

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک
گرایش فرآوری مواد معدنی
پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تاثیر امواج فراصوت بر کارایی فلوتاسیون سرب: مطالعه موردی: نمونه خاک کربناته کارخانه باما

نگارنده:

مجتبی رستمی خواجه‌لنگی

استاد راهنما:

دکتر اصغر عزیزی

آذر ۱۴۰۰

شماره: ۶۰۰/۴۲.۱۵۸

تاریخ: ۱۴۰۰/۱۰/۲۴

ویرایش:

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مجتبی رستمی خواجه‌لنگی با شماره دانشجویی ۹۸۰۵۸۹۴ رشته مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی تحت عنوان بررسی تاثیر امواج فراصوت بر کارایی فلوتاسیون سرب، مطالعه موردی نمونه خاک کربناته یاما که در تاریخ ۱۴۰۰/۹/۲۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☒ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی	

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

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به مهربان فرشتگانی که:

لحظات ناب باور بودن، لذت غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و
زیبای زندگیم، مدیون حضور آن هست

تقدیم به پدر و مادر عزیزم.

به همسرهای مهربان زندگیم سعید و مرتضی نازنین

که باهم آغاز کردیم، در کنار هم آموختیم و به امید هم به آینده چشم می‌دوزیم. قلمم لبریز از عشق به شماست
و خوشبختی‌تان منتهای آرزویم

تشکر و قدردانی

با نام خالق گیتی آغاز کردم راهی را که پیمودن مسیرش میسر نبود جز با نام و یاد ازلی او و اکنون که به سر منزلگاه و پایان سفر می‌رسم، سر بر سجده شکر می‌نهم و بر خود لازم می‌دانم از تمام عزیزانی که مرا در انجام این تحقیق یاری نمودند، تشکر نمایم .

با سپاس و تقدیر ویژه از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر اصغر عزیزی که در مراحل مختلف این پژوهش، راهنمایی‌های ارزنده و سازنده خود را بر من ارزانی داشته و از هیچ کوششی در این زمینه دریغ ننمودند .

این نوشته فرصتی است تا از زحمتهای اساتید بزرگوارم در گروه فرآوری مواد معدنی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود جناب دکتر محمد کارآموزیان و جناب دکتر محمد جهانی که تمام سعی‌شان پیشرفت ما بوده است، قدردانی نمایم .

از مهندس مصطفی پامرد از کارخانه باما اصفهان که در تمام مراحل این پژوهش با اینجانب همکاری نمودند، بسیار سپاسگزارم .

تعهدنامه

اینجانب مجتبی رستمی خواجه‌لنگی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بررسی تاثیر امواج فراصوت بر کارایی فلوتاسیون سرب، مطالعه موردی نمونه خاک کربناته باما تحت راهنمایی دکتر اصغر عزیزی متعهد می‌شوم:

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

امضاء:

تاریخ:

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

امواج فراصوت یک فرآیند اکسیداسیون پیشرفته است که می‌تواند با تغییر ماهیت سطح پالپ و سطح ذرات کانی تاثیر چشم‌گیری بر عملکرد فلوتاسیون ایجاد کند. به‌همین دلیل در این پژوهش، تاثیر امواج فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون نمونه خاک کربناته معدن سرب باما مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور روش سطح پاسخ برای طراحی آزمایش‌ها و بررسی رفتار پارامترهای مهم تاثیرگذار از قبیل فرکانس، زمان و توان فراصوت و میزان مصرف مواد شیمیایی شامل کلکتور، سولفید سدیم و کف‌ساز استفاده شد. نتایج نشان داد که در هر دو فرکانس ۳۷ و ۸۰ کیلو هرتز، پارامترها رفتار مشابهی داشتند و با افزایش توان و زمان فراصوت مقدار بازیابی افزایش یافت. همچنین افزایش مقدار کلکتور، کف‌ساز و سولفید سدیم تا یک مقدار مشخصی تاثیر مثبت در بهبود بازیابی داشت. علاوه بر این از بین پارامترها، میزان مصرف کف‌ساز، زمان فراصوت و اثر متقابل توان فراصوت با مقدار کلکتور به ترتیب دارای بیشترین تاثیر بر بازیابی فلوتاسیون سرب بودند. بهینه‌سازی فلوتاسیون فراصوت سرب انجام شد و بیشترین میزان بازیابی (حدود ۹۲ درصد) تحت شرایط مطلوب پارامترها شامل زمان فراصوت ۱۷ دقیقه، توان دستگاه فراصوت ۸۰ درصد یک کیلووات، مقدار کلکتور ۲۵۹ گرم بر تن، میزان سولفید سدیم ۳۸۶۷ گرم بر تن، مقدار کف‌ساز ۱۱ گرم بر تن و فرکانس ۳۷ کیلو هرتز بدست آمد.

کلمات کلیدی: فلوتاسیون، کربنات سرب، بازیابی، امواج فراصوت، روش سطح پاسخ.

فهرست

فصل اول.....	۱
کلیات تحقیق.....	۱
۱- مقدمه و تعریف مسأله.....	۲
۱-۲- کلیاتی از سرب.....	۳
۱-۳- تولید و قیمت جهانی سرب.....	۴
۱-۴- مطالعه موردی: معرفی کارخانه‌ی باما.....	۴
۱-۵- ضرورت و اهداف انجام تحقیق.....	۷
۱-۶- ساختار پایان‌نامه.....	۸
فصل دوم.....	۹
مروری بر پژوهش‌های پیشین.....	۹
۲-۱- مروری بر پژوهش‌های قبلی.....	۱۰
۲-۲- جمع‌بندی.....	۱۷
فصل سوم.....	۱۹
۳-۱- آماده‌سازی نمونه.....	۲۰
۳-۲- شناسایی کمی نمونه:.....	۲۰
۳-۳- شناسایی کیفی نمونه:.....	۲۱
۳-۴- مواد و تجهیزات مورد نیاز.....	۲۲
۳-۵- روش انجام آزمایش فلوتاسیون.....	۲۲
۳-۶- روش سطح-پاسخ (RSM).....	۲۶
فصل چهارم:.....	۲۹
ارائه یافته‌ها و تحلیل نتایج.....	۲۹

۱-۴	مقدمه	۳۰
۲-۴	طراحی و روش اجرای آزمایش‌های فلوتاسیون فراصوت	۳۰
۱-۲-۴	مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل آماری	۳۳
۲-۲-۴	اعتبارسنجی مدل	۳۷
۳-۲-۴	بررسی تاثیر پارامترها و اندر کنش آن‌ها بر بازیابی فلوتاسیون فراصوت سرب	۳۹
۳-۴	تاثیر متقابل پارامترها	۴۳
۱-۳-۴	اثر همزمان توان و زمان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب	۴۳
۲-۳-۴	اثر همزمان توان فراصوت و کلکتور بر بازیابی فلوتاسیون سرب	۴۵
۳-۳-۴	اثر همزمان توان فراصوت و سولفید سدیم بر بازیابی فلوتاسیون سرب	۴۶
۴-۳-۴	اثر همزمان زمان فراصوت و کلکتور بر بازیابی سرب	۴۸
۵-۳-۴	اثر همزمان زمان فراصوت و مقدار سولفید سدیم بر بازیابی سرب	۴۹
۶-۳-۴	اثر همزمان کلکتور و سولفید سدیم بر بازیابی سرب	۵۱
۷-۳-۴	اثر متقابل توان و زمان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب	۵۳
۸-۳-۴	اثر متقابل مقادیر کلکتور و سولفید سدیم بر بازیابی فلوتاسیون سرب	۵۴
۴-۴	بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر فلوتاسیون فراصوت سرب	۵۵
۵۷	فصل پنجم	
۱-۵	مقدمه	۵۸
۲-۵	جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۵۸
۳-۵	پیشنهادهای	۵۹
۶۰	منابع	
۶۴	Abstract	

فهرست اشکال

- شکل ۱. فلوجارت شرکت باما..... ۶
- شکل ۱-۳. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه کانه سرب (محور افقی: موقعیت (θ_2) (مس (Cu))، محور عمودی: شدت (شمارش))..... ۲۱
- شکل ۲-۳: نمایی از دستگاه فلوتاسیون دنور..... ۲۳
- شکل ۳-۳: نمایی از دستگاه فراصوت..... ۲۴
- شکل ۱-۴: سطوح پارامترهای مهم انتخابی تاثیرگذار بر فرآیند فلوتاسیون سرب براساس روش سطح-پاسخ و طرح مرکب مرکزی..... ۳۱
- جدول ۱-۴: ماتریس طرح اجرای آزمایش‌های فلوتاسیون با فراصوت و مقدار اندازه‌گیری شده بازیابی سرب..... ۳۲
- جدول ۲-۴: تجزیه تحلیل آماری مدل‌های مختلف برازش شده بر فلوتاسیون سرب با کمک فراصوت..... ۳۴
- جدول ۳-۴: آنالیز واریانس مدل درجه‌ی دوم برازش بر فلوتاسیون سرب با فراصوت شده بعد از حذف پارامترهای بی‌اهمیت ($0.05 > \text{میزان احتمال } P$)..... ۳۶
- شکل ۳-۴: نمودار مقادیر آزمایشگاهی بازیابی فلوتاسیون سرب در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده از مدل پیشنهادی..... ۳۷
- شکل ۳-۴: نمودار احتمال نرمال باقیمانده (اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی و واقعی)..... ۳۸
- شکل ۴-۴: نمودار مقدار باقیمانده استیودنت شده در مقابل شماره آزمایش‌ها برای تعیین دقت مدل برازش شده..... ۳۹
- شکل ۵-۴: نمودار حساسیت یا اغتشاش نشان‌دهنده‌ی اثر همه پارامترهای عملیاتی بر فلوتاسیون سرب برای حالت فرکانس ۳۷ کیلوهرتز دستگاه فراصوت..... ۴۰

شکل ۴-۶: نمودار حساسیت یا اغتشاش نشان‌دهنده‌ی اثر همه پارامترهای عملیاتی بر فلوتاسیون سرب برای حالت فرکانس ۸۰ کیلوهرتز دستگاه فراصوت ۴۱

شکل ۴-۷: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده‌ی اثر توان و زمان فراصوت بر فلوتاسیون سرب ۴۳

شکل ۴-۸: نمودار اثر متقابل بین توان و زمان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب هنگامیکه که سایر پارامترها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود و فرکانس بر روی ۳۷ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده‌اند. ۴۴

شکل ۴-۹: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده‌ی اثر کلکتور و توان فراصوت بر فلوتاسیون سرب. ۴۵

شکل ۴-۱۰: نمودار اثر متقابل بین کلکتور و توان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب هنگامیکه که سایر پارامترها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود و فرکانس بر روی ۳۷ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده‌اند ۴۶

شکل ۴-۱۱: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده‌ی اثر میزان مصرف سولفید سدیم و توان فراصوت بر فلوتاسیون سرب ۴۷

شکل ۴-۱۲: نمودار اثر متقابل بین میزان مصرف سولفید سدیم و توان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب هنگامیکه که سایر پارامترها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود و فرکانس بر روی ۳۷ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده‌اند ۴۷

. شکل ۴-۱۳: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده‌ی اثر کلکتور و زمان اولتراسونیک بر فلوتاسیون سرب ۴۸

شکل ۴-۱۴: نمودار اثر متقابل بین میزان مصرف کلکتور و زمان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب هنگامیکه که سایر پارامترها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود و فرکانس بر روی ۳۷ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده‌اند. ۴۹

شکل ۴-۱۵: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده‌ی اثر میزان مصرف سولفید

سدیم و زمان فراصوت بر فلوتاسیون سرب..... ۵۰

شکل ۴-۱۶: نمودار اثر متقابل بین میزان مصرف سولفید سدیم و زمان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب

هنگامیکه که سایر پارامترها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود و فرکانس بر روی ۳۷ کیلوهرتز ثابت نگه داشته

شده‌اند ۵۰

شکل ۴-۱۷: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده‌ی اثر میزان مصرف سولفید

سدیم و کلکتور بر فلوتاسیون سرب..... ۵۲

شکل ۴-۱۸: نمودار اثر متقابل بین میزان مصرف سولفید سدیم و کلکتور بر بازیابی فلوتاسیون سرب هنگامیکه

که سایر پارامترها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود و فرکانس بر روی ۳۷ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده‌اند ۵۲

شکل ۴-۱۹: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده‌ی اثر توان و زمان فراصوت

بر فلوتاسیون سرب هنگامیکه که سایر پارامترها در سطح مرکزی خود (میزان کلکتور: ۲۵۰ گرم بر تن، مقدار

سولفید سدیم: ۳۰۰۰ گرم بر تن و میزان کف‌ساز: ۱۵ گرم بر تن) و فرکانس بر روی ۸۰ کیلوهرتز ثابت نگه

داشته شده است. ۵۳

شکل ۴-۲۰: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده‌ی اثر میزان مصرف سولفید

سدیم و کلتور بر فلوتاسیون سرب هنگامیکه که سایر پارامترها در سطح مرکزی خود (توان فراصوت: ۵۵٪، زمان

فراصوت: ۱۴ دقیقه و مقدار کف‌ساز: ۱۵ گرم بر تن) و فرکانس بر روی ۸۰ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده است

..... ۵۴

شکل ۴-۲۱: سطوح بهینه‌ی پیشنهادی برای پارامترهای مهم تاثیرگذار بر فلوتاسیون سرب با فراصوت. ۵۶

فهرست جداول

- جدول ۳-۱- نتایج آنالیز کمی، بروی نمونه خاک کربناته کارخانه باما ۲۰
- جدول ۳-۲: مقادیر مختلف پارامترهای موثر با استفاده از نرم افزار Design Expert ۲۵
- جدول ۴-۱: ماتریس طرح اجرای آزمایش‌های فلوتاسیون با فراصوت و مقدار اندازه‌گیری شده بازیابی سرب. ۳۲۰
- جدول ۴-۲: تجزیه تحلیل آماری مدل‌های مختلف برازش شده بر فلوتاسیون سرب با کمک فراصوت. ۳۴.....
- جدول ۴-۳: آنالیز واریانس مدل درجه‌ی دوم برازش بر فلوتاسیون سرب با فراصوت شده بعد از حذف پارامترهای بی‌اهمیت ($0.05 > P$). ۳۶

فصل اول

کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه و تعریف مسأله

سرب و روی از پرمصرف‌ترین فلزات غیرآهنی در صنایع مختلف محسوب می‌شوند. ایران کشوری غنی از مواد معدنی سرب و روی است و ذخایر سولفیدی- اکسیدی در ایران حدود ۳ درصد از کل منابع سرب و روی تمامی کشورها است (معمدی زاده، ۱۳۹۸). این امر نشان‌دهنده‌ی پتانسیل عظیم کشور از لحاظ منابع سرب است که اهمیت موضوع فرآوری کانسنگ‌های این فلز را آشکار می‌سازد. کانسنگ‌های اکسیدی (کربناته) سرب و روی پس از انواع سولفیدی آن‌ها مهم‌ترین منبع تولید این فلزات هستند. از طرفی، امروزه به دلیل افزایش تقاضا و کاهش منابع سولفیدی بازیابی و استخراج فلزات پایه مانند سرب و روی از منابع اکسیدی جنبه اقتصادی به خود گرفته است. فلوتاسیون یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌های پریارسازی مواد معدنی برای این کانسنگ‌ها است. از طرفی رفتار فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی با توجه به ماهیت آن‌ها با کانی‌های سولفیدی متفاوت است و این یکی از چالش‌های جدی در این زمینه است. در واقع، در این حالت مقدار مصرف کلکتور بالا بوده و انتخابیت و بازیابی پایین است. پیشرفت‌های اخیر در حوزه کانه‌آرایی و مخصوصاً فلوتاسیون نشان می‌دهد که لرزش‌های مکانیکی، امواج صوتی^۱ (یا فراصوتی) و مجموع این پدیده‌های فیزیکی می‌تواند میزان فلوتاسیون کانی‌ها را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد و تغییرات چشمگیری در بازیابی و عیار ایجاد کند. در واقع، امواج مافوق صوت، بطور گسترده‌ای برای آماده‌سازی و شستشوی سطح طی فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و شیمی فیزیکی در کانه‌آرایی استفاده می‌شود. مکانسیم اصلی جدایش کانی‌ها با امواج فراصوت ناشی از پدیده کاویتاسیون^۲ همراه با یک افزایش موضعی در فشار و درجه حرارت است. تغییرات حاصل شده از این پدیده، سرعت انتقال جرم را افزایش و زمان لازم را برای فرایند کاهش می‌دهد. بنابراین، ذرات آبگریز در پالپ فلوتاسیون با کمک امواج فراصوت، حتی با اندرکنش جامد-مایع ضعیف‌تر، راحت‌تر تولید می‌شوند.

^۱ Ultrasonic Wave

^۲ Cavitation

۱-۲- کلیاتی از سرب

فلز سرب یکی از فلزهای پایه در صنعت مدرن و رایجترین فلز غیرآهنی در جهان بعد از آلومینیوم، مس و روی است. به دلیل کاربردهای فراوانی که این فلز داشته و همچنین به دلیل تهیهی آسان، کار کردن آسان با آن، انعطاف‌پذیری، چکش‌خواری بالا، پالایش راحت و ... حداقل از ۷۰۰۰ سال پیش مورد استفاده بشر می‌باشد. سرب به علت استفاده در باتری‌ها فلزی استراتژیک شناخته می‌شود، زیرا بیشتر فعالیت‌های نظامی و شهری به انرژی ذخیره شده در باتری‌ها بستگی دارد. براساس پژوهش‌های پیشین، صنعت باتری‌سازی به‌طور تقریبی حدود ۸۰٪ از مصرف سرب را به خود اختصاص می‌دهد (معمدی زاده، ۱۳۹۸). سرب در باتری‌های خودروهای برقی، مراکز تلفن‌های سیار و در تامین برق اضطراری برای بیمارستان‌ها و کامپیوترها استفاده می‌شود. همچنین، سرب را به شکل ترکیب تترا اتیل سرب برای به‌سوزی، به بنزین ماشین‌ها اضافه می‌کنند. از این فلز در ساخت تجهیزات و صنایع نظامی، اتاق‌های اشعه‌ایکس، در دیوار رآکتورهای اتمی و رادیوگرافی به‌عنوان جاذب اشعه مضر، در صنعت لحیم‌کاری، در بستر حمام‌های گالوانیزاسیون، در تهیه آندهای استفاده شده در واحدهای الکترولیز، در صنعت چاپ و در نهایت در صنایع رنگ و کبریت‌سازی استفاده می‌کنند (معمدی زاده، ۱۳۹۸).

فلز سرب به دلیل پایداری کم، به صورت خالص در طبیعت یافت نمی‌شود. هرچند در ساختمان بیش از ۱۳۰ کانی شناسایی شده است. مهمترین کانه‌های سرب، گالن (PbS)، آنگلزیت ($PbSO_4$) و سروزیت ($PbCO_3$) است، اما کانه‌های اکسیدی سرب نیز پس از کانه‌های سولفیدی سرب یکی از مهمترین منابع تأمین فلز سرب هستند (Moradi & Monhemius, 2011). به‌علاوه کانی‌های روی‌دار مانند اسفالریت (ZnS)، اسمیتزونیت ($ZnCO_3$)، همیمورفیت ($Zn_4Si_2O_7(OH) \cdot H_2O$) و ویلمیت (Zn_2SiO_4) نیز اغلب با سرب همراه هستند.

۱-۳- تولید و قیمت جهانی سرب

با توجه به داده‌های سازمان زمین‌شناسی آمریکا، مجموع جهانی ذخایر قابل استحصال سرب در سال ۲۰۱۵ در حدود ۸۷ میلیون تن است. علیرغم افزایش مصرف سرب در سال‌های اخیر، افزایش کل ذخایر این فلز رشد بیشتری داشته و بیش از سال‌های گذشته در دسترس قرار گرفته است. تولید جهانی سرب نیز نشان می‌دهد که بیشترین میزان تولید سرب در قاره‌های آسیا و آمریکا متمرکز است. همچنین در حال حاضر کشور چین منبع اصلی تولید کانه‌های سرب و روی در جهان است. این کشور تا پایان سال ۲۰۱۳ میلادی با تولید ۳۰٪ روی و ۴۳٪ سرب جهان نقش مهمی را در تولید این دو فلز بر عهده داشته است. تولید فلز سرب در سال ۲۰۲۱ نیز به ۵/۱ میلیون تن رسیده است که چین به تنهایی ۴۶/۷٪ از حجم تولید را در اختیار دارد. استرالیا، آمریکا، مکزیک و پرو بعد از چین در رده‌های بعدی قرار دارند. لازم به ذکر است بیشترین ذخایر قابل استحصال سرب جهان در استرالیا قرار دارد. جایگاه ایران نیز در صنعت سرب جهان نشان می‌دهد که ایران چهارمین تولیدکننده بزرگ ماده‌ی معدنی سرب و روی در آسیا بعد از چین، قزاقستان و هند است و از نظر تولید شمش سرب جایگاه پنجم را در آسیا دارد. حدود ۳ درصد از ذخایر جهانی سرب و روی در مهمترین معادن ایران قرار دارد. ایران با وجود دو معدن بزرگ مهدی‌آباد و انگوران منابع کافی را برای فعالیت در صنعت سرب و روی دارد. پنج معدن انگوران، مهدی‌آباد، عمارت، کوشک و گوشفیل به ترتیب با میزان ذخیره ۹ میلیون تن، ۲۰ میلیون تن، ۴ میلیون تن، ۳ میلیون تن و ۲ میلیون و ۵۰۰ هزار تن، بیش از ۸۳ میلیون تن ذخیره‌ی قطعی فلز سرب و روی را به خود اختصاص داده‌اند (کامیابی و جواهری، ۱۳۹۴).

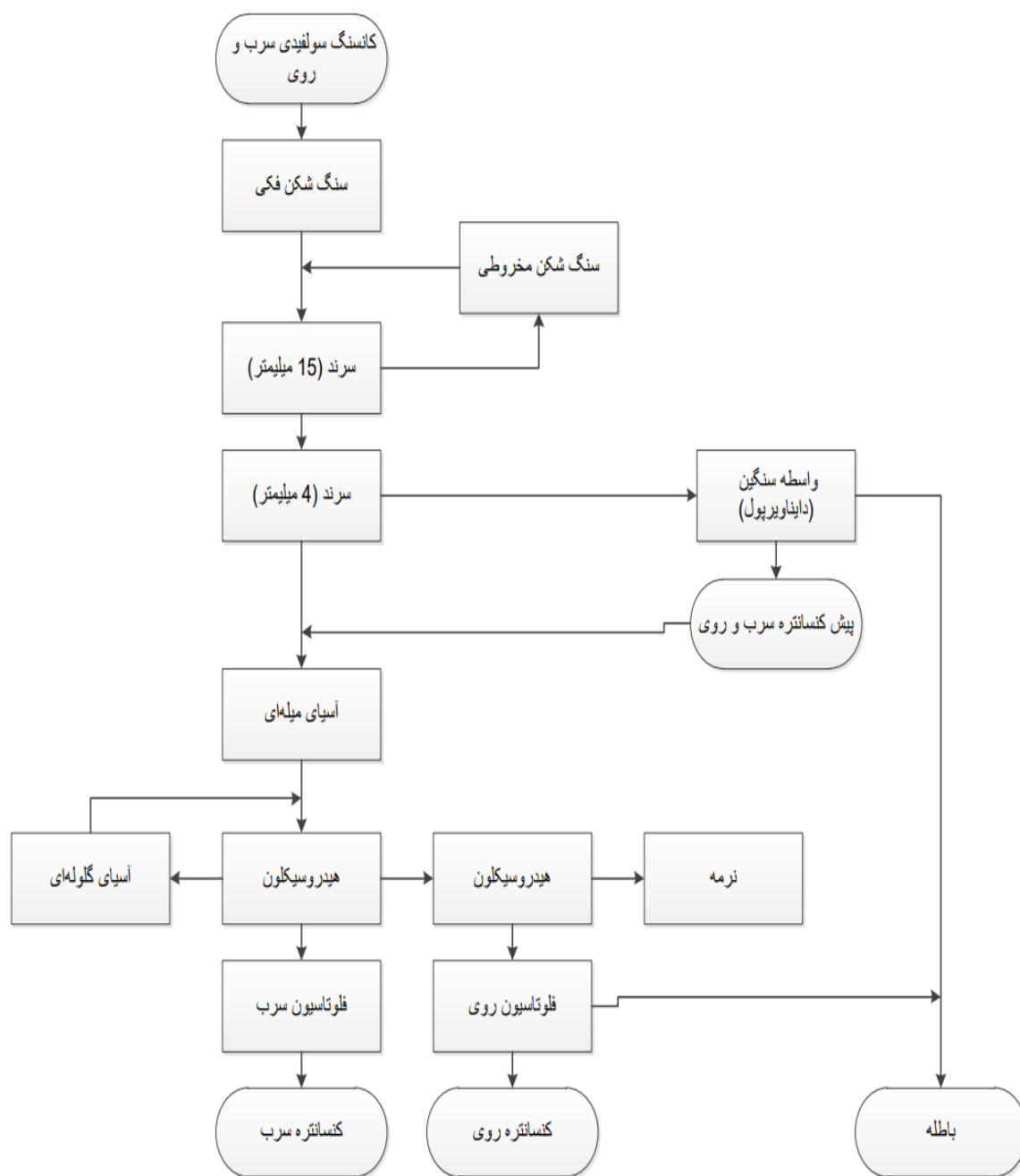
۱-۴- مطالعه موردی: معرفی کارخانه‌ی باما

موقعیت جغرافیایی مجموعه کانسارهای ایرانکوه در ۲۰ کیلومتری جنوب - جنوب غرب اصفهان و شرق فلاورجان واقع شده‌اند. بخش عمده کانه در کانسارهای دامنه جنوبی ایرانکوه شامل کربنات روی همراه با مقدار کمی کربنات سرب است. سولفیدهای روی و سرب از کربنات‌ها دارای ارزش اقتصادی بیشتری

می‌باشند. نسبت کربنات به سولفید در بخش فوقانی ماده معدنی بیشتر است و به طرف پایین مقدار سولفید (اسفالریت و گالن) بیشتر می‌شود. پاراژنز کانسار به نقل از بودنل و باریان به صورت زیر گزارش شده است: همی مورفیت $(\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O})$ ، هیدروزسیت، اسمیت زونیت (ZnCO_3) ، سروزیت (PbCO_3) ، اوری کلسیت $(\text{ZnCu})_5[(\text{OH})_6(\text{CO}_3)_2]$ ، روزاسیت $(\text{Zn,Cu})_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ ، کالکوزین (Cu_2S) و پیرومورفیت $\text{Pb}(\text{C}(\text{PO}_4)_3)$ و همچنین کانه‌های اکسیدی اسفالریت (ZnS) ، گالن (PbS) ، پیریت (FeS_2) و کانی‌های دیگری همانند لیمونیت (Fe_3O_4) ، گوتیت (FeOOH) ، هماتیت (Fe_2O_3) . میانگین روی در کانسار ایرانکوه ۳-۶ درصد و سرب ۱/۸ درصد در بخش سولفیدی می‌باشد. در بخش اکسیدی میانگین سرب و روی ۲ درصد می‌باشد. مجموع ذخیره احتمالی منطقه ایرانکوه حدود ۳۰-۴۰ میلیون تن می‌باشد.

در کارخانه فرآوری باما، مواد ابتدا وارد سنگ‌شکن فکی می‌شوند. ابعاد سنگ در خروجی این سنگ‌شکن‌ها اگر بیشتر از ۱۵ میلی‌متر باشد وارد سنگ‌شکن مخروطی می‌شود و ذرات زیر ۱۵ میلی‌متر کم‌عیار با نوار نقاله به واحد جدایش با واسطه سنگین فرستاده می‌شوند. اما ذرات زیر ۱۵ میلی‌متر پرعیار وارد واحد آسیا و بعد از آن وارد واحد فلوئتاسیون خواهند شد. دستگاه واسطه سنگین یا گریز از مرکز استفاده شده در این کارخانه از نوع دایناویرپول بوده و واسطه سنگین مورد استفاده برای جدایش جرم مخصوصی برابر با ۲/۷ تا ۲/۸ دارد که متشکل از ۳۰٪ منیتیت و ۷۰٪ فروسیلیسیوم است. کانی‌های اکسید و سولفور پس از واحدهای سنگ‌شکنی و واسطه سنگین، وارد بخش فلوئتاسیون شده و به وسیله آسیاهای گلوله‌ای و میله‌ای تا ابعاد ۷۵ میکرون خردایش می‌شوند. در ادامه این مواد به وسیله پمپ‌ها به سلول‌های فلوئتاسیون ارسال شده و با مواد شیمیایی مختلف مورد عملیات آماده‌سازی و فلوئتاسیون قرار می‌گیرند. در پایان پس از آبگیری توسط تیکنرها و فیلترها، کنسانتره خشک شده و به انبار انتقال می‌دهند. پالپ سرریز شده از سیکلون وارد دو دستگاه آماده ساز که به صورت سری قرار دارند می‌شود. در آماده‌ساز اول سولفید سدیم و در آماده‌ساز دوم آمیل گزنات پتاسیم اضافه می‌شود و هنگام وارد شدن پالپ به اولین سلول، کف‌ساز را اضافه می‌کنند. مدار

سرب در این کارخانه دارای ۴ سلول شستشوی اولیه، ۱۰ سلول رافر، ۱۶ سلول ثانویه و ۴ سلول شستشوی نهایی است.



شکل ۱: فلوجارت شرکت باما.

شکل ۱، فلوجارت کارخانه فرآوری شرکت باما را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مواد شیمیایی مورد استفاده در فلوتاسیون خط سولفور عبارت است از سیانورسدیم برای بازداشت پیریت، سولفات روی برای بازداشت روی، اتیل گزنتات به عنوان کلکتور سرب، آثروفلوت به عنوان کلکتور سرب و روغن کاج به عنوان کفساز. بعلاوه مواد شیمیایی مورد استفاده در فلوتاسیون خط اکسید عبارت است از سیلیکات سدیم به مقدار ۵۰۰ گرم در تن، سولفیدسدیم به مقدار ۲۵/۳ کیلوگرم در تن، آمیل گزنتات پتاسیم به مقدار ۳۰۰ گرم در تن و کفساز به مقدار ۲۵۰ تا ۴۰۰ گرم در تن.

۱-۵- ضرورت و اهداف انجام تحقیق

بررسی فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی (مانند کربناته) از جنبه‌های اقتصادی اهمیت ویژه‌ای دارد، بدلیل آن که قسمتی از ذخایر معدنی موجود در سرتاسر دنیا از نوع اکسیدی است و فلوتاسیون می‌تواند یک روش مؤثر برای عمل‌آوری آن‌ها باشد. در واقع، روش فلوتاسیون یک فرآیند شناخته شده برای پرعیارسازی کانسنگ‌های مس سولفیدی با قدمت بسیار زیاد است. فلوتاسیون کانسنگ‌های اکسیدی فرآیند جدیدتری بوده و جنبه‌های ناشناخته بسیاری دارد و این رفتار به طبیعت و ساختار کانسنگ‌های اکسیدی بر می‌گردد که بر قابلیت شناورسازی آن‌ها تاثیر می‌گذارد. شناورسازی کانی‌های اکسیدی به پارامترهای زیادی مانند خواص الکتریکی سطح کانی، وزن مولکولی کلکتور، حلالیت کانی و ... بستگی دارد. از طرفی پیشرفت‌های اخیر در حوزه جدایش کانی‌ها بیانگر نقش مثبت بکارگیری امواج فراصوت به همراه فلوتاسیون بر عملکرد جدایش کانی‌های بارزش از باطله است. امواج فراصوت یک فرآیند اکسیداسیون پیشرفته است که نه تنها ماهیت سطح پالپ بلکه ماهیت سطح ذرات کانی‌ها را تغییر می‌دهد. برای مثال این فرآیند می‌تواند میزان pH، کشش سطحی و پتانسیل الکتروود پالپ را به شدت تغییر دهد و تغییرات چشمگیری را در عملکرد فلوتاسیون (بازیابی و عیار) ایجاد کند. امروزه امواج فراصوت بعنوان یکی از روش‌های مهم مورد استفاده برای عملیات فلوتاسیون پیشرفته شناخته می‌شود. کارخانه باما شامل دو مدار موازی برای فرآوری کانسنگ‌های سولفیدی

و اکسیدی (کربناته) با ظرفیت به ترتیب، ۴۵ و ۳۰ تن بر ساعت است. خوراک ورودی به مدار سولفیدی کارخانه‌ی باما، بسته به وضعیت استخراج، از زون‌های مختلف معدن تأمین می‌شود. معمولاً سعی می‌شود بار اولیه‌ای با ترکیب نسبتاً همگن، که بازیابی قابل قبولی داشته باشد تهیه شود. همان‌طور که بیان شد، فلوتاسیون کانی‌های اکسیدی و سولفیدی متفاوت است و کانی‌های اکسیدی در مقابل مواد شیمیایی مورد استفاده برای جدایش کانی‌های سولفیدی پاسخ مناسبی نمی‌دهند. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر امواج فراصوت و پیش‌فرآوری بر فلوتاسیون خط کربناته کارخانه باما انجام می‌پذیرد.

امواج فراصوت

امواج مافوق صوت، امواج صوتی هستند که فرکانس آنها بالاتر از حد شنوایی انسان یعنی ۲۰ کیلو هرتز تا ۲۰ مگا هرتز است.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل پنج فصل است که در فصل حاضر به مقدمه‌ای از تحقیق، ضرورت و اهداف انجام تحقیقات و معرفی مختصری از ماده معدنی مورد مطالعه پرداخته شد. به منظور مطالعه و دستیابی به اهداف تحقیق نیاز به موضوع‌ها و تئوری‌های تحقیق و مروری بر پژوهش‌های پیشین است که در فصل دوم گزارش می‌شود. در فصل سوم مواد و تجهیزات مورد نیاز و شرح انجام آزمایش‌ها ارائه می‌گردد. نتایج و تجزیه و تحلیل آن‌ها در فصل چهارم و نتیجه‌گیری و پیشنهادهای لازم برای تحقیق‌های بعدی در فصل پنجم آورده می‌شود.

فصل دوم

مروری بر پژوهش‌های پیشین

۲-۱- مروری بر پژوهش‌های قبلی

با توجه به هدف تحقیق که مطالعه تاثیر امواج فراصوت بر روی فلوتاسیون سرب است، برخی از مهم‌ترین تحقیقات مرتبط که در دو دهه اخیر انجام شده است، در ادامه آورده می‌شوند.

آلدريچ و فنگ در سال ۱۹۹۹، تاثیر پيش آماده‌سازی با فراصوت را بر روی فلوتاسیون کانسنگ سولفیدی بررسی کردند. آن‌ها یک فرآیند فراصوتی برای فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی از رگه مرنسکی (Merensky) در آفریقای جنوبی طراحی نمودند تا عملکرد فلوتاسیون را با تغییر انتخابی ویژگی‌های سطحی ذرات معدنی بهبود بخشند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که بعد از القاء فراصوت، قابلیت شناوری سولفیدها به طور قابل توجهی بهبود یافت و سیلیکات‌ها نیز تا حدودی بازداشت شدند. همچنین آن‌ها گزارش کردند که تابش فراصوت در مقایسه با روش معمول مکانیکی، می‌تواند سرعت فلوتاسیون، درجه و بازیابی را بهبود بخشیده و دوز معرف‌های فلوتاسیون را کاهش دهد (Aldrich & Feng, 1999).

اوزکان و کویومچو، یک سلول فلوتاسیون مجهز به امواج فراصوت در فرکانس ۲۵ تا ۴۰ کیلوهرتز را برای فلوتاسیون زغال سنگ طراحی کردند که نتایج بیانگر تاثیر مثبت امواج فراصوت بر شناورسازی زغال سنگ بود. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که بهترین حالت استفاده از امواج فراصوت در حین فرآیند فلوتاسیون است که در این حالت میزان مصرف مواد شیمیایی به یک چهارم کاهش می‌یابد و میزان خاکستر در باطله به دو برابر می‌رسد (Ozkan & Kuyumcu, 2007).

کانگ و همکاران (۲۰۰۷)، تاثیر امواج فراصوت را برای کاهش بیشتر گوگرد و خاکستر در حین فرآیند فلوتاسیون ذرات ریز مطالعه کردند. مقادیر خاکستر و گوگرد برای نمونه‌های یکسان، قبل و بعد از عملیات فلوتاسیون اندازه‌گیری شد و نتایج نشان داد که امواج فراصوت کاهش گوگرد پیریتی و خاکستر از زغال سنگ

را بهبود می‌دهد. در واقع بررسی‌های آن‌ها حاکی از افزایش ۲/۴۹ درصدی گوگردزدایی بود (Kang et al., 2007).

کانگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ نیز یک سری آنالیز تشخیصی برای یافتن اثر تابش امواج اولتراسونیک روی زغال سنگ و ترکیبات پیریت انجام داده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد زغال سنگ تحت اولتراسونیک قرار گرفته خلوص بیشتری دارد که دلیل آن کاهش میزان آهن گوگرد و افزایش مقدار کربن آن‌ها می‌باشد. همچنین نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تمیز شدن سطح که در اثر تابش امواج فراصوت ایجاد می‌شود باعث افزایش آبگریزی زغال سنگ و آب‌دوستی پیریت می‌گردد، به طوریکه بازدهی جداسازی افزایش می‌یابد (Kang et al., 2008).

در تحقیقی دیگر کانگ و همکاران (۲۰۰۹)، قابلیت استفاده از امواج فراصوت را بر فلوتاسیون زغال سنگ با محتوای گوگرد بالا مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر آن بود که امواج فراصوت نه تنها ماهیت سطح پالپ، بلکه ماهیت سطح ذرات زغال سنگ را نیز تغییر داد و سبب کاهش گوگرد و خاکستر در کنسانتره زغال سنگ شد (Kang et al., 2009).

اوزکان در سال ۲۰۱۲، اثر همزمان شرایط فراصوت را بر روی فلوتاسیون نرمه‌های زغال سنگ مورد مطالعه قرار داد و گزارش کرد که بکارگیری همزمان فراصوت با فلوتاسیون، بازیابی زغال را افزایش و میزان خاکستر را کاهش داد. هر چند تاثیر آن روی خاکستر بسیار کم بود. همچنین نتایج نشان داد که در صورت استفاده از فراصوت میزان مصرف مواد شیمیایی بشدت کاهش یافت (Ozkan, 2012).

شاهین اغلو و اسلو (۲۰۱۳)، افزایش کیفیت زغال سنگ به وسیله آگلومراسیون روغنی بعد از عمل‌آوری با فراصوت بررسی کردند. در بررسی آن‌ها توان و زمان عملیات فراصوت به عنوان متغیر انتخاب شدند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که استفاده از فرآیند فراصوت سبب بهبود فرآیند فلوتاسیون گردید و در سیستم مورد

بررسی، میزان بازیابی زغال، درصد کاهش خاکستر و درصد حذف سولفور پیریتی به ۶۶/۱۳، ۸۷/۲۴ و ۹۷/۴۴ درصد رسید. همچنین افزایش زمان و قدرت عمل‌آوری فراصوت تاثیر مثبت اندکی بر روی حذف خاکستر و گوگرد پیریتی داشت (Sahinoglu & Uslu, 2013).

کورسون (۲۰۱۴)، پیش‌تصفیه با فراصوت را برای فلوتاسیون نمونه خوراک حاوی ۱/۶ درصد روی بکار برد. نتایج نشان داد که بدون پیش‌عمل‌آوری، کنسانتره‌ای حاوی ۸/۵۲ درصد روی با بازیابی ۲۴/۶۴ درصد بدست آمد. اما هنگامی که فرآیند فراصوت استفاده شد، کنسانتره‌ای حاوی ۱۸/۷۳ درصد روی با بازیابی ۳۳/۱۸ درصد بدست آورده شد که بیانگر نتایج مثبت امواج فراصوت بر کارایی فلوتاسیون بود (Kursun, 2014).

کورسون و اولاسوی در سال ۲۰۱۵، در مطالعه‌ای دیگر بازیابی روی را از سنگ معدن مس-روی-سرب به‌وسیله‌ی فلوتاسیون ستونی و با کمک امواج مافوق صوت مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند هنگامی که پیش‌فرآوری اولتراسونیک قبل از فلوتاسیون ستونی در چندین مرحله انجام شد، یک کنسانتره حاوی ۷۳/۳۲ درصد روی با بازیابی ۷۶/۴۴ درصد به‌دست آمد (Kursun & Ulusoy, 2015).

کمانگر، استفاده از امواج فراصوت در فرایند خاکستر زدایی قیر طبیعی با استفاده از فلوتاسیون ستونی را مورد مطالعه قرار داد و گزارش نمود که با بکارگیری امواج فراصوت در بهترین حالت میزان خاکسترزدایی و گوگردزدایی به ترتیب از ۶۲/۸۲ به ۷۳/۱۱ درصد و ۵۳/۲۴ به ۵۹/۴۸ درصد افزایش یافته است (کمانگر، ۱۳۹۴).

رضوانی، در مطالعه‌ی تاثیر امواج فراصوت بر فلوتاسیون زغال‌سنگ البرزشرقی گزارش کرد که با کارگیری امواج فراصوت، درصد خاکستر به میزان ۴۵ درصد کاهش و کارایی جدایش به میزان ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از فراصوت سبب کاهش ۶۵ درصدی میزان مصرف کلکتور، کاهش ۵۰ درصدی میزان کف ساز و کاهش ۵۰ درصدی مدت زمان کف‌گیری می‌شود (رضوانی، ۱۳۹۵).

ویدلا و همکاران (۲۰۱۶)، عمل‌آوری با فراصوت را بر روی یک نمونه باطله سولفیدی مس برای افزایش بازیابی فلوتاسیون مس بکار بردند. نتایج نشان داد که با استفاده از فرآیند فراصوت بازیابی مس تا ۳/۵ درصد بهبود یافت (Videla et al., 2016).

فوسو و همکاران در سال ۲۰۱۵، به مطالعه درجه آزادی کانی‌های گالن و اسفالریت پرداختند. آن‌ها متوجه شدند که ذرات گالن و اسفالریت با درجه محدودیت و یا قفل‌شدگی مختلف و همچنین دارای درجه آزادی‌های متفاوت هستند. اسفالریت در ترکیبات گالن، پیریت و کربنات با عناصر گوناگون به دام افتاده است. بازیابی فلوتاسیون هنگامی که اندازه ذرات موجود در فلوتاسیون بیشتر از ۳۱۱ میکرون باشد به شدت کاهش خواهد یافت. همچنین آن‌ها متوجه شدند که ذرات گالن و اسفالریت قفل شده در ترکیبات ساده بازیابی بالاتری نسبت به ذرات موجود در ترکیبات پیچیده را دارا هستند که این به دلیل سطح پیوسته آبریز زیاد در سطح گالن و اسفالریت به منظور اتصال حباب هوا با سطح در ترکیبات ساده می‌باشد (Fosu et al., 2015).

آلبرچ و همکاران (۲۰۱۶)، غلظت بحرانی مس بر روی اسفالریت و همچنین تاثیر دما و کلکتور را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. مکانیزم اصلی فعال‌سازی اسفالریت به‌وسیله مس، تعویض یک به یک از آن با روی در سطح اسفالریت است. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بین غلظت فعال‌کننده مس و بازیابی رابطه‌ای مستقیم برقرار است و با افزایش مقدار مس به عنوان فعال‌کننده مقدار بازیابی نیز افزایش خواهد یافت و از یک نقطه به بعد از بازیابی کاهش می‌یابد که این نقطه غلظت بحرانی مس است. بیشترین مقدار بازیابی زمانی اتفاق می‌افتد که بیشترین جایگزینی مس با روی در سطح اسفالریت رخ داده باشد و از طرفی کاهش بازیابی به علت پوشیده شدن سطح توسط هیدرواکسید مس است و همچنین متوجه شدند که در دماهای پایین‌تر از ۱۲ درجه سانتی‌گراد بازیابی به شدت کاهش خواهد یافت که این موضوع به دلیل تفاوت

در بازیابی کارخانه‌های فلوتاسیون کانادا و سوئد و یا در تابستان و زمستان را مشخص کرد (Albrecht et al., 2016).

واثقیان و همکاران (۲۰۱۶)، حذف همزمان خاکستر و سولفور را از قیر طبیعی با استفاده از ستون فلوتاسیون مجهز به مبدل‌های فراصوت ۲۴ کیلوهرتز مورد تحقیق قرار داده‌اند. اثر چهار متغیر فرآیندی که شامل غلظت عامل کلکتور و کف‌ساز و توان و زمان فراصوت مورد بررسی قرار گرفت (Vasseghian et al., 2016).

کائو و همکاران در سال ۲۰۱۷، نقش اکسیداسیون و شستشوی سطح امواج فراصوت را بر روی فلوتاسیون پیریت اکسید شده مورد مطالعه قرار دادند و گزارش کردند که امواج فراصوت اثرات مثبتی روی آبگریزی پیریت اکسید شده دارد و شدت فراصوت حداقل حدود ۰/۳ وات بر متر مربع برای شستشوی سطح نیاز است (Cao et al., 2017).

زو و همکاران، پیش‌فرآوری فراصوت را روی فلوتاسیون نمونه زغال‌سنگ اکسید شده انجام دادند و گزارش کردند که بیشینه راندمان زغال‌سنگ (۷۹/۶ درصد) و بیشترین میزان ثابت سینتیک فلوتاسیون در طول ۱۰ دقیقه پیش‌فرآوری با فراصوت بدست می‌آید (Xu et al., 2017).

غلامی و همکاران، تاثیر امواج فراصوت بر روی عیار و بازیابی، کارایی جدایش و شاخص انتخاب‌پذیری کانسنگ مس پرفیری معدن مس سرچشمه را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها توان فراصوت را در دو حالت ۴۰ و ۸۰ درصد توان کل ژنراتور (۱ kW) مورد استفاده قرار دادند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که برآیند تاثیر امواج فراصوت بر روی عملکرد کلی فرآیند فلوتاسیون مثبت بوده است و این امواج به صورت چشمگیری بر جدایش انتخابی کالکوپیریت از پیریت تاثیرگذار بود (غلامی و همکاران، ۱۳۹۸).

قدیانی و همکاران، تاثیر امواج فراصوت را بر روی سینتیک فلوتاسیون زغال با محتوی خاکستر بالا (۵۰/۲۹ درصد) و سولفور ۱/۱ درصد مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که بازیابی ۵۶/۹ درصد و

محتوی خاکستر ۹/۲۱ درصد تحت شرایط شدت فراصوت ۳۰ وات بر متر مربع، ۱۵۰۰ گرم بر تن کلکتور، زمان آماده‌سازی ۱۱ دقیقه، pH ۷/۵، سرعت روتور ۸۰۰ دور بر دقیقه و محتوی جامد ۱۰ درصد بدست آورده شد. همچنین آنالیز سینیتیک نشان داد که فلوتاسیون زغال‌سنگ با فراصوت، ۱۰ درصد سریع‌تر بود (Ghadyani et al., 2018).

پنگ و همکاران، نقش فراصوت و مکانیزم آن را در فلوتاسیون لیگنیت بررسی نمودند و دریافتند که راندمان زغال‌شویی با استفاده همزمان فلوتاسیون و فراصوت افزایش می‌یابد و سطح زغال‌سنگ بطور فیزیکی به‌وسیله این فرآیند تمیز می‌شود. همچنین عمل‌آوری با فراصوت موجب ایجاد تعدادی زیادی میکرو حباب می‌شود که سبب افزایش فلوتاسیون لیگنیت می‌گردند (Peng et al., 2018).

مائو و همکاران در سال ۲۰۱۹، یک مطالعه مروری بر کاربرد اولتراسونیک در فلوتاسیون زغال‌سنگ ریز انجام دادند و دریافتند که فراصوت در مدت زمان طولانی می‌تواند منجر به اکسایش دوباره سطح زغال‌سنگ شود (Mao et al., 2019).

شو و همکاران، اثرات پیش‌فرآوری با فراصوت را بر روی فلوتاسیون ایلمینیت و جذب کلکتور مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که ماکزیموم بازیابی فلوتاسیون در محدوده‌ی pH ۴ تا ۵ بدون فراصوت و با فراصوت به ترتیب ۴۳/۱۷ و ۸۹/۵۴ درصد بدست می‌آید. همچنین آنالیز XPS تایید کرد که محتوای نسبی Fe^{+3} از ۳۶/۸۷ به ۶۱/۸۴ درصد با استفاده از پیش عمل‌آوری فراصوت به مدت ۵ دقیقه افزایش می‌یابد (Shu et al., 2019).

حسینی و همکاران گزارش دادند که استفاده از امواج فراصوت اثر مثبتی روی عملکرد فلوتاسیون نمونه فسفات رسوبی کم عیار دارد و سبب افزایش بازیابی و عیار P_2O_5 به ۸۷/۸۸ و ۱۴/۴۵ درصد می‌شود. همچنین زمان آماده‌سازی فراصوت مهم‌ترین فاکتور تاثیرگذار بر عملکرد فلوتاسیون فسفات است (Hassani et al., 2019).

حسن‌زاده و همکاران در سال ۲۰۲۰، امواج فراصوت را برای مراحل رافر و ریکلینر نمونه مس پورفیری به کار گرفتند و بیان کردند که استفاده از فراصوت (بکارگیری هموژنایزر در ۰/۴ کیلووات) سبب افزایش عیار کالکوپریت از ۲۱/۵ درصد به ۲۶/۷ درصد گردید. همچنین استفاده از حمام فراصوت و ترکیبش با هموژنایزر به ترتیب موجب افزایش تقریباً ۱۶/۱ و ۲۶/۹ درصد در شاخص انتخابیت کالکوپریت در مقایسه با فلوئتاسیون معمولی (مکانیکی) می‌شود (Hassanzadeh et al., 2020).

گونگورن و همکاران، فلوئتاسیون گالن را با استفاده از امواج فراصوت با توان پایین در حضور کلکتور اتیل گزنات پتاسیم (KEX) مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای دستیابی به این هدف علاوه بر مطالعات شیمی سطحی شامل پتانسیل زتا، زاویه تماس و اندازه‌گیری زمان اتصال ذرات، آزمایش‌های میکروفلوئتاسیون را در توان‌های اولتراسونیک و زمان‌های آماده‌سازی مختلف انجام دادند. بر اساس یافته‌های آن‌ها، بیشینه بازیابی فلوئتاسیون (۷۷/۵ درصد) با توان ۳۰ وات در مدت زمان آماده‌سازی ۲ دقیقه بدست آورده شد. همچنین نتایج افزایش خاصیت آبگریزی گالن را با امواج فراصوت نشان داد (Gungoren et al., 2020).

جین و همکاران (۲۰۲۱)، اثر امواج فراصوت را روی حباب‌های فلوئتاسیون مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که فلوئتاسیون فراصوت یک روش موثر بر فلوئتاسیون ذرات ریز ذغال‌سنگ است و دانه‌های حبابی در عرض ۴۵۰ میلی ثانیه تشکیل می‌شوند. همچنین تعداد حباب‌های کوچک در میدان فراصوت در ۱۰۰ کیلوهرتز بیشتر از ۸۰ و ۱۲۰ کیلوهرتز بود. علاوه بر این، فلوئتاسیون فراصوت در ۱۰۰ کیلوهرتز بیشترین بازده ذغال‌سنگ تمیز (۳۵/۸۹٪) و بازیافت قابل احتراق (۴۵/۷۷٪) را بدست آورد (Jin et al., 2021).

۲-۲- جمع بندی

پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که استفاده از امواج فراصوت در حین فرآیند فلوتاسیون کانی‌ها می‌تواند قابلیت شناوری کانی‌های سولفیدی را به طور قابل توجهی بهبود دهد و در مقایسه با روش معمول (مکانیکی)، موجب بهبود سرعت فلوتاسیون، عیار و بازیابی می‌شود. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که فلوتاسیون فراصوت می‌تواند میزان مصرف مواد شیمیایی به شدت کاهش دهد. از این رو، هدف پژوهش پیش رو بر بررسی رفتار فلوتاسیون فراصوت کانه سرب و پارامترهای تاثیرگذار بر آن متمرکز شد.

فصل سوم

روش‌ها، تجهیزات و مواد آزمایشگاهی

۳-۱- آماده سازی نمونه

نمونه‌های لازم برای انجام آزمایش از محل دپوی کارخانه باما تهیه گردید. این نمونه‌ها پس از یک مرحله آسیاکنی توسط آسیا گلوله‌ای و با چند بار تکرار برای رسیدن به ابعاد مورد نظر آماده شدند. سپس آنالیز سرندهی بر روی نمونه‌های آسیا شده صورت پذیرفت تا ۸۰ درصد مواد به ابعاد زیر ۱۷۰ میکرون برسند و بعد از آن عمل همگن سازی و مخلوط کردن نمونه‌ها طی چند مرحله ریفل کردن انجام شد. پس از همگن سازی نمونه‌ها جهت آنالیز شیمیایی به آزمایشگاه‌های مربوطه ارسال گردید.

۳-۲- شناسایی کمی نمونه:

تجزیه کمی ترکیب شیمیایی نمونه‌های معرف توسط دستگاه XRF 1800 آزمایشگاه تجزیه مواد معدنی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفت، که نتایج در جدول ۱-۳ آورده شده است.

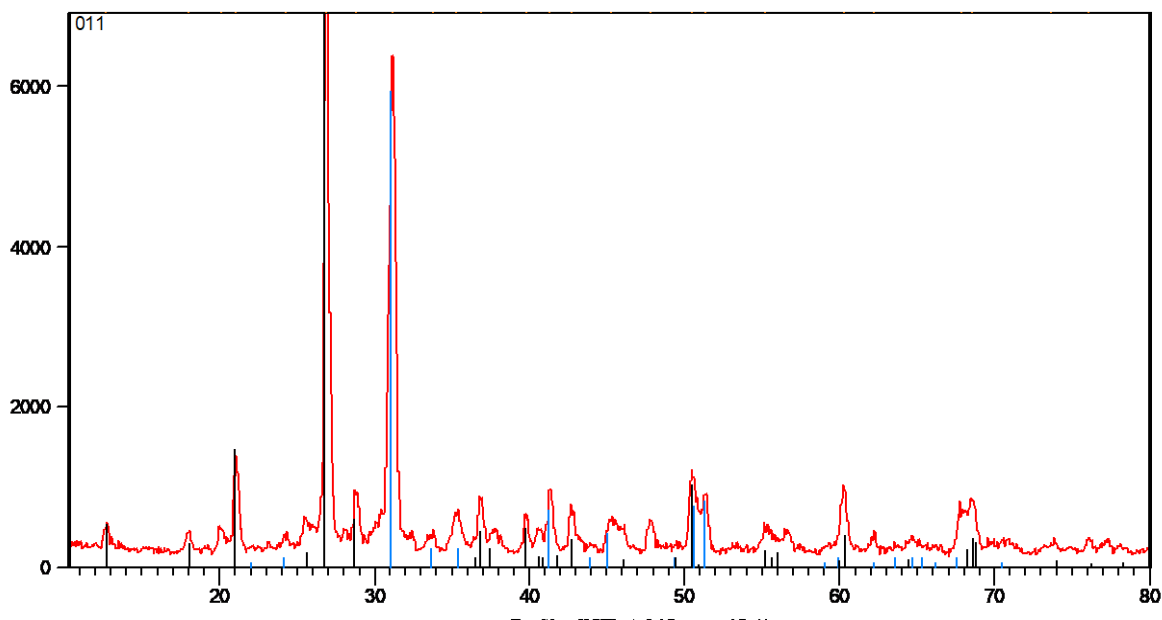
جدول ۱-۳: نتایج آنالیز کمی، بروی نمونه خاک کربناته کارخانه باما

Cr ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Zno	SrO	BaO	SiO ₂	ترکیب
۰/۰۳	۳/۴۳	۰/۵۰	۱/۰۵	۲۱/۳۷	۱۳/۵۳	۰/۳۳	۳/۳۵	۲۱/۱۱	درصد وزنی (%)
L. O. I	ZrO ₂	PbO	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	ترکیب
۱۵/۰۱۴	۰/۰۵	۵/۸۳	۰/۳۱	۲/۶۰	۴/۵۵	۰/۱۷	۲/۹۶	۳/۷۹	درصد وزنی (%)

۳-۳- شناسایی کیفی نمونه:

جهت ترکیب‌شناسی فلز، نمونه‌ها برای آنالیز XRD به مرکز آنالیز صبا تهران فرستاده شدند که نتایج در شکل (۱-۳) آورده شده‌اند.

تجزیه و تحلیل XRD تکنیکی است که در علم مواد برای تعیین ساختار کریستالی یک ماده استفاده می‌شود. این روش آزمایش با هدایت پرتو اشعه ایکس به یک نمونه و اندازه‌گیری شدت پراکندگی به عنوان تابعی از جهت خروجی انجام می‌شود. پس از جدا شدن پرتو، پراکندگی، که الگوی پراش نیز نامیده می‌شود، ساختار کریستالی نمونه را نشان می‌دهد. مهم‌ترین ترکیب شناسایی‌شده برای سرب سروزیت یا کربنات سرب (PbCO_3) و کانی‌های همراه نیز کوارتز (SiO_2) و دولومیت ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) بودند.



شکل ۱-۳. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه کانه سرب (محور افقی: موقعیت (2θ) (مس (Q)، محور عمودی: شدت (شمارش))

۳-۴- مواد و تجهیزات مورد نیاز

مواد و وسایل مورد نیاز برای آزمایش‌های فلوتاسیون در زیر آورده شده است.

✓ بشر، ارلن با حجم‌های مختلف

✓ ترازو

✓ قطره چکان

✓ ظرف فلزی برای خشک کردن نمونه‌ها

✓ همزن مغناطیسی (مگنت)

✓ آون

✓ کاردک

✓ بوته چینی

✓ دستگاه فراصوت

✓ سلول فلوتاسیون آزمایشگاهی نوع دنور

✓ خشک‌کن

برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون مواد شیمیایی مختلفی شامل: سولفید سدیم برای سولفورده کردن سطح

کانی، اتیل گزنتات به عنوان کلکتور سرب، MIBC به عنوان کف‌ساز مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۵- روش انجام آزمایش فلوتاسیون

برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از دستگاه دنور (Denver) محصول کشور انگلستان با حجم سلول یک لیتر

استفاده شد (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲: نمایی از دستگاه فلوئتاسیون دنور.

برای آماده‌سازی پالپ با غلظت ۳۰٪، مقدار ۳۰۰ گرم نمونه توسط ترازوی آزمایشگاهی وزن شد و در ۷۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر ($pH=7$) ریخته و ترکیب فوق را به سلول فلوئتاسیون منتقل گردید. میزان سرعت همزنی پالپ در آزمایش‌ها ۱۱۰۰ دور بر دقیقه تنظیم شد که در تمامی آزمایش‌ها ثابت بوده است و پارامترهای موثر دیگر از جمله: مقدار کلکتور، میزان کف‌ساز، میزان ماده سولفیدکننده، توان دستگاه، فرکانس و زمان انجام آزمایش‌ها در مقادیر مختلف با استفاده از نرم افزار Design Expert طراحی شده‌اند. حاصل طرح‌ریزی اجرای آزمایش‌ها ۴۸ تست آزمایشگاهی بود که شرایط عملیاتی هر یک از این آزمایش‌ها در جدول ۳-۲ آورده شده است. از آنجاییکه هدف ما از انجام این پژوهش تاثیر امواج فراصوت بر روی بازیابی سرب بود، تمام آزمایش‌ها در حضور امواج فراصوت انجام شد. برای این که شرایط برای انتشار امواج فراصوت فراهم باشد، از دستگاه اولتراسونیک یا همان حمام امواج فراصوت استفاده شد. شکل ۳-۳ تصویر دستگاه فراصوت استفاده شده در تست‌ها را نشان می‌دهد. استفاده از امواج فراصوت در فلوئتاسیون باعث تغییر درکشش سطحی، آب‌گریزی

کانی‌ها، تغییر در توزیع اندازه حباب‌ها در فاز کف، افزایش آب انتقالی از کف به کنسانتره و افزایش نرخ بازیابی و عیار می‌شود (Hassanzadeh et al., 2020).

پس از مخلوط شدن نمونه‌ها توسط همزن، مقدار مشخصی سولفید سدیم مطابق جدول ۳-۲ به پالپ حاصل اضافه گردید. پس از گذشت ۸ دقیقه و سولفوره شدن سطح کانی‌های سرب، کلکتور به مقدار مشخصی طبق طرح آزمایش‌های فوق اضافه شد. بعد از اضافه کردن اتیل گزناتات به عنوان کلکتور، مدت زمان ۴ دقیقه به پالپ حاصل زمان داده شد تا سطح کانی سرب را آبران کند. پس از گذشت این زمان، میزان مشخصی کفساز به پالپ اضافه گردید و پس از گذشت ۱ دقیقه از افزودن MIBC به عنوان کفساز، شیر هوا باز و به مدت زمان ۷ دقیقه عمل کف‌گیری انجام شد. برای کم کردن خطای آزمایش، کف‌گیری باید بصورت یکنواخت انجام گیرد. پس از اتمام کف‌گیری و جدا کردن کنسانتره از باطله، هر کدام را در ظروف فلزی جداگانه ریخته و پس از آبیگری، در گرمکن با درجه حرارت ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در مدت زمان ۲۴ ساعت قرار گرفت تا رطوبت آن‌ها از بین برود و کاملاً خشک شوند. پس از خشک شدن کامل، نمونه‌ها برای به‌دست آوردن بازیابی وزن و کنسانتره‌ها نیز برای آنالیز در پلاستیک‌های مخصوصی قرار داده شد و به آزمایشگاه ارسال شد.



شکل ۳-۳: نمایی از دستگاه اولتراسونیک.

جدول ۳-۲: مقادیر مختلف پارامترهای موثر با استفاده از نرم افزار Design Expert

شماره آزمایش	توان دستگاه (Kw)	زمان فراصوت (دقیقه)	کلکتور (گرم برتن)	سولفید سدیم (گرم بر تن)	کف ساز (گرم برتن)	فرکانس (کیلوهرتز)
۱	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷
۲	۵۵	۲۰	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۸۰
۳	۵۵	۱۴	۲۵۰	۲۰۰۰	۱۵	۳۷
۴	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۸۰
۵	۵۵	۲۰	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷
۶	۳۰	۸	۳۰۰	۴۰۰۰	۲۰	۸۰
۷	۳۰	۲۰	۳۰۰	۴۰۰۰	۱۰	۳۷
۸	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۰	۸۰
۹	۵۵	۸	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۸۰
۱۰	۸۰	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷
۱۱	۸۰	۲۰	۲۰۰	۴۰۰۰	۱۰	۳۷
۱۲	۵۵	۱۴	۲۵۰	۴۰۰۰	۱۵	۸۰
۱۳	۳۰	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷
۱۴	۵۵	۱۴	۲۰۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷
۱۵	۳۰	۲۰	۲۰۰	۴۰۰۰	۲۰	۳۷
۱۶	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۲۰	۸۰
۱۷	۳۰	۲۰	۳۰۰	۲۰۰۰	۲۰	۳۷
۱۸	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۸۰
۱۹	۸۰	۸	۲۰۰	۴۰۰۰	۲۰	۸۰
۲۰	۸۰	۲۰	۲۰۰	۲۰۰۰	۲۰	۸۰
۲۱	۸۰	۲۰	۳۰۰	۲۰۰۰	۱۰	۸۰
۲۲	۸۰	۲۰	۳۰۰	۲۰۰۰	۱۰	۳۷
۲۳	۳۰	۸	۲۰۰	۲۰۰۰	۱۰	۳۷
۲۴	۸۰	۸	۳۰۰	۴۰۰۰	۱۰	۸۰
۲۵	۳۰	۸	۲۰۰	۲۰۰۰	۱۰	۸۰
۲۶	۵۵	۱۴	۲۰۰	۳۰۰۰	۱۵	۸۰
۲۷	۵۵	۱۴	۳۰۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷
۲۸	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۲۰	۳۷
۲۹	۳۰	۲۰	۲۰۰	۴۰۰۰	۲۰	۸۰
۳۰	۸۰	۸	۲۰۰	۴۰۰۰	۲۰	۳۷
۳۱	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷

۸۰	۱۵	۳۰۰۰	۳۰۰	۱۴	۵۵	۳۲
۸۰	۱۵	۳۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۵۵	۳۳
۸۰	۱۵	۳۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۳۰	۳۴
۳۷	۲۰	۲۰۰۰	۲۰۰	۲۰	۸۰	۳۵
۳۷	۱۵	۳۰۰۰	۲۵۰	۸	۵۵	۳۶
۸۰	۱۵	۳۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۸۰	۳۷
۸۰	۲۰	۲۰۰۰	۳۰۰	۸	۸۰	۳۸
۳۷	۲۰	۴۰۰۰	۳۰۰	۸	۳۰	۳۹
۳۷	۲۰	۲۰۰۰	۳۰۰	۸	۸۰	۴۰
۳۷	۱۵	۳۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۵۵	۴۱
۳۷	۱۵	۴۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۵۵	۴۲
۸۰	۱۵	۲۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۵۵	۴۳
۳۷	۱۰	۳۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۵۵	۴۴
۳۷	۱۰	۴۰۰۰	۳۰۰	۸	۸۰	۴۵
۸۰	۱۰	۴۰۰۰	۳۰۰	۲۰	۳۰	۴۶
۸۰	۱۰	۴۰۰۰	۲۰۰	۲۰	۸۰	۴۷
۸۰	۲۰	۲۰۰۰	۳۰۰	۲۰	۳۰	۴۸

۳-۶ = روش سطح-پاسخ (RSM)^۱

در بررسی‌های آزمایشگاهی، روش مرسوم برای بهینه‌سازی پارامترهای یک فرآیند مانند فلوتاسیون برای دستیابی به بیشینه بازیابی تغییر یک فاکتور در یک زمان است که در این حالت یک پارامتر تغییر کرده و پارامترهای دیگر در یک مقدار معینی ثابت نگه داشته می‌شوند. ضعف اصلی این روش آن است که از اثرات متقابل بین پارامترهای مورد بررسی اطلاعاتی نمی‌دهد و همچنین تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای انجام تحقیق زیاد است که منجر افزایش زمان، میزان مصرف مواد شیمیایی و متعاقباً افزایش هزینه‌ها می‌گردد. به منظور رفع این شکل، فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از تکنیک‌های آماری چند متغیره انجام می‌شود. یکی از این تکنیک‌های چند متغیره که می‌تواند ابزاری کارآمد در طرح‌ریزی انجام آزمایش‌ها، بهینه‌سازی پارامترهای

^۱ - Response Surface Methodology

تاثیرگذار و تحلیل آماری نتایج آن‌ها برای دستیابی به مدل ریاضی حاکم بر فرآیند و همچنین تعیین برهم‌کنش‌های احتمالی موثر بر متغیر پاسخ (بازیابی سرب) باشد، روش سطح-پاسخ است.

روش سطح-پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که برای مدل‌سازی، بهینه‌سازی و آنالیز مسائلی که در آن متغیر پاسخ متأثر از چندین متغیر ورودی است، استفاده می‌شود و در واقع شمای گرافیکی مدل ریاضی سبب تعریف واژه سطح-پاسخ برای آن شده است (Montgomery, 2001; Myers and Montgomery, 2002). این روش شامل سه مرحله است (Montgomery, 2001): (۱) انجام چندین آزمایش که داده‌های قابل اطمینانی فراهم می‌سازند، (۲) برازش یک مدل ریاضی که رابطه بین پارامترهای ورودی و پاسخ (بازیابی سرب) را توصیف می‌کند، و (۳) استفاده از مدل ریاضی برای بهینه‌سازی همزمان مقادیر پارامترهای موثر برای دستیابی به بهترین بازدهی سیستم است یا بعبارتی پارامترهای موثر بر فلوتاسیون اولتراسونیک سرب در چه میزانی باید بکار برده شوند تا حداکثر بازیابی سرب بدست آید. این روش خود مشتمل بر چندین طرح آماری است که در بین آن‌ها، طرح مرکب مرکزی (CCD)^۱ به دلیل انعطاف‌پذیری در طراحی کاربرد گسترده‌تری دارد (Montgomery, 2001; Myers and Montgomery, 2002) و در این پایان‌نامه نیز استفاده شده است. این طرح شامل سه‌بخش است: (۱) طرح فاکتوریل کامل یا جزئی، (۲) یک طرح محوری، و (۳) نقاط مرکزی.

دو رابطه ریاضی بسیار مهم که معمولاً در مدل‌سازی به روش سطح-پاسخ بکار گرفته می‌شوند عبارتند از:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad \text{مدل درجه اول} \quad (۱-۳)$$

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{1 < i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad \text{مدل درجه دوم} \quad (۲-۳)$$

^۱ - Central Composite Design

در معادلات فوق، Y ، k ، β_0 ، β_i ، X_i ، β_{ii} ، β_{ij} و ε به ترتیب پاسخ پیش‌بینی شده توسط مدل، تعداد متغیرها (فاکتورها)، ضریب ثابت، ضریب پارامترهای خطی، متغیرهای مستقل، ضریب پارامترهای درجه دوم، ضریب اندرکنش پارامترها و میزان باقیمانده (اختلاف میزان پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه) هستند (Bezera, 2008).

فصل چهارم:

ارائه یافته‌ها و تحلیل نتایج

همان طور در فصل‌های قبل بحث شد، یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر به دلیل اثرات مثبت فیزیکی و شیمیایی که ایجاد می‌کند، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و امکان سنجی آن برای فرآوری کانی‌ها استفاده شده است، به کارگیری امواج فراصوت در حین فلوتاسیون است. در این پژوهش نیز از این امواج برای بهبود فلوتاسیون سرب از نمونه کانسنگ کربناته کارخانه باما استفاده شد. بدین منظور، ابتدا پارامترهای مهم موثر بر فلوتاسیون فراصوت سرب شناسایی و سپس رفتار آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت با استفاده از روش طراحی آماری آزمایش‌ها و مدل سطح پاسخ، بهینه‌سازی پارامترهای تاثیرگذار انجام شد. طراحی اجرای آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج در ادامه آورده می‌شود.

۴-۲- طراحی و روش اجرای آزمایش‌های فلوتاسیون فراصوت

به منظور ارزیابی پارامترهای مهم موثر بر فلوتاسیون فراصوت سرب و مدلسازی و بهینه‌سازی این پارامترها، شش فاکتور توان فراصوت، زمان فراصوت، میزان مصرف کلکتور، میزان مصرف سولفید سدیم، میزان مصرف کف‌ساز و مقدار فرکانس که قابل کنترل و به طور کمی قابل تغییر بودند، بعنوان پارامترهای تاثیرگذار انتخاب شدند. از بین این ۶ پارامتر، پنج فاکتور به صورت عددی و یک فاکتور (میزان فرکانس) بصورت کیفی در نظر گرفته شد. پس از آن، طرح‌ریزی انجام آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح-پاسخ و طرح مرکب مرکزی انجام گرفت (شکل ۴-۱) و آزمایش فلوتاسیون فراصوت بر روی نمونه‌های معرف (خاک کربناته سرب باما) تحت شرایط مختلف، انجام شدند. شکل ۴-۱ پارامترهای موثر به همراه مقادیر آزمایشی آن‌ها را براساس مقادیر واقعی و کد نشان می‌دهد. طرح انجام آزمایش‌ها نیز با روش سطح-پاسخ و طرح مرکب مرکزی شامل ۴۸ آزمایش بصورت ۲۴ تست برای سطح فرکانس ۳۷ کیلو هرتز و ۲۴ تست هم برای سطح ۸۰ کیلو هرتز با ۳ آزمایش در نقطه مرکزی برای هر سطح فرکانس بود. ماتریس طرح آزمایش‌های انجام شده از ترکیب سطوح مختلف پارامترهای مورد نظر (۴۸ آزمایش) و مقادیر محاسبه شده بازیابی سرب در جدول (۴-۱) آورده شده

است. لازم به ذکر است که ترتیب انجام این آزمایش‌ها به صورت تصادفی بوده است. همچنین در انجام آزمایش‌ها برای پارامتر زمان فراصوت، سه سطح پایین، مرکزی و بالا به صورت مرحله آماده سازی (سولفیدی کردن) ۸ دقیقه، مرحله قبل کف‌گیری ۱۴ دقیقه و تا پایان زمان کف‌گیری ۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد.

File Edit View Display Options Design Tools Help

Factorial
Combined
Mixture
Response Surface

Central Composite Design

Each numeric factor is varied over 5 levels: plus and minus alpha (axial points), plus and minus 1 (factorial points) and the center point. If categorical factors are added, the central composite design will be duplicated for every combination of the categorical factor levels.

Numeric Factors: 5 (2 to 30)
Categorical Factors: 1 (0 to 10)

	Name	Units	-1 Level	+1 Level	-alpha	+alpha
A	Ultrasonic power		30	80	30	80
B	Ultrasonic time (min)		8	20	8	20
C	Collector (g/t)		200	300	200	300
D	Sodium sulfide (g/t)		2000	4000	2000	4000
E	Frother (g/t)		10	20	10	20

☒ Enter factor ranges in terms of +/- 1 levels
☐ Enter factor ranges in terms of alphas
 Type: Small Blocks: 1
 Points:
 Not center points 21
 Center points 3
 alpha = 1 Options... 24 Ru

CCD Options

Replication

Replicates of factorial points: 1
Replicates of axial (star) points: 1
Center points: 3

Alpha

☐ Rotatable ($k < 6$) 1.82116
☐ Spherical 2.23607
☐ Orthogonal Quadratic 1.61989
☐ Practical ($k > 5$) 1.49535
☒ Face Centered 1.0
☐ Other: 1.49535

For Help, press F1

شکل ۴-۱: سطوح پارامترهای مهم انتخابی تاثیرگذار بر فرآیند فلوتاسیون سرب براساس روش سطح-پاسخ و طرح مرکب مرکزی.

جدول ۴-۱: ماتریس طرح اجرای آزمایش‌های فلوتاسیون با فراصوت و مقدار اندازه‌گیری شده بازیابی سرب.

شماره آزمایش	توان اولتراسونیک (1 kW, %)	زمان فراصوت (دقیقه)	کلکتور (گرم بر تن)	سولفید سدیم (گرم بر تن)	کف‌ساز (گرم بر تن)	فرکانس (کیلو هرتز)	بازیابی سرب (%)
۱	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷	۸۳/۹۲
۲	۵۵	۲۰	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۸۰	۸۶/۵۰
۳	۵۵	۱۴	۲۵۰	۲۰۰۰	۱۵	۳۷	۷۴/۷۹
۴	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۸۰	۸۷/۰۶
۵	۵۵	۲۰	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷	۸۱/۹۰
۶	۳۰	۸	۳۰۰	۴۰۰۰	۲۰	۸۰	۶۹/۸۵
۷	۳۰	۲۰	۳۰۰	۴۰۰۰	۱۰	۳۷	۷۰/۱۰
۸	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۰	۸۰	۷۴/۵۰
۹	۵۵	۸	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۸۰	۷۱/۰۵
۱۰	۸۰	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷	۹۰/۰۷
۱۱	۸۰	۲۰	۲۰۰	۴۰۰۰	۱۰	۳۷	۶۸/۹۴
۱۲	۵۵	۱۴	۲۵۰	۴۰۰۰	۱۵	۸۰	۸۶/۱۱
۱۳	۳۰	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷	۷۸/۹۶
۱۴	۵۵	۱۴	۲۰۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷	۷۵/۱۱
۱۵	۳۰	۲۰	۲۰۰	۴۰۰۰	۲۰	۳۷	۷۳/۲۰
۱۶	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۲۰	۸۰	۸۸/۶۶
۱۷	۳۰	۲۰	۳۰۰	۲۰۰۰	۲۰	۳۷	۷۶/۳۵
۱۸	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۱۵	۸۰	۸۸/۱۰
۱۹	۸۰	۸	۲۰۰	۴۰۰۰	۲۰	۸۰	۷۵/۳۷
۲۰	۸۰	۲۰	۲۰۰	۲۰۰۰	۲۰	۸۰	۷۶/۷۱
۲۱	۸۰	۲۰	۳۰۰	۲۰۰۰	۱۰	۸۰	۷۸/۷۵
۲۲	۸۰	۲۰	۳۰۰	۲۰۰۰	۱۰	۳۷	۷۶/۸۷
۲۳	۳۰	۸	۲۰۰	۲۰۰۰	۱۰	۳۷	۷۰/۹۶
۲۴	۸۰	۸	۳۰۰	۴۰۰۰	۱۰	۸۰	۸۱/۳۱
۲۵	۳۰	۸	۲۰۰	۲۰۰۰	۱۰	۸۰	۷۱/۳۲
۲۶	۵۵	۱۴	۲۰۰	۳۰۰۰	۱۵	۸۰	۷۶/۷۷
۲۷	۵۵	۱۴	۳۰۰	۳۰۰۰	۱۵	۳۷	۸۳/۴۵
۲۸	۵۵	۱۴	۲۵۰	۳۰۰۰	۲۰	۳۷	۸۶/۵۳
۲۹	۳۰	۲۰	۲۰۰	۴۰۰۰	۲۰	۸۰	۷۷/۴۷
۳۰	۸۰	۸	۲۰۰	۴۰۰۰	۲۰	۳۷	۷۵/۳۲

۸۵/۸۰	۳۷	۱۵	۳۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۵۵	۳۱
۸۹/۵۱	۸۰	۱۵	۳۰۰۰	۳۰۰	۱۴	۵۵	۳۲
۸۸/۹۸	۸۰	۱۵	۳۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۵۵	۳۳
۸۳/۰۶	۸۰	۱۵	۳۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۳۰	۳۴
۷۶/۴۳	۳۷	۲۰	۲۰۰۰	۲۰۰	۲۰	۸۰	۳۵
۷۳/۶۵	۳۷	۱۵	۳۰۰۰	۲۵۰	۸	۵۵	۳۶
۹۱/۱۴	۸۰	۱۵	۳۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۸۰	۳۷
۷۳/۲۰	۸۰	۲۰	۲۰۰۰	۳۰۰	۸	۸۰	۳۸
۷۴/۲۱	۳۷	۲۰	۴۰۰۰	۳۰۰	۸	۳۰	۳۹
۷۳/۰۹	۳۷	۲۰	۲۰۰۰	۳۰۰	۸	۸۰	۴۰
۸۴/۱۰	۳۷	۱۵	۳۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۵۵	۴۱
۸۶/۲۰	۳۷	۱۵	۴۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۵۵	۴۲
۷۷/۸۷	۸۰	۱۵	۲۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۵۵	۴۳
۷۲/۴۰	۳۷	۱۰	۳۰۰۰	۲۵۰	۱۴	۵۵	۴۴
۷۵/۸۱	۳۷	۱۰	۴۰۰۰	۳۰۰	۸	۸۰	۴۵
۷۲/۷۵	۸۰	۱۰	۴۰۰۰	۳۰۰	۲۰	۳۰	۴۶
۷۰/۲۴	۸۰	۱۰	۴۰۰۰	۲۰۰	۲۰	۸۰	۴۷
۷۵/۷۶	۸۰	۲۰	۲۰۰۰	۳۰۰	۲۰	۳۰	۴۸

۴-۲-۱- مدل سازی و تجزیه و تحلیل آماری

به منظور شناخت، تعیین و میزان تاثیر هر یک از پارامترهای تاثیرگذار بر فلوتاسیون فراصوت لازم است که ابتدا مدل سازی فرآیند برای ارتباط بین پارامترهای مورد مطالعه با متغیر پاسخ (بازیابی سرب) انجام شود. در واقع مدل سازی می تواند در شناخت بیشتر رفتار پارامترها موثر باشد. هدف از فرآیند مدل سازی، انتخاب مدل های مناسب قابل کاربرد در حیطه کاری مورد نظر و برازش داده های آزمایشگاهی با مدل ها می باشد تا بتوان از بین این مدل ها، بهترین مدلی که بر داده های آزمایشگاهی برازش می شود، بدست آورد. بدین منظور اصول طراحی آزمایش ها و با استفاده از بسته نرم افزاری Design Expert (DX7)، آنالیز گرافیکی و رگرسیونی داده های آزمایشگاهی انجام شد. جدول ۴-۲، نتایج آنالیز آماری انجام شده بوسیله نرم افزار برای انتخاب مدل در سطح اعتماد ۹۵٪ (احتمال p کمتر از ۰/۰۵) نشان می دهد. در این جدول برای مدل مقادیر احتمال p

کوچکتر از ۰/۰۵ و برای عدم برازش^۱ مقادیر احتمال بزرگتر از ۰/۰۵، اهمیت مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ملاحظه می‌گردد، با توجه به مقادیر احتمال p، مدل درجه دوم دارای اهمیت آماری بالاتری نسبت دیگر مدل‌ها است و بهترین برازش را نسبت دیگر مدل‌ها بر داده‌های آزمایشگاهی با مقدار R^2 برابر ۰/۹۵/۰۵ دارد.

جدول ۴-۲: تجزیه تحلیل آماری مدل‌های مختلف برازش شده بر فلوتاسیون سرب با کمک فراصوت.

آنالیز واریانس مدل‌های مختلف برازش شده					
منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
میانگین در مقایسه با مجموع	۲/۹۸×۱۰ ^۵	۱	۲/۹۸×۱۰ ^۵		
مدل خطی در مقایسه با میانگین	۱۹۳/۰۲	۶	۳۲/۱۷	۰/۷۴	۰/۶۲۰۹
مدل 2F1 در مقایسه با خطی	۶۵۵/۶۲	۱۵	۴۳/۷۱	۱/۰۱	۰/۴۷۷۲
مدل درجه دوم در مقایسه با 2F1	۱۰۳۰/۱۶	۵	۲۰۶/۰۳	۴۴/۲۱	<۰/۰۰۰۱
مدل درجه سوم در مقایسه با درجه دوم	۹۳/۰۱	۱۶	۵/۸۱	۵/۹۹	۰/۰۲۸۹
باقی مانده	۴/۸۵	۵	۰/۹۷		
مجموع	۳/۰۰×۱۰ ^۵	۴۸	۶۲۴۳/۶		
آنالیز عدم برازش مدل‌ها (Lack of Fit)					
منبع					
خطی	۱۷۷۹/۶۶	۳۷	۴۸/۱	۴۸/۲۲	۰/۰۰۰۹
مدل 2F1	۱۱۲۴/۰۴	۲۲	۵۱/۰۹	۵۱/۲۳	۰/۰۰۰۸
مدل درجه دوم	۹۳/۸۸	۱۷	۵/۵۲	۵/۵۴	۰/۰۵۴۷
مدل درجه سوم	۰/۸۶	۱	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۴۰۴۵
خطای خالص	۳/۹۹	۴	۱		
خلاصه تجزیه و تحلیل آماری مدل‌ها					
منبع	انحراف استاندارد	R^2			
خطی	۶/۶	۰/۰۹۷۶			
مدل 2F1	۶/۵۹	۰/۴۲۹۳			
مدل درجه دوم	۲/۱۶	۰/۹۵۰۵			
مدل درجه سوم	۰/۹۹	۰/۹۹۷۵			

^۱ - Lack of fit

در مرحله بعد، آنالیز واریانس (ANOVA) مدل تعیین شده (مدل درجه دوم) برای تخمین پارامترهای آماری و انتخاب مدل نهایی با حذف پارامترهای کم اهمیت بوسیله نرم افزار Design Expert انجام گرفت. در واقع آنالیز واریانس تکنیکی است که برای غربال کردن پارامترهای معنادار در سطح اعتماد مورد نظر (۹۵٪) روی پاسخ سیستم استفاده می شود. در این تکنیک هدف شناسایی پارامترهای موثر و همچنین ترتیب آن ها از نظر اهمیت در پاسخ آزمایش ها با انجام یک سلسله عملیات ریاضی است. جدول ۳-۴ نتایج آنالیز واریانس مدل درجه دوم برازش شده و پارامترها موثر را در سطح اعتماد ۹۵ درصد بعد از حذف پارامترهای کم اهمیت نشان می دهد.

در نهایت، مدل نهایی برازش شده بر روی داده های آزمایشگاهی بعد از حذف پارامترهای غیر مهم برای تخمین بازیابی فلوتاسیون سرب (R) بر اساس مقادیر کد به صورت زیر است.

$$R = 84.27 + 4.66 \times A + 5.47 \times B + 3.99 \times C + 4.22 \times D + 8.35 \times E + 0.91 \times F + 2.97 \times A \times B + 5.94 \times A \times C + 4.14 \times A \times D + 4.12 \times B \times C + 1.58 \times B \times D + 4.58 \times C \times D + 2.31 \times A^2 - 5.23 B^2 - 2.29 \times C^2 - 2.26 \times D^2 - 2.98 \times E^2 \quad (1-4)$$

در رابطه بالا، A، B، C، D، E و F به ترتیب نشان دهنده پارامترهای توان فراصوت (°)، زمان فراصوت (دقیقه)، میزان مصرف کلکتور (گرم بر تن)، میزان مصرف سولفید سدیم (گرم بر تن)، مقدار کف ساز (گرم بر تن) و فرکانس (کیلوهرتز) دستگاه فراصوت است. در معادله فوق، مقادیر کد برای مقایسه آسان تر اهمیت نسبی پارامترها نسبت به هم و همچنین ساده سازی محاسبات استفاده گردید. معادله (۲-۴) رابطه بین مقادیر کد بندی شده و مقادیر واقعی پارامترها را نشان می دهد.

$$Z_i = \frac{Z_i - Z_0}{\Delta Z}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad 2-4$$

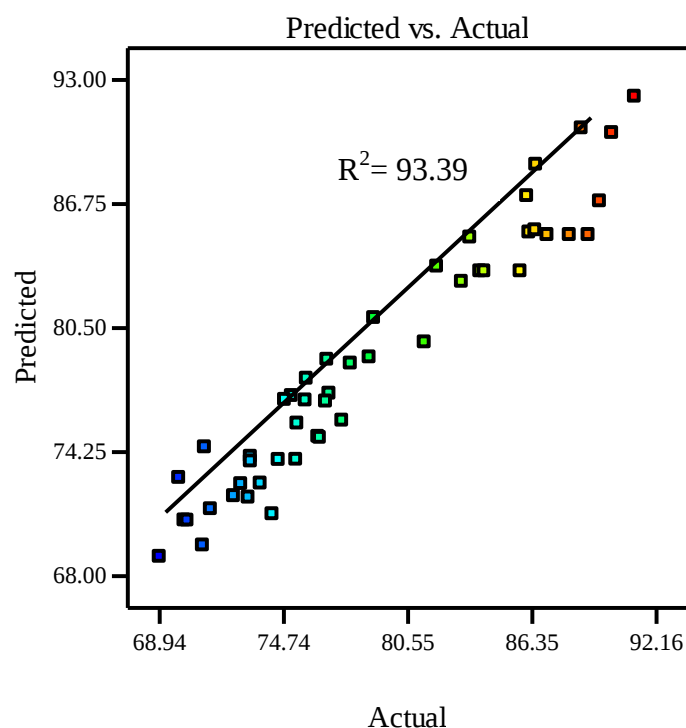
در فرمول بالا، Z_i و Z_0 به ترتیب مقدار کد و مقدار واقعی پارامتر مورد نظر، مقدار پارامتر در سطح مرکزی (مقدار صفر) و تغییر گام مقدار واقعی پارامتر را نشان می دهند.

جدول ۳-۴: آنالیز واریانس مدل درجه دوم برازش بر فلو تاسیون سرب با فراصوت بعد از حذف پارامترهای بی‌اهمیت (< 0.05)
میزان احتمال (P).

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F مقدار	P مقدار
مدل	۱۸۴۶	۱۷	۱۰۸/۵۹	۲۴/۹۳	< 0.0001
A- توان فراصوت	۲۹۵/۸۴	۱	۲۹۵/۸۴	۶۷/۹۲	< 0.0001
B- زمان فراصوت (دقیقه)	۴۰۶/۶۳	۱	۴۰۶/۶۳	۹۳/۳۶	< 0.0001
C- کلکتور (گرم بر تن)	۲۱۶/۷۳	۱	۲۱۶/۷۳	۴۹/۷۶	< 0.0001
D- سولفید سدیم (گرم بر تن)	۲۴۱/۸۵	۱	۲۴۱/۸۵	۵۵/۵۳	< 0.0001
E- کف ساز (گرم بر تن)	۴۸۴/۰۳	۱	۴۸۴/۰۳	۱۱۱/۱۳	< 0.0001
F- فرکانس (کیلو هرتز)	۴۰/۰۴	۱	۴۰/۰۴	۹/۱۹	۰/۰۰۵
AB	۹۳/۴۶	۱	۹۳/۴۶	۲۱/۴۶	< 0.0001
AC	۳۷۳/۲۳	۱	۳۷۳/۲۳	۸۵/۶۹	< 0.0001
AD	۱۸۱/۰۴	۱	۱۸۱/۰۴	۴۱/۵۷	< 0.0001
BC	۱۷۹/۳۴	۱	۱۷۹/۳۴	۴۱/۱۸	۰/۱۹۵
BD	۲۶/۵۵	۱	۲۶/۵۵	۶/۱	< 0.0001
CD	۲۲۲/۰۷	۱	۲۲۲/۰۷	۵۰/۹۹	۰/۰۲۰۶
A ²	۲۶/۰۲	۱	۲۶/۰۲	۵/۹۷	< 0.0001
B ²	۱۳۳/۴۴	۱	۱۳۳/۴۴	۳۰/۶۴	۰/۰۲۱۴
C ²	۲۵/۶۶	۱	۲۵/۶۶	۵/۸۹	۰/۰۲۳۳
D ²	۲۴/۸۸	۱	۲۴/۸۸	۵/۷۱	۰/۰۰۳۷
E ²	۱۳۰/۶۶	۱	۱۳۰/۶۶	۹/۹۴	
باقیمانده	۱۳۰/۶۶	۳۰	۴/۳۶		۰/۰۶۶۵
عدم در برازش	۱۲۶/۶۷	۲۶	۴/۸۷	۴/۸۸	
خطای خالص	۳/۹۹	۴	۱		
جمع کل	۱۹۷۶/۶۷	۴۷			

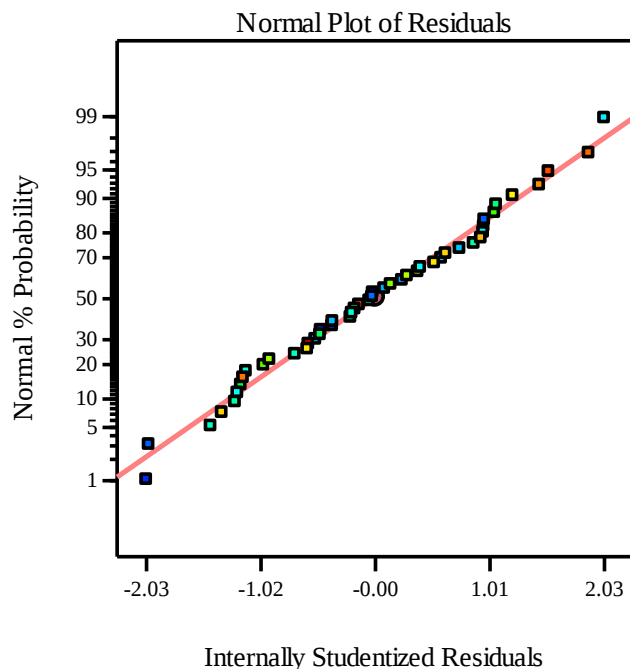
۴-۲-۲- اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی و تعیین دقت مدل برازش شده از نمودارهای احتمال نرمال باقیمانده، نمودار مقدار باقیمانده محاسبه شده از توزیع در مقابل شماره آزمایش‌ها و نمودار مقادیر پیش‌بینی در مقابل مقادیر واقعی استفاده شد. شکل ۴-۲ نمودار مقادیر پیش‌بینی بازیابی فلوتاسیون سرب را براساس مدل برازش شده در مقابل مقادیر آزمایشگاهی محاسبه شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی شده به کمک مدل، نزدیک به مقادیر واقعی است. قرار گرفتن این مقادیر بر روی نیمساز ۴۵ درجه این واقعیت را نشان می‌دهد. در ضمن برای آن که یک مدل توانایی خوبی در برازش داده‌های آزمایشگاهی داشته باشد لازم است که میزان R^2 بالای ۰/۸ باشد. همان‌طور ملاحظه می‌گردد میزان R^2 برابر ۹۳/۳۹ درصد است.



شکل ۴-۳: نمودار مقادیر آزمایشگاهی بازیابی فلوتاسیون سرب در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده از مدل پیشنهادی.

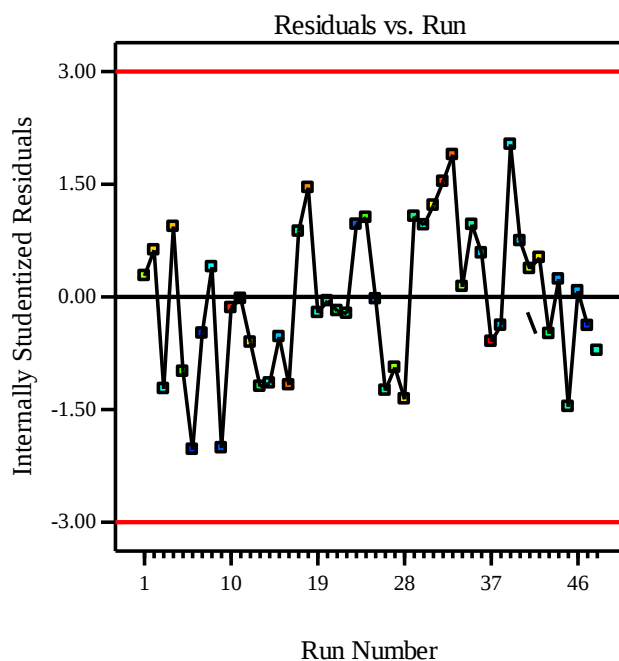
شکل ۳-۴ نمودار احتمال نرمال باقیمانده (اختلاف بین مقادیر بازیابی پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده) را نشان می‌دهد. در این نمودار داده‌ها باید در امتداد یک خط راست و حول مقدار صفر متمرکز باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود همه داده‌ها در امتداد یک خط راست هستند که بیانگر دقت مدل برازش شده است.



شکل ۳-۴: نمودار احتمال نرمال باقیمانده (اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی و واقعی)

نمودار مهم دیگری که برای بررسی مدل و داده‌ها بکار می‌رود، استفاده از نمودار مقدار باقیمانده محاسبه شده از توزیع در مقابل شماره آزمایش‌ها یا همان بررسی مقادیر خارج از رده (شکل ۴-۴) است. انجام محاسبات مربوط به این نمودار به این صورت است که ابتدا، داده‌های مربوط به یک آزمایش را بیرون از محاسبات نگه می‌دارند و سپس بوسیله داده‌های دیگر، پاسخ را توسط مدل محاسبه می‌کنند. به این ترتیب پاسخ محاسبه شده توسط مدل و پاسخ واقعی اندازه‌گیری شده که بیرون از محاسبات نگه داشته شده بودند، با یکدیگر مقایسه شده و باقیمانده محاسبه می‌شود. حال اگر باقیمانده محاسبه شده مربوط به این آزمایش‌ها از خطوط حدی مشخص شده در بالا و پایین که توسط آزمون t محاسبه می‌شود تجاوز کند پاسخ اندازه‌گیری شده از

لحاظ آماری به عنوان خارج از رده شناخته می‌شود (عزیزی، ۱۳۹۲). همان‌طور که در شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود، هیچ یک از داده‌ها خارج از رده نیستند. بنابراین می‌توان ادعا نمود که مدل رگرسیون پیشنهادی، بازیابی فلوتاسیون سرب را در محدوده پارامترهای مورد بررسی به خوبی پیش‌بینی می‌کند.

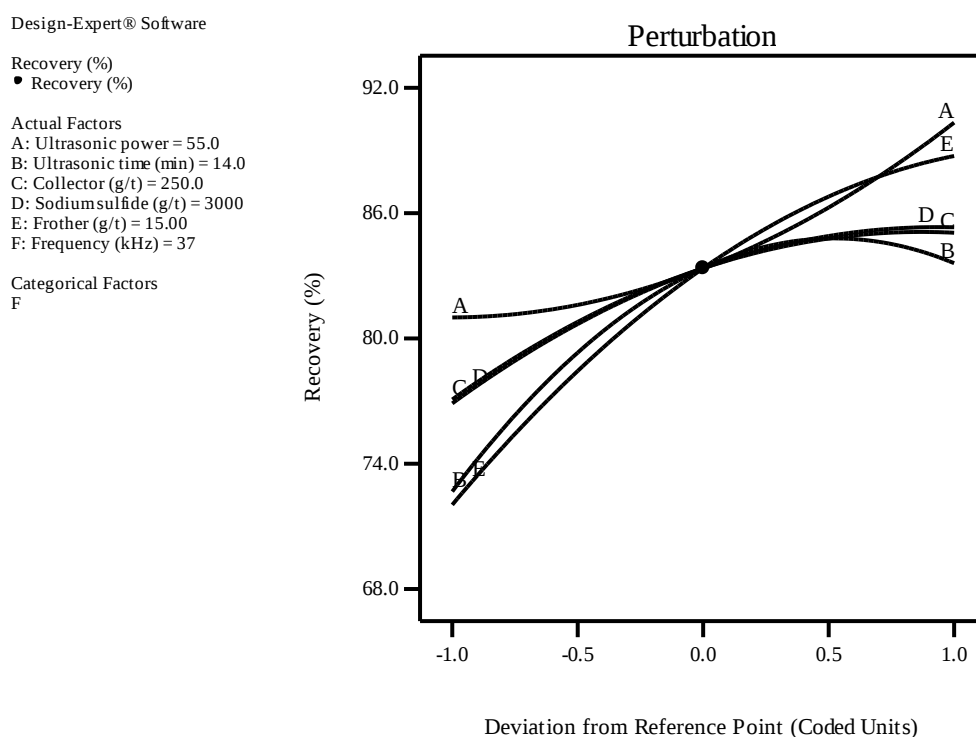


شکل ۴-۴: نمودار مقدار باقیمانده محاسبه شده از توزیع در مقابل شماره آزمایش‌ها برای تعیین دقت مدل برازش شده.

۴-۲-۳- بررسی تاثیر پارامترها و اندر کنش آن‌ها بر بازیابی فلوتاسیون فراصوت سرب

برای تعیین رفتار پارامترهای موثر بر بازیابی فلوتاسیون فراصوت سرب از جدول آنالیز واریانس و همچنین نمودارهای حساسیت یا آشفتگی (perturbation) و سطح پاسخ استفاده شد. جدول ۳-۴ نتایج آنالیز واریانس را برای مدل برازش شده بعد از حذف پارامترهای کم اهمیت نشان می‌دهد. مطابق جدول ۳-۴، از میان متغیرها کف‌ساز، زمان فراصوت و اثر متقابل توان فراصوت با میزان مصرف کلکتور به ترتیب بیشترین تاثیر بر بازیابی فلوتاسیون سرب دارند. شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶، اثر همه پارامترهای عملیاتی و اهمیت نسبی آن‌ها را در یک نقطه خاص از فضای طرح برای حالت‌هایی که فرکانس دستگاه فراصوت به ترتیب در مقادیر ۳۷ و ۸۰

کیلوهرتز تنظیم شده است، نشان می‌دهند. همان‌طور که بیان شد از این نمودارها درک بیشتر اهمیت نسبی اثر پارامترها و مقایسه تاثیر آن‌ها بر فلوتاسیون فراصوت سرب استفاده گردید. به طور کلی در نمودارهای آشفتگی (Perturbation)، شیب تند یا انحناء نشان‌دهنده حساسیت متغیر پاسخ (بازیابی فلوتاسیون سرب) نسبت آن پارامتر و خط نسبتاً صاف هم بیانگر کم‌اهمیت بودن آن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای هر دو فرکانس، پارامترها رفتار مشابهی دارند.



شکل ۴-۵: نمودار حساسیت یا اغتشاش نشان‌دهنده‌ی اثر همه پارامترهای عملیاتی بر فلوتاسیون سرب برای حالت فرکانس ۳۷ کیلوهرتز دستگاه فراصوت.

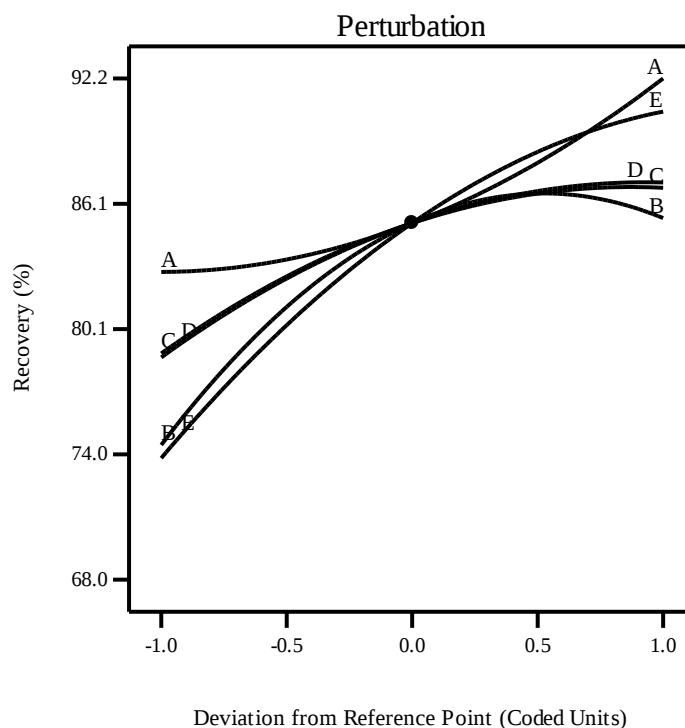
Design-Expert® Software

Recovery (%)
 • Recovery (%)

Actual Factors

A: Ultrasonic power = 55.0
 B: Ultrasonic time (min) = 14.0
 C: Collector (g/t) = 250.0
 D: Sodium sulfide (g/t) = 3000
 E: Frother (g/t) = 15.00
 F: Frequency (kHz) = 80

Categorical Factors
 F



شکل ۴-۶: نمودار حساسیت یا اغتشاش نشان‌دهنده اثر همه پارامترهای عملیاتی بر فلوتاسیون سرب برای حالت فرکانس ۸۰ کیلوهرتز دستگاه فراصوت.

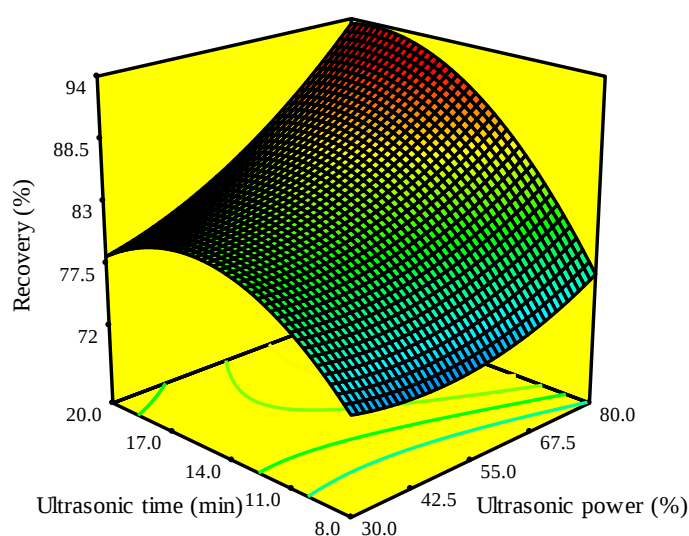
همچنین مطابق شکل ۴-۵ و ۴-۶، فلوتاسیون سرب نسبت به توان فراصوت و مقدار کف‌ساز بیشترین و نسبت به کلکتور و میزان سولفید سدیم کمترین حساسیت را دارد. علاوه بر این شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ تاثیر هر فاکتور روی بازیابی سرب هنگامی پارامترهای دیگر در مقدار مرکزی خود ثابت هستند نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فراصوت بویژه توان و زمان فراصوت نقش بسیار مثبتی را در افزایش بازیابی داشته است و بهبود حدود ۱۶ درصدی در مقدار بازیابی در مقایسه با حالت بدون استفاده از امواج فراصوت مشاهده شد. لازم به ذکر است که آزمایش فلوتاسیون سرب کربناته بدون استفاده از امواج فراصوت تحت شرایط مقدار سولفید سدیم ۳۰۰۰ گرم بر تن، کلکتور ۲۵۰ گرم بر تن و مقدار کف‌ساز ۱۵ گرم بر تن انجام شد و مقدار بازیابی ۷۶ درصد بود. افزایش توان فراصوت می‌تواند متناسب با دامنه ارتعاش منبع فراصوت باشد که افزایش دامنه منجر به به افزایش شدت ارتعاش می‌شود و این به نوبه خود منجر به افزایش اثرات سونوشیمیایی می‌شود که می‌تواند روی اندازه حباب و ذرات، سطح تماس حباب-ذره و دمای پالپ تاثیر

بگذارد (Hassanzadeh et al., 2020). در واقع لرزش‌های مکانیکی حاصل از امواج فراصوت، به دلیل افزایش سطح تماس دینامیکی ذره-سیال و تشکیل مراکز پر انرژی بر روی سطح ذره به منظور جذب مولکول جذب کلکتور، باعث آبدوست‌تر شدن ذرات آبدوست و آب‌گریزتر شدن ذرات آبران می‌شود. علاوه بر این بکارگیری امواج فراصوت باعث افزایش ترسیب حبابهای ریز هوا بر روی ذرات می‌شود که تجمع این حبابهای ریز و پایدار، به ویژه بر روی ذرات آبران، باعث بهبود شرایط تماسی ذره-حباب و در نتیجه افزایش شناورسازی این ذرات می‌شود (غلامی و همکاران، ۱۳۹۸). مطابق شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش مقدار کلکتور، کف‌ساز و سولفید سدیم، بازیابی سرب افزایش می‌یابد تا به یک مقدار مشخصی برسد، سپس با افزایش بیشتر تقریباً ثابت می‌شود و حتی روند کاهشی پیدا می‌کند. کلکتور خصوصیات سطح ذرات را تغییر می‌دهد و در نتیجه منجر به افزایش بازیابی فلوتاسیون سرب در محدوده مورد بررسی (۲۰۰ تا ۲۷۵ گرم بر تن) می‌شود، اما افزایش بیشتر میزان کلکتور از حدود ۲۷۵ تا ۳۰۰ گرم بر تن مشاهده می‌شود که تقریباً کاهش بازیابی را در پی دارد. این رفتار می‌تواند ناشی از پدیده میسلیزاسیون برای مقادیر اضافی کلکتور در محدوده مورد بررسی باشد. افزودن سولفید سدیم برای سولفیدی کردن کانی‌های اکسیدی (کربنات سرب) نقش به سزایی دارد و سطح ذره در اثر حضور یون سولفید جذب شیمیایی شده و خیلی کمتر آب‌پذیر می‌شود و در نتیجه راحت‌تر شناور می‌گردد (شاه چراغی و همکاران، ۱۳۹۳) و (مصدریان، ۱۳۹۷). در واقع اگر میزان سولفور در حد مورد نیاز باشد، یون‌های S^{2-} با انحلال Pb^{+2} صورت PbS رسوب می‌کنند. پس از خارج شدن همه یون‌های سرب، یون‌های سولفید بر روی سطح کانی اکسیدی جذب می‌شوند و تشکیل لایه‌ای از سولفور سرب را بر روی آن می‌دهد و در نتیجه فلوتاسیون در چنین شرایطی بهبود می‌یابد. در صورتی که میزان سولفور سدیم بیش از حد مورد نیاز باشد، یون‌های سولفور جذب کلکتور می‌شوند، و بعنوان بازداشت‌کننده عمل می‌کنند (عطفی و همکاران، ۱۳۸۳) و (عسکرآبادی & کارآموزیان، ۱۳۹۸).

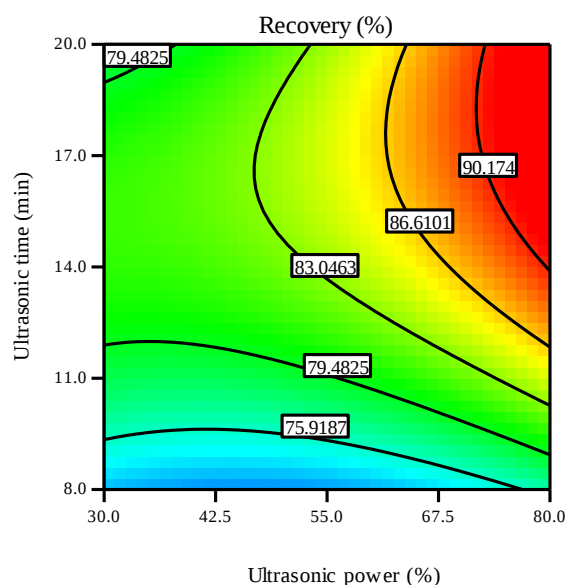
۳-۴- تاثیر متقابل پارامترها

۴-۳-۱- اثر همزمان توان و زمان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب

شکل ۴-۷ نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی و منحنی‌های تراز اثر پارامترهای توان و زمان فراصوت را هنگامی که فرکانس دستگاه فراصوت در ۳۷ کیلو هرتز و پارامترهای دیگر در سطح مرکزی خود یعنی مقدار کلکتور ۲۵۰ گرم بر تن، میزان مصرف سولفید سدیم ۳۰۰۰ گرم بر تن و مقدار کف‌ساز ۱۵ گرم بر تن ثابت نگه داشته شده‌اند، نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۷: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده اثر توان و زمان فراصوت بر فلوتاسیون سرب.

Design-Expert® Software

Recovery (%)

■ B- 8.000
▲ B+ 20.000

X1 = A: Ultrasonic power

X2 = B: Ultrasonic time (min)

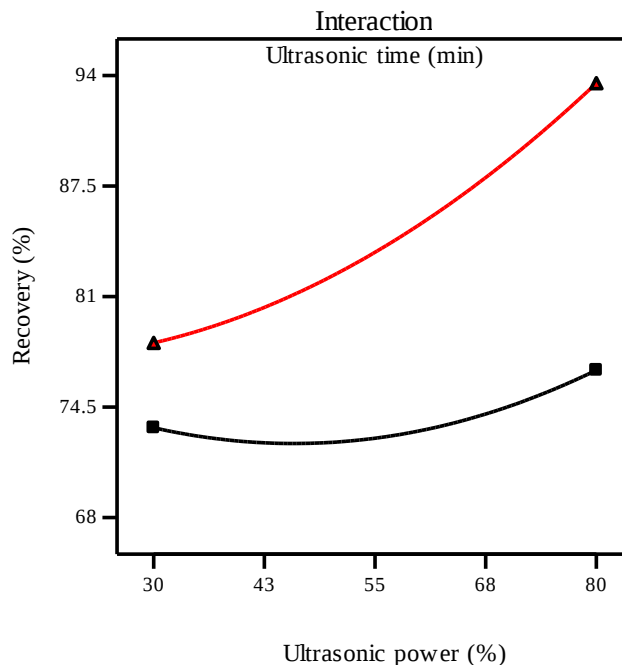
Actual Factors

C: Collector (g/t) = 250.0

D: Sodiumsulfide (g/t) = 3000.0

E: Frother (g/t) = 15.00

F: Frequency (kHz) = 37



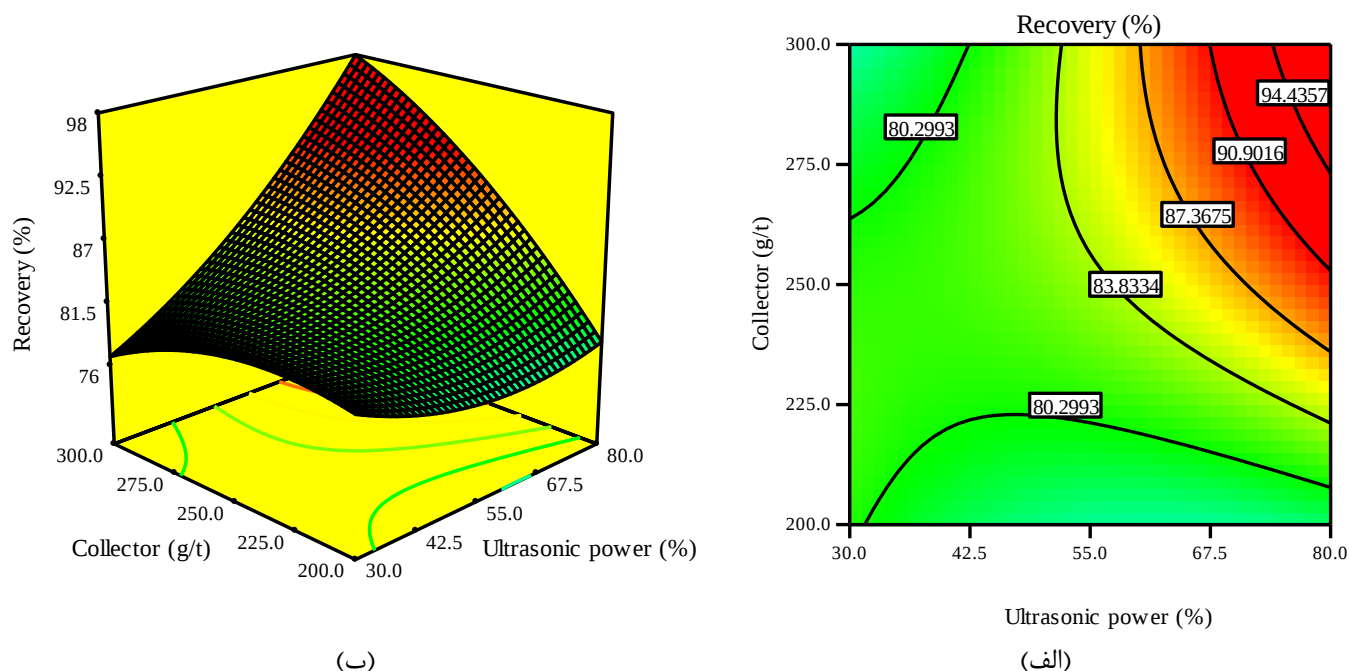
شکل ۴-۸: نمودار اثر متقابل بین توان و زمان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب هنگامی که سایر پارامترها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود و فرکانس بر روی ۳۷ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۴-۷ مشاهده می‌شود، در زمان‌های فراصوت پایین (۸ دقیقه) با افزایش توان فراصوت از ۳۰ به ۸۰ درصد کیلوهرتز، میزان بازیابی با شیب بسیار ملایمی افزایش می‌یابد. درحالی که در مقادیر بالای زمان فراصوت با افزایش توان فراصوت از ۳۰ به ۸۰، میزان بازیابی سرب به شدت افزایش می‌یابد، بطوری‌که در زمان ۱۷ دقیقه بازیابی به حدود ۹۴٪ درصد می‌رسد. این رفتار می‌تواند به دلیل آن باشد که افزایش توان فراصوت موجب افزایش دامنه ارتعاش و شدت ارتعاش و حتی دمای واکنش می‌شود. علاوه براین، با افزایش توان اولتراسونیک کانی آب‌گریزتر می‌شود که باعث می‌شود سرب بیشتر به فاز کف منتقل شود و در نتیجه مقدار بازیابی افزایش یابد (Hassanzadeh et al., 2020).

علاوه بر منحنی‌های تراز و نمودارهای سطح پاسخ سه‌بعدی، برای نمایش و فهم بهتر رفتار پارامترها از نمودارهای اثرات متقابل بین پارامترها استفاده گردید. شکل ۴-۸ بیانگر اندرکنش بین زمان و توان فراصوت بر فلوتاسیون سرب است و نتایج نمایش داده شده در شکل ۴-۷ را تصدیق می‌کند.

۴-۳-۲- اثر همزمان توان فراصوت و کلکتور بر بازیابی فلوتاسیون سرب

شکل ۴-۹ نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی و منحنی‌های تراز اثر پارامترهای توان فراصوت و کلکتور را هنگامی که دیگر پارامترها در سطح مرکزی خود قرار دارند و فرکانس دستگاه ۳۷ کیلو هرتز است، نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۹: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده اثر کلکتور و توان فراصوت بر فلوتاسیون سرب. مطابق شکل ۴-۹، در مقادیر پایین کلکتور با افزایش توان فراصوت تقریباً یک روند کاهشی در میزان بازیابی سرب مشاهده می‌گردد و برعکس در مقادیر بالای کلکتور با افزایش توان فراصوت بازیابی افزایش می‌یابد. امواج فراصوت باعث تمیز شدن سطح کانی‌ها می‌شود که با افزایش توان فراصوت سطح کانی‌ها تمیزتر شده و کلکتور راحت‌تر بروی کانی‌ها قرار می‌گیرد و باعث شناورسازی بیشتر کانی‌های سرب و راهیابی آن‌ها به فاز کف می‌گردد که این کار باعث افزایش بازیابی می‌شود. نتایج ارائه شده در شکل ۴-۱۰ نیز بیانگر همین نتایج است.

Design-Expert® Software

Recovery (%)

■ C- 200.000
▲ C+ 300.000

X1 = A: Ultrasonic power

X2 = C: Collector (g/t)

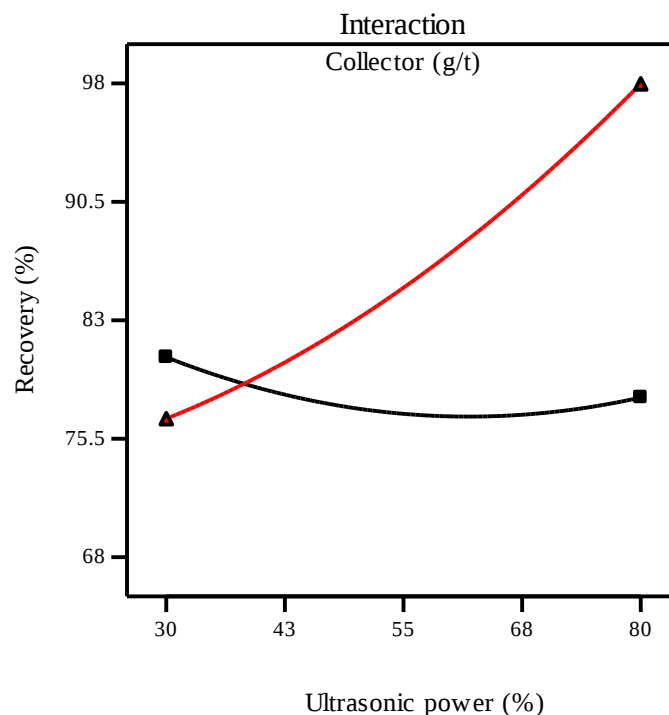
Actual Factors

B: Ultrasonic time (min) = 14.0

D: Sodium sulfide (g/t) = 3000.0

E: Frother (g/t) = 15.00

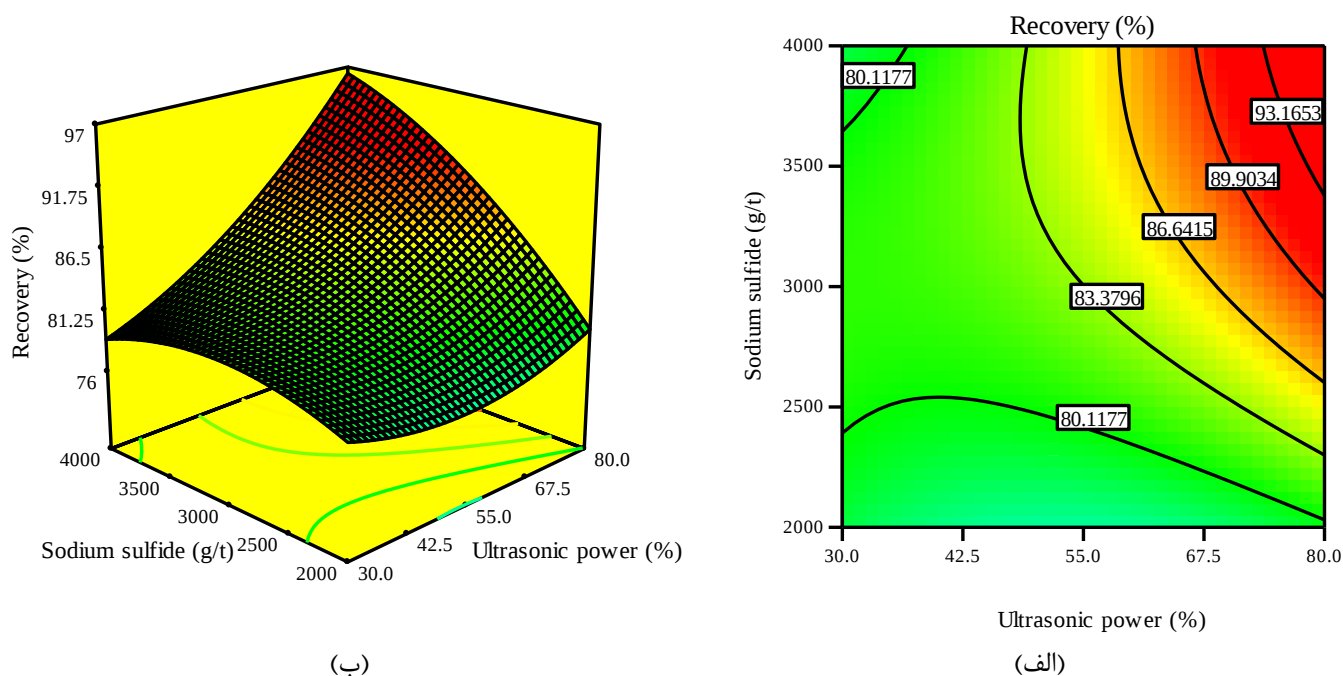
F: Frequency (kHz) = 37



شکل ۴-۱۰: نمودار اثر متقابل بین کلکتور و توان فراصوت بر بازیابی فلوئاسیون سرب هنگامیکه که سایر پارامترها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود و فرکانس بر روی ۳۷ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده‌اند.

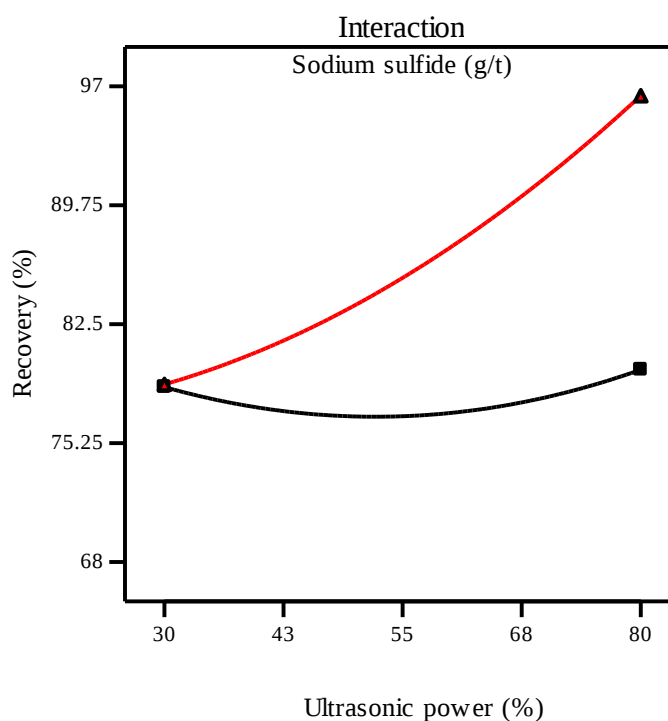
۴-۳-۳- اثر همزمان توان فراصوت و سولفید سدیم بر بازیابی فلوئاسیون سرب

شکل ۴-۱۱ و ۴-۱۲، اثر همزمان پارامترهای توان فراصوت و مقدار سولفید سدیم را نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در مقادیر پایین سولفید سدیم با افزایش توان فراصوت بازیابی تغییر چندانی نمی‌کند، اما در مقادیر بالای سولفید سدیم بازیابی افزایش پیدا می‌کند و تا مقدار ۹۳٪ نیز می‌رسد. این رفتار اثر مثبت افزایش همزمان سولفید سدیم و توان فراصوت را نشان می‌دهد که می‌تواند بطور قابل ملاحظه‌ای بازیابی را افزایش دهد. دلیل این امر را این‌گونه می‌توان توجیه کرد که لرزش‌های مکانیکی حاصل از امواج فراصوت (اثرات سونوشیمیایی) به همراه افزودن میزان سولفور سدیم در مقادیر مورد بررسی علاوه بر تسهیل در جذب یون‌های سولفید بر روی سطح کانی اکسیدی و تشکیل لایه‌ای از سولفور سرب بر روی آن، موجب بهبود شرایط تماسی ذره-حباب شده است.



شکل ۴-۱۱: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده اثر میزان مصرف سولفید سدیم و توان فراصوت بر فلوتاسیون سرب.

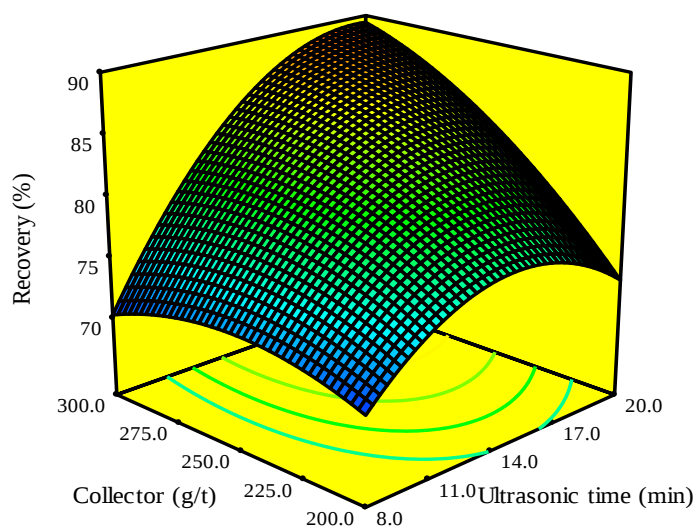
Design-Expert® Software
 Recovery (%)
 ■ D- 2000.000
 ▲ D+ 4000.000
 X1 = A: Ultrasonic power
 X2 = D: Sodiumsulfide (g/t)
 Actual Factors
 B: Ultrasonic time (min) = 14.0
 C: Collector (g/t) = 250.0
 E: Frother (g/t) = 15.00
 F: Frequency (kHz) = 37



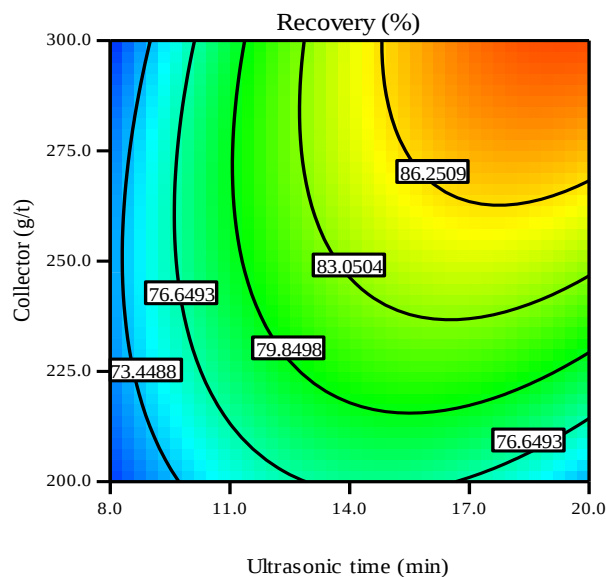
شکل ۴-۱۲: نمودار اثر متقابل بین میزان مصرف سولفید سدیم و توان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب هنگامی که سایر پارامترها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود و فرکانس بر روی ۳۷ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده‌اند.

۴-۳-۴- اثر همزمان زمان فراصوت و کلکتور بر بازیابی سرب

همان‌طور که در شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴ مشاهده می‌شود، زمانی که از کلکتور در مقادیر پایین (۲۰۰ گرم بر تن) استفاده می‌شود، با افزایش مدت زمان فراصوت تا ۱۴ دقیقه افزایش بازیابی را در پی دارد اما با افزایش بیشتر زمان بازیابی کمی کاهش پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد که در مقادیر پایین کلکتور استفاده از امواج فراصوت از یک مدت زمانی به بعد (حدود ۱۴ دقیقه)، شدت لرزش مکانیکی وارد شده به حباب‌ها، از سطح تحمل مکانیکی تعدادی از حباب‌ها تجاوز کرده و در نتیجه منجر به از بین رفتن تعدادی از حباب‌ها (حباب‌های بزرگ و ناپایدار) شده است. در این حالت تراکم حباب‌ها در فاز کف کاهش پیدا می‌کند و باعث کاهش جزیی بازیابی سرب در فرآیند فلو تاسیون فراصوت شده است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که در مقادیر بالای کلکتور (۳۰۰ گرم بر تن) نیز با افزایش مدت زمان فراصوت، بازیابی سرب تا حد مشخصی افزایش پیدا می‌کند و بعد از آن ثابت می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۱۳: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده اثر کلکتور و زمان فراصوت بر فلو تاسیون

سرب

Design-Expert® Software

Recovery (%)

■ C- 200.000
▲ C+ 300.000

X1 = B: Ultrasonic time (min)
X2 = C: Collector (g/t)

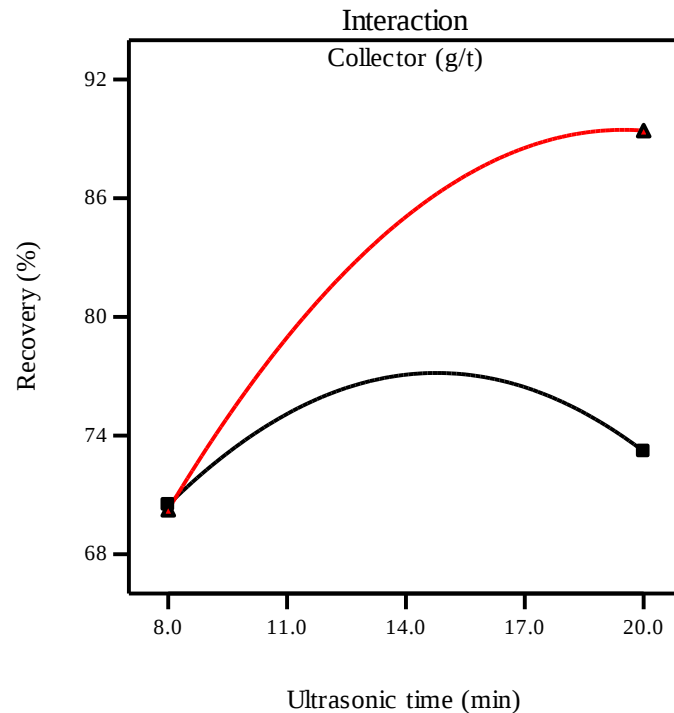
Actual Factors

A: Ultrasonic power = 55

D: Sodiumsulfide (g/t) = 3000.0

E: Frother (g/t) = 15.00

F: Frequency (kHz) = 37

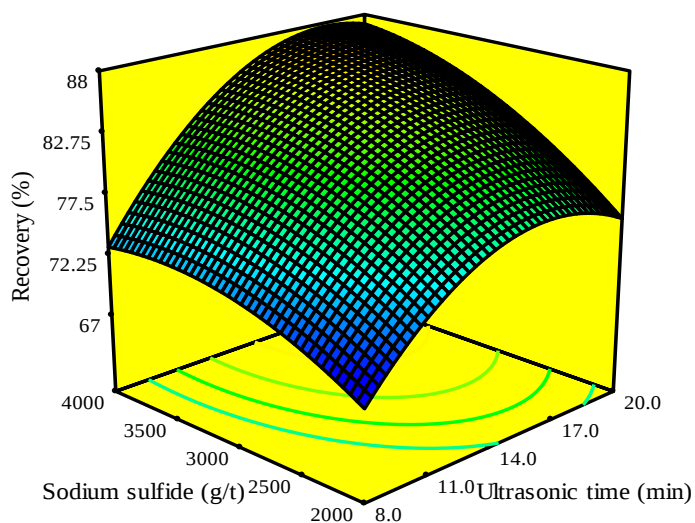


شکل ۴-۱۴: نمودار اثر متقابل بین میزان مصرف کلکتور و زمان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب هنگامی که سایر

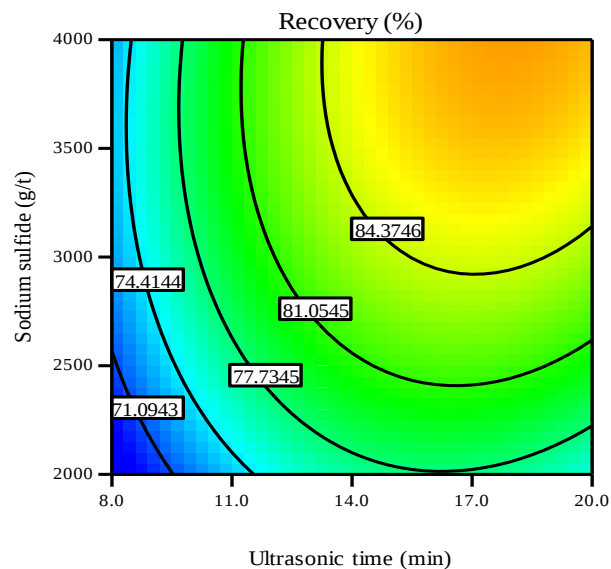
پارامترها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود و فرکانس بر روی ۳۷ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده‌اند.

۴-۳-۵ اثر همزمان زمان فراصوت و مقدار سولفید سدیم بر بازیابی سرب

مطابق شکل ۴-۱۵ و ۴-۱۶، با افزایش زمان فراصوت در هر دو مقادیر پایین و بالای سولفید سدیم میزان بازیابی سرب ابتدا افزایش می‌یابد تا به یک مقدار بیشینه‌ای می‌رسد، سپس با افزایش بیشتر تقریباً روند کاهشی می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که ارتعاش‌های ناشی از امواج اولتراسونیک تا یک مدت زمان مشخصی موجب جذب شیمیایی راحت‌تر یون سولفید بر روی سطح ذره و آگریزتر شدن ذرات و در نتیجه افزایش انتقال این ذرات از فاز پالپ به کف و همچنین افزایش تمایل این ذرات به انتقال بر روی سطح حبابها می‌شود. بنابراین در این حالت مقدار بازیابی افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش بیشتر مدت زمان اولتراسونیک همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، ممکن است که از سطح تحمل مکانیکی تعدادی از حبابها بیشتر باشد و تعدادی از حبابها از بین روند و میزان آن‌ها در فاز کف کاهش یابد و در نتیجه میزان بازیابی کاهش یابد.



(ب)



(الف)

شکل ۴-۱۵: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده اثر میزان مصرف سولفید سدیم و زمان فراصوت بر فلوتاسیون سرب.

Design-Expert® Software

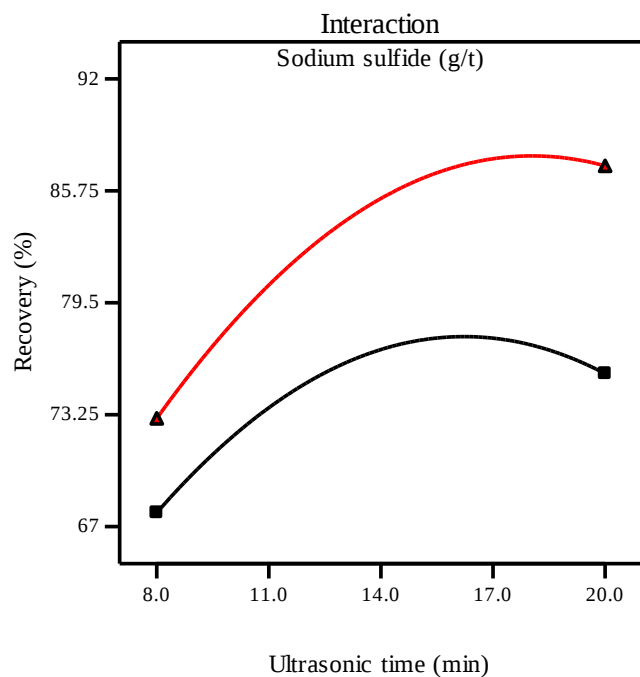
Recovery (%)

■ D- 2000.000
▲ D+ 4000.000

X1 = B: Ultrasonic time (min)
X2 = D: Sodium sulfide (g/t)

Actual Factors

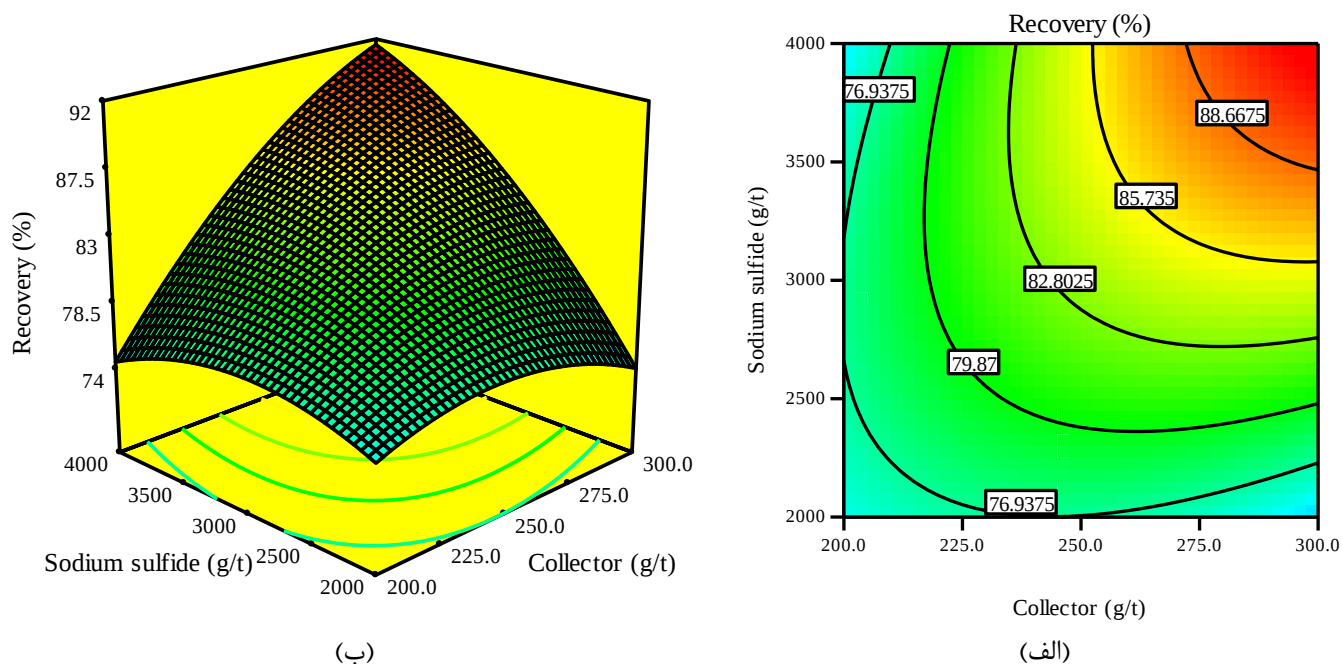
A: Ultrasonic power = 55
C: Collector (g/t) = 250.0
E: Frother (g/t) = 15.00
F: Frequency (kHz) = 37



شکل ۴-۱۶: نمودار اثر متقابل بین میزان مصرف سولفید سدیم و زمان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب هنگامی که سایر پارامترها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود و فرکانس بر روی ۳۷ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده‌اند.

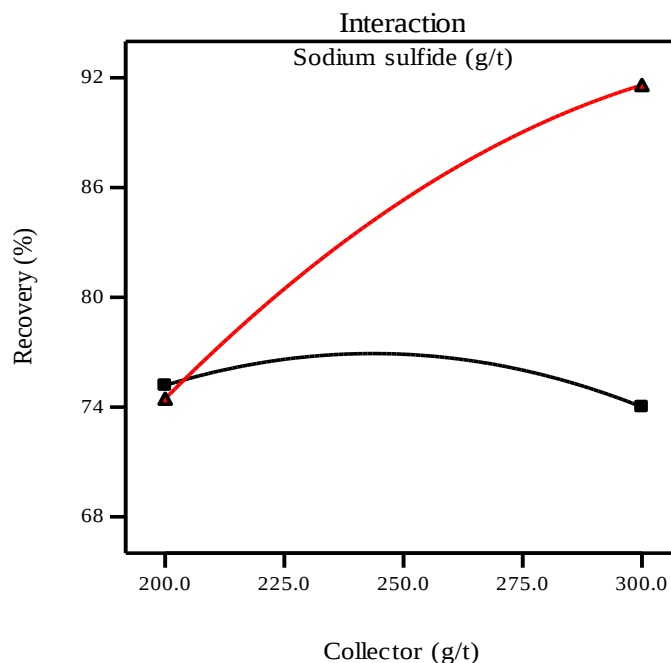
۴-۳-۶- اثر همزمان کلکتور و سولفید سدیم بر بازیابی سرب

همان‌طور که در شکل‌های ۴-۱۷ و ۴-۱۸ مشاهده می‌شود، در مقادیر پایین سولفید سدیم (۲۰۰۰ گرم بر تن) با افزایش میزان کلکتور مقدار بازیابی تا حد مشخصی ثابت و پس از آن روند کاهشی پیدا می‌کند. این امر نشان می‌دهد که سطح کانی‌ها به اندازه کافی برای جذب کلکتور، سولفیدی نشده‌اند. اما هنگامی که ۴۰۰۰ گرم بر تن سولفید سدیم استفاده می‌شود، با افزایش میزان کلکتور مقدار بازیابی افزایش می‌یابد. به طور کلی برای اینکه سولفور نقش فعال‌سازی سطح را به‌درستی ایفاء کند، میزان مصرف آن باید به‌اندازه‌ای باشد که فقط لایه‌ای در سطح کانی تشکیل شود و مصرف بیش‌ازحد آن ممکن است باعث بازداشت برخی از کانی‌های بالارزش گردد. این رفتار نشان می‌دهد که میزان ۴۰۰۰ گرم بر تن سولفور مقدار مناسبی برای فعال‌سازی سطح است. روندهای مشابه از رفتار پارامترهای موثر بر فلوتاسیون سرب برای حالتی که فرکانس دستگاه اولتراسونیک در مقدار ۳۷ کیلوهرتز تنظیم می‌شد و نتایج آن در بالا نمایش داده شده است، برای نتایج فرکانس بالا (۸۰ کیلوهرتز) نیز مشاهد گردید که برای نمونه دو مورد در شکل‌های ۴-۱۹ و ۴-۲۰ آورده شده‌اند.



شکل ۴-۱۷: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده اثر میزان مصرف سولفید سدیم و کلکتور بر فلوتاسیون سرب.

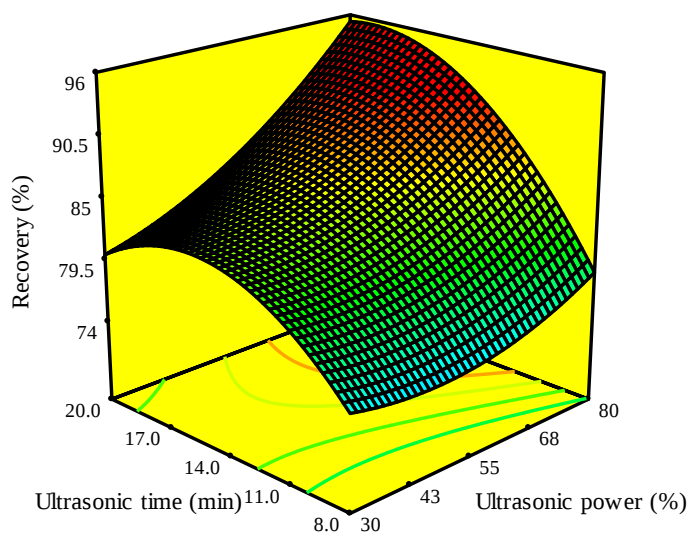
Design-Expert® Software
 Recovery (%)
 ■ D- 2000.000
 ▲ D+ 4000.000
 X1 = C: Collector (g/t)
 X2 = D: Sodiumsulfide (g/t)
 Actual Factors
 A: Ultrasonic power = 55
 B: Ultrasonic time (min) = 14.0
 E: Frother (g/t) = 15.00
 F: Frequency (kHz) = 37



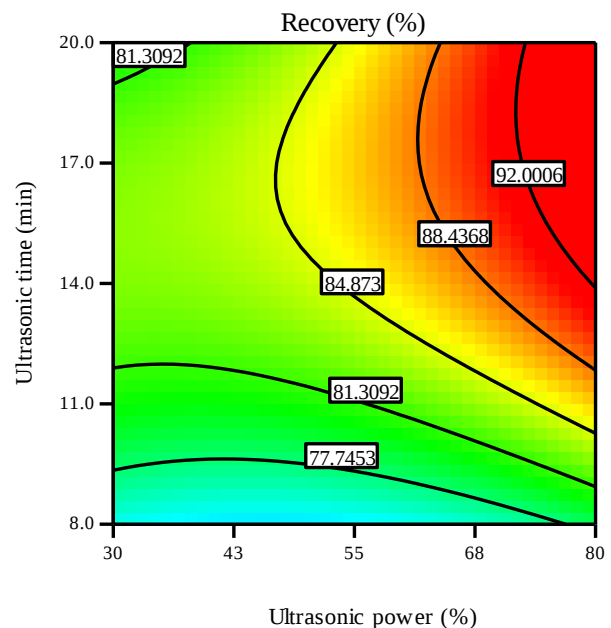
شکل ۴-۱۸: نمودار اثر متقابل بین میزان مصرف سولفید سدیم و کلکتور بر بازیابی فلوتاسیون سرب هنگامی که سایر پارامترها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود و فرکانس بر روی ۳۷ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده‌اند.

۴-۳-۷- اثر متقابل توان و زمان فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب

شکل ۴-۱۹ اثر همزمان توان و زمان فراصوت را بر بازیابی فلوتاسیون سرب هنگامی فرکانس فراصوت در ۸۰ کیلوهرتز تنظیم می‌شد، نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴-۱۹ مشاهده می‌شود، مشابه نتایج برای فرکانس ۳۷ کیلوهرتز، در زمان‌های پایین فراصوت با افزایش توان مقدار بازیابی با شیب بسیار ملایم در حال افزایش است. درحالی‌که در توان‌های فراصوت بالا با افزایش زمان بازیابی افزایش می‌یابد تا به یک مقدار حداکثری برسد، سپس با گذشت زمان‌های بیشتر، بازیابی روند کاهشی پیدا می‌کند که دلیل این کاهش بازیابی فشار بیشتر از آستانه تحمل حباب‌ها است که باعث ترکیدن آن‌ها و عدم رسیدن به سطح پالپ می‌باشد.



(ب)

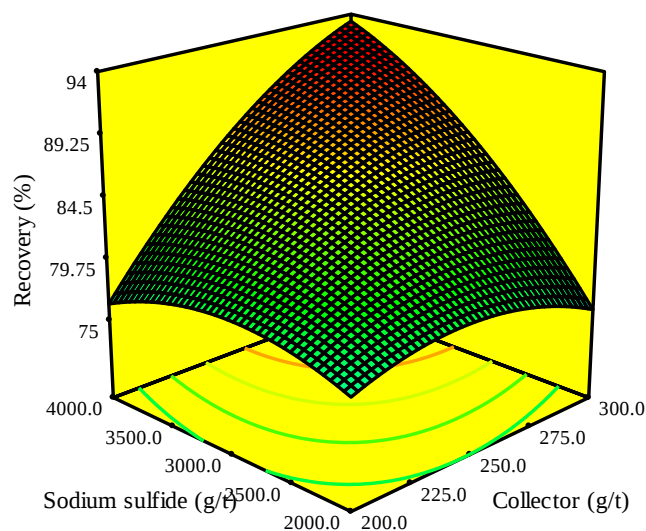


(الف)

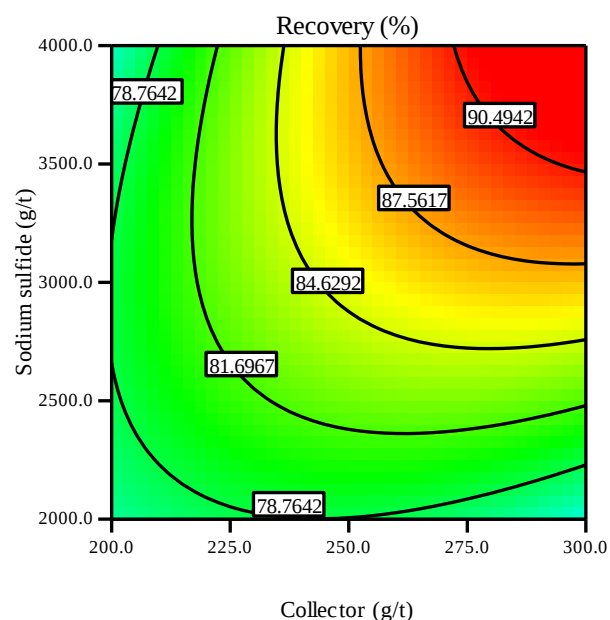
شکل ۴-۱۹: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده‌ی اثر توان و زمان فراصوت بر فلوتاسیون سرب هنگامی که که سایر پارامترها در سطح مرکزی خود (میزان کلکتور: ۲۵۰ گرم بر تن، مقدار سولفید سدیم: ۳۰۰۰ گرم بر تن و میزان کف‌ساز: ۱۵ گرم بر تن) و فرکانس بر روی ۸۰ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده است.

۴-۳-۸- اثر متقابل مقادیر کلکتور و سولفید سدیم بر بازیابی فلوتاسیون سرب

شکل ۴-۲۰ اثر متقابل کلکتور و سولفید سدیم را برای فرکانس فراصوت ۸۰ کیلوهرتز نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴-۲۰ و مشابه نتایج ۳۷ کیلوهرتز، در مقادیر پایین هر دو پارامتر میزان کلکتور و سولفید سدیم بازیابی تغییر معناداری نمی‌کند. اما در مقادیر بالای سولفید سدیم با افزایش مقدار کلکتور بازیابی افزایش پیدا می‌کند. در ضمن برای فرکانس ۸۰ کیلوهرتز در مقایسه با فرکانس ۳۷ کیلوهرتز مقادیر بالاتری از بازیابی بدست می‌آید. دلیل این افزایش امواج فراصوت دارای خواص جهت‌دار هستند و هر چه فرکانس بیشتر باشد، این امواج جهت‌دارتر خواهند بود که با تاثیر روی ذرات به یکنواخت شدن محلول کمک می‌کنند.



(ب)

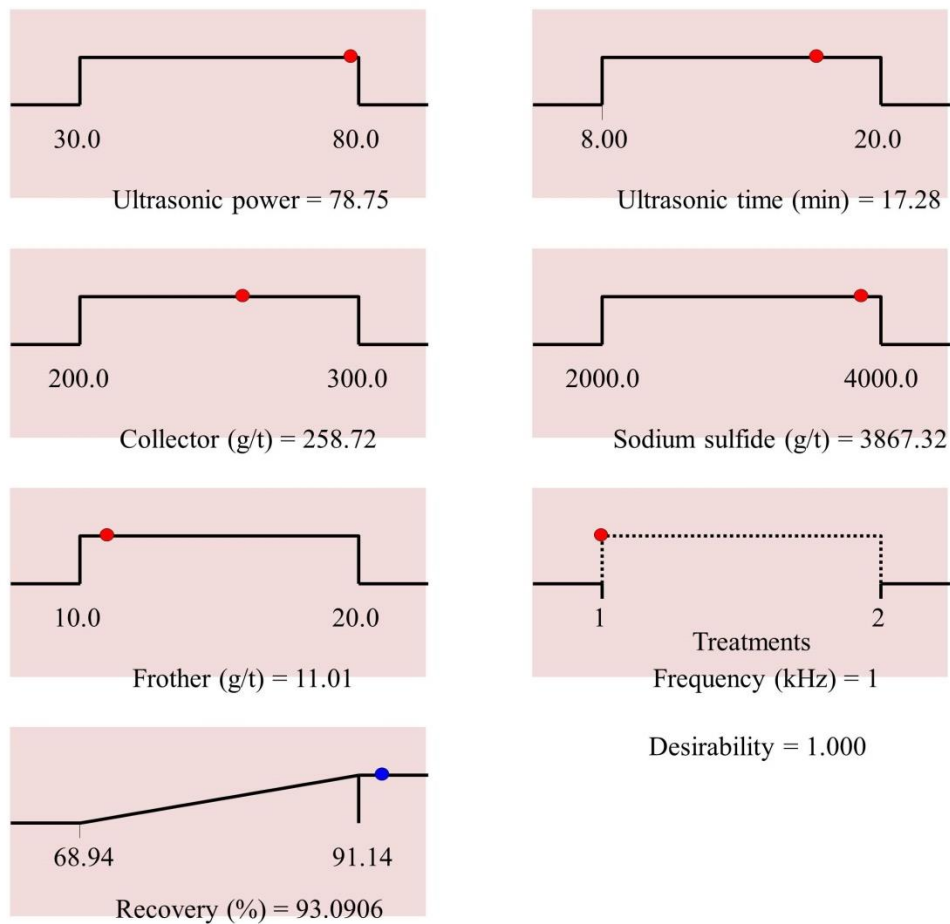


(الف)

شکل ۴-۲۰: منحنی‌های تراز (الف) و نمودار سطح پاسخ سه‌بعدی (ب) نشان‌دهنده اثر میزان مصرف سولفید سدیم و کلکتور بر فلوتاسیون سرب هنگامی که سایر پارامترها در سطح مرکزی خود (توان فراصوت: ۵۵٪، زمان فراصوت: ۱۴ دقیقه و مقدار کف‌ساز: ۱۵ گرم بر تن) و فرکانس بر روی ۸۰ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شده است.

۴-۴- بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر فلوتاسیون فراصوت سرب

یکی دیگر از اهداف این پژوهش، تعیین شرایط مطلوب پارامترهای تاثیرگذار بر فلوتاسیون فراصوت سرب بود. بدین منظور بهینه‌سازی فرآیند با استفاده از نرم افزار Design Expert با هدف اینکه بازه سطوح پارامترهای مورد نظر در چه مقداری تنظیم شود تا بیشینه بازیابی بدست آید، انجام شد. شرایط بهینه‌ی پیشنهادی پارامترهای موثر در شکل ۴-۲۱ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین بازیابی سرب حدود ۹۳ درصد تحت شرایط بهینه شامل توان فراصوت ۷۸/۷۵ درصد کیلووات، زمان فراصوت ۱۷ دقیقه و ۲۸ ثانیه، مقدار کلکتور ۲۵۹ گرم بر تن، مقدار سولفید سدیم ۳۸۶۷ گرم بر تن، مقدار کف‌ساز ۱۱ گرم بر تن و مقدار فرکانس ۳۷ کیلوهرتز (سطح ۱) بدست آورده شد. علاوه بر این، برای اعتبار نتایج بدست آمده، دو آزمایش تحت شرایط بهینه پیشنهادی نرم‌افزار (توان فراصوت: ۸۰ کیلو وات، زمان فراصوت ۱۷ دقیقه، مقدار کلکتور ۲۵۹ گرم بر تن، مقدار سولفید سدیم ۳۸۶۷ گرم بر تن، مقدار کف‌ساز ۱۱ گرم بر تن و مقدار فرکانس ۳۷ کیلوهرتز) انجام شد و متوسط بازیابی حدود ۹۱/۸۵ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی اعتبار مدل و شرایط بهینه پیشنهادی است.



شکل ۴-۲۱: سطوح بهینه‌ی پیشنهادی برای پارامترهای مهم تاثیرگذار بر فلوتاسیون سرب با فراصوت.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تاثیر فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون نمونه خاک کربناته سرب کارخانه باما اصفهان بوده است. در این پژوهش طراحی آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار Design Expert و براساس روش سطح پاسخ انجام گرفت و تمامی پارامترهای تاثیرگذار مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفتند. بدین منظور آزمایش‌های مختلفی تعریف و انجام شد که در ادامه نتایج حاصل از این آزمایش‌ها بیان شده است. با توجه به فعالیت‌های انجام شده و مطالعات صورت گرفته در این زمینه در پایان این فصل پیشنهاداتی نیز ارائه گردید.

۵-۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

✓ مدل‌سازی آماری به منظور بررسی رفتار فلوتاسیون فراصوت کانه سرب کربناته و ارتباط پارامترهای مهم تاثیرگذار با بازیابی سرب به عنوان شاخص کارایی متالورژیکی فرآیند با استفاده از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی انجام شد و یک مدل ریاضی درجه دوم با میزان R^2 حدود ۹۳/۳۹ برای برازش بر داده‌های آزمایشگاهی پیشنهاد شد.

✓ مدل نهایی برازش شده بر روی داده‌های آزمایشگاهی بعد از حذف پارامترهای غیر مهم برای تخمین بازیابی فلوتاسیون سرب (R) بر اساس مقادیر کد به صورت زیر بود.

$$R = 84.27 + 4.66 \times A + 5.47 \times B + 3.99 \times C + 4.22 \times D + 8.35 \times E + 0.91 \times F + 2.97 \times A \times B + 5.94 \times A \times C + 4.14 \times A \times D + 4.12 \times B \times C + 1.58 \times B \times D + 4.58 \times C \times D + 2.31 \times A^2 - 5.23 B^2 - 2.29 \times C^2 - 2.26 \times D^2 - 2.98 \times E^2$$

✓ نتایج آنالیز واریانس و نمودارهای آشفتگی نشان داد که از میان پارامترهای موثر بیشترین تاثیرگذاری فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب را مقدار کف‌ساز و زمان و توان فراصوت دارند.

✓ پارامترها در هر دو فرکانس ۳۷ و ۸۰ کیلو هرتز رفتار مشابهی داشتند و نتایج نشان داد که بازیابی سرب با افزایش توان و زمان فراصوت بهبود می‌یابد. همچنین بازیابی با افزایش میزان مصرف مواد

شیمیایی شامل کلکتور، کف‌ساز و سولفید سدیم در محدوده مورد بررسی تا یک مقدار مشخصی افزایش می‌یابد و پس از آن تقریباً ثابت می‌ماند و یا حتی با یک شیب ملایمی روند کاهشی پیدا می‌کند.

✓ از منحنی‌های تراز و نمودارهای سه بعدی و اثرات متقابل برای درک بهتر رفتار پارامترها استفاده شد و یافته‌ها نشان داد که فرآیند فلوتاسیون فراصوت سرب به شدت به اثر متقابل بین پارامترها وابسته است و اثر متقابل توان فراصوت با میزان مصرف کلکتور بیشترین تاثیر را بر بازیابی فلوتاسیون فراصوت دارد.

✓ نتایج همچنین نشان داد هنگامی که میزان مصرف کلکتور ۲۰۰ گرم بر تن بود، افزایش توان فراصوت نقش مثبتی در افزایش میزان بازیابی سرب نداشت و حتی سبب کاهش بازیابی شد. درحالی که در مقادیر بیشتر (۳۰۰ گرم بر تن) کلکتور، افزایش توان فراصوت موجب بهبود بازیابی شد. رفتار مشابهی برای میزان مصرف سولفید سدیم نیز مشاهد گردید. در مقادیر پایین سولفید سدیم، بازیابی سرب با افزایش توان فراصوت تغییر چندانی پیدا نکرد، اما زمانی که ۴۰۰ گرم بر تن سولفید سدیم به سیستم اضافه شد، بازیابی با افزایش توان دستگاه فراصوت افزایش یافت و به مقدار ۹۳٪ رسید که نشان از اثر مثبت افزایش همزمان سولفید سدیم و توان اولتراسونیک بود.

✓ بهینه‌سازی فرآیند فلوتاسیون فراصوت سرب انجام شد و مقادیر بهینه پیشنهادی برای پارامترها تقریباً به شرح ذیل بود: توان فراصوت ۷۸/۷۵ درصد کیلووات، زمان فراصوت ۱۷/۲۸ دقیقه، مقدار کلکتور ۲۵۹ گرم بر تن، مقدار سولفید سدیم ۳۸۶۷ گرم بر تن، مقدار کف‌ساز ۱۱ گرم بر تن و مقدار فرکانس ۳۷ کیلوهرتز (سطح ۱). تحت این شرایط میزان بازیابی حدود ۹۳ درصد بود.

۵-۳-پیشنهادهای

✓ بدلیل اثرگذاری مثبت فراصوت بر بازیابی فلوتاسیون سرب پیشنهاد می‌شود که استفاده از فراصوت در مقیاس پایلوت نیز مورد بررسی قرار گیرد.

✓ در این پژوهش فقط تاثیر فراصوت بر روی فلوتاسیون سرب و بصورت اکسیدی مورد بررسی قرار گرفت پیشنهاد می‌شود بر روی فلزات دیگر نیز مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

رضوانی ن.، بررسی تأثیر امواج مافوق صوت بر فلوتاسیون زغالسنگ البرزشرقی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود (۱۳۹۵).

عطرفی آ.، حجت الاسلامی ه.، نوع پرست م.، شفائی ض.، قربانی ع.، جوزانی کهن گ.، مطالعه و بررسی پریعارسازی کانسنگ سولفیدی-اکسیدی سرب کم عیار به روش های فلوتاسیون و ثقلی، مجله مهندسی معدن، دوره ۴، شماره ۸، صفحه ۳۹-۴۹ (۱۳۸۸).

غلامی ح.، سجادی س ع.، آقایی م.، امینی س.، بهبود جدایش انتخابی و بازدهی فرآیند فلوتاسیون از طریق اعمال امواج فراصوت، هشتمین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی مهندسی مواد و متالورژی و سیزدهمین همایش ملی مشترک انجمن مهندسی متالورژی و مواد ایران و انجمن ریخته گری ایران، تهران (۱۳۹۸).

کامیابی م.، جواهری ا.، بررسی بنیادین صنعت سرب و روی ایران و جهان و شرکت کیمیای زنجان گستر، تحلیل جامعه صنعت سرب و روی، شرکت مشاور سرمایه گذاری ابنسینا مدبر (اماکو) (۱۳۹۴).

کمانگر ک.، استفاده از امواج فراصوت در فرایند خاکستر زدایی قیر طبیعی با استفاده از فلوتاسیون ستونی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی (۱۳۹۴).

معمدی زاده م.، بررسی امکان بازیابی هیدرومتالورژیکی سرب از پسماند لیچینگ کارخانه تولید روی بندرعباس و ترسیب آن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود (۱۳۹۸).

Albrecht T. W. J., Addai-Mensah J., Fornasiero D., Critical copper concentration in sphalerite flotation: Effect of temperature and collector. International Journal of Mineral Processing, 146, 15-22 (2016).

Aldrich C., Feng D., Effect of ultrasonic preconditioning of pulp on the flotation of sulphide ores, Minerals Engineering 12, 701-707 (1999).

- Bezera M. A., Santelli R. E., Oliveira E. P., Villar L. S., Escaleira L. A., Review response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry, *Talanta*, 76, 5, 965-977 (2008).
- Cao Q., Cheng J., Feng Q., Wen S., Luo B., Surface cleaning and oxidative effects of ultrasonication on the flotation of oxidized pyrite, *Powder Technology* 311, 390–397 (2017).
- Fosu S., Pring A., Skinner W., Zanin M., Characterisation of coarse composite sphalerite particles with respect to flotation, *Minerals Engineering*, 71, 105-112 (2015).
- Ghadyani A., Noaparast M., Shafaei Tonkaboni S.Z., A study on the effects of ultrasonic irradiation as pretreatment method on high-ash coal flotation and kinetics, *International Journal of Coal Preparation and Utilization* 38, 374–391 (2018).
- Gungoren C., Baktarhan Y., Demir I., Ozkan S.G, Enhancement of galena-potassium ethyl xanthate flotation system by low power ultrasound, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 30, 1102-1110 (2020).
- Hassani F., Noaparast M., Shafaei Tonkaboni S.Z., Enhancement of Phosphate Flotation by Ultrasonic Pretreatment, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering* 38(5), 251-266 (2019).
- Hassanzadeh A., Sajjady S.A., Gholami H., Amini S and Gökhan Özkan, An Improvement on Selective Separation by Applying Ultrasound to Rougher and Re-Cleaner Stages of Copper Flotation, *Minerals* 10(7), 619 (2020).
- Jin L., Wang W., Tu Y., Zhang K., Lv Z., Effect of ultrasonic standing waves on flotation bubbles, *Ultrasonics Sonochemistry*, 73, 105459 (2021).
- Kang W., Xun H., Chen J., Study of enhanced fine coal desulphurization and de-ashing by ultrasonic flotation, *Journal of China University of Mining and Technology* 17(3), 0358-0362 (2007).
- Kang W., Xun H., Hu J., Study of the effect of ultrasonic treatment on the surface composition and the flotation performance of high-sulfur coal, *Fuel Processing Technology*, 89 1337–1344 (2008).

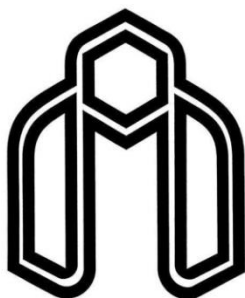
- Kang W., Xun H., Kong X., Li M., Effects from changes in pulp nature after ultrasonic conditioning on high-sulfur coal flotation, *Mining Science and Technology* 19, 0498-0502 (2009).
- Kursun H., A Study on the utilization of ultrasonic pretreatment in zinc flotation, *Separation Science and Technology* 49(18), 2975-2980 (2014).
- Kursun H., Ulusoy U., Zinc recovery from a lead–zinc–copper ore by ultrasonically assisted column flotation, *Particulate Science and Technology* 33(4), 349-356 (2015).
- Mao Y., Xia W., Peng Y., Xie G., Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review, *Fuel Processing Technology* 195, 106150 (2019).
- Montgomery D. C., *Design and Analysis of Experiments*, New York: John Wiley & Sons (2001).
- Moradi S., Monhemius A. J., Mixed sulphide–oxide lead and zinc ores: Problems and solutions, *Minerals Engineering*, 24, 1062–1076 (2011).
- Myers R. H., Montgomery D. C., *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, 2nd Ed. John Wiley & Sons, New York (2002).
- Ozkan S. G., Effects of simultaneous ultrasonic treatment on flotation of hard coal slimes, *Fuel Processing Technology* 93, 576–580 (2012).
- Ozkan S.G., Kuyumcu H. Z., Design of a flotation cell equipped with ultrasound transducers to enhance coal flotation, *Ultrasonics Sonochemistry* 14, 639-645 (2007).
- Ozkan S.G., Kuyumcu H.Z., Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation, *International Journal of Mineral Processing*, 8, 201–203 (2006).
- Peng Y., Mao Y., Xia W., Li Y., Ultrasonic flotation cleaning of high-ash lignite and its mechanism, *Fuel* 220, 558–566 (2018).
- Qian W. E. I., Fen J. I. A. O., Dong L. Y., Liu X. D., Qin W. Q., Selective depression of copper-activated sphalerite by polyaspartic acid during chalcopyrite flotation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(6), 1784-1795 (2021).
- Sahinoglu E., Uslu T., Increasing coal quality by oil agglomeration after ultrasonic treatment, *Fuel Processing Technology* 116, 332-338 (2013).

- Shu K., Xu L., Wu H., Fang S., Wang Z., Xu Y., Zhang Z., Effects of ultrasonic pre-treatment on the flotation of ilmenite and collector adsorption, *Minerals Engineering* 137, 124–132 (2019).
- Vasseghian Y., Ahmadi M., Joshaghani M., Ultrasound assisted ash and sulphur removal from bitumen using column flotation technique: experimental, RSM and ANN methods in modeling and optimization of process, *Iranian Journal of Science Technology. Transactions A: Science*, 1, 1-15 (2016).
- Videla A. R., Morales R., Saint-Jean T., Gaete L., Vargas Y., Miller J. D., Ultrasound treatment on tailings to enhance copper flotation recovery, *Minerals Engineering* 99, 89–95 (2016).
- Wang J., Xie L., Liu Q., Zeng H., Effects of salinity on xanthate adsorption on sphalerite and bubble–sphalerite interactions. *Minerals Engineering* 77, 34-41 (2015).
- Xu M., Xing Y., Gui X., Cao Y., Wang D., Wang L., Effect of ultrasonic pretreatment on oxidized coal flotation, *Energy & Fuels*, 31, 14367–14373 (2017).

ABSTRACT

Ultrasonic waves are an advanced oxidation process that can have a significant effect on flotation efficiency by changing the nature of the pulp surface and the surface of mineral particles. Hence, in this research, the influence of ultrasonic was investigated on flotation efficiency of Bama carbonate soil sample. In this regard, response surface methodology was used to design the experiments and to investigate the behavior of effective important parameters such as ultrasonic frequency, time and power and consumption value of reagents including collector, sodium sulfide and frother. The results indicated that parameters had a similar behavior at both frequency of 37 and 80 kHz and the value of recovery increased with increasing ultrasonic time and power. Also, the increase of the dose of collector, frother and sodium sulfide up to a certain value had the positive effect on the improvement of recovery. In addition, among parameters, the consumption of frother, ultrasonic time and the interactive effect of ultrasonic power with the amount of collector had the greatest influence on lead flotation recovery. Optimization of lead ultrasonic flotation was performed and the maximum efficiency rate (about 92%) was obtained under desirable conditions of parameters including ultrasonic time of 17 minutes, ultrasonic device power of 80% (1 kW), collector dose of 259 g/ton, sodium sulfide dose of 3867 g/ton, frother dose of 11 g/ton and frequency of 37 kHz.

Keywords: Flotation, lead carbonate, recovery, ultrasonic waves, Response surface methodology.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Oil and Geophysics

**An investigation into the influence of ultrasonic waves on the
efficiency of lead flotation, case study: Bama carbonate soil sample**

Supervisor:

Dr. Asghar Azizi

By: Mojtaba Rostami khajelangi

December 2021