

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد فراوری مواد معدنی

بررسی تاثیرات نرمه‌ها بر فلوتاسیون مس سولفیدی و امکان‌سنجی
فراوری نرمه‌ها با بکارگیری نانو حباب‌های پایدار

نگارنده:

علی نیکوئی ماهانی

اساتید راهنما:

دکتر محمد کارآموزیان

دکتر محمد جهانی چگنی

مهر ۱۴۰۰

شماره: ۴۰۰/۴۲۱۴۳
تاریخ: ۱۴۰۹
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 خانم / آقای علی نیکوئی ماهانی با شماره دانشجویی ۹۸۱۲۸۰۴ رشته مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی تحت عنوان بررسی تأثیرات نرمة‌ها بر فلوتاسیون مس سولفیدی و امکان‌سنجی فرآوری نرمة‌ها با بکارگیری نانو حباب‌های پایدار که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۶ 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 ۱۸/۹۹ - ۱۸ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹ - ۱۶ ☐ (د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹ - ۱۴ ☐
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 محمد کاراموزیان	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمد جهانی	استادیار	
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- استاد داور اول	دکتر اصغر عزیزی	دانشیار	
۵- استاد داور دوم	دکتر کیومرث سیف پناهی	دانشیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر رامین رفیعی	استادیار	

نام و نام خانوادگی دانشجو:

مهر دانشجو:



تقدیم به دو دوست واقعی و همراه همیشگی زندگی ام که همیشه و همه جا پشتیبانم
هستند.

(پدر صبورم)

(مادر مهربانم)

تقدیر و تشکر

از استادان گرامی و عزیزم آقایان دکتر محمد کارآموزیان و دکتر محمد جهانی چگنی بسیار سپاسگزارم چرا که بدون راهنمایی‌های بی دریغ و بی شائبه ایشان انجام این پایان‌نامه امکان‌پذیر نبود.

همچنین از رئیس مرکز فرآوری مواد تحقیق و توسعه سرچشمه جناب آقای مهندس محمدرضا یاراحمدی و نیز رئیس مرکز تحقیقات معدنی، تحقیق و توسعه سرچشمه جناب آقای مهندس سید مصطفی حسینی روح الامینی کمال تشکر و قدردانی را بابت همکاری‌هایشان و همچنین مشاوره‌هایشان دارم.

همچنین از مشاور صنعتی عزیزم جناب آقای مهندس محمد محمودی میمند کمال تشکر و قدردانی را دارم. بنده را در انجام این پایان‌نامه راهنمایی کردند. ضمناً از مهندسین و افراد عزیز کارخانه پایلوت و تغلیظ: آقایان، مهندس محمدرضا کرمانیان، مهندس ابوالفضل حیدری فر، مهندس جواد علی بیگی، حسین نوروزی، سلمان صاحبی، محمد عنایت‌پور، مهندس بهروز مقصودی و از دوستان عزیزم که عبارتند از: مهندس فرشاد محمدی انائی، مهندس حسین حسینی پور، مهندس حسین منظری توکلی، مهندس امین محبانی، مهندس مهدیه صبوری حسن آباد، دکتر حمیده افخمی اردکانی، مهندس امید حردانی، مهندس حسین ارشد، مهندس سجاد مولایوسفی کاظم آباد، مهندس مجتبی رستمی کمال تشکر و قدردانی و توفیق روزافزون را دارم.

در آخر از دکتر ساغروانی بابت کمک در تهیه محلول نانوحباب کمال تشکر را دارم.

تهدنامه

اینجانب علی نیکوئی ماهانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فرآوری مواد معدنی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تأثیرات نرمه ها بر فلوتاسیون مس سولفیدی و امکان سنجی فرآوری نرمه ها با بکارگیری نانو حباب های پلیدار تحت راهنمایی دکتر محمد کارآموزیان و دکتر محمد جهانی چگنی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

فلوتاسیون یکی از مهم‌ترین فرآیندهای متداول جهت جداسازی کانی‌های با ارزش از زمینه باطله است. اندازه ذرات نقش بسزایی در این فرایند دارد. مشکلی که امروزه این فرایند با آن روبه‌رو است، ذرات درشت و ذرات نرمه هستند، که باعث می‌شوند کارایی مناسب به وجود نیاید. تاکنون تحقیقات بسیار زیادی در زمینه ذرات درشت و ذرات نرمه با حضور حباب‌های معمولی انجام شده است. مشکلاتی که در مورد ذرات نرمه وجود دارند عبارتند از: سینتیک فلوتاسیون آن‌ها آهسته‌تر و کارایی برخورد این ذرات پایین‌تر است. در این پایان‌نامه تاثیر نانوحباب‌های پایدار که می‌توانند برای مدت طولانی پایداری خود را حفظ کنند، بازیابی ذرات نرمه و ذرات درشت بررسی شده است. نانوحباب‌های پایدار می‌توانند، آبرانی ذرات را افزایش دهند، که این امر باعث افزایش احتمال اتصال حباب - ذره و کاهش، احتمال انفصال شود. در این پایان‌نامه، تمرکز بر افزایش بازیابی و کاهش مصرف مواد شیمیایی است. پس از تهیه نمونه از انبار نرمه تغلیظ یک مجتمع مس سرچشمه و انجام مراحل خردایش، نمونه‌ی معرفی که آماده شد برای انجام آنالیزهای شیمیایی (XRF, XRD) و کانی‌شناسی فرستاده شد. با طراحی ۵۰ آزمایش توسط نرم‌افزار DX13، تاثیرات مقدار مصرف کلکتور، کف‌ساز، pH، اندازه ذرات و درصد جامد بررسی شدند، ۲۵ آزمایش با فلوتاسیون معمولی و ۲۵ آزمایش تحت تاثیر نانوحباب‌ها انجام شدند. پس از انجام آنالیزها و مقایسه تاثیر متقابل آن‌ها با هم، نتایج نشان داد که بازیابی و عیار مس در حضور نانوحباب‌ها به ترتیب حدود ۵/۷۴ و ۳۵ درصد افزایش یافته است. همچنین کاهش ۵۰ درصدی کلکتور و ۶۶ درصدی کف‌ساز در حضور نانوحباب مشاهده شد.

کلمات کلیدی: نانوحباب پایدار، ذرات نرمه، افزایش بازیابی، کاهش مصرف مواد، مجتمع مس سرچشمه

فهرست مطالب

۱	فصل اول کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- معرفی مدار پریارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه
۳	۳-۱- فلوتاسیون
۵	۱-۳-۱- فلوتاسیون ذرات نرمه و درشت
۶	۲-۳-۱- رفتار ذرات نرمه
۷	۴-۱- نانوحباب
۸	۱-۴-۱- کاربردهای نانوحباب
۹	۵-۱- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق
۱۲	۶-۱- اهداف تحقیق
۱۲	۷-۱- ساختار پایان نامه
۱۳	فصل دوم مروری بر تحقیقات گذشته
۱۴	۱-۲- مروری بر تحقیقات گذشته
۲۷	فصل سوم روش تحقیق
۲۸	۱-۳- مقدمه
۲۸	۲-۳- لیست تجهیزات مورد استفاده
۲۹	۳-۳- تهیه و عملیات آماده سازی نمونه
۲۹	۱-۳-۳- آماده سازی نمونه
۳۱	۲-۳-۳- تست صحت تقسیم نمونه ها
۳۳	۳-۳-۳- محاسبه چگالی خاک جهت تعیین مقدار نمونه جامد داخل آسیا
۳۶	۴-۳- تعیین زمان بهینه خردایش
۳۸	۱-۴-۳- زمان بهینه ۱۱ میکرون با سیکلوسایزر
۴۱	۵-۳- آنالیز شیمیایی نمونه ها
۴۱	۱-۵-۳- آنالیز شیمیایی XRF
۴۱	۲-۵-۳- آنالیز شیمیایی XRD
۴۲	۳-۵-۳- تحلیل کانی شناسی
۴۳	۶-۳- بررسی نرمه ها در خط فرآوری تغلیظ ۱ مجتمع مس سرچشمه
۴۸	۷-۳- مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق
۴۸	۸-۳- شرایط ثابت آزمایشگاهی
۴۹	۹-۳- روش انجام آزمایش ها
۵۰	۱۰-۳- محلول نانوحباب
۵۰	۱-۱۰-۳- اندازه گیری ابعاد و توزیع نانوحباب ها
۵۳	۱۱-۳- طراحی آزمایش ها
۵۶	۱۲-۳- آزمایش فلوتاسیون

فصل چهارم نتایج و بحث	۵۹
۱-۴ مقدمه	۶۰
۲-۴ طراحی آزمایش‌ها	۶۰
۳-۴ انتخاب مدل مناسب برای بازیابی مس	۶۲
۴-۴ آنالیز واریانس برای بازیابی مس	۶۵
۵-۴ مشخصات آماری نتایج	۶۷
۶-۴ معادله ارائه شده برای بازیابی مس	۶۷
۷-۴ اعتبارسنجی مدل	۶۸
۸-۴ مقایسه تاثیر تمامی پارامترها بر بازیابی مس در عدم حضور و حضور نانوحباب	۷۰
۹-۴ تاثیر متقابل پارامترها	۷۱
۱-۹-۴ تاثیر همزمان کف‌ساز و کلکتور بر بازیابی در عدم حضور و حضور نانوحباب‌ها	۷۱
۲-۹-۴ تاثیر همزمان pH، کلکتور بر بازیابی مس در عدم حضور و حضور نانوحباب	۷۳
۳-۹-۴ تاثیر همزمان اندازه ذرات و کلکتور بر بازیابی در عدم حضور و حضور نانوحباب	۷۴
۴-۹-۴ تاثیر همزمان درصد جامد و کلکتور در عدم حضور و حضور نانوحباب	۷۵
۵-۹-۴ تاثیر کلکتور بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب	۷۷
۶-۹-۴ تاثیر همزمان pH، کف‌ساز بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب‌ها	۷۷
۷-۹-۴ تاثیر همزمان کف‌ساز و اندازه ذرات در عدم حضور و حضور نانوحباب‌ها	۷۹
۸-۹-۴ تاثیر همزمان کف‌ساز و درصد جامد در عدم حضور نانوحباب‌ها	۸۰
۹-۹-۴ تاثیر همزمان اندازه ذرات و pH بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب	۸۲
۱۰-۹-۴ تاثیر همزمان pH و درصد جامد در عدم حضور و حضور نانو حباب	۸۳
۱۱-۹-۴ تاثیر همزمان اندازه ذرات و درصد جامد در عدم حضور و حضور نانوحباب	۸۵
۱۲-۹-۴ تاثیر درصد جامد بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب	۸۷
۱۰-۴ انتخاب مدل مناسب برای عیار مس	۸۸
۱۱-۴ آنالیز واریانس برای عیار مس	۹۰
۱۲-۴ مشخصات آماری نتایج	۹۱
۱۳-۴ معادله ارائه شده برای عیار مس	۹۲
۱۴-۴ نمودار مقادیر واقعی در مقابل پیش‌بینی شده	۹۳
۱۵-۴ نمودارهای سه‌بعدی عیار مس	۹۳
۱-۱۵-۴ تاثیر همزمان کلکتور و کف‌ساز بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب	۹۳
۲-۱۵-۴ تاثیر همزمان کلکتور و pH بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب	۹۴
۳-۱۵-۴ تاثیر همزمان کلکتور و اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب	۹۵
۴-۱۵-۴ تاثیر همزمان کلکتور و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب	۹۷
۵-۱۵-۴ تاثیر همزمان کف‌ساز و pH بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب	۹۸
۶-۱۵-۴ تاثیر همزمان کف‌ساز و اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب	۹۹
۷-۱۵-۴ تاثیر همزمان کف‌ساز و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب	۱۰۰
۸-۱۵-۴ تاثیر همزمان pH و اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب	۱۰۲

۹-۱۵-۴	تاثیر همزمان pH و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب	۱۰۳
۱۰-۱۵-۴	تاثیر همزمان اندازه ذرات و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب	۱۰۵
۱۶-۴	بهینه‌سازی	۱۰۷
۱۷-۴	یک بررسی ساده اقتصادی	۱۰۸
فصل پنجم	نتیجه‌گیری و پیشنهادها	۱۱۱
۱-۵	مقدمه	۱۱۲
۲-۵	نتایج	۱۱۲
۳-۵	پیشنهادهای	۱۱۴
منابع و مأخذ		۱۱۵

فهرست شکل‌ها

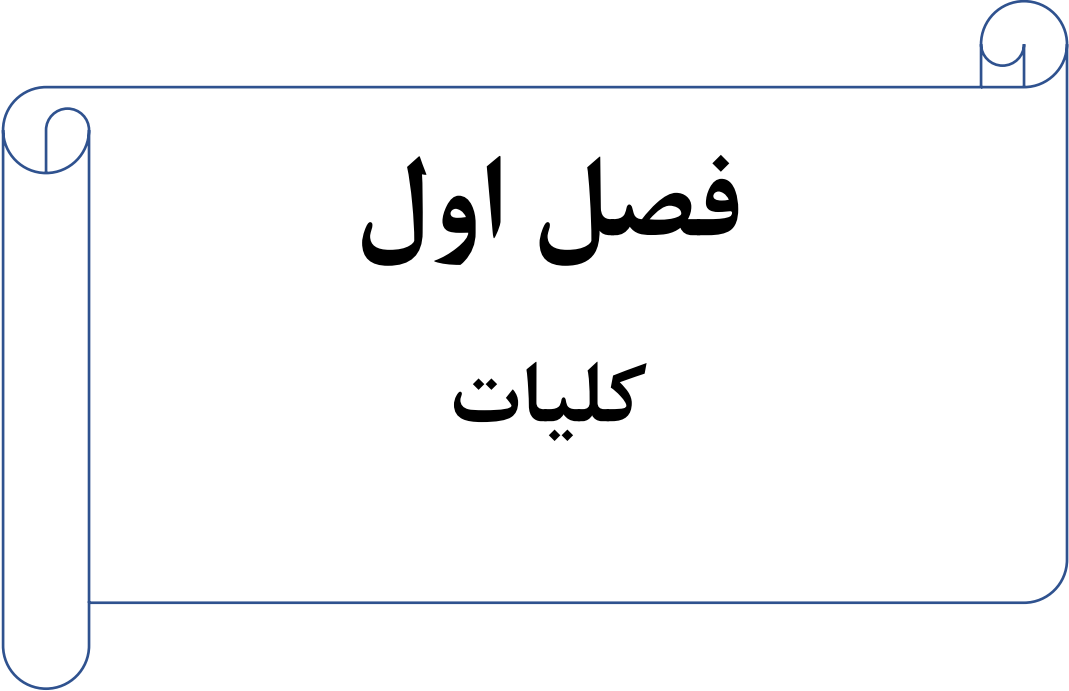
- شکل ۱-۱: مقایسه مقاومت حباب‌های معمولی با نانوحباب‌ها [۱۲] ----- ۸
- شکل ۱-۳: همگن کردن ۲۰۰ کیلوگرم نمونه ----- ۲۹
- شکل ۲-۳: نمونه‌های ۲۰۰ کیلوگرمی به صورت رندوم از زیر انبار نرمه تغلیظ ۱ ----- ۲۹
- شکل ۳-۳: سنگ‌شکن‌های فکی ثابت و متحرک ----- ۳۰
- شکل ۴-۳: سرند لرزان ۱۰ مش (۲MM) ----- ۳۰
- شکل ۵-۳: کل نمونه‌های ۲۰۰ کیلوگرمی تبدیل به ۱۰ مش (۲MM) ----- ۳۰
- شکل ۶-۳: تقسیم نمونه‌ها توسط ریفل به دو بخش مساوی ----- ۳۱
- شکل ۷-۳: تقسیم نمونه با تقسیم شانه‌ایی همچنین سری سرندي و لرزاننده ----- ۳۲
- شکل ۸-۳: دستگاه پولورایز برای پودر کردن نمونه‌ها ----- ۳۴
- شکل ۹-۳: نمایی از پیکنومتر ----- ۳۴
- شکل ۱۰-۳: تقسیم نمونه‌ها توسط تقسیم کننده مجرای جونز در پاکت ----- ۳۶
- شکل ۱۱-۳: مراحل مختلف آزمایشگاهی جهت بدست آوردن زمان بهینه خردایش ----- ۳۷
- شکل ۱۲-۳: زمان بهینه فراکسیون‌های ابعادی مختلف ----- ۳۸
- شکل ۱۳-۳: مراحل مختلف تست سیکلوسایزر برای دامنه ابعادی ۱۱ میکرون ----- ۳۹
- شکل ۱۴-۳: زمان بهینه فراکسیون ۱۱ میکرون ----- ۴۰
- شکل ۱۵-۳: ضلع شمال و جنوب سرریزهای هیدروسیکلون‌های اولیه تغلیظ ۱ ----- ۴۴
- شکل ۱۶-۳: مقدار مواد عبوری مشخص شده از ضلع شمال و جنوب سرریز هیدروسیکلون اولیه تغلیظ ۱ ----- ۴۴
- شکل ۱۷-۳: تغییر ابعاد نانوحباب‌ها در گذر زمان [۵۶] ----- ۵۱
- شکل ۱۸-۳: توزیع نانوحباب‌ها بر اساس شدت ----- ۵۲
- شکل ۱۹-۳: توزیع نانوحباب‌ها بر اساس حجم ----- ۵۲
- شکل ۲۰-۳: توزیع نانوحباب‌ها بر اساس تعداد ----- ۵۳
- شکل ۲۱-۳: درصد عبوری دامنه‌های ابعادی ضلع جنوب سرریز هیدروسیکلون اولیه تغلیظ ۱ ----- ۴۴
- شکل ۱-۴: نمودارهای آماری برای تحلیل صحت مدل پیشنهادی ----- ۶۹
- شکل ۲-۴: تاثیر پارامترها بر بازیابی مس در عدم حضور نانوحباب‌ها ----- ۷۰
- شکل ۳-۴: تاثیر تمامی پارامترها بر بازیابی مس در حضور نانوحباب‌ها ----- ۷۱
- شکل ۴-۴: تاثیر همزمان کفساز و کلکتور بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب ----- ۷۲
- شکل ۵-۴: تاثیر همزمان کفساز و کلکتور بر بازیابی در حضور نانوحباب ----- ۷۲
- شکل ۶-۴: تاثیر همزمان pH و کلکتور بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب ----- ۷۳
- شکل ۷-۴: تاثیر همزمان pH و کلکتور بر بازیابی در حضور نانوحباب ----- ۷۴
- شکل ۸-۴: تاثیر همزمان اندازه ذرات و کلکتور بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب ----- ۷۵
- شکل ۹-۴: تاثیر همزمان اندازه ذرات و کلکتور بر بازیابی در حضور نانوحباب ----- ۷۵
- شکل ۱۰-۴: تاثیر همزمان درصد جامد و کلکتور در عدم حضور نانوحباب ----- ۷۶
- شکل ۱۱-۴: تاثیر همزمان درصد جامد و کلکتور در حضور نانوحباب ----- ۷۶
- شکل ۱۲-۴: تاثیر کلکتور بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب ----- ۷۷

- شکل ۴-۱۳: تاثیر همزمان pH و کفساز بر بازیابی در عدم حضور نانوحبابها ----- ۷۸
- شکل ۴-۱۴: تاثیر همزمان pH و کفساز بر بازیابی در حضور نانوحبابها ----- ۷۸
- شکل ۴-۱۵: تاثیر همزمان کفساز و اندازه ذرات بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب ----- ۷۹
- شکل ۴-۱۶: تاثیر همزمان کفساز و اندازه ذرات بر بازیابی در حضور نانوحباب ----- ۸۰
- شکل ۴-۱۷: تاثیر همزمان کفساز و درصد جامد بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب ----- ۸۱
- شکل ۴-۱۸: تاثیر همزمان کفساز و درصد جامد بر بازیابی در حضور نانوحباب ----- ۸۱
- شکل ۴-۱۹: تاثیر کفساز بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب ----- ۸۲
- شکل ۴-۲۰: تاثیر همزمان اندازه ذرات و pH بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب ----- ۸۳
- شکل ۴-۲۱: تاثیر همزمان اندازه ذرات و pH بر بازیابی در حضور نانوحباب ----- ۸۳
- شکل ۴-۲۲: تاثیر همزمان pH و درصد جامد در عدم حضور نانوحباب ----- ۸۴
- شکل ۴-۲۳: تاثیر همزمان pH و درصد جامد در حضور نانوحباب ----- ۸۴
- شکل ۴-۲۴: تاثیر pH بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب ----- ۸۵
- شکل ۴-۲۵: تاثیر همزمان اندازه ذرات و درصد جامد در عدم حضور نانوحباب ----- ۸۶
- شکل ۴-۲۶: تاثیر همزمان اندازه ذرات و درصد جامد در حضور نانوحباب ----- ۸۶
- شکل ۲-۲۷: تاثیر اندازه ذرات بر بازیابی در عدم حضور و حضور نانوحباب ----- ۸۷
- شکل ۴-۲۸: تاثیر درصد جامد بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب ----- ۸۸
- شکل ۴-۲۹: نمودار مقادیر واقعی در مقابل پیش‌بینی‌شده ----- ۹۳
- شکل ۴-۳۰: تاثیر همزمان کلکتور و کفساز بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب ----- ۹۴
- شکل ۴-۳۱: تاثیر همزمان کلکتور و کفساز بر عیار مس در حضور نانوحباب ----- ۹۴
- شکل ۴-۳۲: تاثیر همزمان کلکتور و pH بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب ----- ۹۵
- شکل ۴-۳۳: تاثیر همزمان کلکتور و pH بر عیار مس در حضور نانوحباب ----- ۹۵
- شکل ۴-۳۴: تاثیر همزمان کلکتور و اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب ----- ۹۶
- شکل ۴-۳۵: تاثیر همزمان کلکتور و اندازه ذرات بر عیار مس در حضور نانوحباب ----- ۹۶
- شکل ۴-۳۶: تاثیر همزمان کلکتور و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب ----- ۹۷
- شکل ۴-۳۷: تاثیر همزمان کلکتور و درصد جامد بر عیار مس در حضور نانوحباب ----- ۹۷
- شکل ۴-۳۸: تاثیر کلکتور بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب ----- ۹۸
- شکل ۴-۳۹: تاثیر همزمان کفساز و pH بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب ----- ۹۹
- شکل ۴-۴۰: تاثیر همزمان کفساز و pH بر عیار مس در حضور نانوحباب ----- ۹۹
- شکل ۴-۴۱: تاثیر همزمان کفساز و اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب ----- ۱۰۰
- شکل ۴-۴۲: تاثیر همزمان کفساز و اندازه ذرات بر عیار مس در حضور نانوحباب ----- ۱۰۰
- شکل ۴-۴۳: تاثیر همزمان کفساز و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب ----- ۱۰۱
- شکل ۴-۴۴: تاثیر همزمان کفساز و درصد جامد بر عیار مس در حضور نانوحباب ----- ۱۰۱
- شکل ۴-۴۵: تاثیر کفساز بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب ----- ۱۰۲
- شکل ۴-۴۶: تاثیر همزمان pH و اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب ----- ۱۰۲
- شکل ۴-۴۷: تاثیر همزمان pH و اندازه ذرات بر عیار مس در حضور نانوحباب ----- ۱۰۳
- شکل ۴-۴۸: تاثیر همزمان pH و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب ----- ۱۰۳

- شکل ۴-۴۹: تاثیر همزمان pH و درصد جامد بر عیار مس در حضور نانوحباب ----- ۱۰۴
- شکل ۴-۵۰: تاثیر pH بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب ----- ۱۰۴
- شکل ۴-۵۱: تاثیر همزمان اندازه ذرات و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب ----- ۱۰۵
- شکل ۴-۵۲: تاثیر همزمان اندازه ذرات و درصد جامد بر عیار مس در حضور نانوحباب ----- ۱۰۵
- شکل ۴-۵۳: تاثیر اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب ----- ۱۰۶
- شکل ۴-۵۴: تاثیر درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب ----- ۱۰۷
- شکل ۴-۵۵: شرایط پیشنهادی نرم افزار برای پارامترها و پیش بینی پاسخ ----- ۱۰۸

فهرست جداول

جدول ۱-۳: بررسی صحت تقسیم دو نمونه به صورت تصادفی	۳۳
جدول ۲-۳: محاسبات بدست آوردن وزن چگالی خاک	۳۵
جدول ۳-۳: زمان‌های بهینه دامنه‌های ابعادی مختلف	۳۸
جدول ۴-۳: زمان بهینه خردایش برای ابعاد ۱۱ میکرون	۴۰
جدول ۵-۳: آنالیز XRF کانسنگ مس سولفیدی معدن مس سرچشمه	۴۱
جدول ۶-۳: نتایج حاصل از آزمایش XRD	۴۲
جدول ۷-۳: نتایج حاصل از آزمایش کانی‌شناسی	۴۲
جدول ۸-۳: نتایج حاصل از آزمایش کانی‌شناسی ۱	۴۳
جدول ۹-۳: مقدار نرمه عبوری از ضلع جنوب سر ریز هیدروسیکلون اولیه تغلیظ ۱	۴۵
جدول ۱۰-۳: مقدار نرمه عبوری از ضلع شمال سر ریز هیدروسیکلون اولیه تغلیظ ۱	۴۶
جدول ۱۱-۳: مقدار نرمه عبوری با استفاده از شرایط آزمایشگاهی $D_{70}=75\mu$	۴۷
جدول ۱۲-۳: مواد شیمیایی استفاده شده در آزمایش‌ها	۴۸
جدول ۱۳-۳: تجهیزات استفاده شده در آزمایش‌ها	۴۹
جدول ۱۴-۳: طراحی آزمایش‌ها به وسیله نرم‌افزار DX۱۳	۵۴
جدول ۱۵-۳: شرایط انجام آزمایش به وسیله نرم‌افزار DX۱۳	۵۶
جدول ۱۶-۳: شرایط انجام آزمایش‌های فلوتاسیون	۵۶
جدول ۱-۴: طراحی آزمایش سطح پاسخ	۶۰
جدول ۲-۴: انتخاب مدل مناسب برای بازیابی مس	۶۲
جدول ۳-۴: مدل متوالی مجموع مربعات	۶۴
جدول ۴-۴: خلاصه‌ای از مدل آماری	۶۵
جدول ۵-۴: آنالیز واریانس برای بازیابی مس	۶۶
جدول ۶-۴: انتخاب مدل مناسب برای عیار مس	۸۸
جدول ۷-۴: مدل متوالی مجموع مربعات	۸۹
جدول ۸-۴: خلاصه‌ای از مدل آماری	۸۹
جدول ۹-۴: آنالیز واریانس برای عیار مس	۹۰
جدول ۱۰-۴: مشخصات آماری نتایج	۹۲



فصل اول

کلیات

فصل ۱- کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

مس یکی از پرمصرف‌ترین و مفیدترین عناصر فلزی و از اولین فلزاتی است که کشف شده است. مس طبیعی، کالکوسیت، کالکوپیریت، کولیت، بورنیت، آزوریت و مالاکیت از مهم‌ترین کانی‌های مس هستند. در میان آن‌ها کالکوپیریت فراوان‌ترین کانی مس و آزوریت و مالاکیت مهم‌ترین کانی‌های اکسیدی مس محسوب می‌شوند.

۱-۲- معرفی مدار پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه

معدن مس پورفیری سرچشمه، در ۱۶۰ کیلومتری جنوب غربی کرمان و در ۵۰ کیلومتری جنوب شهر رفسنجان واقع شده است. کارخانه پرعیارکنی ۱ این مجتمع روزانه حدود ۴۰۰۰۰ تن ماده معدنی با عیار متوسط ۰/۶۸ درصد مس را فرآوری می‌کند. روش مورد استفاده برای پرعیارکنی در این کارخانه فلوتاسیون تجمعی مس و مولیبدن می‌باشد. خوراک کارخانه کانسنگ سولفوری مس می‌باشد، با استفاده از یک سنگ‌شکن اولیه ژیراتوری، سه سنگ‌شکن مخروطی استاندارد به عنوان ثانویه و شش سنگ‌شکن مخروطی سرکوتاه به عنوان ثالثیه خرد شده و به ابعاد ۸۰ درصد زیر ۱۲/۷ میلی متر می‌رسد و سپس وارد هشت آسیای گلوله‌ای اولیه می‌شود. این آسیاها از نوع سرریز شونده هستند که هر یک در مدار بسته با یک خوشه ۱۰ تایی هیدروسیکلون پرعیارکنی اولیه وجود دارند. کنسانتره این سلول‌ها به هیدروسیکلون‌های ثانویه در مدار آسیاکنی مجدد منتقل شده و ته‌ریز سیکلون‌ها وارد آسیاکنی مجدد می‌شود. پس از نرم‌کنی مجدد، محصول مجدداً برای طبقه‌بندی ابعادی به سیکلون‌های ثانویه فرستاده می‌شود. محصول مدار آسیاکنی مجدد با ابعاد ۸۶ درصد زیر ۴۵ میکرون به سلول‌های پرعیارکنی ثانویه هدایت می‌شود [۱]. کنسانتره پرعیارکنی ثانویه پس از پرعیارکنی نهایی محصول نهایی مس و مولیبدن کارخانه فرآوری را تشکیل می‌دهد. باطله مرحله پرعیارکنی ثانویه وارد سلول‌های رمق‌گیری شده و کنسانتره مرحله رمق‌گیری نیز به مدار نرم‌کنی ثانویه انتقال می‌یابد. باطله مراحل پرعیارکنی اولیه و رمق‌گیری، باطله نهایی کارخانه را تشکیل می‌دهد. در نهایت کنسانتره مس و

مولیبیدن وارد کارخانه فرآوری مولیبیدن شده و کنسانتره مولیبیدن از کنسانتره مس جدا می‌گردد. پس از فیلتر و خشک کردن، کنسانتره مس به سمت کارخانه ذوب ارسال می‌شود.

۱-۳- فلوتاسیون

فلوتاسیون یکی از مهم‌ترین فرآیندهای متداول جهت جداسازی از کانی‌های بی ارزش یا گانگ است. این فرآیند، فرآیندی تر است که شامل سه فاز جامد - مایع - گاز (حباب) بوده و جهت جداسازی ذرات کانی با ابعادی بین ۵ تا ۵۰۰ میکرون استفاده می‌گردد. در اثر برخورد ذرات با حباب‌ها، برخی ذرات به حباب‌ها چسبیده و به عنوان کنسانتره در فلوتاسیون مستقیم و به عنوان باطله در فلوتاسیون معکوس به بالای سلول فلوتاسیون منتقل می‌شوند. لازم به ذکر است که، ذرات کوچک‌تر کارآیی برخورد کمتری با حباب‌ها دارند و احتمال جدایش ذرات بزرگ‌تر از حباب‌ها در ناحیه اغتشاش بالای سلول بیشتر است [۲-۳].

اتصال ذرات به حباب‌ها به علت خاصیت آبرانی^۱ ذاتی ذرات، یا در اثر جذب سطحی کلکتورها رخ می‌دهد. برخی از کلکتورها از قبیل تیونوکربامات‌ها برای یک کانی خاص (مانند کانی‌های مس) انتخابی تر عمل می‌کنند. بنابراین، به منظور دستیابی به جدایش انتخابی کانی به مواد شیمیایی دیگر از قبیل بازدارنده‌ها نیاز نیست. همراه با کلکتورهای معمول استفاده شده در فلوتاسیون، تنظیم‌کننده‌های دیگری برای بازداشت کانی‌های باطله از قبیل پیریت، افزوده می‌شود [۲-۳].

کانی‌های سولفیدی مس از قبیل کالکوپیریت، کالکوسیت، بورنیت و کوولیت عموماً منبع فلز باارزش مس هستند. فلوتاسیون کف معمولاً در کنسارهای مس برای جداسازی کانی‌های سولفیدی مس از کانی‌های باطله از قبیل پیریت استفاده می‌شود. یکی از مشکلات این فرآیند، انتقال اشتباه پیریت به بخش کنسانتره مس است که منجر به کاهش عیار مس و ارزش صنعتی آن می‌شود. انتقال اشتباه ذرات نرم پیریت به کنسانتره، عمدتاً

^۱ Hydrophobicity

به علت دنباله‌روی رخ می‌دهد و با کاهش ابعاد ذرات دنباله‌روی آن‌ها افزایش می‌یابد. اما، انتقال ذرات با ابعاد بزرگ‌تر از ده میکرون به کنسانتره، به دلایل زیر می‌تواند رخ دهد [۲]:

✓ آبرانی طبیعی (آلودگی با گونه‌های گرافیت یا حضور ذرات مخلوط با کانی‌های سولفیدی بارزش).

✓ آبرانی القاء شده^۱ (تشکیل گونه‌های سولفور و پلی سولفید و غیره).

✓ آبرانی القاء شده توسط کلکتورها^۲ (پس از فعال‌سازی سطحی با گونه‌های مس تجزیه‌شده از

کانی‌های سولفیدی) [۴].

روند بازیابی مواد توسط فلوتاسیون از پالپ شامل سه مکانیزم است:

✓ اتصال انتخابی به حباب‌های هوا «فلوتاسیون واقعی».

✓ دنباله‌روی در آبی که از کف خارج می‌شود.

✓ به دام افتادگی فیزیکی بین ذرات در کف متصل به حباب‌های هوا.

اتصال مواد معدنی بارزش به حباب‌های هوا مهم‌ترین مکانیزم است و نمایانگر اکثر ذرات بازیابی شده در کنسانتره است. اما بازدهی جدایش^۳ (SE) بین ماده معدنی با ارزش و گانگ نیز به درجه دنباله‌روی و به دام افتادن ذرات بستگی دارد. برخلاف فلوتاسیون واقعی، که گزینشی برای خواص سطح مواد معدنی است، هم گانگ و هم مواد معدنی بارزش به طور یکسان با دنباله‌روی و به دام انداختن قابل بازیابی هستند. زهکشی (آبکشی)^۴ این مواد معدنی در فاز کف ایجاد می‌شود و کنترل ثبات این فاز برای دستیابی به یک جداسازی مناسب مهم است. در کاربرد صنعتی، به دام افتادن گانگ ناخواسته (کانی بی‌ارزش) امری رایج است. بنابراین یک مرحله فلوتاسیون تنها کافی نیست (غیر عادی است) اغلب، برای دستیابی به یک کیفیت قابل قبول از

^۱ Self-Induced Hydrophobicity

^۲ Collector-Induced Hydrophobicity

^۳ Separation Efficiency

^۴ Drainage

نظر اقتصادی از ماده معدنی باارزش در محصول نهایی، چندین مرحله از فلوتاسیون (برای تشکیل مدارها) مورد نیاز است. فلوتاسیون واقعی از تفاوت خواص سطحی ذرات مواد معدنی مختلف بهره‌برداری می‌کند. پس از واکنش با معرف‌ها^۱، چنین اختلافاتی در خصوصیات سطحی بین مواد معدنی درون پالپ فلوتاسیون آشکار می‌شود و یک حباب هوا قادر است به ذره‌ای متصل شود، و آن را تا سطح آب، بالا ببرد این بدان معنی است که چگالی حباب - ذرات کمتر از چگالی پالپ محیط اطراف است [۵-۶].

در معدن مس سرچشمه با توجه به گسترش معدن به بخش‌های عمیق‌تر، کاهش نسبی کالکوسیت (Cu_2S) به کالکوپیریت ($CuFeS_2$) و افزایش پیریت (FeS_2) مشاهده می‌شود. به همین دلیل در واحد پرعیارکنی مجتمع مس سرچشمه، به رغم تمام کنترل‌های شدید عملیاتی که صورت می‌گیرد انتقال بیش از حد پیریت به کنسانتره نهایی مشاهده می‌شود.

۱-۳-۱- فلوتاسیون ذرات نرمه و درشت

فرایند فلوتاسیون برای جداسازی یا بازیابی ذرات در طیف وسیعی از اندازه‌ها استفاده می‌شود. در صنایع معدنی، آسیاکردن کانسنگ معدن به حداکثر اندازه ۶-۷ میکرون به منظور آزاد سازی ماده باارزش، امری غیرمعمول نیست و خوراک فلوتاسیون احتمالاً شامل مقدار مشخصی از ماده است که زیر ۱ میکرون است. در انتهای مقیاس دیگر، اندازه بالای صفحه با عملکرد مدار فلوتاسیون محدود می‌شود. بالاتر از یک نقطه خاص، با افزایش اندازه ذرات، بازیابی کاهش می‌یابد. بنابراین، در فلوتاسیون مواد معدنی، محدوده‌ای از اندازه ذرات وجود دارد که به طور معمول بین ۱۰ تا ۷۰ میکرون برای فلزات پایه است، در جایی که بازیابی بالا را می‌توان با زمان‌های ماند مناسب در سلول بدست آورد. خارج از این محدوده، به دلایل مختلف بازیابی‌ها کاهش می‌یابد. این بررسی در دو منطقه‌ای که دستیابی به بازیابی زیاد دشوارتر است تمرکز خواهد کرد: ذرات نرمه (کوچک‌تر از ۱۰

^۱ Reagents

میکرون) و درشت (بزرگ‌تر از ۷۰ میکرون) عوامل فیزیکی موثر در هر مورد بررسی و تاثیر آنها بر میزان بازیابی مورد بحث قرار خواهد گرفت [۷].

۱-۳-۲ رفتار ذرات نرمه

تحقیقات زیادی درباره‌ی رفتار متفاوت ذرات نرمه در فلوتاسیون، انجام شده است و به نتایجی چون نیاز به توجه ویژه، تجهیزات فلوتاسیون با انرژی بالا، ایمپلرهای (همزن‌های) مخصوص^۱، حباب‌های کوچک، معرف‌های متفاوت و دنباله‌روی^۲ دست یافته‌اند. اما از تجربیات بدست آمده در یک دهه‌ی گذشته، به این نتیجه رسیده‌اند که ذرات نرمه به دلایل زیر تنها دارای رفتاری متفاوت هستند.

✓ ذرات نرمه دارای مساحت سطح بر واحد حجم (سطح ویژه) بیشتری هستند، در نتیجه نیاز به مواد شیمیایی بیشتری دارند.

✓ ذرات نرمه تمایل به دنباله‌روی بیشتری نسبت به ذرات درشت دارند (انرژی کم برای اتصال به حباب و تمایل زیاد برای دنباله‌روی).

✓ سرعت فلوتاسیون کمتر و جهت از بین بردن ذراتی که بر اثر دنباله‌روی به کنسانتره راه یافته‌اند باید از آب شستشو استفاده کرد و یا چگالی تمیزکننده (شستشو) جدایش^۳ کمتر باشد.

✓ بیشتر تحت تاثیر خواص شیمیایی آب و یون‌های موجود در محلول قرار می‌گیرد.

✓ وجود مساحت سطح بیشتر نسبت به حجم (سطح مخصوص) باعث می‌شود تا کف، محکم‌تر به آن بچسبد و تیکنر و فیلتر کردن آن سخت‌تر می‌شود.

^۱ Special Impellers

^۲ Entrainment

^۳ Cleaning

✓ سینتیک فلوتاسیون آهسته‌تر است و تقریباً شبیه به سرعت فلوتاسیون برای ذرات درشت است. ذرات نرمه بوسیله‌ی حباب‌های درشت می‌توانند شناور شوند، اما حباب‌های کوچک‌تر سرعت فلوتاسیون را افزایش می‌دهند.

✓ بیشتر گرایش به تحت تاثیر قرار گرفتن پوشش سطح هستند (ممکن است به دلیل نسبت مساحت سطح زیاد آنها باشد).

✓ اثرات بیان شده در بالا با کوچک‌تر شدن ذرات، افزایش می‌یابد [۸].

۱-۴- نانوحباب

نانوحباب‌ها به صورت حفره‌های^۱ گازی نانوسکوپی^۲ تعریف می‌شوند که قطر آنها کمتر از ۱۰۰nm است. اصطلاحی معادل که در منابع نیز یافت می‌شود (حباب‌های بسیار ریز^۳) سازمان استاندارد بین‌المللی^۴ (ISO) استانداردهای حباب‌های زیر میکرون (ISO / TC 281) را ارزیابی کرده است. همانطور که قبلاً ذکر شد، نانوحباب‌ها می‌توانند هم در سطوح (سطح یا نانوحباب‌های فصل مشترک^۵) [۹] و هم به عنوان فاز پراکنده در یک فاز توده مایع^۶ (توده نانوحباب‌ها)^۷ وجود داشته باشند [۱۰-۱۱].

نانوحباب‌ها حفره‌های گازی نانوسکوپی (به طور معمول هوا) در محلول‌های آبی هستند که توانایی تغییر ویژگی‌های طبیعی آب را دارند. قطر حباب‌های معمولی از ۱ میکرون بیشتر است. این‌ها به سرعت به سطح مایع بالا می‌روند و از بین می‌روند. نانوحباب‌ها با قطر کوچک‌تر از ۱۰۰nm به دلیل آنچه در اصطلاح (حرکت

^۱ Cavities

^۲ Nanoscopic

^۳ Ultrafine Bubbles

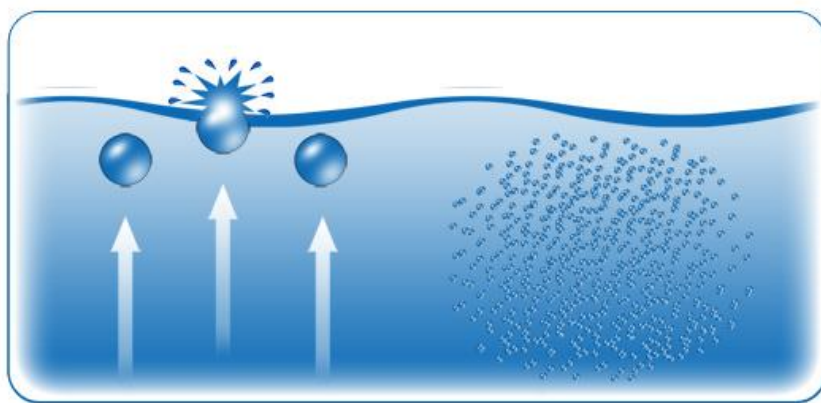
^۴ International Standards Organization

^۵ Surface Or Interfacial NBs

^۶ Liquid Bulk Phase

^۷ Bulk NBs

براونیان)^۱ خوانده می‌شود به طور تصادفی رانده می‌شوند و می‌توانند برای مدت طولانی در مایعات باقی بمانند. در شکل ۱-۱ حباب‌های معمولی (قطر بزرگ‌تر از ۱ میکرون) به سرعت به سطح بالا می‌روند و می‌ترکند اما نانوحباب‌های کوچک‌تر (قطر کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر) از شناوری کمتری برخوردار هستند و برای مدت زمان طولانی در مایعات معلق باقی می‌مانند [۱۲].



شکل ۱-۱: مقایسه مقاومت حباب‌های معمولی با نانوحباب‌ها [۱۲]

۱-۴-۱- کاربردهای نانوحباب

امروزه، نانوحباب‌ها به دلیل پایداری فوق‌العاده‌ای که تا چندین هفته و حتی ماه‌ها دارند، مورد توجه جامعه علمی قرار گرفته‌اند. تناقض این است که پایداری طولانی مدت چنین حباب‌هایی با ترمودینامیک کلاسیک همخوانی ندارد، زیرا طبق قانون یانگ - لاپلاس^۲، فشار داخلی با قطر متناسب است و بنابراین، حباب‌های زیر میکرون باید بلافاصله حل شوند. علاوه بر طول عمر آن‌ها، مشاهده شده است که نانوحباب‌ها بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی محیطی که در آن پراکنده شده‌اند، تأثیر دارند. اهمیت روزافزون فناوری نانو و ویژگی‌های خاص نانوحباب به دلیل دامنه وسیعی از کاربردهای بالقوه، توجه افرادی زیادی را، در بسیاری از بخش‌ها جلب کرده است. برخی از این زمینه‌ها، که در آن‌ها برنامه‌های بالقوه نانوحباب‌ها گسترش یافته است، تمیز کردن

^۱ Brownian Motion

^۲ Younge-Laplace

بدون سطح‌ساز^۱، فرآوری مواد معدنی، حمل داروی درون سلولی^۲، حساسیت دارویی افزایش یافته^۳ سلول‌های سرطانی^۴ و غیره است [۲۰-۱۳].

۱-۵- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

در دنیای امروز مس یکی از عناصر مهم و استراتژیک در صنعت محسوب می‌شود و ایران نیز یکی از تولیدکنندگان این محصول باارزش است. با توجه به نیاز روز افزون جامعه برای این فلز ارزشمند قیمت آن نیز در طی سالیان متمادی روند افزایشی داشته است. از طرف دیگر در کارخانه‌های فرآوری برای جلوگیری از هدر رفتن این فلز ارزشمند فعالیت‌های زیادی انجام شده که هدف همه‌ی آن‌ها کاهش میزان یا بازیابی آن در باطله می‌باشد.

در صورت استفاده از فناوری نانوحباب‌ها در فرآوری نرمة‌های مواد معدنی، بخش زیادی از این مواد معدنی که به عنوان مواد مزاحم در صنعت فرآوری شناخته می‌شوند، بازیابی شده و منجر به جلوگیری از هدرروی می‌شود. از طرف دیگر نرمة‌ها عمدتاً به دلیل کاهش اندازه بیش از حد ذرات به وجود آمده‌اند و انرژی بسیار زیادی طی مراحل خردایش از سنگ‌شکنی تا بعد از آسیاها صرف این مواد شده است. اگر به دلیل مضرات متعدد در بخش فرآوری از فرآیند جدا شوند، در مصرف انرژی صرفه‌جویی خواهد شد. که این امر می‌تواند صرفه اقتصادی زیادی برای مجتمع مس سرچشمه داشته باشد. همانگونه در مراحل که به استخراج مواد معدنی و خردایش آن‌ها ختم می‌شود، قسمتی از مواد معدنی که محتوی ماده باارزش می‌باشند، به ذرات نرمة^۵ و ذرات ریز^۶ تبدیل می‌شوند. پیرامون این موضوع می‌توان مثال‌هایی شرح داد که عبارتند از: بیش از ۷۰٪ فسفات استخراج شده

^۱ Surfactant

^۲ Intracellular Drug Delivery

^۳ Enhanced Drug Susceptibility

^۴ Cancer Cells

^۵ fine

^۶ Ultrafine

در ایالت فلوریدای آمریکا، ۵۰٪ قلع استخراج شده در کشور بولیوی، ۲۰٪ تنگستن استخراجی دنیا و مقادیر قابل توجهی از روی، آهن، باریت، اورانیوم، طلا به علت ریزشیدن بیش از حد ذرات، قابلیت فرآوری و بازیابی خود را از دست داده‌اند و وارد سدهای باطله شده‌اند [۲۱]. فرآوری و بازیابی مواد معدنی با ارزش از نرمة‌ها نیازمند روش‌های کاربردی و خاص در صنعت می‌باشد. یکی از مشکلات بسیار قدیمی که صنعت فرآوری مواد معدنی در جهان سال‌ها با آن درگیر است فلوتاسیون نرمة‌ها است. این مشکلات از ویژگی‌های ذاتی خود نرمة‌ها نظیر انرژی آزاد سطحی، ابعاد کوچک و جرم کم آن‌ها ناشی می‌شوند، که احتمال پایین برخورد و اتصال ذره/ حباب، مصرف بالای مواد شیمیایی، نرخ پایین فلوتاسیون، به تله افتادن^۱ مکانیکی و تشکیل کف چگال (سنگین) را به دنبال دارد. در طی سالیان متمادی به خصوص سه دهه‌ی گذشته، راه‌حل‌های مختلف و همچنین روش‌های متعددی جهت رفع مشکل بازیابی نرمة‌ها مورد مطالعه قرار گرفته و ارائه شده است. اما متأسفانه بیشتر این روش‌های ذکر شده هنوز قابلیت استفاده در مقیاس صنعتی را ندارند. روش‌هایی نظیر الکتروفلوتاسیون، فلوتاسیون هوای محلول به علت حجم کم حباب‌های تولیدی، فلوکولاسیون و کواگولاسیون به علت غیرانتخابی بودن فرآیند و روش فلوتاسیون ستونی به علت احتمال پایین برخورد ذرات نرمة و ذرات ریز با حباب‌های معمولی (که منجر به اصلاحات و تغییراتی در این سلول‌ها جهت افزایش احتمال برخورد ذره/ حباب شده است)، و بازیابی گانگ از طریق دنباله‌روی^۲ آب، از کارایی لازم برای فرآوری نرمة‌ها برخوردار نمی‌باشند. در مواردی که انواع روش‌های فرآوری مورد بررسی قرار گرفتند، علاوه بر موارد ذکر شده، انرژی، زمان، هزینه‌های سرمایه‌ای، قابلیت افزایش مقیاس، سادگی و محیط‌زیست آن نیز بسیار مورد اهمیت است. در ارتباط با بهینه کردن مرحله برخورد ذره/ حباب، تمامی مدل‌های موجود، به نیاز برای یک توزیع ابعادی وسیع از حباب‌ها جهت رسیدن به کارایی بیشتر فلوتاسیون در محدوده‌های مختلف ابعادی اشاره کرده‌اند [۲۲]. با توجه به پیشرفت‌های علمی روز افزون، استفاده از فناوری‌های جدید می‌تواند به منظور افزایش بیشتر راندمان

^۱ Entrapment

^۲ Entrainment

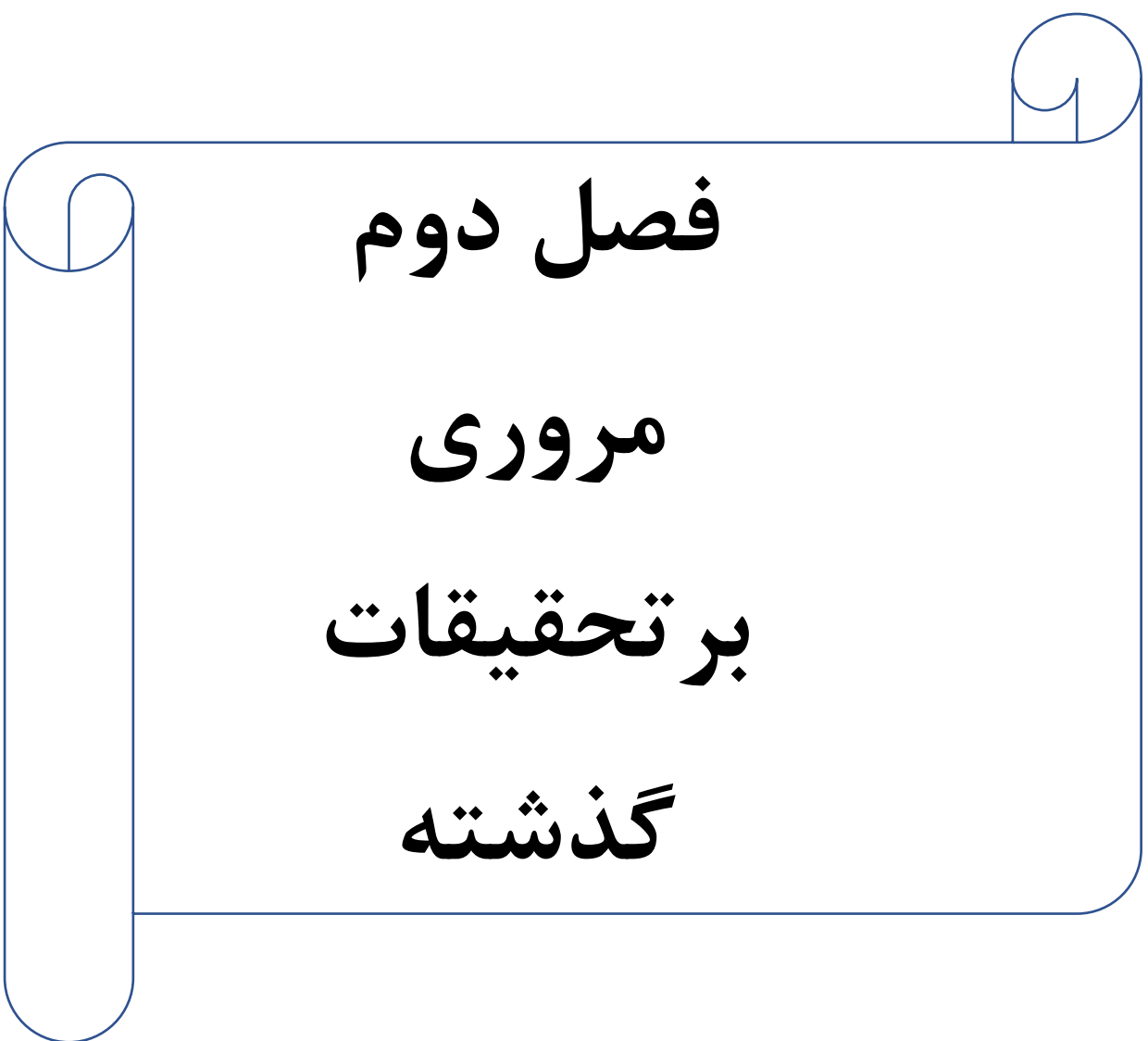
فرآوری مواد معدنی بکار گرفته شوند. نرمه‌ها بخشی از مواد معدنی هستند که به دلیل ابعاد بسیار کوچک در صورت ورود به بخش‌های فرآوری مواد معدنی باعث کاهش راندمان، افزایش مواد مصرفی و بسیاری مشکلات دیگر شوند. از طرف دیگر با حذف این مواد، بخش زیادی از مواد معدنی که دارای ارزش اقتصادی بالایی هستند هدر می‌روند. از این رو روش‌های مختلفی برای فرآوری نرمه‌ها پیشنهاد شده است. در سال‌های اخیر استفاده از نانوفناوری به این منظور در فرآوری مواد معدنی توسعه پیدا کرده است. با بکارگیری موفق استفاده از نانوحباب‌ها در فرآوری نرمه‌های مواد معدنی مختلف، به نظر می‌رسد استفاده از این روش در مجتمع مس سرچشمه بتواند صرفه اقتصادی زیادی ایجاد کرده و از هدرروی بخش زیادی از مواد معدنی جلوگیری نماید. در کشور ایران، تقریباً در کلیه کارخانجات فرآوری مواد معدنی از جمله کارخانه‌های فسفات اسفوردی، مس میدوک، مس سرچشمه، و دیگر کارخانه‌ها، باطله‌های خروجی و نرمه‌ها از مدار فلوتاسیون بخش قابل توجهی از مواد باارزش را شامل می‌شوند. اگر آمار دقیق هدرروی ذرات ریز و نرمه‌های این مواد باارزش در معدن‌های بزرگ مثل سرچشمه حساب شود، در طول سال به مبالغ بسیار بالایی نظیر چند ده میلیارد تومان می‌توان رسید. با بازگردانی آن‌ها با روش‌هایی که ذکر شده است صرفه اقتصادی مورد نظر بدست می‌آید. مثالی را که در این مورد می‌توان زد، کارخانه مس میدوک است که حدوداً بین ۳۰ الی ۴۰ درصد خوراک ورودی به کارخانه در محدوده ابعادی زیر ۲۰ میکرون قرار دارد [۲۱]، وارد شدن این مواد باارزش به سد باطله، علاوه بر اینکه مواد مورد نظر و باارزش را از دست می‌دهند، و نیز ضرر و زیان اقتصادی آن‌ها، باعث بروز مشکلات زیست محیطی متعددی نظیر راه پیدا کردن آن‌ها به آب‌های زیرزمینی و سطحی و فلزات سنگین می‌شوند. یکی از مواد باارزش و مهم که از لحاظ میزان ذخیره در ایران بسیار مورد اهمیت هست، کانسنگ مس می‌باشد. بخش بسیار زیاد و همچنین قابل توجهی از ماده مورد نظر و باارزش که به صورت ذرات ریز و نرمه است و متأسفانه قابل بازیابی کردن با روش‌های معمول فلوتاسیون نمی‌باشد. فلوتاسیون در حضور نانوحباب‌های پایدار تولیدی می‌تواند به عنوان یک راه‌حل مناسب جهت برطرف کردن مشکل بازیابی ذرات ریز و نرمه بکار گرفته شود.

۱-۶- اهداف تحقیق

- افزایش میزان بازیابی در حضور نانوحباب پایدار در مقایسه با عدم حضور نانوحباب پایدار
- کاهش مصرف کف‌ساز و کلکتور در حضور نانوحباب پایدار در مقایسه با عدم حضور نانوحباب پایدار

۱-۷- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در ۵ فصل تدوین شده است که در فصل اول، ابتدا مقدمه‌ای از پژوهش مورد نظر، معرفی مدار پرعیارکنی ۱ مجتمع مس سرچشمه، فلوتاسیون، تاثیر نرمه‌ها، نانوحباب و کاربردهای آن و اهمیت و ضرورت انجام تحقیق و اهداف تحقیق و در آخر ساختار پایان‌نامه بیان شد. به منظور نیل به اهداف تحقیق در فصل دوم مروری بر تحقیقات پیشین در زمینه فلوتاسیون، ذرات نرمه و همچنین نانوحباب‌ها و بررسی پارامترهای مهم و تاثیر گذار در فلوتاسیون نرمه به آن پرداخته شده است. مواد و تجهیزات به کار رفته همراه با روش اجرای آزمایش در فصل سوم، تحلیل و تفسیر نتایج آزمایش‌ها در فصل چهارم ارائه می‌شوند. در انتها در فصل پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری با ارائه پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی بیان می‌گردند.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and a small circular detail at the top-left and top-right corners respectively.

فصل دوم

مروری

بر تحقیقات

گذشته

۲-۱- مروری بر تحقیقات گذشته

ترهار در سال (۱۹۸۱)، مطالعه‌ای تحت عنوان تفسیر منطقی نقش اندازه ذرات در فلوتاسیون انجام داد. نتایج ارائه شده نشان داد حداقل درجه آبرانی لازم برای فلوتاسیون یک ذره به اندازه آن بستگی دارد و در نتیجه، منحنی‌های اندازه بهبودی کمک ارزشمندی برای ارزیابی عملکرد فلوتاسیون نشان دادند. همچنین عامل دنباله‌روی به عنوان یک مکانیزم مهم کمک به بازیابی ذرات ریز محسوب شده که چنانچه با نرخ پایین فلوتاسیون اصلی همراه باشد، می‌تواند رفتار مشاهده شده از جمله نرمه‌ها را به خود اختصاص دهد [۲۳].

احمد و همکاران در سال (۱۹۸۵)، در مطالعه‌ای تاثیر اندازه حباب متوسط بین ۷۵ میکرون تا ۶۵۵ میکرون بر میزان فلوتاسیون نرمه را با استفاده از ذرات لاتکس پلی استایرن^۱، کوارتز و زیرکن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد نرخ فلوتاسیون ذرات نرمه، دارای قطر کمتر از ۵۰ میکرون بوده و سرعت فلوتاسیون به شدت تحت تأثیر اندازه حباب قرار دارد. همچنین اثرات چگالی ذرات و سرعت محرک نیز از دیگر عوامل موثر گزارش شده است [۲۴].

یون و همکاران در سال (۱۹۸۶)، در تحقیقی تاثیر اندازه حباب بر روی فلوتاسیون زغال نرمه را گزارش کردند. نتایج نشان داد که احتمال جمع آوری کف با کاهش اندازه حباب به سرعت افزایش می‌یابد، همچنین مقادیر با احتمال برخورد نظری پیش‌بینی شده از تجزیه و تحلیل وبر و پادوک مطابقت خوبی دارند [۲۵].

سیواموهان در سال (۱۹۹۰)، در مطالعه‌ای مشکل ذرات بسیار نرمه در فراآوری مواد معدنی را مورد بررسی قرار داد. در این بررسی ابتدا سعی شد دانش اساسی موجود را که مربوط به مسئله ذرات بسیار نرمه است، گردآوری کرده و در مرحله دوم روش‌های مختلف مبتنی بر سطح را تجزیه و تحلیل کند. بخش عمده این منابع گسترده، ماهیتی پایه و اساسی داشته است [۲۶].

^۱ Polystyrene Latex

ماتیس و همکاران در سال (۱۹۹۳)، در مطالعه‌ای تفکیک نرمه‌ها توسط تکنیک‌های فلوتاسیون مورد مطالعه قرار دادند. این مقاله روش‌های مختلف فلوتاسیون از جمله فلوتاسیون ترسیبی^۱، فلوکولاسیون-فلوتاسیون^۲، فلوتاسیون ستونی^۳، فلوتاسیون هوای محلول^۴ و فلوتاسیون الکترولیتی^۵ را مرور می‌کند و تست‌های آزمایشگاهی متفاوت با نرمه‌ها (اکثراً در محدوده اندازه زیرسرندي) به عنوان نمونه ارائه شده است. اگرچه فلوتاسیون کف یک فرآیند جداسازی انتخابی معمول در فرآوری مواد معدنی است، اما برای نرمه‌های سودآور ناکارآمد بوده است [۲۷].

انصاری در سال (۱۹۹۷)، مطالعه‌ای را تحت عنوان فرآوری ذرات نرمه و همچنین مشکلات دشوار آن برای مهندس‌ان مواد معدنی ارائه داد. صنایع معدنی به طور مشترک دورریز زیادی در قالب نرمه و ذرات نرمه ایجاد می‌کنند. در این مقاله، چرا ذرات نرمه یک مشکل هستند، محدودیت فرایندها و تجهیزات موجود و پیشرفت در فرآوری مواد معدنی برای بازیابی مقادیر معدنی از نرمه‌ها مورد توجه قرار گرفت [۲۸].

یالسن و همکاران در سال (۲۰۰۶)، مطالعه‌ای تحت عنوان فلوتاسیون گاز محلول در فرآوری مواد معدنی انجام دادند. این مطالعه به وضوح نشان داد که حباب‌های گاز محلول می‌توانند به طور قابل توجهی عملکرد فلوتاسیون را بهبود بخشند [۲۹].

مائومینگ و همکاران در سال (۲۰۱۰)، مطالعه‌ای تحت عنوان تولید نانوحباب و کاربرد آن در فلوتاسیون کف (قسمت اول): تولید نانوحباب و تأثیرات آن بر خصوصیات میکرو حباب و مقیاس محلول‌های حباب میلیمتری را انجام دادند. در این مطالعه، یک طرح آزمایشی مرکب مرکزی^۶ هشت فاکتوری و پنج سطحی برای بررسی

^۱ Precipitate Flotation

^۲ Flocculation-Flotation

^۳ Column Flotation

^۴ Dissolved-Air Flotation

^۵ Electrolytic Flotation

^۶ Central Composite

هشت پارامتر مهم حاکم بر اندازه میانه و حجم نانوحباب‌ها انجام شد. این پارامترهای فرآیند شامل غلظت سطح‌ساز بود، محتوای اکسیژن محلول (O_2)، محتوای گاز دی اکسید کربن محلول (CO_2)، افت فشار در نازل لوله کاویتاسیون^۱، کوچک‌تر از ۵۰ نانومتر غلظت ذرات آب‌گریز، کوچک‌تر از ۵۰ نانومتر غلظت ذرات آب‌دوست، دمای پالپ و فاصله زمانی پس از تولید نانوحباب خصوصیات، ثبات و یکنواختی نانوحباب‌های مورد بررسی انجام شد [۱۵].

مائومینگ و همکاران در سال (۲۰۱۰)، در مطالعه‌ای تحت عنوان تولید نانوحباب و کاربردهای آن در فلوتاسیون کف (قسمت سوم): طراحی شده در مقیاس آزمایشگاهی فلوتاسیون ستونی فسفات تحقیق خود را انجام دادند. نتایج آزمون فلوتاسیون ستونی در مقیاس آزمایشگاهی نشان داد که بسته به ویژگی نمونه‌های فسفات، نانوحباب برای بازیابی اسید نامحلول^۲ (A.I) تا ۱۰٪ ~ ۳۰٪ افزایش داشت. در مقادیر کلکتور پایین‌تر نانوحباب‌ها مقدار کلکتور را ۱/۳ تا ۱/۲ کاهش داده بودند. نانوحباب‌ها تقریباً سرعت فلوتاسیون فسفات درشت را دو برابر کرده و شاخص انتخاب فلوتاسیون را تا ۲۵ درصد افزایش دادند [۱۴].

مائومینگ و همکاران در سال (۲۰۱۰)، مطالعه‌ای تحت عنوان تولید نانوحباب و کاربردهای آن در فلوتاسیون کف (قسمت چهارم): سلول‌های مکانیکی و فلوتاسیون ستونی مخصوص زغال سنگ تحقیقی را انجام دادند. نتایج نشان دادند که استفاده از نانوحباب‌ها در تانک فلوتاسیون سلول‌های مکانیکی و فلوتاسیون ستونی باعث بهبود بازیابی فلوتاسیون ۲۷٪ ~ ۸٪ در یک عیار محصول خاص شدند [۳۰].

جیمسون در سال (۲۰۱۰)، مطالعه‌ای تحت عنوان پیشرفت در فلوتاسیون ذرات نرمه و درشت را مورد بررسی قرار داد. برای ذرات درشت، دلایل افت در بازیابی می‌تواند به طبیعت بسیار آشفته پالپ در یک سلول فلوتاسیون معمولی مربوط باشد. برای بهبود بازیابی، یافتن راهی برای تماس ذرات و حباب‌ها در یک محیط ساکن ضروری

^۱ Cavitation Tube Nozzle

^۲ Acid Insoluble

است. یک فرآیند جدید برای فلوتاسیون ذرات درشت توصیف شده است که در آن بستر سیالی در سلول فلوتاسیون ایجاد شده بود و شرایط جریان بسیار ملایم بود و غلظت بالای مواد جامد منجر به سرعت جذب ذرات شد [۳۱].

اوشی کوبو و همکاران در سال (۲۰۱۰)، مطالعه‌ای را تحت عنوان شواهدی از وجود و پایداری نانوحباب‌ها در آب را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، وجود و تثبیت نانوحباب‌ها پس از تولید حباب بررسی شد. حضور ذرات به اندازه نانو از طریق پراکندگی نور دینامیکی^۱ برای روزها، زمانی که از اکسیژن خالص برای تولید حباب استفاده شده است و برای کمتر از ۱ ساعت در مورد حباب‌های هوا، تشخیص داده شد. پتانسیل زتا^۲ اندازه‌گیری شده در آب پس از معرفی اکسیژن میکرو و نانوحباب در محدوده‌ای از ۴۵- میلی ولت تا ۳۴- میلی ولت و از ۲۰- میلی ولت تا ۱۷- میلی ولت در آب حباب شده با هوا است، که نشان‌دهنده وجود آن است، ذرات پایدار الکتریکی این مطالعه احتمال قوی وجود نانوحباب‌ها در آب برای مدت طولانی را پیشنهاد کرد [۳۲].

میتین و همکاران در سال (۲۰۱۰)، مطالعه‌ای تحت عنوان حدود فلوتاسیون ذرات انجام دادند. ذرات نرمه بازده برخورد کمی با حباب‌های گاز دارند و به آرامی شناور می‌شوند. کارهای زیادی با هدف غلبه بر برخورد ناکارآمد ذرات کوچک با افزایش حباب‌های هوا انجام شده است. این بررسی با تأثیر اندازه حباب، تجمع ذرات، شرایط مختلف جریان، زمان القای ذرات و همچنین عملکرد نیروهای سطحی و مویرگی در جذب حباب ریز ذرات سروکار دارد [۳۳].

آلبیجانیچ و همکاران در سال (۲۰۱۱)، مطالعه‌ای تحت عنوان رابطه‌ای بین زمان اتصال حباب و ذرات و کانی‌شناسی یک کانسنگ معدن سولفید مس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بین زمان کنسانتره جمع‌آوری شده، عیار مس نمونه و زمان اتصال حباب به ذرات رابطه وجود دارد و اندازه‌گیری‌ها نسبت به مقدار

^۱ Dynamic Light Scattering

^۲ Zeta Potential

ماده آزاد نشده حساسیت بیشتری دارند. ماده با شناور شدن سریع (با قابلیت شناوری سریع) پرعیارتر بود، با یک زمان اتصال کوتاه‌تر که نشان داده بود می‌توان از زمان اتصال حباب ذرات اندازه‌گیری شده برای توصیف عملکرد فلوتاسیون یک کانسنگ معدن استفاده کرد [۳۴].

آلبیجانیچ و همکاران در سال (۲۰۱۲)، مطالعه‌ای تحت روابط بین زمان اتصال حباب و ذرات، مقدار کلکتور و کانی‌شناسی کانسنگ معدن سولفید مس را گزارش دادند. نتایج نشان داد که برای ذرات با عیار مس بالا، افزایش کمی مقدار کلکتور^۱ منجر به کاهش چشم‌گیر زمان پیوستگی شده است و هیچ افزایش بیشتری در افزودن بعدی کلکتور ندارد. با این حال، برای ذرات با عیار مس متوسط، اثر جمع کلکتور بر زمان اتصال بسیار کمتر کاهش داشت زیرا مواد معدنی با ارزش عمدتاً متوسط و ضعیف آزاد شدند. برای ذرات با عیار مس پایین، جمع کلکتور هیچ تفاوتی ایجاد نکرد. همه این نتایج تایید کردند که بین آزادسازی مواد معدنی، عیار مس، مقدار کلکتور و زمان اتصال همبستگی غیر خطی بالایی وجود دارد [۳۵].

احمدی و همکاران در سال (۲۰۱۳)، مطالعه‌ای را تحت فلوتاسیون نرمة‌های کالکوپیریت در حضور نانوحباب‌های تولید شده با روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار دادند. حضور نانو-میکرو حباب‌ها موجب افزایش بازیابی فلوتاسیون نرمة‌های کالکوپیریت بین ۲۱-۱۶٪ و کاهش مصرف مواد شیمیایی (کلکتور تا ۷۵٪ و کف‌ساز تا ۵۰٪) شد. افزون بر این، نتیجه‌ها نشان داد که اثر نانو-میکرو حباب‌ها بر افزایش بازیابی ذرہ‌های بیش نرمة (۵+ تا ۱۴/۳۶-) میکرون نسبت به ذرہ‌های نرمة (۳۸+ تا ۱۴/۳۶+) میکرون بیشتر می‌باشد [۳۶].

احمدی و همکاران در سال (۲۰۱۴)، مطالعه‌ای تحت عنوان فلوتاسیون نانومیکرو حباب از ذرات نرمة و ذرات ریز کالکوپیریت گزارش دادند. بر اساس نتایج، میانگین اندازه نانومیکرو حباب‌ها با گذشت زمان افزایش داشت و با افزایش غلظت کف‌ساز کاهش داشت. نتایج آزمون فلوتاسیون در مقیاس آزمایشگاهی نشان داد که بسته

^۱ Collector Dosage

به شرایط عملیاتی فرآیند، بازیابی فلوتاسیون ذرات نرمه و ذرات ریز کالکوپیریت تقریباً در ۱۶ تا ۲۱ درصد افزایش دارد. وجود نانومیکروحباب‌ها بازیابی ذرات ریز (۵+ تا ۱۴/۳۶-) میکرون را بیش از ذرات نرمه (۱۴/۳۶+ تا ۳۸-) میکرون افزایش داد. یکی دیگر از مزایای مهم این است که استفاده از نانومیکروحباب‌ها به ترتیب ۷۵ و ۵۰ درصد مصرف کلکتور و کف‌ساز را کاهش داده است [۳۷].

کالگارتو و همکاران در سال (۲۰۱۴)، مطالعه‌ای تحت عنوان ویژگی‌های سطحی در مورد نانوحباب‌ها و برنامه‌های آینده در فلوتاسیون را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ثابت کرد که کاهش فشار باعث می‌شود مایع فوق اشباع دچار پدیده کاویتاسیون شود و نانوحباب‌ها تولید شوند. pH متوسط و محلول‌های آزمایش شده قبل از تشکیل نانوحباب‌ها در لوله اشباع هوا^۱ تنظیم شده و این امر باعث کنترل (برجا)^۲ شارژ سطح / اندازه پتانسیل زتا از نانوحباب‌های تشکیل دهنده می‌شوند. اندازه نانوحباب‌ها به شارژ آن‌ها بستگی دارد و با pH افزایش می‌یابد. بنابراین، نانوحباب‌های پایدار شارژ شده و بدون بار می‌توانند با استفاده از سطح‌سازها (مواد فعال کننده سطح)^۳ یا بدون آن‌ها ساخته شوند و انتظار می‌رود که استفاده از آن‌ها گزینه‌ها را در فلوتاسیون مواد معدنی گسترش دهد [۳۸].

کالگارتو و همکاران در سال (۲۰۱۵)، مطالعه‌ای تحت عنوان فلوتاسیون ذرات کوارتز با کمک نانوحباب‌ها را انجام دادند. نتایج در یک سلول مکانیکی، بهبود کلی بازیابی نرمه‌ها را تأیید کرد. تصویر ذرات نرمه (نانوحباب‌ها باعث افزایش زاویه تماس کوارتز شد) و تجمع ذرات ریزها کوارتز (با میکروگراف ثابت شد). توسط نانوحباب‌ها مکانیزم‌های اصلی بازیابی، بالاتر هستند. اثر نانوحباب‌ها بر روی فلوتاسیون قطعات کوارتز درشت، در مقیاس پایه، به صورت کاهش سرعت افزایش حباب‌های درشت موجود بود و باعث کاهش درجه انتقال حباب شد [۳۹].

^۱ Air Saturation Vessel

^۲ In Situ

^۳ Surfactants

احمدی و همکاران در سال (۲۰۱۵)، مطالعه‌ای تحت عنوان توزیع ابعادی نانو-میکروحباب‌ها با روش نوین تفرق اشعه لیزری^۱ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با گذشت زمان، متوسط ابعاد نانومیکروحباب‌ها در اثر کاهش میزان اکسیژن محلول در آب و همچنین کاهش مقدار مطلق پتانسیل زتای سطحی، افزایش یافت. افزایش قدرت کف‌ساز و همچنین افزایش غلظت آن از ۳۰ به 100 mgL^{-1} ، همزمان با کاهش کشش سطحی فصل مشترک حباب/آب، منجر به کاهش ابعاد نانو-میکروحباب‌ها شد. افزایش نرخ گازدهی (هوا / اکسیژن) از ۱/۰ به 3 L min^{-1} ، نیز باعث کاهش ابعاد نانو-میکروحباب‌ها شد. علاوه براین، نتایج نشان داد که نانومیکروحباب‌های تولیدشده به هنگام تزریق گاز اکسیژن به علت بزرگ‌تر بودن مقدار مطلق پتانسیل زتای سطحی و حلالیت بیشتر اکسیژن از متوسط ابعادی کوچک‌تری نسبت به نانومیکروحباب‌های هوا دارد [۴۰].

لایسترن و همکاران در سال (۲۰۱۷)، مطالعه‌ای تحت عنوان چگونه اندازه ذرات گانگ می‌تواند در بهبود ذرات نرمه و ذرات ریز در هنگام فلوئوتاسیون کف تأثیر بگذارد را انجام دادند. نتایج نشان داد که وقتی ذرات گانگ نیز نرمه باشند، می‌توان مگنتیت ذرات ریز را مشابه مگنتیت نرمه بازیابی کرد. در مقابل، هنگامی که از کوارتز ذرات ریز به عنوان سیستم معدنی گانگ استفاده بشود، بازیابی مگنتیت نرمه به میزان قابل توجهی کاهش دارد. بنابراین باید بحث در مورد تجدید نظر در مدل‌های بهره‌وری برخورد را برای ترکیب اثر ذرات گانگ باز کند [۴۱].

رولیوف و همکاران در سال (۲۰۱۷)، مطالعه‌ای تحت عنوان تأثیر میکروحباب‌ها به عنوان حامل‌های فلوئوتاسیون بر بهره‌وری مناسب از کانسنگ معدن سولفید را مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله نتایج آزمایش فلوئوتاسیون روی کانسنگ معدن مس - سرب - روی - آهن - سولفید نرمه پراکنده‌ای که در آن میکروحباب‌های از ۵۰ میکرون به عنوان حامل استفاده شد، مشخص شد که مقدار میکروحباب در مقدار ۰/۱ لیتر در هر کیلوگرم مواد

^۱ Laser Diffraction Technique

جامد باعث افزایش سرعت فلوتاسیون اجزای مختلف کانسنگ سولفید توسط فاکتورهای ۲-۴ و بازیابی ۳-۵٪ درصد شده است و سرعت فلوتاسیون میکروحباب‌های معدنی توسط حباب‌های درشت چندین برابر در مقایسه با سرعت فلوتاسیون ذرات جداگانه است [۴۲].

اصغری و همکاران در سال (۲۰۱۸)، مطالعه‌ای تحت عنوان بهبود بازیابی مس در مدار فلوتاسیون صنعتی: مطالعه موردی معدن مس سرچشمه را انجام دادند. نتایج تجزیه و تحلیل بازیابی اندازه به اندازه نشان داد که بیشترین افت مس سولفید در ذرات درشت (بزرگ‌تر از ۷۴ میکرون) و بیشترین افت مس اکسید در ذرات نرمه (کوچک‌تر از ۹ میکرون) اتفاق افتاده است. مطالعات تجربی نشان داد که استفاده از روش‌های پیشنهادی با در نظر گرفتن شرایط بهینه در کارخانه می‌تواند منجر به افزایش بازیابی مس از ۷۹٪ به ۸۷٪ بدون کاهش عیار شود [۴۳].

نظری و همکاران در سال (۲۰۱۸)، مطالعه‌ای تحت عنوان تأثیر پارامترهای نانوحباب و هیدرودینامیک بر فلوتاسیون کوارتز درشت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که حضور نانوحباب‌ها باعث بهبودی فلوتاسیون کوارتز (۱۰۶+۴۲۵ - میکرون) تا ۲۱ درصد می‌شود. برای قطر همزن^۱ ۷ سانتی‌متر، حداکثر بازیابی فلوتاسیون ۸۶/۴٪ و ۹۸٪ به ترتیب در غیاب و حضور نانوحباب‌ها در عدد رینولدز^۲ (Re) ۸۱۰۰۰ و ۶۶۰۰۰ بدست آمد. ذرات به ترتیب بیش از ۱۰٪، ۱۰٪ و ۳۰٪ بهبود یافتند. برای قطر همزن ۹ سانتی‌متر، حداکثر میزان بازیابی ۸۶/۳٪ و ۹۷/۵٪ درصد به ترتیب در غیاب و حضور نانوحباب‌ها در Re از ۹۰۰۰۰ و ۷۵۰۰۰ بدست آمد. نانوحباب‌های ثابت نرخ فلوتاسیون تا ۳۶ درصد افزایش یافته است [۴۴].

دمدیروس و همکاران در سال (۲۰۱۸)، مطالعه‌ای تحت عنوان اهمیت طول زنجیره کلکتور در فلوتاسیون ذرات نرمه را نشان دادند. نتایج اولیه نشان داد که فلوتاسیون با DDA^۳ به شدت تحت تأثیر اندازه ذرات است.

^۱ Diameter Impellers

^۲ Reynolds Number

^۳ Dodecylamine

وقتی d_{50} از ۷۴ میکرون به ۱۴ میکرون کاهش یافته بود، میزان فلوتاسیون از ۸۲/۶٪ به ۵۲/۶٪ کاهش داشت. به نوبه خود، تغییر اندازه ذرات تأثیر اندکی بر روی فلوتاسیون با اولئات^۱ داشت. عملکرد بهتر فلوتاسیون نرمه با اولئات به تجمع آب‌گریز در طول تهویه نسبت داده شد که d_{50} را ۴۳٪ افزایش داد. فلوتاسیون نرمه‌ها با اندازه دانه‌های آب‌گریز افزایش می‌یابد که به نوبه خود، با طول زنجیره کلکتور افزایش می‌یابد. این عملکرد بهتر اولئات (۱۷ درجه سانتی‌گراد) را در مقایسه با DDA (۱۲ درجه سانتی‌گراد) توضیح داده بود و استفاده از کلکتورهای زنجیره بلند را برای فلوتاسیون نرمه‌ها پیشنهاد کرد [۴۵].

تائو و همکاران در سال (۲۰۱۹)، مطالعه‌ای تحت عنوان اثرات نانوحباب بر فعل و انفعالات هیدرودینامیکی بین ذرات و حباب‌ها را در مطالعه‌های خود نشان دادند. نشان داده شده است که آب‌گریزی ذرات و نانوحباب‌های تولیدشده در سطح ذرات با تأثیر بر تعادل بین نیروهای هیدرودینامیکی و شیمیایی سطح که مسیر حرکت ذره‌ای را که در اطراف سطح حباب در حال حرکت است، روند تعامل ذرات و حباب را افزایش می‌دهند. افزایش آب‌گریزی سطح ذرات از نظر زاویه تماس از ۵۰ درجه به ۸۵ درجه و ۱۱۰ درجه باعث افزایش تعامل حباب ذره با کاهش زمان القای از ۷۵ms به ۵۲ms و ۴۸ms شده است. در صورت وجود نانوحباب‌ها روی سطح ذرات، لایه نازک بین ذره و حباب تا ۵۰٪ سریع‌تر پاره می‌شود. همچنین مشاهده شده است که نانوحباب‌هایی قادر به تولید دانه‌های نرمه ذرات هستند که روند تعامل حباب ذرات را تسهیل می‌کنند [۴۶].

ابراهیمی و همکاران در سال (۲۰۲۰)، مطالعه‌ای تحت عنوان تعامل استفاده از نانومیکرو حباب‌های پایدار و تابش اولتراسونیک^۲ در فلوتاسیون زغال‌سنگ را مورد بررسی قرار دادند. استفاده همزمان از دو عامل نانوحباب‌های پایدار و امواج فراصوت تحت تابش نشان داد که عملکرد ذرات درشت (۲۴۰+۸۵۰- میکرون)، متوسط (۱۰۵+۴۲۰- میکرون) و ریز (۱۰۵- میکرون) ذرات به ترتیب بیش از ۱۰٪، ۱۰٪ و ۳۰٪ بهبود

^۲ Oleate

^۱ Ultrasonic

یافتند. بازیافت مواد قابل احتراق در خوراک متغیر همراه با شاخص انتخاب خاکستر^۱ افزایش یافت. علاوه بر این، مصرف کلکتور تا ۹۰٪ کاهش یافت، در حالی که غلظت مورد نیاز برای ماده کف‌ساز تقریباً به یک چهارم کاهش یافت [۴۷].

فرخ پی و همکاران در سال (۲۰۲۰)، مطالعه‌ای تحت عنوان فلوتاسیون ذرات نرمه در حضور میکروحباب‌ها و حباب‌های معمولی مورد بررسی قرار دادند. مشخص شد که هنگام استفاده از میکروحباب‌ها، کلکتور بسیار کمتری (حدود نیمی) برای دستیابی به بهبودی یکسان یا حتی کمی بیشتر مورد نیاز است. در همان زمان، نرخ فلوتاسیون کوارتز نیز در هنگام استفاده از حباب‌های کوچک بیشتر بود. مزیت میکروحباب‌ها ممکن است به دلیل افزایش کارایی اتصال حباب‌های معمولی با ذرات ریز پوشیده شده از میکروحباب‌ها باشد [۴۸].

فرخ پی و همکاران در سال (۲۰۲۰)، مطالعه‌ای تحت عنوان فلوتاسیون ذرات نرمه: یک بررسی را در مطالعه‌های خود نشان دادند. مشکل تراکنش ذرات نرمه عمدتاً به دلیل برخورد کم و بازده اتصال آن‌ها با حباب است. برای غلبه بر مشکلات تولید ذرات نرمه، چندین استراتژی در منابع ارائه شده است. آن‌ها عمدتاً به افزایش اندازه ذرات با تجمع انتخابی و کاهش اندازه حباب با استفاده از نانو یا میکروحباب متکی هستند، اما همچنین با استفاده از سلول‌های فلوتاسیون نوع راکتور - جداکننده که یک تعامل ذره و حباب بسیار قوی‌تر را تقویت کرده است [۴۹].

لی و همکاران در سال (۲۰۲۰)، مطالعه‌ای تحت عنوان جداسازی کارآمد زغال‌سنگ نرمه به کمک نانوحباب‌های سطحی را مورد بررسی قرار دادند. عملکرد جداسازی ذرات نرمه توسط فلوتاسیون به اندازه ذرات حساس است، که محدودیتی برای استفاده از فلوتاسیون در جداسازی ذرات نرمه ایجاد می‌کند. نانوحباب‌ها با روش تغییر دما تولید شدند. در یک آزمایش چسبندگی، ذرات زغال‌سنگ بیشتری در حضور نانوحباب‌ها به حباب متصل

^۱ Ash Selectivity Index

می‌شوند، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانوحباب‌ها بر تعامل حباب ذرات است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت، نانوحباب‌ها عامل بهبود عملکرد فلوتاسیون ذرات زغال‌سنگ هستند [۵۰].

لی و همکاران در سال (۲۰۲۰)، مطالعه‌ای تحت عنوان اثر اولتراسونیک بر روی فلوتاسیون ذرات نرمه گرافیت: نانوحباب‌ها یا خیر؟ گزارش دادند. تصویربرداری (میکروسکوپ نیروی اتمی) AFM^۱ نشان داد که هیچ نانوحباب‌های سطحی در رابط آب HOPG^۲ (گرافیت پیرولیتیک بسیار جهت‌دار) قبل و بعد از مواجهه با فراصوت در معرض فراصوت قرار گرفتن وجود ندارد. علاوه بر این، نانوحباب‌های سطحی قبل از اولتراسونیک با تبادل محلول تولید شدند و سپس تحت اولتراسونیک قرار گرفتند. مشخص شد که اولتراسونیک نانوحباب‌های سطح موجود در رابط آب HOPG - را از بین نمی‌برد. آزمون‌های ته‌نشینی و آزمایش‌های فلوتاسیون نشان می‌دهد که فراصوت تأثیر ناچیزی بر تعامل بین ذرات گرافیت و در نتیجه عملکرد فلوتاسیون دارد [۵۱].

چانگ و همکاران در سال (۲۰۲۰)، مطالعه‌ای تحت عنوان اثر نانوحباب‌ها بر عملکرد فلوتاسیون زغال اکسیدشده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج فلوتاسیون نشان داد که فلوتاسیون زغال اکسیدشده در حضور نانوحباب‌ها منجر به بازیابی ماده قابل احتراق ۱۰٪ بیشتر از فلوتاسیون حباب هوا معمولی می‌شود. علاوه بر این، مشخص شد که فلوتاسیون زغال اکسیدشده در حضور و غیاب نانوحباب‌ها را می‌توان به بهترین وجه با استفاده از مدل مرتبه اول با مدل مستطیل توصیف کرد. تجزیه و تحلیل تصاویر AFM نشان داد که تعداد زیادی نانوحباب تولید شده و به سطح زغال اکسید شده متصل شده‌اند. زمان القای زغال اکسیدشده در غیاب و حضور نانوحباب‌ها به ترتیب ۱۰۰۰ms و ۳۹ms بود، نشان می‌دهد که وجود نانوحباب‌ها به طور موثری باعث تعامل بین زغال‌سنگ اکسیدشده و حباب‌های ماکرو می‌شوند. علاوه بر این، تجمع بین ذرات اکسیدشده

^۱ Atomic Force Microscope

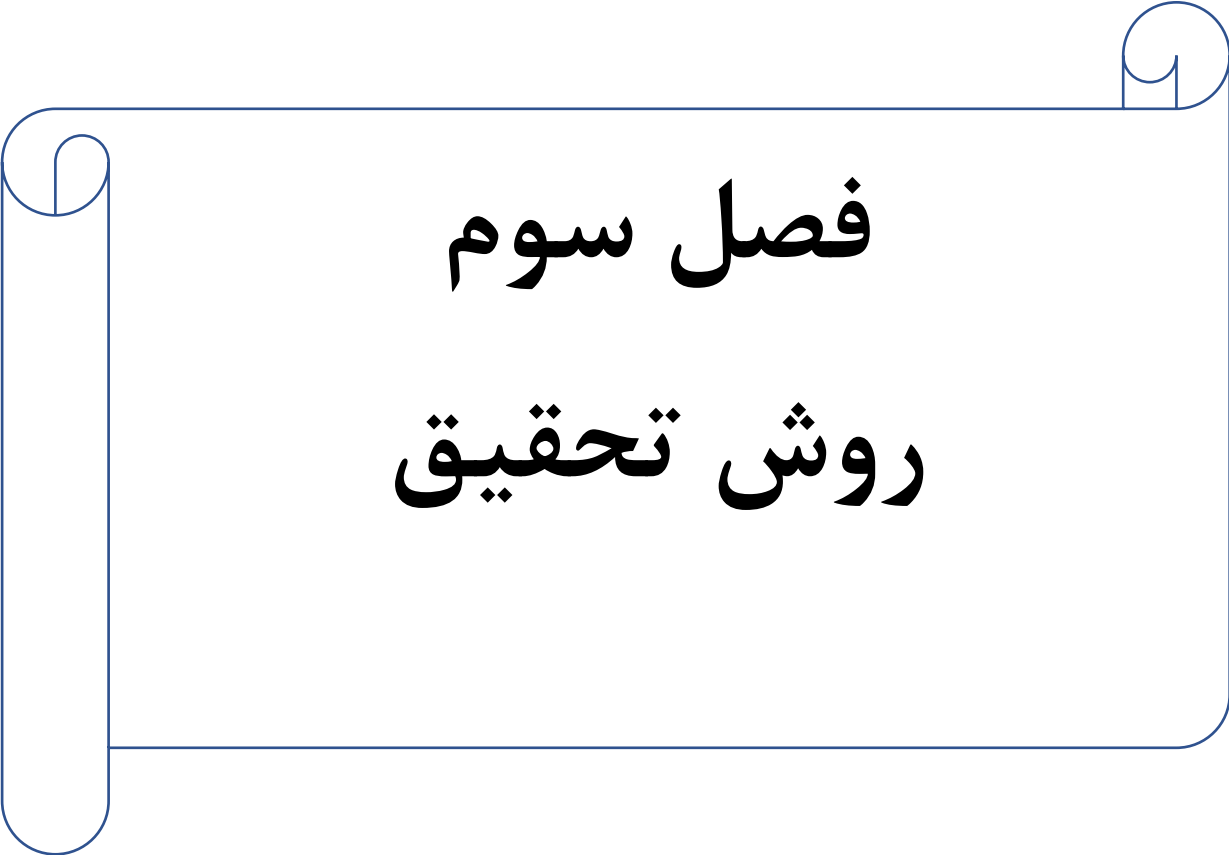
^۲ Highly Oriented Pyrolytic Graphite

زغال سنگ نیز خود به خود و در حضور نانوحباب ها رخ داد، که در بهبود بازیافت ماده قابل احتراق و سرعت فلوتاسیون زغال اکسید شده مفید بود [۵۲].

لی و همکاران در سال (۲۰۲۰)، مطالعه‌ای تحت عنوان اثر نانوحباب ها بر روی پوشش دهی نرمه^۱ کائولینیت در فلوتاسیون زغال سنگ را گزارش دادند. کائولینیت با تشکیل پوشش بر روی سطوح زغال سنگ باعث کاهش فلوتاسیون زغال سنگ شد، اما اثر مخرب آن در آب نانوحباب با پوشش دهی نرمه کاهش یافته کمتر مشخص شد. آزمون های تنظیم، اندازه گیری سطح Emmett – Teller - Brunauer – و پراکندگی نور پویا برای درک مکانیسم زیربنایی انجام شد. در مقایسه با آب (دیونیزه شده) DI^۲، درجه تجمع کائولینیت در آب نانوحباب افزایش یافته است. تشدید خود تجمع پلاکت های کائولینیت که به نظر رسیده است با حضور نانوحباب ها ایجاد و سطح بین سطحی مایع جامد و همچنین تعداد ذرات کائولینیت آزاد را در سیستم تعلیق کاهش داده است و پوشش کائولینیت را روی سطوح زغال سنگ در فلوتاسیون آب نانوحباب کاهش دادند [۵۳].

^۲ Slime Coating

^۱ Deionized



فصل سوم

روش تحقیق

۳-۱ مقدمه

در این فصل به معرفی و ارائه تجهیزات، مواد شیمیایی و وسایل مورد استفاده در این پایان‌نامه، پرداخته می‌شود. سپس نحوه تهیه و عملیات آماده‌سازی نمونه‌ها، همچنین آماده‌سازی نمونه‌های مس سولفیدی جمع آوری شده به روش تصادفی از زیر انبار نرمه کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سرچشمه برای انجام این فرایند و بررسی متغیرهای فلوتاسیون به همراه آب معمولی در مقایسه با محلول آبی نانوحباب پرداخته می‌شود. در نهایت روش و شرایط انجام آزمایش‌ها و ملاحظات مربوط به آن‌ها ارائه می‌گردد، در آخر به یک جمع بندی کلی می‌رسد.

۳-۲ لیست تجهیزات مورد استفاده

- سنگ‌شکن فکی ثابت و متحرک
- آسیای گلوله‌ای
- سرندها
- دستگاه لرزاننده برای تسهیل دانه‌بندی
- دستگاه فلوتاسیون مکانیکی دنور
- دستگاه خشک‌کن برقی برای کاهش رطوبت زیر ۵٪
- pH سنج
- ترازوی دیجیتالی آزمایشگاهی
- کرنومتر
- دستگاه پولورایز
- دستگاه سیکلوسایزر
- ریفل
- پیکنومتر
- دستگاه فیلترپرس

۳-۳ تهیه و عملیات آماده‌سازی نمونه

نمونه‌ی لازم برای مطالعات تعیین زمان ماند و انجام این فرایند از زیر انبار نرمه کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سرچشمه به صورت تصادفی و در طی هفت روز به وزن حدود ۲۰۰ کیلوگرم تهیه و به آزمایشگاه کانه‌آرایی مجتمع مس سرچشمه انتقال داده شد. نمونه مورد نظر با استفاده از سنگ‌شکن فکی با فک ثابت و متغیر و سرند لرزان ۱۰ مش (۲mm) طی چند مرحله خردایش، به‌منظور جلوگیری از ایجاد نرمه بیشتر، بعد از مراحل سنگ‌شکنی، عمل سرندکنی انجام شد تا ۱۰۰ درصد ذرات کوچک‌تر از ۲mm رسانده شد، همچنین در ابتدای مراحل سنگ‌شکنی حدود ۵ کیلوگرم از نمونه مورد نظر برای تمیز کردن دستگاه‌ها و سنگ‌شکن‌ها برداشته شد تا در ابتدای کار با دستگاه‌ها در مراحل آماده‌سازی از آن استفاده شود و از این بابت خطایی در مراحل آماده‌سازی ایجاد نشود.

۳-۳-۱ آماده‌سازی نمونه

مراحل زیر به ترتیب جهت آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شد:

۱- در شکل‌های (۱-۳ و ۲-۳) ابتدا نمونه‌هایی که در طی هفت روز به صورت تصادفی تهیه شده بودند روی هم ریخته تا خوب همگن شوند، بعد از آن عملیات خردایش توسط سنگ‌شکن فکی و سرند لرزان ۱۰ مش انجام شد.



شکل ۲-۳: نمونه‌های ۲۰۰ کیلوگرمی به صورت رندوم از

زیر انبار نرمه تغلیظ ۱



شکل ۱-۳: همگن کردن ۲۰۰ کیلوگرم نمونه

۲- در شکل‌های (۳-۳ تا ۵-۳) نمونه با استفاده از سنگ‌شکن فکی و سرند لرزان ۱۰ مش (۲mm) طی چندین مرحله مورد خردایش قرار گرفت، تا ۱۰۰ درصد ذرات مورد نظر نمونه عبور کنند.



شکل ۳-۳: سنگ‌شکن‌های فکی ثابت و متحرک



شکل ۵-۳: کل نمونه‌های ۲۰۰ کیلوگرمی تبدیل

به ۱۰ مش (۲mm)



شکل ۴-۳: سرند لرزان ۱۰ مش (۲mm)

۳- در شکل (۳-۶) بعد از خشک شدن و همگن سازی کل نمونه ۲۰۰ کیلوگرمی آن ها با استفاده از نمونه گیر مجزایی جونز (Jones riffle sampler) یا همان ریفل، به دو بخش تقسیم شدند.



شکل ۳-۶: تقسیم نمونه ها توسط ریفل به دو بخش مساوی

۳-۳-۲ تست صحت تقسیم نمونه ها

پس از اتمام مراحل فوق، در شکل (۳-۷) دو نمونه به صورت تصادفی از پاکت های نمونه انتخاب شد که هر کدام وزنی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ گرم داشته باشد، نمونه اول ۱۱۳/۹۷ گرم و نمونه دوم ۱۲۳/۷۲ گرم شد. هر دو نمونه مورد نظر با سرنند ۴۰۰ مش یا همان ۳۸ میکرون شستشو داده شد، و داخل خشک کن برقی یا همان خشک کن حرارتی گذاشته شد. بعد از آن توسط ۱۲ سری سرنندی (۱۲، ۱۶، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۷۰، ۱۰۰، ۱۴۰، ۲۰۰، ۲۷۰، ۴۰۰) مش، لرزاننده انجام شد اعدادی که بدست آمده است در جدول (۳-۱) باید زیر ۱/۵ درصد باشد تا تقسیم بندی نمونه ها به خوبی انجام شده باشد.



شکل ۳-۷: تقسیم نمونه با تقسیم شانه‌ایی همچنین سری سرندی و لرزاننده

جدول ۳-۱: بررسی صحت تقسیم دو نمونه به صورت تصادفی

اندازه	باقی مانده	درصد	درصد	اندازه	باقی مانده	درصد	درصد	درصد	درصد
مش		باقی مانده	تجمعی عبوری	مش		باقیمانده	تجمعی عبوری	اختلاف	اختلاف
۱۲	۳/۴۷	۳/۹۶	۹۶/۰۴	۱۲	۴/۶۴	۴/۸۰	۹۵/۲۰	-۰/۸۴	۰/۸۴
۱۶	۱۸/۷	۲۱/۳۶	۷۴/۶۸	۱۶	۱۹/۷۵	۲۰/۴۴	۷۴/۷۶	۰/۰۸	-۰/۹۲
۲۰	۶/۰۱	۶/۸۶	۶۷/۸۱	۲۰	۶/۲۳	۶/۴۵	۶۸/۳۱	۰/۵۰	-۰/۴۲
۳۰	۱۶/۰۹	۱۸/۳۸	۴۹/۴۳	۳۰	۱۷/۴۷	۱۸/۰۸	۵۰/۲۳	۰/۷۹	-۰/۳۰
۴۰	۳/۷۶	۴/۲۹	۴۵/۱۴	۴۰	۴/۳۲	۴/۴۷	۴۵/۷۶	۰/۶۲	۰/۱۸
۵۰	۷/۷	۸/۷۹	۳۶/۳۴	۵۰	۸/۲۸	۸/۵۷	۳۷/۱۹	۰/۸۴	-۰/۲۳
۷۰	۸/۳۶	۹/۵۵	۲۶/۸۰	۷۰	۹/۵۲	۹/۸۵	۲۷/۳۳	۰/۵۴	۰/۳۰
۱۰۰	۴/۵۷	۵/۲۲	۲۱/۵۸	۱۰۰	۵/۲۴	۵/۴۲	۲۱/۹۱	۰/۳۳	۰/۲۰
۱۴۰	۶/۱۵	۷/۰۲	۱۴/۵۵	۱۴۰	۶/۹۴	۷/۱۸	۱۴/۷۳	۰/۱۸	۰/۱۶
۲۰۰	۴/۲۳	۴/۸۳	۹/۷۲	۲۰۰	۴/۶۲	۴/۷۸	۹/۹۵	۰/۲۳	-۰/۰۵
۲۷۰	۳/۲	۳/۶۶	۶/۰۷	۲۷۰	۳/۷۱	۳/۸۴	۶/۱۱	۰/۰۴	۰/۱۸
۴۰۰	۵/۳۱	۶/۰۷	۰/۰۰	۴۰۰	۵/۹۰	۶/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۴
جمع	۸۷/۵۵			جمع	۹۶/۶۲				

۳-۳-۳ محاسبه چگالی خاک جهت تعیین مقدار نمونه جامد داخل آسیا

همانطور که در شکل (۳-۸ و ۳-۹) پیداست جهت محاسبه چگالی خاک، مقدار ۴۰ گرم نمونه معرف از خاک را با دستگاه پولورایز^۱ پودر نموده و سپس به سه نمونه حدود ۳ گرمی تقسیم و با استفاده از فرمول ذیل، چگالی خاک بدست آمد. مقادیر فرمول ذیل با استفاده از پیکنومتر (جدول ۳-۲) بدست آمد، مقدار

^۱ Pulverizer

نهایی چگالی خاک، متوسط چگالی بدست آمده از سه نمونه خواهد بود. چگالی خاک با توجه به فرمول زیر مقدار ۲/۸۲ گرم بر لیتر بدست آمد.

$$\text{چگالی خاک} = \frac{m_3 - m_1}{(m_2 - m_1) - (m_4 - m_3)}$$

m_1 = وزن خالی پیکنومتر

m_2 = وزن پیکنومتر با آب

m_3 = وزن پیکنومتر با نمونه

m_4 = وزن پیکنومتر به همراه آب و نمونه خاک



شکل ۳-۹: نمایی از پیکنومتر



شکل ۳-۸: دستگاه پولورایز برای پودر کردن نمونه‌ها

جدول ۳-۲: محاسبات بدست آوردن وزن چگالی خاک

چگالی	نمونه	۲/۸۳	۲/۸۴	۲/۷۹
(g/cm^3)	میانگین	۲/۸۲		
	درصد	۰/۳۴	۰/۶۳	۰/۹۷
	تفاوت میانگین			

وزن پیکنومتر	۴۷/۹۲۵		
وزن پیکنومتر و آب	۱۴۷/۳۹۷		
وزن خاک	۳/۰۰۱	۳/۰۰۱	۳/۰۰۱
وزن پیکنومتر و آب و خاک	۱۴۹/۳۴۳	۱۴۹/۳۴۶	۱۴۹/۳۲۹
چگالی	۲/۸۳	۲/۸۴	۲/۷۹
محاسبات	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۷

و در پایان با استفاده از فرمول زیر مقدار جامد داخل آسیا بدست آمد:

$$\text{مقدار جامد داخل آسیا} = \frac{2.3 \text{ (حجم سلول فلوتاسیون)}}{\left(\frac{100 - 28}{2}\right) + \frac{1}{\text{چگالی خاک}}}$$

حجم سلول: ۲/۳ لیتر، چگالی خاک: ۲/۸۲، درصد جامد: ۲۸٪

و با جایگذاری اعداد در فرمول بالا مقدار جامد داخل آسیا ۷۸۶ گرم شد.

در شکل (۳-۱۰) نمونه‌های مورد نظر بعد از مخلوط شدن و همگن‌سازی، به وسیله‌ی تقسیم‌کننده‌ی مجرایی به نمونه‌های ۷۸۶ گرمی تقسیم شد.



شکل ۳-۱۰: تقسیم نمونه‌ها توسط تقسیم‌کننده مجرایی جونز در پاکت

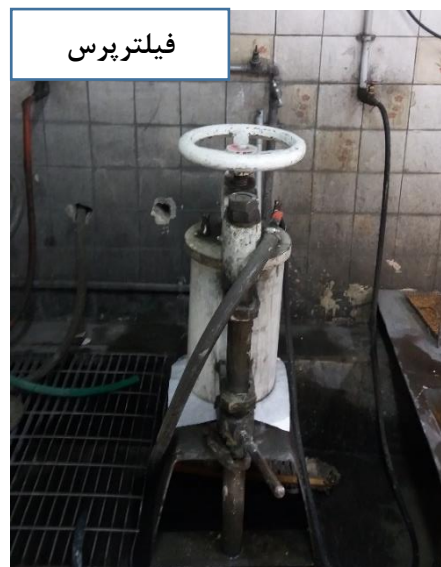
۳-۴ تعیین زمان بهینه خردایش

در شکل (۳-۱۱ و ۳-۱۲) همچنین جدول (۳-۳) پیداست، جهت تعیین زمان خردایش برای مقایسه با شرایط کارخانه برای رسیدن ذرات به زیر هفتاد و چهار میکرون و دیگر دامنه‌های ابعادی مد نظر، ۴ نمونه ۷۸۶ گرمی انتخاب و با آسیای گلوله‌ای آزمایشگاهی در پنج زمان (۴، ۵، ۸، ۱۱) دقیقه مورد خردایش قرار گرفت، از آنجایی که پنج دامنه ابعادی مد نظر قرار داده شده است، باید برای پنج دامنه ابعادی هر کدام به طور مجزا زمان بهینه خردایش بدست آید. دامنه ابعادی مورد نظر: (۱۱، ۳۸، ۵۳، ۷۵، ۱۰۶) میکرون بود.

در اینجا از چهار زمان با سه زمانی که انجام شد، زمان بهینه چهار دامنه ابعادی مد نظر از پنج دامنه ابعادی بدست آمد.



آسیای گلوله‌ای



فیلتر پرس

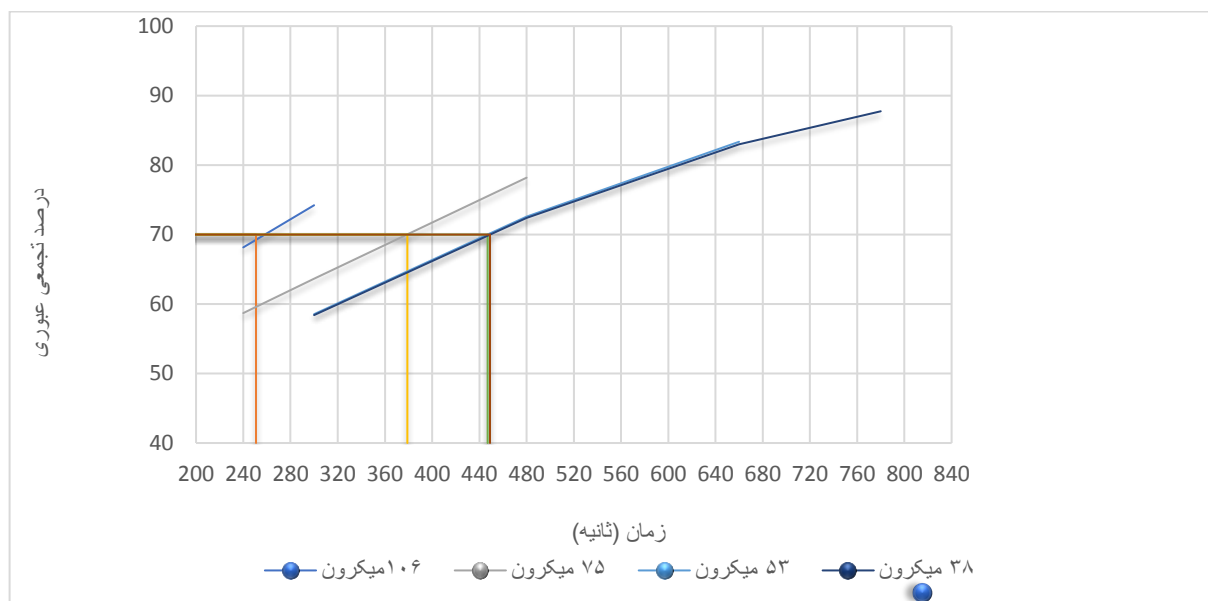


خشک کن برقی



لرزاننده
ضربه‌ای

شکل ۳-۱۱: مراحل مختلف آزمایشگاهی جهت بدست آوردن زمان بهینه خردایش



شکل ۳-۱۲: زمان بهینه فراکسیون‌های ابعادی مختلف

جدول ۳-۳: زمان‌های بهینه دامنه‌های ابعادی مختلف

شماره نمونه	نمونه شماره ۱	نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۳	نمونه شماره ۴
زمان خردایش (دقیقه)	۴	۵	۸	۱۱
دامنه ابعادی	۱۰۶ میکرون	۷۵ میکرون	۵۳ میکرون	۳۸ میکرون
زمان‌های بهینه	۴ دقیقه ۱۸ ثانیه	۶ دقیقه ۱۹ ثانیه	۷ دقیقه ۲۷ ثانیه	۷ دقیقه ۲۹ ثانیه

۳-۴-۱ زمان بهینه ۱۱ میکرون با سیکلوسایزر

همانطور که در شکل‌های (۳-۱۳ و ۳-۱۴) و جدول (۳-۴) پیداست، برای بدست آوردن زمان بهینه

۱۱ میکرون با استفاده از سیکلوسایزر ۵ نمونه را در ۵ زمان مختلف آماده شد. همچنین زمان‌های که

تست سیکلوسایزر زده شد، زمان‌های مورد آزمایش: (۵۰، ۴۰، ۳۰، ۱۵، ۱۳) دقیقه بود.

دامنه‌های ابعادی که دستگاه سیکلوسایزر نشان می‌دهد، (۱۱، ۱۵، ۲۳، ۳۳، ۴۴) میکرون است.

برای کار با دستگاه مد نظر ابتدا نمونه مورد نظر با تقسیم شانه‌ای تقسیم شد. حدوداً بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ گرم از نمونه برداشته شد. توسط سرند ۲۷۰ مش یا همان ۵۳ میکرون شستشو انجام شد. کمتر از ۲۷۰ مش فیلتر شد، و داخل خشک‌کن برقی گذاشته شد. از مقداری که بدست آمده است بین ۴۰ تا ۵۰ گرم داخل دستگاه سیکلوسایزر قرار داده شد. پس از پر کردن مخزن دستگاه با آب شهری، دستگاه روشن شد بعد از آن تمامی ۵ دامنه ابعادی هواگیری‌شان انجام شد. تا نمونه‌ای از تست‌های قبلی باقی نمانده باشد تا خطایی ایجاد کند. در نتیجه ظرف نمونه مد نظر باز شد و حدوداً بین ۱۵ تا ۲۰ دقیقه کار از دامنه‌های ابعادی مختلف عبور کرد در آخر توسط بشر هر دامنه ابعادی خالی شد، داخل کاغذ فیلتر خاص خود گذاشته شد. سپس داخل خشک‌کن برقی خشک شد، نمونه‌ها وزن شد و داخل فایل اکسل گذاشته شد، تا زمان بهینه مد نظر مشاهده شد. در اینجا بین ۳ زمان (۳۰، ۴۰، ۵۰) دقیقه درصدهای عبوری محاسبه شد و میانگین زمان (۳۰، ۴۰) دقیقه با میانگین (۳۰، ۵۰) دقیقه جمع و زمان بهینه خردایش برای ابعاد ۱۱ میکرون بدست آمد.



سیکلوسایزر



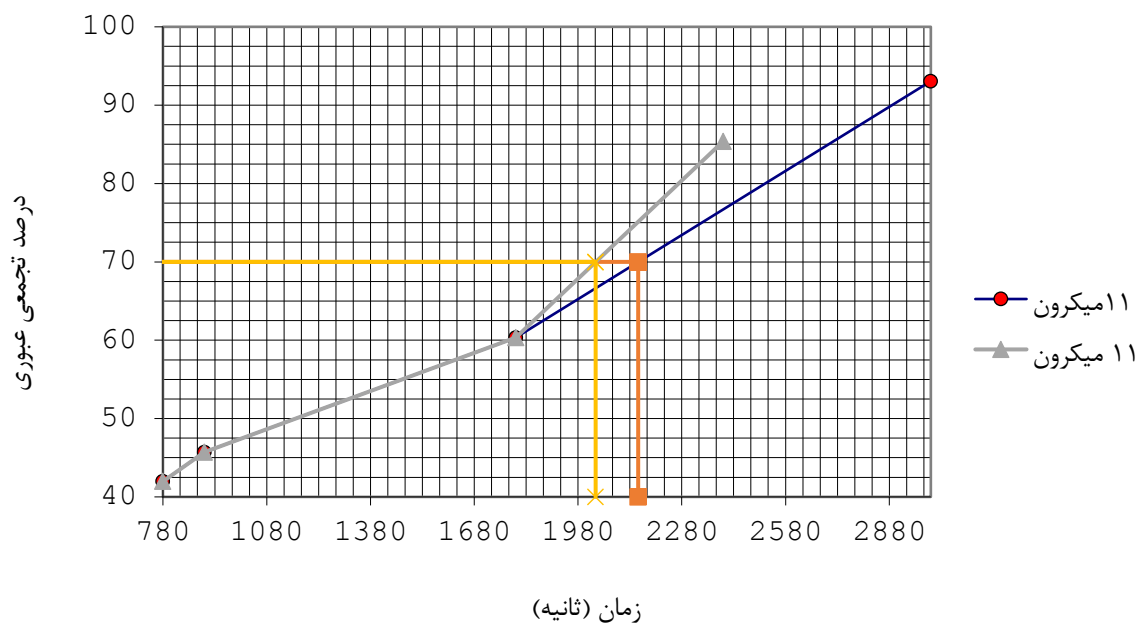
کاغذ فیلتر با استوانه
مدرج و پی‌ست



پنج دامنه ابعادی سیکلوسایزر

شکل ۳-۱۳: مراحل مختلف تست سیکلوسایزر برای دامنه

ابعادی ۱۱ میکرون



شکل ۳-۱۴: زمان بهینه فراکسیون ۱۱ میکرون

جدول ۳-۴: زمان بهینه خردایش برای ابعاد ۱۱ میکرون

شماره نمونه	نمونه شماره ۱	نمونه شماره ۲	نمونه شماره ۳	نمونه شماره ۴	نمونه شماره ۵
زمان خردایش (دقیقه)	۱۳	۱۵	۳۰	۴۰	۵۰
درصد عبوری از ۱۱ میکرون	۴۲	۴۵/۷	۶۰/۳	۸۵/۴	۹۳/۱
زمان بهینه	۳۴ دقیقه و ۵۳ ثانیه				

پس از بدست آوردن زمان‌های بهینه خردایش، نمونه‌ای جهت آنالیز کانی‌شناسی، XRD و XRF به آزمایشگاه مرکزی مجتمع مس سرچشمه ارسال شد.

۳-۵ آنالیز شیمیایی نمونه‌ها

پس از تقسیم و کاهش وزن هر سه سری نمونه، که همگی از یک خاک بودند. برای هر کدام از آن‌ها حدود ۲۵ تا ۳۰ گرم نمونه معرف، طبق روش‌های استاندارد نمونه‌گیری، تهیه شد و جهت آنالیزهای کانی‌شناسی، XRD، XRF به مرکز تحقیقات و توسعه مجتمع مس سرچشمه ارسال گردید.

۳-۵-۱ آنالیز شیمیایی XRF

درصد عناصر و برخی انواع ترکیبات موجود در نمونه به صورت روش آنالیز XRF تعیین شد و نتایج آنالیز نمونه در جدول ۳-۵ آمده است. نتایج حاصل شده بر این قرار است که مقدار مس در خوراک ۰/۶۲ درصد و مقدار اکسید مس ۴/۸۴ درصد است.

جدول ۳-۵: آنالیز XRF کانسنگ مس سولفیدی معدن مس سرچشمه

فرمول شیمیایی	<i>Cu</i>	<i>CuO</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>Fe</i>	<i>S</i>	<i>K₂O</i>	<i>MgO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>
%	۰/۶۲	۰/۰۳	۱۰/۱۰	۷/۰۷	۳/۳۷	۳/۲۷	۲/۱۸	۵۳/۴۳	۱۷/۳۴
فرمول شیمیایی	<i>CaO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>ZnO</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Mo</i>				
%	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۱۰	۰/۸۰	۰/۰۳۰				

۳-۵-۲ آنالیز شیمیایی XRD

همچنین نمونه‌هایی برای آنالیز عیاری و کانی‌شناسی به آزمایشگاه شیمی مجتمع مس سرچشمه ارسال شد و با توجه به نتایج آنالیز XRD، که در جدول (۳-۶) آمده است عمده‌ترین کانی‌های موجود در نمونه، مطابق جدول زیر بود.

جدول ۳-۶: نتایج حاصل از آزمایش XRD

درصد نیمه کمی	ترکیبات موجود در نمونه
۱۴/۱	Quartz
۲۳	Illite
۸/۳	Clinochlore
۳/۹	Albite
۲۶/۵	Muscovite
۹/۴	Chamosite
۹/۵	Pyrite
۵/۲	AmorphH

۳-۵-۳ تحلیل کانی شناسی

داده‌های زیر در جدول (۳-۷) بر اساس نمونه‌ای که پولورایز شده بود بدست آمده است.

جدول ۳-۷: نتایج حاصل از آزمایش کانی شناسی

نوع ترکیب	کالکوسیت	کالکوپیریت	کولیت	مس طبیعی	پیریت
فرمول	Cu_2S	$CuFeS_2$	CuS	Cu	FeS_2
درجه آزادی	-	۸۴/۷۲	۱۰۰	-	۹۳/۲۶
مقدار (/)	۰	۱/۴۵۴	۰/۱۱۳	۰	۱۴/۰۵۲

نمونه‌ی زیر در جدول (۳-۸) با زمان خردایش ۶ دقیقه ۱۹ ثانیه برای درصد تجمعی عبوری $D_{70}=75$ میکرون شرایط کارخانه بدست آمده است.

جدول ۳-۸: نتایج حاصل از آزمایش کانی‌شناسی ۱

نوع ترکیب	کالکوسیت	کالکوپیریت	کولیت	مس طبیعی	پیریت
فرمول	Cu_2S	$CuFeS_2$	CuS	Cu	FeS_2
درجه آزادی	-	۷۷/۳۸	۱۰۰	-	۹۳/۶۲
مقدار(%)	۰	۱/۴۵۴	۰/۰۶۴	۰	۱۳/۵۷۷

۳-۶ بررسی نرمه‌ها در خط فرآوری تغلیظ ۱ مجتمع مس سرچشمه

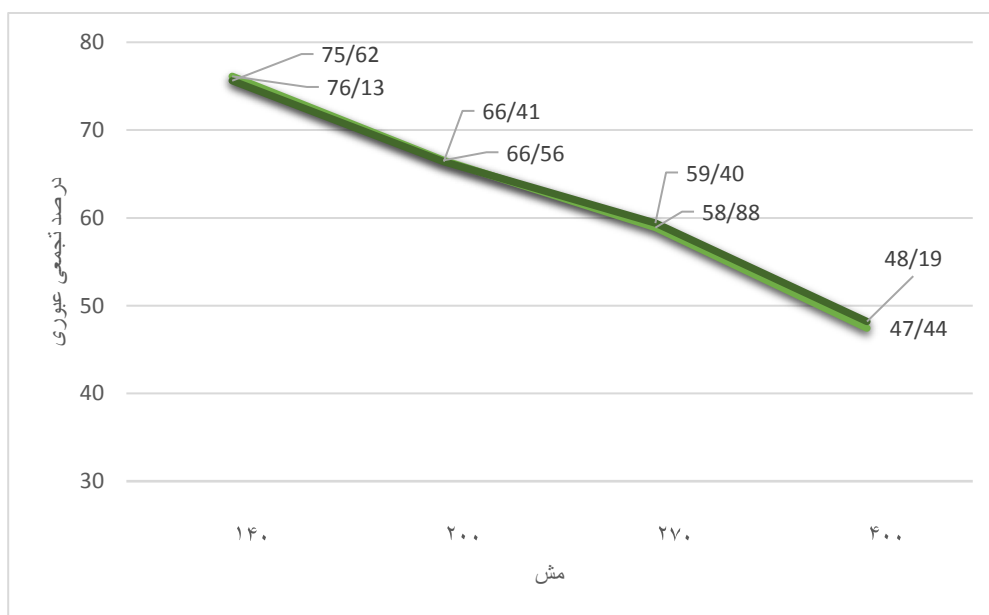
همانطور که در شکل‌های (۳-۱۵ و ۳-۱۶) پیداست، ابتدا به مدت ۵ روز در تاریخ‌های (۱۸، ۱۶، ۱۳، ۱۲، ۱۱) اسفند ماه سال ۱۳۹۹ از سرریزهای هیدروسیکلون چهار آسیا (هر ضلع) که شامل دو ضلع شمال و جنوب کارخانه تغلیظ ۱ مجتمع مس سرچشمه بود نمونه برداری انجام شد. در مجموع با نمونه‌گیری از دو ضلع شمال و جنوب از ۸ سرریز هیدروسیکلون اولیه نمونه‌ی پالپ گرفته شد. بعد توسط فیلترپرس فیلتر شد، داخل خشک‌کن برقی گذاشته شد و با هم مخلوط و همگن شدند و هر ضلع جداگانه دامنه ابعادی آن انجام شد. برای این کار با سرند ۴۰۰ مش شستشو انجام شده و بعد از آن نمونه خشک‌شده با لرزاننده محاسبه شد.

دامنه‌های ابعادی با لرزاننده: (۴۰۰، ۲۷۰، ۲۰۰، ۱۴۰) مش بودند. از آنجایی که هدف بررسی نرمه‌های تغلیظ ۱ در سرریزهای هیدروسیکلون اولیه بود در هر ضلع کارخانه بدست آمد چه مقداری نرمه عبوری وجود داشت. دوباره از همان نمونه‌های ضلع شمال و جنوب تست سیکلوسایزر زده شد تا مقدار نرمه‌های عبوری از ضلع شمال و ضلع جنوب کارخانه تغلیظ ۱ چه قدر بوده است، همانطور که در جدول‌های (۳-۹ و ۳-۱۰) پیداست، با تست مقدار هر کدام انجام شد، شستشو با سرند ۳۲۵ مش

انجام شده است و مقدار درصد عبوری از ضلع جنوب ۳۲/۵۰ درصد و مقدار درصد عبوری از ضلع شمال ۳۰/۵۰ درصد شد.



شکل ۳-۱۵: ضلع شمال و جنوب سرریزهای هیدروسیکلون‌های اولیه تغلیظ ۱



شکل ۳-۱۶: مقدار مواد عبوری مشخص شده از ضلع شمال و جنوب سرریز هیدروسیکلون اولیه تغلیظ ۱

جدول ۳-۹: مقدار نرمه عبوری از ضلع جنوب سر ریز هیدروسیکلون اولیه تغلیظ ۱

عبوری تجمعی (%)	باقی مانده (%)	باقی مانده (g)	میکرون
۱۰۰/۰	۰/۰		۲۱۰
۱۰۰/۰	۰/۰		۱۴۹
۱۰۰/۰	۰/۰		۱۰۵
۱۰۰/۰	۰/۰		۷۴
۴۵/۲	۵۴/۸	۹۴/۰۴	۵۳
۴۴/۹	۰/۳	۰/۵۰	۵۰
۴۳/۱	۱/۸	۲/۹۵	۳۸
۴۰/۶	۲/۵	۴/۱۷	۲۶
۳۶/۶	۴/۰	۶/۵۶	۱۷
۳۲/۵	۴/۲	۶/۹۰	۱۳
۰/۰	۳۲/۵	۵۳/۹۷	-۱۳
	۱۰۰/۰	۱۶۶/۱۰	

محاسبات نهایی		سیکلوسایزر		محاسبات ضرایب	
۰/۵۰	۵۰	۰/۲۷	۴۴	۰/۹۵۲	۲/۸۲
۲/۹۵	۳۸	۱/۵۸	۳۳	۱/۱۴۱	۱۰
۴/۱۷	۲۶	۲/۲۳	۲۳	۰/۹۴۰	۱۵
۶/۵۶	۱۷	۳/۵۱	۱۵	۱/۱۱۷	۱۶۰
۶/۹۰	۱۳	۳/۶۹	۱۱	۱/۱۴۱	f
۵۳/۹۷	-۱۳	۲۸/۸۶	-۱۱	۱۶۶/۱	وزن اولیه
۷۵/۰۶	مجموع +۳۲۵		۴۰/۱۴		وزن سیکلوسایزر

جدول ۳-۱۰: مقدار نرمه عبوری از ضلع شمال سر ریز هیدروسیکلون اولیه تغلیظ ۱

عبوری تجمعی (%)	باقی مانده (%)	باقی مانده (g)	میکرون
۱۰۰/۰	۰/۰		۲۱۰
۱۰۰/۰	۰/۰		۱۴۹
۱۰۰/۰	۰/۰		۱۰۵
۱۰۰/۰	۰/۰		۷۴
۴۶/۵	۵۳/۵	۹۸/۵۱	۵۳
۴۶/۱	۰/۳	۰/۵۸	۵۰
۴۳/۷	۲/۴	۴/۴۷	۳۸
۳۹/۹	۳/۸	۶/۹۳	۲۶
۳۵/۴	۴/۶	۸/۴۱	۱۷
۳۰/۵	۴/۹	۸/۹۷	۱۳
۰/۰	۳۰/۵	۵۶/۱۱	-۱۳
	۱۰۰/۰	۱۸۳/۹۷	

محاسبات نهایی		سیکلوسایزر		محاسبات ضرایب	
۰/۵۸	۵۰	۰/۲۸	۴۴	۰/۹۵۲	۲/۸۲
۴/۴۷	۳۸	۲/۱۶	۳۳	۱/۱۴۱	۱۰
۶/۹۳	۲۶	۳/۳۵	۲۳	۰/۹۴۰	۱۵
۸/۴۱	۱۷	۴/۰۷	۱۵	۱/۱۱۷	۱۶۰
۸/۹۷	۱۳	۴/۳۴	۱۱	۱/۱۴۱	f
۵۶/۱۱	-۱۳	۲۷/۱۴	-۱۱	۱۸۳/۹۷	وزن اولیه
۸۵/۴۶	مجموع ۳۲۵+		۴۱/۳۴		وزن سیکلوسایزر

با استفاده از نمونه آزمایشگاهی $D_{70}=75\mu$ که با استفاده از آسیای گلوله‌ای زمان بهینه آن بدست آمد. همانطور که در جدول (۳-۱۱) پیداست زمان بهینه آن ۶ دقیقه ۱۹ ثانیه بود. تست سیکلوسایزر نیز زده شد و تفاوت ۱۱ میکرون آزمایشگاهی با ضلع شمال و ضلع جنوب سر ریز هیدروسیکلون تغلیظ ۱ مقایسه بررسی شد.

جدول ۳-۱۱: مقدار نرمه عبوری با استفاده از شرایط آزمایشگاهی $D_{70}=75\mu$

عبوری تجمعی (%)	باقی مانده (%)	باقی مانده (g)	میکرون
۱۰۰/۰	۰/۰		۲۱۰
۱۰۰/۰	۰/۰		۱۴۹
۱۰۰/۰	۰/۰		۱۰۵
۱۰۰/۰	۰/۰		۷۴
۴۵/۶	۵۴/۴	۸۳/۹۰	۵۳
۴۵/۴	۰/۲	۰/۳۳	۵۰
۴۴	۱/۵	۲/۲۶	۳۸
۴۰/۴	۳/۶	۵/۴۹	۲۶
۳۵	۵/۴	۸/۳۱	۱۷
۲۹/۵	۵/۵	۸/۴۸	۱۳
۰/۰	۲۹/۵	۴۵/۵۹	-۱۳
	۱۰۰/۰	۱۵۴/۳۶	

محاسبات نهایی		سیکلوسایزر		محاسبات ضرایب	
۰/۳۳	۵۰	۰/۱۹	۴۴	۰/۹۵۲	۲/۸۲
۲/۲۶	۳۸	۱/۳۱	۳۳	۱/۱۴۱	۱۰
۵/۴۹	۲۶	۳/۱۸	۲۳	۰/۹۴۰	۱۵
۸/۳۱	۱۷	۴/۸۱	۱۵	۱/۱۱۷	۱۶۰
۸/۴۸	۱۳	۴/۹۱	۱۱	۱/۱۴۱	f
۴۵/۵۹	-۱۳	۲۶/۴	-۱۱	۱۵۴/۳۶	وزن اولیه
۷۰/۴۶	مجموع ۳۲۵+		۴۰/۸	وزن سیکلوسایزر	

مقدار نرمه عبوری با استفاده از شرایط آزمایشگاهی ۲۹/۵ درصد شد. تفاوت آن با ضلع شمال سرریز هیدروسیکلون تغلیظ ۱ مقدار ۱ درصد شد. همچنین مقدار تفاوت آن با ضلع جنوب سرریز هیدروسیکلون تغلیظ ۱، ۳ درصد شد، در شرایط آزمایشگاهی و واقعی کارخانه این مقدار تفاوت زیاد نیست بنابراین نتیجه بدست آمده قابل قبول است.

۷-۳ مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق

۱- همانطور که در جدول (۱۲-۳) پیداست، برای انجام آزمایش‌ها فلوتاسیون مس سولفیدی از مواد شیمیایی مشخص شده در جدول زیر استفاده شد.

جدول ۱۲-۳: مواد شیمیایی استفاده شده در آزمایش‌ها

ردیف	نوع ماده شیمیایی	نقش ماده شیمیایی	میزان مصرف (g/ton)
۱	C7240	کلکتور	۲۵
۲	Z11	کلکتور	۱۵
۳	گازوئیل	کمک کلکتور	۱۳
۴	MIBC	کفساز	۱۵
۵	A65	کفساز	۱۵
۶	آهک	تنظیم‌کننده pH	بستگی دارد

۸-۳ شرایط ثابت آزمایشگاهی

همانطور که در جدول (۱۳-۳) پیداست، شرایط ثابت اعمال شده در کلیه آزمایش‌های که حالت مقایسه با شرایط کارخانه داشتند در جدول زیر خلاصه شده است.

جدول ۳-۱۳: تجهیزات استفاده شده در آزمایش‌ها

دستگاه فلوتاسیون مکانیکی دنور	سلول ۲/۳۰۰ لیتری دنور
دور روتور	۱۱۰۰ دور بر دقیقه
درصد جامد	۲۸ درصد
وزن نمونه لازم برای هر آزمایش	۷۸۶ گرم
میزان کف‌ساز در هر آزمایش	۳۰ گرم بر تن
میزان کلکتور در هر آزمایش	۴۰ گرم بر تن
زمان آماده‌سازی کف‌ساز	۱ دقیقه
زمان آماده‌سازی کلکتور	۲ دقیقه
زمان کف‌گیری توسط کاربر	۱۲ دقیقه
دما و فشار انجام آزمایش‌ها	محیط
آب مورد استفاده	آب لوله‌کشی شهری

۳-۹ روش انجام آزمایش‌ها

پس از روشن نمودن دستگاه فلوتاسیون مکانیکی دنور و تنظیم دور روتور روی ۱۱۰۰ دور در دقیقه، ۷۸۶ گرم از نمونه پس از رساندن به درصد جامد ۲۸٪ به آرامی به سلول ۲/۳۰۰ لیتری دنور ریخته شد. پس از آن سلول مدنظر را در محل انجام آزمایش فلوتاسیون زیر دستگاه قرار داده، حال دستگاه را روشن کرده و آهک آنقدر به آن اضافه شد، که pH مورد نظر به ۱۱/۸ برسد. بعد از آن کلکتور و کف‌ساز با زمان‌های آماده‌سازی مشخص به سیستم اضافه می‌گردد. لازم به ذکر است که در همه مراحل کنترل pH صورت می‌گیرد. کف فلوتاسیون پس از جمع‌آوری مس توسط کاردک مخصوص فیلتر شده توسط دستگاه خشک‌کن، خشک و سپس توزین گردید. برای محاسبه بازیابی فلوتاسیون کانی‌ها و کارایی جدایش به صورت ترکیبی از رابطه‌های زیر استفاده شد.

$$R = \frac{C c}{F f} \times 100 \quad (3-1)$$

$$SE = \frac{c(f-t)(c-f)(100-t)}{f(c-t)^2(100-f)} \times 100 \quad (3-2)$$

که C، F، c، f و t به ترتیب بیانگر وزن کنسانتره، وزن خوراک، عیار کنسانتره، عیار خوراک و عیار باطله

برای هر فلز می‌باشند که مقادیر موازنه‌شده آن‌ها استفاده شد.

۳-۱۰ محلول نانوحباب

دستگاه نانوحباب‌ساز مورد نظر بر اساس پدیده کاویتاسیون هیدرودینامیکی، در دانشگاه صنعتی شاهرود، تجهیز و ساخته شده است. دستگاه نانوحباب‌ساز از سه بخش اصلی (ورود هوا یا گاز)، اعمال فشار بر مخلوط هوا، آب و منطقه کاهش یا افت فشار و آزادسازی بخشی از هوای حل شده تشکیل می‌شود. هدفی که از ورود هوا به دستگاه نانوحباب‌ساز وجود دارد، افزایش حلالیت میزان هوای حل شده در آب به منظور افزایش کارایی پدیده کاویتاسیون همچنین تولید حباب می‌باشد. در نتیجه هوا یا گاز در این دستگاه قبل از پمپ تزریق شده است. ویژگی ساخت و طراحی این دستگاه، استفاده از چندین مولد هیدرودینامیکی میکرو-نانوحباب با قطر گلوله‌های مختلف به‌طور همزمان وجود دارد در دستگاه نانوحباب‌ساز طراحی شده دانشگاه صنعتی شاهرود از سه مولد استفاده شده است و دیگر ویژگی منحصر به فرد نانوحباب‌های تولید شده توسط این دستگاه، می‌توان به پایداری آن‌ها برای چندین روز (ماه) در آب اشاره کرد [۵۴].

۳-۱۰-۱ اندازه‌گیری ابعاد و توزیع نانوحباب‌ها

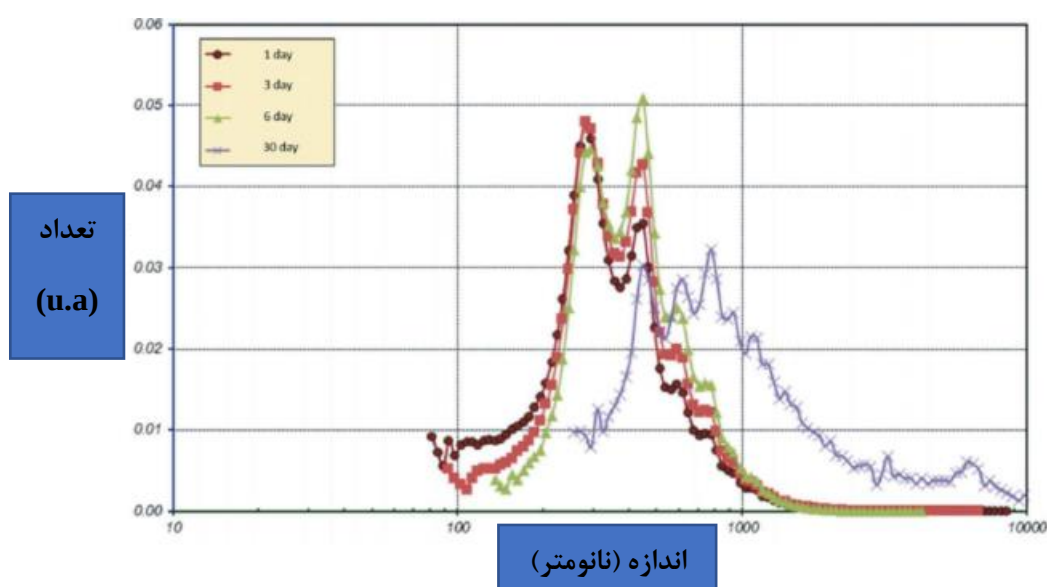
در این تحقیق، برای اندازه‌گیری اندازه ذرات در مایع از روش پراش نور دینامیکی^۱ استفاده شده است. این روش با استاندارد ISO22412 سال ۲۰۰۸ جهت تعیین محدوده‌ی ابعاد ذرات بین ۰/۶ تا ۸ میکرون مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو روش پاد-لاپلاس^۲ و کومولانت برای اندازه‌گیری ابعاد حباب‌ها استفاده می‌شوند که روش کومولانت^۳ دارای نتایج دقیق‌تری است. در روش کومولانت امکان

^۱ Dynamic Light Scattering

^۲ Pade - Laplace

^۳ Cumulants

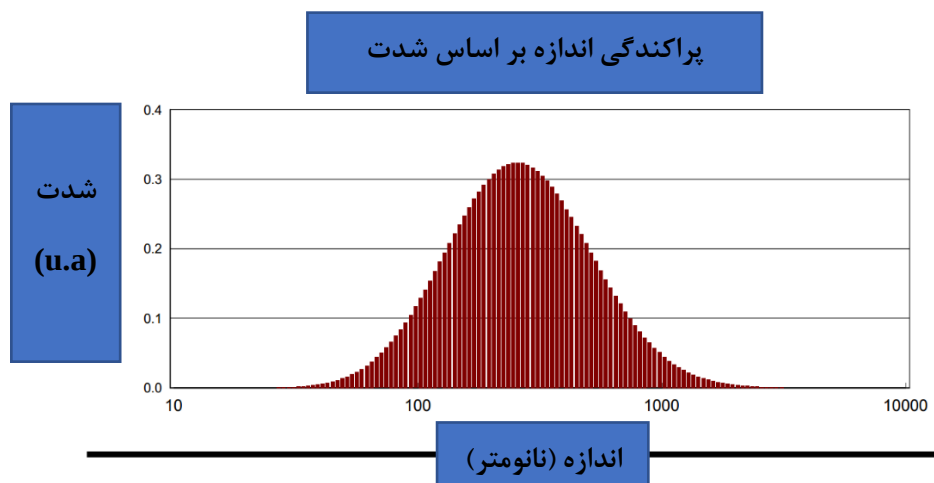
اندازه‌گیری پارامتر میانگین قطر هیدرودینامیکی وجود دارد، با استفاده از طریق شدت نور پخش شده با یک آشکارساز مناسب اندازه‌گیری شده است. شدت نوسان نور پخش شده به طور مستقیم به سرعت نفوذ مولکول در حلال بستگی دارد و همچنین با داشتن لزجت محیط، شدت این نوسانات برای تعیین قطر نمونه استفاده می‌شود. قطر اندازه‌گیری شده با استفاده از این روش قطر هیدرودینامیکی نمونه است که نشان‌دهنده‌ی چگونگی نفوذ ذرات در سیال می‌باشد. [۵۵]



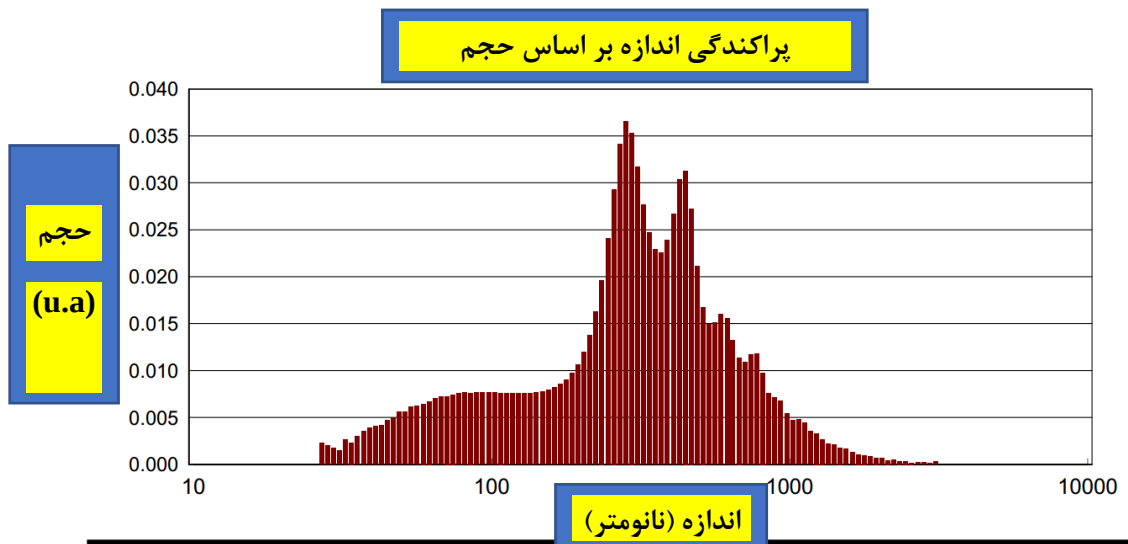
شکل ۳-۱۷: تغییر ابعاد نانوحباب‌ها در گذر زمان [۵۶]

برای تعیین ابعاد نانوحباب‌ها، نمونه‌ی ۱ روزه در دستگاه Nano Particle Size Analyzer قرار داده می‌شود. این دستگاه با روش پراش نور دینامیکی کار می‌کند و همچنین ذرات را در محدوده‌ی ابعادی ۱ نانومتر تا ۶ میکرون اندازه‌گیری می‌کند. روش کومولانت بر اساس ۳ پارامتر تعداد، حجم و شدت نمونه‌ها نتیجه‌گیری می‌کند. برای این آزمایش‌ها ضریب شکست نور برای نانوحباب‌ها ۱/۵۶ و برای آب ۱/۳۳ فرض شد. توزیع ذرات در مقیاس نانو به وسیله‌ی نور لیزر با طول موج ۶۵۷ نانومتر و توان ۵۰ درصد اندازه‌گیری شد. براساس آزمایش‌ها اندازه تقریبی کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین حباب‌ها به ترتیب ۲۶/۹۲ و ۳۰۹۱/۱۱ نانومتر است. شکل‌های ۳-۱۸، ۳-۱۹ و ۳-۲۰، توزیع حباب‌ها را بر اساس

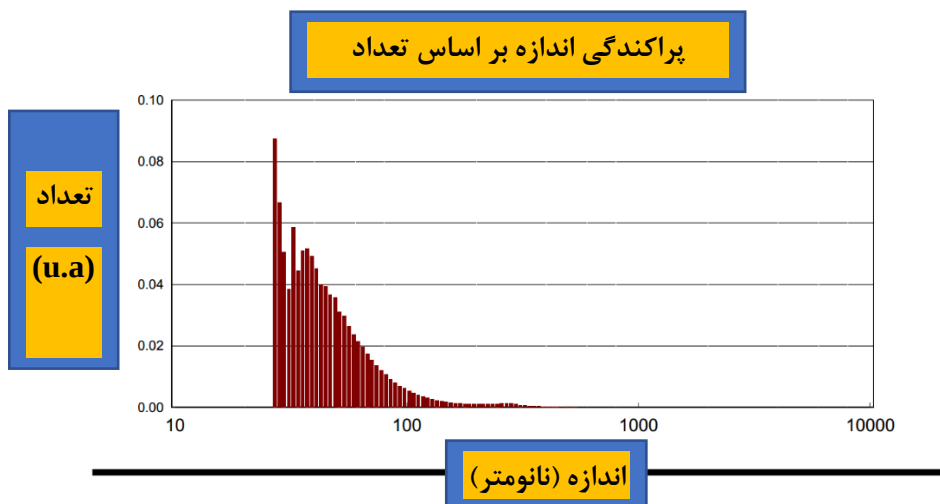
سه پارامتر شدت، حجم و تعداد را نشان می‌دهند. شکل ۳-۱۸ که توزیع نانوحباب‌ها بر اساس شدت است دارای توزیع نرمال بود و شکل ۳-۲۰ توزیع نانوحباب‌ها بر اساس تعداد است که دارای توزیع لاگ نرمال بود.



شکل ۳-۱۸: توزیع نانوحباب‌ها بر اساس شدت



شکل ۳-۱۹: توزیع نانوحباب‌ها بر اساس حجم



شکل ۳-۲: توزیع نانوحباب‌ها بر اساس تعداد

۳-۱۱ طراحی آزمایش‌ها

در بازدهی فرآیند فلوتاسیون، عوامل مختلفی نقش دارند که با معین کردن مقادیر بهینه آن‌ها می‌توان نرخ فلوتاسیون ذرات مد نظر را افزایش داد. بسیاری از این عوامل به طور مجزا عمل نمی‌کنند به همین علت باید تاثیر متقابل آن‌ها نیز مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. این عوامل را می‌توان در قالب ویژگی‌های ذرات (شکل، ابعاد، خاصیت آبرانی، جرم مخصوص، پوشش ذرات نرمه، اکسایش و غیره) کف (ابعاد و شار سطحی حباب‌ها، عمق کف، نرخ هوادهی و غیره) ماشین فلوتاسیون (نوع همزن، شکل سلول، ابعاد و غیره) پالپ (کیفیت آب، دما، خواص هیدرودینامیکی، غلظت و غیره) بررسی و دسته‌بندی نمود [۵۷]

تعداد و سطوح عوامل در نظر گرفته شده، برای آزمایش‌های فلوتاسیون طرح آزمایشی سطح پاسخ با طراحی اولیه مرکب مرکزی در نرم افزار Design Expert 13 (DX13) انتخاب شد. جدول ۳-۱۴ آزمایش‌های طراحی شده و جدول ۳-۱۵ شرایط انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱۴: طراحی آزمایش‌ها به وسیله نرم‌افزار DX۱۳

شماره آزمایش	اجرای آزمایش	معرف ۱	معرف ۲	معرف ۳	معرف ۴	معرف ۵	معرف ۶
		کلکتور	کفساز	pH	اندازه ذرات	درصد جامد	نانوحباب
		g/t	g/t	-	mic	%	-
۱	۱۹	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۰
۲	۳۶	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۰
۳	۴۲	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	۰
۴	۳۹	-۱	-۱	۱	-۱	-۱	۰
۵	۱۶	۱	-۱	۱	-۱	۱	۰
۶	۶	-۱	۱	۱	-۱	۱	۰
۷	۲۸	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	۰
۸	۷	۱	-۱	-۱	۱	۱	۰
۹	۴۹	-۱	۱	-۱	۱	۱	۰
۱۰	۲۹	۱	۱	-۱	۱	-۱	۰
۱۱	۴۴	-۱	۱	۱	۱	-۱	۰
۱۲	۳۸	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۱۳	۳	-۲	۰	۰	۰	۰	۰
۱۴	۴	۲	۰	۰	۰	۰	۰
۱۵	۲۶	۰	-۲	۰	۰	۰	۰
۱۶	۳۲	۰	۲	۰	۰	۰	۰
۱۷	۴۷	۰	۰	-۲	۰	۰	۰
۱۸	۱۱	۰	۰	۲	۰	۰	۰
۱۹	۳۳	۰	۰	۰	-۲	۰	۰
۲۰	۱۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰
۲۱	۲۵	۰	۰	۰	۰	-۲	۰
۲۲	۲۱	۰	۰	۰	۰	۲	۰
۲۳	۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

Run

•	•	•	•	•	•	۴۸	۲۴
•	•	•	•	•	•	۳۵	۲۵
۱	۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۸	۲۶
۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱	۱۴	۲۷
۱	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	۴۶	۲۸
۱	-۱	-۱	۱	-۱	-۱	۴۵	۲۹
۱	۱	-۱	۱	-۱	۱	۴۰	۳۰
۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	۳۷	۳۱
۱	-۱	۱	-۱	-۱	-۱	۵۰	۳۲
۱	۱	۱	-۱	-۱	۱	۴۳	۳۳
۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	۹	۳۴
۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۳۴	۳۵
۱	-۱	۱	۱	۱	-۱	۳۰	۳۶
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۳۷
۱	•	•	•	•	-۲	۲۳	۳۸
۱	•	•	•	•	۲	۱۵	۳۹
۱	•	•	•	-۲	•	۲۲	۴۰
۱	•	•	•	۲	•	۱۷	۴۱
۱	•	•	-۲	•	•	۵	۴۲
۱	•	•	۲	•	•	۱۸	۴۳
۱	•	-۲	•	•	•	۲۴	۴۴
۱	•	۲	•	•	•	۴۱	۴۵
۱	-۲	•	•	•	•	۳۱	۴۶
۱	۲	•	•	•	•	۲۷	۴۷
۱	•	•	•	•	•	۱۲	۴۸
۱	•	•	•	•	•	۱۳	۴۹
۱	•	•	•	•	•	۱	۵۰

جدول ۳-۱۵: شرایط انجام آزمایش به وسیله نرم افزار DX۱۳

پارامترها	سطح ۲	سطح ۱	سطح ۰	سطح -۱	سطح -۲
کلکتور (گرم بر تن)	۵۰	۴۵	۴۰	۲۵	۲۰
کف ساز (گرم بر تن)	۵۰	۴۰	۳۰	۱۵	۱۰
pH	۱۲/۲	۱۲	۱۱/۸	۱۱/۶	۱۱/۴
درصد جامد	۳۲	۳۰	۲۸	۲۶	۲۴
اندازه ذرات (میکرون)	۱۰۶	۵۳	۷۵	۱۱	۳۸
نانوحباب (میلی لیتر)	-	۱	۰	-	-

۳-۱۲ آزمایش فلوتاسیون

تمامی آزمایش‌های فلوتاسیون با استفاده از ماشین مکانیکی مدل دنور با حجم سلول ۲/۳ لیتری استفاده شد.

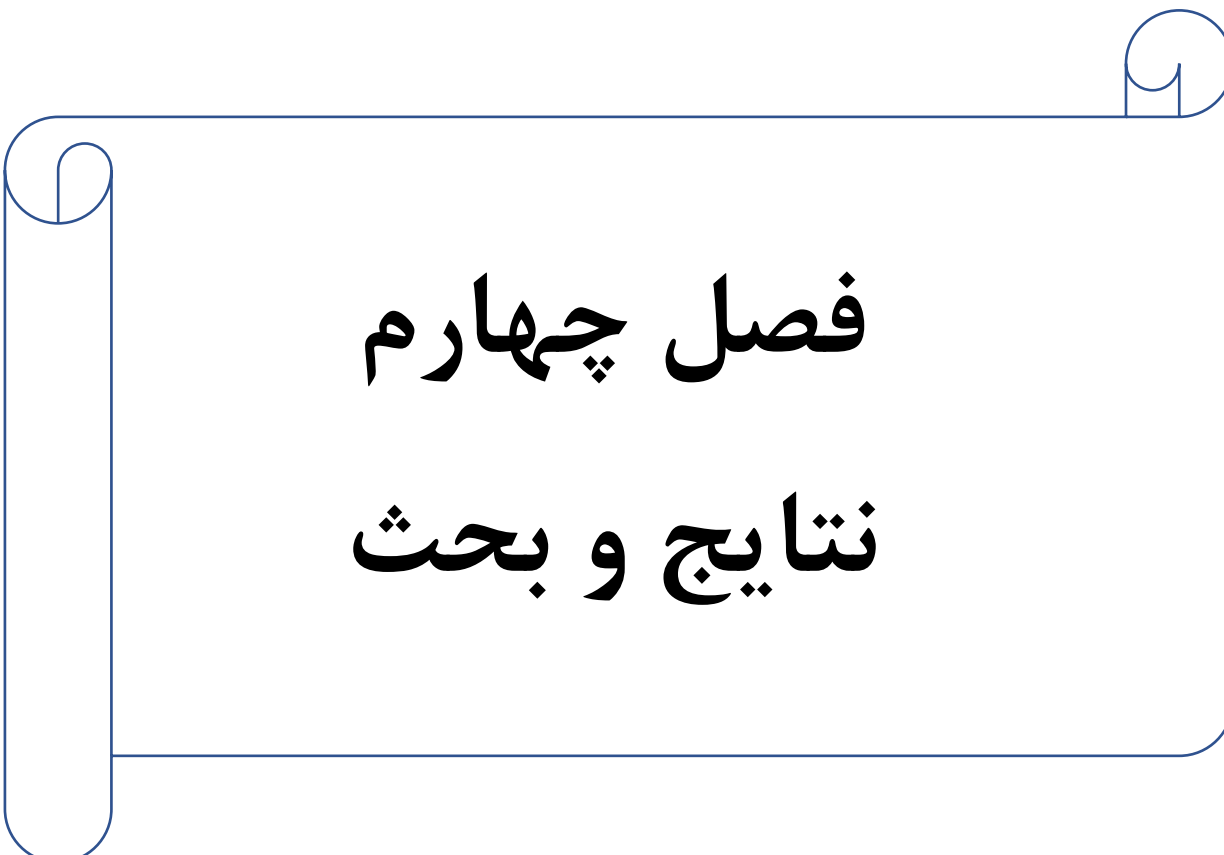
تمامی پارامترها طبق جدول ۳-۱۶ به صورت متغیر و ثابت در نظر گرفته شد.

بر اساس آزمایش‌های طراحی شده با استفاده از نرم افزار DX۱۳، ۲۵ آزمایش با درصد جامدهای متفاوت (شامل نمونه مس سولفیدی و آب معمولی) ۲۵ آزمایش دیگر با همان درصد جامدها (شامل نمونه مس سولفیدی و محلول نانوحباب) تحت شرایط یکسان در نظر گرفته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. شرایط انجام آزمایش‌های فلوتاسیون در جدول ۳-۱۶ ذکر شده است.

جدول ۳-۱۶: شرایط انجام آزمایش‌های فلوتاسیون

کف‌گیری	کف‌سازها	کلکتورها	زمان	پارامترهای
	A65 MIBC	C7240 Z11 F.Oil	آماده‌سازی	اندازه‌گیری شده
۱۲	۱	۲	۵	زمان (دقیقه)

پس از بدست آوردن کنسانتره و باطله، آن را داخل دستگاه خشک کن برقی گذاشته، پس از خشک شدن و توزین نمونه، برای ارزیابی کانی‌ها موجود در کنسانتره و باطله مقدار ۲۰-۲۵ گرم از آن را برای آنالیز به آزمایشگاه مرکزی مس سرچشمه ارسال شد.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rolled-up ends.

فصل چهارم

نتایج و بحث

۱-۴ مقدمه

فلوتاسیون در فرآیند جداسازی فیزیکی برای فرآوری مواد معدنی، کاربردهای زیادی دارد. فرآیند فلوتاسیون به علت کارایی جداسازی مناسب همچنین صرفه اقتصادی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در تحقیق‌های سال‌های اخیر انجام شده است، استفاده از نانوحباب در جداسازی فلوتاسیون ذرات نرمه و درشت کارایی مناسبی داشته است. نانوحباب‌ها همچنین به عنوان کلکتور ثانویه عمل نموده و باعث بهبود احتمال چسبندگی و به حداقل رساندن نیاز به معرف‌های شیمیایی آبران کننده می‌شوند که همین امر باعث بالا رفتن بازیابی می‌شود.

۲-۴ طراحی آزمایش‌ها

در اینجا میزان مصرف هر یک از مواد شیمیایی با استفاده از طرح آزمایشی سطح پاسخ از نوع مرکب مرکزی طراحی شده، تا در انتها نحوه تغییر عوامل و میزان مصرف بهینه مواد شیمیایی تعیین شود. سپس بازیابی، عیار و کارایی جدایش به عنوان سه پاسخ این طراحی در نظر گرفته شد. بعد از وارد کردن پارامترها و سطوح آن‌ها، نرم افزار DX۱۳، تعداد ۵۰ آزمایش پیشنهاد نمود. جدول ۱-۴ طراحی آزمایش سطح پاسخ را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۴: طراحی آزمایش سطح پاسخ

شماره آزمایش	اجرای آزمایش	معرف ۱	معرف ۲	معرف ۳	معرف ۴	معرف ۵	معرف ۶	پاسخ ۱	پاسخ ۲	پاسخ ۳
		کلکتور	کف‌ساز	pH	اندازه ذرات	درصد جامد	نانوحباب	بازیابی	عیار	بازدهی جدایش
		g/t	g/t	-	mic	%	-	%	%	%
۱	۱۹	۲۵	۱۵	۱۱/۶	۱۱	۳۰	۰	۸۵/۸	۵/۰۱	۷۶/۹۲
۲	۳۶	۴۵	۱۵	۱۱/۶	۱۱	۲۶	۰	۹۲/۲	۳/۱۲	۷۵/۶۶
۳	۴۲	۲۵	۴۰	۱۱/۶	۱۱	۲۶	۰	۹۲/۲	۳/۲۴	۷۵/۲۵
۴	۳۹	۲۵	۱۵	۱۲	۱۱	۲۶	۰	۸۶	۴/۵۹	۷۶/۲۱

۸۶/۶	۸/۳	۹۲/۶	.	۳۰	۱۱	۱۲	۱۵	۴۵	۱۶	۵
۶۹/۰۱	۲/۳۴	۹۰/۴	.	۳۰	۱۱	۱۲	۴۰	۲۵	۶	۶
۶۵/۵۶	۳/۷	۷۵/۱	.	۲۶	۵۳	۱۱/۶	۱۵	۲۵	۲۸	۷
۶۳/۶۹	۳/۳	۷۴/۲	.	۳۰	۵۳	۱۱/۶	۱۵	۴۵	۷	۸
۷۳/۷	۳/۹۳	۸۴/۹	.	۳۰	۵۳	۱۱/۶	۴۰	۲۵	۴۹	۹
۸۱/۰۲	۵/۳۸	۹۰/۱	.	۲۶	۵۳	۱۱/۶	۴۰	۴۵	۲۹	۱۰
۸۳/۹۵	۸/۳۱	۸۹/۶	.	۲۶	۵۳	۱۲	۴۰	۲۵	۴۴	۱۱
۸۰/۳۶	۵/۷۶	۸۸/۶	.	۲۶	۵۳	۱۲	۴۰	۴۵	۳۸	۱۲
۸۰/۸۷	۱۰/۵۱	۸۴/۹	.	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۲۰	۳	۱۳
۷۸/۱۸	۷/۵۹	۸۳/۸	.	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۵۰	۴	۱۴
۷۱/۳۷	۷/۴۶	۷۶/۲	.	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۱۰	۴۰	۲۶	۱۵
۷۷/۵۸	۵/۴۸	۸۵/۷	.	۲۸	۷۵	۱۱/۴	۵۰	۴۰	۳۲	۱۶
۷۵/۰۱	۴/۵۶	۸۴/۶	.	۲۸	۷۵	۱۲/۲	۳۰	۴۰	۴۷	۱۷
۸۱/۶۷	۹/۰۶	۸۶/۶	.	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۱۱	۱۸
۷۷/۱۸	۵/۱۹	۸۵/۸	.	۲۸	۳۸	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۳۳	۱۹
۷۸/۸۹	۶/۷۶	۸۵/۴	.	۲۸	۱۰۶	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۱۰	۲۰
۸۲/۳۴	۶/۳۹	۸۹/۹	.	۲۴	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۲۵	۲۱
۷۸/۳۴	۵/۱۷	۸۷/۲	.	۳۲	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۲۱	۲۲
۸۲/۳۷	۷/۹۲	۸۸/۲	.	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۲۰	۲۳
۷۸/۴۳	۵/۲۳	۸۷/۳	.	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۴۸	۲۴
۷۸/۴۸	۶/۳	۸۵/۵	.	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۳۵	۲۵
۷۵/۷۶	۴/۳۶	۸۶/۱	۱	۳۰	۱۱	۱۱/۶	۱۵	۲۵	۸	۲۶
۸۶/۸۲	۸/۶۳	۹۲/۶	۱	۲۶	۱۱	۱۱/۶	۱۵	۴۵	۱۴	۲۷
۷۲/۶	۵/۴۲	۷۹/۷	۱	۲۶	۱۱	۱۱/۶	۴۰	۲۵	۴۶	۲۸
۸۰/۳	۶/۹	۸۶/۸	۱	۲۶	۱۱	۱۲	۱۵	۲۵	۴۵	۲۹
۸۶/۸۴	۸/۶۶	۹۲/۶	۱	۳۰	۱۱	۱۲	۱۵	۴۵	۴۰	۳۰
۷۹/۰۱	۶/۹	۸۵/۳	۱	۳۰	۱۱	۱۲	۴۰	۲۵	۳۷	۳۱
۶۶/۹۱	۴/۷	۷۴/۱	۱	۲۶	۵۳	۱۱/۶	۱۵	۲۵	۵۰	۳۲

۶۴/۸۶	۵/۲۸	۷۱/۱	۱	۳۰	۵۳	۱۱/۶	۱۵	۴۵	۴۳	۳۳
۷۶/۲۹	۶/۷۵	۸۲/۵	۱	۳۰	۵۳	۱۱/۶	۴۰	۲۵	۹	۳۴
۸۱/۴	۸/۵۳	۸۶/۶	۱	۲۶	۵۳	۱۱/۶	۴۰	۴۵	۳۴	۳۵
۸۵/۱۵	۱۰/۷۲	۸۹/۵	۱	۲۶	۵۳	۱۲	۴۰	۲۵	۳۰	۳۶
۸۱/۷۲	۷/۰۶	۸۸/۳	۱	۲۶	۵۳	۱۲	۴۰	۴۵	۲	۳۷
۸۱/۸۱	۹/۳۵	۸۶/۵	۱	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۲۰	۲۳	۳۸
۷۹/۲۱	۷/۱۷	۸۵/۳	۱	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۵۰	۱۵	۳۹
۷۱/۶۳	۸/۰۸	۷۶/۲	۱	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۱۰	۴۰	۲۲	۴۰
۷۶/۹۹	۶/۰۶	۸۴/۱	۱	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۵۰	۴۰	۱۷	۴۱
۸۱/۴۵	۶/۷۵	۸۸/۳	۱	۲۸	۷۵	۱۱/۴	۳۰	۴۰	۵	۴۲
۷۹/۵۷	۷/۷	۸۵/۲	۱	۲۸	۷۵	۱۲/۲	۳۰	۴۰	۱۸	۴۳
۷۹/۴۸	۶/۰۵	۸۷	۱	۲۸	۳۸	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۲۴	۴۴
۷۳/۵۲	۴/۳۶	۸۳/۲	۱	۲۸	۱۰۶	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۴۱	۴۵
۷۶/۶	۵/۶۹	۸۴/۲	۱	۲۴	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۳۱	۴۶
۷۹/۸۴	۶/۴	۸۶/۹	۱	۳۲	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۲۷	۴۷
۷۸/۸۱	۵/۵	۸۷/۱	۱	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۱۲	۴۸
۸۱/۰۸	۵/۶۷	۸۸/۸	۱	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۱۳	۴۹
۷۸/۴	۶/۲۱	۸۵/۵	۱	۲۸	۷۵	۱۱/۸	۳۰	۴۰	۱	۵۰

۳-۴ انتخاب مدل مناسب برای بازیابی مس

جدول ۲-۴: انتخاب مدل مناسب برای بازیابی مس

نوع مدل	Model p-value	Lack of fit p-value	Adjusted R^2	
مدل طراحی شده	۰/۰۴۷۶	۰/۰۱۲۰	۰/۶۳۶۴	
فاکتور خطی	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۷۳	۰/۲۷۱۹	
فاکتور دوتایی	۰/۰۲۴۱	۰/۰۱۶۱	۰/۵۰۶۱	
معادله درجه دوم	۰/۰۰۱۶	۰/۰۵۷۷	۰/۷۲۹۲	پیشنهادی
معادله درجه سوم	۰/۰۵۷۷	-	۰/۹۲۳۹	صرف نظر

مدل‌های مختلفی شامل: مدل اثر متقابل دو پارامتر ($2FI$)، خطی، درجه سوم و دوم بر روی داده‌های آزمایشگاهی مورد نظر برازش شدند. با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) در سطح اعتماد ۹۵٪ (مقدار احتمال کمتر از ۰/۰۵) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. همانگونه که مشاهده شد مدل چندجمله‌ای دارای ضریب تعیین (R^2) و ضریب تعیین تعدیل‌شده ($Adjusted R^2$) بالاتری نسبت به سایر مدل‌های دیگر برای پیش‌بینی میزان بازیابی مس است. همچنین میزان احتمال p مدل درجه دوم برازش شده در سطح اعتماد ۹۵ درصد برابر ۰/۰۰۱۶ و نشان‌دهنده برازش مناسب مدل است. جدول ۳-۴ شاخص‌هایی مانند میانگین در مقایسه با مجموع (Mean vs Total)، مدل خطی در مقایسه با میانگین (Linear vs Mean)، مدل $2FI$ در مقایسه با خطی (2FI vs Linear)، مدل درجه دوم در مقایسه با $2FI$ (Quadratic vs 2FI)، مدل درجه سوم در مقایسه با درجه دوم (Cubic vs Quadratic)، باقی‌مانده و کل را به عنوان منبع نشان می‌دهد. همچنین مقادیر میانگین مربعات، مجموع مربعات، درجه آزادی (P-value) و (F-value) آن‌ها به وسیله نرم‌افزار محاسبه شد. P-value، احتمال دیدن F-value، مشاهده شده بطوریکه بیان می‌کند چه اندازه احتمال دارد که مقدار عدد F بزرگ‌تری به دلیل تاثیر اغتشاشات به وجود آمده باشد. F-value، بدست می‌آید که از تقسیم میانگین مربعات هر مدل بر میانگین مربعات باقی‌مانده بدست می‌آید. یک نکته که در اینجا حائز اهمیت است مقدار عددی F-value، برخلاف عدد P-value، هر چه عددش بیشتر باشد بهتر است. در اینجا نرم‌افزار با استفاده از مقدار (F-value) و (P-value) مدل پیشنهادی که ارائه می‌دهد، مدل درجه دوم در مقایسه با $2FI$ است. در آخر نیز نرم‌افزار از معادله مدل درجه سوم در مقایسه با درجه دوم صرفه‌نظر نموده است.

جدول ۳-۴: مدل متوالی مجموع مربعات

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value	
میانگین در مقایسه با مجموع	۳/۶۵۷E+۰۵	۱	۳/۶۵۷E+۰۵			
مدل خطی در مقایسه با میانگین	۴۳۴/۳۶	۶	۷۲/۳۹	۴/۰۵	۰/۰۰۲۶	
مدل ۲FI در مقایسه با خطی	۴۲۹/۱۱	۱۵	۲۸/۶۱	۲/۳۶	۰/۰۲۴۱	
مدل درجه دوم در مقایسه با ۲FI	۱۸۶/۵۶	۵	۳۷/۳۱	۵/۶۱	۰/۰۰۱۶	پیشنهاد شده
مدل درجه سوم در مقایسه با درجه دوم	۱۴۳/۵۸	۱۸	۷/۹۸	۴/۲۷	۰/۰۵۷۷	صرف نظر
باقی مانده	۹/۳۵	۵	۱/۸۷			
مجموع	۳/۶۶۹E+۰۵	۵۰	۷۳۳۸/۷۶			

جدول ۴-۴: خلاصه‌ای از مدل آماری

منبع	انحراف معیار	R^2	Adjusted R^2	Predicted R^2	PRESS	
خطی	۴/۲۳	۰/۳۶۱۱	۰/۲۷۱۹	۰/۱۰۶۳	۱۰۷۵/۱۲	
دوتایی	۳/۴۸	۰/۷۱۷۸	۰/۵۰۶۱	۰/۰۲۸۴	۱۱۶۸/۷۹	
معادله درجه دوم	۲/۵۸	۰/۸۷۲۹	۰/۷۲۹۲	۰/۲۱۷۵	۹۴۱/۲۶	پیشنهادی
معادله درجه سوم	۱/۳۷	۰/۹۹۲۲	۰/۹۲۳۹		*	صرف نظر

۴-۴ آنالیز واریانس برای بازیابی مس

آنالیز واریانس (ANOVA)، یک روش آماری معمول برای تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها است و سهم تاثیر هر پارامتر بر مشخصه کیفی پاسخ را تعیین می‌کند. همچنین این عوامل با تاثیرهای اصلی هر پارامتر بدست می‌آیند. در ضمن مشخصه‌های کیفی نیز با پیدا کردن یک حد پایین و یک حد بالا برای عوامل تاثیرگذار بر کیفیت، کنترل می‌شوند. در ضمن نتیجه سطح‌های موثر بر عوامل برای بدست آوردن بهترین نتیجه، پیش‌بینی شده‌اند. مفاهیم آماری جدول آنالیز واریانس (ANOVA)، مانند: میانگین مربعات، مجموع مربعات، نسبت واریانس برای تمامی عوامل‌ها و هر سطح پاسخ در نرم‌افزار محاسبه شدند. در اینجا اطمینان ۹۵٪ برای سطح پاسخ در نظر گرفته شد. برای آزمایش‌ها، در قسمت (ANOVA)، مقادیر ارزش احتمال کوچک‌تر از (۰/۰۵) این را نشان می‌دهد که پارامترهای مد نظر معنی‌دار هستند. مقدار (F-value)، در اینجا برابر با ۶/۰۷ است. این را نشان داد که مدل معنی‌دار است. همچنین مقادیر (P-value)، کمتر از (۰/۰۵) این را نشان می‌دهد که عبارات مدل معنی‌دار هستند. در این آزمایش: پارامترهای (A, B, AB, AD, AE, BD, BE, BF, CD, CE, DE, A², B², D²)، مدل معنی‌دار هستند. اگر مقادیر بیشتر از (۰/۱) بودند، این را نشان می‌دهد که پارامترهای معنی‌دار نیستند. مقدار (Lack of Fit) عدد (۴/۲۷) را نشان داد و بدان معناست که عدم تناسب نسبت به خطای خالص بی‌معنی می‌باشد. (۵/۷۷٪) نیز احتمال دارد که کمبود (Lack of Fit)، به دلیل اغتشاشات ایجاد شود. در آخر

نیز عدم تناسب خوب است زیرا مدل ما باید متناسب باشد. جدول (۴-۵) آنالیز واریانس برای بازیابی مس را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۵: آنالیز واریانس برای بازیابی مس

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value	
مدل	۱۰۵۳/۰۳	۲۶	۴۰/۳۹	۶/۰۷	<۰/۰۰۰۱	معنی‌دار
A- کلکتور	۷۲/۲۸	۱	۷۲/۲۸	۱۰/۸۷	۰/۰۰۳۲	
B- کفساز	۳۹/۶۰	۱	۳۹/۶۰	۵/۹۶	۰/۰۲۲۸	
C- pH	۴۳/۰۵	۱	۴۳/۰۵	۶/۴۷	۰/۰۱۸۱	
D- اندازه ذرات	۴/۲۲	۱	۴/۲۲	۰/۰۶۳۳۹	۰/۴۳۴۱	
E- درصد جامد	۱/۷۰	۱	۱/۷۰	۰/۲۵۶۱	۰/۶۱۷۶	
F- نانوحباب	۱۸/۷۵	۱	۱۸/۷۵	۲/۸۲	۰/۱۰۶۶	
AB	۸۲/۳۷	۱	۸۲/۳۷	۱۲/۳۹	۰/۰۰۱۸	
AC	۲۵/۹۲	۱	۲۵/۹۲	۳/۹۰	۰/۰۶۰۵	
AD	۴۰/۶۷	۱	۴۰/۶۷	۶/۱۲	۰/۰۲۱۲	
AE	۱۳۹/۵۲	۱	۱۳۹/۵۲	۲۰/۹۸	۰/۰۰۰۱	
AF	۰/۱۵۴۱	۱	۰/۱۵۴۱	۰/۰۲۳۲	۰/۸۸۰۳	
BC	۲۴/۹۹	۱	۲۴/۹۹	۳/۷۶	۰/۰۶۴۹	
BD	۱۶۴/۰۴	۱	۱۶۴/۰۴	۲۴/۶۴	<۰/۰۰۰۱	
BE	۱۱۷/۴۴	۱	۱۱۷/۴۴	۱۷/۶۶	۰/۰۰۰۳	
BF	۲۹/۳۴	۱	۲۹/۳۴	۴/۴۱	۰/۰۴۶۸	
CD	۸۶/۲۵	۱	۸۶/۲۵	۱۲/۹۷	۰/۰۰۱۵	
CE	۱۰۸/۶۴	۱	۱۰۸/۶۴	۱۶/۳۴	۰/۰۰۰۵	
CF	۱۲/۲۲	۱	۱۲/۲۲	۱/۸۴	۰/۱۸۸۴	
DE	۱۰۶/۷۶	۱	۱۰۶/۷۶	۱۶/۰۶	۰/۰۰۰۶	
DF	۹/۷۸	۱	۹/۷۸	۱/۴۷	۰/۲۳۷۶	

EF	۲/۷۰	۱	۲/۷۰	۰/۴۰۶۲	۰/۵۳۰۲	
A^2	۴۱/۳۳	۱	۴۱/۳۳	۶/۲۲	۰/۰۲۰۳	
B^2	۱۴۴/۶۴	۱	۱۴۴/۶۴	۲۱/۷۵	۰/۰۰۰۱	
C^2	۳/۵۸	۱	۳/۵۸	۰/۵۳۸۷	۰/۴۷۰۴	
D^2	۳۰/۲۸	۱	۳۰/۲۸	۴/۵۵	۰/۰۴۳۷	
E^2	۳/۷۴	۱	۳/۷۴	۰/۵۶۲۲	۰/۴۶۱۰	
Residual	۱۵۲/۹۳	۲۳	۶/۶۵			
Lack of Fit	۱۴۳/۵۸	۱۸	۷/۹۸	۴/۲۷	۰/۰۵۷۷	بی معنی
Pure Error	۹/۳۵	۵	۱/۸۷			
Cor Total	۱۲۰۲/۹۶	۴۹				

۴-۵ مشخصات آماری نتایج

R^2 ، هر چه به عدد ۱ نزدیک تر باشد بهتر است، که در اینجا ۰/۸۷۲۹ بدست آمد که نسبت به آمار، قابل قبول است. Adeq Precision، این پارامتر نشاندهنده مقدار سیگنال به اغتشاش است. محدوده مقادیر پیش‌بینی شده در نقطه‌های طراحی به خطای متوسط پیش‌بینی را قیاس می‌کند. نسبت بیشتر از عدد ۴ مطلوب است، که در اینجا عدد ۱۰/۶۳۳۶ بدست آمده که نشاندهنده سیگنال کافی می‌باشد. $Predicted R^2$ ، پارامتری است که مقدار مطلوبیت مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله مدل را بیان می‌کند. $Adjusted R^2$ ، این پارامتر ضریب همبستگی فاکتورهای مدل نسبت به مقادیر طراحی شده یا حقیقی است. همانطور که پیداست در آخر از این مدل می‌توان برای پیمایش در فضای طراحی استفاده کرد.

۴-۶ معادله ارائه شده برای بازیابی مس

معادله بدست آمده را می‌توان از منظر معرف‌های واقعی برای پیش‌بینی پاسخ در مورد سطوح معین هر پارامتر استفاده کرد. در اینجا، باید سطح‌ها در واحدهای اصلی برای هر پارامتر مشخص شود. نباید از این معادله برای

تعیین تاثیر نسبی هر پارامتر استفاده شود. به علت اینکه ضرایب برای جا دادن واحدهای هر پارامتر دسته‌بندی می‌شوند، همچنین رهگیری در مرکز فضای طراحی نیست.

معادله ارائه شده برای بازیابی مس بدون حضور نانوحباب:

Nano Bubble 0

$$+3521.08982 + 0.094950 \text{ Collector} + 0.303729 \text{ Frother} - 241.75701 \text{ pH} + 6.04623 \text{ Particle Size} - 157.51643 \text{ Solid Percent} - 0.038936 \text{ Collector} * \text{Frother} + 0.859303 \text{ Collector} * \text{pH} + 0.011993 \text{ Collector} * \text{Particle Size} - 0.311562 \text{ Collector} * \text{Solid percent} + 0.635377 \text{ Frother} * \text{pH} + 0.021957 \text{ Frother} * \text{Particle Size} - 0.230116 \text{ Frother} * \text{Solid percent} - 0.797915 \text{ pH} * \text{Particle Size} + 14.71729 \text{ pH} * \text{Solid percent} + 0.092724 \text{ Particle Size} * \text{Solid percent} - 0.019219 \text{ Collector}^2 - 0.017672 \text{ Frother}^2 - 7.15994 \text{ pH}^2 - 0.002582 \text{ Particle Size}^2 - 0.071798 \text{ Solid percent}^2$$

معادله ارائه شده برای بازیابی مس در حضور نانوحباب:

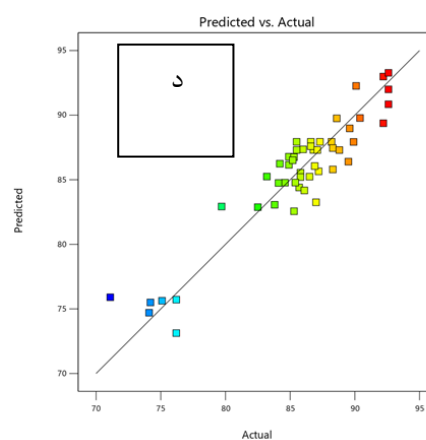
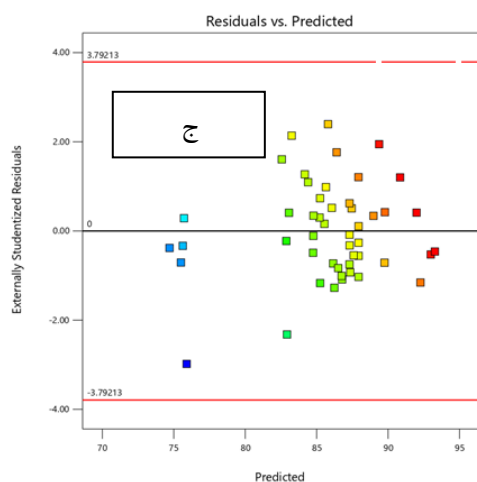
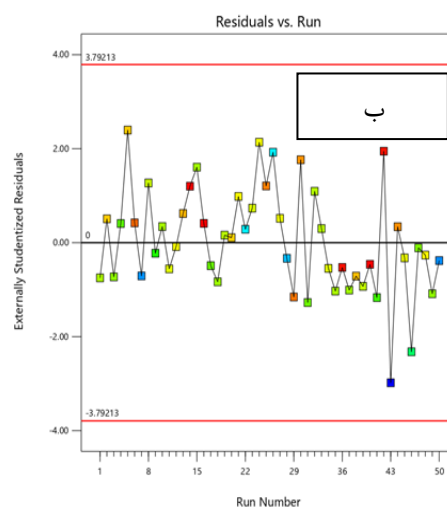
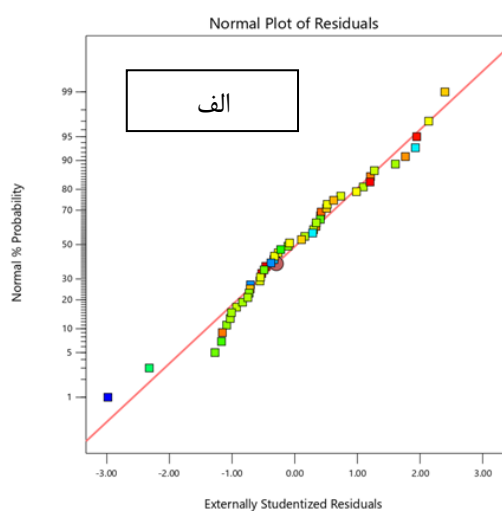
Nano Bubble 1

$$+3444.57085 + 0.108762 \text{ Collector} + 0.142608 \text{ Frother} - 235.81266 \text{ pH} + 6.08185 \text{ Particle Size} - 157.25404 \text{ Solid percent} - 0.038936 \text{ Collector} * \text{Frother} + 0.859303 \text{ Collector} * \text{pH} + 0.011993 \text{ Collector} * \text{Particle Size} - 0.311562 \text{ Collector} * \text{Solid percent} + 0.635377 \text{ Frother} * \text{pH} + 0.021957 \text{ Frother} * \text{Particle Size} - 0.230116 \text{ Frother} * \text{Solid percent} - 0.797915 \text{ pH} * \text{Particle Size} + 14.71729 \text{ pH} * \text{Solid percent} + 0.092724 \text{ Particle Size} * \text{Solid percent} - 0.019219 \text{ Collector}^2 - 0.017672 \text{ Frother}^2 - 7.15994 \text{ pH}^2 - 0.002582 \text{ Particle Size}^2 - 0.071798 \text{ Solid percent}^2$$

۴-۷ اعتبارسنجی مدل

بعد از بررسی‌های اولیه صحت مدل، اینک با استفاده از بررسی باقی‌مانده که دارای توزیع نرمال می‌باشد. مدل نهایی اعتبارسنجی شد. در شکل‌های زیر، نمودارهای احتمال نرمال باقی‌مانده (اختلاف میان مقدارهای پیش‌بینی مدل و واقعی، (شکل ۴-۱ الف)، مقدار باقی‌مانده محاسبه شده با استفاده از توزیع t-student در مقابل شماره آزمایش‌ها (شکل ۴-۱ ب) همچنین پیش‌بینی (شکل ۴-۱ ج) و مقدارهای پیش‌بینی شده بازیابی مس در مقابل مقدارهای اندازه‌گیری شده (شکل ۴-۱ د) به منظور واریسی دقیق‌تر صحت مدل ارائه شده و نتایج بدست آمده از مدل استفاده شد. همانگونه که در (شکل ۴-۱ الف)، مشاهده شد، تمام باقی‌مانده‌ها تقریباً در امتداد یک خط راست واقع شدند. در اصل کمتر بودن فاصله نقاط با خط بیانگر تصادفی بودن مقدارهای

باقی‌مانده‌ها، تبعیت کردن آن‌ها از یک تابع نرمال و نهایتاً نشان از دقت مدل پیشنهادی است. از طرفی در (شکل ۴-۱ ب و شکل ۴-۱ ج)، اگر باقی‌مانده محاسبه شده از خطوط حدی مشخص شده در پایین و بالا که توسط آزمون t محاسبه می‌شود تجاوز کند پاسخ اندازه‌گیری شده از لحاظ آماری به عنوان خارج از رده شناخته می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود هیچ یک از داده‌ها خارج از رده نیستند و (شکل ۴-۱ د) نشان می‌دهد که مدل می‌تواند حدود ۹۳ درصد تغییرپذیری در پاسخ (بازیابی مس) را بیان کند.



شکل ۴-۱: نمودارهای آماری برای تحلیل صحت مدل پیشنهادی

۸-۴ مقایسه تاثیر تمامی پارامترها بر بازیابی مس در عدم حضور نانوحباب

شکل ۲-۴ تاثیر تمامی پارامترها بر بازیابی مس در عدم حضور نانوحبابها را نشان می‌دهد. در این شکل، پارامترهای کلکتور، کفساز و اندازه ذرات دارای بیشترین شیب هستند که نشان‌دهنده تاثیر زیاد این سه پارامتر بر بازیابی مس در عدم حضور نانوحباب است. شکل ۳-۴ تاثیر تمامی پارامترها بر بازیابی مس در حضور نانوحبابها را نشان می‌دهد. در این شکل، پارامترهای، کفساز، pH، اندازه ذرات و درصد جامد دارای بیشترین شیب هستند که نشان‌دهنده تاثیر زیاد این چهار پارامتر بر بازیابی مس در حضور نانوحباب است. با مقایسه دو نمودار می‌توان فهمید که در حضور نانوحبابها با کاهش مقدار کفساز، با افزایش مقدار pH، با کاهش مقدار درصد جامد، همچنین با افزایش اندازه ذرات بازیابی افزایش یافته و با افزایش درصد جامد، بازیابی کاهش می‌یابد.

Factor Coding: Actual

Recovery (%)

Actual Factors

A = 35

B = 30

C = 11.8

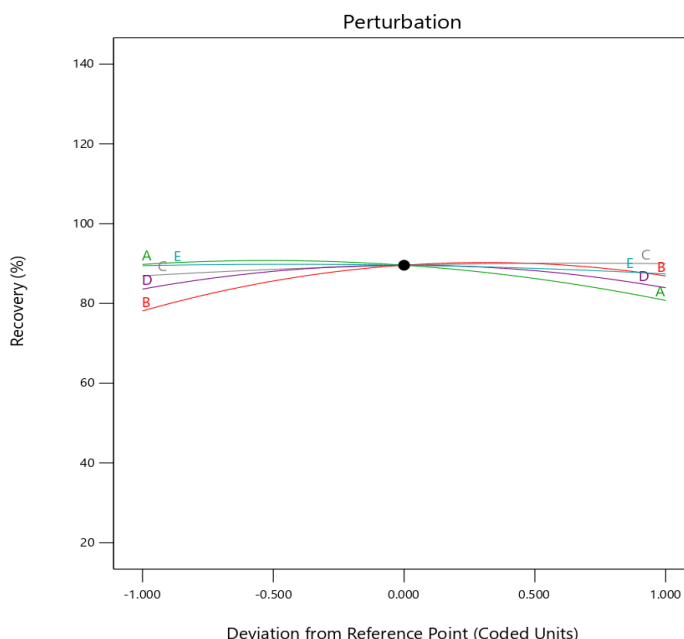
D = 58.5

E = 28

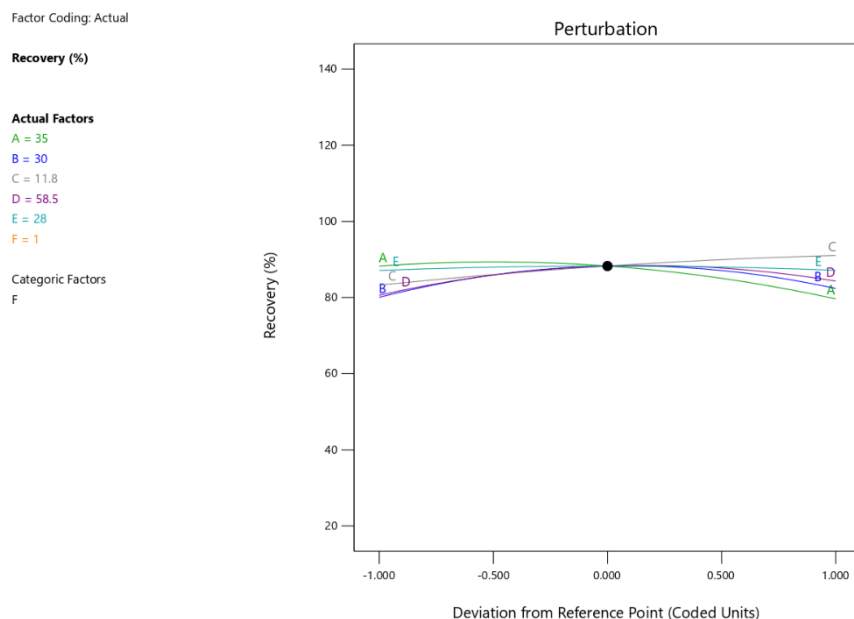
F = 0

Categoric Factors

F



شکل ۲-۴: تاثیر پارامترها بر بازیابی مس در عدم حضور نانوحبابها



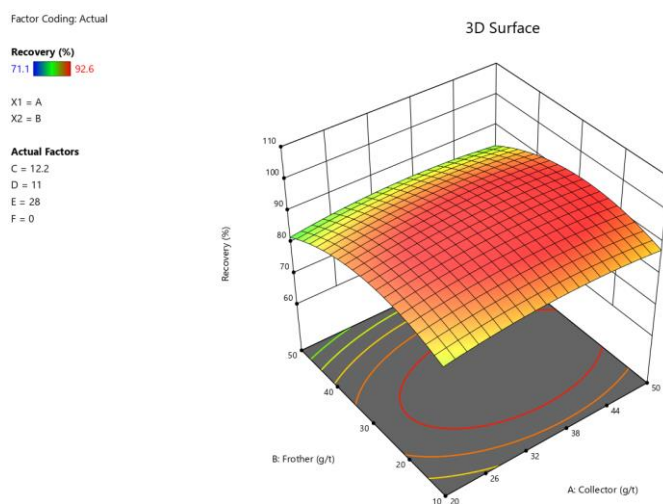
شکل ۴-۳: تاثیر تمامی پارامترها بر بازیابی مس در حضور نانوحباب‌ها

۴-۹ تاثیر متقابل پارامترها

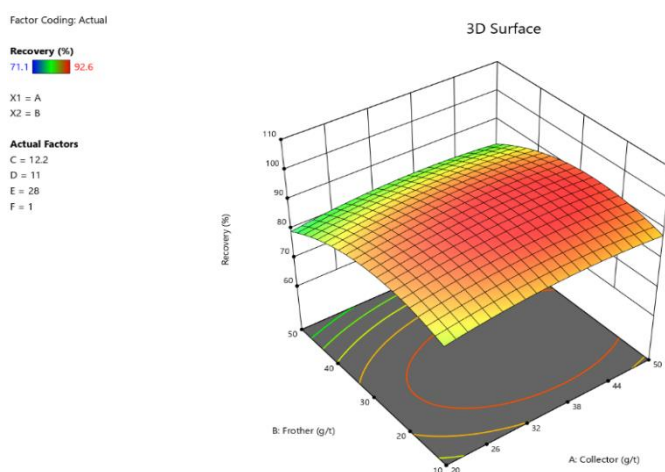
۴-۹-۱ تاثیر همزمان کفساز و کلکتور بر بازیابی در عدم حضور و حضور نانوحباب‌ها

شکل (۴-۴) نشان‌دهنده این است که با افزایش همزمان کفساز و کلکتور، در حضور فلوتاسیون بدون نانوحباب، بازیابی افزایش پیدا می‌کند. اما در شکل (۴-۵) که تاثیر همزمان کفساز و کلکتور، در حضور نانوحباب‌ها را بررسی می‌کند، زمانی بازیابی در بالاترین حد خود قرار می‌گیرد که کلکتور در مقدار حد آزمایشگاه و بالاتر و کفساز در مقدار پایین خود یعنی یک سوم حد آزمایشگاه بهترین بازیابی را در مقایسه با عدم حضور نانوحباب دارد. همانطور که مشاهده شد در عدم حضور نانوحباب با وجود کلکتور و کفساز زیاد تا حد خاصی که به غلظت بحرانی یا (CMC) مشهور است بازیابی افزایش پیدا می‌کند و بعد از آن افت می‌کند. اما در حضور

نانوحباب چونکه خود خاصیت کلکتور ثانویه و پایداری بالایی دارد می‌تواند با مقدار مصرف کمتر کلکتور و کفساز بازیابی بهتری نشان دهد.



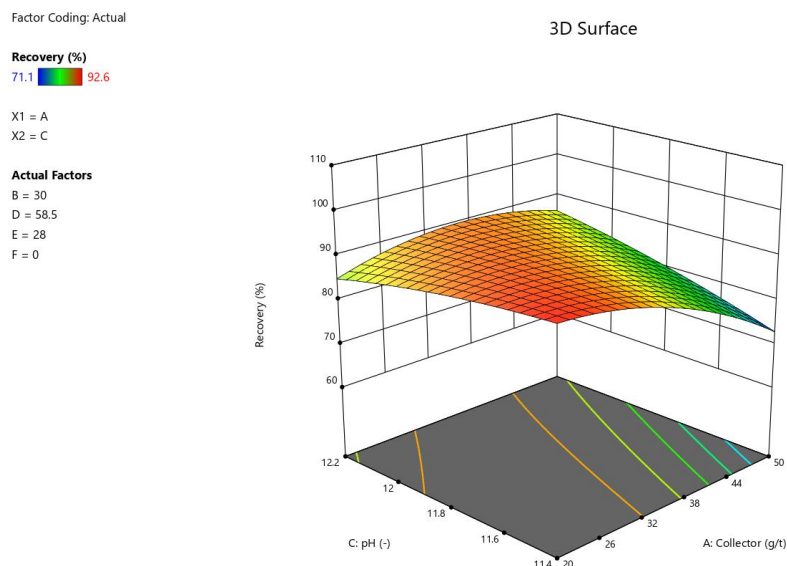
شکل ۴-۴: تاثیر همزمان کفساز و کلکتور بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب



شکل ۴-۵: تاثیر همزمان کفساز و کلکتور بر بازیابی در حضور نانوحباب

۴-۹-۲ تاثیر همزمان pH، کلکتور بر بازیابی مس در عدم حضور نانوحباب

همانطور که در شکل‌های (۴-۶ و ۴-۷) پیداست، در عدم حضور نانوحباب، با کاهش pH و همچنین کلکتور بازیابی افزایش پیدا می‌کند. همانگونه که مشاهده می‌شود در حضور نانوحباب‌ها زمانی بازیابی افزایش پیدا می‌کند، pH در بالاترین حد خود قرار گیرد، مقدار عدد آن ۱۲/۲ است. همانگونه که مشاهده شد در حضور نانوحباب‌ها بازیابی زمانی افزایش پیدا می‌کند که pH آن افزایش پیدا کند ولی اینکه چه علتی باعث این کار می‌شود را نمی‌دانیم.



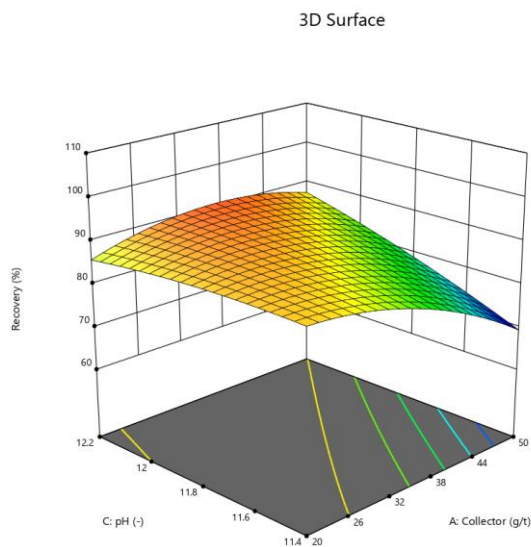
شکل ۴-۶: تاثیر همزمان pH و کلکتور بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب

Factor Coding: Actual

Recovery (%)
71.1 92.6

X1 = A
X2 = C

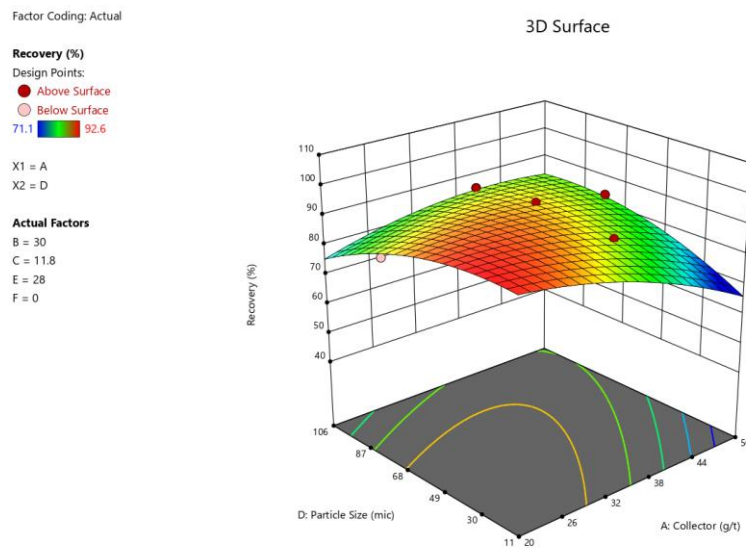
Actual Factors
B = 30
D = 58.5
E = 28
F = 1



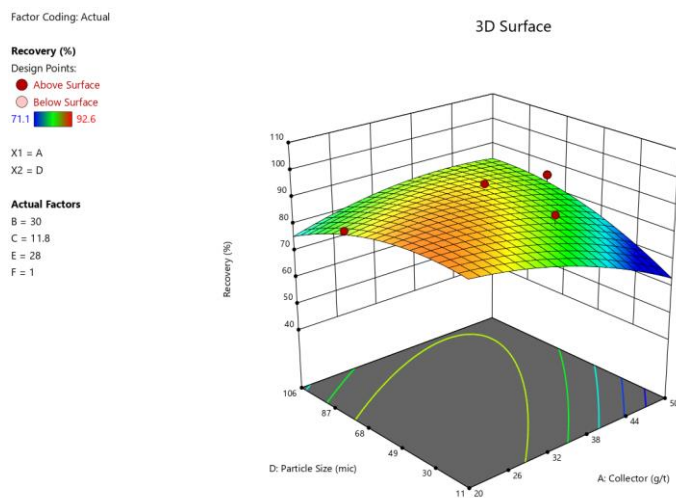
شکل ۴-۷: تاثیر همزمان pH و کلکتور بر بازیابی در حضور نانوحباب

۴-۹-۳ تاثیر همزمان اندازه ذرات و کلکتور بر بازیابی در عدم حضور و حضور نانوحباب

در شکل (۴-۸ و ۴-۹) که نشاندهنده تاثیرهای همزمان اندازه ذرات و کلکتور در عدم حضور و حضور نانوحباب‌ها هستند، نمایان است که در عدم حضور نانوحباب، هر چه اندازه ذرات کمتر می‌شود و کلکتور نیز کمتر بازیابی افزایش پیدا می‌کند. اما در حضور نانوحباب‌ها، در مقدار اندازه ذرات درشت مثل ۱۰۶ میکرون و ۷۵ میکرون کارخانه که مد نظر است، همچنین در اندازه ۳۸ میکرون و پایین‌تر بازیابی افزایش پیدا کرده است. در نتیجه نانوحباب بر روی ذرات درشت نیز جواب داده است. همانگونه که مطلع هستیم نانوحباب برای ذرات نرمه جواب می‌دهد علت اینکه بر روی ذرات درشت نیز جواب داده است این است که در ذرات درشت نیز نرمه وجود دارد و نانوحباب به خوبی ذرات نرمه را شناور می‌کند.



شکل ۴-۸: تاثیر همزمان اندازه ذرات و کلکتور بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب

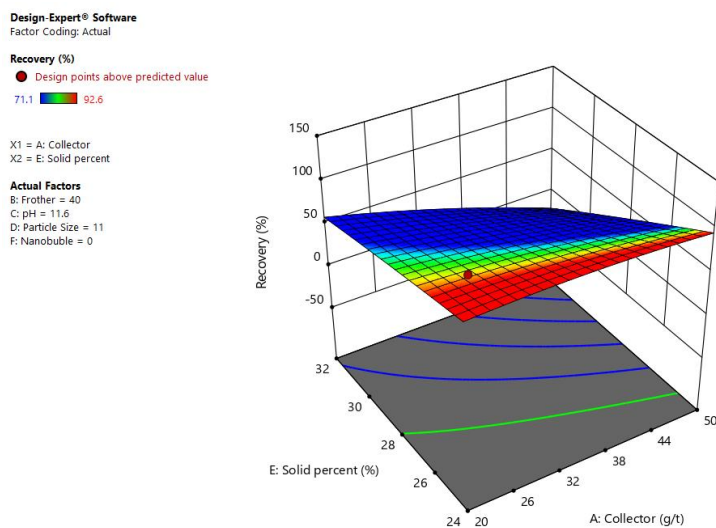


شکل ۴-۹: تاثیر همزمان اندازه ذرات و کلکتور بر بازیابی در حضور نانوحباب

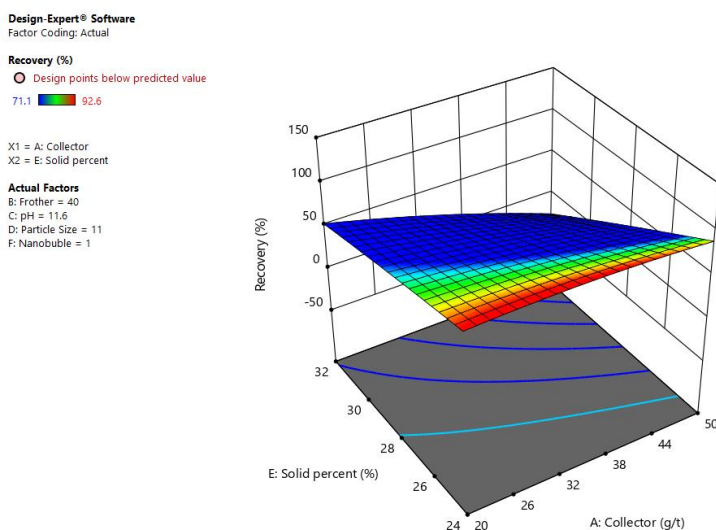
۴-۹-۴ تاثیر همزمان درصد جامد و کلکتور در عدم حضور نانوحباب

در شکل (۴-۱۰ و ۴-۱۱)، همانگونه که مشاهده شد، در عدم حضور نانوحباب با درصد جامد کارخانه و کلکتور زیاد و کم بازیابی خوبی مشاهده شد. اما در حضور نانوحباب با کمترین مقدار درصد جامد و کاهش کلکتور به پایین‌ترین مقدار خود بهترین بازیابی مشاهده شد. یکی از اصول نانوحباب این است که به عنوان کلکتور ثانویه

عمل می‌کند علت اینکه با مصرف کمتر کلکتور بازیابی در حضور نانوحباب افزایش پیدا می‌کند همین مورد است.



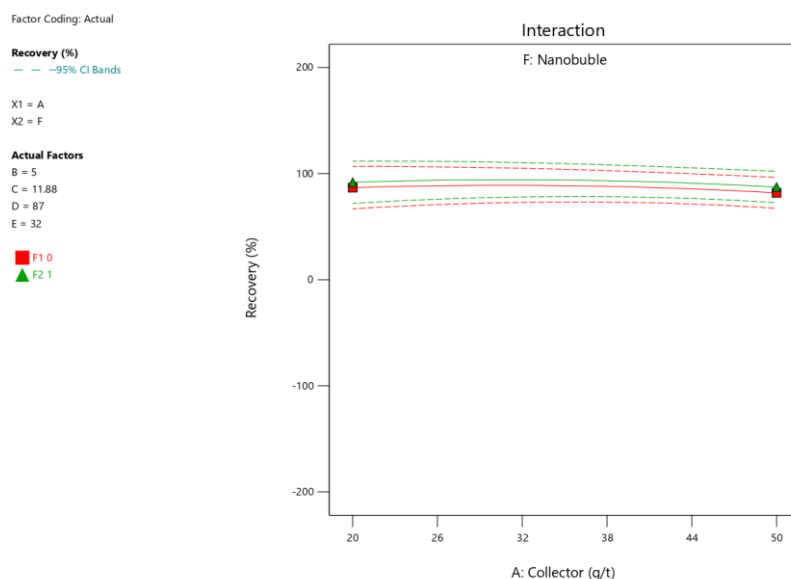
شکل ۴-۱۰: تاثیر همزمان درصد جامد و کلکتور در عدم حضور نانوحباب



شکل ۴-۱۱: تاثیر همزمان درصد جامد و کلکتور در حضور نانوحباب

۴-۹-۵ تاثیر کلکتور بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب

در شکل (۴-۱۲)، در عدم حضور نانوحباب‌ها، بیشترین مقدار بازیابی حدود ۸۷٪ است. اما در حضور نانوحباب‌ها با کمترین مقدار کلکتور درصد بازیابی حدود ۹۲٪ است. یکی از علت‌هایی که می‌توان ذکر کرد این است که نانوحباب به عنوان کلکتور ثانویه نیز عمل می‌کند [۵۸].



شکل ۴-۱۲: تاثیر کلکتور بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب

۴-۹-۶ تاثیر همزمان pH، کف‌ساز بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب‌ها

همانگونه که در شکل‌های (۴-۱۳ و ۴-۱۴) پیداست، در pH ۱۲/۲ و بیشترین مقدار کف‌ساز در عدم حضور نانوحباب‌ها بازیابی خوبی مشاهده شد. اما در حضور نانوحباب‌ها با کمترین مقدار کف‌ساز و pH ۱۲/۲ بازیابی بهتری نسبت به عدم حضور نانوحباب‌ها مشاهده شد. از اصول اولیه نانوحباب این است که دارای پایداری خوبی است به همین علت است که با مقدار مصرف کمتر کف‌ساز بازیابی بهتری نسبت به عدم حضور نانوحباب دارد.

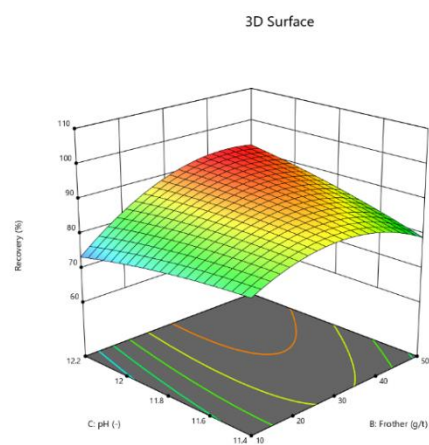
Factor Coding: Actual

Recovery (%)
71.1 92.6

X1 = B
X2 = C

Actual Factors

A = 35
D = 58.5
E = 28
F = 0



شکل ۴-۱۳: تاثیر همزمان pH و کف‌ساز بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب‌ها

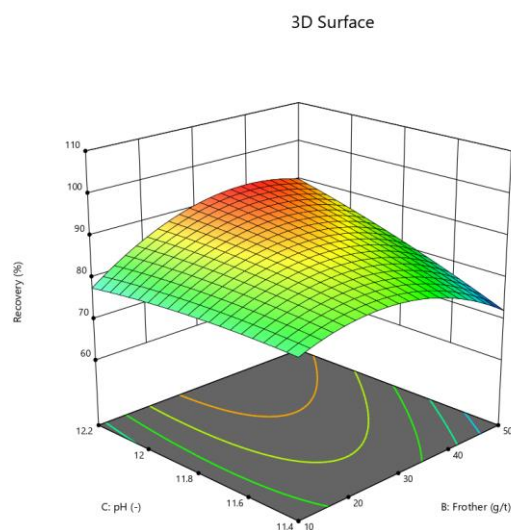
Factor Coding: Actual

Recovery (%)
71.1 92.6

X1 = B
X2 = C

Actual Factors

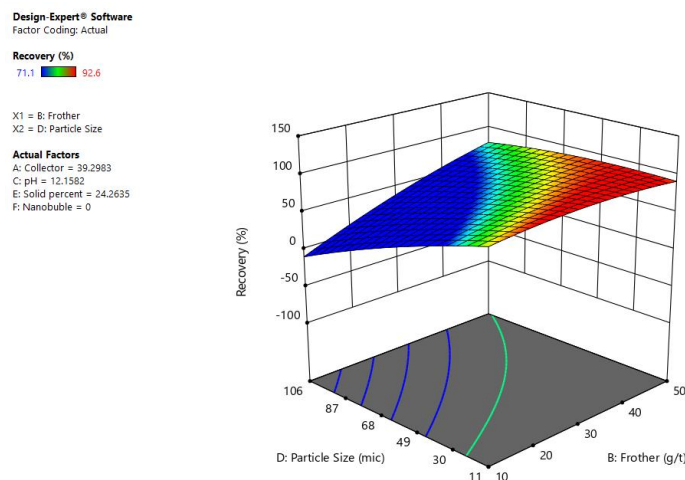
A = 35
D = 58.5
E = 28
F = 1



شکل ۴-۱۴: تاثیر همزمان pH و کف‌ساز بر بازیابی در حضور نانوحباب‌ها

۷-۹-۴ تاثیر همزمان کف‌ساز و اندازه ذرات در عدم حضور نانوحباب‌ها

همانگونه که مشاهده شد در عدم حضور نانوحباب‌ها، در شکل (۴-۱۵)، زمانی که ذرات درشت دانه هستند باید در فلوئاسیون به مقدار زیاد کف‌ساز اضافه شود، بازیابی افزایش یابد. به این علت حباب‌ها توان حمل ذرات درشت را ندارند. همچنین با اضافه نمودن کف‌ساز و تجمع حباب‌ها قادر به حمل ذرات درشت می‌شوند. در



شکل ۴-۱۵: تاثیر همزمان کف‌ساز و اندازه ذرات بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب

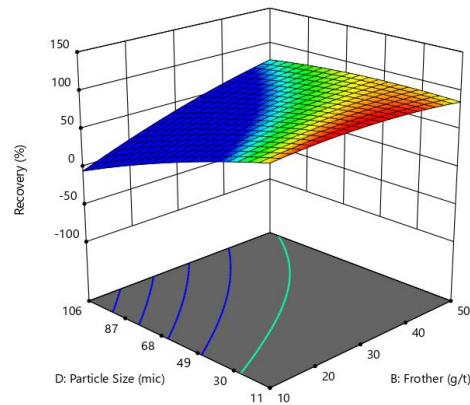
حضور نانوحباب‌ها، همانطور که در شکل ۴-۱۶ دیده شد، در اندازه ذرات نرمه تاثیر خوبی بر بازیابی گذاشته‌اند. همینطور مصرف کف‌ساز را کاهش دادند. نانوحباب‌ها دارای پایداری کف خوبی هستند و همچنین خاصیت کلکتور ثانویه نیز دارند به همین علت در اندازه ذرات نرمه بازیابی بهتری مشاهده می‌شود.

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual

Recovery (%)
71.1 92.6

X1 = B: Frother
X2 = D: Particle Size

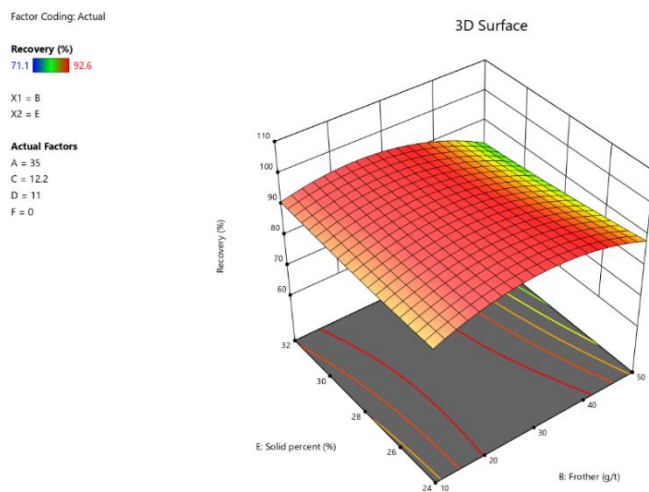
Actual Factors
A: Collector = 39.2983
C: pH = 12.1582
E: Solid percent = 24.2635
F: Nanobubble = 1



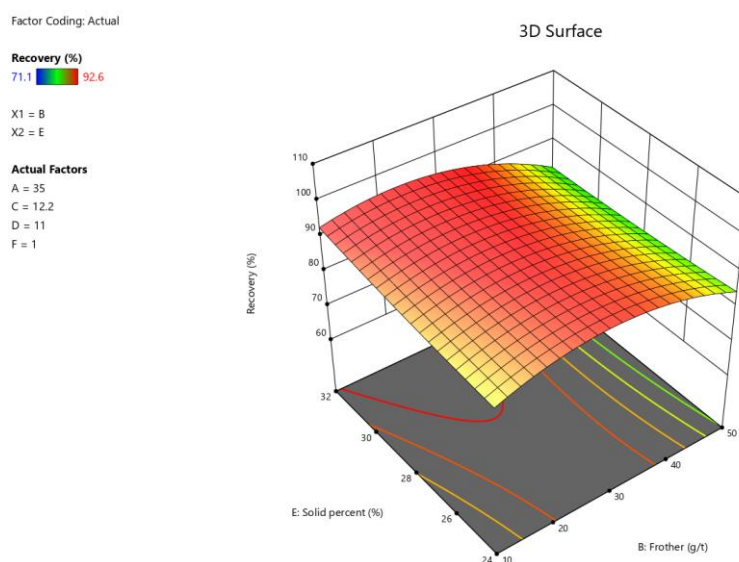
شکل ۴-۱۶: تاثیر همزمان کف‌ساز و اندازه ذرات بر بازیابی در حضور نانوحباب

۴-۹-۸ تاثیر همزمان کف‌ساز و درصد جامد در عدم حضور نانوحباب‌ها

همانگونه که مشاهده می‌شود، شکل (۴-۱۷)، در عدم حضور نانوحباب‌ها با افزایش کف‌ساز و درصد جامد در ابعاد مختلف بازیابی خوبی مشاهده شد. همچنین در شکل (۴-۱۸)، حضور نانوحباب‌ها با کاهش کف‌ساز و همچنین افزایش درصد جامد در حد کارخانه و بالاتر بازیابی خوبی مشاهده شد. یکی از مواردی که با درصد جامد بالاتر در حضور نانوحباب‌ها نتیجه بهتری مشاهده شد این است که وقتی درصد جامد افزایش پیدا می‌کند مقدار خاک نیز بیشتر می‌شود و در خاک بیشتر مقدار نرمه بیشتری به طبع است همین مورد باعث می‌شود با خصوصیتی که نانوحباب دارد بازیابی بهتر شود.

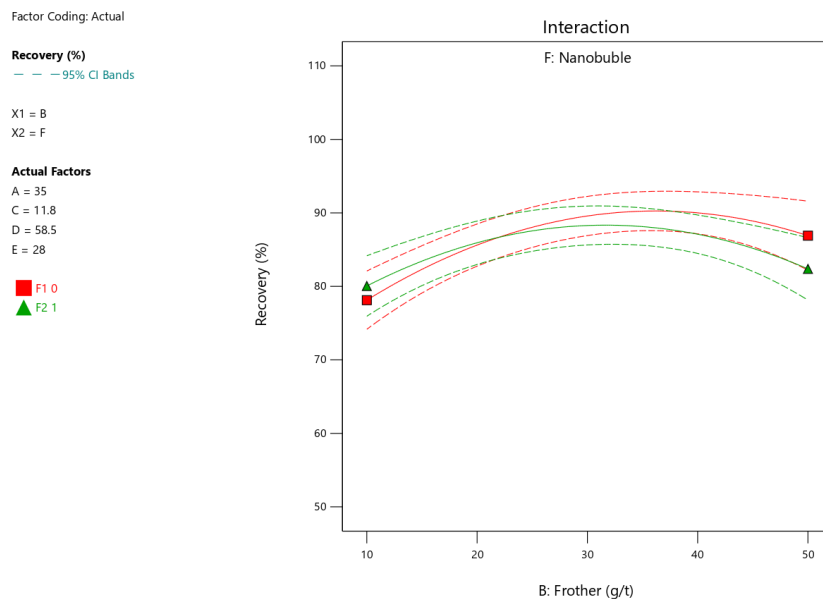


شکل ۴-۱۷: تاثیر همزمان کف‌ساز و درصد جامد بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب



شکل ۴-۱۸: تاثیر همزمان کف‌ساز و درصد جامد بر بازیابی در حضور نانوحباب

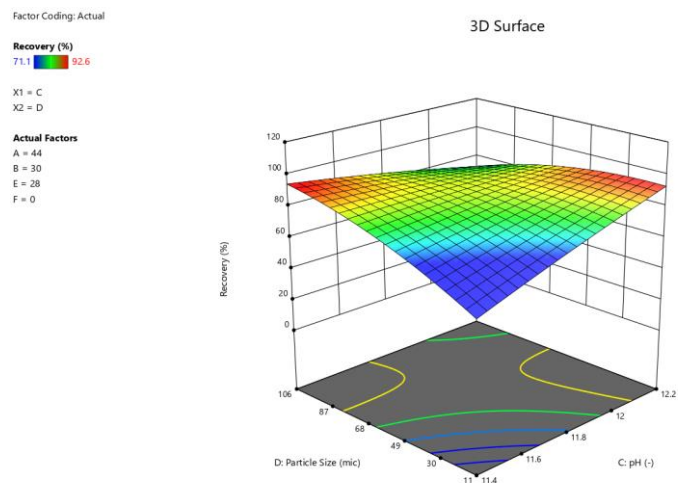
همچنین در شکل (۴-۱۹)، نشان داده می‌شود، با افزایش کف‌ساز در عدم حضور نانوحباب بازیابی افزایش پیدا می‌کند. اما در حضور نانوحباب با کاهش کف‌ساز در حد یک سوم آزمایشگاهی بازیابی ما ۱/۹۳ درصد نسبت به عدم حضور نانوحباب افزایش پیدا کرد. یکی از خصوصیات که نانوحباب‌ها دارند این است که دارای پایداری کف خوبی هستند و همین علت باعث می‌شود که کف‌ساز کمتری استفاده شود.



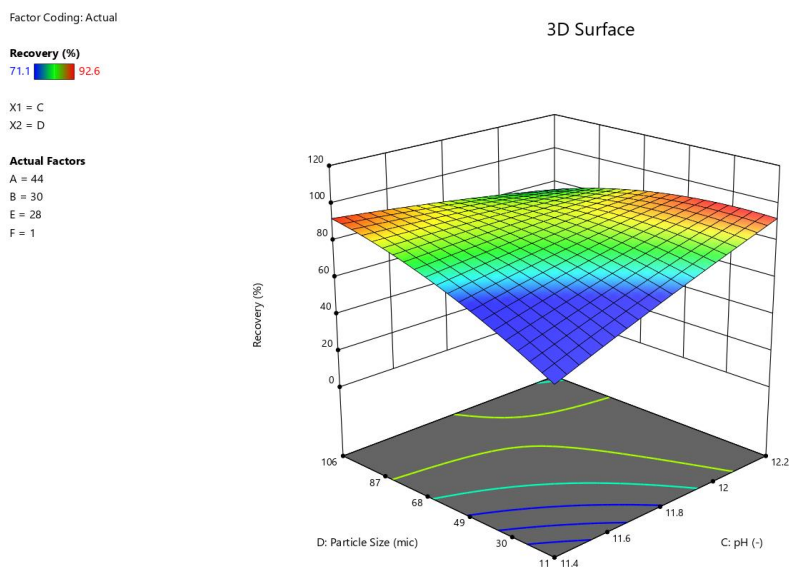
شکل ۴-۱۹: تاثیر کف‌ساز بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب

۴-۹-۹ تاثیر همزمان اندازه ذرات و pH بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب

همانگونه که در شکل‌های (۴-۲۰ و ۴-۲۱) مشاهده می‌شود افزایش pH و افزایش اندازه ذرات در حالت عدم حضور نانوحباب بازیابی خوبی مشاهده شده است. اما در حضور نانوحباب‌ها با افزایش pH و همچنین افزایش اندازه ذرات، شاهد آن هستیم، که نانوحباب در اندازه ذرات درشت نیز کارایی دارد. طبق خصوصیتی که نانوحباب دارد که شامل کلکتور ثانویه و پایداری خوب کف است. باعث می‌شود در ذرات درشت که آن‌ها نیز دارای نرمه هستند ذرات درشت شناور شوند.



شکل ۴-۲۰: تاثیر همزمان اندازه ذرات و pH بر بازیابی در عدم حضور نانوحباب

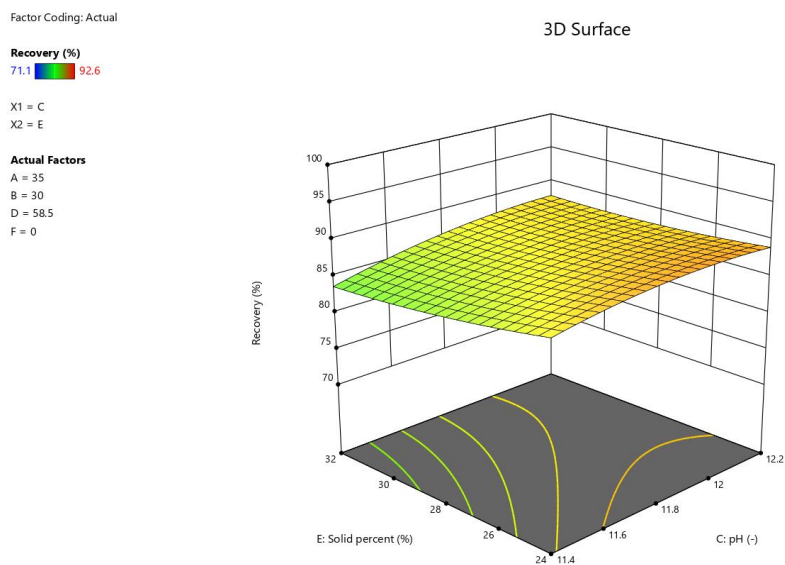


شکل ۴-۲۱: تاثیر همزمان اندازه ذرات و pH بر بازیابی در حضور نانوحباب

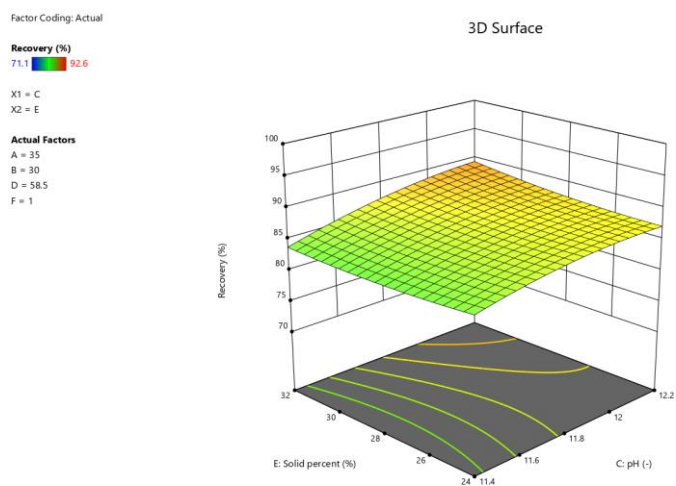
۴-۹-۱۰ تاثیر همزمان pH و درصد جامد در عدم حضور نانو حباب

در شکل (۴-۲۲ و ۴-۲۳)، مشاهده شد که در عدم حضور نانوحباب با درصد جامد پایین و افزایش و کاهش pH، بازیابی خوبی مشاهده شد. اما در حضور نانوحباب با درصد جامد بالا و افزایش و کاهش pH، در مقایسه با عدم حضور نانوحباب بازیابی خوبی مشاهده شد. یکی از مواردی که باعث می‌شود نانوحباب در درصد جامد

بالا جواب دهد. این مورد است که دارای کلکتور ثانویه و پایداری کف خوب است چون درصد جامد افزایش پیدا کند مقدار خاک نیز افزایش پیدا می کند و مقدار نرمه نیز بیشتر می شود به همین سبب طبق موارد گفته شده بازیابی در حضور نانوحباب بهتر می شود.

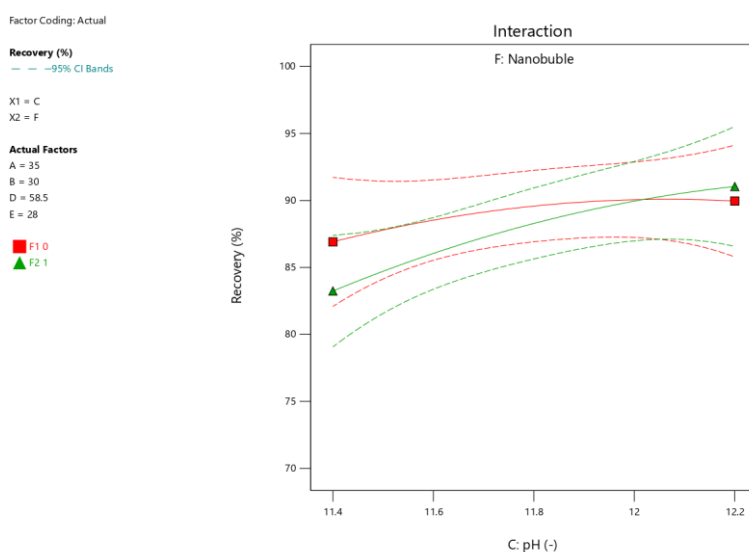


شکل ۴-۲۲: تاثیر همزمان pH و درصد جامد در عدم حضور نانوحباب



شکل ۴-۲۳: تاثیر همزمان pH و درصد جامد در حضور نانوحباب

همانگونه که در شکل (۴-۲۴)، پیداست تاثیر نانوحباب‌ها در pH بالا نسبت به عدم حضور نانوحباب‌ها کاملاً مشهود است و باعث افزایش بازیابی شده است. اینجا مشاهده شد نانوحباب در pH بالا جواب داده است ولی اینکه چه عاملی باعث این کار شده است اطلاع نداریم.



شکل ۴-۲۴: تاثیر pH بر بازیابی در عدم حضور و حضور نانوحباب

۴-۹-۱۱ تاثیر همزمان اندازه ذرات و درصد جامد در عدم حضور و حضور نانوحباب

در شکل‌های (۴-۲۵، ۴-۲۶)، پیداست که در عدم حضور نانوحباب در ذرات نرمه با درصد جامد بالاترین و پایین‌ترین بازیابی خوبی مشاهده شد. اما در حضور نانوحباب با ذرات درشت و درصد جامد پایین‌ترین و بالاترین در مقایسه با عدم حضور نانوحباب نشان داد، که نانوحباب برای ذرات درشت نیز کارایی دارد. همانگونه که پیداست در ذرات درشت چونکه نرمه وجود دارد و همچنین در درصد جامد بالا بنا به خاک زیاده‌تری که هست. طبق خصوصیتی که نانوحباب‌ها دارند باعث افزایش بازیابی می‌شوند.

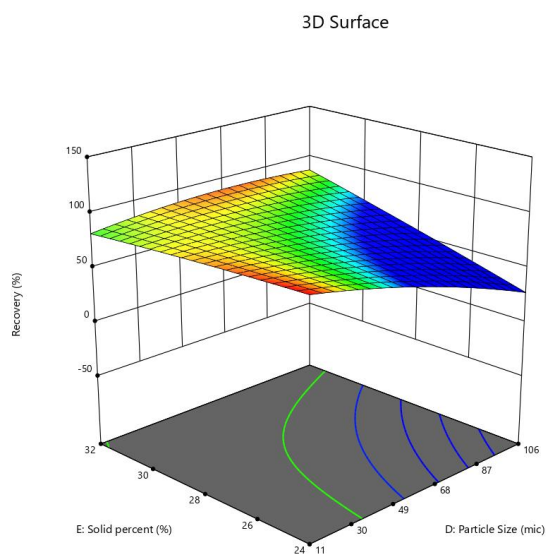
Factor Coding: Actual

Recovery (%)
71.1 92.6

X1 = D
X2 = E

Actual Factors

A = 30.5
B = 12.4
C = 11.648
F = 0



شکل ۴-۲۵: تاثیر همزمان اندازه ذرات و درصد جامد در عدم حضور نانوحباب

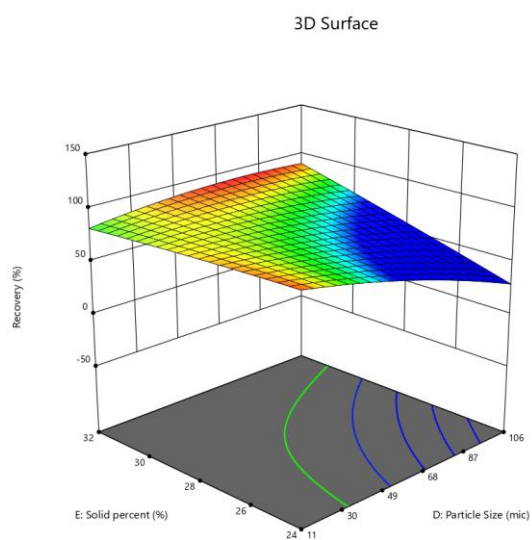
Factor Coding: Actual

Recovery (%)
71.1 92.6

X1 = D
X2 = E

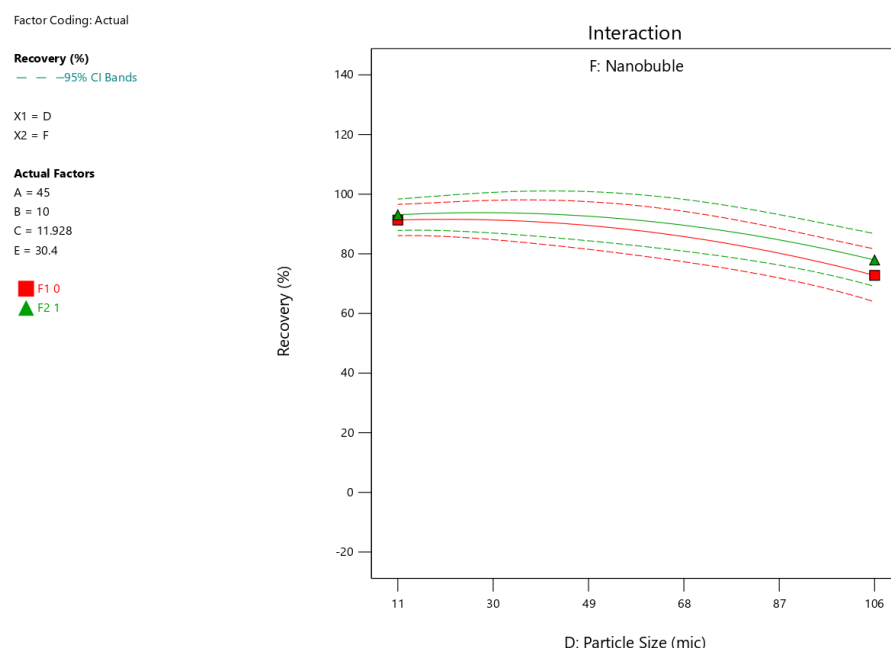
Actual Factors

A = 30.5
B = 12.4
C = 11.648
F = 1



شکل ۴-۲۶: تاثیر همزمان اندازه ذرات و درصد جامد در حضور نانوحباب

در شکل (۴-۲۷)، پیداست که در حضور نانوحباب اندازه ذرات چه در ابعاد نرمه و چه در ابعاد درشت در مقایسه با عدم حضور نانوحباب کارایی خوبی دارد و افزایش بازیابی مشاهده شد. خصوصیات نانوحباب‌ها شامل کلکتور ثانویه و پایداری خوب کف است. همانگونه که پیداست در ذرات نرمه به خوبی جواب می‌دهد اما در اینجا مشخص شد که در ذرات درشت بنا به وجود نرمه داخل آن‌ها جواب مثبت داده است.



شکل ۲-۲۷: تاثیر اندازه ذرات بر بازیابی در عدم حضور و حضور نانوحباب

۴-۹-۱۲ تاثیر درصد جامد بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب

همانطور که در شکل (۴-۲۸)، پیداست در صورت وجود نانوحباب با این ابعاد مشخصاتی در، درصد جامدهای مختلف، در مقایسه با عدم وجود نانوحباب، افزایش بازیابی مشاهده شد. یکی از علت‌هایی که نانوحباب‌ها در درصد جامدهای بالا جواب بهتری می‌دهد این مورد است که خاک ورودی بیشتر می‌شود و به طبع نرمه ورودی نیز زیاده‌تر می‌شود همین مورد باعث افزایش بازیابی در درصد جامدهای بالا به نسبت درصد جامدهای پایین می‌شود.

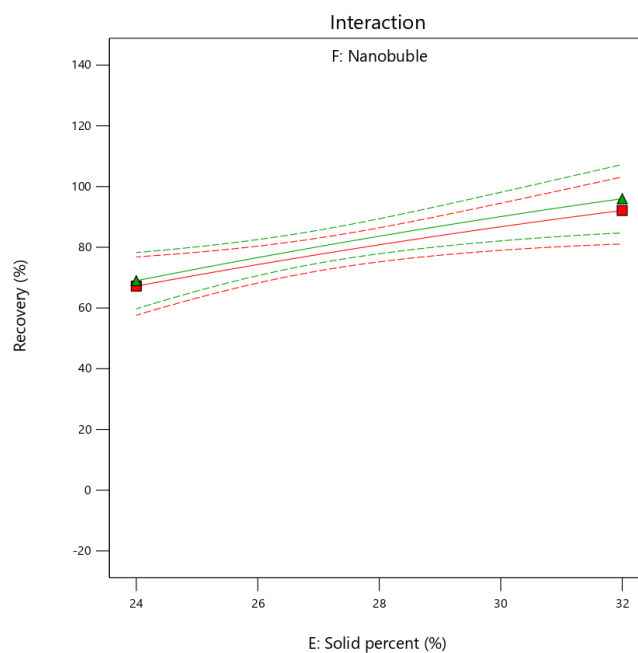
Factor Coding: Actual

Recovery (%)
— —95% CI Bands

X1 = E
X2 = F

Actual Factors
A = 45
B = 10
C = 11.928
D = 58.5

■ F1 0
▲ F2 1



شکل ۴-۲۸: تاثیر درصد جامد بر بازیابی در حضور و عدم حضور نانوحباب

۴-۱۰ انتخاب مدل مناسب برای عیار مس

جدول ۴-۶: انتخاب مدل مناسب برای عیار مس

نوع مدل	Model p-value	Lack of fit p-value	Adjusted R^2	
مدل طراحی شده	۰/۱۸۳۰	۰/۳۳۱۴	۰/۴۱۳۱	
فاکتور خطی	۰/۱۲۷۴	۰/۲۳۸۵	۰/۰۸۶۵	
فاکتور دوتایی	۰/۰۵۴۵	۰/۳۷۱۳	۰/۳۲۳۴	پیشنهادشده
معادله درجه دوم	۰/۲۰۵۹	۰/۴۲۰۹	۰/۳۸۶۸	
معادله درجه سوم	۰/۴۲۰۹	—	۰/۴۹۹۳	صرف نظر

جدول ۴-۷: مدل متوالی مجموع مربعات

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value	
میانگین در مقایسه با مجموع	۱۹۶۵/۶۴	۱	۱۹۶۵/۶۴			
مدل خطی در مقایسه با میانگین	۳۴/۶۵	۵	۵/۷۷	۱/۷۷	۰/۱۲۷۴	
مدل ۲FI در مقایسه با خطی	۷۲/۴۸	۱۵	۴/۸۳	۲/۰۰	۰/۰۵۴۵	پیشنهاد شده
مدل درجه دوم در مقایسه با ۲FI	۱۷/۲۵	۵	۳/۴۵	۱/۵۸	۰/۲۰۵۹	
مدل درجه سوم در مقایسه با درجه دوم	۴۱/۳۵	۱۸	۲/۳۰	۱/۲۹	۰/۴۲۰۹	صرف نظر
باقی مانده	۸/۹۲	۵	۱/۷۸			
مجموع	۲۱۴۰/۳۰	۵۰	۴۲/۸۱			

جدول ۴-۸: خلاصه‌ای از مدل آماری

منبع	انحراف معیار	R^2	Adjusted R^2	Predicted R^2	PRESS	
خطی	۱/۸۰	۰/۱۹۸۴	۰/۰۸۶۵	-۰/۱۱۷۴	۱۹۵/۱۶	
دوتایی	۱/۵۵	۰/۶۱۳۴	۰/۳۲۳۴	-۰/۳۸۵۴	۲۴۱/۹۶	پیشنهاد شده
معادله درجه دوم	۱/۴۸	۰/۷۲۲۱	۰/۳۸۶۷	-۰/۶۲۳۸	۲۸۳/۶۰	
معادله درجه سوم	۱/۳۴	۰/۹۴۸۹	۰/۴۹۹۳		*	صرف نظر

۴-۱۱ آنالیز واریانس برای عیار مس

مقدار (F-value)، در اینجا برابر با ۲/۱۲ است. نشاندهنده معنادار بودن مدل است. فقط ۳/۲۳ درصد احتمال دارد که F-value بزرگ به علت اغتشاشات ایجاد شود. همچنین مقادیر (P-value)، کمتر از (۰/۰۵۰۰) این را نشان می‌دهد که عبارات مدل معنی‌دارند. در این آزمایش: (A,C,D,BE,DF)، این پارامترهای مدل معنی‌دار هستند. اگر مقادیر بیشتر از (۰/۱۰۰۰) بودند، این را نشان می‌دهد که پارامترهای معنی‌دار نیستند. مقدار (Lack of Fit)، عدد (۱/۴۳) را نشان داد. بدان معناست که عدم تناسب نسبت به خطای خالص بی‌معنی می‌باشد. (۳۷/۱۳) نیز احتمال دارد که کمبود (Lack of Fit)، به دلیل اغتشاشات ایجاد شود. در آخر نیز عدم تناسب خوب است زیرا مدل باید متناسب باشد. جدول (۴-۹) آنالیز واریانس برای عیار مس را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۹: آنالیز واریانس برای عیار مس

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-value	P-value	
مدل	۱۰۷/۱۳	۲۱	۵/۱۰	۲/۱۲	۰/۰۳۲۳	معنی‌دار
A- کلکتور	۱۷/۹۰	۱	۱۷/۹۰	۷/۴۲	۰/۰۱۱۰	
B- کفساز	۲/۳۸	۱	۲/۳۸	۰/۹۸۸۳	۰/۳۲۸۷	
C- pH	۱۱/۸۹	۱	۱۱/۸۹	۴/۹۳	۰/۰۳۴۶	
D- اندازه ذرات	۱۲/۵۳	۱	۱۲/۵۳	۵/۲۰	۰/۰۳۰۴	
E- درصد جامد	۰/۹۰۰۲	۱	۰/۹۰۰۲	۰/۳۷۳۳	۰/۵۴۶۱	
F- نانوحباب	۷/۲۹	۱	۷/۲۹	۰/۴۹۱۳	۰/۴۸۹۱	
AB	۱/۱۸	۱	۱/۱۸	۱۲/۳۹	۰/۰۰۱۸	
AC	۱/۲۵	۱	۱/۲۵	۰/۵۲۰۲	۰/۴۷۶۸	
AD	۷/۶۶	۱	۷/۶۶	۳/۱۸	۰/۰۸۵۵	
AE	۴/۳۳	۱	۴/۳۳	۱/۷۹	۰/۱۹۱۱	
AF	۰/۷۰۴۱	۱	۰/۷۰۴۱	۰/۲۹۲۰	۰/۵۹۳۲	

BC	۱/۰۶	۱	۱/۰۶	۰/۴۴۱۴	۰/۵۱۱۹	
BD	۰/۹۷۱۰	۱	۰/۹۷۱۰	۰/۴۰۲۶	۰/۵۳۰۹	
BE	۱۲/۶۷	۱	۱۲/۶۷	۵/۲۵	۰/۰۲۹۶	
BF	۲/۷۵	۱	۲/۷۵	۱/۱۴	۰/۲۹۵۱	
CD	۲/۰۲	۱	۲/۰۲	۰/۸۳۷۵	۰/۳۶۷۹	
CE	۱/۵۲	۱	۱/۵۲	۰/۶۲۹۷	۰/۴۳۴۱	
CF	۰/۰۰۱۳	۱	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۵	۰/۹۸۱۷	
DE	۲/۳۷	۱	۲/۳۷	۰/۹۸۳۰	۰/۳۲۹۹	
DF	۱۸/۰۲	۱	۱۸/۰۲	۷/۴۷	۰/۰۱۰۷	
EF	۰/۰۸۱۳	۱	۰/۰۸۱۳	۰/۰۳۳۷	۰/۸۵۵۷	
Residual	۶۷/۵۲	۲۸	۲/۴۱			
Lack of Fit	۵۸/۶۰	۲۳	۲/۵۵	۱/۴۳	۰/۳۷۱۳	بی معنی
Pure Error	۸/۹۲	۵	۱/۷۸			
Cor Total	۱۷۴/۶۵	۴۹				

۴-۱۲ مشخصات آماری نتایج

پیش‌بینی R^2 ، بیانگر این مسئله است که میانگین کلی عبارت ممکن است پیش‌بینی بهتری از پاسخ نسبت به مدل فعلی بدهد. در برخی موارد، یک مدل بالاتر نیز ممکن است بهتر پیش‌بینی کند.

Adeq Precision، این پارامتر نشان‌دهنده مقدار سیگنال به اغتشاش است. محدوده مقادیر پیش‌بینی شده در نقطه‌های طراحی به خطای متوسط پیش‌بینی را قیاس می‌کند. نسبت بیشتر از عدد ۴ مطلوب است، که در اینجا عدد ۶/۵۸۷۳ بدست آمده که نشان‌دهنده سیگنال کافی می‌باشد. همانطور که در جدول ۴-۱۰ دیده شد در آخر از این مدل می‌توان برای پیمایش در فضای طراحی استفاده کرد.

جدول ۴-۱۰: مشخصات آماری نتایج

انحراف معیار	۱/۵۵	R^2	۰/۶۱۳۴
میانگین	۶/۲۷	$Adjusted R^2$	۰/۳۲۳۴
C.V%	۲۴/۷۷	$Predicted R^2$	-۰/۳۸۵۴
		Adeq Precision	۶/۵۸۷۳

۴-۱۳ معادله ارائه شده برای عیار مس

معادله بدست آمده را می توان از منظر معرف های واقعی برای پیش بینی پاسخ در مورد سطوح معین هر پارامتر استفاده کرد. در اینجا، باید سطح ها در واحدهای اصلی برای هر پارامتر مشخص شود. نباید از این معادله برای تعیین تاثیر نسبی هر پارامتر استفاده شود. به سبب آنکه ضرایب برای جا دادن واحدهای هر پارامتر دسته بندی می شوند، همچنین رهگیری در مرکز فضای طراحی نیست.

معادله ارائه شده برای عیار مس بدون حضور نانوحباب:

Nano Bubble 0

+44.68377 + 3.07731 Collector + 2.82711 Frother - 9.04240 pH + 0.928803 Particle Size - 9.00834 Solid Percent - 0.002818 Collector * Frother - 0.161833 Collector * pH - 0.002640 Collector * Particle Size - 0.037602 Collector * Solid percent - 0.112913 Frother * pH + 0.000897 Frother * Particle Size - 0.053716 Frother * Solid percent - 0.091456 pH * Particle Size + 0.957317 pH * Solid percent + 0.009765 Particle Size * Solid percent

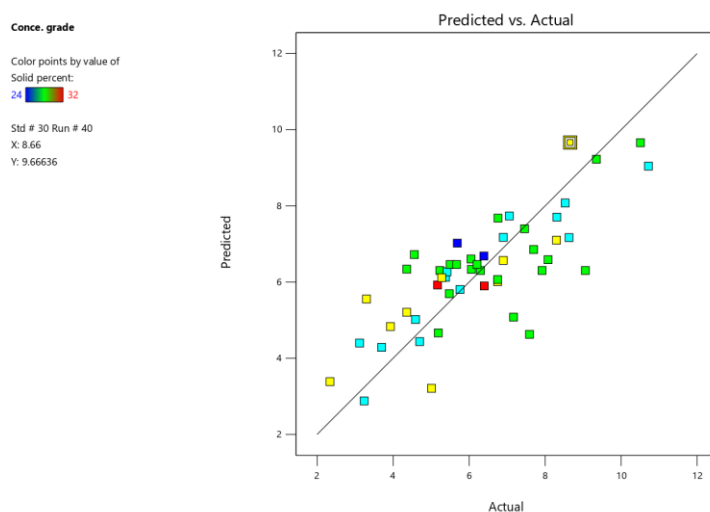
معادله ارائه شده برای عیار مس در حضور نانوحباب:

Nano Bubble 1

+47.80006 +3.10681 Collector +2.87552 Frother -9.10153 pH +0.880526 Particle Size -9.05384 Solid Percent - 0.002818 Collector * Frother -0.161833 Collector * pH -0.002640 Collector * Particle Size -0.037602 Collector * Solid percent -0.112913 Frother * pH +0.000897 Frother * Particle Size -0.053716 Frother * Solid percent - 0.091456 pH * Particle Size +0.957317 pH * Solid percent +0.009765 Particle Size * Solid percent

۴-۱۴ نمودار مقادیر واقعی در مقابل پیش‌بینی‌شده

مقدارهای پیش‌بینی‌شده بازیابی مس در مقابل مقدارهای اندازه‌گیری شده (شکل ۴-۲۹) به منظور واریسی دقیق‌تر صحت مدل ارائه شده و نتایج بدست آمده از مدل استفاده شدند. در آخر نشان می‌دهد که پراکندگی نقاط در عیار مس به خط مورد نظر نزدیک بوده که همین مسئله خود حاکی از انتخاب درست مدل است.

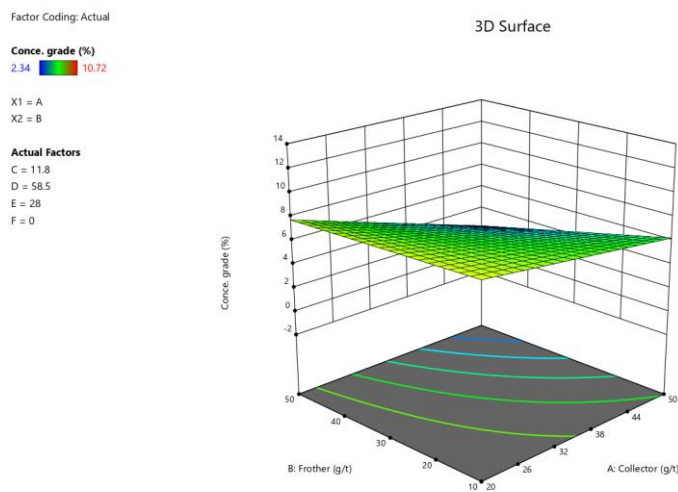


شکل ۴-۲۹: نمودار مقادیر واقعی در مقابل پیش‌بینی‌شده

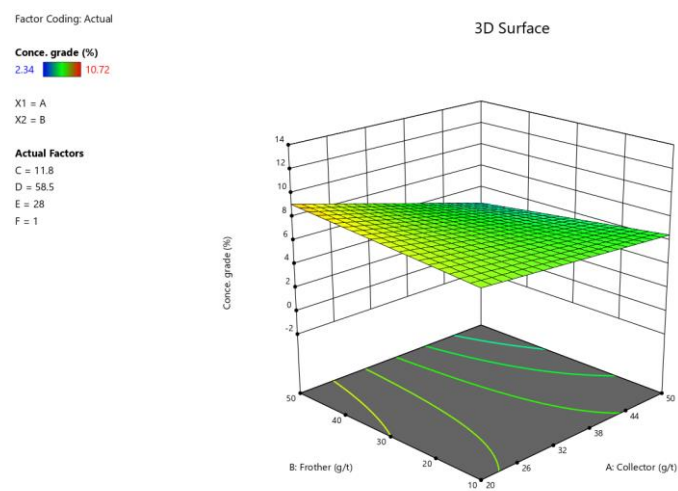
۴-۱۵ نمودارهای سه‌بعدی عیار مس

۴-۱۵-۱ تاثیر همزمان کلکتور و کفساز بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب

در شکل‌های (۴-۳۰، ۴-۳۱)، پیداست که در عدم حضور نانوحباب، با کاهش کلکتور و کفساز عیار مد نظر بالاتر می‌رود و با افزایش کلکتور و کفساز عیار مد نظر پایین‌تر می‌رود. اما در حضور نانوحباب، با افزایش کلکتور و کاهش کفساز یا با کاهش کلکتور و افزایش کفساز افزایش عیار خوبی مشاهده شد.



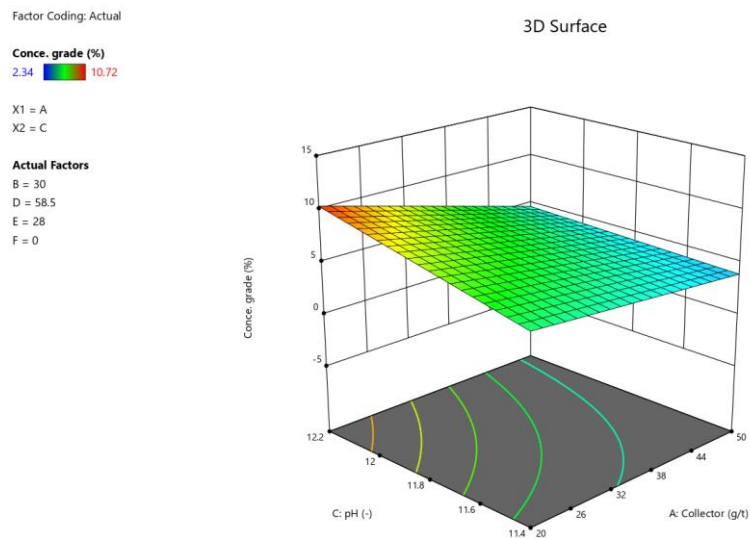
شکل ۴-۳۰: تاثیر همزمان کلکتور و کف‌ساز بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب



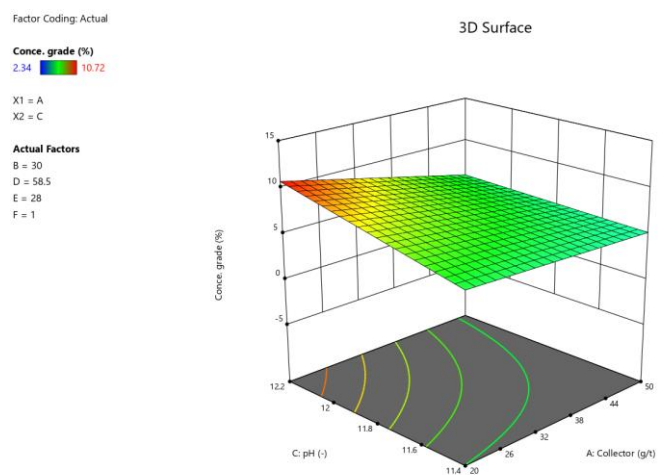
شکل ۴-۳۱: تاثیر همزمان کلکتور و کف‌ساز بر عیار مس در حضور نانوحباب

۴-۱۵-۲ تاثیر همزمان کلکتور و pH بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب

در شکل‌های (۴-۳۲، ۴-۳۳)، پیداست که با حضور نانوحباب در مقایسه بدون حضور نانوحباب، در تمامی ابعاد تاثیر همزمان کلکتور و pH، عیار مس در حضور نانوحباب دارای افزایش قابل قبولی بوده است.



شکل ۴-۳: تاثیر همزمان کلکتور و pH بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب



شکل ۴-۳: تاثیر همزمان کلکتور و pH بر عیار مس در حضور نانوحباب

۴-۱۵-۳ تاثیر همزمان کلکتور و اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب

در شکل‌های (۴-۳۴، ۴-۳۵)، پیداست که بدون حضور نانوحباب، کلکتور و اندازه ذرات در تمامی ابعاد عیار بهتری نسبت به حضور نانوحباب دارند، اما در حضور نانوحباب با کلکتور پایین و اندازه ذرات نرمه افزایش عیار قابل توجهی در حد دو برابر مشاهده شد.

Factor Coding: Actual

Conce. grade (%)

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

2.34 10.72

X1 = A

X2 = D

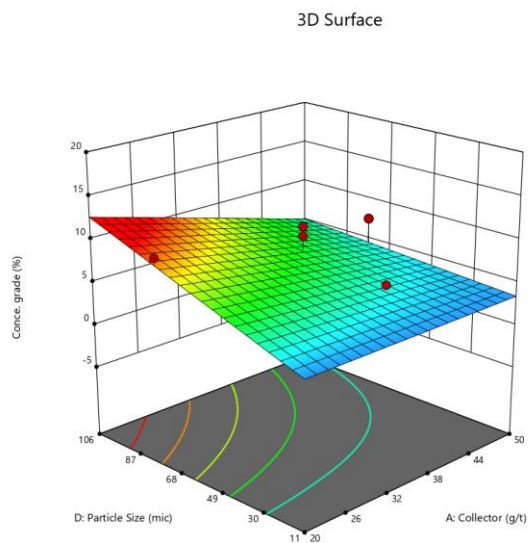
Actual Factors

B = 30

C = 11.8

E = 28

F = 0



شکل ۴-۳۴: تاثیر همزمان کلکتور و اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب

Factor Coding: Actual

Conce. grade (%)

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

2.34 10.72

X1 = A

X2 = D

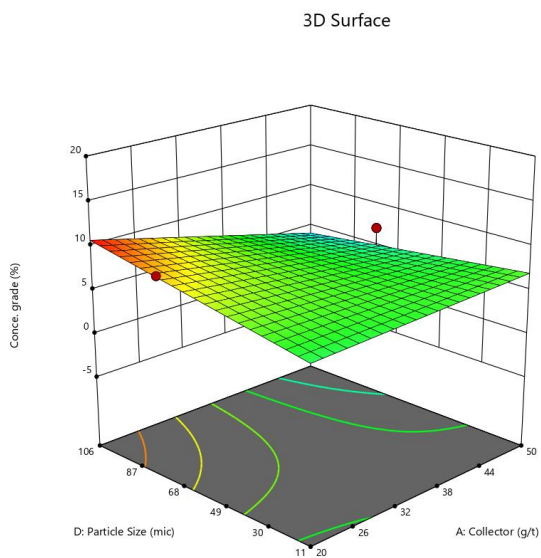
Actual Factors

B = 30

C = 11.8

E = 28

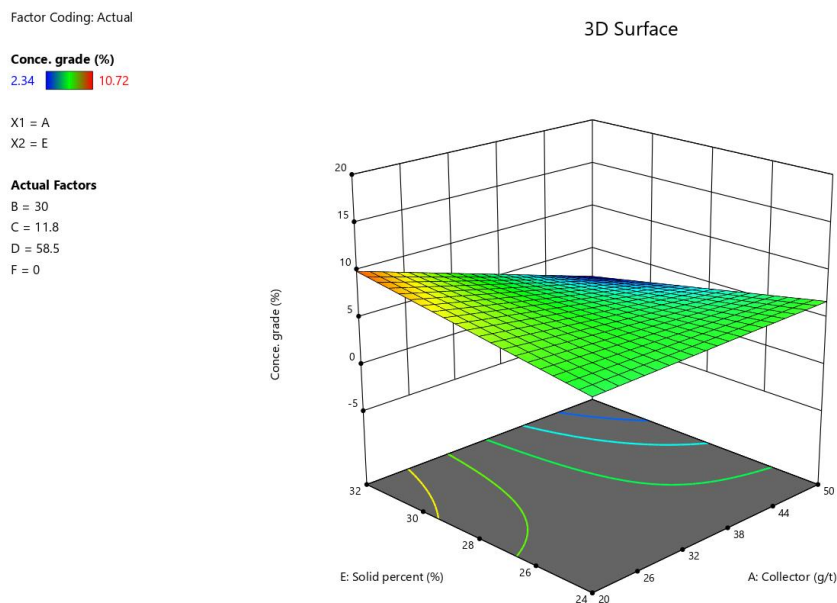
F = 1



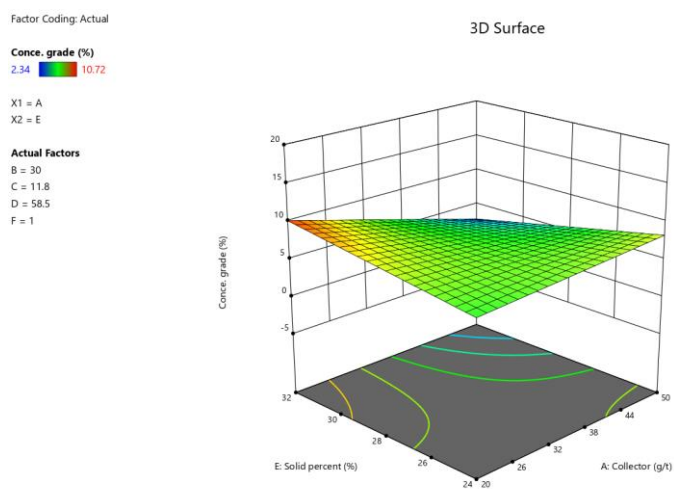
شکل ۴-۳۵: تاثیر همزمان کلکتور و اندازه ذرات بر عیار مس در حضور نانوحباب

۴-۱۵-۴ تاثیر همزمان کلکتور و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب

در شکل‌های (۴-۳۶، ۴-۳۷) همانگونه که پیداست، در حضور نانوحباب در مقایسه بدون حضور نانوحباب، تاثیر همزمان کلکتور و درصد جامد در تمامی ابعاد چه در درصد جامدهای پایین و چه بالا دارای عیار بهتری است.

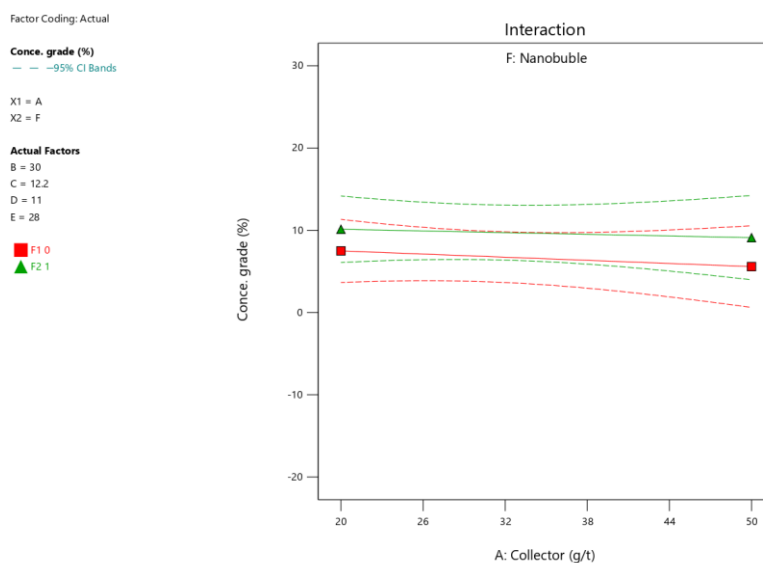


شکل ۴-۳۶: تاثیر همزمان کلکتور و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب



شکل ۴-۳۷: تاثیر همزمان کلکتور و درصد جامد بر عیار مس در حضور نانوحباب

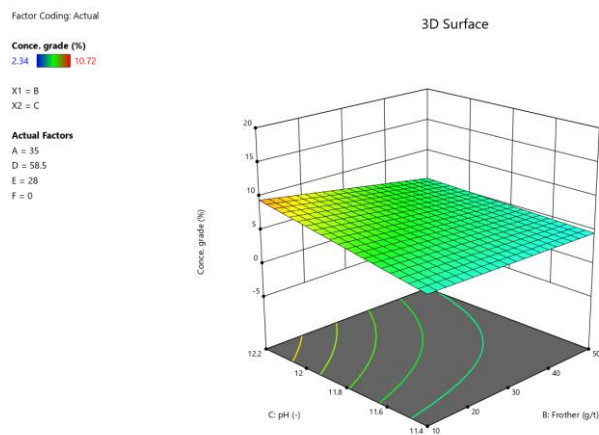
در شکل (۳۸-۴) همانگونه که پیداست تاثیر کلکتور بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تحلیلی، در حضور نانوحباب‌ها چه در کلکتورهای بالا و چه پایین که برای کلکتور پایین مد نظر است. دارای عیار بالاتری در مقایسه با حالت بدون نانو است. به عنوان مثال در مقدار مصرف ۲۰ گرم بر تن کلکتور در حضور نانوحباب نسبت به عدم حضور نانوحباب شاهد افزایش عیار ۲/۶۳ درصدی هستیم.



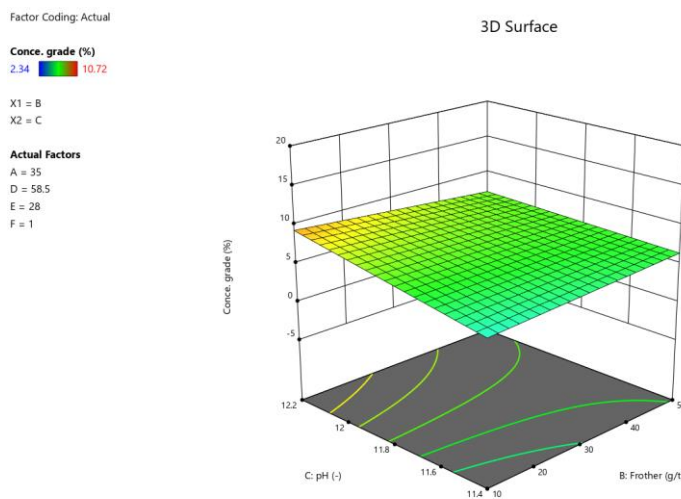
شکل ۳۸-۴: تاثیر کلکتور بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب

۴-۱۵-۵ تاثیر همزمان کف‌ساز و pH بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب

در شکل‌های (۳۹-۴، ۴۰-۴)، همانطور که پیداست، در غیاب نانوحباب با کف‌ساز پایین و pHهای متفاوت شاهد افزایش عیار هستیم، اما در حضور نانوحباب با افزایش کف‌ساز و pHهای متفاوت در مقایسه بدون حضور نانوحباب، افزایش عیار مشاهده شد.



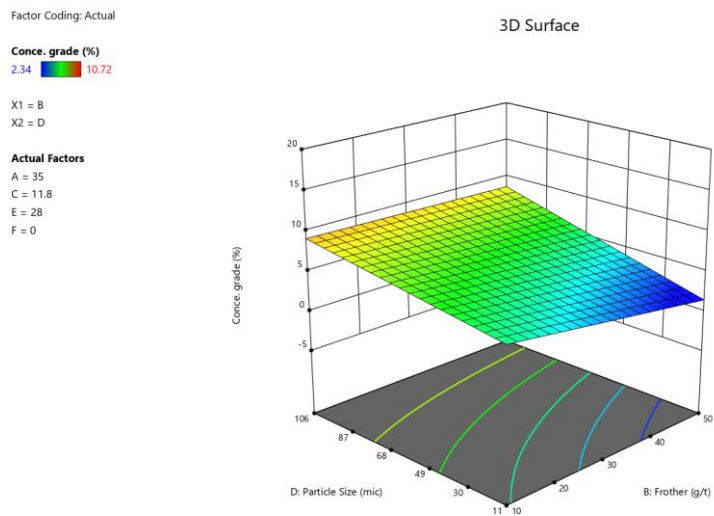
شکل ۴-۳: تاثیر همزمان کف‌ساز و pH بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب



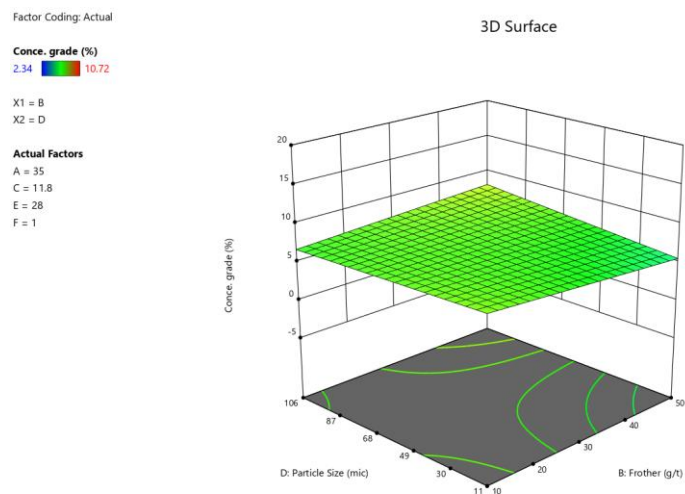
شکل ۴-۴: تاثیر همزمان کف‌ساز و pH بر عیار مس در حضور نانوحباب

۴-۱۵-۶ تاثیر همزمان کف‌ساز و اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب

در شکل‌های (۴-۴۱، ۴-۴۲) پیداست، در حضور نانوحباب با وجود پایین‌ترین کف‌ساز موجود در آزمایش و اندازه ذرات نرمه در مقایسه‌ی آن با حالت بدون نانوحباب افزایش عیار مناسبی بدست آمده است.



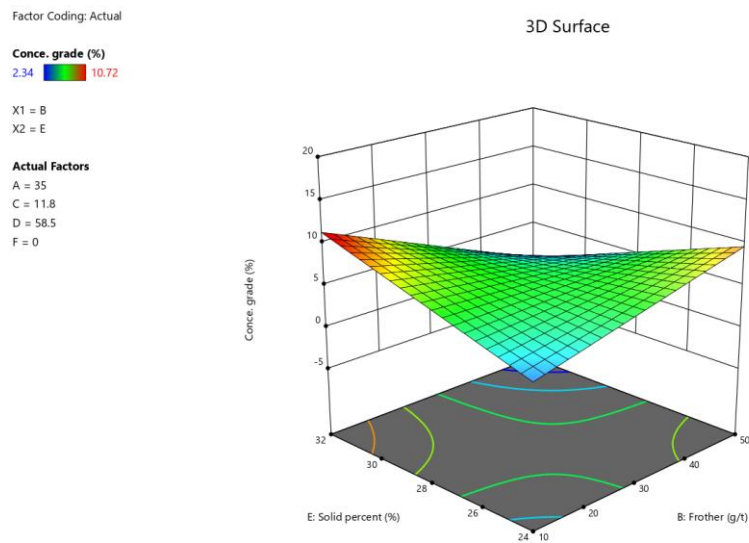
شکل ۴-۴: تاثیر همزمان کف‌ساز و اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب



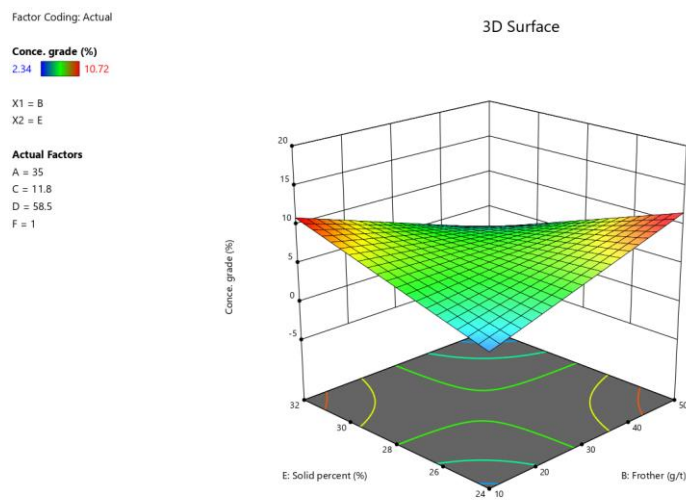
شکل ۴-۴: تاثیر همزمان کف‌ساز و اندازه ذرات بر عیار مس در حضور نانوحباب

۴-۱۵-۷ تاثیر همزمان کف‌ساز و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب

در شکل‌های (۴-۴۳، ۴-۴۴)، همانگونه که مشاهده می‌شود، با وجود نانوحباب با استفاده از کف‌ساز پایین و درصد جامد پایین به عیار بهتری در مقایسه با حالت بدون نانو بدست آمده است.

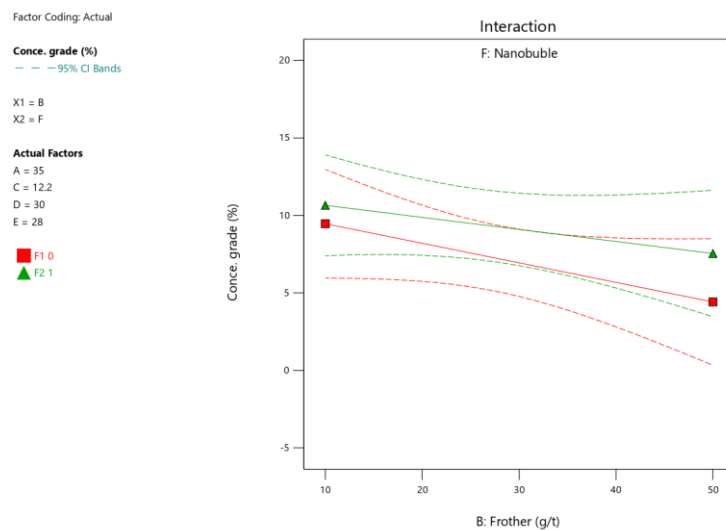


شکل ۴-۴: تاثیر همزمان کف‌ساز و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب



شکل ۴-۴: تاثیر همزمان کف‌ساز و درصد جامد بر عیار مس در حضور نانوحباب

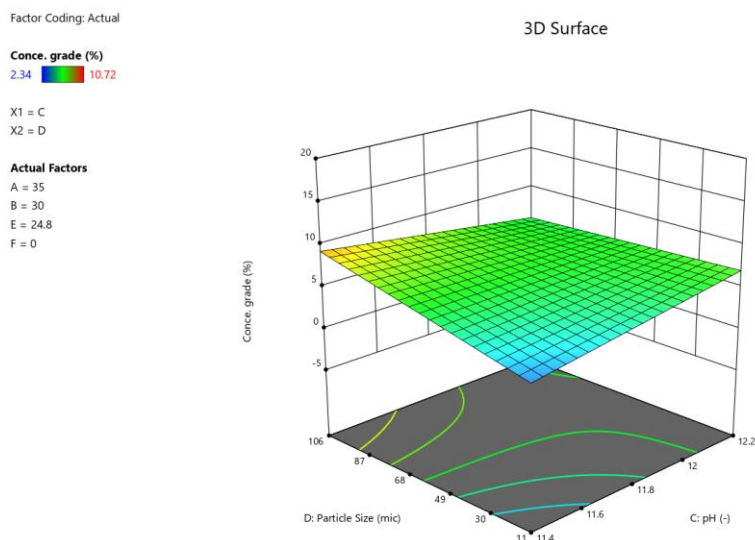
در شکل (۴-۴۵) تاثیر کف‌ساز بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب مشاهده می‌شود. همانگونه که در تصویر زیر می‌بینیم. تاثیر نانوحباب به وضوح بر روی کف‌ساز در حالت‌های مختلف مشهود است، و در مقایسه با حالت بدون نانوحباب بهتر است.



شکل ۴-۴۵: تاثیر کف‌ساز بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب

۴-۱۵-۸ تاثیر همزمان pH و اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب

در شکل‌های (۴-۴۶، ۴-۴۷) همانطور که مشاهده می‌شود، در غیاب نانوحباب تاثیر pH و اندازه ذرات به گونه‌ای است که با اندازه ذرات درشت و pH بالا و پایین عیار خوبی بدست آمده است. اما در حضور نانوحباب با اندازه ذرات نرمه و pH بالا و پایین عیار بهتری در مقایسه با حالت بدون نانو بدست آمده است.



شکل ۴-۴۶: تاثیر همزمان pH و اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب

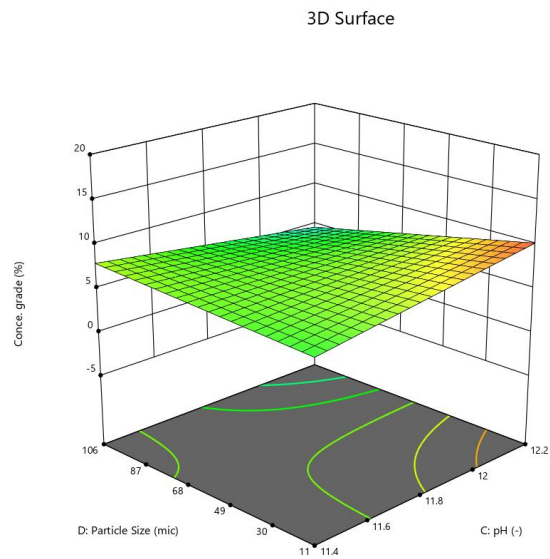
Factor Coding: Actual

Conce. grade (%)
2.34 10.72

X1 = C
X2 = D

Actual Factors

A = 35
B = 30
E = 24.8
F = 1



شکل ۴-۴: تاثیر همزمان pH و اندازه ذرات بر عیار مس در حضور نانوحباب

۹-۱۵-۴ تاثیر همزمان pH و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب

در شکل‌های (۴۸-۴، ۴۹-۴)، همانطور که پیداست، با حضور نانوحباب در pHهای مختلف و درصد جامدهای متفاوت در مقایسه با حالت بدون نانوحباب افزایش عیار بهتری مشاهده شد.

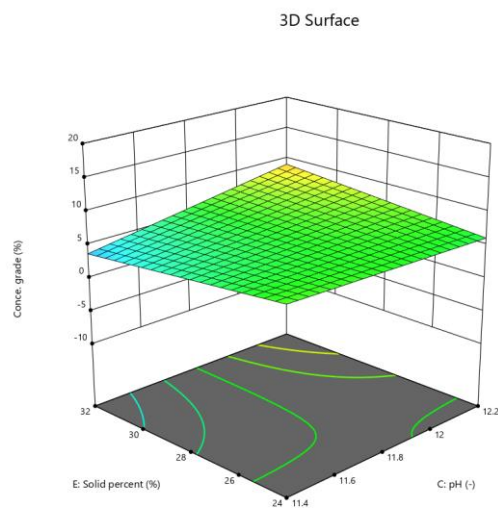
Factor Coding: Actual

Conce. grade (%)
2.34 10.72

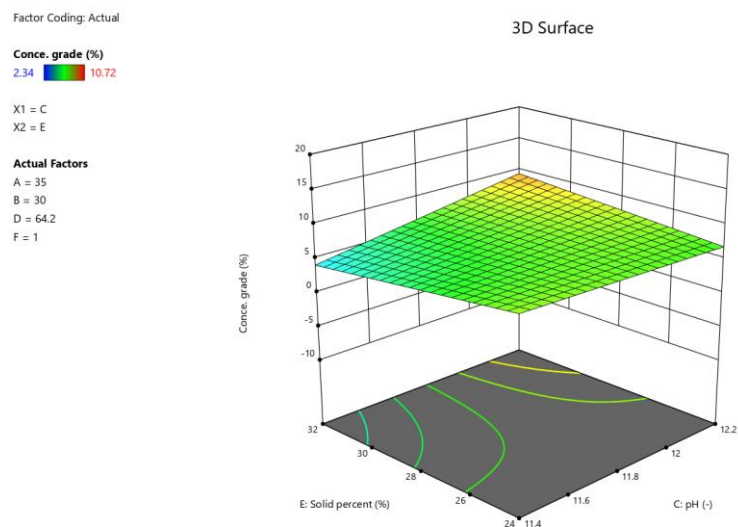
X1 = C
X2 = E

Actual Factors

A = 35
B = 30
D = 64.2
F = 0

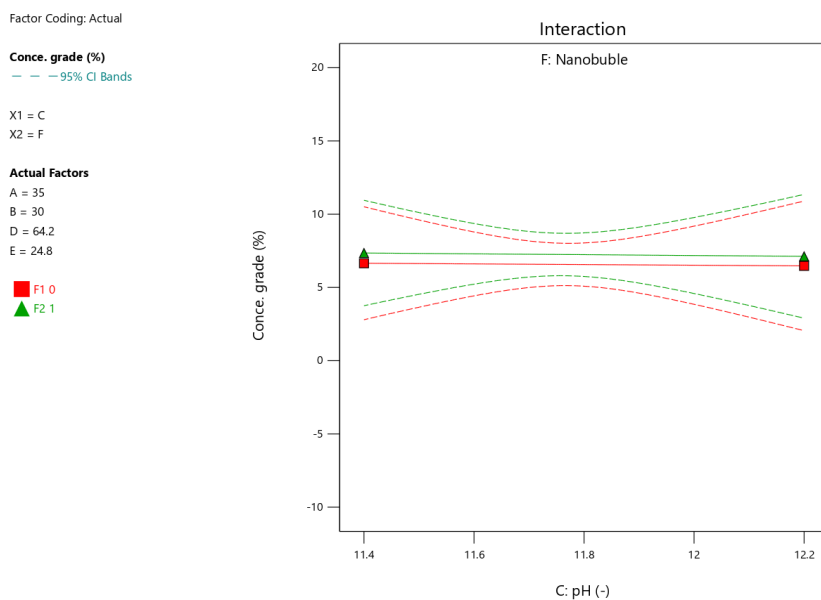


شکل ۴-۴۸: تاثیر همزمان pH و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب



شکل ۴-۴۹: تاثیر همزمان pH و درصد جامد بر عیار مس در حضور نانوحباب

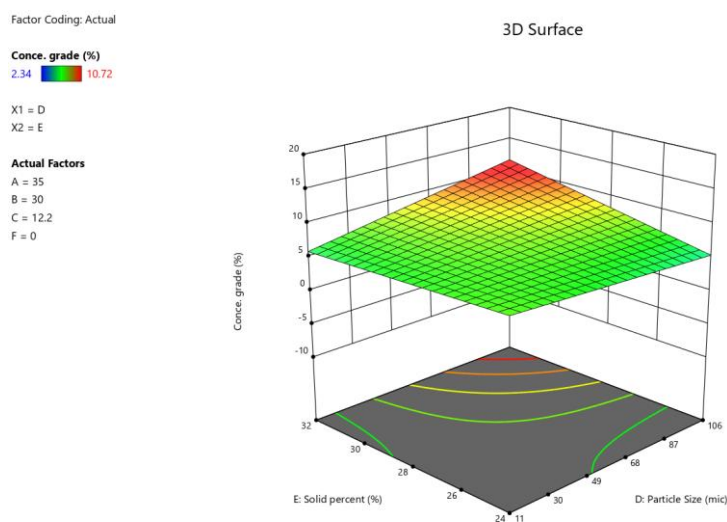
در شکل (۴-۵۰) تاثیر pH بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب مشاهده می‌شود. همانطور که از شکل پیداست، در تمامی pHها تاثیر افزایش عیار در حالت با نانوحباب بهتر است.



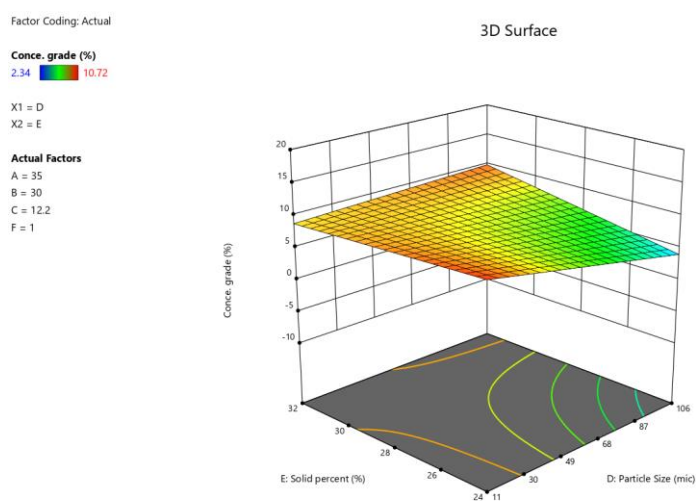
شکل ۴-۵۰: تاثیر pH بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب

۴-۱۵-۱۰ تاثیر همزمان اندازه ذرات و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب

در شکل‌های (۴-۵۱، ۴-۵۲) پیداست، که در غیاب نانوحباب با اندازه ذرات درشت و درصد جامدهای متفاوت عیار بالاتری بدست آمده است، اما در حضور نانوحباب با اندازه ذرات نرمه و درصد جامدهای متفاوت افزایش عیار بهتری مشاهده شد، نشادهنده‌ی این مورد است که نانوحباب در ذرات نرمه نیز بر عیار تاثیر مثبتی دارد.

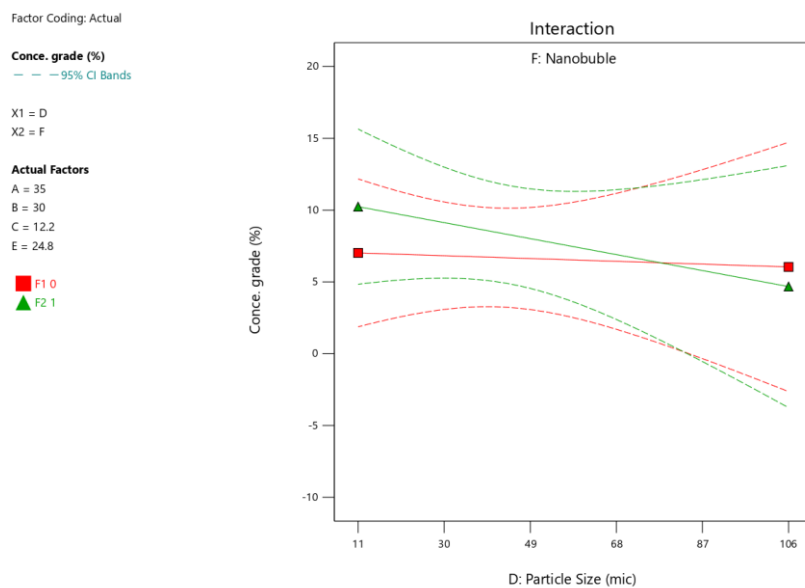


شکل ۴-۵۱: تاثیر همزمان اندازه ذرات و درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور نانوحباب



شکل ۴-۵۲: تاثیر همزمان اندازه ذرات و درصد جامد بر عیار مس در حضور نانوحباب

در شکل (۴-۵۳) همانطور که مشاهده می‌شود. تاثیر اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب است، نشاندهنده‌ی این مورد است که در حضور نانوحباب هر چه اندازه ذرات کمتر باشند به حدی که اندازه ذرات به نرمه برسند، افزایش عیار قابل توجهی نسبت به حالت بدون نانوحباب بدست آمده است.



شکل ۴-۵۳: تاثیر اندازه ذرات بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب

در شکل (۴-۵۴) پیداست، که تاثیر درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب است. طبق شکل حضور نانوحباب‌ها در درصد جامدهای مختلف در مقایسه با عدم حضور آن‌ها باعث افزایش عیار بهتری شده‌اند.

Factor Coding: Actual

Conce. grade (%)
— 95% CI Bands

X1 = E

X2 = F

Actual Factors

A = 35

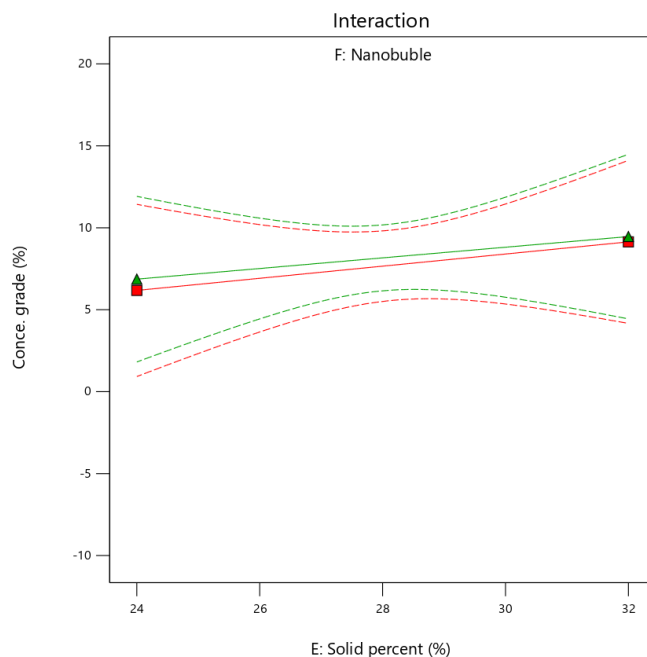
B = 30

C = 12.2

D = 64.2

F1 0

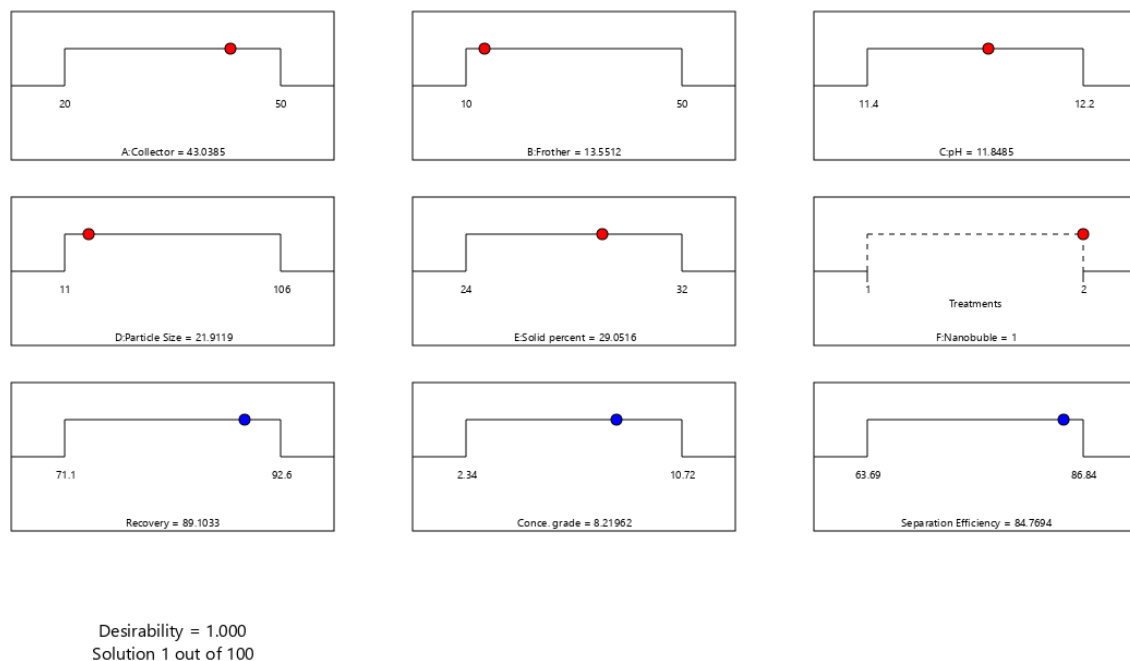
F2 1



شکل ۴-۵: تاثیر درصد جامد بر عیار مس در عدم حضور و حضور نانوحباب

۴-۱۶ بهینه‌سازی

با توجه به این مسئله بهینه‌سازی در روش‌های سطح پاسخ، برای یافتن شرایط بهینه پاسخ‌ها در فضای طراحی است. به همین دلیل بهینه‌سازی نسبت به اهداف می‌تواند در جهت بیشینه یا کمینه کردن یک یا چند پاسخ باشد. در شکل (۴-۵۵) شرایطی را که نرم‌افزار برای پارامترها و پیش‌بینی پاسخ‌ها بررسی می‌کند. بر این اساس است که، در حضور نانوحباب‌ها، با کاهش اندازه ذرات و کف‌ساز و قرار گرفتن pH ۱۱/۸، بازیابی ۸۹/۱۰ و کارایی جدایش ۸۴/۷۶ بدست می‌آید.



شکل ۴-۵۵: شرایط پیشنهادی نرم افزار برای پارامترها و پیش بینی پاسخ

چند تست آزمایش اطمینان جهت تایید شرایط پیش بینی شده انجام گرفت، این نتایج تقریباً مشابه با نتایج بدست آمده و مطلوبیت مدل را تایید کرد.

۴-۱۷ یک بررسی ساده اقتصادی

بر اساس داده‌هایی که از کنترل کیفی تغلیظ گرفته شد، مقدار مصرف خوراک تغلیظ ۱، در سال ۱۳۹۹ برابر با ۲۹۵۷۳۲۴۵/۵۸ تن بود. همچنین میانگین مصرف کف‌ساز و کلکتور در سال ۱۳۹۹ برابر با ۲۱/۳۷ گرم بر تن، ۲۴/۵۸ گرم بر تن بود، طبق محاسبات انجام شده، مصرف کف‌ساز و کلکتور در سال ۱۳۹۹ برابر با (۶۳۲) و (۷۲۷) تن بوده است، در آزمایش‌های خود با کاهش ۶۶ درصدی کف‌ساز و ۵۰ درصدی کلکتور که مشاهده شد، در این مورد نیز کاهش (۴۱۷) تن کف‌ساز و (۳۶۳/۵) تن کلکتور طبق موارد گفته شده مورد بررسی قرار گرفت و به سبب اینکه قیمت‌های مواد شیمیایی در حسابداری صنعتی به روز نبود، با وجود این اگر طبق برآوردها میانگین قیمت کف‌ساز و کلکتور هر کیلوگرم ۱۵۰۰۰ تومان حداقل در نظر گرفته شود.

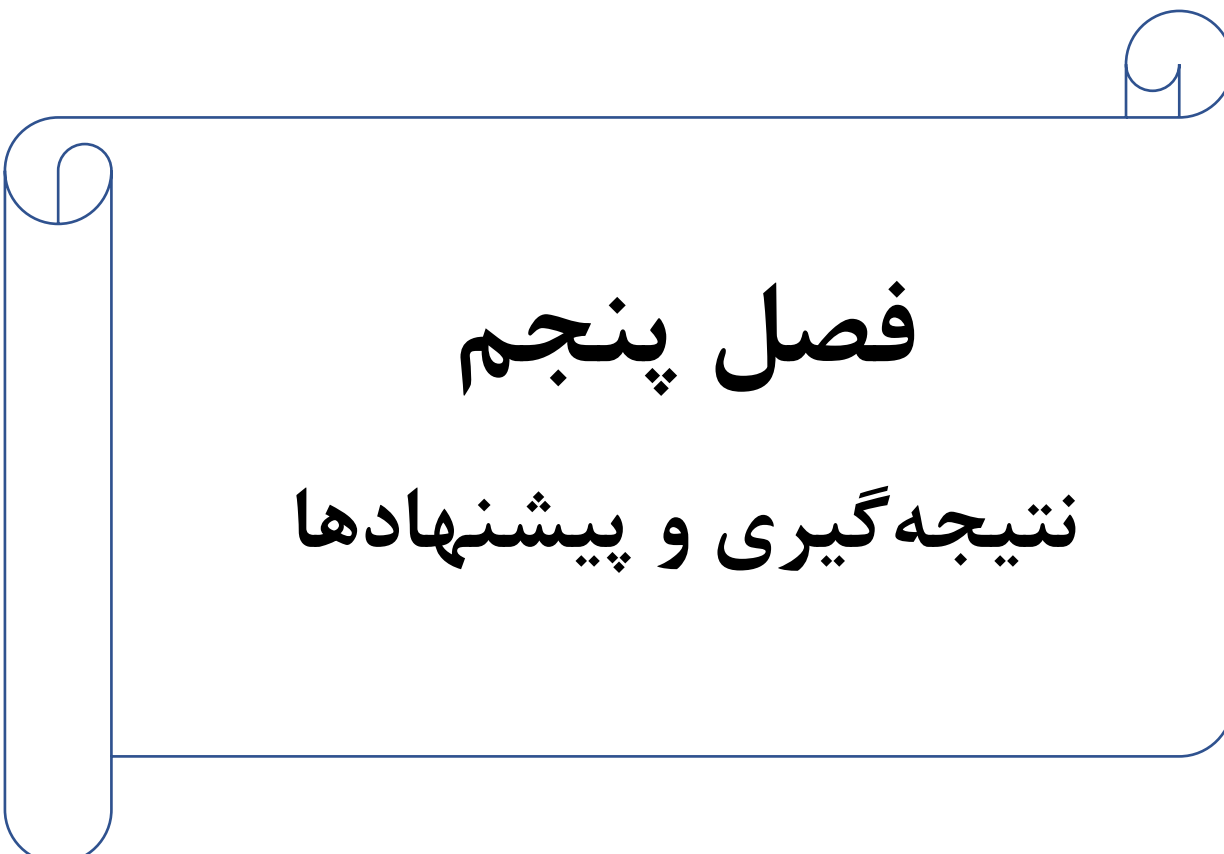
$$417+363.5=780.5 \text{ Ton}$$

$$780.5 * 1000 = 780500 \text{ kg}$$

$$780500 * 150000 = 117.075.000.000 \text{ Rials}$$

که در اینجا بیش از ۱۱ میلیارد و ۷۰۰ میلیون تومان صرفه‌جویی شده است. همچنین از هدرروی ارزی به کشورهای دیگر نیز جلوگیری شده است.

برای اینکه دیده شود آیا نانوحباب به صرفه است یا خیر؟ اینجا باید این نکته را بیان کرد که نانوحباب پایدار رایگان است، فقط هزینه ساخت دستگاه نانوحباب ساز وجود دارد که اگر در ابعاد پایلوت ساخته شود حداکثر هزینه‌ای که باید بابت ساخت آن صرف شود در حد ۲ میلیارد است، با جمع و تفریق ساده بیش از ۹ میلیارد تومان صرفه‌جویی در سال اول دیده شد زیرا هزینه ساخت دستگاه فقط برای یک سال است.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both featuring rounded ends and a slight shadow effect.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

نتایجی که از این تحقیق بدست آمد در متن به آن اشاره شد. همچنین کسانی که در آینده می‌خواهند در این زمینه کار کنند، برای آن‌ها پیشنهاداتی مطرح شده است که می‌تواند در ادامه‌ی این راه برای آن‌ها راهگشا باشد.

۵-۲ نتایج

۱- در حضور نانوحباب‌ها، به علت اینکه پایداری بالایی دارند، مصرف کف‌ساز کاهش می‌یابد بطوریکه در حضور نانوحباب‌ها با یک سوم یعنی ۶۶ درصد مصرف کمتر کف‌ساز بازیابی بهتری نسبت به همین حالت در شرایط عادی بدست آمده است.

۲- تاثیر محلول نانوحباب بر بازیابی اندازه ذرات نرمه و درشت نسبت به عدم حضور نانوحباب قابل قبول بود، به عنوان نمونه با مصرف ۲۰ گرم بر تن کلکتور، ۳۰ گرم بر تن کف‌ساز، $pH=11/8$ ، درصد جامد ۲۸ در اندازه ذرات ۱۰۶ میکرون در حالت عادی بازیابی ۷۵/۵۶ و در حالت حضور نانوحباب ۷۵/۷۵ مشاهده شد.

۳- با افزایش مقدار مصرف کلکتور، بدون حضور نانوحباب‌ها، افزایش بازیابی مس مشاهده شد. اما در حضور نانوحباب‌ها مقدار مصرف کلکتور تاثیر زیادی بر افزایش بازیابی مس مشاهده نشد. علت این مورد، این است که در حالت عادی دچار غلظت بحرانی یا (CMC) می‌شویم اما در حضور نانوحباب‌ها چونکه خاصیت کلکتور ثانویه دارند نیازی به افزایش بیش از حد کلکتور نداریم.

۴- در حضور نانوحباب‌ها، بازیابی زمانی افزایش خوبی دارد که pH در بالاترین حد آزمایشی خود باشد.

۵- در حضور نانوحباب‌ها، با کمترین مقدار درصد جامد یعنی ۲۴ و کاهش کلکتور به پایین‌ترین مقدار خود یعنی ۲۰ گرم بر تن بازیابی ۰/۷ افزایش نسبت به حالت عادی دیده شد.

۶- در حضور نانوحباب‌ها با کمترین مقدار کف‌ساز و pH ۱۲/۲ بازیابی بهتری نسبت به عدم حضور نانوحباب‌ها مشاهده شد.

۷- در حضور نانوحباب، با افزایش کلکتور و کاهش کف‌ساز عیار ۰/۲۸٪ افزایش داشت و با کاهش کلکتور و افزایش کف‌ساز عیار ۱/۳۳٪ افزایش پیدا کرد.

۸- با حضور نانوحباب در مقایسه بدون حضور نانوحباب، در تمامی ابعاد تاثیر همزمان کلکتور و pH، عیار مس در حضور نانوحباب دارای افزایش قابل قبولی بود، به عنوان نمونه با مقدار مصرف ۲۰ گرم بر تن کلکتور و pH=۱۱/۴ در حضور نانوحباب افزایش ۰/۳۸٪ همچنین با مقدار مصرف ۲۰ گرم بر تن کلکتور و pH=۱۲/۲ افزایش ۰/۳۴٪ نسبت به حالت عادی دیده شد.

۹- در حضور نانوحباب با کلکتور پایین و اندازه ذرات نرمه افزایش عیار خوبی در حد دو برابر مشاهده شد.

۱۰- در حضور نانوحباب در مقایسه بدون حضور نانوحباب، تاثیر همزمان کلکتور و درصد جامد در تمامی ابعاد چه در درصد جامدهای پایین و چه بالا عیار بهتری مشاهده شد، به عنوان نمونه با مصرف ۲۰ گرم بر تن کلکتور با درصد جامد ۳۲ عیار ۰/۱۸٪ همچنین با همان مصرف کلکتور و درصد جامد ۲۴ عیار ۰/۵۴٪ افزایش نسبت به حالت عادی دیده شد.

۱۱- در حضور نانوحباب با وجود پایین‌ترین کف‌ساز موجود در آزمایش یعنی ۱۰ گرم بر تن و اندازه ذرات نرمه یعنی ۱۱ میکرون در مقایسه‌ی آن با حالت بدون نانوحباب افزایش ۲/۲۷٪ در عیار مشاهده شد.

۳-۵ پیشنهادها

- ۱- بررسی تاثیرهای منفی و مثبت نانوحباب‌ها در مرحله پایلوت (نیمه‌صنعتی)
- ۲- ساخت دستگاه نانوحباب‌ساز در ابعاد پایلوت
- ۳- تاثیرهای مثبت و منفی نانوحباب‌ها در مراحل مختلف فلوتاسیون بعد از رافر (ریکلینر، کلینر، اسکاونجر)

- [1] National Iranian Copper Industries Company, "Flotation and Re grind, Operating Manual", 1977.
- [2] Sh. He., (2006). "Depression of pyrite in the flotation of copper ores", Thesis Submitted to the University of South Australia, Ian Wark Research Institute University of South Australia.
- [۳] رضائی، ب.، (۱۳۷۵) "فلوتاسیون"، انتشارات دانشگاه هرمزگان، چاپ دوم.
- [4] Voigt S., Szargan R., Suoninen E., (1994) "Interaction of copper (II) ions with pyrite and its influence on ethyl xanthate adsorption. Surface and Interface Analysis", 21 526-536.
- [5] Trahar W.J., Warren, L.J., (1976) "The floatability of very fine particles-a review", Int. J. Miner. Process. 3 (2), 103-131.
- [6] Crawford R., Ralston, J., (1988) "The influence of particle size and contact angle in mineral flotation", Int. J. Miner. Proc. 23 (1-2), 124.
- [7] Fuerstenau M C., Jameson G., Yoon R-H., "Froth flotation A century of innovation", 2007 by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. All rights reserved. Electronic edition published 2009.
- [8] Pease J.D., Curry D.C., Young M.F., (2006) "Designing flotation circuits for high fines recovery", Minerals Engineering, 19, 831-840.
- [9] Zhizhao C., Panagiotis E., (2017) "Theodorakis. Formation, dissolution and properties of surface nanobubbles", Journal of Colloid and Interface Science, 487, 123-129.
- [10] Seung H h., Kim J-M., "Generation and Stability of Bulk Nanobubbles", pubs.acs.org/Langmuir.
- [11] James R. T. Seddon, Detlef Lohse, William A. Ducker, Vincent S. J. Craig. "A Deliberation on Nanobubbles at Surfaces and in Bulk", ChemPHysChem, 0000, 00, 1 – 10.

- [12] Nanobubbles., What are Nanobubbles., 2020., <http://www.nanobubbles.com/what-are-nanobubbles>.
- [13] Fan M., Daniel T., Honaker R., Zhenfu L.U.O., (2010a) “Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part II): fundamental study and theoretical analysis”, *Min. Sci. Technol. (China)* 20 (2) 159-177.
- [14] Fan M., Tao D., Honaker R., Luo Z., (2010b) “Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part III): specially designed laboratory scale column flotation of pHospHate”, *Min. Sci. Technol. (China)* 20 (3) 317-338.
- [15] Fan M., Tao D., Honaker R., Luo Z., (2010c) “Nanobubble generation and its application in froth flotation (part I): nanobubble generation and its effects on properties of microbubble and millimeter scale bubble solutions”, *Min. Sci. Technol. (China)* 20 (1), 0001-0019.
- [16] George P., Nguyen A.V., Jameson G.J., (2004) “Assessment of true flotation and entrainment in the flotation of submicron particles by fine bubbles”, *Miner. Eng.* 17 (7), 847-853.
- [17] Michalopoulou A., Favvas E.P., Mitropoulos A.C., Maravelaki P., Kilikoglou V., Karatasios I., (2018) “A comparative evaluation of bottom-up and top-down methodologies for the synthesis of calcium hydroxide nanoparticles for the consolidation of architectural monuments”, *Mater.Today: Proc.* 5, 27425-27433.
- [18] Suzuki M., Koshiyama K., Shinohara F., Mori S., Ono M., Tomita Y., Yano T., Fujikawa S., Vassaux G., Kodama T., (2005) “Nanobubbles enhanced drug susceptibility of cancer cells using ultrasound”, *Int. Congr. Ser.* 1284, 338-339.
- [19] Wu Z., Chen H., Dong Y., Mao H., Sun J., Chen S., Hu J., (2008) “Cleaning using nanobubbles: defouling by electrochemical generation of bubbles”, *J. Colloid Interface Sci.* 328 (1), 10-14.
- [20] Zhou Z.A., Xu Z., Finch J.A., Masliyah J.H., Chow R.S., (2009) “On the role of cavitation in particle collection in flotation - A critical review”, *II, Miner. Eng.* 22 (5), 419-433.

[۲۱] احمدی، ر.، «۱۳۹۲» «فلوتاسیون نرمه‌ها از باطله‌های معدن با تلفیقی از میکرو نانو حباب‌ها». رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

[22] Franzidis J. P., Manlapig E.V., (1999) “A new comprehensive and useful model for flotation”, In: Parekh B.K., Miller J.D. (Eds). *Advances in flotation Technology*. SME, pp. 413-423.

[23] Trahar W.J., (1981) “A rational interpretation of the role of particle size”, *International Journal of Mineral Processing*, 8, 289-327.

[24] Ahmed N., Jameson G.J., (1985) “the effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles”, *International Journal of Mineral Processing*, 14, 195-215.

[25] Yoon R.H., Luttrell G.H., (1986) “The Effect of Bubble Size on Fine Coal Flotation”, *Coal Preparation*, Val. 2, pp. 179-192.

[26] Sivamohan R., (1990) “the problem of recovering very fine particles in mineral processing – a review”, *International Journal of Mineral Processing*, 28, 247-288.

[27] Matis K., Gallios G. P., Kydros K., (1993) “Separation of fines by flotation techniques”, *Sep. Technol.*, vol. 3, April.

[28] Ansari M.I., (1997) “Fine particle processing - A difficult problem for mineral engineers”, *Nml. Jamshedpur*; pp. 93-102.

[29] Yalcin T., Byers A., (2006) “Dissolved gas flotation in mineral processing”, *Mineral Processing & Extractive Metall. Rev.*, 27: 87–97.

[30] Fan M., Daniel T., Honaker R., Zhenfu L.U.O., (2010) “Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part IV): mechanical cells and specially designed column flotation of coal”, *Mining Science and Technology*, 20, 0641–0671.

[31] Graeme J. Jameson., (2010) “Advances in Fine and Coarse Particle Flotation”, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol 49, No 4 pp 325-330.

[32] Ushikubo F.Y., Furukawa T., Nakagawa R., Enari M., Makino Y., Kawagoe Y., Shiina T., Oshita S., (2010) "Evidence of the existence and the stability of nanobubbles in water", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 361, 31–37.

[33] Miettinen T., Ralston J., Fornasiero D., (2010) "The limits of fine particle flotation", *Minerals Engineering*, 23, 420–437

[34] Albijanic B., Amini E., Wightman E., Ozdemir O, Nguyen A.V., Bradshaw D.J., (2011) "A relationship between the bubble–particle attachment time and the mineralogy of a copper–sulphide ore", *Minerals Engineering*, 24, 1335-1339.

[35] Albijanic B., Bradshaw D.J., Nguyen A.V., (2012) "The relationships between the bubble–particle attachment time, collector dosage and the mineralogy of a copper sulfide ore", *Minerals Engineering*, 36 38, 309-313.

[۳۶] احمدی ر., خدادادی دربان ا., عبداللهی م., (۱۳۹۲) «فلوتاسیون نرمة‌های کالکوپیریت در حضور نانوحباب‌های تولید شده با روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی» نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، دوره ۳۲، شماره ۴.

[37] Ahmadi R., Khodadadi Darban A., Abdollahy M, Maoming F., (2014) "Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine chalcopyrite particles", *International Journal of Mining Science and Technology*, XXX, XXX-XXX.

[38] Calgaroto S., Wilberg K.Q., Rubio J., (2014) "On the nanobubbles interfacial properties and future applications in flotation", *Minerals Engineering*, 60, 33–40.

[39] Calgaroto S., Azevedo A., Rubio J., (2015) "Flotation of quartz particles assisted by nanobubbles", *International Journal of Mineral Processing*, 137, 64-70.

[۴۰] احمدی ر., خدادادی ا., عبداللهی م., (۱۳۹۳) «توزیع ابعادی نانو – میکرو حباب‌ها با روش نوین تفرق اشعه لیزری»، نشریه علمی – پژوهشی "مهندسی معدن" *Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)*. دوره ۹، شماره ۲۵، سال ۱۳۹۳، صفحه ۲۴ تا ۳۴.

- [41] Leistner T., Peuker U.A., Rudolph M., (2017) "How gangue particle size can affect the recovery of ultrafine and fine particles during froth flotation", *Minerals Engineering*, 109, 1-9.
- [42] Rulyov N., Nessipbay U., Dulatbek T., Larissa S., Zhamikhan K., (2017) "Effect of microbubbles as flotation carriers on fine sulphide ore beneficiation", *Mineral processing and extractive metallurgy*.
- [43] Asghari M., Nakhaei F., VandGhorbany O., (2018) "Copper recovery improvement in an industrial flotation circuit: A case study of Sarcheshmeh copper mine", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*.
- [44] Nazari S., Shafaei S.Z., Gharabaghi M., Ahmadi R., Shahbazi B., Maoming F., (2018) "Effects of nanobubble and hydrodynamic parameters on coarse quartz flotation", *International Journal of Mining Science and Technology*, xxx, xxx-xxx.
- [45] de Medeiros A.R.S., Baltar C.A.M., (2018) "Importance of collector chain length in flotation of fine particles", *Minerals Engineering*, 122, 179-184.
- [46] Tao D., Sobhy A., Li L., (2019) "Nanobubble effects on hydrodynamic interactions between particles and bubbles", *Powder Technology*, S0032-5910(19)30126-3.
- [47] Ebrahimi H., Karamoozian M., Saghravani S.F., (2020) "Interaction of applying stable micro-nano bubbles and ultrasonic irradiation in coal flotation", *International Journal of Coal Preparation and Utilization*.
- [48] Farrokhpour S., Filippova I., Filippov L., Picarra A., Rulyov N., Fornasiero D., (2020) "Flotation of fine particles in the presence of combined microbubbles and conventional bubbles", *Minerals Engineering*, 155, 106439.
- [49] Farrokhpour S., Filippov L., Fornasiero D., (2020) "Flotation of Fine Particles: A Review", *Mineral processing and extractive metallurgy review*.
- [50] Li C., Xu M., Xing Y., Zhang H., Peuker U.A., (2020) "Efficient separation of fine coal assisted by surface nanobubbles", *Separation and Purification Technology*. S1383-5866(20)31637-3

[51] Li C., Li X, Xu M., Zhang H., (2020) "Effect of ultrasonication on the flotation of fine graphHite particles: Nanobubbles or not?", *Ultrasonics–Sonochemistry*, 69,105243.

[52] Chang G., Xing Y., Zhang F., Yang Z., Liu X., Gui X., (2020) "Effect of Nanobubbles on the Flotation Performance of Oxidized Coal", *ACS Omega*, 5, 20283-20290.

[53] Li P., Zhang M., Lei W., Yao W., Fan R., (2020) "Effect of Nanobubbles on the Slime Coating of Kaolinite in Coal Flotation", *ACS Omega*, 5, 24773-24779.

[۵۴] عارفی، الف، (۱۳۹۳). «کاربرد میکرو/نانوحباب و نانو مواد در بهبود رفتارهای مکانیکی و عایق بودن مصالح ساختمان (با تاکید بر بتن)»، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران (آب و محیط زیست)، ساغروانی، ف (استاد راهنما)، نائینی، م، (استاد مشاور)، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود

[۵۵] ترکی، ع، (۱۳۹۶). «تاثیر همزمان میکرو-نانوحباب و فوق روان کننده بر مشخصات مکانیکی بتن»، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی، ساغروانی، ف، (استاد راهنما). شفایی، ج، (استاد راهنما).

[۵۶] ابراهیمی، ح، (۱۳۹۶). «بهبود راندمان جدایش زغال سنگ با استفاده از فناوری میکرو حباب ها»، پایان نامه کارشناسی ارشد، کارآموزیان، م، (استاد راهنما)، ساغروانی، ف، (استاد مشاور).

[۵۷] قدیانی، الف، (۱۳۹۶). «بررسی امواج فراصوت بر بهبود فرآیند فلو تاسیون زغال سنگ»، رساله دکتری مهندسی معدن (فرآوری مواد معدنی)، نوع پرست، م، (استاد راهنما)، شفایی تنکابنی، ز، (استاد راهنما)، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران.

[58] Tao , Y ., liu , J ., Yu , S ., Tao , D.(2006). Picobubble enhanced fine coal flotation . separation science and technology , 41: 3597-3607 .

Abstract

Flotation is one of the most important common processes for separating valuable minerals from gangue. Particle size plays an important role in this process. Today, the problem that this process encounters with is existence of coarse particles and fine particles, which makes the whole process inefficient. So far, a lot of research has been done on coarse particles and fine particles with the presence of ordinary bubbles. Problems with fine particles include: their flotation kinetics is slower and their collision efficiency is lower. In this thesis, the effect of stable nanobubbles that can maintain their stability for a long time, and recovery of fine and coarse particles are investigated. Stable nanobubbles can increase particle hydrophobicity, which increases the possibility of bubble-particle bonding and decreases the probability of separation. In this thesis, the focus is on increasing recovery and reducing chemical consumption. After preparing the samples from the fine stockroom of the concentrate plant 1 of Sarcheshmeh copper complex and performing the comminution steps, the representative sample that was prepared was sent for chemical analysis (XRF, XRD) and mineralogy. By designing 50 experiments with DX13 software, the effects of amount of collector consumption, frother, pH, particle size and solid percentage were investigated, 25 experiments were performed with normal flotation and 25 experiments were performed under the influence of nanobubbles. After performing the analyzes and comparing their interaction with each other, the results demonstrated that the recovery and grade of copper in the presence of nanobubbles increased by about 5.74 and 35%, respectively. Also, a 50% reduction in the collector consumption and a 66% reduction in the frother consumption were observed in the presence of nanobubbles.

Keywords: Stable nano-bubble, Fine Particles, Recovery increase, Reduce of Material Consumption, Sarcheshmeh Copper Complex



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

Master of Science Thesis in Mineral Processing Engineering

**Investigation of the effects of fines on flotation of sulfide copper
and the feasibility of recovering fines by applying stable
nanobubbles**

By: Ali Nikouei Mahani

Supervisors:

Dr. Mohammad Karamoozian

Dr. Mohammad Jahani Chegeni

October 2021