

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



گزارش مدیریتی قرارداد ۳۸۶۲ مورخ ۱۴۰۰/۰۲/۰۷

عنوان طرح (پایان نامه تحصیلات تکمیلی)

بازیابی سرب و باریت به عنوان محصولات قابل عرضه به بازار از سنگ معدن باریتی مهدی  
آباد

استاد راهنما  
دکتر ابراهیم عظیمی

دانشجو  
شیوا مرتضوی

## تقدیم و تشکر

تیم تحقیقاتی انجام دهنده این طرح بر خود لازم می دانند از حمایت های انجام شده توسط سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) در قالب حمایت از انجام پایاننامه پژوهشی تحصیلات تکمیلی (قرارداد شماره ۳۸۶۲ مورخ ۱۴۰۰/۲/۷)، مسئولین محترم معدن مهدی آباد یزد و همچنین آزمایشگاه کانه آرائی دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اصفهان تقدیر و تشکر نمایند.

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	چکیده
۲	۱- اهداف پژوهش
۲	۲- نمونه برداری از معدن
۳	۳- آماده سازی و همگن سازی نمونه
۳	۴- تهیه نمونه برای انجام آنالیزهای شناسائی XRF و XRD
۴	۵- تهیه نمونه برای انجام مطالعات میکروسکوپی
۵	۶- تهیه نمونه برای انجام آزمایش های ثقلی و فلوتاسیون
۵	۷- معیارهای تعیین کیفیت جدایش
۶	۸- شرایط انجام آزمایش ها و نتایج بدست آمده
۶	۸-۱- نتایج آنالیز میکروسکوپی
۸	۸-۲- شرایط مد نظر در انجام آزمایش های جیگ
۹	۸-۳- شرایط مد نظر در انجام آزمایش های میز لرزان
۱۰	۸-۴- شرایط مد نظر در انجام آزمایش های اسپیرال
۱۱	۸-۵- شرایط مد نظر در انجام آزمایش های فلوتاسیون
۱۱	۸-۶- استفاده از ترکیب دو روش میز لرزان و فلوتاسیون
۱۲	۹- نتایج بدست آمده
۴۱	۱۰- پیشنهادات

در این پژوهش سعی شده است تا کارائی روش های ثقلی معمول و یا فلوتاسیون در راستای استحصال محصولات با ارزشی با محتوای باریت و سرب بالا از سنگ معدن باریتی موجود در معدن باریت مهدی آباد (که در حال حاضر بصورت دپوهای در محدوده معدن موجود می باشند)، مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. در این راستا از چهار دپوی موجود نمونه تهیه شد و پس از خردایش اولیه و انجام آزمایش های تشخیصی کانی شناسی و عیار سنجی و مشخص شدن ماهیت مشابه برخی از دپوها با همدیگر، ترکیبی از دو دپوی شماره ۱ و ۲ بعنوان نمونه B12 و ترکیب دو دپوی ۴ و ۵ بعنوان نمونه B54 جهت بررسی های بیشتر ایجاد گردید. در مرحله اول به بررسی امکان تولید محصولاتی با عیار بالای BaO (بعنوان نماینده کانی باریت) و PbO (بعنوان نماینده تمام کانی های حاوی سرب) به کمک روش میز لرزان، اسپیرال و جیگ پرداخته شد. بررسی نتایج بدست آمده از جدایش با روش های ثقلی نشان دهنده کارآئی بهتر جدایش ثقلی برای نمونه B54 در مقایسه با نمونه B12 بود. در مورد نمونه B12 علیرغم چگالی بالای خود نمونه و محصولات تولیدی، با توجه به عیارها و بازیابی های بدست آمده از جدایش با هر سه روش، بطور کلی از دیدگاه جدایش نمی توان روش جدایش ثقلی کاملاً موثری را پیشنهاد نمود. چگالی بالای نمونه B12 را می توان به درصد بالای باریت، سرب و همچنین میزان بالای آهن این نمونه نسبت داد که البته درگیری شدید کانی های مربوطه باعث کاهش کارآئی روش های ثقلی برای این نمونه شده است. ترتیب موفقیت روش های ثقلی در افزایش عیار محصول برای هر دو نمونه را می توان بصورت میز لرزان < اسپیرال < جیگ در نظر گرفت. در ادامه امکان افزایش عیار محصولات به کمک روش فلوتاسیون مورد بررسی قرار گرفت. برای هر دو نمونه فلوتاسیون دو مرحله ای (ابتدا کنسانتره سرب و سپس کنسانتره باریتی) انتخاب شد. بهینه سازی عوامل موثر و میزان مصرف مواد شیمیایی برای دو نمونه نهایتاً منجر به تولید عیار و بازیابی PbO در کنسانتره سرب ۵/۱۴ و ۷۹/۲۷٪ در مقادیر ۲۰۰ g/t متاسیلیکات سدیم، ۲۰۰ g/t سولفید سدیم و ۴۵۰ g/t کلکتور PEX در pH=۹، و عیار و بازیابی BaO در کنسانتره باریتی ۶۳/۵۹ و ۷۷/۰۹٪ به ازاء مصرف ۵۰۰ g/t متاسیلیکات سدیم، ۴۸۰ g/t کلکتور آئروفلوت ۸۵۴ در pH=۱۰ برای نمونه B12، و همچنین عیار و بازیابی PbO در کنسانتره سرب ۶/۹۶ و ۷۳/۷۱٪ در مقادیر ۵۰۰ g/t متاسیلیکات سدیم، ۱۱۰۰ g/t سولفید سدیم و ۳۵۰ g/t کلکتور PEX در pH=۹، و عیار و بازیابی BaO در کنسانتره باریتی ۵۴/۳۱ و ۷۸/۶۰٪ به ازاء مصرف ۱۰۰۰ g/t متاسیلیکات سدیم، ۴۸۰ g/t کلکتور آئروفلوت ۸۵۴ در pH=۱۰ برای نمونه B54 گردید.

**کلمات کلیدی:** معدن مهدی آباد، سنگ معدن باریتی، میز لرزان، جیگ، اسپیرال، فلوتاسیون

## ۱- اهداف پژوهش

با توجه به وجود چندین دپوی باریتی البته با مشخصات متفاوت در معدن مهدی آباد، و همچنین وجود چندین ماده معدنی در بخشی از محدوده این مجموعه و ارزش باریت و عناصر و ترکیبات دیگر همراه با این ماده معدنی (بویژه بین ۱ الی ۳ درصد سرب)، هدف اصلی این پژوهش بررسی امکان فرآوری مواد دپو شده به قصد افزایش عیار باریت و تولید محصول جانبی از جمله ماده ای با عیار بالاتر سرب تعریف شد. بررسی و مقایسه قابلیت استفاده از روش های ساده تر و کم هزینه (بویژه روش های معمول ثقلی) در مقایسه با روش هایی پیچیده تر و پرهزینه (همچون فلوتاسیون) و کیفیت محصولات تولیدی، تعیین عوامل عملیاتی موثر بر کیفیت جدایش، بررسی احتمال وجود تاثیر متقابل بین پارامترها، تعیین میزان بهینه پارامترهای عملیاتی برای دستیابی به بهترین کیفیت جدایش را نیز می توان از اهداف این پژوهش در نظر گرفت. در این راستا عملیات مختلفی مانند نمونه برداری از دپو ها، آنالیز های شناسائی نمونه ها، آزمایش های جدایش ثقلی مانند میز لرزان، جیگ و اسپیرال و همچنین جدایش به کمک فلوتاسیون انجام گرفت. در نهایت و پس از انجام آنالیز های مختلف، در مورد قابلیت هر یک از روش ها جهت فرآوری نمونه ها بحث شد.

## ۲- نمونه برداری از معدن

با توجه به تنوع مواد دپو شده و میزان ذخائر باقی مانده از سنگ معدن مشابه مواد دپو شده، مواد معدنی موجود در چهار دپوی اصلی بعنوان هدف تعیین شدند. در شکل ۱ موقعیت دپوهای B1، B2، B4، و B5 نمایش داده شده است. با توجه به ویژگی های بسیار مشابه دو دپوی B1 و B2 نمونه این دو دپو پس از اختلاط با نام B12 لحاظ شد.



شکل ۱: موقعیت دپوهای نمونه برداری شده (مسیر نمونه برداری با رنگ زرد مشخص شده است)

از هر یک از دپوها مجموعاً بین ۱۵۰ الی ۲۰۰ کیلوگرم نمونه تهیه شد. طی عملیات نمونه برداری، طول دپوها پیموده شد و در فواصل مساوی جزء نمونه های تصادفی بر روی خط طولی دپوها مطابق شکل ۱ تهیه شده و نهایتاً با یکدیگر مخلوط

شدند. نمونه‌های جمع آوری شده بسته بندی شده و به آزمایشگاه کانه آرایی دانشگاه صنعتی اصفهان جهت آماده سازی و انجام آزمایش‌های مد نظر حمل شدند.

### ۳- آماده سازی و همگن سازی نمونه

همانطور که ذکر شد نمونه‌های تهیه شده از معدن به محل آزمایشگاه دانشگاه صنعتی اصفهان حمل گردید. برای هر یک از نمونه‌ها (B12، B4 و B5) مراحل آماده سازی، خردایش اولیه، همگن سازی و تقسیم نمونه‌ها و بطور جداگانه انجام شد. ابتدا کل حجم نمونه‌های تهیه شده با استفاده از سنگ شکن فکی (مدل Labtech Essa) با تنظیم اندازه دهانه در ۱۰ mm به ابعاد کوچک‌تر از ۱۵ mm رسانده شد. سپس نمونه خرد شده به صورت کامل مخلوط شده و با استفاده از روش "مخروطی به چهار قسمتی کردن" به چهار بخش تقسیم شدند. برای هر یک از نمونه‌ها یک بخش از چهار قسمت انتخاب شد و در مرحله اول با سرند استاندارد ASTM ۶/۲ mm ای نمونه‌ها به دو قسمت ریزتر از ۶/۲ mm و درشت‌تر از ۶/۲ mm تقسیم شدند. پس از آن نمونه‌های درشت‌تر از ۶/۲ mm طی چند مرحله خردایش در مسیر بسته با استفاده از سنگ شکن غلطکی آزمایشگاهی (مدل SVEDALA) به زیر ۶/۲ mm (با تولید حداقل نرمه) رسید (با فاصله غلطک ۵ mm).



شکل ۲: تصویری از مراحل تقسیم نمونه‌های خرد شده تا ابعاد ریزتر از یک چهارم اینچ به روش مخروطی

پس از آنکه تمام نمونه‌ها به زیر ۶/۲ mm رسانده شد، تمام نمونه‌ها بطور با هم کامل مخلوط شد و پس از همگن سازی، با استفاده از تقسیم کننده مجرای (ریفل)، طی ۵ مرحله تقسیم کنی کل حجم نمونه، به نمونه‌های کوچک‌تر (جزء نمونه‌هایی با وزن ۲/۶ kg تا ۳) تقسیم شد.

### ۴- تهیه نمونه برای انجام آنالیزهای شناسائی XRF و XRD

به منظور تهیه نمونه مناسب برای انجام آنالیزهای شیمیایی (XRF) و فاز یابی (XRD)، از جزء نمونه‌های تهیه شده با استفاده از تقسیم کننده مجرائی حدود ۳۰۰ گرم نمونه تهیه شد. هر یک از نمونه‌های ۳۰۰ گرمی با استفاده از آسیای لرزان به مدت ۳۰ ثانیه تا ابعاد ریزتر از ۴۰ میکرون آماده سازی شدند. هر بار قبل از انتقال نمونه به آسیا، محفظه آن بطور کامل تمیز

می‌شد تا از آلودگی نمونه‌ها به مواد دیگر و یا اختلاط احتمالی آن‌ها جلوگیری گردد. مقداری از نمونه‌های پودر شده، به تناسب میزان مورد نیاز بسته بندی شد و برای آنالیزهای مد نظر به آزمایشگاه‌های معتبر ارسال گردید. در جدول ۱ نتایج بدست آمده از آنالیز XRF نمونه‌ها ارائه شده است.

جدول ۱: درصد وزنی اکسیدهای اصلی تشکیل دهنده نمونه‌ها (XRF)

نام نمونه	SiO <sub>2</sub>	BaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	ZnO	CuO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI
B12	۸/۳۷	۴۹/۹۷	۸/۹۱	۱/۸۶	۰/۰۴	۰/۲۲۸	۲۷/۵۷	۰/۳۸	۰/۱۰	۰/۲۹۲	۰/۲۱	۲/۰۷
B4	۳۵/۵	۳۳/۸	۳/۵۳	۱/۵۱	۰/۰۱	۰/۲۵۹	۲۰/۷	۰/۳۱	۱/۳۵۲	۰	۰/۹۳	۲/۰۹۹
B5	۳۷/۹	۳۱/۵۶	۳/۹۲	۱/۳۹	۰/۰۵	۰/۲۱۹	۱۸/۹۷	۰/۲۸	۲/۴۷۳	۰	۰/۷۱	۲/۵۲۸

همانطور که ملاحظه می‌شود، هر سه نمونه تقریباً حاوی مقدار بالایی باریت (BaO) می‌باشند که بخش اعظمی از حجم نمونه را به خود اختصاص می‌دهد. مقدار سرب محتوای هر سه نمونه نیز بسیار نزدیک به هم می‌باشد. در واقع با توجه به محتوای SiO<sub>2</sub>، Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، BaO و PbO سه نمونه، می‌توان نمونه‌های B4 و B5 را از دیدگاه ترکیب شیمیایی و با دقت قابل قبولی مشابه هم در نظر گرفت.

در روش آنالیز XRF سرب گزارش شده مجموعی از سرب اکسیدی و سولفیدی است که بطور کلی بصورت اکسیدی گزارش شده است. لذا برای بررسی میزان سرب سولفیدی و اکسیدی موجود در نمونه‌ها از روش انحلال و تیتراسیون استفاده شد که در آزمایشگاه دیگری آنالیز شدند. نتایج بدست آمده از آن آنالیز در جدول ۲ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین میزان سرب B12 وجود دارد که تقریباً دو برابر نمونه B4 و B5 است.

جدول ۲: میزان سرب اکسیدی و سولفیدی موجود در نمونه‌ها

نام نمونه	سرب کل	سرب اکسیدی	سرب سولفیدی
B4	۱/۹۲	۱/۷۶	۰/۱۶
B5	۱/۶۰	۱/۴۲	۰/۱۸
B12	۲/۴۶	۲/۲۰	۰/۲۶

الگوی پراش بدست آمده از آنالیز XRD با استفاده از نرم افزار X'Pert HighScore مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دهنده وجود باریت در هر سه نمونه B4، B12 و B5 بعنوان فاز غالب و همچنین سیلیس و اکسیدهای سرب بود.

##### ۵- تهیه نمونه برای انجام مطالعات میکروسکوپی

به منظور تهیه نمونه مناسب برای تهیه مقاطع صیغلی و نازک به منظور شناسایی کانی‌های موجود، تطبیق نتایج بدست آمده از آنالیز XRD با ماهیت نمونه‌ها، بررسی درگیری فازهای مختلف نمونه‌ها و همچنین تعیین درجه آزادی نمونه‌ها، حدود



۳۰۰ گرم از هر یک از نمونه‌ها به کمک تقسیم کننده مجرائی تهیه شد. نمونه‌های شاخصی از بین فراکسیون‌های ابعادی تهیه شده، برای آماده سازی مقطع نازک و صیقلی و انجام مطالعات میکروسکوپی به آزمایشگاه کانی شناسی دانشگاه تهران ارسال گردید.

#### ۶- تهیه نمونه برای انجام آزمایش‌های ثقلی و فلوتاسیون

برای انجام هر یک از آزمایش‌ها به روش ثقلی نیاز به دانه بندی مشخصی بر اساس عملکرد دستگاه و مطالعات انجام شده در پژوهش‌های گذشته است. با توجه به دانه بندی مورد نیاز از جزء نمونه‌ها و سرندهای مشخص استفاده شد و در مدار بسته با تغییر فاصله‌ی غلطک‌های آسیای غلطکی محدوده‌های دانه بندی مورد نیاز بدست آمد. بر روی نمونه های تهیه شده تحت شرایط خردایش در مدار بسته، آزمایش های جدایش ثقلی انجام گرفت.

برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون و در مرحله تهیه نمونه (خردایش و آسیا کنی) ابتدا تعیین زمان آسیا کنی با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات میکروسکوپی انجام گرفت. همچنین مواد شیمیایی مورد استفاده در آزمون‌ها تا حد امکان با عیار آزمایشگاهی تهیه شدند و در برخی موارد با توجه به وفور کلکتورهای پر کاربرد، از انواع صنعتی آن‌ها استفاده گردید.

#### ۷- معیارهای تعیین کیفیت جدایش

معیارهای متفاوتی جهت ارزیابی کیفیت جدایش توسط روش‌های انتخاب شده، مورد استفاده قرار گرفت. از جمله می‌توان به تغییر چگالی در جریان‌های مختلف خروجی از سیستم جدایش، بازیابی وزنی مواد به هر یک از جریان‌ها، مقایسه تغییرات بوجود آمده در عیار BaO و PbO (بعنوان نماینده‌ای از مجموع سرب اکسیدی و سولفیدی) و نهایتاً بازیابی متالورژیکی (R) مواد یا عناصر مد نظر به جریان‌ها اشاره کرد. پس از گرفتن چگالی تمام نمونه‌ها و با توجه به مقایسه آن‌ها تصمیم بر آن شد در هر آزمایش، نمونه‌هایی که چگالی آن‌ها حداقل ۱/۱ برابر نسبت به چگالی خوراک، افزایش چگالی داشتند برای انجام آنالیز XRF و در نتیجه عیار سنجی فرستاده شوند.

بازیابی متالورژیکی با استفاده از رابطه ذیل قابل محاسبه می‌باشد. که در این رابطه C درصد وزنی کنسانتره نسبت به خوراک ورودی، C عیار اکسید مورد نظر در کنسانتره و f عیار اکسید مورد نظر در خوراک است.

$$R = \frac{Cc}{Ff}$$

۸- شرایط انجام آزمایش ها و نتایج بدست آمده

۸-۱- نتایج آنالیز میکروسکوپی

جهت انجام مطالعات میکروسکوپی، پنج فراکسیون ابعادی از هر نمونه تهیه شد و نمونه های شاخصی از بین پنج فراکسیون ابعادی تهیه شده، برای آماده سازی مقطع نازک و صیقلی و انجام مطالعات میکروسکوپی به آزمایشگاه ارسال گردید. مهمترین نکات و یافته های مطالعات میکروسکوپی بطور خلاصه در جدول ۳ جهت تسهیل در نتیجه گیری ارائه شده است.

جدول ۳: خلاصه ای از مهمترین نکات و یافته های مطالعات میکروسکوپی انجام گرفته بر روی سه نمونه تهیه شده از معدن مهدی آباد

فراکسیون ابعادی	نمونه B12	نمونه B4	نمونه B5
کانی های غیرفلزی جزء اصلی.	کانی های فلزی - نیمه فلزی کانی های فرعی	کانی های فلزی - نیمه فلزی کانی های فرعی	کانی های فلزی - نیمه فلزی کانی های فرعی
کانی های فلزی - نیمه فلزی کانی های فرعی که ۱۰-۱۵ درصد راتشکیل میدهد شامل: هماتیت (۱۰-۵ درصد حجمی با میزان آزادی ۴۰ درصد)، کمتر مگنتیت، گوتیت - لیمونیت و اکسیدهای تیتانیم، گالن (۰/۲ - ۰/۱ درصد حجمی)، کالکوپیریت، کالکوسیت، کولیت و پیریت (> ۰/۱ درصد حجمی).	و حدود ۳/۵ - ۱/۵ درصد حجمی. کانی های اکسید - هیدروکسیدهای آهن عمدتاً هماتیت (حدود ۵۰-۴۵ درصد آزاد) و کمتر گوتیت - لیمونیت، در حد ۱-۳ درصد حجمی، مالاکیت در حد دهم درصد (۰/۳ - ۰/۱ درصد)، گالن در حد دهم درصد (۰/۲ - ۰/۱ درصد حجمی).	که حدود ۳ درصد حجمی. سهم اصلی بخش فلزی - نیمه فلزی شامل اکسید - هیدروکسیدهای آهن (عمدتاً هماتیت کمتر گوتیت لیمونیت). ذرات ریز و میکرونی کالکوپیریت در اندازه های کوچک تر از ۳۰ میکرون، درگیر در زمینه کانی های شفاف.	درجه آزادی اکسید - هیدروکسیدهای آهن در مجموع حدود ۴۰-۳۵ درصد.
گالن در اندازه ریزتر از ۲۳۰ میکرون همراه با جایگزینی با کولیت و کانی های ثانویه سرب (سروزیت و انگلزیت) در حاشیه.	گالن به فرم بلورهای سالم تا دگرسان و جایگزین با کانی های ثانویه اکسیدی سرب، در اندازه های کوچک تر از ۳۰ میکرون تا حداکثر ۲۳۰ میکرون و برخی بلورها جایگزینی با کولیت ثانویه. قطعه آزاد گالن و مالاکیت مشاهده نشد	درجه آزادی اکسید - هیدروکسیدهای آهن در مجموع حدود ۴۰-۳۵ درصد.	آهن در مجموع حدود ۴۰-۳۵ درصد.
۸۰-۸۵ درصد حجمی کل قطعات کانی های شفاف / به ترتیب فراوانی شامل باریت (۷۵-۷۰ درصد حجمی)، کوارتز (۸-۱۲ درصد حجمی)، کانه های ثانویه اکسیدی سرب (انگلزیت و کمتر سروزیت) (۱/۵ - ۰/۵ درصد حجمی) و کلسیت (حداکثر ۰/۵ درصد حجمی).	کانی های شفاف غیر فلزی تشکیل دهنده اصلی (باریت) بوده؛ قطعات اوپاک - نیمه شفاف به مقدار ۶-۳ درصد حجمی. کانی های شفاف به ترتیب فراوانی باریت، کوارتز، کلسیت و کمتر کانه های ثانویه سرب شامل سروزیت و انگلزیت (۳-۱ درصد حجمی)، به ندرت مالاکیت. باریت به فرم قطعات درشت آزاد به فرم آزاد یا درگیر با کوارتز، قطعات اوپاک و کانه های ثانویه سرب. گاهی درگیری پیچیده از ادخال باریت در کوارتز و بالعکس.	کانی های شفاف غیر فلزی شامل: باریت (حدود ۶۵-۶۰ درصد حجمی)، کوارتز (حدود ۱۰-۵ درصد حجمی)، کلسیت (کمتر از یک درصد حجمی)، کانه های ثانویه سرب (عمدتاً انگلزیت و کمتر سروزیت) (مجموعاً ۴-۲ درصد حجمی)، ژیس (در حدود ۵-۳ درصد حجمی)، کانه ثانویه اکسیدی مس از نوع مالاکیت و به ندرت فلدسپات آلکالین. باریت عموماً بصورت آزاد و قطعات غیر آزاد آن با کانه های ثانویه سرب (انگلزیت - سروزیت)، کوارتز، ژیس و قطعات	کانی های شفاف غیر فلزی شامل: باریت (حدود ۶۵-۶۰ درصد حجمی)، کوارتز (حدود ۱۰-۵ درصد حجمی)، کلسیت (کمتر از یک درصد حجمی)، کانه های ثانویه سرب (عمدتاً انگلزیت و کمتر سروزیت) (مجموعاً ۴-۲ درصد حجمی)، ژیس (در حدود ۵-۳ درصد حجمی)، کانه ثانویه اکسیدی مس از نوع مالاکیت و به ندرت فلدسپات آلکالین. باریت عموماً بصورت آزاد و قطعات غیر آزاد آن با کانه های ثانویه سرب (انگلزیت - سروزیت)، کوارتز، ژیس و قطعات
۱۸۰+۵۰۰ (مقطع صیقلی)	۱۸۰+۵۰۰ (مقطع نازک)		

کانه ثانویه سرب (سروزیت و انگلزیت) عمدتاً در گیر با باریت و قطعات اوپاک - نیمه شفاف و کلسیت / درجه آزادی سروزیت - انگلزیت ۳۵-۳۰ درصد و درجه آزادی قطعات اوپاک ۴۰-۳۵ درصد	سروزیت - انگلزیت، در گیر با کوارتز و باریت. درجه آزادی باریت ۷۵-۸۰ درصد. درجه آزادی کانه های ثانویه سرب در مجموع ۱۵-۱۰ درصد. درجه آزادی قطعات اوپاک حدود ۴۰ درصد.	اوپاک وجود دارد. درجه آزادی باریت ۷۵-۸۰ درصد.
فراوانی هماتیت ۱۰-۵ درصد حجمی با درجه هماتیت ۶۰-۵۵ درصد (کانی فلزی اصلی). کالکوپیریت، پیریت، گالن، با فراوانی ۱/۱٪ <. جایگزینی و دگرسانی گالن در حاشیه با کانی های ثانویه اکسیدی مثل سروزیت و انگلزیت. گالن آزاد دیده نشد.	اکسید - هیدروکسیدهای آهن شامل عمدتاً هماتیت (درجه آزادی ۵۰ درصد) و کمتر گوتیت - لیمونیت در مجموع به مقدار ۲/۵ - ۱/۵ درصد حجمی. مالاکیت در حد دهم درصد و به ندرت پیریت، کالکوسیت و ذرات ریز کوولیت. حاشیه گالن بصورت جایگزینی با کانی های ثانویه سرب و نیز بعضاً کوولیت. سایر کانی های فلزی به فرم در گیر.	اکسید - هیدروکسیدهای آهن ( عمدتاً هماتیت و کمتر گوتیت - لیمونیت) در مجموع حدود ۳-۱ درصد حجمی. به اندازه ی دهم درصد، پیریت، کوولیت و مالاکیت به فرم بلوری و آغشتگی. درجه آزادی اکسید - هیدروکسیدهای آهن حدود ۵۰-۴۵ درصد. درجه آزادی مالاکیت (٪ ۱/۱ <) حدود ۴۵-۴۰ درصد.
فراوانی باریت ۷۵-۷۰ درصد حجمی. کوارتز ۴-۲ درصد حجمی. کانی های ثانویه سرب عمدتاً سروزیت و کمتر انگلزیت در حد ۳-۱ درصد حجمی و کلسیت در حد ۴-۲ درصد حجمی. درجه آزادی باریت ۹۰-۸۵ درصد، کانه های اکسیدی سرب ۶۰-۵۵ درصد	کانی غیر فلزی اصلی باریت با فراوانی ۷۵-۷۰ درصد. فراوانی کوارتز ۲۰-۱۵ درصد حجمی، کلسیت ۴-۲ درصد حجمی، کانه های اکسیدهای سرب حدود ۳-۱ درصد حجمی و به ندرت مالاکیت و اسفالریت. درجه آزادی باریت ۹۰-۸۵ درصد. کانه های اکسیدی سرب ۵۵-۵۰ درصد.	باریت ۶۵-۶۰ درصد حجمی. کوارتز ۱۰-۵ درصد حجمی. فلدسپات آلکالن ۷-۳ درصد حجمی. کلسیت ۲-۱ درصد حجمی. کانه های ثانویه سرب ۵-۲ درصد حجمی. درجه آزادی باریت ۹۰-۸۵ درصد. درجه آزادی کانه های اکسید سرب (انگلزیت - سروزیت) در مجموع ۵۰-۴۵ درصد
هماتیت کانی فلزی اصلی با ۱۰-۵ درصد حجمی. گالن، کالکوپیریت، پیریت و کوولیت، ناچیز و در حد صدم درصد. درجه آزادی هماتیت ۶۵-۶۰ درصد.	اکسید - هیدروکسیدهای آهن ۲-۱ درصد حجمی، گالن در حد صدم تا دهم درصد و به ندرت مالاکیت. درجه آزادی اکسید - هیدروکسیدهای آهن ۶۵-۶۰ درصد و گالن ۹۵-۹۰ درصد.	فراکسیون اکسید - هیدروکسیدهای آهن مجموعاً ۲-۱ درصد حجمی. گالن صدم درصد. کالکوپیریت دهم درصد (۳/۱-۰/۱). مالاکیت صدم درصد / درجه آزادی هماتیت حدود ۶۵-۶۰ درصد
باریت تشکیل دهنده اصلی با درجه آزادی ۹۵-۹۰ درصد. کانه های اکسیدی سرب شامل سروزیت و انگلزیت در مجموع ۳-۱ درصد حجمی با درجه آزادی ۸۵-۸۰ درصد.	فراوانی و نوع کانی ها شبیه فراکسیون قبل. درجه آزادی باریت بیش از ۹۵ درصد و برای کانه های اکسیدی سرب حدود ۸۰-۷۵ درصد.	نوع و ترتیب فراوانی کانی ها مشابه فراکسیون قبل. درجه آزادی باریت ۹۵-۹۰ درصد. درجه آزادی انگلزیت - سروزیت در مجموع حدود ۷۵-۷۰ درصد. درگیری قطعات سروزیت و انگلزیت غیر آزاد، عمدتاً با باریت و قطعات اوپاک

هماتیت به مقدار ۱۵-۱۰ درصد حجمی. بیشترین کانی‌های فلزی نیمه فلزی اکسید- اکسید - هیدروکسیدهای آهن بعنوان کانی کالکوپیریت و پیریت در حد صدم تا دهم درصد.	هیدروکسیدهای آهن با ۴-۲ درصد	های اصلی فلزی- نیمه فلزی (۳-۱ درصد حجمی).	در حد دهم درصد کالکوپیریت، در حد صدم درصد گالن و به ندرت مالاکیت و اسفالریت اغلب بصورت آزاد. درجه آزادی کالکوپیریت حداقل ۹۷ درصد، گالن ۹۵-۹۰ درصد و هماتیت ۹۵-۷۵ درصد و گالن حداقل ۹۷ درصد
۷۵- (مقطع صیقلی)	گالن در حد صدم تا دهم درصد و مالاکیت صدم درصد. گالن هم بصورت خالص آزاد هم ذرات باقی در کانی‌های ثانویه سرب. درجه آزادی کانی‌های آهن دار حدود ۷۵-۸۰ درصد و گالن حداقل ۹۷ درصد	در حد دهم درصد کالکوپیریت، در حد صدم درصد گالن و به ندرت مالاکیت و اسفالریت اغلب بصورت آزاد. درجه آزادی کالکوپیریت حداقل ۹۷ درصد، گالن ۹۵-۹۰ درصد و هماتیت ۹۵-۷۵ درصد و گالن حداقل ۹۷ درصد	در حد دهم درصد کالکوپیریت، در حد صدم درصد گالن و به ندرت مالاکیت و اسفالریت اغلب بصورت آزاد. درجه آزادی کالکوپیریت حداقل ۹۷ درصد، گالن ۹۵-۹۰ درصد و هماتیت ۹۵-۷۵ درصد و گالن حداقل ۹۷ درصد
تشکیل دهنده اصلی باریت. قطعات اوپاک ۱۵-۱۰ درصد حجمی. کانه‌های اکسیدی سرب (سروزیت و انگلزیت) ۳-۲ درصد حجمی. کوارتز ۴-۲ درصد حجمی. کلسیت ۲-۱ درصد حجمی. درجه آزادی باریت حداقل ۹۵٪ و کانی‌های اکسیده سرب ۹۰٪.	کانی‌های شفاف اصلی باریت و کوارتز و کلسیت	کانی‌های شفاف اصلی باریت و کوارتز، بعد کلسیت/ کوارتز، ژپس. کانی‌های شفاف فرعی اکسیدی سرب، کلسیت، مالاکیت و فلدسپات. باریت به صورت آزاد با درجه آزادی حداقل ۹۵ درصد. درجه آزادی کانه‌های اکسیدی سرب در مجموع حدود ۸۵-۸۰ درصد	کانی‌های شفاف اصلی باریت و کوارتز، بعد کلسیت/ کوارتز، ژپس. کانی‌های شفاف فرعی اکسیدی سرب، کلسیت، مالاکیت و فلدسپات. باریت به صورت آزاد با درجه آزادی حداقل ۹۵ درصد. درجه آزادی کانه‌های اکسیدی سرب در مجموع حدود ۸۵-۸۰ درصد
۷۵- (مقطع نازک)	کانی‌های شفاف اصلی باریت و کوارتز و کلسیت	کانی‌های شفاف فرعی سروزیت - انگلزیت و مالاکیت. درجه آزادی باریت حداقل ۹۷ درصد. درجه آزادی کانه‌های اکسیدی سرب در مجموع حدود ۸۵-۸۰ درصد	کانی‌های شفاف اصلی باریت و کوارتز، بعد کلسیت/ کوارتز، ژپس. کانی‌های شفاف فرعی اکسیدی سرب، کلسیت، مالاکیت و فلدسپات. باریت به صورت آزاد با درجه آزادی حداقل ۹۵ درصد. درجه آزادی کانه‌های اکسیدی سرب در مجموع حدود ۸۵-۸۰ درصد

با توجه به بررسی‌های انجام شده، می‌توان گفت هر سه نمونه از دیدگاه عیاری و کانی شناسی تا حدودی مشابه هم می‌باشند. باریت عمده ترین کانی تشکیل دهنده نمونه‌ها بوده و کانی‌های اکسیدی و سولفیدی سرب نیز با کمی تفاوت در هر سه نمونه وجود دارد. همانطور که در بخش مربوط به آنالیز عیاری بحث شد و سپس توسط مطالعات کانی شناسی نیز تا حدودی تأیید شده، عملاً می‌توان نمونه‌های B4 و B5 (و یا هر سه نمونه با اغماض اندک) را بصورت یک نمونه در نظر گرفت. لذا ادامه مطالعات و آزمایش‌های فرآوری بر روی نمونه B12 و ترکیب نمونه‌های B5 و B4 (به نسبت مساوی) و با نام B54 انجام گرفت.

## ۸-۲- شرایط مد نظر در انجام آزمایش‌های جیگ

برای بررسی محدوده‌ی مناسب عملیاتی برای هر یک از پارامترها، یک سری آزمایش اولیه انجام شد. در آزمایش‌های اولیه، با استفاده از دبی بالاتر از ۱۸ l/min، تمام نمونه‌ها بدون اینکه فرصتی برای طبقه بندی پیدا کنند به سرریز (باطله) جیگ رفتند. همچنین با توجه به ظرفیت دبی سنج مورد استفاده در آزمایشگاه، دبی‌های پایین‌تر از ۶ l/min قابل تنظیم نبودند. با توجه به محدودیت‌ها و ویژگی‌های دستگاه جیگ مورد استفاده، مشخص شد که در ضخامت بستر کمتر از ۵ cm و بیشتر از ۲/۵ cm جدایش مناسبی اتفاق نمی‌افتد. لذا با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های اولیه پارامترها بصورت جدول ۴ تعیین شدند. تمامی آزمایش‌ها بر روی دو نمونه B12 و B54 انجام گرفت و محصولات پس از تعیین

چگالی و درصد وزنی به کنسانتره، در صورت نیاز عیار سنجی شده و بازیابی متالورژیکی BaO و PbO به محصول تعیین، و نتایج تحلیل شدند.

جدول ۴: پارامترهای عملیاتی استفاده شده در آزمایش‌های جیگ

پارامترها	واحد	مقادیر
دبی آب	l/min	۱۸، ۱۴، ۱۰، ۶
محدوده اندازه ذرات	$\mu\text{m}$	(۱۴۰۰+۲۰۰۰- به اختصار ۱۴۰۰)، (۸۵۰+۱۴۰۰- به اختصار ۸۵۰)، (۳۰۰+۳۰۰-)
ضخامت بستر	cm	۵ و ۲/۵
فرکانس نوسان	rpm	۲۵۵، ۳۰۵، ۳۳۰

### ۸-۳- شرایط مد نظر در انجام آزمایش‌های میز لرزان

با توجه به نتایج مطالعات منتشر شده توسط دیگر محققین و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های اولیه، تصمیم گرفته شد که ابعاد خوراک ورودی به میز به ریزتر از  $850 \mu\text{m}$  محدود گردد. همچنین با توجه به اینکه ماهیت میز لرزان برای استفاده برای ذرات با دانه بندی ریزتر نسبت به جیگ است تصمیم بر آن شد که محدوده‌ی دانه بندی ذرات خوراک به دو محدوده‌ی  $850 \mu\text{m} + 300 \mu\text{m}$  و  $300 \mu\text{m}$  تقسیم شود. برای تعیین شیب طولی میز، با توجه به مطالعات گذشته و ماهیت میز لرزان، ابتدا میز بر روی حالت افقی (شیب طولی  $0^\circ$ ) قرار داده شد. نتایج حاصل از آن نشان داد در این حالت تمامی ذرات به خروجی‌های اول و دوم میز (سمت خوراک دهی یا بخش مربوطه به کانی‌های سبک) راه می‌یابند. پس از آن شیب طولی را بر روی  $5/0^\circ$  قرار داده و مشخص شد با تغییر دبی و شیب عرضی، ذرات نمونه‌ها تقریباً تمام سطح میز را پوشش داده و طبقه بندی با میز لرزان را امکان پذیر می‌نماید. پس از تثبیت شیب طولی، فرکانس میز در محدوده‌های مختلفی قرار داده شد و نتایج بدین صورت بود که در فرکانس‌های پایین مدت زمان بسیار طولانی برای طبقه بندی ذرات نیاز بود. همچنین در فرکانس‌های بالا، ذرات بدون اینکه فرصت کافی برای طبقه بندی پیداکنند به قسمت انتهایی میز (محصولات میانی و سنگین) راه پیدا می‌کردند.

برای تعیین محدوده مناسب شیب عرضی، یک سری آزمایش با شیب عرضی  $6^\circ$  و  $14^\circ$  زده شد که در شیب‌های پایین اکثر ذرات به قسمت محصولات سنگین‌تر و در شیب‌های بالا اکثر ذرات به قسمت محصولات سبک بدون طبقه بندی مناسب راه می‌یافتند. در ادامه با توجه به ماهیت میز لرزان و اینکه در محدوده‌ی دانه ریزتری توانایی طبقه بندی دارند، دو محدوده‌ی دانه بندی درشت که در جیگ از آنها استفاده شدند حذف شد. همچنین در دبی‌های بالا مانند  $18 \text{ l/min}$  مشخص شد که ذرات بدون طبقه بندی شسته می‌شدند و البته با توجه به ظرفیت دبی سنج بطور عملی امکان تنظیم دبی آب به کمتر از  $6 \text{ l/min}$  وجود نداشت هر چند در  $6 \text{ l/min}$  نیز ذرات از روی سطح میز به خوبی شسته و طبقه بندی نمی‌شدند. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های اولیه، عوامل مورد بررسی در آزمایش‌ها بدست آمد. در

آزمایش‌های انجام شده با توجه به آنچه گفته شد، فرکانس و شیب طولی میز به ترتیب بر روی ۳۰۰rpm و  $0/5^\circ$  ثابت قرار داده شد. بنابراین مقادیر و محدوده پارامترهای عملیاتی مورد استفاده در آزمایش‌های میز لرزان در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: پارامترهای عملیاتی استفاده شده در آزمایش‌های میز لرزان

پارامترها	واحد	مقادیر
دبی آب	l/min	۱۶، ۱۴، ۱۰، ۸
محدوده اندازه ذرات	$\mu\text{m}$	(۳۰۰+) - ۸۵۰ - به اختصار (۸۵۰-) و (۳۰۰-)
شیب عرضی	درجه	۱۲ و ۱۰

تمامی آزمایش‌ها مطابق شرایط مد نظر بر روی دو نمونه B12 و B54 انجام گرفت و محصولات پس از تعیین چگالی و درصد وزنی به کنسانتره، در صورت نیاز عیار سنجی شده و بازیابی متالورژیکی BaO و PbO به محصول تعیین، و نتایج تحلیل شدند.

#### ۸-۴- شرایط مد نظر در انجام آزمایش‌های اسپیرال

با توجه به کارهای انجام شده توسط دیگر محققین و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های میز لرزان، تصمیم گرفته شد که از ذرات ریز تر از ۸۵۰ میکرون بعنوان خوراک در جدایش با استفاده از اسپیرال استفاده شود. مانند میز لرزان دو محدوده ابعادی  $300 + 850 \mu\text{m}$  و  $300 \mu\text{m}$  جهت اجرای آزمایش‌ها تهیه شدند. با توجه به حجم بالای نمونه مورد نیاز برای هر آزمایش، مقداری نمونه آزمایشی تهیه شد و تاثیر برخی از پارامترها با تکرار همان پالپ، و بصورت وزنی و چشمی بررسی شد. بر اساس ارزیابی‌های اولیه از جدایش ذرات، تاثیر دبی پالپ علاوه بر ابعاد ذرات خوراک، بر روی محصولات خروجی بارز تشخیص داده شد. لذا در تمامی آزمایش‌ها از درصد جامد ۲۵ درصد، دبی آب شستشوی ۲۰ لیتر بر دقیقه و موقعیت ثابت تیغه‌های جداکننده محصول‌ها (سه خروجی) استفاده شد. نهایتاً تاثیر دو پارامتر اندازه ذرات و دبی پالپ بر روی کیفیت محصولات خروجی مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر و محدوده پارامترهای عملیاتی مورد استفاده در آزمایش‌های اسپیرال در جدول ۶ آورده شده است. تمامی آزمایش‌ها مطابق شرایط مد نظر بر روی دو نمونه B12 و B54 انجام گرفت و محصولات پس از تعیین چگالی و درصد وزنی به کنسانتره، در صورت نیاز عیار سنجی شده و بازیابی متالورژیکی BaO و PbO به محصول تعیین، و نتایج تحلیل شدند.

جدول ۶: پارامترهای عملیاتی استفاده شده در آزمایش‌های اسپیرال

پارامترها	واحد	مقادیر
محدوده اندازه ذرات	$\text{m}\mu$	(۳۰۰+) - ۸۵۰ - به اختصار (۸۵۰-) و (۳۰۰-)
دبی خوراک	$\text{m}^3/\text{h}$	۳ و ۵

#### ۸-۵- شرایط مد نظر در انجام آزمایش‌های فلوتاسیون

جهت بررسی کارآئی روش فلوتاسیون برای جدایش کانی‌های با ارزش از کانی‌های باطله، ابتدا چند آزمایش مقدماتی با توجه به منابع موجود و موارد صنعتی استحصال سرب برنامه ریزی و انجام شد. پس از بررسی نتایج اولیه بصورت کلی، مرحله بعدی آزمایش‌ها برنامه ریزی و انجام شد تا بتوان نوع و میزان مصرف مواد شیمیایی مناسب جهت فلوتاسیون را تعیین نمود. پس از بررسی نتایج و آنالیزهای حاصل از آزمایش‌های اولیه، طراحی آزمایش جهت تعیین نوع و میزان مناسب مواد شیمیایی به کمک نرم افزار طراحی آزمایش Design Expert انجام گرفت. با تحلیل نتایج بدست آمده و تهیه مدل پاسخ سطح نسبت به بهینه سازی پارامترهای مد نظر برای رسیدن به بهترین ترکیب عیار و بازیابی اقدام شد.

برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون و در مرحله تهیه نمونه (خردایش و آسیا کنی) ابتدا تعیین زمان آسیا کنی با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات میکروسکوپی انجام گرفت. همچنین مواد شیمیایی مورد استفاده در آزمون‌ها تا حد امکان با عیار آزمایشگاهی تهیه شدند و در برخی موارد با توجه به وفور کلکتورهای پر کاربرد، از انواع صنعتی آن‌ها استفاده گردید. برای هر دو نمونه و در مرحله فلوتاسیون سرب، از طراحی آزمایش استفاده شد. پس از بهینه سازی تمامی پارامترها در مرحله فلوتاسیون باریت مد نظر قرار گرفت. در مرحله باریت نیز، برای هر نمونه میزان مصرف مواد شیمیایی بررسی شده و مقادیر بهینه آنها تعیین شدند. در حالت کلی می توان گفت به کلکتو، تنظیم کننده هایی مانند پتاسیم اتیل زنتات، متاسیلیکات سدیم، سولفید سدیم و آئروفلوت ۸۴۵ در کنار تنظیم کننده‌های pH نیاز می باشد.

#### ۶-۸- استفاده از ترکیب دو روش میز لرزان و فلوتاسیون

با توجه به نتایج بدست آمده در جدایش به کمک روش‌های ثقلی، و احتمال بهبود کیفیت جدایش به کمک فلوتاسیون در صورت ترکیب این روش‌ها و یا به اصطلاح پیش فرآوری ماده معدنی قبل از انجام آزمایش‌های فلوتاسیون، جدایش ماده معدنی به کمک میز لرزان و سپس انجام فلوتاسیون بر روی محصول میز لرزان مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل عملکرد بهتر روش میز لرزان، این روش از بین سه روش دیگر انتخاب گردید. با توجه به این که در روش میز لرزان کل خوراک ابتدا تا ابعاد ریزتر از  $850 \mu\text{m}$  رسانده شده پس از تقسیم کردن به دو محدوده  $300 \mu\text{m} + 850 -$  و  $300 \mu\text{m} -$  جدایش انجام شده بود، در این مرحله نیز ابتدا حجم مشخصی از خوراک خرد شده و پس از تقسیم به دو بخش، جدایش تحت شیب  $10^\circ$  و دبی  $10 \text{ lit/min}$  انجام گرفت. کنسانتره‌های حاصل از دو محدوده دانه بندی پس از جمع آوری و خشک شدن، توزین شده و پس از اختلاط با هم به کمک آسیا تا ابعاد  $106 \mu\text{m}$  - جهت استفاده در آزمایش فلوتاسیون، خرد شدند.

برای هر یک از نمونه های B12 و B54 شرایط بهینه تعیین شده در بخش آزمایش‌های فلوتاسیون مد نظر قرار گرفت و پس از انجام آزمایش‌ها، کنسانتره‌های تهیه شده، خشک توزین و عیار سنجی شدند. مقادیر بازیابی‌های وزنی و متالورژیکی

نسبت به وزن خوراک اولیه که به میز لرزان خوراکدهی شده بود محاسبه شد و نتایج آزمایش‌های ترکیبی با نتایج بدست آمده برای جدایش هر یک از نمونه‌ها تنها به کمک فلوتاسیون در جدول ۷ ارائه شده است. لازم به ذکر است که دو آزمایش ۱ و ۲ (به ترتیب برای نمونه B54 و B12) مربوط به بازفرآوری کنسانتره میز لرزان به روش فلوتاسیون می‌باشد و جهت مقایسه در ذیل هر ترکیب، مقادیر قابل دستیابی از همان نمونه در صورتی که تنها به روش فلوتاسیون فرآوری شود (با توجه به نتایج بدست آمده از بخش فلوتاسیون) آورده شده است.

جدول ۷: نتایج بدست آمده از آزمون‌های ترکیبی میز لرزان-فلوتاسیون و فلوتاسیون تنها (تمام بازیابی‌ها نسبت به خوراک اولیه وارد شده به اولین سیستم جدایش محاسبه شده اند)

Rec. /BaO	Rec. /PbO	%BaO	%PbO	بازیابی وزنی	بازیابی وزنی	نام نمونه	شماره تست
کنسانتره	کنسانتره	کنسانتره	کنسانتره	کنسانتره	کنسانتره		
باریت	سرب	باریت	سرب	باریت	سرب		
۴۱/۶۹	۴۵/۴۵	۵۹/۸	۹/۳۱	۲۲/۸	۷/۰۸	B54	۱
							بخش سرب تست ۱۸ جدول ۴-۲۰ و
۷۸/۶	۷۳/۷۱	۵۴/۳۱	۶/۹۶	۴۷/۸۰	۱۶/۳۱	B54	بخش باریت تست ۲۶ جدول ۴-۲۲ از
							گزارش اصلی
۴۱/۸۴	۴۸/۴۹	۶۵/۱	۶/۷۳	۳۲/۱۲	۱۳/۴	B12	۲
							بخش سرب تست ۱۴ جدول ۴-۲۹ و
۷۷/۰۹	۷۹/۲۷	۶۳/۵۹	۵/۱۴	۶۳/۵۹	۲۸/۷۱	B12	بخش باریت تست ۱۸ جدول ۴-۳۰ از
							گزارش اصلی

همانطور که دیده می‌شود، در صورت استفاده از سیستم ترکیبی عیارهای کنسانتره‌های بدست آمده بالاتر از هر یک از روش‌های میز لرزان و یا فلوتاسیون تنها خواهد بود. اما نکته حائز اهمیت میزان پایین‌تر بازیابی‌های وزنی کنسانتره‌ها و همچنین بازیابی‌های متالورژیکی عناصر مد نظر به کنسانتره‌های تولیدی در روش ترکیبی نسبت به روش فلوتاسیون می‌باشد. عمده‌ترین دلیل در تفاوت بازیابی‌ها، کارآئی بسیار پایین روش جدایش با میز لرزان (و عموماً دیگر روش‌های آزموده شده برای این نمونه‌ها) می‌باشد که منجر به هدر روی بخش زیادی از مواد با ارزش به باطله اولیه می‌گردد. تفاوت در بازیابی‌ها به میزانی است که به سادگی بر تفاوت بر افزایش عیار حاصل شده در روش ترکیبی غلبه می‌نماید. با توجه به تفاوت فاحش در بازیابی‌ها، به نظر می‌رسد بحث در مورد روش ترکیبی بسیار جالب نبوده و با توجه به لزوم خردایش مجدد برای فلوتاسیون، استفاده یکباره از روش فلوتاسیون به دلیل نتایج بهتر برای هر دو نمونه توصیه می‌گردد.



## ۹- نتایج بدست آمده

نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش از چهار دپوی مختلف از معدن مهدی آباد تهیه شد و با توجه به ویژگی‌های بسیار مشابه دو دپوی B1 و B2 نمونه‌های آن‌ها با هم مخلوط شدند (B12). آزمایش‌های شناسائی نمونه‌ها حاکی از مقدار بالای باریت (BaO) و همچنین مقدار سرب محتوای نزدیک به هم در دو نمونه B5 و B4 بود. پس از بررسی نتایج آنالیز XRF و همچنین نتایج آنالیز میکروسکوپی فراکسیون‌های مختلف نمونه‌ها، با توجه به تشابه زیاد دو نمونه B5 و B4 این دو نمونه با نسبت برابر مخلوط شده و نهایتاً نمونه B54 بعنوان نمونه دوم انتخاب شد. آزمایش‌های جدایش متعددی بر روی دو نمونه جهت پرعیار سازی آن‌ها برنامه ریزی و انجام شد. در ادامه به برخی از نتایج بارز بدست آمده اشاره می‌شود.

✓ بطور کلی چگالی نمونه خوراک B54 نسبت به نمونه B12 کمتر بود. به همین علت چگالی محصول‌های بدست آمده از نمونه‌ی B12 تحت شرایط جدایش یکسان، عموماً نسبت به محصول‌های B54 مشابه بیشتر بدست آمد. نتایج حاصل از تعیین چگالی محدوده‌های دانه بندی تولید شده از هر دو خوراک مورد استفاده در آزمایش‌های ثقلی، نشان داد که چگالی بخش دانه ریز خوراک بیشتر از چگالی متوسط خوراک و همچنین بخش دانه درشت می‌باشد. ✓ در جدایش با جیگ، استفاده از ضخامت بستر بیشتر باعث افزایش چگالی محصول شد. البته افزایش چگالی محصول رابطه معکوس با درصد وزنی محصول نشان داد. همچنین با افزایش دبی سیال، چگالی محصول روندی افزایشی-کاهشی، و درصد وزنی محصول روند کاهشی از خود نشان دادند. برای اندازه ذرات ریزتر خوراک، چگالی محصول بدست آمده بیشتر از ذرات درشت بود.

✓ بطور کلی بیشترین چگالی بدست آمده در نمونه B54 در شرایط ضخامت بستر ۵ cm اندازه ذرات  $300\mu\text{m}$  - و در دبی‌های بالاتر بدست آمد که چگالی محصول را از  $3/88\text{ g/cm}^3$  به حدود  $4/2\text{ g/cm}^3$  افزایش یافت. برای نمونه B12 افزایش چگالی مطلوبی حاصل نشد و در بهترین حالت در اندازه ذرات  $300\mu\text{m}$  - چگالی از  $4/2\text{ g/cm}^3$  به حدود  $4/4\text{ g/cm}^3$  افزایش یافت.

✓ برای بررسی تاثیر تغییر فرکانس جیگ بر روی کیفیت محصولات تولید شده، فرکانس جیگ از ۳۳۰ rpm به ۳۰۵ و سپس به ۲۵۵ rpm کاهش داده شد. در نتیجه‌ی کاهش فرکانس، عموماً، درصد وزنی ته ریزها افزایش یافت و همین سبب کاهش چگالی ته ریز و همچنین کاهش  $\text{PbO}$  و  $\text{BaO}$  محصولات شد. در نتیجه‌ی این تغییرات بازیابی متالورژیکی محصولات افزایش یافت و در مواردی حتی به ۱۰۰٪ بازیابی نیز نزدیک شد که نشان دهنده‌ی عدم جدایش موفقیت آمیز ذرات در کاهش فرکانس بوده است. رفتار جدایشی جیگ در فرکانس ۳۰۵ rpm بسیار شبیه به فرکانس اولیه دستگاه بود.

✓ در جدایش با میز لرزان، چگالی محصول‌های بدست آمده در شیب عرضی  $12^\circ$  بالاتر از چگالی محصول‌ها در شیب عرضی  $10^\circ$  بدست آمد. اما این نکته لازم به ذکر است که در شیب  $12^\circ$ ، درصد وزنی محصولات بدست آمده باوجود چگالی بالا گاهی بسیار پایین بود.

- ✓ در حالت کلی در جدایش نمونه B54 با استفاده از میز لرزان در شیب عرضی  $12^\circ$  در اندازه ذرات درشت تر چگالی محصول بدست آمده از حدود  $3/84 \text{ g/cm}^3$  تا حدود  $5/9 \text{ g/cm}^3$  افزایش یافت که البته درصد وزنی محصول بدست آمده حدود ۱٪ وزنی بدست آمد. برای نمونه B12 در بهترین حالت چگالی محصول از حدود  $4/4 \text{ g/cm}^3$  به حدود  $5/1 \text{ g/cm}^3$  رسیده است.
- ✓ در جدایش با میز لرزان، درصد وزنی محصول‌های بدست آمده با افزایش دبی کاهش یافت. این کاهش در اندازه ذرات درشت تر و شیب عرضی پایین تر قابل توجه بود بطوریکه برای ذرات درشت در شیب عرضی و دبی کم، جدایش به خوبی صورت نگرفت.
- ✓ در محصولات نمونه B54 که با میز لرزان فرآوری شده بودند، روندی مشابه بین میزان BaO، چگالی و بازیابی محصول وجود داشت. عموماً میزان PbO (بعنوان نماینده کانی‌های اکسیدی و سولفیدی سرب) در محصول بدست آمده توسط جدایش با میز لرزان از خوراک دانه ریز بیش از خوراک دانه درشت بود. همچنین تغییر چگالی محصول درشت تر با افزایش دبی تغییر کمی داشت (در شیب عرضی  $10^\circ$  چگالی از  $3/84 \text{ g/cm}^3$  در دبی پایین به  $4/5$  در دبی بالاتر رسیده است). در شیب عرضی  $12^\circ$  و ذرات با محدوده دانه بندی  $300 \mu\text{m}$  - افزایش قابل توجه PbO/ محصول مشاهده شد که البته بازیابی وزنی محصول بسیار پایین بود.
- ✓ در جدایش با اسپیرال روندی تقریباً مشابه با میز لرزان مشاهده شد. در مورد هر دو نمونه و بویژه نمونه B54، افزایش دبی خوراکدهی باعث کاهش چگالی محصول شد (در اندازه ذرات  $300 \mu\text{m}$  - چگالی از  $4/7 \text{ g/cm}^3$  به  $4/3$  کاهش یافت و در اندازه ذرات  $800 \mu\text{m}$  - از  $4/25 \text{ g/cm}^3$  به  $4/1 \text{ g/cm}^3$  با کاهش دبی کاهش یافت) در حالیکه بازیابی وزنی محصول افزایش یافت. بالاترین تغییر چگالی محصول نمونه B54 بدست آمده با استفاده از اسپیرال حدود  $1 \text{ g/cm}^3$  افزایش چگالی داشته است. تقریباً ارتباط مستقیمی بین چگالی محصول و میزان BaO و PbO مشاهده شد.
- ✓ در مورد نمونه B54 میزان BaO تا حدود ۵۷ درصد و میزان PbO تا حدود ۷/۵ درصد افزایش یافت. البته بازیابی وزنی و بازیابی متالورژیکی هر دو و بویژه BaO قابل ملاحظه نبود. در مورد جدایش نمونه B12 با اسپیرال می‌توان گفت جدایش به معنی تغییر در محتوای کانی‌های با ارزش مشهود نبود و بیشتر جنبه تقسیم خوراک مطرح بود. علیرغم چگالی بالای خوراک نمونه B12 نسبت به B54، نتایج آزمایش‌های جدایش با جیگ، میز لرزان و اسپیرال نشان داد که این نمونه توانائی تولید محصول با چگالی بالاتری را ندارد.
- ✓ ترتیب موفقیت روش‌های ثقلی بررسی شده در راستای تولید محصول نهایی و یا بعنوان یک روش پیش فرآوری را می‌توان بصورت میز لرزان < اسپیرال < جیگ در نظر گرفت. عملاً به دلیل زمان ماند کوتاه تر مواد، تلاطم بیشتر، درجه آزادی پایین کانی‌ها، حضور مخلوطی از کانی‌های سولفیدی و اکسیدی سرب و محدوده ابعادی درشت تر مورد نیاز در جیگ، این روش در کل نتایج شایان توجه و قابل قبولی را ارائه ننمود.

- ✓ پس از انجام آزمون‌های اولیه فلوتاسیون، گزینه تولید کنسانتره سرب و سپس تولید کنسانتره باریت انتخاب شد. آزمون‌های تکمیلی فلوتاسیون به کمک روش طراحی آزمایش برای مرحله فلوتاسیون سرب انجام شدند و حالت بهینه برای دست یابی به بالاترین میزان بازیابی PbO پس از تحلیل نتایج و ادامه بررسی‌ها تا حصول شرایط بیشینه ادامه داده شد.
- ✓ برای نمونه B54 نتایج بدست آمده حاکی از تاثیر حداکثری کلکتور PEX در رسیدن به بازیابی بالای سرب محتوی را داشت. تاثیر متقابل بارز بین کلکتور PEX و سولفید سدیم تشخیص داده شد. جهت دستیابی به حداکثر بازیابی PbO، حداقل مقدار متاسیلیکات سدیم، حداکثر مقدار سولفید سدیم و همچنین بیشترین مقدار کلکتور PEX در مرحله بهینه سازی اولیه تعیین شد. در ادامه و به منظور بهینه کردن شرایط آزمون‌ها، مقدار PEX و pH پالپ مجدداً بهینه سازی شدند. نهایتاً در مرحله فلوتاسیون سرب با استفاده از ۵۰۰ گرم بر تن متاسیلیکات سدیم، ۱۱۰۰ گرم بر تن سولفید سدیم و ۳۵۰ گرم بر تن کلکتور PEX در pH=۹ می‌توان به عیار و بازیابی PbO ۶/۹۶٪ و ۷۳/۷۱٪ دست یافت.
- ✓ پس از بهینه کردن فلوتاسیون مرحله سرب نمونه B54، سعی بر افزایش میزان بازیابی BaO در مرحله فلوتاسیون باریت این نمونه به ترتیب با تغییر میزان کلکتور آثروفلوت ۸۴۵، متاسیلیکات سدیم و pH محیط شد. نهایتاً محصول باریت بدست آمده در شرایط استفاده از ۱۰۰۰ گرم بر تن متاسیلیکات سدیم، ۴۸۰ گرم بر تن کلکتور آثروفلوت ۸۴۵ در pH=۱۰ به ترتیب دارای عیار و بازیابی BaO ۵۴/۳۱٪ و ۷۸/۶۰٪ بعنوان حالت منتخب برگزیده شد.
- ✓ در مورد نمونه B12 نیز با توجه به آزمون‌های اولیه و مقایسه با نمونه B54، شرایط طراحی آزمایش تعیین شد. تحلیل نتایج بدست آمده از طراحی آزمایش این نمونه حاکی از تاثیر بیشتر متاسیلیکات سدیم و همچنین تاثیر متقابل متاسیلیکات سدیم و سولفید سدیم و تاثیر متقابل متاسیلیکات سدیم و کلکتور PEX بر روی بازیابی PbO بود. با توجه به نتایج برای رسیدن به حداکثر بازیابی PbO استفاده از حداقل متاسیلیکات سدیم، حداقل میزان سولفید سدیم و حداکثر میزان استفاده از کلکتور PEX پیشنهاد شد. ادامه بهینه سازی میزان مواد شیمیایی منجر به استفاده از ۲۰۰ گرم بر تن متاسیلیکات سدیم، ۲۰۰ گرم بر تن سولفید سدیم و ۴۵۰ گرم بر تن کلکتور PEX در pH=۹ گردید که می‌تواند محصولی با عیار و بازیابی بیشینه به ترتیب به ۵/۱۴٪ و ۷۹/۲۷٪ تولید نماید.
- ✓ پس از بهینه سازی مرحله فلوتاسیون سرب برای نمونه B12، با ثابت نگه داشتن شرایط این مرحله و با تغییر میزان کلکتور آثروفلوت ۸۴۵ در مرحله فلوتاسیون باریت سعی بر رسیدن به حداکثر بازیابی BaO شد. در نتیجه آزمون‌های انجام شده در شرایط ۵۰۰ گرم بر تن متاسیلیکات سدیم و ۴۸۰ گرم بر تن آثروفلوت ۸۴۵ در pH=۱۰ به ترتیب عیار و بازیابی BaO ۶۳/۵۹٪ و ۷۷/۰۹٪ حاصل شد.
- ✓ استفاده از ترکیب دو روش میز لرزان بعنوان بهترین گزینه جدایش ثقی، و سپس استفاده از فلوتاسیون برای باز فرآوری کنسانتره اولیه منجر به تولید محصولاتی با عیارهای بالاتر نسبت به هر یک از این دو روش بصورت مستقل

شد. به دلیل کاهش شدید در بازیابی وزنی و متالورژیکی کنسانتره‌های تولیدی در روش ترکیبی، استفاده از این سیستم توصیه نشده و ظاهراً استفاده تنها از فلوتاسیون مقرون به صرفه‌تر می‌باشد.

#### ۱۰- پیشنهادات

❖ پیشنهاد می‌گردد در صورت امکان آزمایش‌های پایلوت برای هر یک از روش‌های جدایش ثقلی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در صورت برنامه ریزی برای استفاده از روش فلوتاسیون، بایستی مطالعات تفصیلی انجام گرفته و سپس طراحی و اجرا گردد.