سه نمونه معرف به جرم ۱۴۶۰ گرم از آنها تهیه شده و به کمک آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی با نسبت جامد به مایع ۱:۱ (یعنی ۵۰ درصد جامد و ۵۰ درصد مایع) برای رسیدن به ۶۷ تا ۷۶ درصد زیر ۷۴ میکرون در ۳ فاصله زمانی ۶، ۸ و ۱۰ دقیقه‌ای خردایش شد. پس از فیلتر کردن و خشک کردن، نمونه‌های معرفی به وزن ۲۰۰ گرم تهیه شد. با انجام آنالیز سرندی مشخص شد که زمان بهینه خردایش در آزمایشگاه برای خوراک سلول‌های فلوتاسیون رافر، ۷/۳۰ دقیقه می‌باشد.

### ۳-۲-۳. نمونه‌برداری برای بررسی سلول‌های شستشو

سری سوم نمونه‌گیری برای بررسی کارایی سلول‌های شستشو که از نوع ستونی هستند، صورت گرفت. نمونه‌گیری در مدت ۴ روز و با فاصله ۱۰ دقیقه‌ای از نقاط خوراک ورودی، کنسانتره، باطله و هم‌چنین از محل فصل مشترک بین ناحیه کف و پالپ انجام شد. هم‌زمان با نمونه‌گیری نیز برای بررسی بیشتر سایر پارامترهای عملیاتی مانند ارتفاع کف، نرخ هوا و آب ورودی به سلول، اطلاعاتی از اتاق کنترل ثبت شد. بعد از جمع‌آوری نمونه‌ها، نمونه‌های ترکیبی از هر یک از نقاط تهیه و برای تعیین عناصر مس و مولیبدن، آنالیز شیمیایی انجام گرفت.

### ۳-۲-۴. نمونه‌برداری برای بررسی سلول‌های رمق‌گیر

به منظور بررسی و بهینه‌سازی عیار و بازیابی مولیبدن در سلول‌های رمق‌گیر، نمونه‌گیری از این سلول‌ها نیز صورت گرفت. بدین منظور ابتدا از سه نقطه خوراک، باطله و کنسانتره در طول ۲ هفته و در شرایط پایدار مدار نمونه‌برداری شده و آنالیز شیمیایی انجام شد. سپس برای انجام آزمایش‌های سلول‌های رمق‌گیر، از خوراک آن به صورت پالپ نمونه‌گیری شد تا آزمایش‌ها به شرایط عملیاتی کارخانه نزدیک باشد.

### ۳-۳. موازنه داده‌ها

در کارخانه‌های فرآوری مواد، کنترل عملیات فرآوری جهت دستیابی به شرایط عملیاتی بهتر، بهبود وضعیت کارخانه و ارتقاء سطح بهره‌وری، تنها از طریق ارزیابی عملکرد دستگاه‌ها و آگاهی از نحوه‌ی توزیع مواد در قسمت‌های مختلف مدار امکان‌پذیر است. بدین منظور ابتدا از بعضی جریان‌های مدار اطلاعاتی نظیر عیار فلز یا کانی، درصد جامد، توزیع دانه‌بندی مواد و عیار فلز در بخش‌های ابعادی جمع‌آوری، و سپس بر روی این داده‌ها یکسری محاسبات انجام می‌گیرد تا:

- \* پارامترهای مربوط به جریان‌های نمونه‌برداری نشده محاسبه شوند.
- \* پارامترهای اندازه‌گیری شده که دارای خطا هستند، تصحیح شوند.
- \* نرخ‌های جریان که عموماً غیر قابل اندازه‌گیری هستند، تخمین زده شوند.

از موازنه جرم، مهندسان عملیات برای محاسبه دقیق شاخص‌های کارایی عملیات، مهندسان طراح جهت طراحی شمای عملیات جدید، محققان فرآوری برای تصحیح داده‌های آزمایشگاه قبل از بکارگیری آنها در مدل‌سازی و مهندسان کنترل فرآیند، برای کنترل و بهینه‌سازی عملیات استفاده می‌کنند (بنیسی، ۱۳۹۱).

در نمونه‌گیری از کل مدار، احتمال برهم خوردن تعادل مدار در طول نمونه‌گیری وجود دارد که موجب بروز خطا در نتایج می‌شود. لذا نتایج بدست آمده از آنالیز شیمیایی نقاط نمونه‌گیری، با استفاده از نرم

افزار موازن، موازنه شد. در این نرم افزار ضمن موازنه جرم داده‌ها، سایر پارامترهای عملیاتی موردنیاز نیز محاسبه شدند.

### ۳-۴. مواد شیمیایی مورد استفاده

استفاده از مواد شیمیایی مناسب برای هر فرآیند، تابع عوامل متعددی است که از آن جمله می‌توان به خصوصیات ذاتی و کانی‌شناسی ماده معدنی، مدار فرآوری، رفتار شناوری کانی‌ها، مقدار و نوع کانی باطله موجود در کانسنگ و وجود انواع ترکیبات رسی اشاره کرد. در این تحقیق برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از مواد شیمیایی ذیل استفاده شدند که همه آنها از واحد مواد شیمیایی کارخانه مس سونگون تهیه شده است.

#### ۳-۴-۱. کلکتورها

در بین مواد شیمیایی فلوتاسیون، کلکتورها مهم‌ترین و حساس‌ترین عوامل شیمیایی محسوب می‌شوند. کلکتورها، مولکول‌ها یا یون‌های آلی هستند که به طور انتخابی بر روی سطوح ذرات جذب شده، و با افزایش زاویه تماس، سطح کانی را آبران می‌کنند. کلکتورهای مورد استفاده برای فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی از لحاظ ساختار شیمیایی به سه گروه گزنتات‌ها، تیوفسفات‌ها و تیونوکرپامات‌ها تقسیم می‌شوند (Bulatovic, 2007). در کارخانه فرآوری مس سونگون از گزنتات‌ها و دی‌تیوفسفات‌ها به عنوان کلکتور استفاده می‌شود که دارای ساختار ترکیباتی زیر می‌باشند:

- Z11: ایزوپروپیل گزنتات سدیم، کلکتور مس که دارای ساختار شیمیایی به صورت



- Flomin C4132: اتیل ایزوپروپیل تیونو کرپامات، کلکتور مس می‌باشد که ساخت شرکت Flomin است.

- Kerosene: مواد نفتی گازوئیل است که به عنوان کلکتور مولیبدن بکار می‌رود.



### ۳-۴-۲. کف‌سازها

مولکول‌های کف‌ساز به نحوی در فصل مشترک هوا و آب قرار می‌گیرند که گروه قطبی یا آب‌دوست به سمت آب و زنجیر غیرقطبی هیدروکربنی یا آبران به سمت هوا جهت‌گیری می‌کنند. از جمله خصوصیات یک کف‌ساز خوب، عدم تأثیرپذیری در مقابل املاح محلول در آب و عدم تأثیرپذیری از pH می‌باشد. حضور کانی‌های رسی در کانه، یکی از دلایل اصلی برای عدم پایداری کف‌ها و کاهش قدرت کف می‌باشد. کف‌سازی که وزن مولکولی بیشتری داشته باشد کفی پایدارتر ولی با اثر انتخابی کمتر تولید می‌کند (Bulatovic, 2007). در کارخانه مس سونگون از کف‌سازهای A65 و A70 استفاده می‌کنند که در این تحقیق نیز برای انجام آزمایش‌ها از این کف‌سازها استفاده شد.

- Aero Froth 70: مشابه کف‌ساز MIBC است که نام شیمیایی آن متیل ایزوبوتیل کربنیل است.

- Aero Froth 65: پلی پروپیلن گلیکول که از گروه پلی گلیکول‌ها محسوب می‌شود. وزن مولکولی و طول زنجیر هیدروکربنی پلی گلیکول‌ها تعیین‌کننده قابلیت کف‌سازی آنها است.

### ۳-۴-۳. بازداشت‌کننده‌ها

بازداشت‌کننده‌ها مواد شیمیایی هستند که اضافه کردن آنها به محیط فلوتاسیون، باعث افزایش توان انتخابی بودن فلوتاسیون شده و در عین حال باعث آسیب پذیر شدن کانی‌های دیگر می‌شود و مانع فلوتاسیون آنها می‌گردد و تأثیر نامناسبی بر روی کانی مورد نظر باقی نمی‌گذارند. از جمله رایج‌ترین بازداشت‌کننده‌ها می‌توان سیانور سدیم و پتاسیم، سولفات روی، گاز  $SO_2$ ، متاسففات، نشاسته، کبراکو و دکسترین را نام برد. از مهم‌ترین بازداشت‌کننده‌ها در صنعت فلوتاسیون مس و مولیبدن، نشاسته و دکسترین هستند. نشاسته‌ها و دکسترین‌ها از نظر ساختمانی واحدهای پلیمری منو متریک دکستروز

هستند و به دلیل خصوصیات ساختمانی، نشاسته‌ها وزن مولکولی زیاد یعنی در حدود ۱۰۰۰۰۰۰ دارند، در صورتی که به دلیل یکنواخت نبودن سیستم ساختمانی دکسترین‌ها، وزن مولکولی آنها پایین است. دکسترین در اثر تجزیه نشاسته بدست می‌آید و به عنوان تنظیم کننده و بازداشت کننده استفاده می‌شود. در این تحقیق از دکسترین برای بازداشت مولیبدن در فلوتاسیون مس - مولیبدن استفاده شده است. نشاسته‌ها و دکسترین‌ها دارای فرمول کلی  $(C_6H_{12}O_5)_n$  هستند (رضایی، ۱۳۷۸).

### ۳-۴-۴. تنظیم کننده‌ها

pH در فرآیند فلوتاسیون تأثیر زیادی دارد که مطالعه و بررسی آن از مهم‌ترین پارامترهای اساسی در فلوتاسیون است. برای فلوتاسیون هر کانی pH بهینه‌ای وجود دارد که تحت آن شرایط بازیابی فلوتاسیون ماکزیمم می‌شود. بنابراین با تنظیم pH می‌توان به جدایش مطلوب دست یافت. موادی که برای تنظیم pH مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از آهک، کربنات سدیم، خاکستر سودا و یا هیدرواکسید آمونیوم (رضایی، ۱۳۷۸). در کارخانه مس سونگون نیز آهک را به صورت شیر آهک درست کرده و برای تنظیم pH به پالپ اضافه می‌کنند. آهک علاوه بر تنظیم کننده pH به عنوان بازداشت کننده پیریت نیز کاربرد دارد. در واقع این امر سبب پایداری بیشتر کف و توانایی بهتر کف در حمل ذرات، برای بیشتر کانسارهای مس می‌شود. مقدار آهک مصرفی با توجه به شناوری مس در pHهای مختلف و شناوری ذرات میانی (بزرگتر از ۲۰۰ میکرون) که با افزایش pH بیشتر می‌شود، بستگی دارد. بازداشت پیریت در کانسارهای پورفیری شامل کالکوسیت در pH نسبتاً بالا (بالای ۱۱/۵) روی می‌دهد، در حالی که در کالکوپیریت این امر در pH ۱۱ تا ۱۱/۵ محقق می‌شود (Bulatovic, 2007).

### ۳-۵. تجهیزات مورد استفاده

برای انجام این تحقیق از تجهیزات زیر استفاده شده که به طور خلاصه شرح داده می‌شود.

۱- **نمونه‌گیر:** با توجه به موارد ذکر شده در قسمت قبل و نیاز به نمونه‌گیر مخصوص در بعضی جریان‌ها، جهت نمونه‌برداری از نمونه‌گیرهای متناسب با هر جریان و موقعیت ناوها ساخته شد. انواع مختلف نمونه‌گیرها از نظر شکل و بدنه ساخته شد که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



شکل (۲-۳): انواع ظرف‌های نمونه‌گیر مورد استفاده

۲- **دانه‌بندی:** برای آنالیز دانه‌بندی نمونه‌ها از سرندهای آزمایشگاهی و از دستگاه سیکلوسایزر مجتمع مس سرچشمه استفاده شده است.

۳- **خردایش:** برای خرد کردن مواد معدنی از سنگ‌شکن فکی و آسیای گلوله‌ای در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شده است.

۴- **سلول‌های فلوتاسیون:** از دستگاه فلوتاسیون آزمایشگاهی مدل Denver و از سلول‌هایی با حجم‌های مختلف ۳، ۲/۵، ۱/۸، ۱/۳ لیتری استفاده شد.

۵- **تجهیزات اندازه‌گیری:** برای اندازه‌گیری pH از دستگاه pH متر و اندازه‌گیری دانسیته حجمی پالپ از دانسیته سنج هسته‌ای آزمایشگاه متالورژی مجتمع مس سونگون استفاده گردید.

۶- **آنالیز شیمیایی:** برای آنالیز نمونه‌ها از دستگاه<sup>۹</sup> ICP-AES با مدل LIBERTY-RL ساخت شرکت Varian استرالیا که در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی کرج قرار دارد استفاده شده است. حد تشخیص این دستگاه برای اکثر عناصر در حد ppb و برای بعضی عناصر ppm است.

۷- **مطالعات میکروسکوپی:** میکروسکوپ الکترونی مورد استفاده با مدل LEO1400 ساخت شرکت LEO در کشور انگلستان است. کاربرد اصلی این دستگاه تهیه تصویر با بزرگ‌نمایی حداکثر ۳۰۰۰۰۰ بار از نمونه‌های مختلف (اعم از نمونه‌های معدنی و زمین شناسی شامل مقاطع نازک و صیقلی، نمونه‌های متالورژی، نمونه‌های مربوط به مطالعات نانو، نمونه‌های بیولوژیک و ...) و انجام آنالیز نیمه کمی عناصر به همراه نمایش طیف EDS است.

### ۳-۶. روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های فلوتاسیون برای بهینه‌سازی و بررسی امکان افزایش عیار و بازیابی مولیدن در مدار مس - مولیدن در چند مرحله انجام گرفت که در هر کدام شرایط خاصی در نظر گرفته شد.

### ۳-۶-۱. آزمایش‌های شناورسازی سینتیک

برای بررسی تأثیر عوامل مختلفی مانند مقدار کف‌ساز، مقدار کلکتور، pH و درصد جامد بر کارایی عملیات فلوتاسیون، ابتدا سینتیک فلوتاسیون مس - مولیدن بررسی شد. آزمایش‌های فلوتاسیون برای برای بدست آوردن زمان بهینه فلوتاسیون مس - مولیدن در سلول آزمایشگاهی ۵ لیتری از نوع مدل دنور و دور همزن ۱۲۸۰rpm انجام شد. برای انجام این آزمایش‌ها ابتدا ماده معدنی را به درصد جامد ۳۲ (طبق فرآیند فلوتاسیون کارخانه) رسانده، پس از تنظیم pH=۱۰-۱۱ و اضافه کردن کلکتور و کف‌ساز بعد از ۴ دقیقه زمان آماده‌سازی، کنسانتره‌هایی در زمان‌های ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و

---

<sup>9</sup> Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy

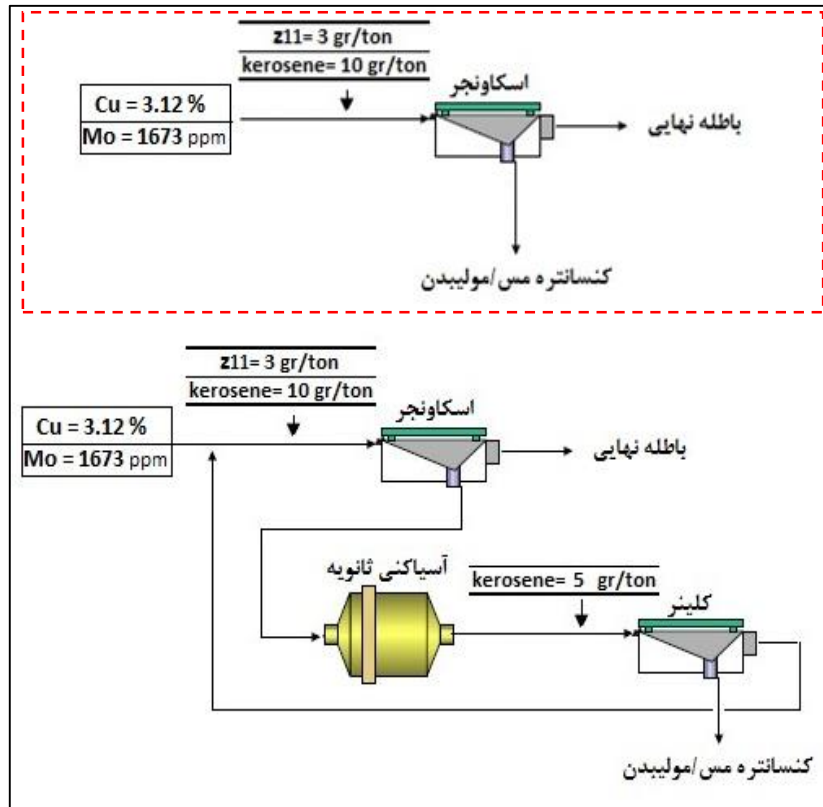
۱۰ دقیقه به صورت جداگانه تهیه و همراه با نمونه‌های خوراک و باطله، پس از خشک شدن، توزین و عیارسنجی شدند. کف‌گیری در هنگام آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون در بازه‌های زمانی ۵ ثانیه انجام شد. جهت تنظیم درصد جامد از آب برگشتی کارخانه استفاده شد. سپس با روش کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا، مقدار ثابت سینتیک عملیات ناپیوسته شناورسازی محاسبه گردید.

### ۳-۶-۲. آزمایش‌های مرحله رافر

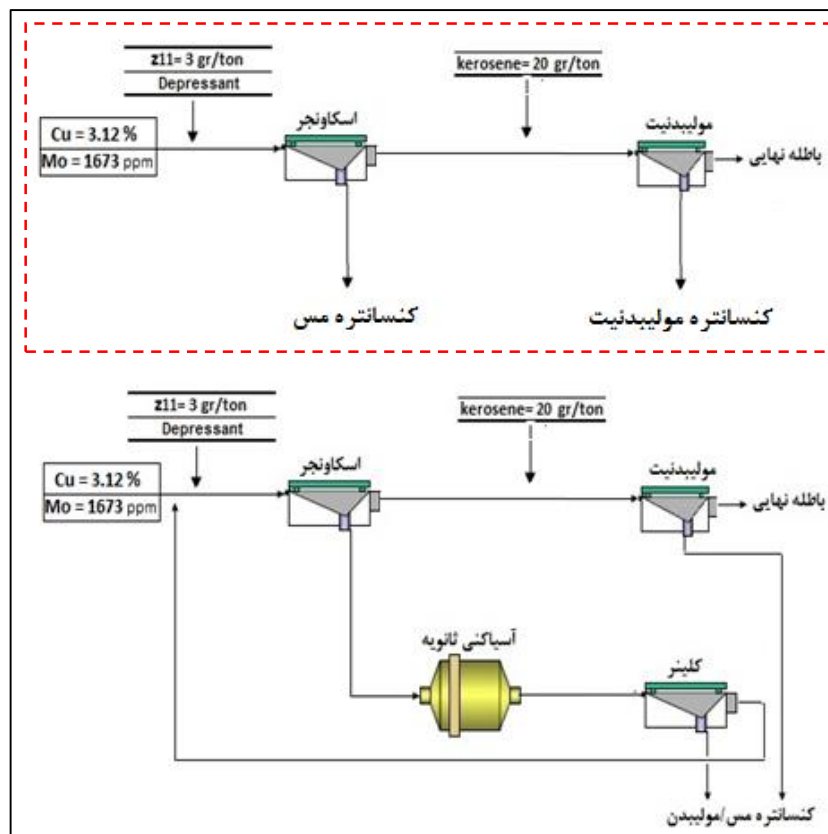
برای انجام آزمایش‌های مرحله رافر، بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، برای هر آزمایش مقدار ۱۴۰۰ گرم ماده معدنی و در سلول ۳ لیتری صورت گرفت. مقادیر مواد شیمیایی از جمله کف‌ساز و کلکتور با محاسبه شرایط عملیاتی کارخانه اضافه شدند. کلکتورهای Z11 و Flomin هرکدام به میزان ۱۳ گرم بر تن و ۱۸ گرم بر تن به ترتیب استفاده شدند. همچنین کف‌سازهای A70 و A65 به ترتیب به میزان ۱۰ گرم بر تن و ۳ گرم بر تن اضافه شدند. از گازوئیل نیز به عنوان کلکتور مولیبدن به مقدار ۱۴ گرم بر تن استفاده شد. زمان بهینه فلوتاسیون که با استفاده از آزمایش‌های سینتیکی ۴ دقیقه بدست آمد، در نظر گرفته شد. بعد از شناورسازی کنسانتره، باطله و خوراک هر یک از آزمایش‌ها توزین، خشک و آنالیز شیمیایی برای تعیین عناصر مس و مولیبدن انجام گرفت.

### ۳-۶-۳. آزمایش‌های مرحله رمق‌گیر

آزمایش‌های مرحله رمق‌گیر به دو روش صورت گرفت که در روش اول با استفاده از شرایط عملیاتی کارخانه و فقط با تغییر دور همزن و مقدار گازوئیل انجام گرفت، شکل (۲-۳) فلوشیت انجام آزمایش دور متغیر همزن را نشان می‌دهد. در روش دوم نیز با تغییر فلوشیت فعلی کارخانه و استفاده از بازداشت کننده صورت گرفت که شکل (۳-۳) نیز فلوشیت انجام آزمایش با استفاده از بازداشت کننده را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳): فلوشیت انجام آزمایش‌ها با تغییر دور همزن



شکل (۴-۳): فلوشیت انجام آزمایش‌ها با بازداشت کننده

## فصل چہارم

ارائہ یافتہ ها و  
تحليل نتايج

#### ۴-۱. مقدمه

در این فصل نتایج حاصل از آنالیزهای دانه‌بندی، شیمیایی، فلوتاسیون آزمایشگاهی و هم‌چنین بررسی کلی مدار و هریک از مراحل رافر، شستشو و رمق‌گیر آورده شده است. در ادامه نیز عوامل مؤثر بر فلوتاسیون مس - مولیبدن جهت افزایش عیار و بازیابی شناسایی شده‌اند. در انتهای این بخش امکان تغییر فلوشیت مدار برای بهبود بازیابی مولیبدن بررسی شده است.

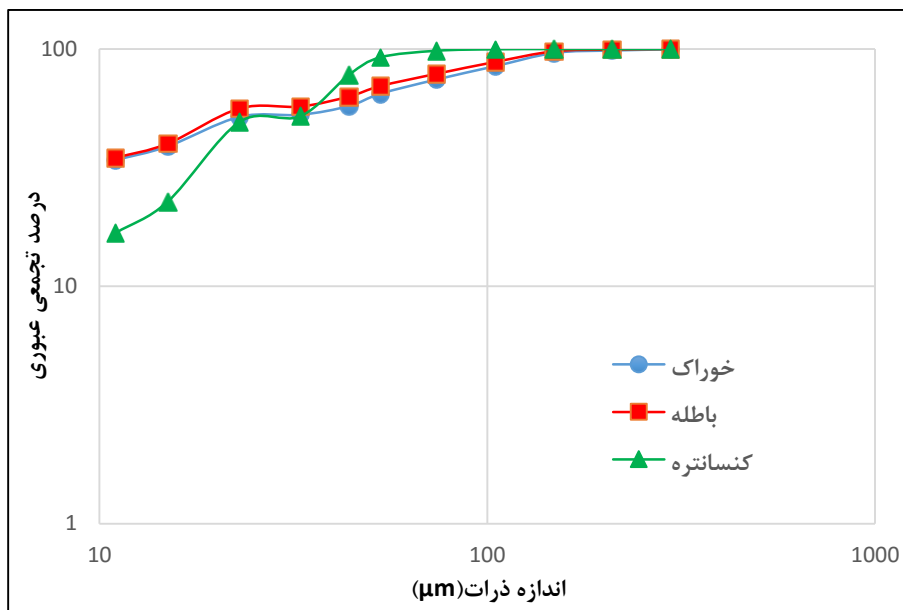
#### ۴-۲. ارزیابی شرایط فعلی کارخانه

همان‌طور که در فصل قبل بیان شد، برای بررسی شرایط عملیاتی کارخانه، نمونه‌گیری ۳ ماهه‌ای صورت گرفت تا ضمن مطالعه دقیق کارکرد هر مرحله از کارخانه، نقاط هدرروی مولیبدن نیز شناسایی شوند. به همین منظور ابتدا کل مدار را از نظر دانه‌بندی، عیار، بازیابی و کارآیی جدایش مورد بررسی قرار داده، سپس ارزیابی هر مرحله از مدار به صورت جداگانه انجام شده است.

#### ۴-۲-۱. بررسی متالورژیکی کل مدار

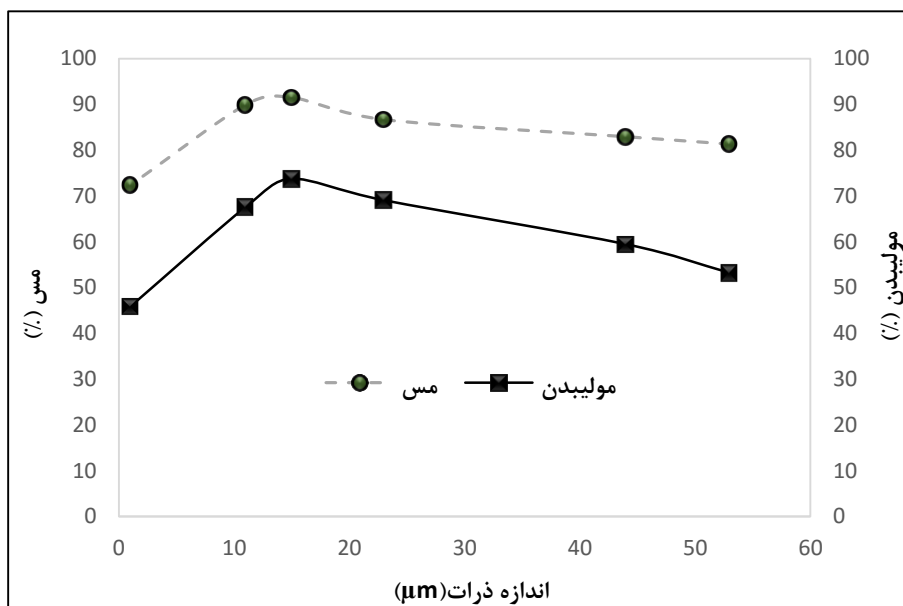
با استفاده از نتایج حاصل از آنالیزهای دانه‌بندی هر یک از نقاط خوراک، باطله و کنسانتره، نمودار دانه‌بندی برای تعیین محدوده ذرات در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار دانه‌بندی کل مدار مشخص است، خوراک کارخانه دارای اندازه درشت‌تری نسبت به باطله و کنسانتره نهایی است.  $d_{80}$  خوراک، باطله و کنسانتره به ترتیب ۸۹/۷، ۷۸/۱ و ۴۵/۴ میکرون است.



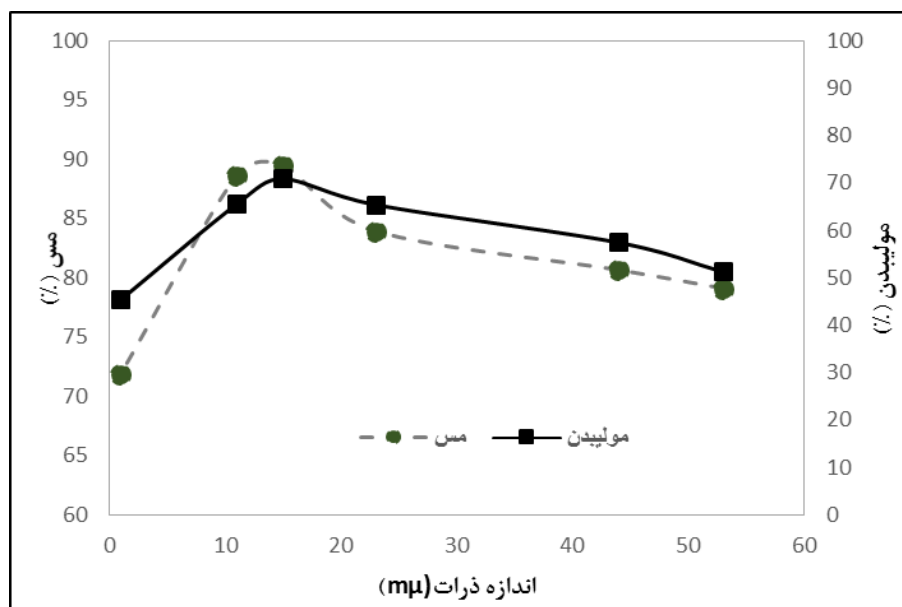


شکل (۴-۱): آنالیز دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره کل مدار

نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی نمونه‌ها، برای بدست آوردن بازیابی و کارایی جدایش در اندازه‌های مختلف برای مس و مولیبدن، در شکل‌های (۴-۲) و (۴-۳) نشان داده شده است.



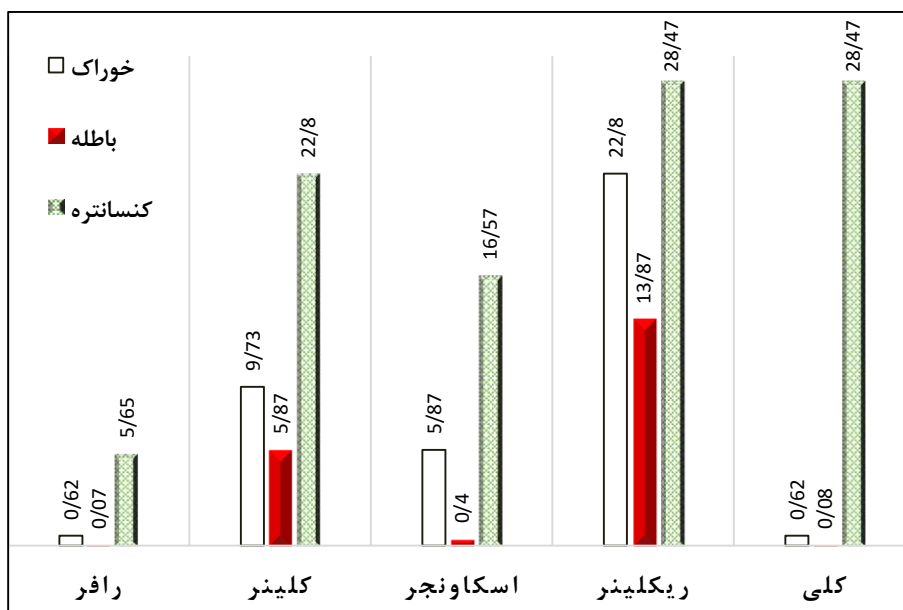
شکل (۴-۲): بازیابی ذره به ذره مس و مولیبدن در کل مدار



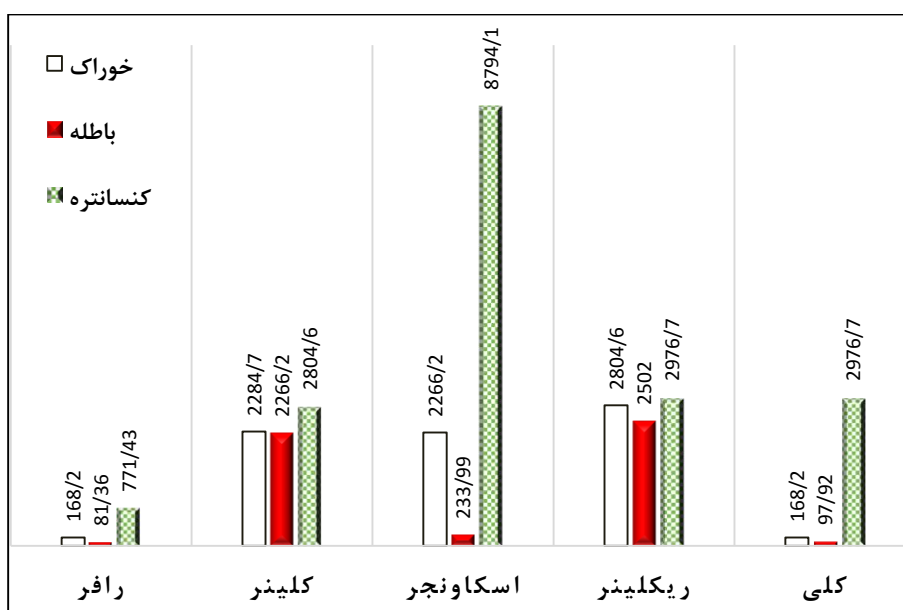
شکل (۳-۴): کارآیی جدایش ذره به ذره مس و مولیبیدن در کل مدار

همان‌طور که در نمودارهای فوق دیده می‌شود، کمترین بازیابی و کارآیی جدایش در ذرات ریز و درشت حاصل می‌شود. دلیل این امر در ذرات درشت می‌تواند به دلیل آزاد نشدن کافی و قفل شدگی ذرات باشد و در ذرات ریز این رفتار به دلیل ایجاد نرمة و ناتوانی فرآیند فلوتاسیون در شناورسازی این ذرات است. اندازه ذرات متوسط در حالت کلی بازیابی قابل قبولی دارد. در بررسی کلی مدار، آگاهی از مقدار عیار و بازیابی هر یک از مرحله‌های مدار نیز ضروری است، در شکل‌های (۴-۴) و (۵-۴) عیار مس و مولیبیدن در هر مرحله از مدار نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۴-۴)، ملاحظه می‌شود که در سلول‌های شستشو، با توجه به مقدار مس موجود در خوراک، عیار قابل قبولی از مس بدست می‌آید و باطله این مرحله در سلول‌های رمق‌گیر دوباره فرآوری می‌شود. در سلول‌های رمق‌گیر علی‌رغم عیار بالای کنسانتره، باطله آن هدرروی مس بیشتری دارد. همچنین در شکل (۵-۴) نیز که عیار مولیبیدن را در واحدهای مختلف نشان می‌دهد، نکته قابل توجه وجود عیار ۳ برابری کنسانتره رمق‌گیر نسبت به کنسانتره نهایی، و عیار بالای باطله در مرحله شستشو است. بنابراین اولین نشانه از هدرروی مولیبیدن در مدار به سلول‌های شستشو و در مرتبه دوم به سلول‌های رمق‌گیر مربوط می‌شود.



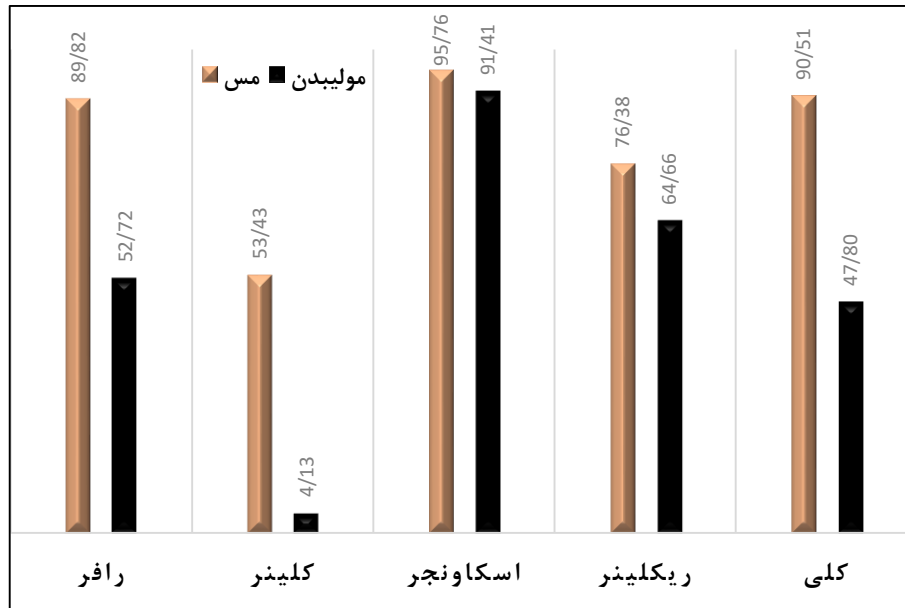
شکل (۴-۴): عیار خوراک، باطله و کنسانتره مس در هر مرحله کارخانه (%).



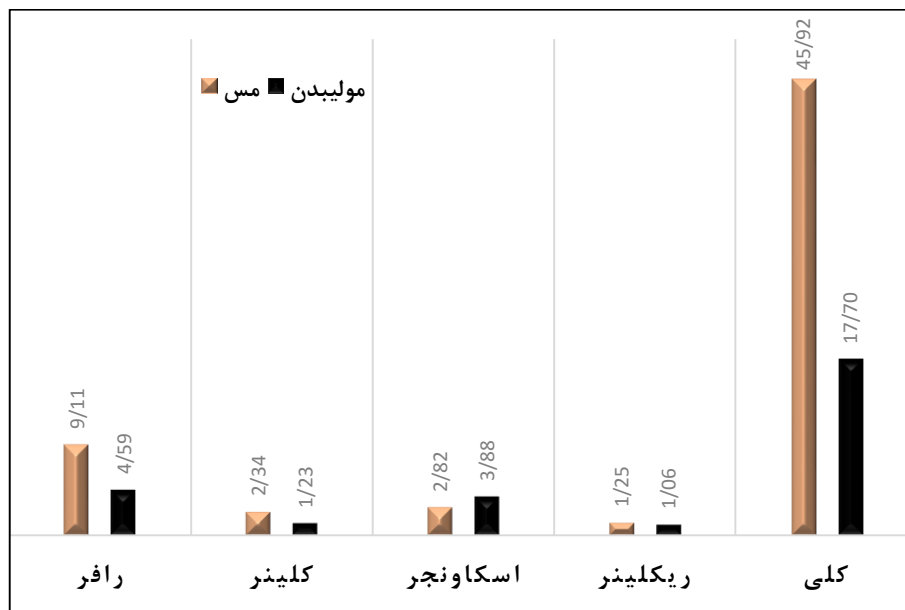
شکل (۵-۴): عیار خوراک، باطله و کنسانتره مولیبدن در هر مرحله کارخانه (ppm).

برای بررسی بیشتر و اطمینان از نتیجه بدست آمده، میزان بازیابی و نسبت غنی‌شوندگی<sup>۱۰</sup> برای مس و مولیبدن در شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) آورده شده است.

<sup>10</sup> Enrichment



شکل (۴-۶): بازیابی مس و مولیبیدن در مرحله‌های مختلف کارخانه (%).

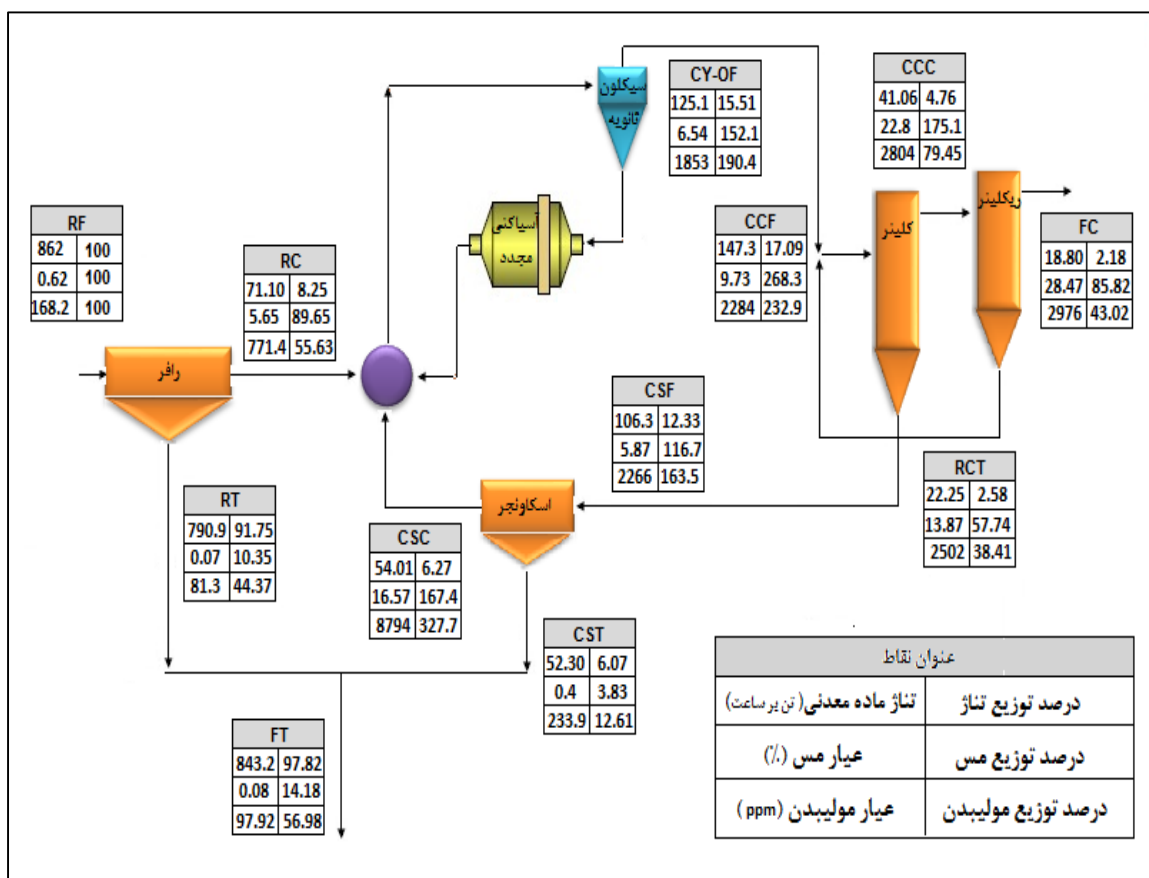


شکل (۴-۷): نسبت غنی‌شوندگی مس و مولیبیدن در مرحله‌های مختلف کارخانه

بازیابی مس و مولیبیدن در هر مرحله از مدار در همه قسمت‌ها به جز رmq گیر اختلاف قابل توجهی با یکدیگر دارند. به طوری که این اختلاف در سلول‌های شستشو به بیشترین مقدار یعنی حدود ۴۹ درصد می‌رسد و در حالت کلی نیز نزدیک به ۴۲ درصد اختلاف قابل مشاهده است. در شکل (۴-۷)، نسبت

غنی‌شوندگی مراحل مختلف را نشان می‌دهد که به جز رمق‌گیر، آن هم به دلیل عیار بالای مولیبدن در کنسانتره، در سایر مرحله‌ها، نسبت غنی‌شوندگی مولیبدن کمتر از مس است، به طوری که در حالت کلی نیز نسبت غنی‌شوندگی مس، ۳ برابر مولیبدن است.

پس از بدست آمدن نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های ۳ ماهه، با استفاده از نرم افزار موازن، کل مدار کارخانه براساس بازیابی وزنی و عیاری موازنه شد که در شکل (۴-۸) نتایج بدست آمده از موازنه نشان داده شده است.



شکل (۴-۸): فلوشیت موازنه مدار کارخانه فرآوری مس سونگون

در شکل (۴-۸) هر یک از مراحل به صورت RF=خوراک رافر، RC=کنسانتره رافر، RT=باطله رافر، CY-OF=سرریز هیدروسیکلون ثانویه، CCF=خوراک سلول شستشو، CCC=کنسانتره سلول شستشو، CSC=باطله سلول شستشو (رمق‌گیر)، CST=باطله رمق‌گیر، CSC=کنسانتره رمق‌گیر، RCT=باطله سلول شستشوی مجدد، FC=کنسانتره نهایی و FT=باطله نهایی تعریف می‌شود.

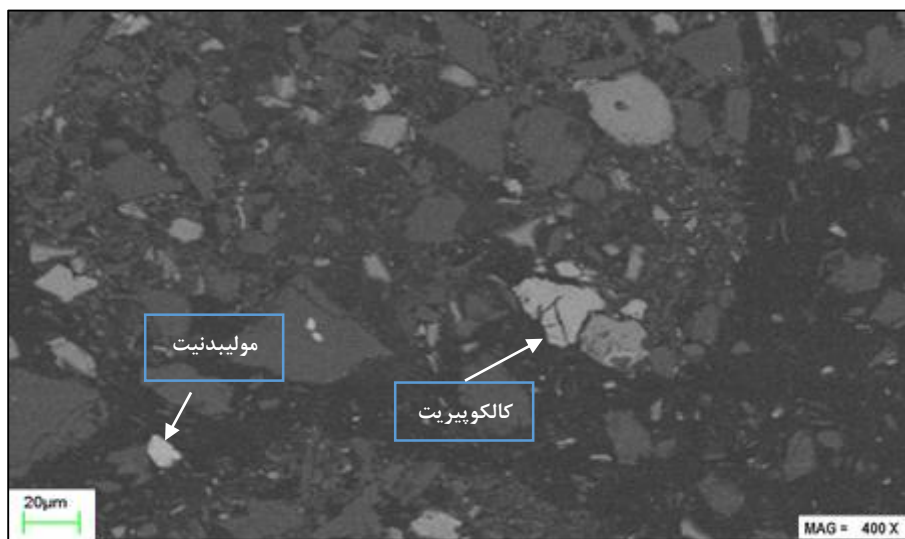
همان‌طور که در شکل (۴-۸) مشاهده می‌شود، مهم‌ترین نکته وجود درصد بالای مولیبدینت در باطله رافر است. البته همان‌طور که در فصل اول نیز ذکر شد، بیشترین هدرروی مولیبدین که معمولاً تا ۴۸٪ نیز می‌تواند باشد، مربوط به مراحل اولیه (رافر) در فرآیند مس - مولیبدین است (Gupta, 1992). بنابراین در کارخانه مس سونگون باطله رافر ۳۵/۱۰٪ مس و ۳۷/۴۴٪ مولیبدین از کل مس و مولیبدین موجود در خوراک را به خود اختصاص می‌دهد. از دیگر نقاط هدرروی قابل مشاهده در شکل (۴-۸)، باطله رمق گیر با ۸۳/۳٪ مس و ۶۱/۱۲٪ مولیبدین است که در حالت کلی و با ترکیب باطله رافر، باطله نهایی حاوی ۱۴/۱۸٪ مس و ۹۸/۵۶٪ مولیبدین از کل مس و مولیبدین موجود در خوراک است.

نکته قابل توجه دیگر در موازنه مدار، وجود عیار بالای مس و بخصوص مولیبدین در مراحل میانی مدار است که معمولاً به صورت بار در گردش دیده می‌شود. به طوری که این حالت در سلول‌های رمق‌گیر به بیشترین مقدار خود یعنی ۴/۱۶۷٪ مس و ۷/۳۲۷٪ مولیبدین می‌رسد و عیار موجود در این مرحله ۵۷/۱۶٪ مس و ۸۷۹ ppm مولیبدین است و این در حالی است که مولیبدین موجود در کنسانتره نهایی، تقریباً یک چهارم مولیبدین موجود در کنسانتره رمق‌گیر بدست آمده است. همچنین وجود درصد بالای مولیبدین در باطله شستشو عاملی بر بوجود آمدن بار در گردش مس و مولیبدین در مراحل بعد از سلول‌های شستشو است.

بنابراین با توجه به نتایج موازنه مدار، استنباط می‌شود که در مراحل میانی و بویژه در شستشو و رمق‌گیر می‌توان با لحاظ شرایط بهینه و همچنین روش‌های غیر از روش معمول موجود در کارخانه به بیشترین عیار و بازیابی مولیبدین دست یافت. به طوری که اگر بتوان به عیاری برابر با حتی نصف عیار موجود در کنسانتره رمق‌گیر دست یافت، از نظر راندمان تولید و صرفه اقتصادی نتایج قابل توجهی حاصل خواهد شد. بنابراین بعد از مشخص شدن اختلاف عیار و بازیابی مس با مولیبدین در حالت کلی، و اینکه بیشترین هدرروی مولیبدین در باطله شستشوها و رمق‌گیر روی می‌دهد، هر یک از مرحله‌ها به صورت جداگانه بررسی می‌شوند.

#### ۲-۲-۴. نتایج حاصل از مطالعات کانی‌شناسی مدار

به منظور بررسی کانی‌شناسی هر یک از مرحله‌های مدار، مطالعات میکروسکوپی از مقاطع صیقلی انجام گرفت. با توجه به اینکه کانی مولیبدنیت در بررسی‌های میکروسکوپی از کلیه کانی‌های فلزی مشخص‌تر بوده و در نور انعکاسی دارای رفلکس خیلی شدید سفید خالص متمایل به خاکستری بوده و در نور پلاریزه بدون اینکه رنگ خاصی از خود نشان دهد دارای رفلکس خیلی شدید است. مولیبدنیت در زیر میکروسکوپ دارای دو تقسیم‌بندی از نظر شکل ظاهری می‌باشد که عبارتند از: مولیبدنیت توده‌ای و مولیبدنیت تیغه‌ای. به‌همین منظور از نمونه‌های خوراک، باطله و کنسانتره کارخانه مقطع صیقلی تهیه و از آنها با دستگاه SEM تصویربرداری به عمل آمد که در شکل‌های (۹-۴)، (۱۰-۴)، (۱۱-۴) و (۱۲-۴) نشان داده شده است.



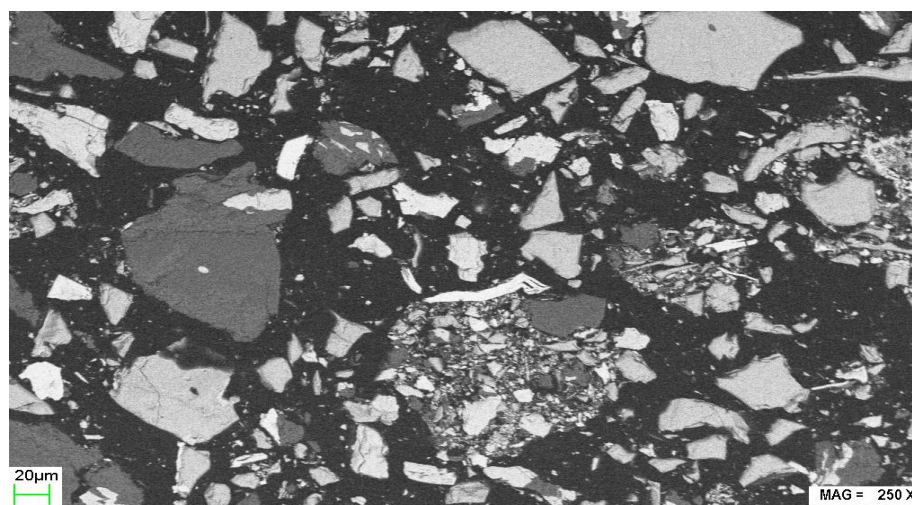
شکل (۹-۴): تصویر SEM از خوراک کارخانه



شکل (۴-۱۰): تصویر SEM از باطله رافر کارخانه



شکل (۴-۱۱): تصویر SEM از باطله نهایی کارخانه



شکل (۴-۱۲): تصویر SEM از کنسانتره نهایی کارخانه



مطالعه مقاطع و تصاویر SEM نمونه‌های باطله نهایی کارخانه، نشان داد که نمونه ذرات آزاد مولیبدنیت در باطله وجود دارد که این ذرات آزاد مولیبدنیت به دلیل اندازه ابعاد خیلی ریزتر، به سختی و در بزرگ‌نمایی‌های بالا قابل مشاهده است. در اکثر موارد هم در اثر قفل شدگی با پیریت و سیلیس به باطله منتقل می‌شوند. نمونه‌های آزاد مولیبدنیتی که در باطله دیده می‌شوند به دلیل پوشش اکسیدی و نرم‌ای سطح آنها است که به باطله منتقل می‌شوند. در اکثر مقاطع میکروسکوپی مشاهده شد که مولیبدنیت‌های آزاد موجود در باطله به صورت تیغه‌ای بوده که به علت تماس با حباب هوا و ترک‌اندن آنها، شناور نمی‌شوند. ذرات ریز به علت داشتن سطح مخصوص بیشتر، مصرف مواد شیمیایی بیشتر نسبت به سایر ذرات مصرف دارند. هم‌چنین ابعاد خیلی درشت آزاد در باطله به دلیل سنگینی و ذرات مولیبدنیت قفل شده نیز به خاطر اتصال از سمت ذرات آبدوست، حباب‌ها از شناوری و حمل آنها ناتوان بوده و نمی‌توانند به فاز کف انتقال یافته و سبب افت بازیابی می‌شوند.

هم‌چنین نتایج حاصل از مطالعات کانی‌شناسی با استفاده از آنالیز XRD بخش‌های خوراک رافر، باطله رافر، باطله رمق گیر، باطله نهایی و کنسانتره نهایی در جدول (۴-۱) آورده شده است که درصد وزنی کانی‌های فلزی، مجموع کانی‌های اکسیدی و غیر فلزی را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۱): درصد وزنی کانی‌های موجود در مرحله‌های مختلف مدار

کانی‌های اکسیدی	کانی‌های غیرفلزی	کانی‌های فلزی							واحدها
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnS	MoS <sub>2</sub>	FeS <sub>2</sub>	CuFeS <sub>2</sub>	CuS	Cu <sub>2</sub> S	
۰/۰۰	۹۱/۰۶	۰/۲۶۳	۰/۰۸۱	۰/۰۴۸	۷/۳۷۹	۰/۸۰۴	۰/۰۸۹	۰/۲۶۶	خوراک رافر
۰/۰۶۳	۹۵/۷۴	۰/۲۶۷	۰/۰۳۹	۰/۰۱۷	۳/۵۲۶	۰/۰۵۷	۰/۰۲۰	۰/۰۱۴	باطله رافر
۰/۲۹۶	۶۷/۸۰۳	۰/۱۹۲	۰/۰۷۷	۰/۰۴۵	۳۰/۸۸	۰/۱۱۵	۰/۲۵۸	۰/۰۰	باطله رمق گیر
۰/۰۵۳	۹۴/۳۳	۰/۲۲۸	۰/۰۶۵	۰/۰۱۵	۵/۰۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲۸	۰/۰۱۱	باطله نهایی
۱/۰۳۵	۱۱/۶۵۱	۰/۴۵۰	۱/۰۰۸	۰/۶۲۲	۳۴/۲۸	۳۹/۷۳	۳/۹۰	۷/۸۸	کنسانتره نهایی

### ۳-۴. بررسی و بهینه‌سازی مرحله رافر

همان‌طور که در فلوشیت کارخانه در فصل یک ارائه شد (شکل ۱-۱)، سرریز هیدروسیکلون‌های اولیه به عنوان خوراک سلول‌های رافر بوده و کنسانتره سلول‌های رافر نیز به مخزن آماده‌سازی و سپس به هیدروسیکلون‌های ثانویه منتقل می‌شود. باطله خروجی از این سلول‌ها نیز مستقیماً به تیکر باطله جریان می‌یابد. در شکل (۴-۱۳) نمایی از این سلول‌ها و در جدول (۴-۲) برخی از مشخصات سلول‌های رافر ارائه شده است.



شکل (۴-۱۳): نمایی از سلول‌های رافر (چپ) و سلول‌های رمق گیر (راست) (باقریان، ۱۳۸۵)

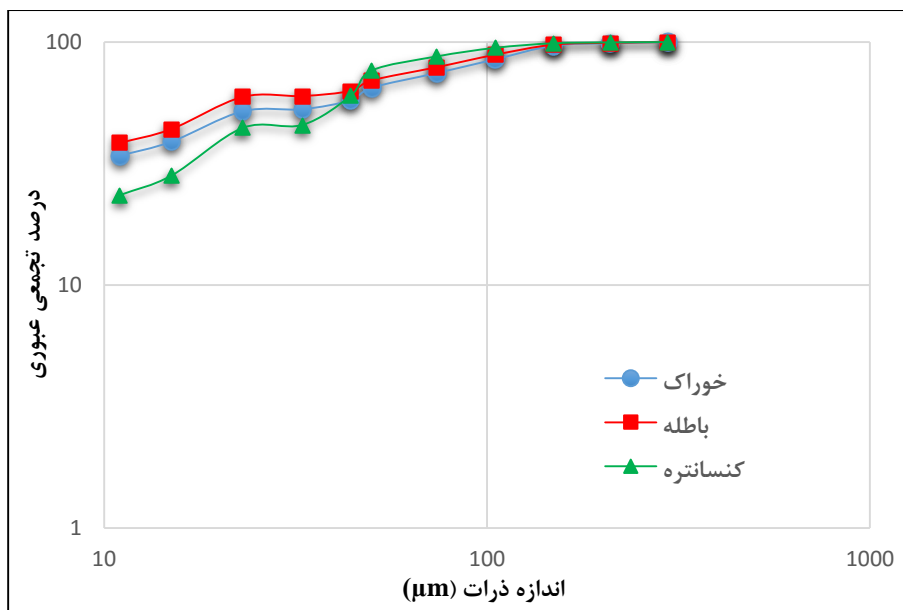
جدول (۴-۲) مشخصات فنی سلول‌های رافر (باقریان، ۱۳۸۵)

نوع سلول	RCS130	قطر	۶/۱ متر
تعداد	۱۲	ارتفاع	۵/۶۵ متر
زمان ماند	۳۳ دقیقه	سرعت چرخش پره‌ها	۱۰۴rpm

### ۱-۳-۴. بررسی کارآیی متالورژیکی سلول‌های رافر

با استفاده از نتایج حاصل از نمونه‌برداری از قسمت‌های مختلف مدار، سلول‌های رافر نیز از نظر کارآیی بررسی شدند که در شکل (۴-۱۴) نمودار دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره سلول‌های رافر را نشان می‌دهد.

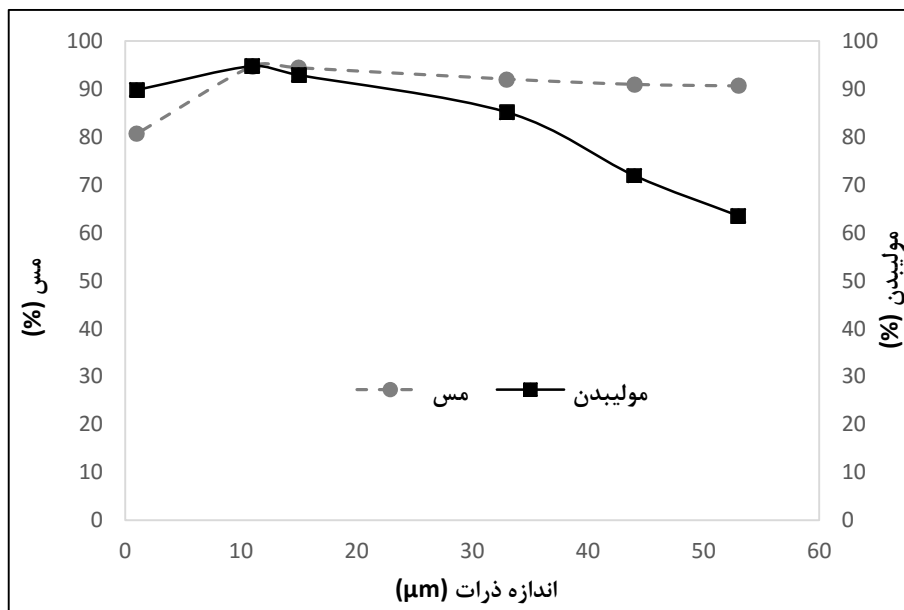
با توجه به آنالیز دانه‌بندی نمونه‌ها، ذرات با ابعاد بیشتر از ۲۳ میکرون بیشتر به کنسانتره راه پیدا کرده‌اند و ذرات ریزتر از آن به دلیل مشکلات فرآوری نرمه‌ها به باطله رفته‌اند. همچنین برای بررسی بازیابی و کارآیی جدایش ذرات در محدوده‌های ابعادی مختلف سلول‌های رافر، نمودارهای بازیابی و کارآیی جدایش هر یک از مس و مولیبدن در شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) نشان داده شده است.



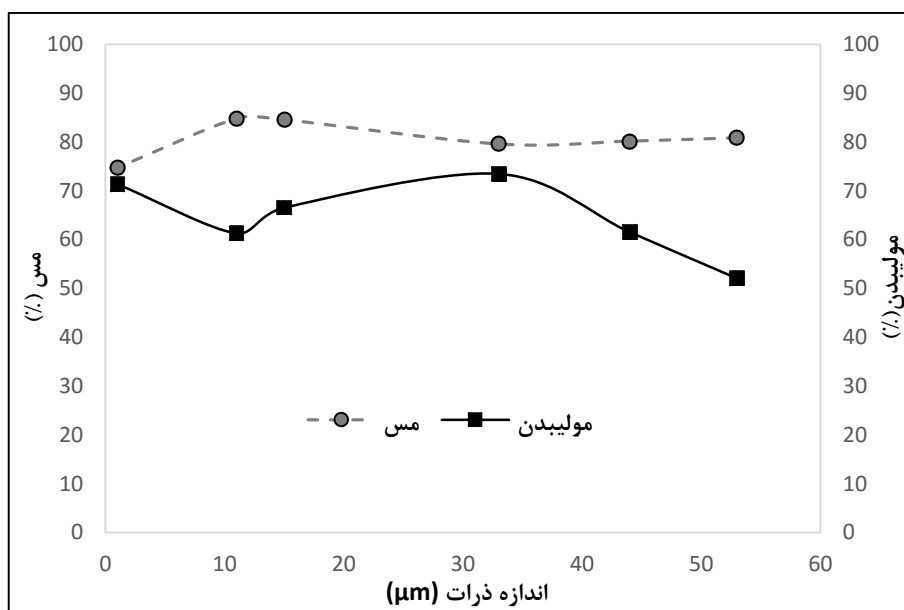
شکل (۴-۱۴): آنالیز دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره سلول‌های رافر

با بررسی بازیابی در محدوده‌های مختلف برای مس مشخص شد که ذرات با ابعاد ریزتر کمترین بازیابی و کارآیی جدایش را دارند، در حالی که ذرات مس در اندازه‌های متوسط از نظر بازیابی و کارآیی جدایش در سطح بالاتری قرار دارند. برای ذرات مولیبدن نیز اندازه ذرات خیلی ریز دارای بازیابی و کارآیی جدایش پایین‌تری بوده و ذرات درشت‌تر نیز به دلیل آزاد نشدن مولیبدن و قفل شدگی با پیریت و سیلیس به باطله راه یافته و بازیابی آن پایین می‌باشد. بنابراین بهترین محدوده ابعادی برای مولیبدن،

ذرات متوسطی هستند که دارای درجه آزادی مناسب و پوشش اکسیدی و نرمه‌ای آن نیز کمتر است. همان‌طور که در شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) دیده می‌شود در اندازه ابعاد ۱۱ میکرون در حال که ذرات مولیبدن دارای بیشترین بازیابی است اما کارآیی جدایش آن به دلیل انتقال نرمه‌ها به کنسانتره کمتر می‌باشد.



شکل (۴-۱۵): بازیابی ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله رافر



شکل (۴-۱۶): کارآیی جدایش ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله رافر

بنابراین برای رسیدن به بهترین بازیابی در این مرحله می‌توان به بهینه کردن عواملی مانند اندازه ذرات، مواد شیمیایی و درصد جامد و pH اشاره کرد که در بخش‌های بعدی به آن‌ها پرداخته می‌شود. در جدول (۳-۴) نیز برخی از اطلاعات مرحله رافر نشان داده شده است.

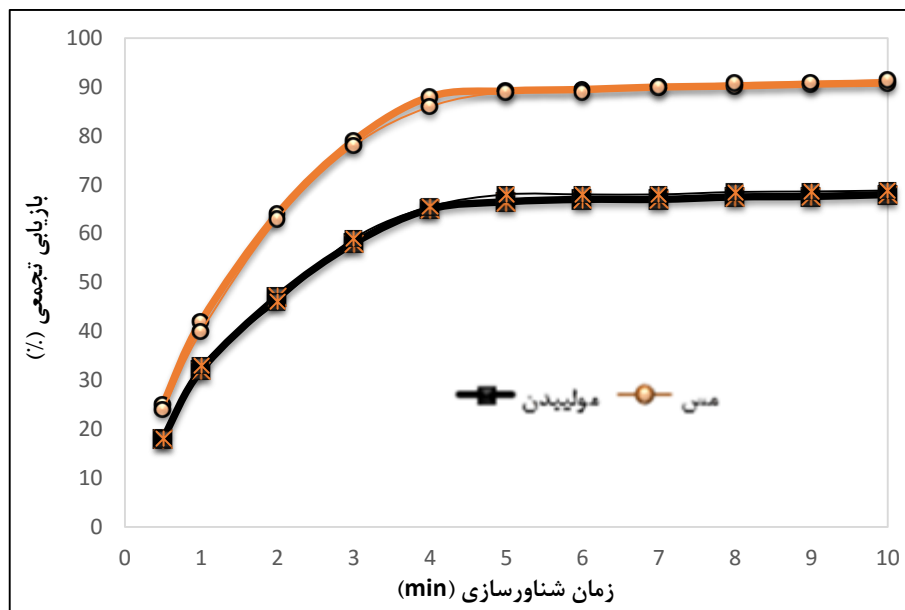
جدول (۳-۴): اطلاعات مربوط به مرحله رافر

وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	مقدار جامد (%)	D <sub>80</sub> (μm)	واحدهای مدار
۲/۷۸	۳۴/۱۱	۸۹/۷	خوراک
۲/۷۲	۳۳/۴	۷۷/۶	باطله
۳/۷۳	۲۸/۶۷	۵۹/۵	کنسانتره

#### ۲-۳-۴. تعیین سینتیک فلوتاسیون مس و مولیبدن

آزمایش سینتیک برای تعیین نرخ شناوری مس و مولیبدن در طی دو مرحله تکرار انجام گرفت که نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است. در مطالعه روند شناورسازی ذرات، مقدار ثابت نرخ فلوتاسیون (K) که به اندازه ذرات، درجه آزادی، دانسیته پالپ، ساختار ذرات و میزان تلاطم بستگی دارد، از اهمیت زیادی برخوردار است (حسن زاده محله، ۱۳۹۱). با توجه به شرایط آزمایش سینتیکی انجام شده، ثابت نرخ فلوتاسیون مس و مولیبدن، با استفاده از روش کمینه‌سازی مجموع مربعات تفاضل بازیابی حاصل از آزمایش و بازیابی محاسباتی با فرض K و R<sub>∞</sub> (بازیابی بعد از زمان طولانی) و فرمول (۴-۱) محاسبه و برای هر دو مس و مولیبدن برابر با K=۰/۶۰۹ بدست آمد. هم‌چنین زمان بهینه آزمایش‌های فلوتاسیون طبق نمودار سینتیکی و با در نظر گرفتن بیشترین بازیابی مس و مولیبدن، ۴ دقیقه انتخاب شد.

$$R=R_{\infty}(1-e^{-kt}) \quad (۴-۱)$$

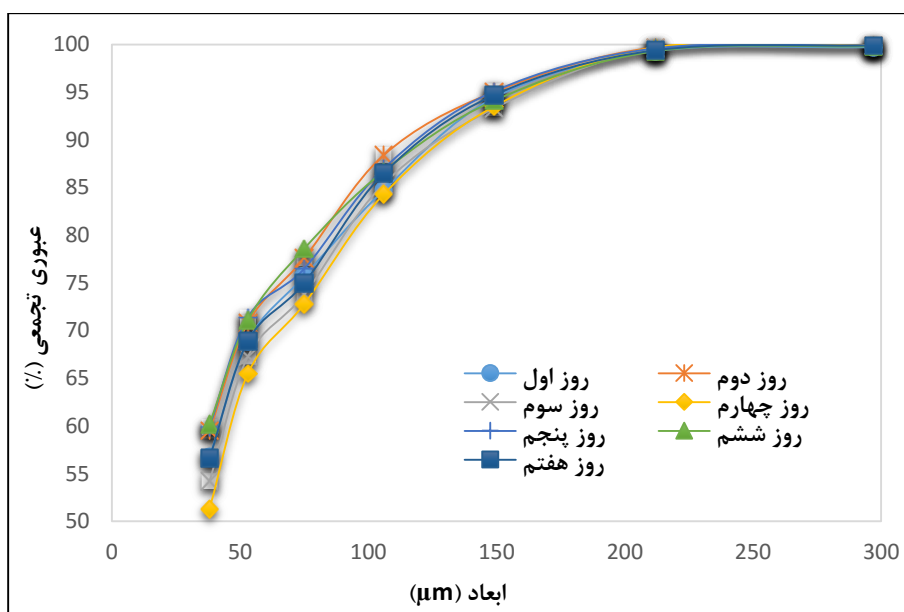


شکل (۴-۱۷): نتایج آزمایش‌های سینتیکی مس و مولیبیدن

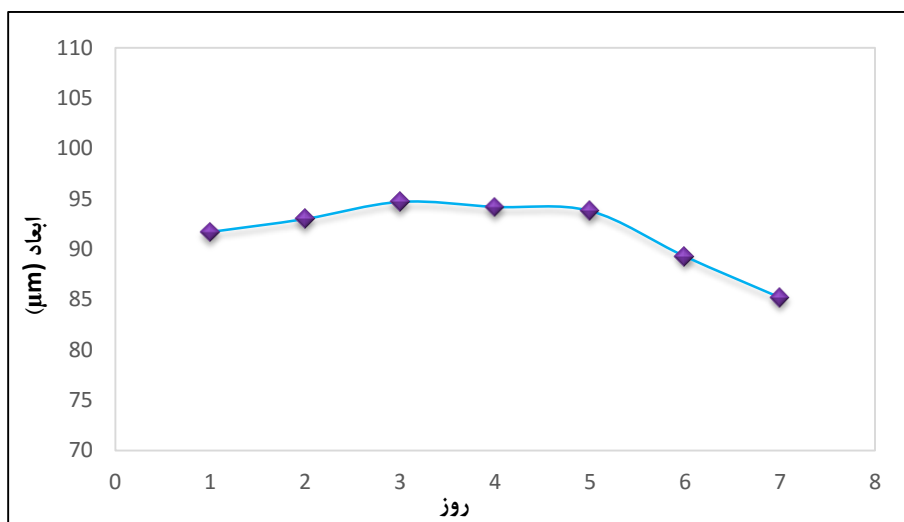
#### ۴-۳-۳. تأثیر خردایش بر عملکرد فلوتاسیون

عملیات خردایش بیشترین انرژی مصرفی در آرایش مواد معدنی را شامل می‌شود و معمولاً تا ۵۰٪ انرژی مصرفی کارخانه را به خود اختصاص می‌دهد. آزادی کانی‌های با ارزش تا حدی انجام می‌شوند که کانی با ارزش و باطله به طور مناسب از هم جدا شوند. البته خردایش بیش از حد سبب تولید ذرات بسیار ریز یا نرمه، که اغلب به عنوان باطله محسوب شده و سبب اتلاف انرژی و هدرروی کانی با ارزش می‌شود (قره داغی، ۱۳۸۹). اگر نرمه‌های تولید شده، از جنس باطله باشند و ذرات با ارزش را پوشش دهند باعث بازداشت کانی‌های با ارزش به صورت طبیعی می‌شوند. و در صورتی که نرمه‌ها از جنس ذرات با ارزش باشند، موجب افزایش مصرف مواد شیمیایی شده و با پوشش دادن ذرات باطله، عیار محصول نهایی را کاهش می‌دهند. به دلیل اهمیت ابعاد ذرات در سلول‌های فلوتاسیون، از خوراک ورودی به مدار فلوتاسیون مس - مولیبدن طی یک هفته در شرایط پایدار مدار سونگون نمونه‌برداری شد و آنالیز دانه‌بندی ذرات برای نمونه‌های گرفته شده انجام شد که نتایج آن در شکل (۴-۱۸) نشان داده شده است. میانگین  $d_{80}$  نمونه‌ها ۹۱ میکرون با انحراف معیار ۲/۵۵ میکرون بدست آمد (شکل (۴-۱۹)).

با توجه به شکل (۴-۱۹) مشاهده می‌شود که خوراک ورودی به مدار فلوتاسیون در روزهای مختلف دارای ابعاد متفاوتی است به طوری که این مقدار از ۸۷ تا ۹۶ میکرون ( $91/5 \pm 4/5$ ) تغییر می‌کند که نشان دهنده تغییرات زیاد در ابعاد محصول تولیدی خردایش روزهای مختلف است. بعد از مشخص کردن  $d_{80}$  میانگین کارخانه، نمونه برداشت شده از خوراک کارخانه توسط سنگ‌شکن فکی و آسیای گلوله‌ای با در نظر گرفتن  $d_{80}$  مورد نظر (۹۱ میکرون) خرد شده و بعد از آنالیز سرندی خوراک آزمایش - های فلوتاسیون در دانه‌بندی‌های مختلف آماده شدند.

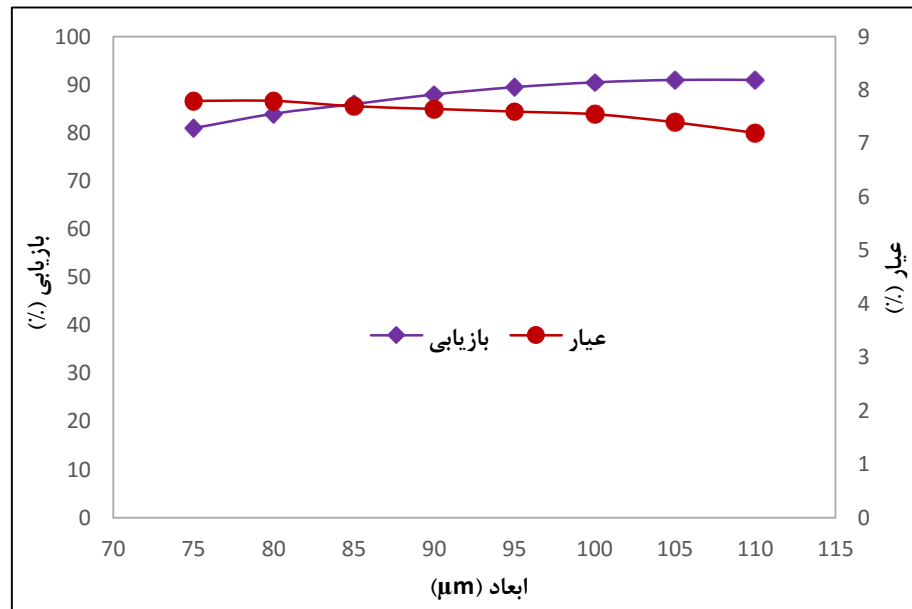


شکل (۴-۱۸): آنالیز دانه‌بندی نمونه‌های خوراک

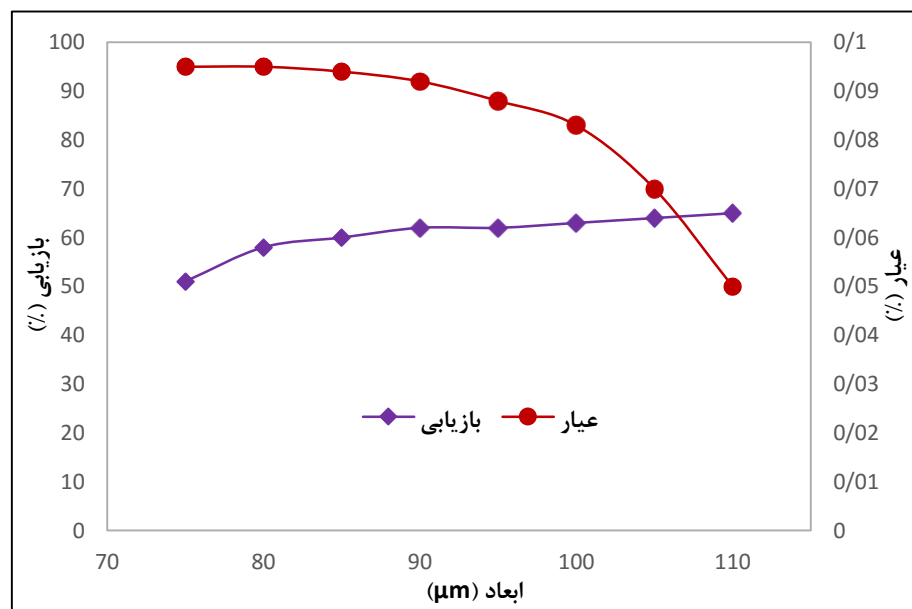


شکل (۴-۱۹): تغییرات  $d_{80}$  نمونه‌های خوراک

برای نشان دادن تأثیر خردایش بر عیار و بازیابی مس و مولیبدن، آزمایش‌های فلوتاسیون با اندازه‌های خوراک متفاوت ( $d_{80}$ ) انجام شد که نتایج آن در شکل‌های (۴-۲۰) و (۴-۲۱) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۰): تأثیر اندازه ذرات بر عیار و بازیابی مس



شکل (۴-۲۱): تأثیر اندازه ذرات بر عیار و بازیابی مولیبدن

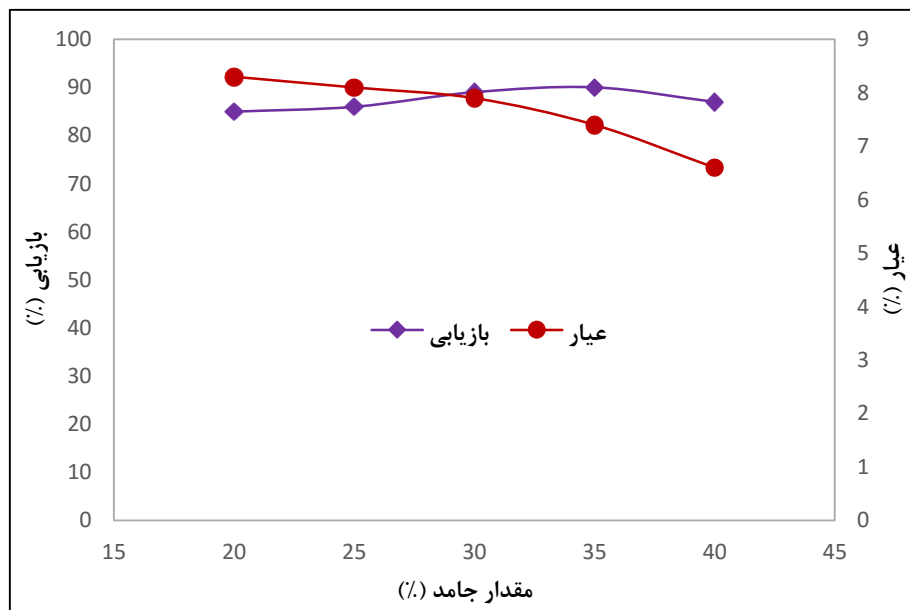


همان طور که در شکل (۴-۲۰) دیده می‌شود، بیشترین عیار و بازیابی مس در محدوده اندازه‌های ۱۰۰-۹۵ میکرون بدست می‌آید و افزایش آسیاکنی سبب هدرروی مس به صورت نرمه و کاهش کارایی فلوتاسیون می‌باشد. همچنین در شکل (۴-۲۱) تأثیر اندازه ذرات بر روی فلوتاسیون مولیبدن نیز دیده می‌شود که در آن مولیبدن نسبت به مس از حساسیت بیشتری به خردایش برخوردار است و بیشترین عیار و بازیابی مولیبدن در اندازه کمتر از  $d_{80}$  میانگین کارخانه (تقریباً ابعاد ۹۵-۸۵ میکرون) رخ می‌دهد. بنابراین با توجه به کمترین تلفات مس و عیار مولیبدن ابعاد بهینه خردایش ۹۵ میکرون بدست آمد. بنابراین تأثیر منفی اندازه ذرات بر کارایی فلوتاسیون در محدوده‌های ابعادی بسیار ریز و بسیار درشت مشاهده می‌شود.

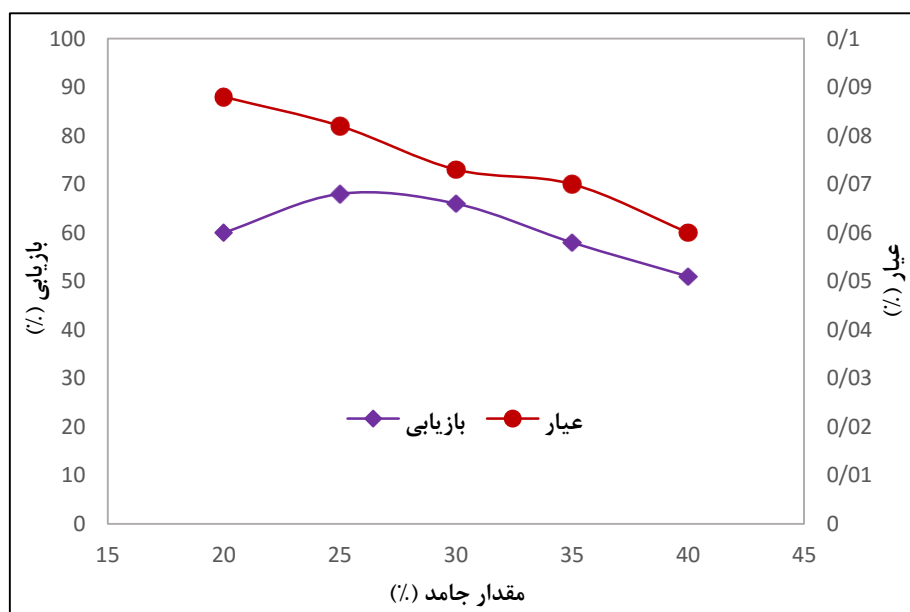
#### ۴-۳-۴. تأثیر غلظت پالپ بر عیار و بازیابی در فلوتاسیون مس و مولیبدن

غلظت پالپ که به صورت درصد جامد در پالپ ارائه می‌شود که یک پارامتر مهم برای فلوتاسیون به شمار می‌رود. با توجه به اندازه و چگالی ذرات جامد، غلظت بحرانی پالپ در فلوتاسیون برای هر ماده معدنی متفاوت است. درصد جامد در سلول‌های فلوتاسیون نقش مهمی را در ظرفیت و همچنین مکانیزم شناورسازی دارد. هرچه درصد جامد بیشتر باشد، به همان نسبت ظرفیت و سرعت شناورسازی نیز افزایش ولی عیار کنسانتره کاهش می‌یابد (رضایی، ۱۳۷۸). بازیابی مولیبدن در سلول‌های پرعیارکنی اولیه و رمق‌گیری، با کاهش درصد جامد، افزایش می‌یابد. رفتار هیدرودینامیکی ذرات ورقه‌ای مولیبدن می‌تواند توجیه‌کننده افزایش بازیابی ذرات مولیبدن با کاهش درصد جامد باشد (Zanin et al., 2009). کاهش درصد جامد باعث افزایش ویسکوزیته و نیز درجه برخورد ذرات به حباب می‌شود. به دلیل اهمیت درصد جامد در فرآیند فلوتاسیون، تأثیر غلظت پالپ در مرحله رافر بر روی عیار و بازیابی مس و مولیبدن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌های فلوتاسیون در شکل‌های (۴-۲۲) و (۴-۲۳) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۴-۲۲) مشاهده می‌شود بالاترین بازیابی در درصد جامدهای بین ۳۰ تا ۳۵ و بالاترین عیار نیز در درصد جامد ۳۰ حاصل می‌شود. بنابراین با افزایش درصد جامد، عیار و بازیابی هر دو پایین می‌آیند. هم‌چنین نتایج شکل (۴-۲۳) نشان می‌دهد که بالاترین مقدار عیار و بازیابی مولیبدن در درصد جامد ۲۵ بدست می‌آید. بنابراین با توجه به در نظر گرفتن هر دو مس و مولیبدن، درصد جامد بهینه در این تحقیق ۲۵ بدست آمد.



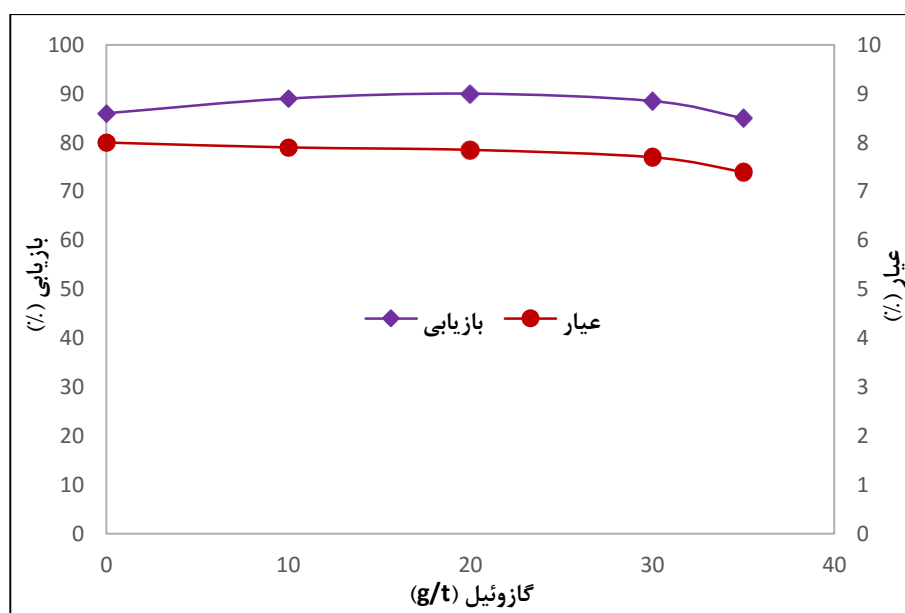
شکل (۴-۲۲): تأثیر درصد جامد بر عیار و بازیابی مس



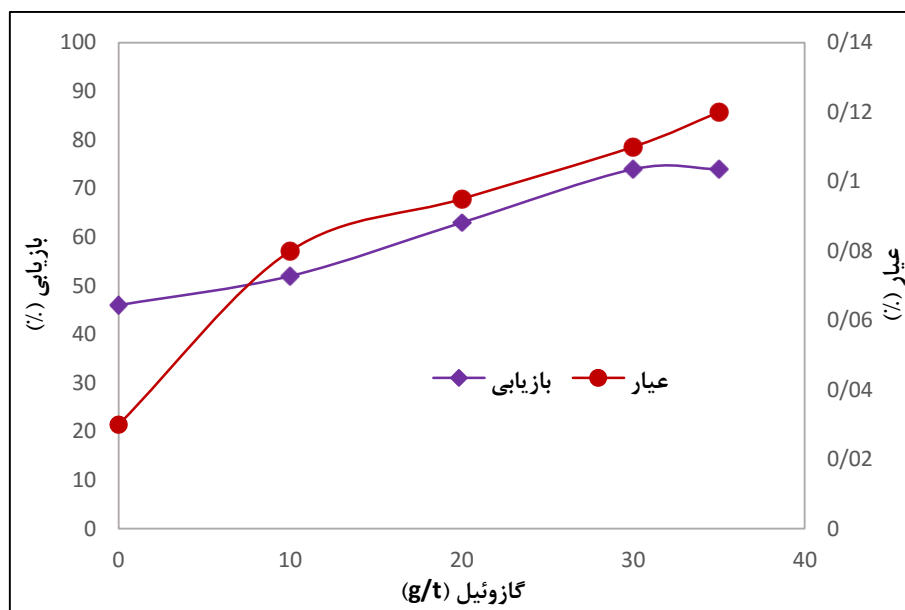
شکل (۴-۲۳): تأثیر درصد جامد بر عیار و بازیابی مولیبدن

### ۴-۳-۵. تأثیر مقدار گازوئیل بر عیار و بازیابی در فلوتاسیون مس و مولیبدن

یکی از مهم‌ترین موارد در فلوتاسیون مس - مولیبدن میزان و نوع مواد شیمیایی است که در کارخانه‌های فرآوری مورد توجه قرار می‌گیرد. از جمله این مواد شیمیایی می‌توان به سوخت‌های نفتی اشاره کرد که به عنوان کمک کلکتور برای فعال کردن مولیبدنیت در مدار فلوتاسیون مس - مولیبدن به کار می‌روند. امروزه در بیشتر کارخانه‌های فرآوری از گازوئیل به عنوان یک هیدروکربن طبیعی، به دلیل ارزان بودن و قدرت انتخابیت خوب مولیبدنیت نسبت به دیگر هیدروکربن‌ها مثل نفت سفید استفاده می‌شود. در این تحقیق برای بررسی تأثیر مواد شیمیایی بر روی فلوتاسیون مس - مولیبدن، با ثابت در نظر گرفتن مقدار کلکتورها و کف‌سازها بر اساس شرایط کارخانه به ترتیب ۳۱ و ۱۲ گرم بر تن، درصد جامد بهینه (۲۵)، نرخ خردایش بهینه (۹۵ میکرون) و تغییر مقدار گازوئیل، آزمایش‌های فلوتاسیون انجام شدند. نتایج حاصل از تغییر مقدار گازوئیل در آزمایش‌ها برای هر یک از مواد مس و مولیبدن در شکل‌های (۴-۲۴) و (۴-۲۵) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۴): تأثیر میزان گازوئیل بر عیار و بازیابی مس



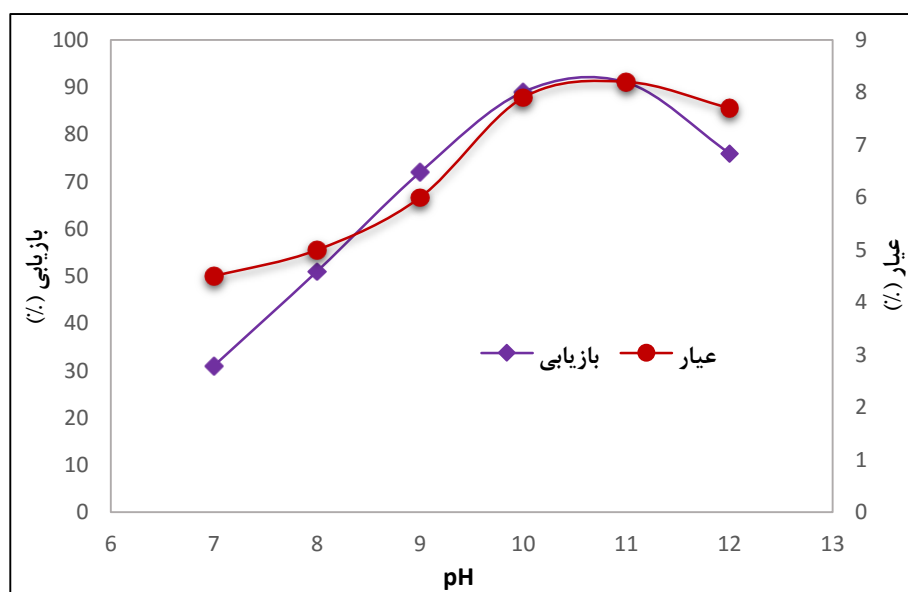
شکل (۴-۲۵): تأثیر میزان گازوئیل بر عیار و بازیابی مولیبدن

همان‌طور که در شکل (۴-۲۴) مشاهده می‌شود با افزایش میزان گازوئیل عیار و بازیابی مس در بیشتر از میزان ۲۰ گرم بر تن کاهش می‌یابد. در حالی‌که با توجه به نتایج شکل (۴-۲۵)، با افزایش میزان گازوئیل همواره میزان عیار مولیبدن افزایش می‌یابد و بازیابی نیز تا اندازه ۳۰ گرم بر تن که به عنوان میزان بحرانی تلقی می‌شود، افزایش یافته و از آن به بعد کاهش بازیابی اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه عیار و بازیابی مس در مقدار گازوئیل بیش از ۲۵ گرم بر تن کاهش محسوسی دارد، در نتیجه برای اینکه بیشترین مقدار عیار و بازیابی مس (۷/۹٪ و ۹۰٪) و مولیبدن (۱۰۵/۰٪ و ۷۱٪) حاصل شود، باید میزان گازوئیل تا ۲۵ گرم بر تن به سلول‌های فلوتاسیون اضافه شود. مصرف بیش از ۲۵ گرم بر تن گازوئیل علاوه بر کاهش عیار و بازیابی، از نظر اقتصادی نیز مناسب نبوده و موجب افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود.

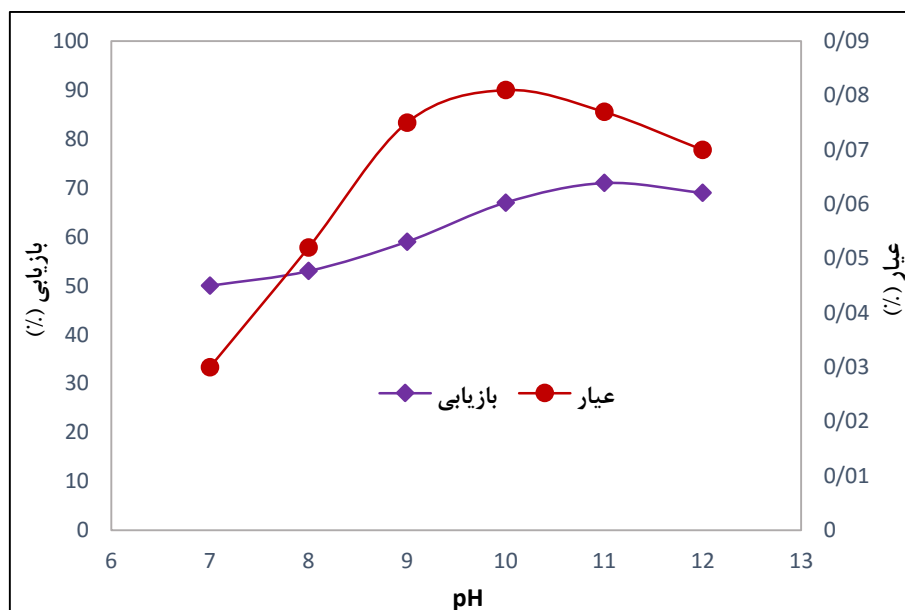
#### ۴-۳-۶. تأثیر pH بر عیار و بازیابی در فلوتاسیون مس و مولیبدن

عامل تأثیرگذار دیگر بر روی عیار و بازیابی مس - مولیبدن، pH فرآیند است که باید کنترل شود. در اکثر کارخانه‌ها از آهک به عنوان تنظیم کننده pH استفاده می‌شود. مقدار بالا و پایین بودن pH در هر

فرآیندی متغیر بوده و ممکن است هر کارخانه‌ای مقدارش کمتر یا بیشتر از کارخانه‌های دیگر باشد (قره داغی، ۱۳۸۹). در فلوتاسیون کالکوپیریت و کالکوسیت وقتی گزانتات به عنوان کلکتور استفاده می‌شود فلوتاسیون تا  $pH=10-11$  امکان‌پذیر است. بالاتر از این مقدار به نظر می‌رسد لایه آبران علاوه بر لایه شیمیایی گزانتات مس لایه دی‌گزانتوژن نیز باشد، زیرا دی‌گزانتوژن در  $pH$  حدود ۱۱ پایدار نیست و بازداشت کالکوپیریت در  $pH$  بالای ۱۱ حتمی است (رضایی، ۱۳۷۸). مولیبدنیت دارای پتانسیل زتای منفی در یک محدوده گسترده از  $pH$  است و جذب یون‌های مثبت کلسیم موجود در آهک ممکن است زاویه تماس یا شناورسازی ذرات مولیبدن را کاهش دهند. یون‌های کلسیم در حقیقت ممکن است یک پل ارتباطی بین مولیبدن و ذرات سیلیکات شود و این مکانیزم نیز می‌تواند با فلوتاسیون ماده معدنی با سطح گانگ و یون‌های حل شده در ارتباط باشد (Zanin et al., 2009). برای بررسی تأثیر میزان  $pH$  بر روی فلوتاسیون مس - مولیبدن، با ثابت در نظر گرفتن مقدار کلکتورها (۳۱ گرم بر تن)، کف‌سازها (۱۲ گرم بر تن)، درصد جامد بهینه (۲۵)، نرخ خردایش بهینه (۹۵ میکرون) و مقدار بهینه گازوئیل (۲۵ گرم بر تن)، آزمایش‌های فلوتاسیون در  $pH$  های مختلف انجام شدند. نتایج حاصل از تغییر مقدار  $pH$  در آزمایش‌ها برای هر یک از مواد مس و مولیبدن در شکل‌های (۴-۲۶) و (۴-۲۷) نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۶): تأثیر  $pH$  بر عیار و بازیابی مس



شکل (۴-۲۷): تأثیر pH بر عیار و بازیابی مولیبدن

نتایج حاصل از تأثیر pH بر روی عیار و بازیابی مس نشان می‌دهد که محدوده مناسب برای شناورسازی کانی‌های مس ۱۰-۱۱ است، به طوری که بیش از این مقدار pH موجب بازداشت کانی‌های با ارزش شده و موجب پایین آمدن عیار و بازیابی می‌شود. هم‌چنین در شکل (۴-۲۷) تأثیر تغییر pH بر روی عیار و بازیابی مولیبدن نشان داده شده است که بالاترین عیار و بازیابی مولیبدن نسبت به مس در pH پایین‌تری صورت گرفت. بنابراین برای رسیدن به بالاترین عیار و بازیابی مولیبدن و از دست ندادن مس، مقدار بهینه pH در این تحقیق ۱۰/۵-۱۰ انتخاب شد.

#### ۴-۳-۷. اعتبارسنجی نتایج بدست آمده

برای اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از مقادیر بهینه هر یک از پارامترها، آزمایش‌هایی با در نظر گرفتن مقادیر بهینه انجام شد. در این آزمایش‌ها هر یک از پارامترهای بهینه به صورت:

- ابعاد نهایی خردایش ( $d_{90}$ ): ۹۵ میکرون

- درصد جامد پالپ: ۲۵

- مقدار گازوئیل: ۲۵ گرم بر تن

- میزان pH: ۱۰/۵

- کلکتورها: ۳۱ گرم بر تن

- کف‌سازها: ۱۲ گرم بر تن

در نظر گرفته شده و آزمایش‌ها در ۳ مرحله تکرار شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول (۴-۴) نشان داده شده است.

جدول (۴-۴): نتایج آزمایش‌های اعتبارسنجی

مولیبدن		مس		مراحل
بازیابی (%)	عیار (ppm)	بازیابی (%)	عیار (%)	آزمایش‌ها
۷۰/۱۳	۹۰۳	۹۰/۸	۸/۲۲	۱
۷۱/۲۱	۸۹۰	۹۱/۱	۷/۷۵	۲
۷۱/۸۸	۸۷۶	۹۰/۹	۸/۱۶	۳

نتایج حاصل از آزمایش‌های اعتبارسنجی نشان دادند که بهترین مقدار عیار و بازیابی مس ۸/۲۲٪ و ۹۰/۸٪، و عیار و بازیابی مولیبدن ۸۹۰ ppm و ۷۱/۲۱٪ می‌باشد که نسبت به نتایج موجود در کارخانه (عیار و بازیابی مولیبدن در مرحله رافر به طور میانگین ۷۵۰ ppm و ۶۷٪) ۴/۲۱٪ برای بازیابی و با افزایش عیار به ۸۹۰ ppm، افزایش (۱۴۰ ppm) ۱۸ درصدی برای عیار را نشان می‌دهد.

#### ۴-۴. بررسی متالورژیکی سلول‌های شستشو

سلول‌های شستشو و شستشوی مجدد کارخانه سونگون از نوع ستونی هستند. سلول‌های ستونی دارای تجهیزات مربوط به آب شستشو، کنترل سطح پالپ، لوله‌های حلقوی توزیع کننده پالپ در گردش، مخلوط کننده ثابت، شیرهای جداسازی حباب‌سازها و لوله حلقوی توزیع کننده هوا می‌باشند. در شکل (۴-۲۸)، نمایی از سلول شستشو و شستشوی مجدد نشان داده شده است. مشخصات فنی سلول ستونی

مورد استفاده در کارخانه فرآوری مس سونگون در جدول (۴-۵) به طور خلاصه آورده شده است (باقریان، ۱۳۸۵).



شکل (۴-۲۸): سلول شستشوی مورد استفاده در کارخانه فرآوری مس سونگون (باقریان، ۱۳۸۵)

جدول (۴-۵): اطلاعات مربوط به سلول‌های ستونی (باقریان، ۱۳۸۵)

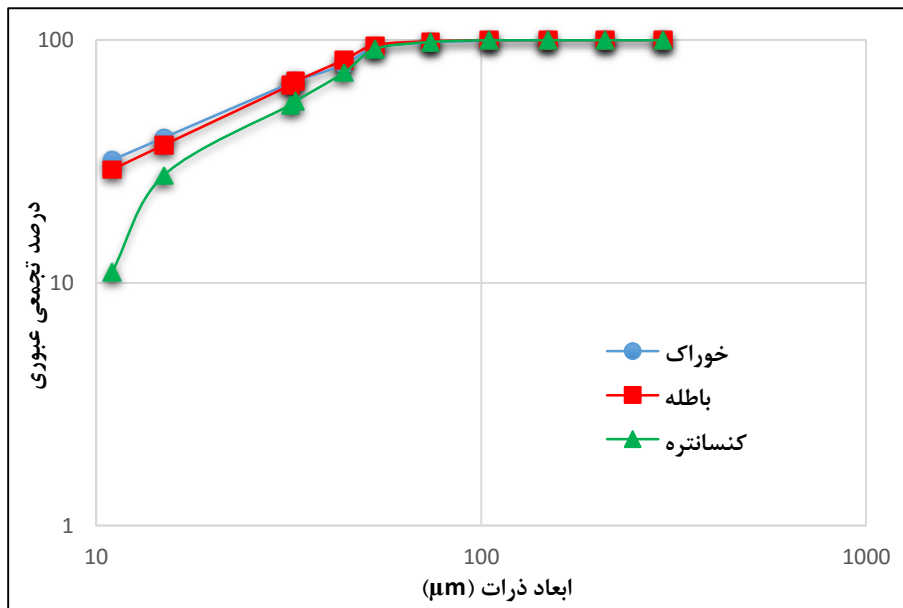
تعداد سلول‌ها	۲ تا شستشو، ۱ ری شستشو	ظرفیت حمل کف	۴ گرم بر مترمربع بردقیقه
قطر داخلی	۴ متر	حجم هوای لازم	۸۰۰ مترمکعب بر ساعت
ارتفاع ستون	۱۲ متر	دبی آب لازم	۴۰ مترمکعب بر ساعت
حجم ستون	۱۵۰ مترمکعب	دبی پالپ ورودی	۵۳۵ متر مکعب بر ساعت

امروزه فلوتاسیون ستونی یک فناوری قابل قبول در محدوده وسیعی از کاربردها، مخصوصاً برای پرعیارکنی نهایی سولفیدهای فلزات (مس، روی، سرب و مولیبدنیت) و فلوتاسیون کانسنگ‌های فسفات و زغال به شمار می‌آید، اغلب تولید کنندگان اصلی مس در جهان از فلوتاسیون ستونی به عنوان مرحله پرعیارسازی نهایی استفاده می‌کنند (Mular et al., 2002).



#### ۱-۴-۴. بررسی کارآیی متالورژیکی سلول‌های شستشو و شستشوی مجدد

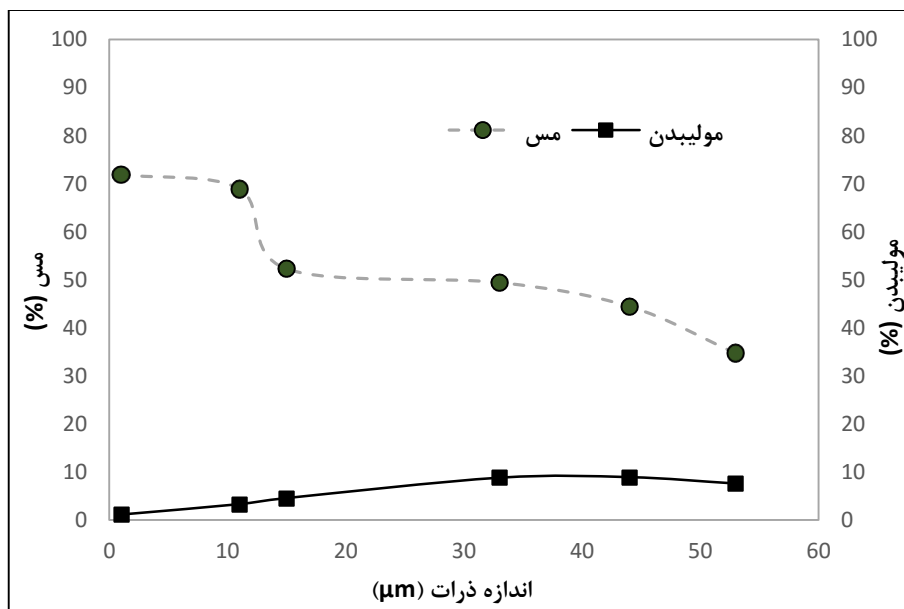
با استفاده از نتایج حاصل از نمونه‌برداری کلی مدار، نمودارهای دانه‌بندی هر یک از خوراک، باطله و کنسانتره شستشو در شکل (۴-۲۹) نشان داده شده است.



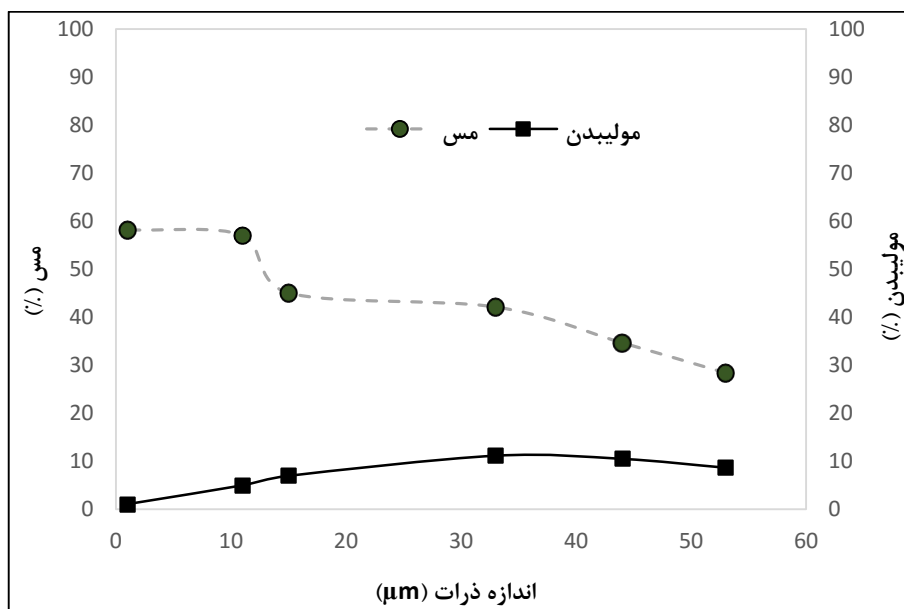
شکل (۴-۲۹): آنالیز دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره مرحله شستشو

همان‌طور که از آنالیز دانه‌بندی مشاهده می‌شود  $d_{80}$  ذرات خوراک و کنسانتره و باطله بسیار به هم نزدیک بوده که نشان می‌دهد ذرات ریزتر مواد با ارزش در باطله وجود دارند و سلول‌های شستشو در شناورسازی این ذرات ناتوان هستند. هم‌چنین با استفاده از نتایج دانه‌بندی نمونه‌ها، نمودارهای بازیابی و کارآیی جدایش ذره به ذره مس و مولیبدن نیز در شکل (۴-۳۰) و (۴-۳۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های (۴-۳۰) و (۴-۳۱) مشاهده می‌شود که در ذرات ریزتر بازیابی و کارآیی جدایش مس و مولیبدن معکوس هم بوده، به طوری که بیشترین بازیابی مس در ذرات ریز و کمترین بازیابی مولیبدن نیز در این محدوده حاصل می‌شود. با درشت‌تر شدن ذرات، بازیابی و کارآیی جدایش مس و مولیبدن کاهش می‌یابد. بازیابی مولیبدن در سلول‌های شستشو بسیار پایین است و ذرات مولیبدن به

صورت باطله به رمق‌گیر منتقل می‌شوند که به دلیل اهمیت جداسازی مس در این مرحله و امکان جداسازی مولیبدن در رمق‌گیر، مولیبدن زیاد مورد توجه قرار نگرفته است.

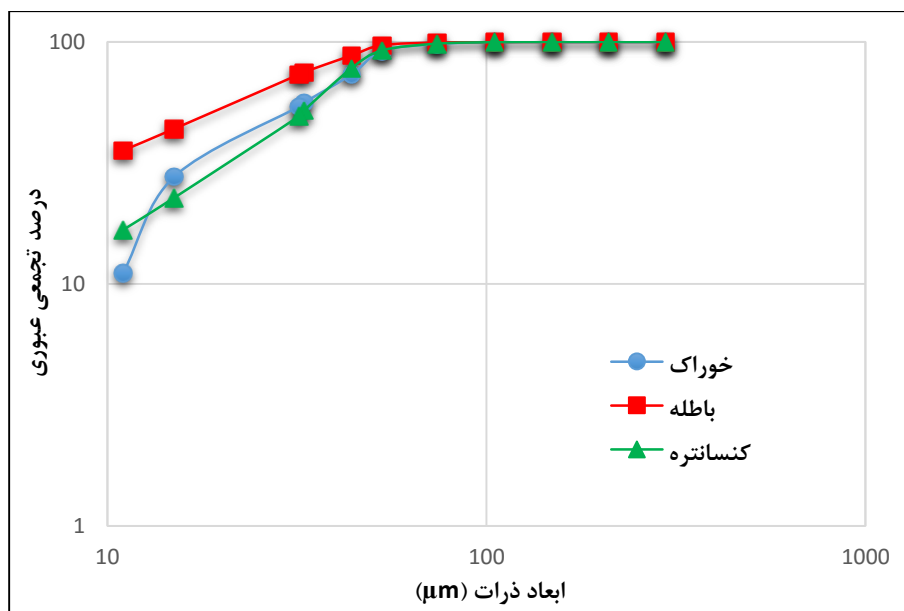


شکل (۴-۳۰): بازیابی ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله شستشو



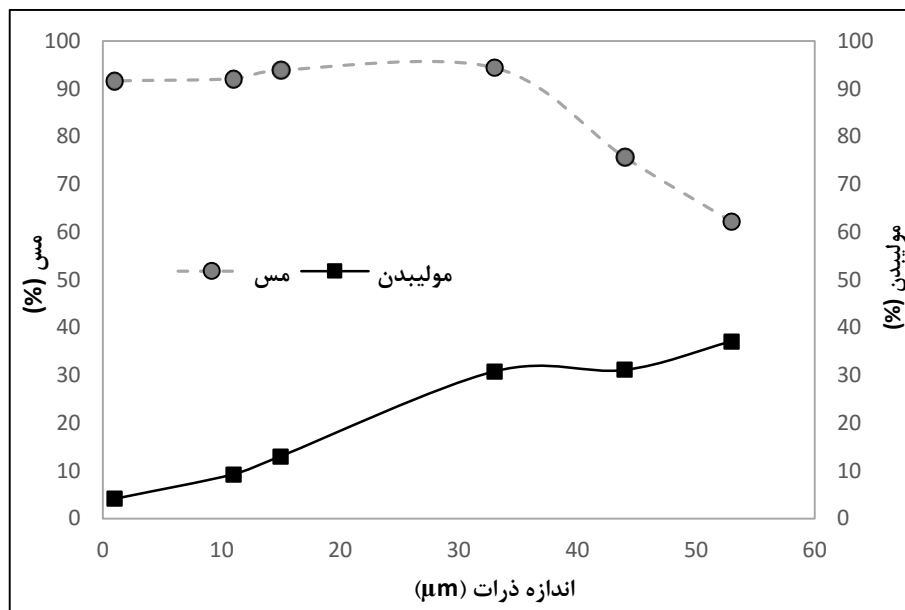
شکل (۴-۳۱): کارایی جدایش ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله شستشو

هم‌چنین برای بررسی دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره سلول‌های شستشوی مجدد، نمودارهای آنالیز دانه‌بندی در شکل (۴-۳۲) نشان داده شده است.

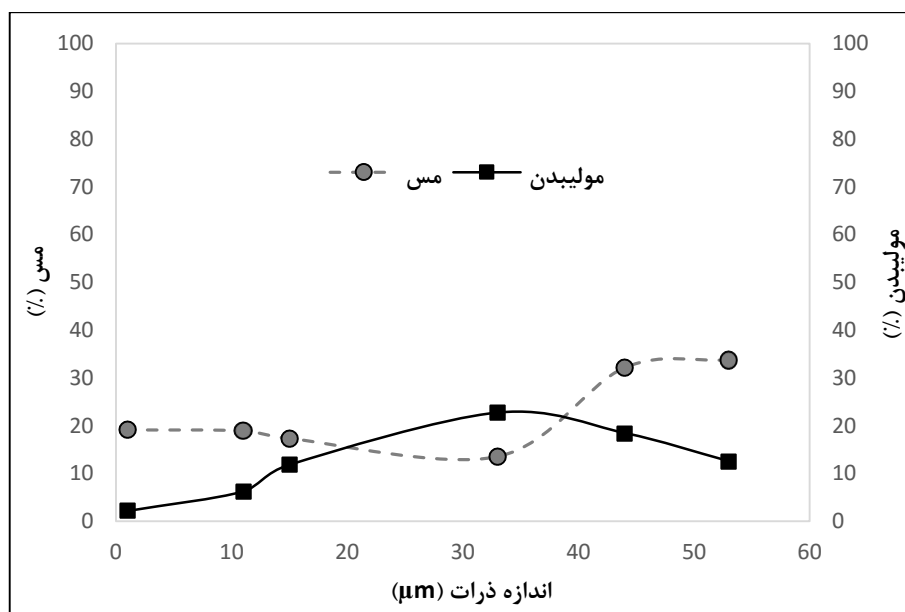


شکل (۴-۳۲): آنالیز دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره سلول شستشوی مجدد

با توجه به شکل (۴-۳۲) مشاهده می‌شود که باطله سلول‌های شستشوی مجدد ریزترین ابعاد را در بین خوراک و کنسانتره دارد که نشان دهنده کارایی پایین این سلول‌ها در محدوده ابعادی ریزتر است. بنابراین با توجه به اینکه باطله سلول شستشوی مجدد به عنوان بخشی از خوراک سلول‌های شستشو محسوب می‌شود به همین خاطر ابعاد ریزتر مواد با ارزش علاوه بر هدرروی در این مرحله، برای مرحله شستشو نیز به دلیل نرمه بودن مشکل ایجاد می‌کند. برای بررسی بیشتر سلول شستشوی مجدد از نظر عیار و بازیابی مس و مولیبدن، در شکل‌های (۴-۳۳) و (۴-۳۴) نمودارهای بازیابی و کارایی جدایش هر یک از مس و مولیبدن در اندازه‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل (۴-۳۳): بازیابی ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله شستشوی مجدد



شکل (۴-۳۴): کارآیی جدایش ذره به ذره مس و مولیبدن در مرحله شستشوی مجدد

همان‌طور که در شکل (۴-۳۳) مشاهده می‌شود بازیابی مس در ذرات ریز کوچکتر از ۳۳ میکرون بسیار خوب بوده ولی در ذرات درشت‌تر بازیابی پایین است و این در حالی است که مولیبدن در ذرات ریز بازیابی بسیار پایینی دارد، و برعکس در ذرات درشت بازیابی بهتری دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت

که با توجه به حضور بیشترین مقدار ذرات ریز در باطله و هم‌چنین بازیابی پایین مولیبدن در ذرات ریز، مهم‌ترین دلیل هدررفتن مولیبدن در این مرحله، ابعاد ریز بوده که از طریق باطله به سلول‌های شستشو منتقل می‌شوند.

شکل (۴-۳۴) نیز کارآیی جدایش مس و مولیبدن در مرحله شستشوی مجدد را نشان می‌دهد که بهترین کارآیی جدایش مس در ذرات درشت‌تر و برای مولیبدن در ذرات میانی حاصل می‌شود. از نکات قابل توجه در نمودار کارآیی جدایش، پایین بودن کارآیی جدایش مس و مولیبدن در ذرات ریزتر است که همانند سلول‌های شستشو در جدایش ذرات ریز مشکل دارند. سایر اطلاعات لازم مربوط به سلول‌های شستشو و شستشوی مجدد در جدول (۴-۶) آورده شده است.

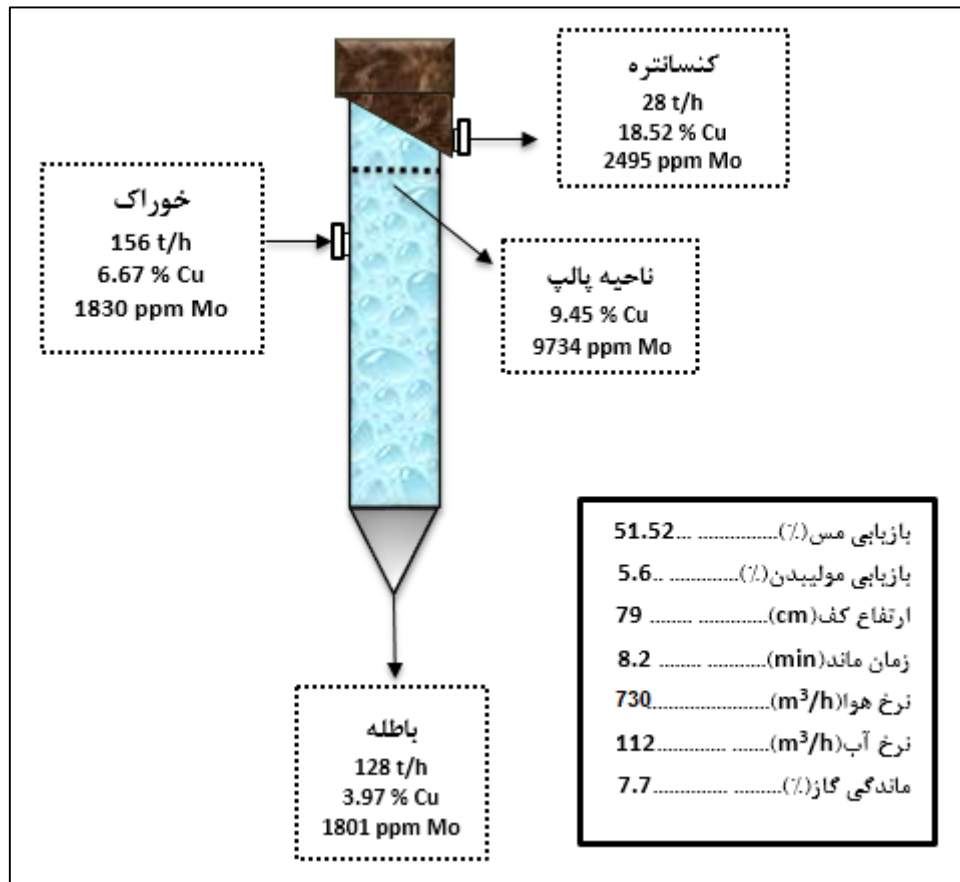
جدول (۴-۶): اطلاعات مربوط به سلول‌های شستشو و شستشوی مجدد

وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> )	مقدار جامد (%)	D <sub>80</sub> (μm)	واحدهای مدار	
۳/۷۷	۲۲/۵۴	۴۴/۵	خوراک	شستشو
۳/۸۵	۱۷/۴۳	۴۱/۹	باطله	
۴/۳۰	۲۸/۶۱	۴۷/۲	کنسانتره	
۴/۳۰	۲۸/۶۱	۴۷/۲	خوراک	شستشوی مجدد
۴/۰۴	۱۵/۳۴	۳۷/۱	باطله	
۴/۳۳	۲۸/۸۹	۴۵/۴	کنسانتره	

#### ۴-۴-۲. بررسی عملکرد سلول‌های شستشو

برای بررسی متالورژیکی سلول‌های شستشو به مدت یک هفته از خوراک، باطله، فصل مشترک فاز کف و پالپ و کنسانتره آن ۴ سری نمونه‌گیری شده و یک نمونه ترکیبی از آنها تهیه شد که نتایج حاصل از این نمونه‌ها در شکل (۴-۳۵) به همراه برخی اطلاعات دیگر که از اتاق کنترل ثبت شد، نشان داده شده

است. از جمله عواملی که برای رسیدن به اهداف متالورژیکی مانند عیار و بازیابی باید تغییر کند، عواملی مثل دبی آب شستشو، دبی هوا، ارتفاع کف و مقدار کف‌ساز هستند.



شکل (۴-۳۵): نتایج حاصل از بررسی عملکرد سلول‌های شستشو

با توجه به نتایج نمونه‌برداری که در شکل (۴-۳۵) مشاهده می‌شود، بازیابی مولیبدن نسبت به مس بسیار کمتر است و همان‌طور که ملاحظه می‌شود در فصل مشترک بین فاز کف و پالپ عیار مولیبدن بسیار بالا بوده و حدود ۴ برابر عیار کنسانتره سلول‌های شستشو است. استفاده از آب شستشو در پرعیارسازی مس نقش مهمی دارد ولی در مورد مولیبدن می‌تواند نقش معکوسی داشته باشد. به همین خاطر برای بررسی نقش آب شستشو و دبی هوا در تشکیل میزان ارتفاع کف و عیار مس و مولیبدن، پارامترهای آب شستشو و دبی هوا را از طریق اتاق کنترل، ثبت و هم‌زمان نمونه‌هایی برای نشان دادن تأثیر این پارامترها گرفته شد.

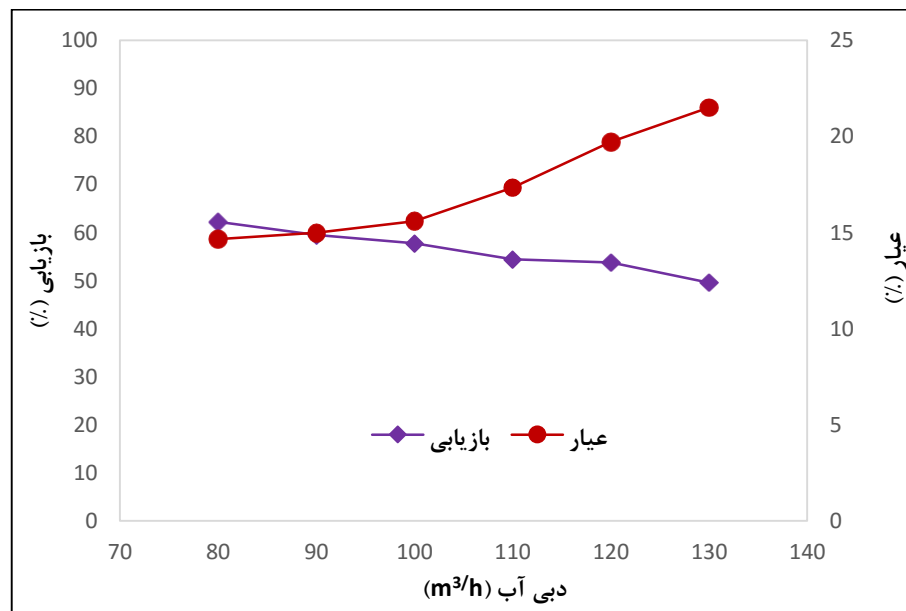
#### ۳-۴-۴. تعیین پارامترهای مؤثر بر عیار و بازیابی سلول‌های شستشو

##### ۱-۳-۴-۴. آب شستشو

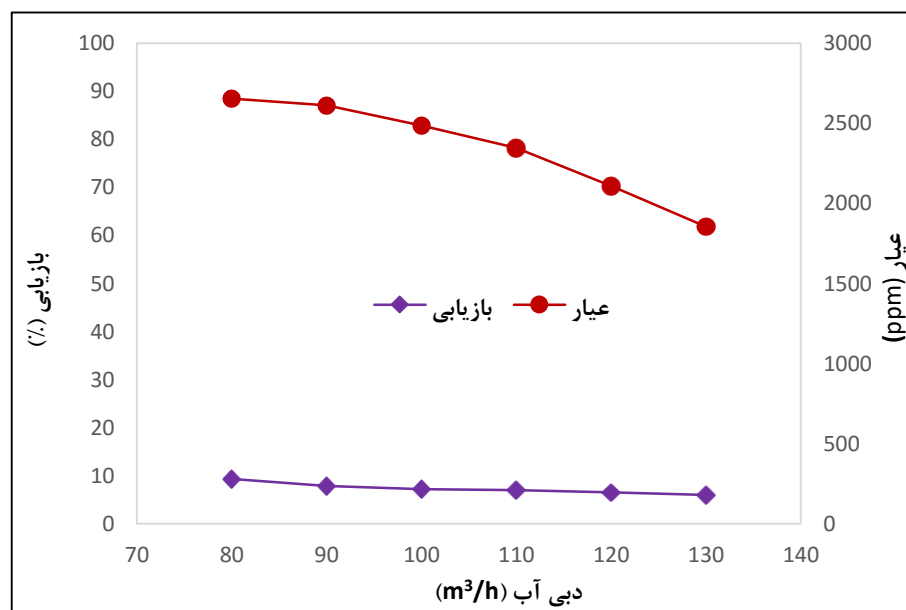
یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده پایداری عملیات، میزان بازیابی و عملکرد انتخابی فلوتاسیون ستونی، مقدار آب شستشویی است که در سطح ستون بر روی کف پاشیده می‌شود و هرچه شدت جریان آب بیشتر باشد، ارتفاع لایه کف و عیار کنسانتره افزایش یافته و بازیابی کاهش می‌یابد. قسمتی از آب شستشو که به طرف پایین و ناحیه جمع‌آوری حرکت می‌کند (آب بایاس) عمل شستشوی کف و در نهایت افزایش عیار کنسانتره را بر عهده دارد. مقدار بهینه آب شستشو (آب بایاس) به عواملی هم‌چون قابلیت شستشوپذیری باطله، پایداری کف، اندازه حباب‌ها و اندازه ذرات بستگی دارد (بنیسی، ۱۳۹۰).

سیستم توزیع آب شستشو متشکل از ۴ لوله حلقوی هم‌مرکز می‌باشد که توسط لوله‌های نگهدارنده در بالای کف نگهداری می‌شود. هر حلقه متشکل از لوله‌های پی‌وی‌سی با قطر ۴۰ میلی‌متر است که دارای دو سوراخ مقابل هم می‌باشند و این لوله‌ها علاوه بر توزیع مناسب آب، در صورت انسداد به راحتی قابل باز کردن و تمیز نمودن هستند. یک سیستم آب شستشوی آماده به کار هم وجود دارد که در مواقع گرفتگی لوله‌ها، جایگزین سیستم در حال کار می‌شود. سیستم آب شستشوی دیگر در سلول‌های ستونی، سیستم آب اسپری لاندر است که برای انتقال کف از کانال خارجی یا لاندر طراحی شده است. نتایج حاصل از تأثیر تغییر دبی آب شستشو بر عیار و بازیابی مس و مولیبدن در سلول‌های شستشو در شکل‌های (۳۶-۴) و (۳۷-۴) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳۶-۴) مشاهده می‌شود با افزایش دبی آب عیار مس به دلیل شستشوی مواد باطله در منطقه کف و هدایت آنها به سمت پایین (باطله) افزایش و بازیابی آن نیز به دلیل دنباله‌روی مقادیری از مواد با ارزش همراه با باطله، کاهش می‌یابد. هم‌چنین در شکل (۳۷-۴) دیده می‌شود که برای مولیبدن با افزایش دبی آب، عیار و بازیابی کاهش می‌یابد که دلیل این امر ذرات بسیار ریز مولیبدن جمع شده در منطقه بین کف و پالپ است. با افزایش میزان آب شستشو انتقال این ذرات به سمت باطله بیشتر شده و موجب کاهش عیار و بازیابی

می‌شوند. بنابراین برای اینکه عیار و بازیابی بالایی از مولیبدن حاصل شود بایستی میزان آب شستشو را کاهش داده که این امر نیز به کاهش عیار مس منجر می‌شود.



شکل (۴-۳۶): تأثیر دبی آب بر عیار و بازیابی مس

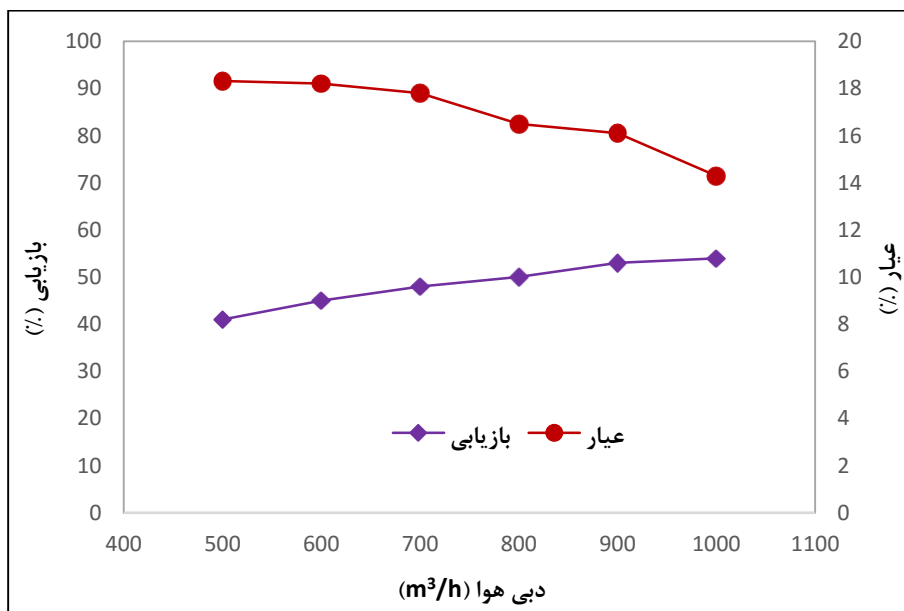


شکل (۴-۳۷): تأثیر دبی آب بر عیار و بازیابی مولیبدن

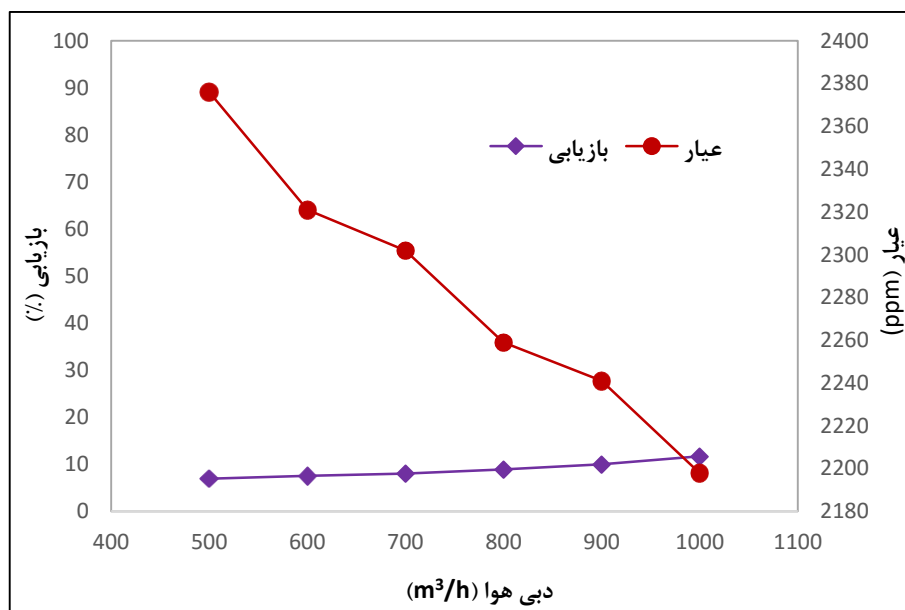


#### ۴-۳-۲. دبی هوا

تعیین دبی هوا به دلیل تأثیر سریع آن بر روی عیار و بازیابی اهمیت زیادی دارد. افزایش دبی هوا معمولاً منجر به کاهش عیار و افزایش بازیابی سلول ستونی می‌شود. مقدار دبی هوا برای سلول‌های با قطر ۴ متر بین ۶۰۰ تا ۹۰۰ مترمکعب بر ساعت می‌باشد که باید فشار ۲ بار را در داخل لوله حلقوی سلول ستونی تأمین کند. دبی هوا در سلول ستونی با بالا رفتن عیار خوراک ورودی به سلول ستونی افزایش داده می‌شود تا با افزایش نرخ انتقال مواد به کف، بازیابی وزنی خوراک افزایش یابد. اما در صورتی که عیار خوراک ورودی به ستون کم باشد، برای جلوگیری از دنباله‌روی ذرات گانگ با حباب‌ها و راهیابی آنها به کنسانتره و کاهش عیار آن، دبی هوا کاهش داده می‌شود. نتایج حاصل از تأثیر تغییر دبی هوا بر عیار و بازیابی مس و مولیبدن در شکل‌های (۴-۳۸) و (۴-۳۹) نشان داده شده است.



شکل (۴-۳۸): تأثیر دبی هوا بر عیار و بازیابی مس



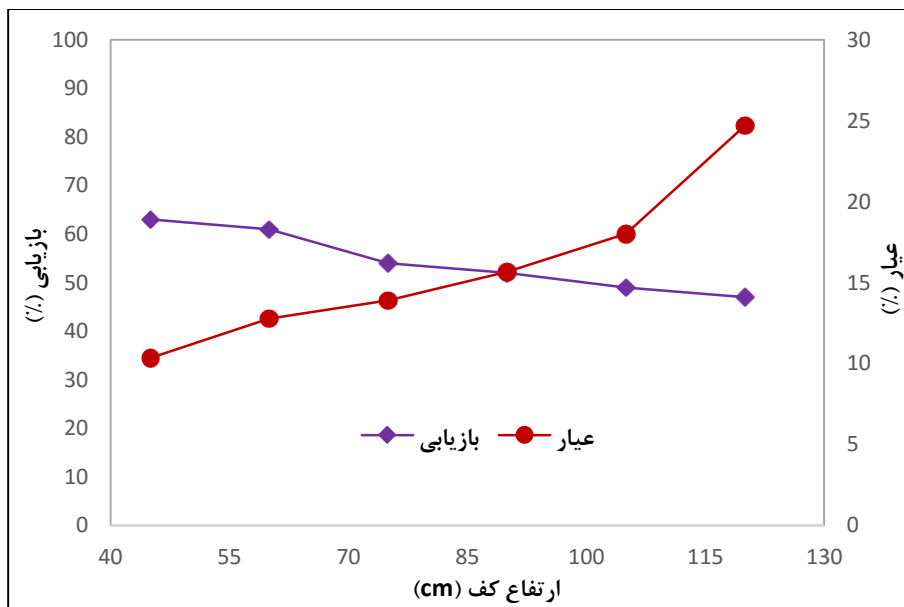
شکل (۴-۳۹): تأثیر دبی هوا بر عیار و بازیابی مولیبدن

با توجه به شکل (۴-۳۸) مشاهده می‌شود که با افزایش دبی هوا بازیابی مس به دلیل انتقال ذرات باطله به کنسانتره افزایش می‌یابد، در حالی که عیار کنسانتره کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین در شکل (۴-۳۹) نیز تغییر دبی هوا به تغییر عیار و بازیابی مولیبدن منجر می‌شود که در آن با افزایش دبی هوا بازیابی به مقدار کم افزایش ولی مقدار عیار به دلیل ریز بودن ذرات مولیبدنیت، کاهش بیشتری نسبت به عیار مس دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش یا کاهش دبی هوا، برای مس و مولیبدن نمی‌تواند به طور هم‌زمان عیار و بازیابی بالاتری را فراهم کند.

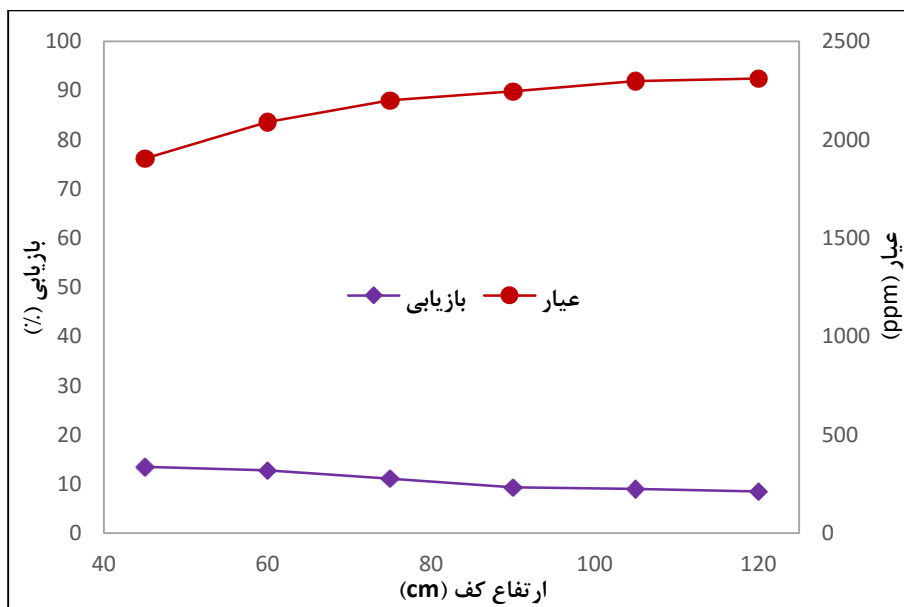
#### ۴-۳-۴-۳. ارتفاع کف

از آنجا که افزایش عیار در منطقه کف انجام می‌شود، لذا عمق کف یک عامل مهم در فرآیند فلوتاسیون است. در سلول‌های ستونی، عمق کف نسبت به سلول‌های مکانیکی بیشتر است. کف عمیق دنباله‌روی ذرات را کاهش داده و در نتیجه عیار کنسانتره را بالا می‌برد. مقدار بهینه ارتفاع کف معمولاً بین ۵۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر است. ارتفاع کف در سلول ستونی با بالا رفتن عیار خوراک ورودی به سلول ستونی کاهش می‌یابد تا بازیابی خوراک پرعیار، بیشتر شود. اما در صورتی که عیار خوراک ورودی به سلول

ستونی کم باشد، برای جلوگیری از دنباله‌روی ذرات بی‌ارزش به کنسانتره و کاهش عیار آن، ارتفاع کف افزایش داده می‌شود.



شکل (۴-۴۰): تأثیر ارتفاع کف بر عیار و بازیابی مس



شکل (۴-۴۱): تأثیر ارتفاع کف بر عیار و بازیابی مولیبدن

همان‌طور که در شکل (۴-۴۰) دیده می‌شود، با افزایش ارتفاع کف، عیار کنسانتره بیشتر و بازیابی کاهش می‌یابد. برای افزایش ارتفاع کف معمولاً دبی آب شستشو را افزایش می‌دهند که این کار سبب جدا شدن ذرات ریز باطله از مواد با ارزش شده و عیار منطقه کف بیشتر می‌شود. همچنین در شکل (۴-۴۱) مشاهده می‌شود که عیار مولیبدن با افزایش ارتفاع کف بیشتر می‌شود که این امر یکی از دلایل کم عیار بودن مولیبدنیت در مرحله شستشو می‌تواند باشد. بازیابی مولیبدن نیز با افزایش ارتفاع کف به دلیل دبی بالای آب شستشو، کاهش می‌یابد.

با جمع‌بندی نتایج حاصل از تأثیر پارامترهای دبی آب شستشو، دبی هوا و ارتفاع کف می‌توان نتیجه گرفت که در سلول‌های شستشو (ستونی) کارخانه سونگون، به دلیل ارجحیت عیار و بازیابی مس نسبت به مولیبدن، بدست آوردن هم‌زمان عیار و بازیابی مس و مولیبدن با مشکلاتی همراه است و جهت جلوگیری از هدرروی مولیبدن، بایستی در مرحله‌های بعدی (رمق‌گیر) به دنبال رفع مشکل بود. به همین خاطر با توجه به اینکه باطله سلول‌های شستشو، خوراک سلول‌های رmq‌گیر است، برای بدست آوردن عیار و بازیابی بالای مولیبدن آزمایش‌های فلوتاسیون با روش‌های مختلف صورت گرفت که در مرحله بعدی این تحقیق نتایج حاصل از آن آورده شده است.

#### ۴-۵. بررسی و بهینه‌سازی مرحله رmq‌گیر

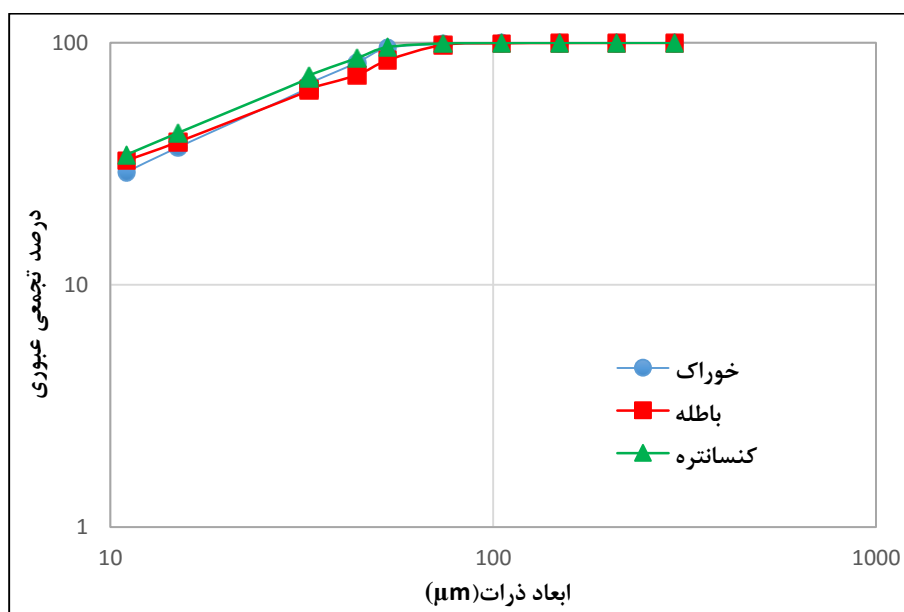
همان‌طور که در فلوشیت کلی کارخانه مشاهده شد، باطله سلول‌های ستونی شستشو برای رmq‌گیری وارد سلول‌های فلوتاسیون رmq‌گیر می‌شود. کنسانتره این سلول‌ها برای پرعیارسازی بهتر، وارد مخزن آماده‌سازی قبل از سیکلون‌های ثانویه شده و باطله رmq‌گیر نیز به همراه باطله سلول‌های رافر به سمت تیکنر باطله جریان می‌یابند. برخی از مشخصات فنی سلول‌های رmq‌گیر مورد استفاده در کارخانه فراوری سونگون در جدول (۴-۶) آورده شده است.

جدول (۴-۶): مشخصات فنی سلول‌های رmq گیر (باقریان، ۱۳۸۵)

نوع سلول	RCS50	قطر	۴/۵ متر
تعداد	۴	ارتفاع	۴/۱۹۵ متر
زمان ماند	۱۵ دقیقه	سرعت چرخش پره‌ها	۱۴۰rpm

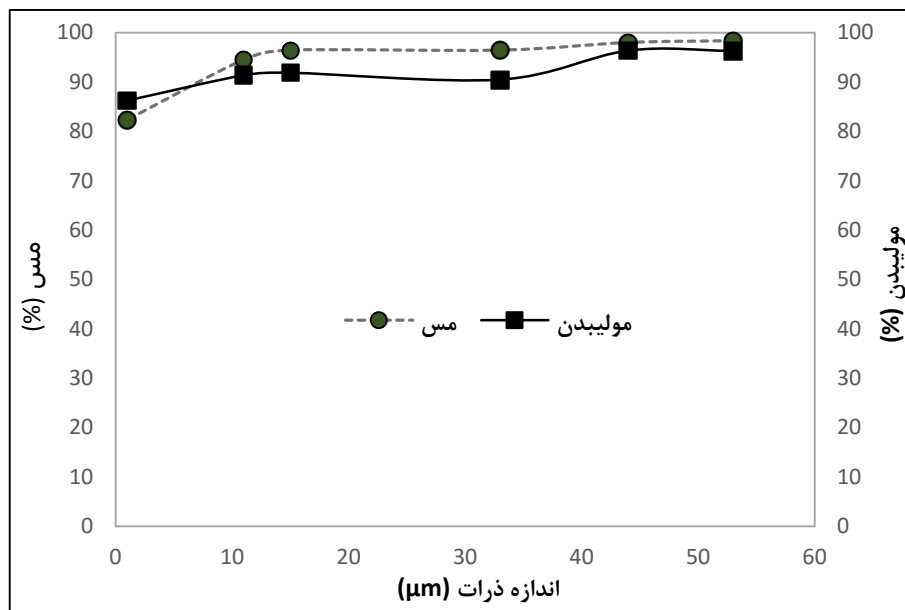
#### ۴-۵-۱. بررسی عملکرد متالورژیکی سلول‌های رmq گیر

با توجه به نمونه‌برداری کلی از مدار و بررسی هر مرحله مدار، در این قسمت نیز بررسی متالورژیکی سلول‌های رmq گیر انجام شده است که در آن نتایج حاصل از آنالیزهای دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره در شکل (۴-۴۲) نشان داده شده است.

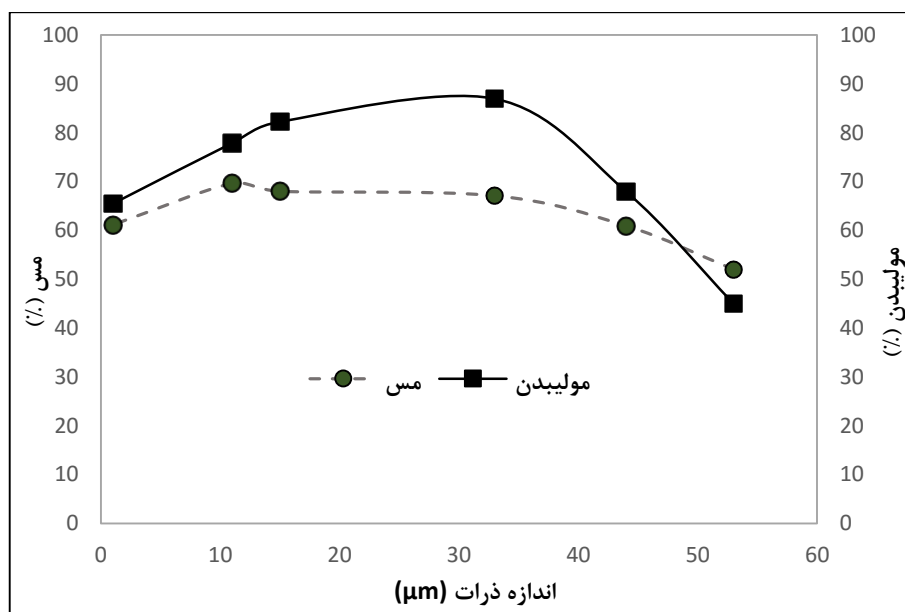


شکل (۴-۴۲): آنالیز دانه‌بندی خوراک، باطله و کنسانتره سلول‌های رmq گیر

نمودارهای آنالیز دانه‌بندی نشان می‌دهند که باطله رmq گیر دارای ذرات نسبتاً درشت‌تری نسبت به کنسانتره و خوراک می‌باشد و اغلب ذرات با ارزش قفل شده در این مرحله، به باطله انتقال می‌یابند. هم‌چنین برای بررسی بازیابی و کارایی جدایش مس و مولیبدن در هر مرحله ابعادی، نتایج حاصل از آنالیز دانه‌بندی و آنالیز شیمیایی در شکل‌های (۴-۴۳) و (۴-۴۴) نشان داده شده است.



شکل (۴-۴۳): بازیابی ذره به ذره مس و مولیبیدن در مرحله رmq گیر



شکل (۴-۴۴): کارآیی جدایش ذره به ذره مس و مولیبیدن در مرحله رmq گیر

همان‌طور که در شکل (۴-۴۳) ملاحظه می‌شود بیشترین بازیابی مس و مولیبیدن در کل مدار مربوط به سلول‌های رmq گیر است. با توجه به اینکه کنسانتره سلول‌های رmq گیر دوباره برای افزایش درجه آزادی به آسیای ثانویه منتقل شده و خوراک سلول‌های شستشو می‌شود، به همین دلیل عیار کمتری از

مولیبیدن بدست می‌آید. بیشترین هدرروی مولیبیدن و هم‌چنین مس در ذرات با ابعاد کمتر از ۱۱ میکرون که به صورت نرمه است، اتفاق می‌افتد. هم‌چنین شکل (۴-۴۴) کارآیی جدایش مس و مولیبیدن را نشان می‌دهد که در آن کمترین کارآیی جدایش برای مس و مولیبیدن در ذرات ریز و درشت است و بیشترین کارآیی جدایش نیز در ابعاد میانی بین ۲۰ تا ۴۰ میکرون حاصل می‌شود. برخی از اطلاعات دیگر در سلول‌های رمق‌گیر در جدول (۴-۷) نشان داده شده است.

جدول (۴-۷): اطلاعات مربوط به مرحله رمق‌گیر

واحد‌های مدار	$D_{80}(\mu m)$	مقدار جامد (%)	وزن مخصوص ( $g/cm^3$ )
خوراک	۴۱/۹	۱۷/۴۳	۳/۸۵
باطله	۴۹/۱	۱۶/۸۲	۳/۱۸
کنسانتره	۳۸/۴	۱۸/۲۳	۳/۹۷

#### ۴-۵-۲. بهینه‌سازی عیار و بازیابی سلول‌های رمق‌گیر

با توجه به اینکه در بخش‌های قبلی مشخص شد، باطله سلول‌های رمق‌گیر بعد از سلول‌های رافر بیشترین هدرروی مولیبیدن را دارند و هدرروی نیز بیشتر به صورت نرمه است که از تأثیر آسیابکنی دوباره حاصل شده، و به علت ناتوانی سلول‌های شستشو در شناورسازی این ابعاد، از طریق باطله به سلول‌های رمق‌گیر و از آنجا هم به باطله منتقل می‌شوند. لازم به ذکر است که به دلیل حجم بالای باطله رافر، امکان بازیابی بیشتر مولیبیدن در این مرحله وجود ندارد. بنابراین در این مرحله با استفاده از دو روش مختلف به بهینه‌سازی عیار و بازیابی مس و مولیبیدن پرداخته شده است. ابتدا با استفاده از حفظ فرآیند موجود در کارخانه و با تغییر شرایط عملیاتی مانند دور همزن، عیار و بازیابی مس و مولیبیدن بررسی شد. سپس با استفاده از بازداشت کننده (دکسترین) و تغییر در فلوشیت کارخانه، بهینه‌سازی عیار و بازیابی مولیبیدن صورت گرفت.

#### ۴-۵-۲-۱. نتایج آزمایش‌ها با تغییر پارامترهای عملیاتی کارخانه

همان‌طور که از آنالیز دانه‌بندی ذرات مشاهده شد (شکل ۴-۴۲)، ۳۴ درصد وزنی باطله شستشو را اندازه زیر ۱۱ میکرون تشکیل می‌دهد که مولیبدن با عیار بالای ۲۲۶۶ ppm در این مرحله قرار دارد. همچنین آنالیز دانه‌بندی باطله رم‌گیر نیز نشان داد که در محدوده ابعادی زیر ۱۱ میکرون، عیار مولیبدنیت و مس به ترتیب ۱۷۴ ppm و ۰/۷۴٪ است. از بررسی آنالیزهای دانه‌بندی و شیمیایی چنین برمی‌آید که فلوتاسیون هم‌زمان مس و مولیبدن در اندازه‌های ریز ذرات، بازیابی کمتری دارند، در حالی که در اندازه‌های درشت‌تر بازیابی قابل قبول‌تری دارد.

ابعاد ریز و نرمه‌ها موادی هستند که به دلیل جرم مخصوص و سطح مخصوص کمتر و همچنین احتمال کم برخورد و چسبندگی این ذرات با حباب‌ها، از نرخ شناوری کمتری برخوردار هستند. بنابراین فلوتاسیون کف برای پرعیارسازی این ذرات بسیار پیچیده و سخت خواهد بود. روش فلوک - فلوتاسیون<sup>۱۱</sup> در شناورسازی ذرات نرمه آبران، یک روش مورد قبول است که در فرآوری ذرات ریز کاربرد دارد (Arbiter, 1979) (Fuerstenau et al., 1979).

در روش فلوتاسیون با دور تند، ذرات نرمه مواد معدنی با آگلومراسیون<sup>۱۲</sup> در محیط آبی و واکنش جذبی بین ذرات آبران شناور می‌شوند. این روش به آسانی در آگلومراسیون ذرات آبران کانی‌هایی مانند گرافیت، تالک و مولیبدنیت که به حالت نرمه وجود دارند، بکار می‌رود. در این تحقیق تلاش شده است برای بدست آوردن بازیابی بهتر نرمه‌های مولیبدنیت در فلوتاسیون مس - مولیبدن که معمولاً هدر می‌روند، از این روش استفاده شود. چندین آزمایش فلوتاسیون با دور همزن متغیر انجام شد که نتایج آن برای هر یک از مس و مولیبدن در شکل‌های (۴-۴۵) و (۴-۴۶) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که شرایط آزمایش در تمام آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد که در جدول (۴-۸) نشان داده شده است.

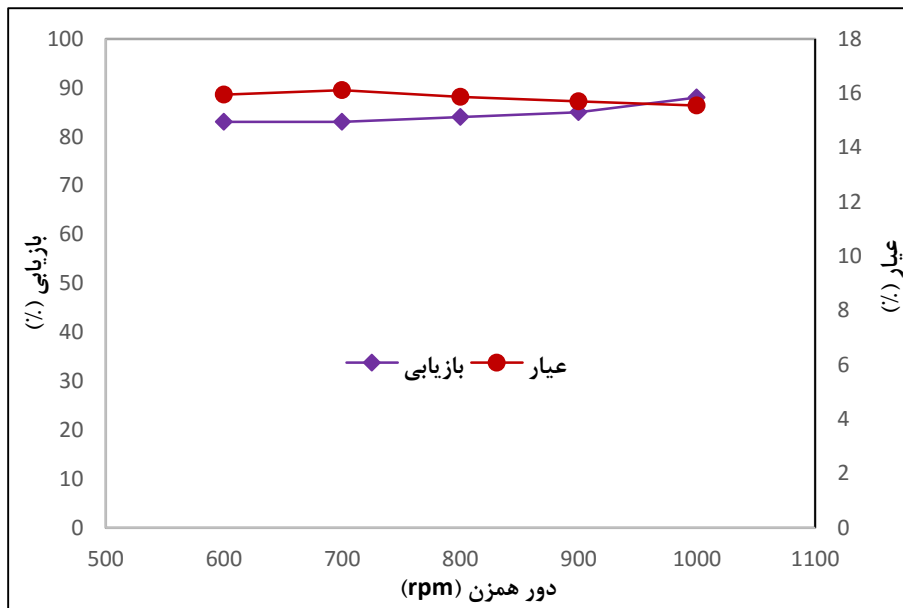
<sup>۱۱</sup> Floc-flotation

<sup>۱۲</sup> Agglomeration



جدول (۴-۸): عوامل ثابت آزمایش‌ها

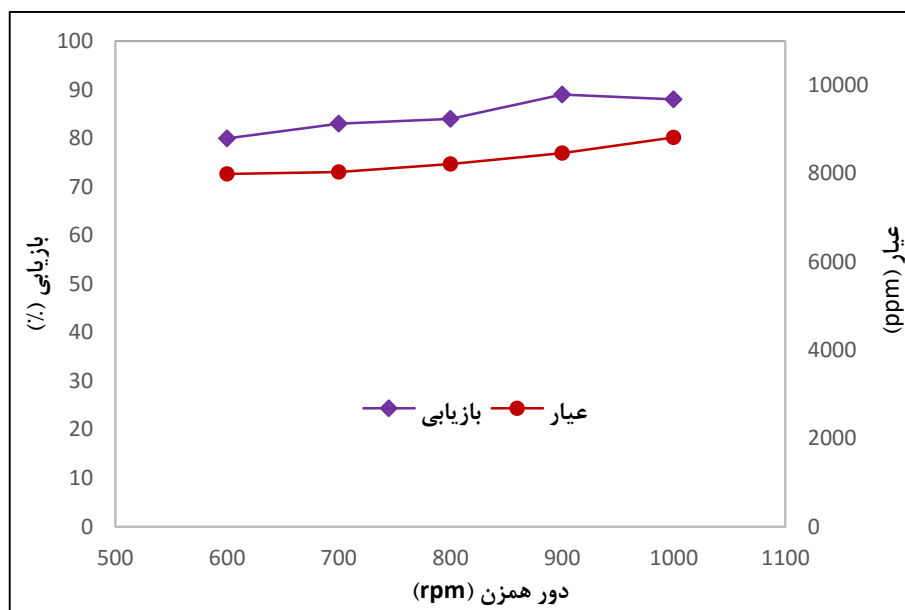
۵ دقیقه	زمان آماده سازی	۳ گرم بر تن	کلکتور مس (Z11)
۸ دقیقه	زمان شناورسازی	۱۱	pH
۱۹	درصد جامد	۱۵ گرم بر تن	کلکتور مولیبدن (گازوئیل)



شکل (۴-۴۵): تأثیر دور همزن بر عیار و بازیابی مس

همان‌طور که در شکل (۴-۴۵) مشاهده می‌شود، با افزایش دور همزن، نرمه‌های مس با ارزش آگلومره شده و موجب افزایش بازیابی می‌شوند. در دور همزن‌های بیشتر به دلیل اینکه احتمال چسبیدن ذرات نرمه گانگ به مواد با ارزش وجود دارد، عیار ماده معدنی کاهش می‌یابد.

هم‌چنین شکل (۴-۴۶) تأثیر دور همزن را بر عیار و بازیابی مولیبدن نشان می‌دهد که در آن با افزایش دور، عیار و بازیابی به دلیل نرمه زیاد ماده معدنی با ارزش بیشتر می‌شود. بنابراین با توجه به اینکه در سلول‌های رمق‌گیر بازیابی مس و مولیبدن قابل قبول است، بنابراین در این روش می‌توان با افزایش دور همزن به عیار بالاتری از مولیبدن دست یافت.



شکل (۴-۴): تأثیر دور همزن بر عیار و بازیابی مولیبدن

در این روش با افزایش دور همزن به مقدار ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، کنسانتره مس با عیار ۱۵/۵۴٪ و بازیابی ۸۸٪ بدست آمد که نسبت به شرایط عملیاتی کارخانه عیار مس کاهش یافته و بازیابی ثابت مانده است. همچنین مولیبدن با خوراک ۱۶۷۳ ppm با در نظر گرفتن بیشترین دور همزن، کنسانتره مولیبدن با عیار ۸۸۲۳ ppm و بازیابی ۹۰٪ حاصل شد که نسبت به شرایط فعلی کارخانه ۰/۳۲٪ بهبود را نشان می‌دهد.

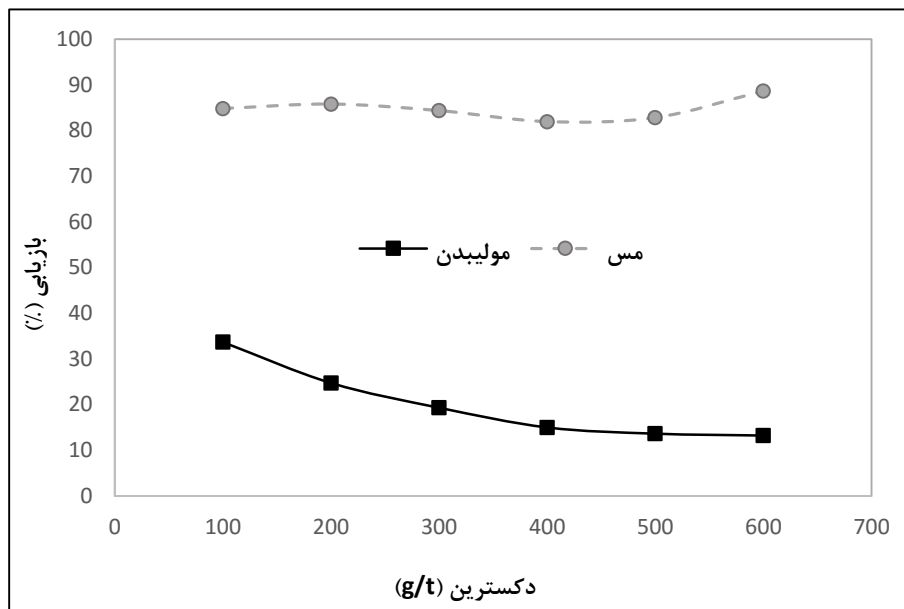
#### ۴-۵-۲-۲. نتایج آزمایش‌های بازداشت مولیبدن با استفاده از دکستروزین

با توجه به اینکه کنسانتره رمق‌گیر بیشترین عیار و بازیابی مولیبدن را در بین مراحل فلوتاسیون دارد و همین‌طور باطله رمق‌گیر نیز دارای مقدار عیار بیشتری از مولیبدن است. به همین دلیل، برای جلوگیری از هدرروی مولیبدن از باطله و همچنین بازیابی بیشتر مولیبدن در این مرحله، طبق فلوشیت شکل (۳-۳) آزمایش‌هایی برای افزایش عیار و بازیابی مولیبدن انجام شد. در این آزمایش‌ها که خوراک آن از باطله سلول‌های شستشو است، هم‌زمان با شناورسازی مس، بازداشت مولیبدن نیز توسط دکستروزین

صورت گرفت. شرایط انجام آزمایش‌ها در جدول (۴-۹) و نتایج حاصل از آزمایش‌ها برای هر یک از مس و مولیبدن در شکل (۴-۴۷) و (۴-۴۸) نشان داده شده است.

جدول (۴-۹): عوامل ثابت آزمایش‌ها

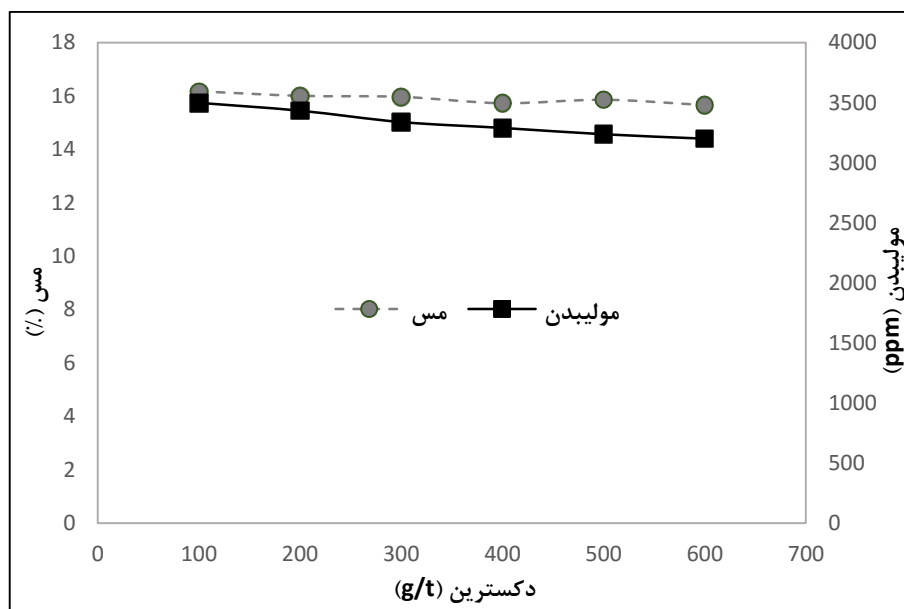
کلکتور مس (Z11)	۳ گرم بر تن	زمان آماده سازی	۶ دقیقه
pH	۱۱	زمان شناورسازی	۱۰ دقیقه
دکستروزین	۱۰۰-۶۰۰ گرم بر تن	درصد جامد	۱۹



شکل (۴-۴۷): تأثیر مقدار بازداشت کننده دکستروزین بر بازیابی مس و مولیبدن

همان‌طور که در شکل (۴-۴۷) مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار بازداشت کننده (دکستروزین) بازیابی مس افزایش و بازیابی مولیبدن به دلیل بازداشت توسط دکستروزین کاهش می‌یابد. همچنین در شکل (۴-۴۸) تأثیر مقدار دکستروزین را بر عیار مس و مولیبدن نشان می‌دهد که با افزایش مقادیر دکستروزین بازیابی مس تغییر چندانی نداشته، اما عیار مولیبدن به دلیل بازداشت شدن کاهش می‌یابد. بنابراین در این حالت به جای شناورسازی مولیبدن با مس، مولیبدن بازداشت شده و در باطله رمق‌گیر بازیابی می‌شود. در این روش بیشترین عیار مولیبدن ۳۵۱۰ ppm بدست آمد که همراه با کنسانتره مس در

مراحل بعدی (شستشوها) می‌توان آن را نیز بازیابی کرده و در کنسانتره مس - مولیبدن نهایی بدست آورد.

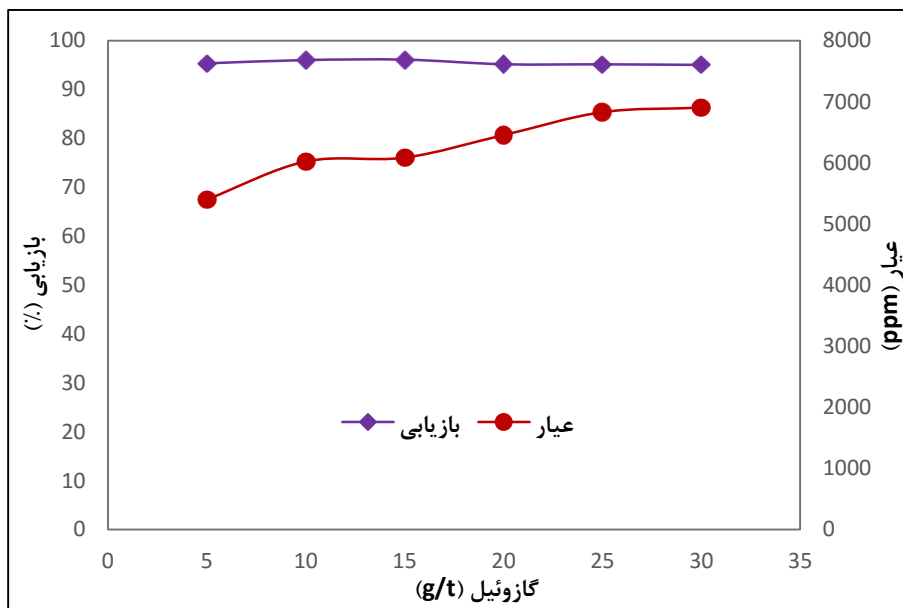


شکل (۴-۴۷): تأثیر مقدار بازداشت کننده دکسترین بر عیار مس و مولیبدن

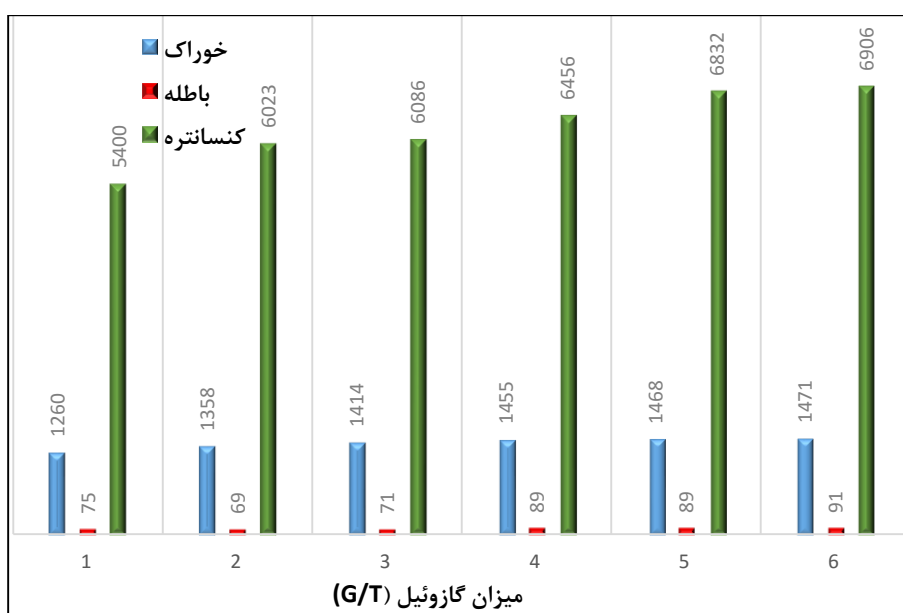
مولیبدن منتقل شده به باطله رمق‌گیر، به عنوان خوراک در یک مرحله پرعیارکنی با استفاده از کلکتور گازوئیل شناور شده و کنسانتره مولیبدنیت به کنسانتره نهایی مس - مولیبدن اضافه شده و باطله آن نیز به عنوان باطله نهایی محسوب گردید. شرایط انجام هر یک از آزمایش‌ها (۶ سری) در جدول (۴-۱۰) و نتایج حاصل از آزمایش‌های فلوتاسیون نیز در شکل‌های (۴-۴۹) و (۴-۵۰) نشان داده شده است.

جدول (۴-۱۰): عوامل ثابت آزمایش‌ها در فلوتاسیون باطله رمق‌گیر

کلکتور مس (Z11)	-	زمان آماده سازی	۶ دقیقه
pH	۱۱	زمان شناورسازی	۱۰ دقیقه
کلکتور مولیبدن گازوئیل	۳۰-۵ گرم بر تن	درصد جامد	۱۹



شکل (۴-۴۹): تأثیر میزان گازوئیل بر عیار و بازیابی مولیبدن در باطله رمق گیر



شکل (۴-۵۰): عیار خوراک، باطله و کنسانتره مولیبدن در مقادیر مختلف گازوئیل (ppm)

همان طور که در شکل (۴-۴۹) مشاهده می‌شود، با افزایش میزان گازوئیل بازیابی مولیبدن کاهش و عیار کنسانتره مولیبدن افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین عیار مولیبدن در میزان ۳۰ گرم بر تن گازوئیل، ۶۹۰۶ ppm بدست آمد که با توجه به میزان مولیبدن کنسانتره نهایی کارخانه که حدود ppm

۲۰۰۰-۳۰۰۰ است، افزایش عیار قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌شود. هم‌چنین با استفاده از این روش علاوه بر دست یافتن به عیار بالاتر مولیبدن، از نظر عملیات شناورسازی در مراحل اولیه کارخانه مولیبدنیت نیز دارای مزیت‌هایی است. بنابراین بعد از بدست آوردن مولیبدن در این قسمت و اضافه کردن آن به کنسانتره نهایی مس - مولیبدن می‌توان مشکل کم بودن عیار و بازیابی مولیبدن را کاهش داده و از نظر تولید و راندمان کارخانه به مقدار بالاتری دست یافت.

# فصل پنجم

## نتیجه‌گیری و پیشنهاده‌ها

## ۵-۱. خلاصه و نتیجه‌گیری

چنانچه تشریح گردید بازیابی پایین مولیبدن در مدار فلوتاسیون مس - مولیبدن کانسارهای پورفیری همواره یکی از مهم‌ترین مشکلات کارخانه‌های فرآوری است. با توجه به اهمیت موضوع از نظر اقتصادی برای کارخانه مس سونگون، این تحقیق به مطالعه شناسایی نقاط و علل هدرروی مولیبدن در مدار و بررسی فاکتورهای تأثیرگذار در بهینه‌سازی عیار و بازیابی مولیبدن در کانسنگ مس سونگون به عنوان مطالعه موردی پرداخته شد. برای رسیدن به شرایط بهینه عیار و بازیابی مولیبدن بررسی آنالیز دانه‌بندی، آنالیز شیمیایی، مطالعات کانی‌شناسی، انجام آزمایش‌های فلوتاسیون در حالت‌های مختلف، بررسی روش‌های جدید در بازیابی مولیبدنیت که ابتدا به صورت کلی و سپس مرحله به مرحله در سه مرحله رافر، شستشو و رمق‌گیر صورت گرفت. با جمع‌بندی نتایج حاصل از این مطالعات که در فصل چهارم به طور کامل تجزیه و تحلیل شدند، در این فصل نیز نتیجه‌گیری بررسی‌های انجام شده به همراه پیشنهاداتی برای کارهای آینده ارائه شده است.

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که:

- ۱- بیشترین بازیابی و کارایی جدایش مس و مولیبدن در اندازه ابعاد ۱۵-۱۰ میکرون و کمترین بازیابی و کارایی جدایش در اندازه‌های ریز و درشت به دلیل آزاد نشدن کافی و قفل شدگی ذرات است.
- ۲- بیشترین عیار مولیبدن با مقدار ۸۷۹۴ ppm در بین مرحله‌های مختلف کارخانه، مربوط به کنسانتره رمق‌گیر است که عیار مولیبدن آن ۳ برابر کنسانتره نهایی می‌باشد.
- ۳- در مقایسه بازیابی مس و مولیبدن در کل مدار کارخانه، بیشترین بازیابی مس و مولیبدن در مرحله رمق‌گیر به مقدار ۹۵ درصد مس و ۹۱ درصد مولیبدن، و هم‌چنین کمترین بازیابی در مرحله شستشو برای مس و مولیبدن به ترتیب ۵۳/۴۳ و ۴/۱ درصد بدست آمد.



۴- نسبت غنی شونددگی مولیبدن در تمامی مراحل کارخانه کمتر از مس است، به طوری که سلول‌های شستشو و شستشوی مجدد کمترین نسبت غنی شونددگی برای مولیبدن را دارند و در کنسانتره نهایی نیز نسبت غنی شونددگی برای مس و مولیبدن به ترتیب ۴۵/۹۲ و ۱۷/۷۰ حاصل شد.

۵- از موازنه کلی مدار مشاهده شد که بیشترین هدرروی مولیبدن در باطله رافر به مقدار ۴۴/۳۷٪ و مس نیز به مقدار ۱۰/۲۵٪ از کل مس و مولیبدن موجود در خوراک است.

۶- درصد توزیع عیار مس و مولیبدن در کنسانتره رمق‌گیر به ترتیب برابر با ۱۶۷/۴٪ و ۳۲۷/۷٪ است که عیار بالای مس و مولیبدن در باطله شستشوها عامل به وجود آمدن بار در گردش مس و مولیبدن در مراحل بعد از سلول‌های شستشو است.

۷- با توجه به آزمایش‌های سینتیکی انجام شده، ثابت نرخ فلوتاسیون برای مس و مولیبدن  $K = 0/609$  و زمان مناسب برای آزمایش‌های فلوتاسیون جهت بهینه‌سازی فرآیند، در مقیاس آزمایشگاهی ۴ دقیقه به دست آمد.

۸- آزمایش‌های فلوتاسیون با ابعاد خوراک متفاوت نشان دادند که بیشترین عیار و بازیابی مس (۷/۷٪، ۹۱٪) در ابعاد ۹۵-۱۰۰ میکرون و بیشترین عیار و بازیابی مولیبدن (۰/۰۹٪، ۶۷٪) در ابعاد ۹۵-۹۰ میکرون حاصل می‌شوند. در این تحقیق ابعاد خوراک بهینه ۹۵ میکرون بدست آمد.

۹- با بررسی درصد جامد فرآیند، مشخص شد که بیشترین عیار و بازیابی مس و مولیبدن در درصد جامد ۲۵ حاصل می‌شود.

۱۰- نتایج حاصل از آزمایش‌های اعتبارسنجی نشان دادند که بهترین مقدار عیار و بازیابی مس ۸/۲۲٪ و ۹۰/۸٪، و عیار و بازیابی مولیبدن ۸۹۰ ppm و ۷۱/۲۱٪ می‌باشد که نسبت به شرایط کارخانه، ۴/۲۱٪ برای بازیابی و ۱۸٪ برای عیار را نشان می‌دهد.

۱۱- با افزایش دبی آب در شستشو، عیار مس افزایش و بازیابی آن نیز به دلیل دنباله‌روی مقادیری از مواد با ارزش همراه با باطله، کاهش می‌یابد و برای مولیبدن با افزایش دبی آب، عیار و بازیابی کاهش می‌یابد که دلیل این امر ذرات بسیار ریز مولیبدن جمع شده در منطقه بین کف و پالپ است.

۱۲- با افزایش دبی هوا در شستشو بازیابی به مقدار کم افزایش ولی مقدار عیار به دلیل ریز بودن ذرات مولیبدنیت کاهش بیشتری نسبت به عیار مس دارد.

۱۳- بیشترین هدرروی مولیبدن و هم‌چنین مس در ذرات با ابعاد کمتر از ۱۱ میکرون که به صورت نرمه است، اتفاق می‌افتد.

۱۴- کمترین کارآیی جدایش برای مس و مولیبدن در ذرات ریز و درشت است و بیشترین کارآیی جدایش نیز در ابعاد میانی بین ۲۰ تا ۴۰ میکرون حاصل می‌شود.

۱۵- با افزایش دور همزن سلول‌ها (از ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ دور بر دقیقه)، عیار مولیبدن در کنسانتره به مقدار ۸۸۲۳ ppm و بازیابی ۹۰٪ حاصل شد که این مقدار افزایش عیار نسبت به شرایط فعلی کارخانه ۰/۳۲٪ بهبود را در پی داشت.

۱۶- راهکار دیگری که در این تحقیق برای جلوگیری از هدرروی مولیبدن به باطله بررسی شد، بازداشت مولیبدن در مرحله رمق‌گیر با اضافه کردن دکستین بود. در این حالت مقدار عیار مولیبدن در باطله رمق‌گیر با مقدار ۶۰۰ گرم بر تن دکستین، از ۲۳۴ ppm به ۱۴۷۱ ppm افزایش پیدا کرد. سپس با انجام یک مرحله فلوتاسیون مولیبدن بر روی باطله رمق‌گیر، عیار کنسانتره مولیبدن ۶۹۰۶ ppm با مقدار ۳۰ گرم بر تن گازوئیل حاصل شد که از ترکیب کنسانتره تولید شده با کنسانتره نهایی کارخانه فرآوری، از هدرروی مولیبدن جلوگیری شده و مولیبدن محصول نهایی حدود ۲/۳ برابر نسبت به شرایط فعلی کارخانه (۲۹۷۶ ppm) بهبود پیدا کرد.

## ۵-۲. پیشنهادها

مطالعات ذیل جهت بهبود شرایط تولید پیشنهاد می‌شود:

۱- بررسی جلوگیری از پوشش نرماه‌ای ذرات مولیبدن در هنگام فلوتاسیون مس - مولیبدن جهت افزایش بازیابی مولیبدن.

۲- بررسی تأثیر شرایط هیدرودینامیکی فلوتاسیون در فرآیند شناورسازی مس - مولیبدن.

۳- جایگزینی و انتخاب مواد شیمیایی جدید با کارایی بالاتر و ضریب انتخابی بالا

۴- جایگزینی سلول‌های ستونی با سلول‌های مکانیکی

۵- به دلیل هدرروی ۷/۴۴٪ مولیبدن در باطله رافر، بررسی بازیابی مولیبدن در این بخش ضروری است.

- Ametov, I.;** S. R. Grano, M. Zanin, S. Gredelj, R. Maqunson, T. Bolles, B. Triffett (2008) "Copper and molybdenite recovery in plant and batch laboratory cells in porphyry copper rougher flotation", *Proceedings of XXIV International Mineral Processing Congress*, Beijing: Science Press, pp. 1129-1137.
- Arbiter, N.;** (1979) "Problems in sulfide ore processing". in: Benefication of mineral Fines Problem and Reaserch Needs, P. Somasundaeen, N. Arbiter, *AIME*, pp. 139-152.
- Arbiter, N.;** P. Somasundaeen (1979) "Benefication of mineral Fines Problem and Reaserch Needs", *Problems in sulfide ore processing*, pp. 139-152.
- Baoliang, G.;** L. Siqing, N. Qi, L. Qing, Z. Chao (2013) "Applying One-Stage Grinding and Flotation to Improving Copper Recovery of a Fine-Grained Cu-Mo Sulphide Ore", *Separation Science and Technology*, 48, pp. 1900-1905.
- Bocharov, V. A.;** L. S. Khachatryan, V. A. Ignatkina , Zh. Baatarkhuu (2008) "Modified reagent mode in porphyry copper – molybdenum ore flotation" *Journal of mining Science*, 44, pp. 45-67.
- Bulatovic, S. M.;** D. M. Wyslouzil, C. Kan (1999) " Effect of clay slimes on copper/molybdenum flotation from porphyry ores", *Processing Copper*, 99: pp. 95-111.
- Bulatovic, S. M.;** (2007) "Handbook of Flotation Reagents", *Elsevier Science & Technology Books*, Vol. 1, 2 vols.
- Chander, S.;** D. W. Fuerstenau (1972) "On the natural flotability of molybdenite", *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, 252: pp. 62-69.
- Crozier, R. D.;** (1979) "Flotation Reagent Practice in Primary and By-Product Molybdenite Recovery ", *Mining Magazine*, 140: pp. 174-178.

- Fuerstenau, D. W.;** S. Chander, A. M. Abouzeid (1979) "The recovery of fine particles by physical separation methods". in: Benefication of mineral Fines Problem and Research Needs, P. Somasundaran , N. Arbiter, *AIME*, pp. 3-59.
- Gupta, C. K.;** (1992) " Extractive Metallurgy of Molybdenum ". Bombay India: *CRC Press*, Vol. 1.
- Hernlund, R. W.;** (1961) "Extraction of molybdenite from copper flotation products", *Colorado School Mines*, 56: pp. 177-195.
- Lince, J. R.;** P. Frantz (2000) "Anisotropic oxidation of MoS<sub>2</sub> crystallites studied by angle resolved X-ray photoelectron spectroscopy", *Tribology Letters* , 9: pp. 211-218.
- Malhotra, D.;** R. M. Hoover, F. N. Bender (1980) "Effect of agitation and aeration on flotation of molybdenite", *Annual meeting, Atlanta*.
- Mular, A. L.;** D. N. Halbe, D. J. Barratt (2002) "Mineral Processing Plant Design " , Practice and Control, Littleton Co. *Society Mining Engineering*.
- Nelson, S.;** (2007) "Kennecott Utah Copper internal email communication".
- Newell, R.;** S. Grano (2007) "Hydrodynamics and scale-up in Rushton turbine flotation cells", *International Journal Mineral Processing*, 81: pp. 224-236.
- Orwe, D.;** S. R. Grano, D. W. Lauder (1998) "Increasing fine copper recovery at the Ok Tedi concentrator", *Mineral Engineering*, 11: pp. 171-187.
- Qinbo, C.;** W. Shuming, L. Dan, D. Jiushuai, X. Yongjun, B. Shaojun (2013) " Investigation on improving the recovery of molybdenum in the bulk flotation of Mo-copper sulphide ore" *Advanced Materials Research*, 616-618: pp. 649-654.
- Raghavan, S.;** L. L. Hsu (1984) "Factors affecting the flotation recovery of molybdenite from porphyry copper ore" *International Journal of Mineral Processing*, 12: pp. 145-162.
- Savassi, O. N.;** D. J. Alexander, N. W. Johnson, E. V. Manlapig, J. P. Franzidis (1997) "Measurement of froth recovery of attached particles in industrial

cells " *Proceedings of the Sixth Mill Operators Conference*, Melbourne, pp. 149-155.

**Shirley, J. F.;** A. Sutulov (1985) "By-product molybdenite ". in: *SME Mineral Processing Handbook*, N. L. Weiss; 16-17, pp. 16-36, New York: *AIME*.

**Traher, W. J.;** (1981) "A rational interpretation of the role of particle size in flotation " *International Journal of Mineral Processing*, 8: pp. 289-327.

**Triffett, B.;** C. Veloo, B. J. I. Adair , D. Bradshaw (2008) "An investigation of the factors affecting the recovery of molybdenite in the kennecott Utah Copper bulk flotation circuit" *Minerals Engineering*, 21: pp. 832-840.

**Weiss, N. L.;** (1985) "SME Mineral Processing Handbook". *Society of mining Engineering*, New York.

**Wie, J. M.;** D. W. Fuerstenau (1974) "Effect of dextrin on surface properties and the flotation of molybdenite " *International Journal of Mineral Processing*, 1: pp. 17-32.

**Zanin, M.;** I. Ametov, S. R. Grano, L. Zhou ,W. Skinner (2009) "A study of mechanisms affecting molybdenite recovery in a bulk copper/molybdenum flotation circuit". *International Journal of Mineral Processing*, 93: pp. 256-266.

**Zanin, M.;** S. R. Grano, I. Ametov (2010) "Technical challenges in the flotation of molybdenite from porphyry copper ores", *International mineral processing congress*, Chicago, pp. 234-245.

**بارانی, وحیده.** (۱۳۹۱) "تعیین میزان تاثیر کانی شناسی مولیبدنیت بر اختلاف بازیابی مولیبدن در کارخانه تغلیظ ۱ و ۲ سرچشمه" پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، بخش معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان.

**باقریان, اصغر.** (۱۳۹۲) "گزارش متالورژیکی سه ماهه کارخانه" (فروردین تا خرداد)، واحد متالورژی.

**باقریان, اصغر.** (۱۳۸۵) "فرآیند پریعیارسازی مس در کارخانه تغلیظ مس سونگون" گزارش طرح مس سونگون، امور کارخانه.

**بالنده, امین.** (۱۳۸۹) "بررسی انواع گونه های مولیبدنیت در فرآیند فرآوری مربوط به معدن مس سرچشمه" *مجله زمین شناسی اقتصادی*، جلد ۳، شماره ۲: صفحه ۱۹۷-۱۹۱.

بنیسی، صمد. (۱۳۹۰) "فلوتاسیون ستونی" چاپ دوم، انتشارات دانشگاه هرمزگان.

بنیسی، صمد. (۱۳۹۱) "موازنه جرم در سیستم های فرآوری مواد" انتشارات دانشگاه هرمزگان.

جمال زاده، علی. (۱۳۹۱) "بررسی نحوه بازیابی مولیبدن و امکان سنجی بهبود آن در مدار پرعیارکنی مس مجتمع سونگون" پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، بخش معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان.

حسن زاده محله، احمد. (۱۳۹۱) "بررسی امکان بهبود بازیابی ذرات قفل شده در سلول های پرعیارکنی اولیه کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سرچشمه" پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، بخش معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان.

رضایی، بهرام. (۱۳۷۸) "فلوتاسیون"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه هرمزگان.

زیدآبادی، صدیقه. (۱۳۸۴) "بررسی بازیابی مرحله به مرحله مولیبدن در مدار پرعیارکنی کارخانه تغلیظ ۲ مجتمع مس سرچشمه" پروژه تحقیقاتی امور تحقیق و توسعه، واحد تحقیقات فرآوری مواد معدنی، کرمان، شرکت ملی صنایع مس ایران.

شهرآشویی، مرضیه. (۱۳۸۵) "بررسی نحوه شناورسازی مس و مولیبدن در سلول های پرعیارکنی اولیه کارخانه جدید مجتمع مس سرچشمه" پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، بخش معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان.

عادلی، ثریا. (۱۳۸۴) "شناسایی گونه های مختلف مولیبدنیت در کنسانتره و باطله کارخانه تغلیظ از نظر کانی شناسی" پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، بخش معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان.

قره داغی، محمد. (۱۳۸۹) "بررسی تأثیر اندازه ذرات ورودی به سلول های پرعیارکنی اولیه بر کارایی این سلول ها در کارخانه تغلیظ مجتمع مس سونگون" پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، بخش معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان.

میرشمسی، مرجان. (۱۳۸۹) "بررسی امکان افزایش بازیابی مولیبدن در مدار ثانویه کارخانه پرعیارکنی شماره ۲ مجتمع مس سرچشمه" پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، بخش معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان.

نعمت اللهی، حسین. (۱۳۸۴) "کانه آرایی" چاپ چهارم، جلد دوم، انتشارات دانشگاه تهران.

## **Abstract**

Molybdenite is a valuable byproduct in porphyry copper flotation process whose recovery is well considered due to its high economic value. The most important objectives of this research is to identify the cause of low recovery in the copper-molybdenum flotation circuit and also provide the strategies to increase molybdenum grade and recovery while fixing the copper grade and recovery. In this study, factors and effective processes in order to optimize grade and recovery of molybdenum in rougher, cleaner and scavenger of Sungun copper processing plant were studied. For this purpose, same samples were taken from the entire circuit to investigate the mineralogical and metallurgical situation. Then is laboratory studies, the effect of factors such mineralogy, grinding rate, solid percent, reagents doses, pH in rougher stage and cleaning water rate, air rate and froth height in cleaner stage and flotation process type in scavenger were investigated. The results showed that the most molybdenum wasting was happened in rougher tailings by 44.3%. Operational parameters for optimization of molybdenum grade and recovery in this stage were determined as feed size (-95  $\mu\text{m}$ ), solid percent (25), kerosene (25 g/t), pH (10.5), collector doses (31 g/t) and frothers doses (12 g/t). in optimum conditions, the grade and recovery were 8.22 and 90.8% respectively for copper and 890 ppm and 71.2% for molybdenum which showed 4% and 18% increase respectively for molybdenum recovery and grade respect to the present conditions of the plant. The results of optimizing the cleaner stage showed that increasing water and air rate, causes the decreasing molybdenum grade and also increasing water rate and froth height causes increase in copper grade. The results of optimizing scavenger stage showed that increasing stirring (600-1000 rpm) molybdenum grade in concentrate reach 8823 ppm with 90% recovery, which show 0.32% improvement respect to the present conditions of plant. Another approach for prevent of wasting molybdenum to the tailing was depressing molybdenum in scavenger stage by adding dextrin. In this case, molybdenum grade in scavenger tailing was increased from 234 to 1471 ppm by adding 600 g/t dextrin, then performing a molybdenum flotation process on scavenger tailing a concentrate with 6906 ppm molybdenum grade was obtained mixing the produced concentrate with the final concentrate will prevent for molybdenum wasting and increases 2.3 times in molybdenum content in final product respect to the present condition at the plant.

**Keyword:** flotation – optimize – copper – molybdenum - sungun





Shahrood University of Technology  
School of mining, petroleum and geophysics engineering

# **Optimization of the grade and recovery of molybdenum in the Copper-Molybdenum flotation circuit**

**(Case study: Sungun copper complex)**

M.Sc. Thesis  
in Mineral Processing Engineering

**Hossein Sabouri Injar**

Supervisors:

**Dr. Mohammad Karamoozian**  
**Prof. Seyed Ziaeddin Shafaei**

May 2014