

صلى الله عليه وسلم



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بهبود راندمان جدایش زغال سنگ با استفاده از فناوری میکرو حباب‌ها

نگارنده:

حسین ابراهیمی

استاد راهنما:

دکتر محمد کارآموزیان

استاد مشاور:

دکتر سید فضل الله ساغروانی

بهمن ۱۳۹۶

شماره ۹۶۲۰۸۳
تاریخ: ۹۶/۱۲/۵

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

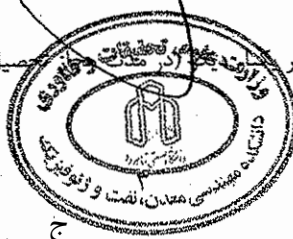
با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای حسین ابراهیمی
با شماره دانشجویی ۹۴۰۱۳۶۴ رشته مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی تحت عنوان
بهبود راندمان جدایش زغال سنگ با استفاده از فناوری میکرو حباب ها که در تاریخ ۹۶/۱۱/۰۸ با حضور هیأت
محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: <u>خیلی خوب</u>) ☒ مردود ☐			
نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☒			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد کارآموزیان	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	دکتر سید فضل الله ساغروانی	دانشیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر رامین رفیعی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر اصغر عزیزی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر محمد جهانی چگنی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۹۶/۱۲/۵

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یک بار مجاز است مجدداً در همان رشته و مقطع تحصیلی (معدل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم به:

این مجموعه را به پدر و مادر مهربان و خواهر عزیزم تقدیم می‌کنم:

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی،

عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است،

قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهمان به شجاعت می‌گراید،

و نیز محبت‌های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند.

تشکر و قدردانی:

نهال را "باران" باید، تا سیرابش کند از آب حیات و "آفتاب" باید تا بتاباند نیرو را و محکم کند شاخه‌های تازه روئیده را؛ بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه‌ام جناب آقای دکتر "محمد کارآموزیان" آموزگاری که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند تقدیر و تشکر نمایم.

از جناب آقای دکتر فضل‌الله ساغروانی بسیار سپاسگزارم چرا که بدون کمک‌های بی‌چشم داشت ایشان تأمین این پایان نامه میسر نبود.

همچنین از مهندس بابک عابدی اورنگ، مهندس افشین قلی‌نیا، مهندس آرش درویشی و تمامی دوستانی که من را در اتمام این پایان نامه همراهی کرده‌اند، نهایت تشکر را دارم.

و در آخر بر دستان پدر و مادر عزیزم که همواره من را در این مسیر پر تلاطم همراهی نموده‌اند، بوسه می‌زنم.

تعهدنامه

اینجانب **حسین ابراهیمی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی معدن گرایش **فرآوری مواد معدنی** دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **بهبود راندمان جدایش زغال سنگ با استفاده از فناوری میکروحباب‌ها** تحت راهنمایی **دکتر محمد کارآموزیان** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا 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 می‌باشد 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 تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- 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 :

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

فلوتاسیون مؤثرترین روش جدایش ذرات ریز (کوچکتر از ۵۰۰ میکرومتر) زغال سنگ از باطله است. هنگامی که اندازه ذرات زغال سنگ بسیار ریز (زیر ۵۰ میکرومتر) یا درشت (بالتر از ۵۰۰ میکرومتر) باشد، راندمان فلوتاسیون به شدت کاهش می یابد. تلاش برای افزایش بازیابی این ذرات به وسیله افزایش غلظت کلکتورهای نفتی اغلب منجر به تولید قابل توجه مواد غیر قابل اشتعال می شود که به همراه زغال سنگ شناور شده اند. بنابراین بازیابی فلوتاسیون ذرات زغال سنگ در ابعاد بسیار ریز و درشت، پایین است. در این پایان نامه، تمرکز بر روی بهبود راندمان فلوتاسیون زغال سنگ قرار گرفته است. پس از تهیه نمونه زغال سنگ و خردایش آن، نمونه ها به سه بخش ابعادی تقسیم شدند. بررسی های اولیه نشان داد، هر بخش دارای سه درصد خاکستر خوراک متفاوت است. آزمایش های فلوتاسیون با هدف تست پارامترهای مختلف جهت دستیابی به بازیابی بالاتر در دو بخش فلوتاسیون و سینتیک فلوتاسیون طراحی شدند. با توجه به مطالعه های اخیر در زمینه حضور میکرو-نانوحباب ها و امواج فراصوت در علوم مختلف و مشاهده نتایج قابل توجه این فناوری های پیشتاز، تأثیرات این دو عامل به صورت جداگانه و همزمان در فلوتاسیون زغال سنگ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این آزمایش ها بر روی نمونه های زغال سنگ حاکی از آن بود که در حضور میکرو-نانوحباب بازیابی در تمام ابعاد با درصد خاکستر خوراک متفاوت بهبود یافته است. همچنین، آزمایش های مربوط به امواج فراصوت نیز تأثیرات مثبت بر بازیابی فلوتاسیون زغال سنگ را در حضور این امواج نشان دادند. نتایج آزمایش های مربوط به استفاده همزمان از این دو عامل بیان گر عملکرد بهتر میکرو-نانوحباب ها در حضور امواج فراصوت است. در بخش سینتیک نیز، ثابت نرخ فلوتاسیون در حضور میکرو-نانوحباب ها بهبود یافت.

کلمات کلیدی: فلوتاسیون، زغال سنگ، میکرو-نانوحباب، امواج فراصوت، سینتیک

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۱-۱ فلوتاسیون	۳
۲-۱-۱ میکرو-نانوحباب	۵
۳-۱-۱ امواج فراصوت	۶
۴-۱-۱ فلوتاسیون زغال سنگ	۷
۲-۱ بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق	۸
۳-۱ اهداف تحقیق	۱۱
۴-۱ ساختار تحقیق	۱۲
فصل دوم: مروری بر مطالعه‌های انجام شده	۱۳
۱-۲ مقدمه	۱۴
۲-۲ کاربرد میکرو-نانوحباب در فرآوری مواد معدنی	۱۴
۳-۲ کاربرد امواج فراصوت در فرآوری مواد معدنی	۱۶
۴-۲ سینتیک فلوتاسیون زغال سنگ	۱۸
۵-۲ جمع‌بندی	۱۹
فصل سوم: مواد و روش‌ها	۲۱
۱-۳ مقدمه	۲۲
۲-۳ مواد و تجهیزات	۲۲

۲۲	۱-۲-۳ تجهیزات و دستگاه‌های مورد استفاده در آزمایش
۲۳	۲-۲-۳ محلول میکرو-نانوحباب
۲۳	۱-۲-۲-۳ چگونگی تولید و ساخت میکرو-نانوحباب
۲۴	۲-۲-۲-۳ روش اندازه‌گیری ابعاد میکرو-نانوحباب
۲۵	۳-۲-۲-۳ اندازه‌گیری ابعاد میکرو-نانوحباب
۲۶	۳-۲-۳ مواد شیمیایی مورد استفاده در آزمایش‌ها
۲۷	۳-۳ روش‌ها
۲۷	۱-۳-۳ تهیه و آماده‌سازی نمونه
۲۷	۲-۳-۳ تعیین درصد خاکستر
۲۸	۱-۲-۳-۳ آنالیز خوراک اولیه فلوتاسیون
۲۸	۳-۳-۳ انتخاب پارامترهای مورد بررسی و سطوح هر یک از آن‌ها
۳۰	۴-۳-۳ انتخاب طرح آزمایش‌ها
۳۲	۵-۳-۳ آزمایش‌های فلوتاسیون
۳۳	۶-۳-۳ سینتیک فلوتاسیون
۳۶	۷-۳-۳ محاسبه شاخص‌های فرآیندی
۳۷	۴-۳ جمع‌بندی
۳۹	فصل چهارم: نتایج تحقیق
۴۰	۱-۴ مقدمه
۴۰	۲-۴ نتایج درصد خاکستر در کنسانتره و باطله

۴-۴	تحلیل نتایج در نرم افزار	۴۱
۴-۳-۱	آنالیز واریانس	۴۳
۴-۴	بررسی تأثیر میکرو-نانو حباب و فراصوت بر پارامترهای عملیاتی	۴۴
۴-۴-۱	بررسی عملکرد محلول میکرو-نانوحباب بر پارامترهای عملیاتی	۴۴
۴-۴-۲	فراصوت	۵۱
۴-۴-۲-۱	عملکرد امواج فراصوت	۵۱
۴-۴-۲-۲	بررسی عملکرد فراصوت بر پارامترهای عملیاتی	۵۳
۴-۴-۳	بررسی عملکرد محلول میکرو-نانوحباب و امواج فراصوت	۵۷
۴-۵	بررسی سینتیک فلوتاسیون	۵۸
۴-۶	جمع بندی	۶۴
	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها	۶۷
۵-۱	مقدمه	۶۸
۵-۲	نتایج	۶۸
۵-۳	پیشنهادها	۷۰
	منابع	۷۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: نمایی از ماشین فلوتاسیون مکانیکی ساخت شرکت اتوکومپو. ۴
- شکل ۲-۱: اصول عملیات فلوتاسیون. ۵
- شکل ۳-۱: نمودار مربوط به سهم منابع انرژی در تامین انرژی ایالات متحده آمریکا. ۱۰
- شکل ۱-۳: شماتیکی از دستگاه میکرو-نانوحباب: (۱) مخزن آب، (۲) مولد با قطر مرکزی ۱ میلی‌متر، (۳) مولد با قطر مرکزی ۳ میلی‌متر، (۴) مولد با قطر مرکزی ۵ میلی‌متر، (۵) شیرهای تنظیم دبی، (۶) شیرهای اصلی مولد، (۷) پمپ آب، (۸) شیر نمونه‌گیری. ۲۴
- شکل ۲-۳: توزیع شدت میکرو-نانوحباب‌ها. ۲۶
- شکل ۳-۳: توزیع حجمی میکرو-نانوحباب‌ها. ۲۶
- شکل ۴-۳: توزیع تعدادی میکرو-نانوحباب‌ها. ۲۷
- شکل ۵-۳: سیستم تنظیم شده برای انجام فلوتاسیون. ۳۳
- شکل ۱-۴: تأثیر هم‌زمان محلول میکرو-نانوحباب و مقدار کلکتور بر بازیابی (٪) (الف)، شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر (ب) در مقدار کلکتور (گرم بر تن) و اندازه حباب: ۱ (محلول میکرو-نانوحباب)، ۲ (حباب معمولی). ۴۶
- شکل ۲-۴: تأثیر هم‌زمان محلول میکرو-نانوحباب و مقدار کفساز بر بازیابی (٪) (الف)، خاکستر محصول (٪) (ب) در مقدار کفساز (گرم بر تن) و اندازه حباب: ۱ (محلول میکرو-نانوحباب)، ۲ (حباب معمولی). ۴۸
- شکل ۳-۴: تأثیر هم‌زمان محلول میکرو-نانوحباب و اندازه ذرات (میکرون) بر بازیابی (٪)، در اندازه ذرات: ۱: درشت (۸۰۰ - ۴۰۰ + میکرون)، ۲: متوسط (۴۰۰ - ۱۰۰ + میکرون)، ۳: ریز (۱۰۰ - میکرون) و موج فراصوت (کیلوهرتز). ۴۸
- شکل ۴-۴: شماتیک اتصال ذره به حباب، قسمت (الف) اتصال ذره و حباب بدون حضور میکرو-نانو حباب، قسمت (ب) اتصال ذره و حباب در حضور میکرو-نانوحباب. ۴۹

- شکل ۴-۵: مکانیسم شناوری ذرات در حضور میکرو-نانوحباب، (الف) ذرات معمولی، (ب) ذرات ریز، (ج) ذرات درشت. ۵۰
- شکل ۴-۶: تأثیر هم‌زمان محلول میکرو-نانوحباب و خاکستر خوراک (٪) بر بازیابی مواد سوختنی (٪) (الف) و شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر در خاکستر خوراک: ۱ (کم)، ۲ (متوسط)، ۳ (زیاد) و اندازه حباب: ۱ (محلول میکرو-نانوحباب)، ۲ (حباب معمولی). ۵۱
- شکل ۴-۷: تأثیر هم‌زمان فراصوت و مقدار کلکتور بر بازیابی (٪) (الف)، شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر (ب). ۵۵
- شکل ۴-۸: تأثیر هم‌زمان فراصوت و مقدار کفساز بر بازیابی (٪) (الف)، بازیابی مواد سوختی (ب). ۵۶
- شکل ۴-۹: تأثیر هم‌زمان امواج فراصوت و اندازه ذرات (میکرون) بر بازیابی (٪)، در اندازه ذرات: ۱: درشت (۸۰۰ - ۴۰۰ میکرون)، ۲: متوسط (۴۰۰ - ۱۰۰ میکرون)، ۳: ریز (۱۰۰ - میکرون) و موج فراصوت (کیلوهرتز). ۵۶
- شکل ۴-۱۰: تأثیر هم‌زمان امواج فراصوت و خاکستر خوراک (٪) بر بازیابی مواد سوختنی (٪) (الف) و شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر در خاکستر خوراک: ۱ (کم)، ۲ (متوسط)، ۳ (زیاد) و موج فراصوت (کیلوهرتز). ۵۷
- شکل ۴-۱۱: اثر موج فراصوت بر محلول حاوی میکرو-نانوحباب. ۵۸
- شکل ۴-۱۲: تأثیر هم‌زمان محلول میکرو-نانوحباب و امواج فراصوت بر بازیابی مواد سوختنی (٪) (الف) و خاکستر محصول (٪) (ب): اندازه حباب: ۱ (محلول میکرو-نانوحباب)، ۲ (حباب معمولی) و موج فراصوت (کیلوهرتز). ۵۹
- شکل ۴-۱۳: نمودارهای بازیابی تجمعی ماده سوختنی در آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون. ۶۰

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مطالعه‌های کاربرد میکرو-نانوحباب در فرآوری مواد معدنی. ۱۴
- جدول ۲-۲: مطالعه تأثیر امواج فراصوت در فرآوری مواد معدنی. ۱۷
- جدول ۳-۲: مطالعه سینتیک فلوتاسیون. ۱۸
- جدول ۱-۳: دانه‌بندی خوراک. ۲۷
- جدول ۲-۳: نتایج آنالیز خوراک فلوتاسیون. ۲۸
- جدول ۳-۳: پارامترهای مورد بررسی و سطوح تغییرات آن‌ها. ۳۰
- جدول ۴-۳: طرح آزمایش‌ها. ۳۰
- جدول ۵-۳: مقدار پارامترهای انتخابی در آزمایش‌ها سینتیک فلوتاسیون. ۳۶
- جدول ۱-۴: میزان خاکستر در خوراک، کنسانتره و باطله. ۴۰
- جدول ۲-۴: محاسبه شاخص‌های فرآیندی. ۴۲
- جدول ۳-۴: آنالیز واریانس بازیابی ماده سوختنی. ۴۴
- جدول ۴-۴: نتایج حاصل از برازش مدل ۱ در آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون. ۶۱
- جدول ۵-۴: نتایج حاصل از برازش مدل ۲ در آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون. ۶۱
- جدول ۶-۴: نتایج حاصل از برازش مدل ۳ در آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون. ۶۲
- جدول ۷-۴: نتایج حاصل از برازش مدل ۴ در آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون. ۶۳
- جدول ۸-۴: انتخاب برازش برای هر یک از مدل‌های سینتیکی. ۶۴
- جدول ۹-۴: سهم تأثیر تغییر نرخ ثابت فلوتاسیون در حضور میکرو-نانوحباب‌ها. ۶۴

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

با روندی که امروزه دنیای صنعت و فناوری‌های پیشرفته در پیش دارند، هر روز نیاز به مواد معدنی بیش‌تر می‌شود و در جهت تامین نیازها، بهره‌وری از ذخایر معدنی نیز روز به روز افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش تولید مواد معدنی به عنوان ماده اولیه مورد مصرف در صنعت، موجب اقتصادی شدن مواد معدنی با عیار کم‌تر می‌شود. پیشرفت فناوری، استفاده از مواد اولیه با مشخصات فنی دقیق‌تری را ضروری می‌سازد. کاهش ذخایر معدنی با عیار بالا و ترکیب‌های کانی‌شناختی ساده نیز موجب شده است که معادنی با عیار بسیار پایین و ترکیب‌های کانی‌شناختی پیچیده مورد استفاده قرار گیرند (اولیاءزاده و همکاران، ۱۳۸۴).

مواد معدنی کم‌عیار برای ورود به بازار مصرف نیاز به یک مجموعه عملیات تغلیظ و پریارسازی دارند. از آن‌جا که مواد معدنی استخراج شده از معادن بدون انجام فرآیند پریارسازی قابلیت استفاده در صنعت را ندارند، علم فرآوری به عنوان یک فرآیند مهم شناخته می‌شود. فعالیت‌های معدنی به عنوان پایه اکثر فعالیت‌های اقتصادی بدون علم فرآوری مواد معدنی با چالش‌های جدی رو به رو می‌شود (اولیاءزاده و همکاران، ۱۳۸۴).

معرفی فرآیند فلوتاسیون در اوایل قرن بیستم، باعث ایجاد تحول اساسی در صنایع معدنی شده است و یک گام مهم در پیشرفت صنعتی بشر محسوب می‌شود (اولیاءزاده و همکاران، ۱۳۸۴). این روش در ابتدا برای فرآوری مواد معدنی سولفیدی مس، سرب و روی توسعه یافت. فلوتاسیون برای مواد معدنی فلزی سولفیدی مانند نیکل، پلاتین، سنگ معدنی سولفیدی میزبان طلا و مواد معدنی فلزی غیر سولفیدی شامل اکسیدها مانند هماتیت، کاسیتريت و مواد معدنی غیر فلزی مانند فلوریت، تالک، فسفات، پتاس و مواد معدنی سوختی مانند زغال‌سنگ گسترش یافته است (Rao & Leja, 2004).

لازم به تذکر است که هر چند کاربرد عمده فلوتاسیون در آرایش مواد معدنی است، اما در سایر صنایع از قبیل تصفیه پساب‌های صنعتی، صنایع کاغذسازی به منظور بازیافت کاغذهای مستعمل مورد

استفاده قرار گرفته است (نعمت‌اللهی، ۱۳۸۷).

۱-۱-۱ فلوتاسیون^۱

بدون شک، فلوتاسیون کارآمدترین روش کانه‌آرایی است و بیش‌ترین کاربرد را در آرایش مواد معدنی دارد (نعمت‌اللهی، ۱۳۸۷). فلوتاسیون فرآیند جداسازی است که از اختلافات طبیعی در ویژگی‌های سطح مواد معدنی بهره می‌گیرد، حال اگر سطح به راحتی توسط آب مرطوب شود، آب‌دوست^۲ است و یا اگر سطح آب را دفع کند، آب‌گریز^۳ است. اگر سطح ذرات آب‌گریز باشد، ذرات مواد معدنی می‌توانند به حباب‌های هوا متصل و شناور شوند (Wills & Finch, 2016).

سیستم فلوتاسیون پیچیده است و شامل سه فاز (جامدات، آب و هوا) و تعامل متغیرهای شیمیایی و فیزیکی می‌شود. متغیرهای شیمیایی به منظور کنترل انتقال، بین حالت آب‌دوستی و آب‌گریزی استفاده می‌شوند. متغیرهای فیزیکی شامل مواردی است که از خواص سنگ معدن، مانند اندازه ذرات و ترکیب (آزادسازی)، و عوامل مشتق شده از ماشین فلوتاسیون^۴ مانند میزان هوادهی و اندازه حباب، به دست می‌آید (Wills & Finch, 2016). روند فراوری مواد معدنی به وسیله فلوتاسیون شامل سه مکانیسم زیر است (Fuerstenau et al., 2007; Bulatovic, 2007, 2010):

۱- چسبندگی انتخابی^۵ به حباب‌های هوا (یا فلوتاسیون واقعی^۶)،

۲- دنباله‌روی^۷ در آبی که از میان کف^۸ عبور می‌کند،

۳- گیرافتادن^۹ فیزیکی، بین ذرات چسبیده شده به حباب‌های هوا.

^۱ Flotation

^۲ Hydrophobic

^۳ Hydrophilic

^۴ Flotation Machine-derived Factors

^۵ Selective Attachment

^۶ True Flotation

^۷ Entrainment

^۸ Froth

^۹ Entrapment

عملیات فلوتاسیون توسط ماشین‌های مکانیکی و ستونی فلوتاسیون انجام می‌شوند. سلول‌های

فلوتاسیون مکانیکی شامل قسمت‌های اصلی زیر می‌باشند (Mular & Barratt, 2002):

۱. همزن^۱ که شامل دو قسمت تیغه‌های همزن^۲ و تثبیت‌کننده^۳ است؛

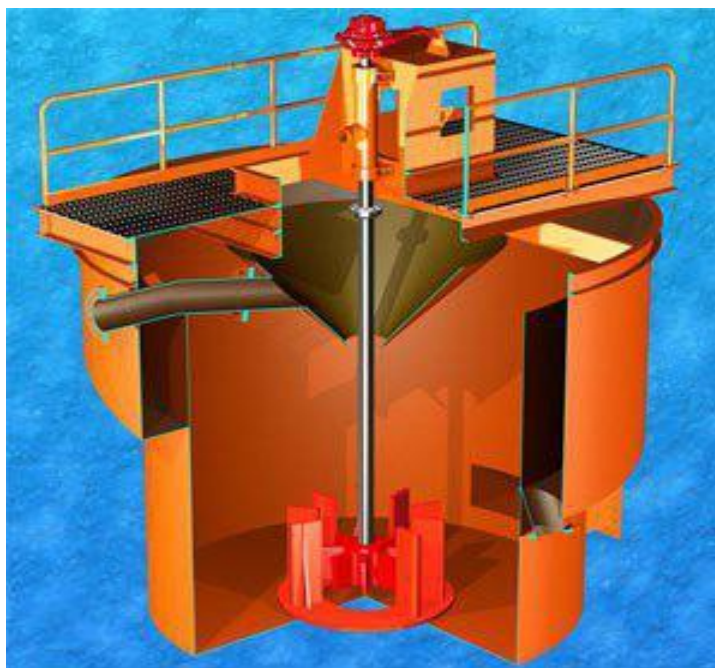
۲. سیستم هوادهی که به دو حالت منبع و یا خود هواده^۴ است؛

۳. منبع ورودی خوراک؛

۴. سیستم تخلیه که به دو روش سرریز مستقیم و یا نیروی مکانیکی به شکل پارو است.

شکل ۱-۱ یک ماشین فلوتاسیون در مقیاس صنعتی و شکل ۲-۱ اصول عملیات فلوتاسیون را نمایش

می‌دهند.



شکل ۱-۱: نمایی از ماشین فلوتاسیون مکانیکی ساخت شرکت اتوکومپو^۵ (Mular & Barratt, 2002).

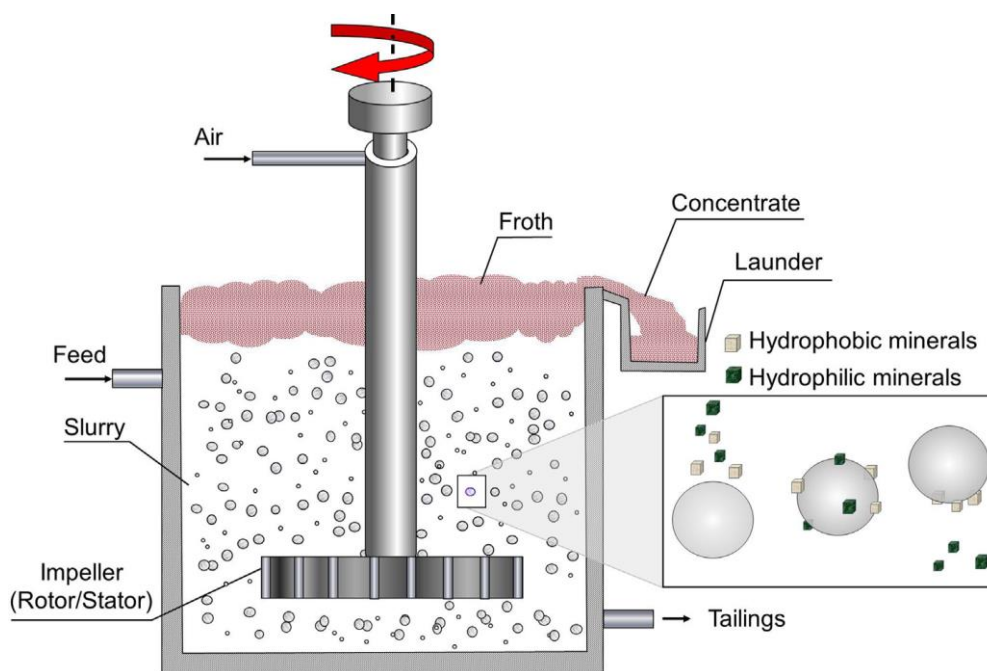
^۱ Impeller

^۲ Rotor

^۳ Stator

^۴ Self-Aerating

^۵ Outokumpu



شکل ۱-۲: اصول عملیات فلو تاسیون (Wills & Finch, 2016).

۱-۱-۲ میکرو-نانو حباب

میکرو-نانو حبابها (MNB)^۱، حبابهای کوچکی هستند که می توان آنها را به چندین روش مختلف مانند تبادل حلال^۲ (Hampton et al., 2008, 2010)، تغییر دما، کاهش فشار، روش فراصوت^۳ (Cho et al., 2005) و روش کاویتاسیون هیدرودینامیکی^۴ (Johnson et al., 1981; Zhou et al., 1997) ایجاد کرد.

میکرو-نانو حبابها برای مقاصد گوناگونی تولید می شوند که از جمله می توان به تصفیه پسابها، مقاصد پزشکی از جمله برای آب درمانی از طریق شناورسازی در آب دارای MNB، گند زدایی از طریق گاز اوزون که به صورت میکرو-نانو حباب در آب تزریق، و تجزیه آن پس از شکل گیری MNB افزایش می یابد، اشاره نمود. این حبابها فلو تاسیون ذرات دانه درشت و کارایی فلو تاسیون ذرات ریز را

^۱ Micro-Nano-Bubble

^۲ Solvent Exchange

^۳ Ultrasonic Method

^۴ Hydrodynamic Cavitation Method

بهبود و مصرف مواد شیمیایی را کاهش می‌دهند (ساغروانی و نائینی، ۱۳۹۲).

میکرو-نانوحباب‌ها حفره‌هایی حاوی گاز در محلول آبی هستند. علت تولید این حفره‌ها فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیکی در حضور نوکلی گازها^۱ یا گاز هسته‌زایی شده در آب است. فرآیند هسته‌زایی در مایع سبب چرخش ذرات گاز در میدان داخلی هسته می‌شود که باعث ایجاد میدان الکترواستاتیکی به دور هسته می‌گردد و این میدان الکترواستاتیکی با ذرات باردار دور هسته که تشکیل لایه دوگانه را داده‌اند به طور مداوم در تبادل شار الکتریکی ثابتی هستند. این افزایش یا کاهش تبادل شار الکتریکی و همچنین افت پتانسیل شیمیایی هسته، باعث رشد یا انقباض هسته و به تبع آن بزرگ‌تر یا کوچک‌تر شدن لایه دوگانه می‌شود. بزرگ یا کوچک شدن لایه دوگانه باعث بزرگ یا کوچک شدن نیروی کشش سطحی می‌شود. به همین دلیل نانوحباب‌ها یا میکروحاباب‌ها به کمک انتشار ذرات و متناسب با چه مقدار پتانسیل اطراف محلول و مقدار پتانسیلی که باعث فوق اشباع و یا زیر اشباع شدن شود، شروع به رشد کردن و یا کوچک شدن در طول زمان می‌کنند (عارفی، ۱۳۹۳).

۱-۱-۳ امواج فراصوت^۲

موج، آشفتگی یا برهم خوردن محیط به صورت منظم یا نامنظم است و روشی برای انتقال انرژی می‌باشد. در امواج مکانیکی، بخشی از محیط کشسانی نسبت به حالت تعادل پایدار خود تغییر مکان می‌دهد و این حرکت به دلیل خصوصیات کشسانی محیط به بقیه آن انتقال می‌یابد و محیط را آشفته می‌سازد. همان طور که از تعریف این امواج بر می‌آید، برای انتقال خود به محیط مادی مانند آب، هوا و جامدات نیاز دارد، بر حرکت ذرات آن قوانین نیوتن حاکم است و سرعتش به محیط انتشار بستگی دارد (مهردادی و همکاران، ۱۳۹۱).

امواج فراصوت به دسته‌ای از امواج مکانیکی گفته می‌شود که فرکانس نوسان آن‌ها بیش از محدوده شنوایی انسان (۲۰ هرتز تا ۲۰۰۰۰ هرتز) باشد. امواج فراصوت مانند دیگر امواج دارای خاصیت

^۱ Nucleate

^۲ Ultrasonic Wave

شکست، انعکاس، نفوذ و پراش می‌باشند (مهردادی و همکاران، ۱۳۹۱).

امواج فراصوت اولین بار در سال ۱۸۷۶ میلادی توسط گالتون^۱ که بر روی آستانه شنوایی انسان و حیوان مطالعه می‌کرد، کشف شد، و طی جنگ‌های جهانی اول و دوم به سرعت توسعه یافت (مهردادی و همکاران، ۱۳۹۱). امواج فراصوت به طور گسترده‌ای برای آماده‌سازی و شستشوی سطح، طی فرآیند فیزیکی، شیمیایی و شیمیایی-فیزیکی در کانه آرایی استفاده می‌شوند که می‌تواند بر بازیابی محصول تأثیر چشم‌گیری داشته باشد.

امواج فراصوت کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مختلف صنعتی، نظیر ماشین‌کاری، جوش‌کاری، کنترل کیفیت، تمیز کردن سطوح اجسام، تمیز کردن در جواهرسازی، صنایع پزشکی، تست‌های غیر مخرب، صنایع غذایی، صنایع ساختمانی، صنایع نظامی دارد که طیف آن برای هر کاربرد متفاوت است (مهردادی و همکاران، ۱۳۹۱).

۱-۱-۴ فلوتاسیون زغال‌سنگ

زغال‌سنگ ماده‌ای به طور طبیعی آبران است و از عناصر میکروسکوپی قابل رویتی به نام ماسرال‌ها^۲ تشکیل یافته است. تفاوت بین فلوتاسیون زغال‌سنگ و دیگر مواد معدنی در آن است که در مورد مواد معدنی، خردایش تا حد لازم و در محدوده‌ی کاربرد فلوتاسیون باید انجام گیرد اما در مورد زغال‌سنگ به خصوص در معادن زیرزمینی فقط آن بخش از زغال‌سنگ را که نمی‌توان به وسیله روش‌های ثقلی پرعیار کرد (ذرات زیر ۰/۵ میلی‌متر) با روش فلوتاسیون شسته می‌شوند (رضایی، ۱۳۹۴).

در فلوتاسیون زغال‌سنگ به طور معمول از روغن‌های غیریونیک یا گازوئیل به عنوان کلکتور^۳، از کلکتورهای سولفیدریلی برای پیریت (در فلوتاسیون معکوس)، از الک‌ها با طول زنجیر هیدروکربن

^۱ Francis Galton

^۲ Macerals

^۳ Collector

کوتاه مانند متیل ایزوبوتیل کربونیل^۱ (MIBC) و روغن کاج به عنوان کف‌ساز^۲، از نشاسته و دکستین^۳ به عنوان بازداشت‌کننده زغال‌سنگ (در فلوتاسیون معکوس)، از سیلیکات سدیم برای بازداشت خاکستر و همچنین از آهک، سیانور سدیم، کلرور پتاسیم، پرمنگنات پتاسیم و کرومات پتاسیم به عنوان بازداشت‌کننده پیریت استفاده می‌شود (قدیانی، ۱۳۹۶).

عوامل مؤثر در فلوتاسیون زغال‌سنگ را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد (اولیاءزاده و همکاران، ۱۳۸۴):

- ۱- دانه‌بندی: به طور معمول برای ذرات کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر زغال‌سنگ از فلوتاسیون استفاده می‌شود، هر چند دانه‌بندی بهینه ۱۰۰ تا ۳۰۰ میکرون است.
- ۲- چگالی پالپ: درصد جامد پالپ فلوتاسیون تابع دانه‌بندی خوراک است. برای کانی‌های فلزی ۲۵ درصد جامد معمول است اما این رقم برای کانی‌های سبک‌تر زیاد است. در فلوتاسیون زغال‌سنگ به طور معمول از پالپی با ۳ تا ۲۰ درصد جامد استفاده می‌شود.
- ۳- اکسیداسیون و درجه زغال‌شدگی: زغال‌سنگ‌هایی که درصد مواد فرار کم‌تری دارند، بهتر از زغال‌سنگ‌های با مواد بیشتر شناور می‌شوند. آنتراسیت قابلیت فلوتاسیون کمتری نسبت به زغال‌سنگ‌های بیتومینه دارد. اگر زغال‌سنگ اکسیده شود، قابلیت فلوتاسیون کاهش یافته و بسته به شدت اکسیداسیون، به سختی شناور می‌شود. زمان بیش‌تری برای شناور کردن زغال‌سنگ‌های اکسیده لازم است.

- ۴- pH و مشخصات آب مصرفی: حداکثر بازیابی به طور معمول در pH ۶/۵ تا ۷ بدست می‌آید. با افزایش pH، عیار زغال‌سنگ کاهش می‌یابد.

۲-۱ بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق

در گذشته با توجه به وجود ذخایر پرعیار، ماده معدنی پس از استخراج به طور مستقیم و یا با

^۱ Methyl Isobutyl Carbonil

^۲ Frother

^۳ Dextrin

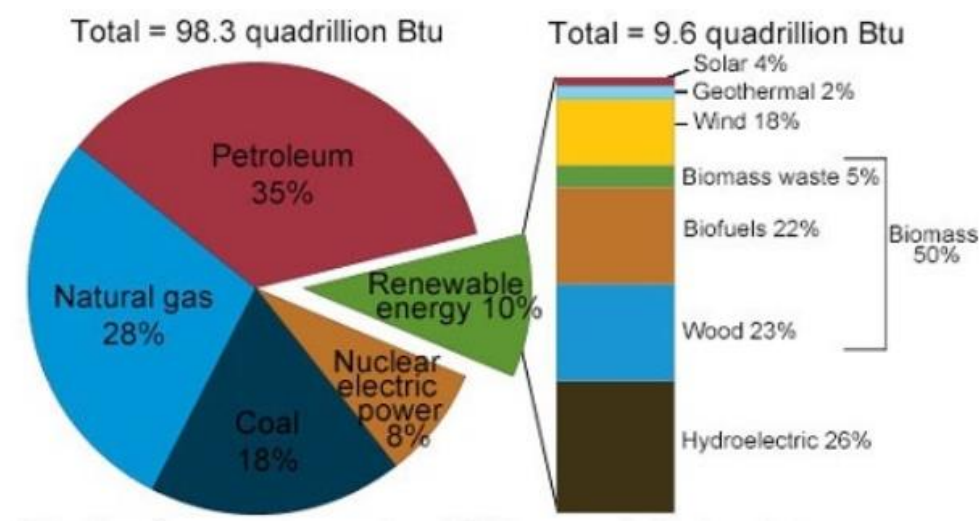
اندکی تغییر به عنوان ماده اولیه در صنایع دیگر به کار برده می‌شد. در حال حاضر با توجه به رو به پایان بودن ذخایر پرمعیار، ذخایر کمعیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. مواد کمعیار برای ورود به بازار مصرف نیاز به یکسری عملیات تغلیظ و پرمعیارسازی دارند. امروزه در کشور ما نیز ذخایر پرمعیار و ساده رو به اتمام بوده و ذخایر کمعیار و با کانی‌شناسی پیچیده جهت استفاده، مطرح شده‌اند (اولیاءزاده و همکاران، ۱۳۸۴).

تمدن‌های پیشرفته بدون حضور منابع نیرو وجود ندارند. زغال‌سنگ یک منبع انرژی فراوان است که رشد جمعیت و توسعه فناوری، استفاده از آن را به شدت افزایش می‌دهد. استفاده روزافزون از زغال‌سنگ از یک‌سو و نیاز به کاهش آلودگی محیط‌زیست از سوی دیگر، تقاضای رو به رشدی را برای فناوری زغال‌شویی ایجاد می‌کند. این امر بدون دستیابی به درکی واضح از فرآوری زغال‌سنگ و اصول به کارگیری آن امکان‌پذیر نیست (Laskowski, 2001).

شکل ۱-۳ سهم تأمین انرژی توسط منابع مختلف در آمریکا را نشان می‌دهد. در کشور آمریکا، به عنوان دومین تولیدکننده بزرگ زغال‌سنگ در جهان، مقدار سهم زغال‌سنگ در تأمین انرژی در سال ۲۰۱۴، حدود ۱۸٪ بوده است. بالاتر بودن سهم زغال‌سنگ از انرژی هسته‌ای میزان اهمیت این ماده با ارزش از لحاظ انرژی را نشان می‌دهد. با توجه به مشکلات زیاد کشور ایران در تأمین انرژی، توجه بیشتر به ذخایر زغال‌سنگ و استفاده از فناوری‌ها و روش‌های به روز و تحقیق در این راستا، می‌تواند سهم به سزایی در پیشرفت ایران داشته باشد.

فلوتاسیون مؤثرترین روش جدایش ذرات ریز (کوچکتر از ۵۰۰ میکرومتر) زغال‌سنگ از باطله است. هنگامی که اندازه ذرات زغال‌سنگ بسیار ریز (زیر ۵۰ میکرومتر) یا درشت (بالاتر از ۵۰۰ میکرومتر) باشد، بهره‌وری فلوتاسیون به شدت کاهش می‌یابد. تلاش برای افزایش بازیابی این ذرات به وسیله افزایش غلظت کلکتورهای نفتی اغلب منجر به تولید قابل توجه مواد غیر قابل اشتعال می‌شود که به همراه زغال‌سنگ شناور شده‌اند. از این رو بازیابی فلوتاسیون ذرات زغال‌سنگ در ابعاد بسیار ریز و درشت، پایین است (Maoming et al., 2010).

در عمده فرآیندهای استخراج و فرآوری، بخشی از مواد معدنی که حاوی درصد بالایی از ماده با ارزش می‌باشد، به نرمه تبدیل می‌شود. در بیشتر واحدهای فرآوری مواد معدنی، نرمه‌های تولید شده، به دلیل مکانیسم فرآوری خاص و پیچیده و همچنین خصوصیات فیزیکی آن‌ها مانند، شکل و فسفات استخراج شده در ایالت فلوریدای آمریکا و مقادیر قابل توجهی باریت، فلورین و دیگر کانسنگ‌های روی، آهن، طلا و اورانیوم به خاطر ریز بودن بیش از حد ذرات، قابلیت استحصال خود را از دست داده و وارد سدهای باطله می‌شوند (سیدی و همکاران، ۱۳۹۱).



شکل ۱-۳: نمودار مربوط به سهم منابع انرژی در تامین انرژی ایالات متحده آمریکا (eia Website).

دانه‌بندی، از چرخه فرآوری خارج شده و به سد باطله منتقل می‌شوند. به عنوان مثال ۳۰ درصد جهت‌دهی تحقیقات برای یافتن روش‌های خاص برای فرآوری این گونه مواد توجیه اقتصادی قابل توجهی دارد. در سال‌های اخیر از دیدگاه‌های متفاوتی، فرآوری ذرات ریز کانی (نرمه) مورد مطالعه قرار گرفته و بدین منظور روش‌های جدیدی برای بازیابی نرمه نیز ارائه شده است. سیستم‌هایی مانند فلوتاسیون ستونی، فلوکلاسیون، ترکیبی از دو روش فلوتاسیون - فلوکلاسیون، لیچینگ، آگلومراسیون، فلوتاسیون امولسیونی، فلوتاسیون روغن در آب (سیدی و همکاران، ۱۳۹۱) و میکرو-نانو فلوتاسیون ابداع گشته که در این تحقیق به معرفی روش میکرو-نانو فلوتاسیون پرداخته خواهد شد. به طور معمول می‌توان گفت که نرمه‌ها، هم بر عیار و هم بازیابی اثر منفی می‌گذارند. ضمن این که

مسائلی همچون پایداری کف در فلوتاسیون را نیز موجب می‌شوند. برخی از مشکلات فرآوری نرمة‌ها در زیر آورده شده است (سیدی و همکاران، ۱۳۹۱):

۱. نرمة‌ها باعث افزایش انرژی سطحی ذرات می‌شوند این امر موجب جذب کلکتور و غیر انتخابی‌تر شدن فرآیند می‌شود.

۲. به دلیل کاهش شدید جرم ذرات، احتمال برخورد ذرات ریز و چسبیدن آن‌ها به حباب‌های هوا کاهش پیدا می‌کند.

۳. با کاهش ابعاد، میزان سطح مخصوص ذرات افزایش یافته و با پایداری زیاد ذرات ریز، مصرف مواد شیمیایی در فلوتاسیون و نیز پایداری کف افزایش می‌یابد. هر دو این موارد باعث افزایش هزینه‌های فلوتاسیون می‌شود.

تحقیقات علمی و کاربردی در زمینه میکرو-نانو حباب‌ها، یعنی روش تولید، مطالعات پایه و کاربردهای آن، امروزه یکی از سریع‌ترین فناوری‌های رو به رشد است. بسیاری از خواص منحصر به فرد فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی و پتانسیل بالای فناوری میکرو-نانو حباب‌ها پیش‌بینی شده است. با وجود گسترش مطالعات در مورد میکرو-نانو حباب‌ها، خواص سطح این حباب‌ها و کاربرد آن‌ها در بسیاری از بخش‌ها مانند فلوتاسیون مواد معدنی، از موارد جذاب برای محققین در عصر جدید است (Calgaroto et al., 2015).

۳-۱ اهداف تحقیق

- بررسی تغییرات بازیابی فلوتاسیون زغال‌سنگ در دامنه ابعادی و درصد خاکستر خوراک متفاوت با استفاده از میکرو-نانوحباب؛
- بررسی تأثیر میکرو-نانوحباب بر روی پارامترهای عملیاتی در فلوتاسیون زغال‌سنگ؛
- بررسی تأثیر امواج فراصوت بر روی پارامترهای عملیاتی در فلوتاسیون زغال‌سنگ؛
- بررسی تأثیر هم‌زمان محلول میکرو-نانوحباب و امواج فراصوت در فلوتاسیون زغال‌سنگ؛
- بررسی سینتیک فلوتاسیون در حضور و عدم حضور میکرو-نانوحباب.

۴-۱ ساختار تحقیق

تحقیق از پنج فصل ساخته شده است که به صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

- فصل یک: شامل کلیاتی از جمله مقدمه‌ای از نیاز صنعت به فلوتاسیون، کارکرد فلوتاسیون، معرفی میکرو-نانوحباب و نحوه تولید آن، امواج فراصوت و فلوتاسیون زغال سنگ بوده و در ادامه شامل، بیان مسئله، ضرورت انجام تحقیق و اهداف تحقیق است.
- فصل دو: مروری بر پژوهش‌های پیشین مطرح شده است که بعد از بیان آن، نتایج حاصل از تحقیقات گذشته بیان شده است.
- فصل سه: تجهیزات و مواد شیمیایی به کار گرفته شده، پارامترهای عملیاتی و نحوه محاسبه شاخص‌های فرآیندی و سینتیک فلوتاسیون در این بخش بیان خواهد شد.
- فصل چهار: در این بخش تأثیر محلول میکرو-نانوحباب و امواج فراصوت بر پارامترهای عملیاتی و تأثیر هم‌زمان میکرو-نانوحباب و امواج فراصوت و سینتیک فلوتاسیون با استفاده از محلول میکرو-نانوحباب بررسی می‌شود.
- فصل پنج: در این فصل، نتایج حاصل از تحقیق و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده ارائه خواهد شد.

فصل دوم

مروری بر مطالعاتی انجام شده

۲-۱ مقدمه

پیشرفت دانش بشری وابسته به استفاده از علوم و دانش گذشتگان و به کارگیری روش‌های نوین برای اصلاح و یا تکمیل آن‌ها است. در این فصل مطالعات و تحقیقات انجام شده در سه بخش کاربرد میکرو-نانو حباب و امواج فراصوت در فرآوری مواد معدنی و سینتیک فلوتاسیون ارائه می‌شود. در ادامه با توجه به بررسی انجام شده بر روی مراجع تحقیق، بخش‌های قابل توسعه و وجوه تمایز مطالعات قبلی انجام شده با توجه به موضوع این پایان‌نامه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲ کاربرد میکرو-نانوحباب در فرآوری مواد معدنی

کاویتاسیون هیدرودینامیکی یک روش کاربردی برای تولید انبوه حباب‌های کوچک در سیستم فلوتاسیون فراهم می‌کند. پدیده کاویتاسیون در فلوتاسیون از لحاظ اقتصادی مورد توجه قرار گرفته و به طور عمده این روش برای بهبود عملکرد فلوتاسیون در دهه گذشته به کار گرفته شده است. تحولات اخیر و درک کاویتاسیون و پدیده هسته‌زایی یک مبنای علمی برای صرفه جویی اقتصادی در راستای کاربرد این روش برای عملیات فلوتاسیون فراهم کرده است. تجزیه و تحلیل‌های بنیادی و نتایج آزمایشگاهی، هر دو اثرات مثبت کاویتاسیون هیدرودینامیکی بر عملکرد فلوتاسیون را نشان داده‌اند (Zhou et al., 2009). خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در کاربرد میکرو-نانو حباب‌ها در فرآوری مواد معدنی در جدول ۲-۱ ارائه شده است.

جدول ۲-۱: مطالعه‌های کاربرد میکرو-نانوحباب در فرآوری مواد معدنی.

ردیف	محققین	موضوع	نتیجه تحقیق
۱	Zhang (2006)	توسعه فلوتاسیون پیکوحباب برای افزایش بازیابی ذرات درشت فسفات	بازیابی ۹۸ درصدی در حضور پیکوحباب‌ها در مقایسه با حداکثر بازیابی ۸۸/۷۲ درصدی در غیاب آن در مقدار کلکتور و کف‌ساز یکسان.
۲	Zhou et al. (2010)	تأثیر حباب هسته‌زایی دینامیکی بر روی فلوتاسیون بیتومین	نقش مهم حباب‌های کوچک در بازیابی فلوتاسیون بیتومین؛ بهبود بازیابی ۵۰ تا ۱۷۰ درصدی بیتومین در آب با گاز هسته‌زایی شده نسبت به آب بدون اشباع هوا در شرایط یکسان.

ادامه جدول ۲-۱.

۳	Maoming et al. (2010)	تولید نانوحباب و کاربرد آن در فلوتاسیون (بخش ۲): مطالعات بنیادی و تحلیل علمی	بهبود قابل ملاحظه بازیابی فلوتاسیون ذرات زغال سنگ و فسفات با استفاده از نانوحباب‌های تولید شده به وسیله کاویتاسیون؛ افزایش بازیابی ذرات ریز و درشت فسفات و زغال سنگ؛ افزایش آب‌گریزی سطح ذرات، افزایش احتمال برخورد ذره-حباب و اتصال، کاهش احتمال جدا شدن ذرات؛ افزایش زاویه تماس زغال سنگ و فسفات با اضافه شدن نانوحباب‌ها به محلول سورفکتانت در غلظت کم‌تر؛ حضور نانوحباب‌ها می‌تواند زاویه تماس ساب‌بیتومینه، بیتومینه و آنتراسیت را به ترتیب تا 27° ، 24° و 19° افزایش دهد، که نشان می‌دهد نانوحباب‌ها به طور قابل توجهی روی سطح زغال سنگ با درجه آبرانی کم‌تر تأثیر دارند.
۴	Sobhy and Tao (2013)	فلوتاسیون ستونی نانوحباب برای ذرات ریز زغال سنگ و اصول مرتبط	بهبود بازیابی زغال سنگ ریز با استفاده از یک ستون فلوتاسیون مخصوص با تولیدکننده نانوحباب کاویتاسیون هیدرودینامیکی؛ افزایش ۵ تا ۵۰ درصدی بازیابی ماده سوختنی زغال سنگ ($150 \mu m$) در حضور نانوحباب؛ بهبود قابل توجه کارایی جدایش در حضور نانوحباب؛ کاهش مقدار مصرف کف‌ساز.
۵	Fan et al. (2013)	تأثیر نانوحباب‌ها بر روی فلوتاسیون اندازه‌های مختلف ذرات زغال سنگ	افزایش قابل توجه بازیابی فلوتاسیون با استفاده از نانوحباب‌ها در یک بانک سلول مکانیکی و ستونی فلوتاسیون؛ افزایش بازیابی ۱۳ تا ۲۲ درصدی در محصول حاوی ۵ تا ۱۲ درصد خاکستر در فراکسیون ابعادی درشت (۳۵۵ تا ۶۰۰ میکرومتر)؛ افزایش ۸، ۲۸ و ۴۶ درصدی بازیابی ذرات بسیار ریز با ابعاد ۳۸ تا ۴۵، ۲۰ تا ۳۸ و زیر ۲۰ میکرومتر.
۶	Peng and Xing (2013)	فلوتاسیون پیکو-نانوحباب با استفاده از مخلوط‌کننده استاتیک-لوله و نتوری برای زغال سنگ پیتسبورگ شماره ۸	افزایش قابل توجه بازیابی زغال سنگ در ابعاد درشت (۳۵۵ تا ۷۱۰ میکرومتر) و ابعاد بسیار ریز (کوچکتر از ۷۵ میکرومتر) با استفاده از فلوتاسیون پیکو-نانوحباب.
۷	Ahmadi et al. (2014)	فلوتاسیون میکرو-نانوحباب ذرات نرمه و بیش‌نرمه کالکوپیریت	افزایش بازیابی ۱۶ تا ۲۱ درصدی ذرات کالکوپیریت و کاهش مصرف مواد شیمیایی (کلکتور و کف‌ساز به ترتیب تا ۷۵ و ۵۰ درصد) با حضور میکرو-نانوحباب‌ها؛

ادامه جدول ۲-۱.

			افزایش بیشتر بازیابی ذرات بیش‌نرمه (۵+ ۱۴/۳۶- میکرومتر) نسبت به ذرات نرمه (۳۸- ۱۴/۳۶+ میکرومتر).
۸	Calgaroto et al. (2015)	فلوتاسیون ذرات کوارتز با کمک نانوحباب‌ها	مؤثر نبودن فلوتاسیون با نانوحباب‌ها بدون تزریق حباب معمولی به سلول فلوتاسیون به دلیل قدرت کم بلند کردن آن‌ها؛ بهبود ۲۰ تا ۳۰ درصدی بازیابی ذرات نرمه و بیش‌نرمه کوارتز با ابعاد ۸ تا ۷۴ میکرومتر با حضور ترکیبی حباب‌های نانو و درشت (معمولی)؛ کاهش بازیابی ذرات درشت با ابعاد ۶۷ تا ۱۱۸ میکرومتر.
۹	Li et al. (2015)	بررسی اثر متقابل بین ذرات ریز و حباب‌ها با اندازه میکرون تولیدشده به وسیله کاویتاسیون هیدرودینامیکی	بررسی تعامل بین حباب با اندازه میکرون و زغال‌سنگ ریز به وسیله زغال‌سنگ ساب-بیتومینه تحت شرایط کاویتاسیون هیدرودینامیکی؛ افزایش حجم گاز حل‌شده با افزایش تعداد حباب‌های تولیدشده با اندازه میکرون، در نتیجه افزایش بازیابی؛ کاهش مقدار گاز حل‌شده در دوغاب به تدریج با افزایش زمان فلوتاسیون.

۲-۳ کاربرد امواج فراصوت در فرآوری مواد معدنی

استفاده از امواج فراصوت در فرآوری مواد معدنی از دهه ۱۹۷۰ میلادی با بررسی اثر این امواج بر کارایی فلوتاسیون کالکوپیریت، پیریت و کوارتز توسط یاکوبویچ و همکاران^۱ آغاز شده است؛ که در نتیجه آماده‌سازی پالپ با امواج، آب‌گریزی کانی هدف و آب‌دوستی^۲ باطله افزایش یافت. همچنین چلیک^۳ در ۱۹۸۹ نقش امواج فراصوت را بر قابلیت شناورسازی زغال‌سنگ و گالن بررسی نمود (قدیانی، ۱۳۹۶). خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در کاربرد امواج فراصوت در فرآوری مواد معدنی در

^۱ Yakubovich et al., 1973

^۲ Hydrophilicity

^۳ Celik, 1989

جدول ۲-۲ ارائه شده است.

جدول ۲-۲: مطالعه تأثیر امواج فراصوت در فرآوری مواد معدنی.

ردیف	محققین	موضوع	نتیجه تحقیق
۱	Ozkan and Veasey (1996)	کاربرد امواج فراصوت به صورت هم-زمان در فلوتاسیون کولمانیت	تأثیر مثبت امواج فراصوت بر بازیابی کولمانیت
۲	Aldrich and Feng (1999)	اثر آماده‌سازی پالپ با امواج فراصوت در فلوتاسیون کانه‌های سولفیدی	افزایش قابلیت شناور شدن کانه‌های سولفیدی؛ بهبود نرخ فلوتاسیون و عیار کانه‌های سولفیدی؛ کاهش مصرف مواد شیمیایی؛ بازداشت کانی‌های باطله سیلیکاته.
۳	Li and Li (2000)	بررسی تأثیر امواج فراصوت بر ویژگی‌های پالپ زغال	افزایش ویسکوزیته در درصد جامد مشخص؛ افزایش یون‌های محلول در پالپ؛ تغییر ویژگی‌های پالپ زغال سنگ از حالت الاستیک به شبه پلاستیک.
۴	Ozkan (2002)	فرآوری ذرات نرمه منیزیت با استفاده از امواج فراصوت	کاهش اندازه و افزایش ثبات حباب‌ها؛ افزایش بازیابی منیزیت.
۵	Ozkan and Kuyumcu (2006)	بررسی مکانیسم اثر امواج فراصوت فلوتاسیون زغال سنگ	افزایش بازیابی کنسانتره زغال سنگ و کاهش درصد خاکستر محصول به دلیل تمیز شدن سطح زغال سنگ.
۶	Ozkan (2006)	بهبود فلوتاسیون زغال سنگ به وسیله امواج فراصوت	ساخت سلول مجهز به تولیدکننده امواج فراصوت؛ کاهش زمان آماده‌سازی و فلوتاسیون؛ توزیع یکنواخت و ریز حباب‌ها؛ کاهش مصرف مواد شیمیایی؛ افزایش بازیابی و کاهش خاکستر.
۷	Kang et al. (2008)	بررسی اثر امواج فراصوت بر ترکیب سطح و عمل‌کرد فلوتاسیون زغال-سنگ با سولفور بالا	افزایش آبرانی زغال سنگ و آب‌دوستی پیریت؛ افزایش کارایی جدایش و انتخاب‌پذیری فلوتاسیون؛ افزایش بازیابی کنسانتره زغال سنگ و کاهش گوگرد و خاکستر محصول؛ افزایش حباب‌های چسبیده به ذرات در آماده‌سازی با امواج فراصوت.

ادامه جدول ۲-۲.

آماده سازی با امواج فراصوت: حذف لایه های اکسیده زغال-سنگ و کانی های رسی از سطوح و در نتیجه افزایش آبرانی زغال سنگ؛ بهبود جذب مواد شیمیایی. آماده سازی با امواج ریزموج: کاهش رطوبت و افزایش آبرانی و بازیابی زغال سنگ بدون تغییر در خواص و اکسید شده سطح؛ افزایش خواص مغناطیسی پیریت و امکان حذف آن با جداکننده های مغناطیسی. آماده سازی با شدت بالا: حذف لایه کانی های رسی از سطح و در نتیجه افزایش آبرانی زغال سنگ.	مروری بر بهبود فلوتاسیون زغال سنگ اکسیده با روش های پیش فرآوری	Xia et al. (2013)	۸
---	---	----------------------	---

۲-۴ سینتیک فلوتاسیون زغال سنگ

یکی از جنبه های بسیار مهم فلوتاسیون، سینتیک آن است. می توان سینتیک را یکی از مهم ترین جنبه های مؤثر در فرآیند جداسازی دانست (Wills & Napier-Munn, 2006). نرخ فلوتاسیون را می توان تغییرات بازیابی مواد شناور در محصول فلوتاسیون در هر واحد زمان تعریف کرد. به طور کلی مدل های سینتیک فلوتاسیون با استفاده از سینتیک واکنش شیمیایی مدل سازی می شود. در اکثر مدل های ارائه شده توسط محققین، برای مدل سازی سینتیکی از پیش فرض مناسب بودن مدل مرتبه اول سینتیک استفاده می شود. این مدل از جنبه های پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و هیدرودینامیکی سیستم فلوتاسیون قابل اندازه گیری بوده و برای تعیین نرخ شناورسازی فرمول بندی می شوند (Ofori et al., 2014). خلاصه ای از تحقیقات انجام شده در مورد سینتیک فلوتاسیون در جدول ۲-۳ ارائه شده است.

جدول ۲-۳: مطالعه سینتیک فلوتاسیون.

ردیف	محققین	موضوع	نتیجه تحقیق
۱	Amini et al. (2009)	مقایسه سینتیکی فلوتاسیون معمولی و بیولوژیکی زغال سنگ	کاهش نرخ فلوتاسیون پیریت در روش باکتریایی و بهبود قابلیت انتخابی بودن بین زغال و گانگ.

ادامه جدول ۲-۳.

۲	Sobhy and Tao (2013)	کارایی بالای فلوتاسیون نانوحباب زغال سنگ	بررسی سینتیک فلوتاسیون زغال در حضور و عدم حضور نانوحباب؛ در حضور نانوحباب‌ها؛ افزایش نرخ ثابت فلوتاسیون (k) تا بیش از ۴۰٪.
۳	Azizi et al. (2014)	بهینه‌سازی روند فلوتاسیون زغال سنگ با استفاده از روش طراحی Plackett-Burman و تحلیل سینتیک	تحقیق بر روی تأثیر کلکتور و کف‌سازهای مختلف در درصد جامد ثابت، با استفاده از سینتیک مرتبه اول؛ زمان بهینه ۲ دقیقه مشخص شد؛ نرخ ثابت در این تحقیق ۰۵۳/۰ تعیین شد.
۴	Bu et al. (2017)	مرتبه مدل‌های سینتیک در فلوتاسیون زغال سنگ	مدل‌های سینتیک مختلف را برای فلوتاسیون ذرات ریز زغال بررسی شد؛ بهترین مدل سینتیک برای این ذرات، سینتیک مرتبه اول بود.

۲-۵ جمع‌بندی

نتایج حاصل از تحقیقات گذشته در دو بخش بیان می‌شود:

- حباب‌های کوچک ایجاد شده به وسیله کاویتاسیون هیدرودینامیکی در فلوتاسیون موارد زیر را نتیجه می‌دهند:

❖ افزایش تجمع ذرات به وسیله اتصال دادن حباب‌های کوچک و افزایش احتمال اتصال ذرات بزرگ با حباب‌های رایج فلوتاسیون؛

❖ با به هم آمیختگی حباب‌های ریز پوشاننده سطح و حباب‌های معمولی موجود در محیط سرعت اتصال حباب-ذره افزایش می‌یابد، این اتصال جایگزین اتصال مستقیم حباب-ذره است؛

❖ زاویه تماس و نیروی چسبندگی بین ذرات و حباب از طریق پوشانده شدن سطح ذرات با حباب ریز افزایش می‌یابد و افزایش بازیابی ذرات ریز و درشت را در مقدار کم مواد شیمیایی نشان می‌دهد؛

❖ تمیز کردن سطوح ذرات از طریق فروپاشی حباب (به عنوان مثال، حذف پوشش‌های لجن، حذف فیلم‌های اکسیداسیون، و حذف لایه‌های آلوده کننده کلکتور بر روی سطح ذرات

گانگ^۱).

- پرتوافکنی با امواج فراصوت در آماده‌سازی پالپ در فلوتاسیون کانه‌های مختلف، حذف ناخالصی‌ها و آغشتگی‌های سطحی، افزایش کارایی فرآیند متالورژی استخراجی و بهبود فرآیند جدایش ذرات جامد از سیال کاربرد عمده دارد. بر اساس مطالعات انجام شده در زمینه کاربرد امواج فراصوت در فلوتاسیون، آماده‌سازی پالپ با این امواج، منجر به افزایش کارایی فرآیند و کاهش مصرف مواد شیمیایی شده که به طور عمده به دلیل حذف ناخالصی‌ها و آغشتگی‌های سطحی ذرات و جذب بهینه مواد شیمیایی در سطح آن‌ها است.
 - برای برآزش نتایج آزمایشگاهی، به طور معمول از نرخ سینتیک فلوتاسیون مرتبه اول استفاده می‌شود. نتایج آزمایشگاهی سینتیک فلوتاسیون در حضور نانوحباب‌ها، افزایش را در نرخ ثابت فلوتاسیون نشان داد.
- با وجود مطالعه بر روی عملکرد میکرو-نانوحباب‌ها و امواج فراصوت در فلوتاسیون زغال، چند نوآوری زیر در این مطالعه صورت گرفت:
۱. با توجه به فناوری جدید ساخت میکرو-نانوحباب‌ها برای اولین بار از میکرو-نانو حباب‌های پایدار برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیونی استفاده شده است.
 ۲. تأثیرات میکرو-نانوحباب و فراصوت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته است.
 ۳. تأثیرات میکرو-نانوحباب و فراصوت بر توزیع ابعادی مختلف و درصد خاکسترهای متفاوت به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است.
 ۴. سینتیک در ابعاد مختلف با درصد خاکسترهای مختلف با پالپ حاوی میکرو-نانو حباب انجام و نتایج آن ارائه شده است.

^۱ Gunge

فصل سوم

مواد و روش‌ها

۳-۱ مقدمه

انجام عملیات فلوتاسیون مستلزم فراهم نمودن مواد اولیه، آشنایی با دستگاه‌ها و شناخت دقیق عملکرد آن‌ها، مشخص کردن شرایط کلی برای انجام هر آزمایش، معین کردن پارامترهای مورد بررسی و پارامترهای پاسخ و نحوه‌ی محاسبه‌ی هر یک از آن‌ها و در نهایت انجام آزمایش‌ها است.

در این فصل ابتدا تجهیزات، دستگاه‌ها و مواد مورد استفاده در آزمایش‌های مربوط به این پایان‌نامه شرح داده می‌شود و سپس چگونگی تهیه و آماده‌سازی زغال‌سنگ ارائه می‌گردد. در انتهای این فصل، به اختصار به نحوه ارزیابی سینتیک فلوتاسیون و محاسبه شاخص‌های فرآیندی هر آزمایش نظیر بازیابی، بازیابی مواد سوختنی و شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر که به عنوان معیارهای تحلیل و مقایسه آزمایش‌ها به کار می‌روند، پرداخته خواهد شد.

۳-۲ مواد و تجهیزات

۳-۲-۱ تجهیزات و دستگاه‌های مورد استفاده در آزمایش

دستگاه‌ها و تجهیزات اصلی مورد استفاده در آزمایش‌ها به شرح زیر می‌باشند:

- سنگ‌شکن آزمایشگاهی: به منظور خردایش نمونه‌ها، سنگ‌شکن فکی آزمایشگاهی به کار گرفته شد؛
- سرندهای استاندارد و شیکر^۱ آزمایشگاهی: پس از عملیات خردایش برای دانه‌بندی، با استفاده از شیکر و سرندهای استاندارد (ASTM) محدوده ابعادی مورد نظر برای ذرات نمونه به دست آمد؛
- ماشین فلوتاسیون مکانیکی: برای انجام آزمایش‌ها از سلول مکانیکی دنور با حجم سلول یک لیتری استفاده شد؛
- دستگاه تولیدکننده امواج فراصوت: به منظور پرتوافکنی، دستگاه حمام تولید امواج فراصوت ساخت شرکت الما^۲ کشور آلمان به کار گرفته شد؛

^۱ Shaker

^۲ Elma

- سایر تجهیزات آزمایشگاهی: کرنومتر، ترازوی دیجیتال با دقت 0.0001 و 0.01 گرم، فیلتر پرس، آون، کوره الکتریکی آزمایشگاهی.

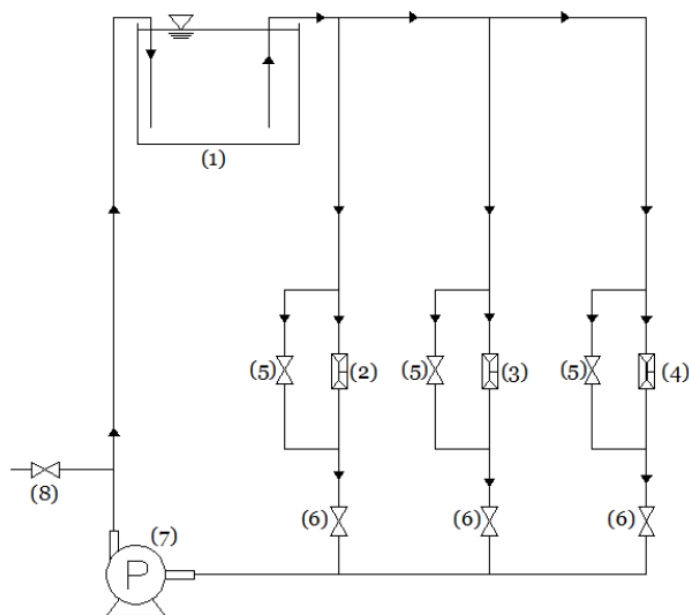
۳-۲-۲ محلول میکرو-نانوحباب

دستگاه میکرو-نانوحباب ساز براساس پدیده کاویتاسیون هیدرودینامیکی در دانشگاه صنعتی شاهرود طراحی و ساخته شده است. این دستگاه از سه بخش عمده ورود هوا (گاز)، اعمال فشار بر مخلوط هوا و آب و منطقه کاهش یا افت فشار و آزادسازی بخشی از هوای حل شده تشکیل شده است. هدف از ورود هوا در این دستگاه، افزایش حلالیت میزان هوای حل شده در آب به منظور افزایش کارایی پدیده کاویتاسیون و تولید حباب می باشد. بنابراین، برخلاف سایر دستگاه ها، گاز یا هوا در این دستگاه قبل از پمپ، تزریق شده است. ویژگی طراحی و ساخت این دستگاه به نحوی است که به راحتی امکان استفاده از چندین مولد هیدرودینامیکی میکرو-نانوحباب با قطر گلوله های متفاوت به طور همزمان وجود دارد، که در این دستگاه از سه مولد استفاده شده است. از ویژگی های منحصر به فرد میکرو-نانو حباب ها می توان به پایداری آن ها برای چندین روز در آب اشاره نمود (عارفی، ۱۳۹۳).

۳-۲-۲-۱ چگونگی تولید و ساخت میکرو-نانوحباب

در این تحقیق، از دستگاه تولید میکرو-نانوحباب بر مبنای روش برش و استفاده از لوله ونتوری و فرآیند کاویتاسیون هیدرودینامیکی به تولید میکرو-نانوحباب ها با ابعاد تقریباً یکسان به وسیله تنظیم پارامترهای فیزیکی مبادرت گردید. این دستگاه از سه بخش اصلی تشکیل شده است: ورودی هوا، اعمال فشار بر محلول، منطقه افت فشار. هدف وجود هوا در این دستگاه دقیقاً در محل فشار منفی افزایش کارایی پدیده کاویتاسیون و تولید میکرو-نانو حباب می باشد. بنابراین، برخلاف سایر دستگاه ها، لوله های ونتوری و ورودی هوا در این دستگاه قبل از پمپ، وارد آب می شود. گاز اصلی مورد استفاده جهت تولید میکرو-نانوحباب ها، هوا بوده است. مایع نیز از آب لوله کشی شهری شهر شاهرود و بدون افزودن هیچ گونه ماده اضافی تهیه شد. سیال در یک منبع با ارتفاع اولیه حدود ۳ متر، که از تراز مولدهای هیدرودینامیکی دارد، از طریق یک پمپ سانتریفیوژ (مدل PK ساخت شرکت پدرولو ایتالیا با

قدرت ۰/۵ اسب بخار) پس از عبور از مولد میکرو-نانوحباب به داخل آن برگشت داده می‌شود. مولد در قسمت مکش (بالا دست) پمپ قرار گرفت. شایان ذکر است که در سیستم از سه مولد هیدرودینامیکی با قطرهای داخلی ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر استفاده شد. در مولدها، در ناحیه‌ی همگرای مخروطی این لوله، سرعت جریان افزایش می‌یابد، در نتیجه فشار کاهش می‌یابد و در قسمتی از لوله فشار منفی می‌شود و با افزایش سرعت از فشار بخار کمتر می‌شود که این امر باعث مکش هوا به داخل لوله می‌شود. به کمک شیرآلات موجود مکش هوا به نحوی تنظیم می‌شود که برای تشکیل حباب کافی باشد. در مرحله بعد حباب‌ها به علت چرخش در سامانه به لوله مولد بر می‌گردد، بنابراین کاویتاسیون منجر به کوچک شدن ابعاد حباب‌ها شده و با انجام مکرر میکرو-نانوحباب بیش‌تر و با قطر کم‌تری تولید می‌شود. شکل ۱-۳ شماتیکی از دستگاه میکرو-نانوحباب‌ساز را نشان می‌دهد (عارفی، ۱۳۹۳).



شکل ۱-۳: شماتیکی از دستگاه میکرو-نانوحباب: (۱) مخزن آب، (۲) مولد با قطر مرکزی ۱ میلی‌متر، (۳) مولد با قطر مرکزی ۳ میلی‌متر، (۴) مولد با قطر مرکزی ۵ میلی‌متر، (۵) شیرهای تنظیم دبی، (۶) شیرهای اصلی مولد، (۷) پمپ آب، (۸) شیر نمونه‌گیری (عارفی، ۱۳۹۳).

۳-۲-۲ روش اندازه‌گیری ابعاد میکرو-نانوحباب

روشی که در این تحقیق از آن استفاده شده است، روش پراش نور دینامیکی^۱ می‌باشد که برای

^۱ Dynamic Light Scattering

اندازه‌گیری اندازه ذرات در محیط مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یک محلول، برخورد ذرات و مولکول‌های کوچک با مولکول‌های حلال، منجر به حرکت تصادفی مولکول‌ها می‌شود، که به این حرکت ذرات کوچک در یک سیال، حرکت براونی^۱ می‌گویند. در عمل ذرات در مایع هیچ‌گاه ساکن نبوده و به وسیله‌ی حرکات براونی به طور دائم در حرکت هستند. یکی از ویژگی‌های حرکت براونی آن است که ذرات کوچک، سریع و ذرات بزرگ، آهسته حرکت می‌کنند و در یک دمای ثابت ذرات بزرگ‌تر در مقایسه با ذرات کوچک‌تر، حرکت بسیار آهسته‌تری دارند و زمانی که ذرات به طور ثابت در حرکت هستند، به نظر می‌رسد که الگوی ایجاد شده به وسیله آن‌ها نیز حرکت می‌کند.

روش پراش نور دینامیکی مطابق با استاندارد ISO 22412 سال ۲۰۰۸ جهت تعیین ابعاد ذرات در محدوده ابعادی بین ۰/۶ نانومتر تا ۸ میکرون قابل استفاده است.

جهت اندازه‌گیری ابعاد حباب‌ها، دو روش پاد-لاپلاس^۲ و کومولانت^۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد. که نتایج روش کومولانت دقیق‌تر و قابل استنادتر است (عارفی، ۱۳۹۳).

۳-۲-۲-۳ اندازه‌گیری ابعاد میکرو-نانوحباب

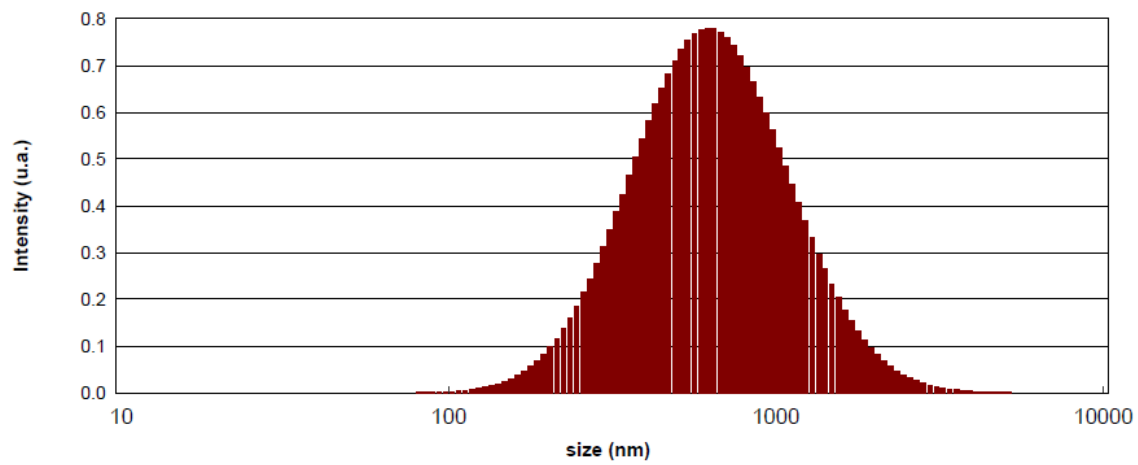
ابعاد میکرو-نانوحباب‌ها حداقل ۲۴ ساعت پس از تولید با استفاده از دستگاه آنالیز اندازه نانو ذره اندازه‌گیری شد. دستگاه مزبور با روش پراش نور دینامیکی کار می‌کند و قادر به اندازه‌گیری ذرات در محدوده ابعادی ۱ نانومتر تا ۶ میکرون است. نتایج به ۲ روش کومولانت و پاد-لاپلاس و بر اساس ۳ پارامتر حجم، تعداد و شدت نمونه‌ها به دست آمد. در این آزمایش‌ها فرض شد که ضریب شکست نور برای میکرو-نانوحباب‌ها ۱/۵۶ و برای آب ۱/۳۳ باشد. توزیع ذرات در مقیاس نانو به کمک نور لیزر با طول موج ۶۵۷ نانومتر و توان ۵۰٪ تعیین شد. آزمایش‌ها مشخص نمود کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین حباب‌ها به ترتیب دارای اندازه تقریبی ۸۱ و ۳۷۰۰ نانومتر هستند. شکل ۲-۳، شکل ۳-۳ و شکل ۴-۳ نشان‌دهنده توزیع حباب‌ها به ترتیب بر اساس سه معیار شدت، حجم و تعداد است.

^۱ Brownian Motion

^۲ Pade-Laplace

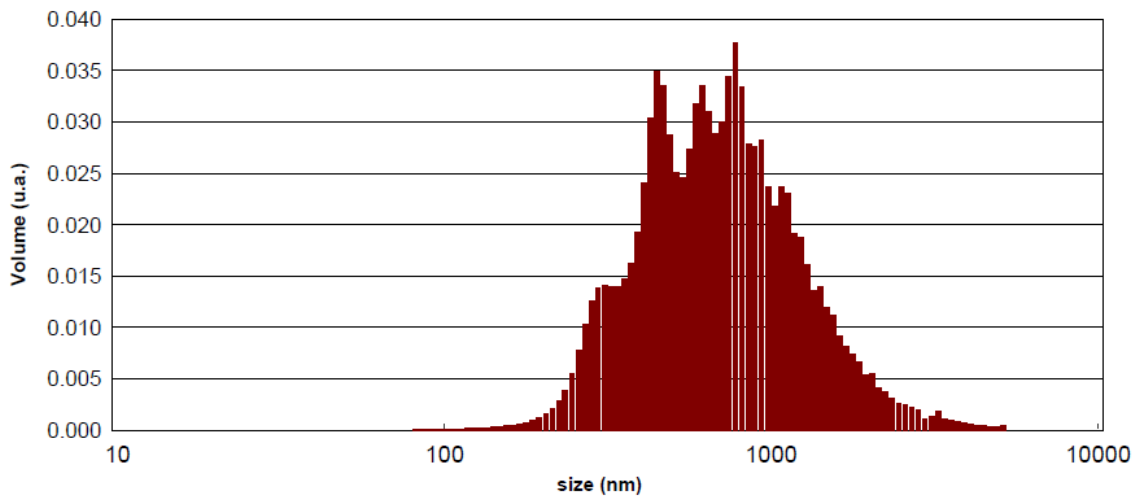
^۳ Cumulants

Size dispersion by Intensity



شکل ۳-۲: توزیع شدت میکرو-نانوحباب‌ها.

Size dispersion by Volume

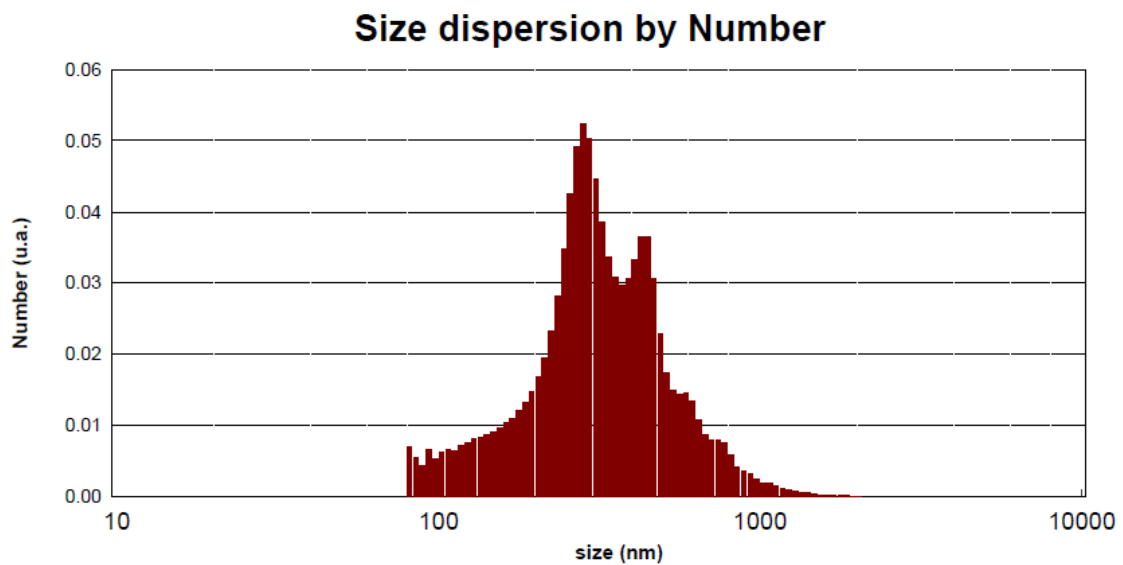


شکل ۳-۳: توزیع حجمی میکرو-نانوحباب‌ها.

۳-۲-۳ مواد شیمیایی مورد استفاده در آزمایش‌ها

مواد شیمیایی مورد استفاده در آزمایش‌ها شامل، نفت سفید به عنوان کلکتور برای کمک به آبرانی

سطح زغال سنگ و MIBC برای تولید کف پایدار در فلو تاسیون، هستند.



شکل ۳-۴: توزیع تعدادی میکرو-نانوحباب‌ها.

۳-۳ روش‌ها

۳-۳-۱ تهیه و آماده‌سازی نمونه

زغال سنگ مورد استفاده در این پژوهش از معادن البرز شرقی در استان سمنان است، نمونه‌های مورد مطالعه از بار ورودی کارخانه زغال‌شویی با سه کیفیت از درصد خاکستر، تهیه شد. در مرحله اول، عملیات خردایش به وسیله سنگ‌شکن فکی انجام شد و محصول آن تحت دانه‌بندی قرار گرفت. با روش تجزیه سرنندی و با استفاده از سری ASTM، جهت پوشش دادن شرایط ابعادی مورد نظر در این تحقیق، نمونه‌های زغال سنگ به سه بخش ابعادی تقسیم شد، جدول ۳-۱.

جدول ۳-۱: دانه‌بندی خوراک.

دامنه ابعادی ذرات (میکرون)	شماره سرنند (مش)
+۴۰۰ -۸۰۰	+۴۰ -۲۰
+۱۰۰ -۴۰۰	+۱۴۰ -۴۰
-۱۰۰	-۱۴۰

۳-۳-۲ تعیین درصد خاکستر

یکی از پارامترهای اصلی تعیین کننده کیفیت زغال سنگ، تعیین میزان خاکستر است. مواد غیر قابل سوختن در زغال سنگ را خاکستر می‌نامند و از آنجا که این مواد نقش منفی و نامطلوبی بر

کیفیت زغال مورد استفاده در صنعت دارند، قبل از استفاده باید شستشو و از محیط خارج شوند.

طبق استاندارد ASTM D-3174 برای تعیین خاکستر، مقدار ۱ تا ۲ گرم زغال سنگ را پس از عبور دادن از سرنده ۷۰ مش در بوته چینی وزن کرده، سپس بوته به مدت یک ساعت و سی دقیقه در کوره که دمای آن به ۸۵۰ درجه سانتی گراد رسیده است، قرار داده شد. بوته پس از خارج کردن از کوره و خنک شدن، توسط ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم وزن شد.

درصد خاکستر طبق معادله زیر تعیین می شود (Rao, 2016):

$$\% \text{ Ash} = \left(\frac{B}{A} \right) \times 100 \quad (1-3)$$

$$B = C - D \quad (2-3)$$

Ash: درصد خاکستر موجود در نمونه (٪)؛

A: وزن نمونه زغال سنگ (گرم)؛

B: وزن خاکستر (گرم)؛

C: وزن بوته خارج شده از کوره (گرم)؛

D: وزن بوته خالی (گرم).

۳-۲-۱ آنالیز خوراک اولیه فلوتاسیون

پس از انجام آماده سازی نمونه و دانه بندی، میزان خاکستر در هر دامنه ابعادی تعیین شد، که در جدول ۳-۲ نتایج این آنالیزها ارائه شده است.

جدول ۳-۲: نتایج آنالیز خوراک فلوتاسیون.

نمونه زغال سنگ									
-۱۰۰			+۱۰۰ -۴۰۰			+۴۰۰ -۸۰۰			دامنه ابعادی (میکرون)
۳۴	۲۵	۱۲	۴۰	۲۸	۱۲	۳۹	۳۴	۱۴	درصد خاکستر (%)
H3	M3	L3	H2	M2	L2	H1	M1	L1	نام نمونه

۳-۳-۳ انتخاب پارامترهای مورد بررسی و سطوح هر یک از آنها

در فلوتاسیون زغال سنگ نسبت به سایر کانی ها نرخ فلوتاسیون و مقدار زغال سنگ شناور شده بر

حسب حجم سلول، به دلیل پایین بودن ارزش واحد زغال سنگ اهمیت خاصی دارد. تولید حباب‌های مناسب هوا و ایجاد شرایط لازم برای اتصال ذرات زغال سنگ به حباب‌های هوا و پایداری این مجموعه تا رسیدن به سطح کف و جمع‌آوری آن‌ها از سطح، از جمله ضرورت‌های یک فلوتاسیون موفق است (رضایی، ۱۳۹۴).

پارامترهای متعددی در کارایی فرآیند فلوتاسیون نقش دارند که با تعیین مقادیر بهینه آن‌ها می‌توان نرخ شناورسازی ذرات را افزایش داد. بسیاری از این پارامترها به طور مستقل عمل نمی‌کنند و تأثیر متقابل آن‌ها نیز باید مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. این پارامترها را می‌توان در قالب ویژگی‌های پالپ (غلظت، دما، کیفیت آب، خواص هیدرودینامیکی و ...)، کف (نرخ هوادهی، عمق کف، ابعاد و شار سطحی حباب‌ها و ...)، ذرات (ابعاد، شکل، جرم مخصوص، خاصیت آبرانی، اکسایش، پوشش ذرات نرمه و ...) و ماشین فلوتاسیون (ابعاد و شکل سلول، نوع همزن و ...) دسته‌بندی و بررسی نمود (قدیانی، ۱۳۹۶).

انتخاب پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش طبق تحقیقات گذشته در دانشگاه صنعتی شاهرود صورت پذیرفت (محمودی، ۱۳۹۰؛ قاسمی، ۱۳۹۱؛ نوری، ۱۳۹۳). پارامترهای مورد بررسی و سطوح تغییرات آن‌ها در جدول ۳-۳ بیان شده است. همچنین پارامترهای ثابت در نظر گرفته شده به شرح زیر است:

- درصد جامد: ۷ درصد؛
- نوع کلکتور: نفت سفید؛
- نوع کف‌ساز: MIBC؛
- دما: دمای محیط؛
- pH: خنثی؛
- سرعت روتور: ۱۰۰۰ دور بر دقیقه؛
- توان دستگاه فراصوت: ۸۰ درصد؛

- زمان آماده‌سازی؛

- میزان هوادهی.

جدول ۳-۳: پارامترهای مورد بررسی و سطوح تغییرات آن‌ها.

پارامتر	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
مقدار کلکتور	گرم بر تن	۲۰۰	۱۱۰۰	۲۰۰۰
مقدار کف‌ساز	گرم بر تن	۵۰	۱۲۵	۲۰۰
موج فراصوت	کیلوهرتز	۰	۳۷	۸۰
نوع حباب*	-	۱	-	۲
اندازه ذرات**	میکرون	۱	۲	۳
خاکستر خوراک***	درصد	۱	۲	۳

* در پارامتر نوع حباب، منظور از سطح ۱ محلول میکرو-نانوحباب و سطح ۲ آب معمولی است.

** در پارامتر اندازه ذرات، منظور از سطح ۱ ذرات درشت، سطح ۲ ذرات متوسط و سطح ۳ ذرات ریز است.

*** در پارامتر خاکستر خوراک، منظور از سطح ۱ خاکستر پایین، سطح ۲ خاکستر متوسط و سطح ۳ خاکستر زیاد در هر بخش ابعادی است.

۳-۳-۴ انتخاب طرح آزمایش‌ها

در این پژوهش با توجه به تعداد و سطوح پارامترهای در نظر گرفته شده برای آزمایش‌های

فلوتاسیون، طرح آزمایشی سطح پاسخ^۱ با طراحی اولیه مرکب مرکزی^۲، در نرم‌افزار DX7.0 انتخاب

شد. بر این اساس، آزمایش‌های طراحی شده در جدول ۳-۴ آمده است.

جدول ۳-۴: طرح آزمایش‌ها.

شماره آزمایش	اجرای آزمایش	کلکتور (گرم بر تن)	کف‌ساز (گرم بر تن)	موج فراصوت (کیلوهرتز)	نوع حباب	خاکستر خوراک (درصد)	اندازه ذرات (میکرون)
۱	۴۳	۱۱۰۰	۱۲۵	۳۷	۲	۲	۱
۲	۴۲	۱۱۰۰	۱۲۵	۳۷	۲	۳	۲
۳	۱۸	۲۰۰۰	۵۰	۰	۱	۳	۱
۴	۱	۲۰۰	۵۰	۰	۱	۱	۱
۵	۹	۲۰۰	۵۰	۰	۱	۱	۳

^۱ Response Surface

^۲ Central Composite Design

ادامه جدول ۳-۴.

شماره آزمایش	اجرای آزمایش	کلکتور (گرم بر تن)	کف‌ساز (گرم بر تن)	موج فراصوت (کیلوهرتز)	نوع حباب	خاکستر خوراک (درصد)	اندازه ذرات (میکرون)
۶	۱۷	۲۰۰	۵۰	۰	۱	۳	۳
۷	۲۰	۲۰۰۰	۲۰۰	۰	۱	۳	۳
۸	۱۰	۲۰۰۰	۵۰	۰	۲	۱	۱
۹	۴	۲۰۰۰	۲۰۰	۰	۱	۱	۱
۱۰	۴۱	۱۱۰۰	۱۲۵	۳۷	۲	۱	۲
۱۱	۷	۲۰۰	۲۰۰	۸۰	۱	۱	۱
۱۲	۱۶	۲۰۰۰	۲۰۰	۸۰	۱	۱	۱
۱۳	۲۳	۲۰۰	۲۰۰	۸۰	۱	۳	۳
۱۴	۳۴	۲۰۰۰	۱۲۵	۳۷	۲	۲	۲
۱۵	۳۵	۱۱۰۰	۵۰	۳۷	۲	۲	۲
۱۶	۳	۲۰۰	۲۰۰	۰	۱	۱	۳
۱۷	۲۹	۲۰۰	۵۰	۸۰	۲	۳	۳
۱۸	۲۷	۲۰۰	۲۰۰	۰	۲	۳	۳
۱۹	۱۴	۲۰۰۰	۵۰	۸۰	۲	۱	۳
۲۰	۲۴	۲۰۰۰	۲۰۰	۸۰	۱	۳	۱
۲۱	۲۲	۲۰۰۰	۵۰	۸۰	۱	۳	۳
۲۲	۱۹	۲۰۰	۲۰۰	۰	۱	۳	۱
۲۳	۳۷	۱۱۰۰	۱۲۵	۰	۲	۲	۲
۲۴	۲۶	۲۰۰۰	۵۰	۰	۱	۳	۳
۲۵	۴۸	۱۱۰۰	۱۲۵	۳۷	۲	۲	۲
۲۶	۲۵	۲۰۰	۵۰	۰	۱	۳	۱
۲۷	۳۱	۲۰۰	۲۰۰	۸۰	۲	۳	۱
۲۸	۳۹	۱۱۰۰	۱۲۵	۳۷	۱	۲	۲
۲۹	۳۸	۱۱۰۰	۱۲۵	۸۰	۲	۲	۲
۳۰	۳۰	۲۰۰۰	۵۰	۸۰	۲	۳	۱
۳۱	۳۶	۱۱۰۰	۲۰۰	۳۷	۲	۲	۲
۳۲	۲۸	۲۰۰۰	۲۰۰	۰	۱	۳	۱
۳۳	۱۲	۲۰۰۰	۲۰۰	۰	۲	۱	۳
۳۴	۴۰	۱۱۰۰	۱۲۵	۳۷	۱	۲	۲
۳۵	۲۱	۲۰۰	۵۰	۸۰	۱	۳	۱
۳۶	۴۹	۱۱۰۰	۱۲۵	۳۷	۱	۲	۲
۳۷	۸	۲۰۰۰	۲۰۰	۸۰	۱	۱	۳

ادامه جدول ۳-۴.

شماره آزمایش	اجرای آزمایش	کلکتور (گرم بر تن)	کف ساز (گرم بر تن)	موج فراصوت (کیلوهرتز)	نوع حباب	خاکستر خوراک (درصد)	اندازه ذرات (میکرون)
۳۸	۴۵	۱۱۰۰	۱۲۵	۳۷	۲	۲	۲
۳۹	۳۳	۲۰۰	۱۲۵	۳۷	۲	۲	۲
۴۰	۲	۲۰۰۰	۵۰	۰	۱	۱	۳
۴۱	۴۷	۱۱۰۰	۱۲۵	۳۷	۲	۲	۲
۴۲	۴۶	۱۱۰۰	۱۲۵	۳۷	۱	۲	۲
۴۳	۱۵	۲۰۰	۲۰۰	۸۰	۱	۱	۳
۴۴	۱۳	۲۰۰	۵۰	۸۰	۱	۱	۱
۴۵	۴۴	۱۱۰۰	۱۲۵	۳۷	۲	۲	۳
۴۶	۵	۲۰۰	۵۰	۸۰	۱	۱	۳
۴۷	۳۲	۲۰۰۰	۲۰۰	۸۰	۲	۳	۳
۴۸	۱۱	۲۰۰	۲۰۰	۰	۱	۱	۱
۴۹	۶	۲۰۰۰	۵۰	۸۰	۱	۱	۱

۳-۳-۵ آزمایش های فلوتاسیون

به منظور انجام آزمایش ها از ماشین فلوتاسیون مکانیکی نوع دنور با حجم سلول ۱ لیتر استفاده شد. با استفاده از مطالعات و تحقیقات پیشین صورت گرفته پارامترهای گفته شده در بخش ۳-۳-۳ ثابت در نظر گرفته شدند.

برای هر آزمایش بعد از آماده کردن خوراک طبق طرح آزمایشی، پالپ با درصد جامد ۷٪ (۷۰ گرم زغال سنگ با ۹۳۰ میلی لیتر آب) آماده شد و به مدت ۵ دقیقه تحت آماده سازی اولیه به منظور خیس شدن سطح ذرات زغال سنگ قرار گرفت. پس از آن به منظور آبران کردن سطح ذرات، کلکتور به میزان مشخص شده در طرح آزمایشی با زمان آماده سازی ۹۰ ثانیه به سلول اضافه شد. پس از اتمام زمان آماده سازی کلکتور، کف ساز به مقدار مشخص شده در هر آزمایش به منظور پایداری کف به سلول افزوده و به مدت ۹۰ ثانیه آماده سازی انجام شد.

بعد از اتمام فرآیند آماده سازی، شیر هوا باز شد و عملیات کف گیری صورت گرفت. مدت زمان کف گیری بر اساس آزمایش های سینتیکی صورت گرفته، تعیین شد. پس از کف گیری، کنسانتره و

باطله، آبیگری و خشک شد و تحت خاکسترسنجی قرار گرفت. سیستم تنظیم شده برای انجام آزمایش‌های مربوط به فلوتاسیون در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۵: سیستم تنظیم شده برای انجام فلوتاسیون.

۳-۳-۶ سینتیک فلوتاسیون

برای درک معقول هر فرآیند، مقادیری که ارزیابی شده‌اند به سه گروه تقسیم می‌شوند (Ahmed

Jameson, 1989):

۱. روش‌های آزمایشگاهی تعیین نرخ فرآیند؛

۲. تأثیرهای متغیرهای فرآیند؛

۳. معادله‌ی نشان‌دهنده‌ی نرخ.

بر مبنای تحقیقات صورت گرفته مقدار ماده معدنی شناور شده در بخش کف در یک سلول

غیرپیوسته، تابعی از غلظت آن نسبت به زمان است (رضایی، ۱۳۹۴):

$$\frac{dC}{dt} = -kC^n \quad (3-3)$$

که در آن:

$\frac{dC}{dt}$: تغییرات غلظت ماده شناور شونده نسبت به زمان؛

C: غلظت مواد جامد اولیه که در زمان t قابل شناور شدن است؛

n: درجه واکنش شیمیایی؛

k: نرخ شناورسازی (ثابت سینتیک) فلوتاسیون است و به پارامترهایی مانند نوع و غلظت مواد

شیمیایی، شدت جریان هوا، توزیع زمان ماند، ابعاد ذره و ... بستگی دارد.

در صورتی که فرض شود فلوتاسیون نسبت به درصد ذراتی که در پالپ شناور می‌شوند، فرآیندی از

مرتبه اول است، رابطه سینتیکی فلوتاسیون در یک سلول غیرپیوسته به صورت زیر تعریف می‌شود که

در آن k_1 نرخ شناورسازی فلوتاسیون درجه یک است (رضایی، ۱۳۹۴):

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 C^n \quad (4-3)$$

اگر زمان ماند و نرخ شناورسازی کلیه ذراتی که باید شناور شوند مقدار ثابتی باشد، غلظت وزنی آن

ماده در پالپ در زمان t به شرح زیر حاصل خواهد شد (رضایی، ۱۳۹۴):

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \int_0^t -k_1 dt \quad (5-3)$$

که در آن C_0 غلظت اولیه ماده مورد نظر است و در نتیجه معادله ۳-۶ حاصل می‌شود (رضایی،

۱۳۹۴).

$$C = C_0 \exp(-k_1 t) \quad (6-3)$$

بخشی از مواد که در پایان زمان t به صورت غیرپیوسته شناور می‌شود، بازیابی نامیده شده و از

رابطه زیر محاسبه می‌شود (رضایی، ۱۳۹۴).

$$R = \frac{C_0 - C}{C_0} \quad (7-3)$$

با استفاده از روابط ۳-۶ و ۳-۷ رابطه زیر برای بازیابی در حالتی که نرخ شناورسازی و زمان ماند کلیه ذرات که باید شناور شوند مقدار ثابتی است، به دست می‌آید (رضایی، ۱۳۹۴).

$$R = 1 - \exp(-k_1 t) \quad (۳-۸)$$

این رابطه در مواردی معتبر است که بازیابی بعد از زمان بی‌نهایت معادل ۱۰۰ درصد باشد و چنانچه بازیابی بعد از زمان بی‌نهایت معادل R_∞ باشد، رابطه سینتیک فلوتاسیون درجه اول به صورت زیر خواهد بود (رضایی، ۱۳۹۴):

$$R = R_\infty [1 - \exp(-k_1 t)] \quad (۳-۹)$$

در این تحقیق، علاوه بر معادله ۳-۹ (مدل شماره ۱)، معادله‌های ۳-۱۰ تا ۳-۱۲، به منظور بررسی تأثیر محلول میکرو-نانوحباب بر سینتیک فلوتاسیون زغال سنگ مورد استفاده قرار گرفتند.

معادله ۳-۱۰، مدل درجه اول با توزیع مستطیلی است که به علت کاربرد توزیع مستطیلی قابلیت فلوتاسیون، به عنوان بهترین مدل در انطباق با داده‌های آزمایشگاهی معرفی شده است (Gupta & Yan, 2016).

$$R = R_\infty \left[1 - \frac{1 - \exp(-k_2 t)}{k_2 t} \right] \quad (۳-۱۰)$$

در معادله ۳-۱۱، مدل درجه دوم که در آن ذرات دارای درجه فلوتاسیون ثابتی هستند، ذکر شده است (مدل شماره ۳) (Gupta & Yan, 2016).

$$R = \frac{R_\infty^2 k_3 t}{1 + R_\infty k_3 t} \quad (۳-۱۱)$$

معادله ۳-۱۲ بیان گر مدل درجه دوم با توزیع مستطیلی قابلیت‌های فلوتاسیون (مدل شماره ۴) است (Gupta & Yan, 2016).

$$R = R_\infty \left[1 - \frac{\ln(1 + k_4 t)}{k_4 t} \right] \quad (۳-۱۲)$$

آزمایش‌ها سینتیک فلوتاسیون با پارامترهای ثابت مشابه و در شرایط استفاده از محلول میکرو-

نانوحباب و آب معمولی انجام شد. مقدار هر یک از پارامترها در جدول ۳-۵ آورده شده است. جهت تعیین سرعت انتقال ذرات به محصول کنسانتره، کفگیری در زمان مشخص، انجام شد و محصول کنسانتره در هر بخش به صورت مجزا جمع آوری، خشک و خاکسترسنجی شد.

جدول ۳-۵: مقدار پارامترهای انتخابی در آزمایش‌ها سینتیک فلو تاسیون.

پارامترها	کلکتور (گرم بر تن)	کف‌ساز (گرم بر تن)	ابعاد ذرات (میکرون)	خاکستر خوراک
مقدار	۲۰۰۰	۲۰۰	۸۰۰ - ۴۰۰+	کم
			۴۰۰ - ۱۰۰+	متوسط
			۱۰۰-	زیاد

۳-۳-۷ محاسبه شاخص‌های فرآیندی

معادله‌های ۳-۱۳، ۳-۱۴، ۳-۱۵ و ۳-۱۶ به ترتیب برای محاسبه بازیابی، بازیابی مواد سوختنی، بازیابی خاکستر در باطله و شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر مورد استفاده قرار گرفتند (Rao, 2016; Wills & Napier-Munn, 2006).

$$Yield = \frac{f_{Ash} - t_{Ash}}{C_{Ash} - t_{Ash}} \times 100 \quad (۳-۱۳)$$

$$R_{Combustible} = \frac{(100 - c_{Ash}) \times C}{(100 - f_{Ash}) \times F} \times 100 \quad (۳-۱۴)$$

$$R_{Non-combustible} = \left(1 - \frac{c_{Ash} \times C}{f_{Ash} \times F} \right) \times 100 \quad (۳-۱۵)$$

$$S \cdot I \cdot Non-combustible = \sqrt{\frac{R_{Combustible} \times R_{Combustible}}{(100 - R_{Combustible}) \times (100 - R_{Combustible})}} \quad (۳-۱۵)$$

$Yield$: بازیابی (٪)؛

$R_{Combustible}$: بازیابی ماده سوختنی در کنسانتره (٪)؛

$R_{Non-combustible}$: بازیابی خاکستر در باطله (٪)؛

$S \cdot I \cdot Non-combustible$: شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر؛

t_{Ash} و C_{Ash} ، f_{Ash} : متوسط خاکستر (%) به ترتیب در خوراک، کنسانتره و باطله؛

C و F : وزن (گرم) به ترتیب کنسانتره و خوراک هستند.

۳-۴ جمع‌بندی

در این فصل در ابتدا تجهیزات و مواد شیمیایی به کار گرفته شده معرفی شدند. در ادامه تهیه و آماده‌سازی نمونه، تعیین پارامترهای عملیاتی و طرح آزمایش مورد استفاده، بیان شد. ۱۸ آزمایش سینتیکی برای نمونه‌های مختلف زغال‌سنگ در حضور یا عدم‌حضور میکرو-نانوحباب‌ها طراحی و انجام شدند. در انتها نیز نحوه محاسبه سینتیک فلوتاسیون و شاخص‌های فرآیندی ارائه شد.

فصل چهارم

تفسیر نتایج تحقیق

۴-۱ مقدمه

یکی از مسایل بسیار مهم در فرآوری و شستشوی زغال سنگ، انجام آزمایش است. اغلب فرایندها در مقیاس آزمایشگاهی و نیمه صنعتی و یا آزمایش‌های مدار بسته انجام شده و سپس به مرحله صنعتی وارد می‌شوند. بنابراین، روند انجام آزمایش نیاز به یک طرح منظم در جهت تسریع و تنظیم اطلاعات به دست آمده، کاهش تعداد آزمایش‌ها، بهینه‌سازی آن‌ها و اندرکنش بعضی از پارامترها دارد که به طور سیستماتیک باید مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند (رضایی، ۱۳۹۴). در این فصل با استفاده از محاسبه شاخص‌های فرآیندی بیان شده در فصل سوم، به بررسی تأثیر محلول میکرو-نانوحباب، امواج فراصوت و سینتیک فرآیند پرداخته شده است.

۴-۲ نتایج درصد خاکستر در کنسانتره و باطله

یکی از پارامترهای اصلی تعیین کننده کیفیت زغال سنگ، تعیین میزان خاکستر آن است. وجود خاکستر در زغال سنگ، افزایش مصرف معرف‌ها، ایجاد مشکل در فرآیند تولید فولاد، افزایش مصرف کک و کاهش بازدهی آن را موجب می‌شود (رضایی، ۱۳۹۴).

نتایج درصد خاکستر در کنسانتره و باطله پس از یک مرحله شناورسازی در جدول ۴-۱ ارائه شده است.

جدول ۴-۱: میزان خاکستر در خوراک، کنسانتره و باطله.

شماره آزمایش	خاکستر خوراک (%)	خاکستر کنسانتره (%)	خاکستر باطله (%)	شماره آزمایش	خاکستر خوراک (%)	خاکستر کنسانتره (%)	خاکستر باطله (%)
۱	۳۴	۱۴	۴۶	۲۶	۳۹	۲۳	۳۹
۲	۴۰	۱۶	۶۴	۲۷	۳۹	۲۱	۴۰
۳	۳۹	۲۱	۳۹	۲۸	۲۸	۱۷	۶۱
۴	۱۴	۹	۱۵	۲۹	۲۸	۱۸	۴۱
۵	۱۲	۷	۱۴	۳۰	۳۹	۲۰	۴۰
۶	۳۴	۲۱	۵۳	۳۱	۲۸	۱۵	۵۸
۷	۳۴	۳۱	۶۹	۳۲	۳۹	۲۴	۴۲
۸	۱۴	۱۰	۱۵	۳۳	۱۲	۶	۲۰

ادامه جدول ۴-۱.

شماره آزمایش	خاکستر خوراک (%)	خاکستر کنسانتره (%)	خاکستر باطله (%)	شماره آزمایش	خاکستر خوراک (%)	خاکستر کنسانتره (%)	خاکستر باطله (%)
۹	۱۴	۷	۱۹	۳۴	۲۸	۱۳	۵۱
۱۰	۱۲	۶	۱۵	۳۵	۳۹	۲۴	۳۹
۱۱	۱۴	۸	۱۴	۳۶	۲۸	۱۵	۵۵
۱۲	۱۴	۹	۱۴	۳۷	۱۲	۸	۲۶
۱۳	۳۴	۱۹	۷۰	۳۸	۲۸	۱۸	۵۳
۱۴	۲۸	۱۶	۵۷	۳۹	۲۸	۱۱	۴۶
۱۵	۲۸	۱۴	۴۹	۴۰	۱۲	۹	۱۷
۱۶	۱۲	۶	۱۴	۴۱	۲۸	۱۵	۵۷
۱۷	۳۴	۱۸	۶۶	۴۲	۲۸	۱۵	۵۲
۱۸	۳۴	۲۰	۶۴	۴۳	۱۲	۸	۱۴
۱۹	۱۲	۶	۱۵	۴۴	۱۴	۱۱	۱۴
۲۰	۳۹	۲۲	۴۰	۴۵	۲۵	۱۵	۶۲
۲۱	۳۴	۲۲	۷۳	۴۶	۱۲	۸	۱۳
۲۲	۳۹	۲۵	۳۹	۴۷	۳۴	۲۲	۶۲
۲۳	۲۸	۱۴	۳۶	۴۸	۱۴	۸	۱۴
۲۴	۳۴	۲۱	۶۹	۴۹	۱۴	۸	۱۶
۲۵	۲۸	۱۴	۵۵	-	-	-	-

۴-۳ تحلیل نتایج در نرم افزار

بعد از انجام آزمایش و محاسبه پاسخ‌های مورد نظر سیستم، با استفاده از تحلیل‌های آماری مانند رگرسیون ساده، رگرسیون چند متغیره و همچنین آنالیز واریانس‌ها^۱، محاسبه آماره‌های مختلف مانند P و F و نیز مدل ریاضی حاکم بر فرآیند، فاکتورهای مؤثر و میزان تأثیر آن‌ها به همراه تأثیرات متقابل مؤثر بدست می‌آیند. در جدول ۴-۲ محاسبه پاسخ‌ها ارائه شده است.

^۱ Analysis of Variance (ANOVA)

جدول ۴-۲: محاسبه شاخص‌های فرآیندی.

شماره آزمایش	Combustible Recovery (%)	S.I.Non- Combustible	Yield (%)	Ash.P (%) (خاکستر محصول کسانتره)
۱	۵۶/۲۴	۲/۴۴	۳۷/۵	۱۴
۲	۵۳/۹۸	۲/۵۴	۵۰	۱۶
۳	۲/۳۳	۱/۵۶	۰	۲۱
۴	۷/۴۱	۱/۳	۱۶/۶۷	۹
۵	۳۸/۴۸	۱/۵۲	۲۸/۵۷	۷
۶	۷۲/۶۶	۲/۱	۵۹/۳۷	۲۱
۷	۸۲/۹۵	۱/۳۶	۹۲/۱۱	۳۱
۸	۱۰/۸۱	۱/۲۳	۲۰	۱۰
۹	۳۴/۸۸	۱/۶۷	۴۱/۶۷	۷
۱۰	۱۸/۶۶	۱/۶۱	۳۳/۳۳	۶
۱۱	۱۰/۸۸	۱/۴۱	۰	۸
۱۲	۲۱/۸	۱/۳۵	۰	۹
۱۳	۹۶/۶۲	۶/۰۳	۷۰/۵۹	۱۹
۱۴	۷۸/۷۳	۲/۴۳	۷۰/۷۳	۱۶
۱۵	۶۸/۳۴	۲/۳۲	۶۰	۱۴
۱۶	۴۴/۸۳	۱/۷۵	۲۵	۶
۱۷	۸۴/۰۱	۳/۰۷	۶۶/۶۷	۱۸
۱۸	۷۶/۶۹	۱/۵۶	۸۸/۶۴	۲۰
۱۹	۴۵/۳۴	۱/۷۵	۳۳/۳۳	۶
۲۰	۶/۰۶	۱/۵۳	۵/۵۶	۲۲
۲۱	۸۹/۴۱	۲/۹۷	۷۶/۴۷	۲۲
۲۲	۸/۱۳	۱/۴۱	۰	۲۵
۲۳	۴۳/۸۵	۱/۸۶	۳۶/۳۶	۱۴
۲۴	۸۴/۱۳	۲/۶۳	۷۲/۹۲	۲۱
۲۵	۷۶/۷۲	۲/۶۴	۶۵/۸۵	۱۴
۲۶	۱/۷۷	۱/۴۷	۰	۲۳
۲۷	۵/۱۶	۱/۵۸	۵/۲۶	۲۱
۲۸	۸۱/۸۸	۲/۴۴	۷۵	۱۷
۲۹	۴۹/۷۷	۱/۵۹	۵۶/۵۲	۱۸
۳۰	۵/۷۱	۱/۶۳	۵	۲۰
۳۱	۷۹/۸۷	۲/۶۴	۶۹/۷۷	۱۵
۳۲	۱۳/۸۱	۱/۴۸	۱۶/۶۷	۲۴
۳۳	۵۶/۸۸	۱/۹۱	۵۷/۱۴	۶
۳۴	۷۱/۹۱	۲/۵۹	۶۰/۵۳	۱۳
۳۵	۳/۰۴	۱/۴۳	۰	۲۴
۳۶	۸۲/۲۲	۲/۷۹	۶۷/۵	۱۵

ادامه جدول ۴-۲.

شماره آزمایش	Combustible Recovery (%)	S.I.Non-Combustible	Yield (%)	Ash.P (%) (خاکستر محصول کنسانتره)
۳۷	۶۵/۲۸	۱/۶۲	۷۷/۷۸	۸
۳۸	۷۲/۶۸	۱/۹۶	۷۱/۴۳	۱۸
۳۹	۶۰/۵۷	۲/۵۴	۵۱/۴۳	۱۱
۴۰	۴۸/۸۵	۱/۳۲	۶۲/۵	۹
۴۱	۷۷/۱۲	۲/۵	۶۹/۰۵	۱۵
۴۲	۷۸/۶۲	۲/۵۸	۶۴/۸۶	۱۵
۴۳	۴۵/۵۱	۱/۴۳	۳۳/۳۳	۸
۴۴	۱۳	۱/۱۷	۰	۱۱
۴۵	۸۸/۶۸	۲/۹۲	۷۸/۷۲	۱۵
۴۶	۴۱	۱/۴	۲۰	۸
۴۷	۸۸/۲	۲/۸۳	۷۰	۲۲
۴۸	۷/۰۶	۱/۳۹	۰	۸
۴۹	۲۱/۱۵	۱/۴۵	۲۵	۸

۴-۳-۱ آنالیز واریانس

آنالیز واریانس یک عملیات آماری معمول برای تحلیل نتایج آزمایش‌ها و تعیین سهم تأثیر هر عامل بر مشخصه‌ی کیفی پاسخ است، که این امر با مطالعه تأثیرات اصلی هر عامل حاصل می‌شود. مشخصه کیفی نیز با پیدا کردن یک حد بالا و یک حد پایین برای عوامل تأثیرگذار بر کیفیت، کنترل می‌شوند. در نتیجه سطوحی که بر عوامل تأثیر می‌گذارند تا بهترین نتایج را حاصل کنند، پیش‌بینی می‌شوند. آنالیز واریانس تمامی پاسخ‌ها برای شناسایی پارامترهای مؤثر و تأثیرات متقابل آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار DX7.0 انجام شد. مفاهیم آماری جدول ANOVA مانند مجموع مربعات^۱، میانگین مربعات^۲ و نسبت واریانس^۳ برای تمامی پارامترها و هر پاسخ در نرم‌افزار محاسبه گردید. با توجه به زیادی پاسخ‌ها، جدول ANOVA برای بازیابی ماده سوختنی (٪) در ادامه ارائه شده است. با توجه به سطح پاسخ اطمینان ۹۵ درصد در نظر گرفته شده برای این آزمایش‌ها، مقادیر ارزش احتمال^۴ کوچکتر از

^۱ Sum of Squares (SS)

^۲ Mean of Squares (MS)

^۳ Variance ratio (F-Value)

^۴ Calculated Probability (P-Value)

۰/۰۵۰۰ نشان‌دهنده آن است که پارامترها در مدل معنی‌دار هستند.

بر اساس جدول ۳-۴، پارامترهای مؤثر در بازیابی ماده سوختنی به ترتیب اهمیت، عبارتند از اندازه ذرات، درصد خاکستر خوراک. ضریب همبستگی مدل بازیابی ماده سوختنی ۰/۹۷ به دست آمد.

جدول ۳-۴: آنالیز واریانس بازیابی ماده سوختنی.

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	نسبت واریانس	ارزش احتمال
مدل	۴۴۸۲۶/۵۵	۱۵	۲۹۸۸/۴۴	۱۴۰/۱۷	<۰/۰۰۰۱
A-Collector dosage	۶۲۳/۲۹	۱	۶۲۳/۲۹	۲۹/۲۳	<۰/۰۰۰۱
B-Frother dosage	۳۳۷/۵۵	۱	۳۳۷/۵۵	۱۵/۸۳	۰/۰۰۰۴
C-Ultrasonic wave	۱۳۰/۹۱	۱	۱۳۰/۹۱	۶/۱۴	۰/۰۱۸۵
D-Bubble size	۱۸۴/۳۹	۱	۱۸۴/۳۹	۸/۶۵	۰/۰۰۵۹
E-Feed ash	۳۴۲۶/۷۱	۲	۱۷۱۳/۳۶	۸۰/۳۶	<۰/۰۰۰۱
F-Particle size	۲۵۴۴۴/۲۱	۲	۱۲۷۲۲/۱۰	۵۹۶/۷۲	<۰/۰۰۰۱
AE	۲۹۶/۵۵	۲	۱۴۸/۲۷	۶/۹۵	۰/۰۰۳۰
EF	۴۸۱۴/۱۷	۴	۱۲۰۳/۵۴	۵۶/۴۵	<۰/۰۰۰۱
C ²	۱۱۸۸/۸۴	۱	۱۱۸۸/۸۴	۵۵/۷۶	<۰/۰۰۰۱
باقیمانده	۷۰۳/۵۶	۳۳	۲۱/۳۲	-	-
مجموع	۴۵۵۳۰/۱۱	۴۸	-	-	-

۴-۴ بررسی تأثیر میکرو-نانو حباب و فراصوت بر پارامترهای عملیاتی

در طول فرآیند فرآوری مواد معدنی، هر یک از پارامترها علاوه بر تأثیرات مجزایی که در فرآیند دارند، تحت تأثیر یک‌دیگر نیز قرار می‌گیرند. این تأثیرات متقابل می‌تواند عمل‌کرد کاهشی یا افزایشی بر روی هر یک از پارامترها داشته باشد. از این رو، در این تحقیق، تأثیرات دو گانه هر یک از پارامترها با محلول میکرو-نانوحباب و فراصوت در هر یک از شاخص‌های فرآیندی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۴-۴-۱ بررسی عملکرد محلول میکرو-نانوحباب بر پارامترهای عملیاتی

شکل ۴-۱ (الف)، تأثیر حضور و عدم حضور محلول میکرو-نانوحباب بر روی بازیابی در مقدار کلکتورهای ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ گرم بر تن را نشان می‌دهد. محلول میکرو-نانوحباب بازیابی را بیشتر از ۴۰ و ۱۵ درصد در مقدار کلکتور ۲۰۰ و ۲۰۰۰ گرم بر تن افزایش داده، در حالی که بیشترین بازیابی در عدم حضور میکرو-نانوحباب‌ها ۷۲٪ و در مقدار کلکتور ۲۰۰۰ گرم بر تن است، با این وجود، بازیابی در

حضور میکرو-نانوحباب در مقدار کلکتور مصرفی ۲۰۰ گرم بر تن به ۷۲٪ رسیده است. به عبارت دیگر برای رسیدن به بازیابی یکسان، مقدار کلکتور مصرفی کاهش پیدا کرده است. مطالعه انجام شده بر اساس تجزیه‌های تصویری، میکرو-نانوحباب‌ها تمایل بیشتری برای حضور در سطح ذرات آب‌گریز نسبت به حضور در آب و سطح ذرات آب‌دوست دارند (Maoming et al., 2010) و همچنین مطالعات گو و همکاران^۱ نشان داد که زاویه تماس حباب‌های معمولی با سطح ذرات آب‌گریز در حضور میکرو-نانوحباب‌ها بیشتر از عدم حضور آن‌ها است (Gu et al., 2004). علت افزایش زاویه تماس در حضور میکرو-نانوحباب‌ها، آب‌گریزی بیشتر سطح آن‌ها نسبت به سطح جامد است. این امر نشان می‌دهد میکرو-نانوحباب‌ها بر روی سطح ذرات زغال حضور یافته و به صورت یک کلکتور ثانویه عمل می‌کنند. در نتیجه در مورد کلکتور، استفاده از میکرو-نانوحباب‌ها می‌تواند در هزینه‌های مربوط به کلکتور به میزان زیادی صرفه‌جویی کند. در این مورد تا ۹۰٪ صرفه‌جویی در مصرف کلکتور مشاهده می‌شود.

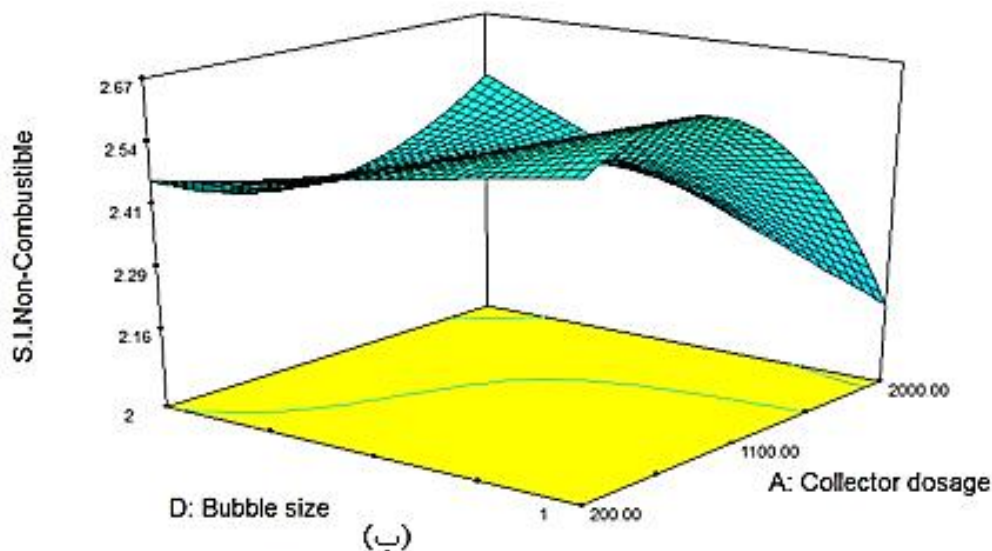
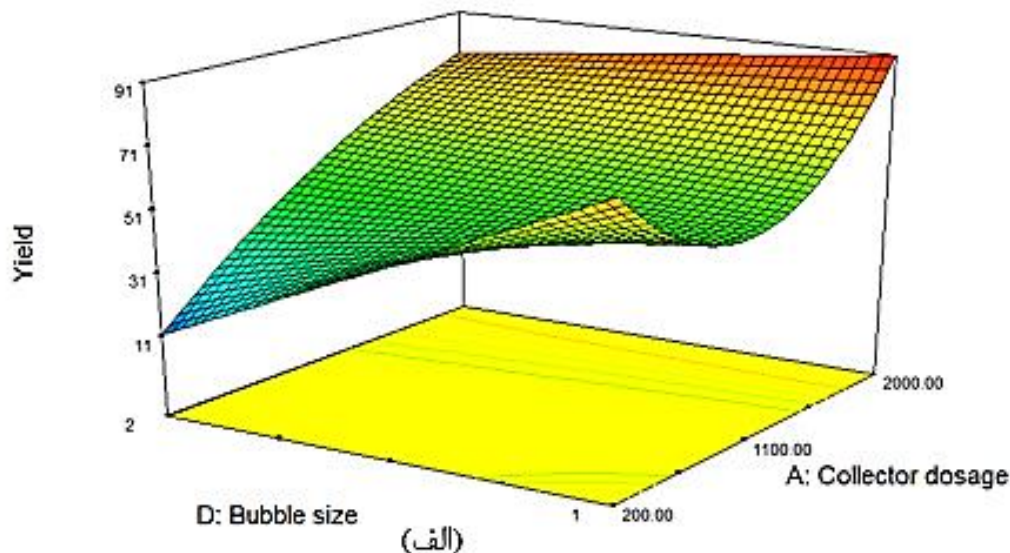
شکل ۴-۱ (ب)، تأثیر حضور و عدم حضور محلول میکرو-نانوحباب را بر روی شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر در مقدار کلکتورهای ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ گرم بر تن را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر با افزایش کلکتور در عدم حضور میکرو-نانوحباب افزایش پیدا کرده است. در حالی که، در حضور میکرو-نانوحباب در مقدار کلکتور ۲۰۰ گرم بر تن، شاخص انتخاب‌پذیری بیشتر از عدم حضور میکرو-نانوحباب است و با افزایش مقدار کلکتور این شاخص کاهش پیدا می‌کند، که این امر بیان‌گر کاهش انتخاب‌پذیری است. با توجه به اینکه حضور میکرو-نانو حباب‌ها به دلیل افزایش زاویه تماس، باعث افزایش قابلیت شناوری ذرات داخل پالپ می‌شود، انتظار می‌رود کاهش شاخص انتخاب‌پذیری فرآیند به دلیل افزایش احتمال دنباله‌روی و یا انتقال ذرات درگیر شده به همراه حباب‌ها باشد.

با توجه به موارد بیان شده در بالا، دو نکته برای استفاده از میکرو-نانوحباب به عنوان کلکتور ثانویه، فارغ از مزیت‌های دیگر آن، حائز اهمیت است:

^۱ Gu et al.

۱. داشتن توجیه اقتصادی مصرف میکرو-نانوحباب‌ها به عنوان جایگزین کلکتور از نظر اقتصادی؛

۲. مهم‌تر بودن ویژگی شناورسازی نسبت به فاکتور انتخاب‌پذیری در فرآیند.



شکل ۴-۱: تأثیر هم‌زمان محلول میکرو-نانوحباب و مقدار کلکتور بر بازیابی (% (الف)، شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر (ب) در مقدار کلکتور (گرم بر تن) و اندازه حباب: ۱ (محلول میکرو-نانوحباب)، ۲ (حباب معمولی).

شکل ۴-۲ (الف)، تأثیر حضور و عدم حضور محلول میکرو-نانوحباب بر روی بازیابی در مقدار کفساز ۵۰ تا ۲۰۰ گرم بر تن را نشان می‌دهد. افزایش غلظت کفساز باعث کاهش ابعاد حباب و افزایش غلظت حجمی آن‌ها در مایع می‌شود. میکرو-نانوحباب‌ها غلظت مورد نیاز برای کفساز را تا حدود یک چهارم کاهش می‌دهد. برای مثال، در غیاب میکرو-نانوحباب‌ها بیشترین مقدار بازیابی

حدود ۶۲٪ در غلظت ۲۰۰ گرم بر تن کفساز اتفاق می‌افتد، در حالی که، در حضور میکرو-نانوحباب‌ها در غلظت ۵۰ گرم بر تن کفساز، می‌توان به همان بازیابی دست یافت. در حضور میکرو-نانوحباب با غلظت ۲۰۰ گرم بر تن کفساز، بازیابی ۶۵٪ می‌شود.

شکل ۲-۴ (ب)، تأثیر حضور و عدم حضور محلول میکرو-نانوحباب بر روی خاکستر محصول در مقدار کفساز ۵۰ تا ۲۰۰ گرم بر تن را نشان می‌دهد. خاکستر محصول در حضور میکرو-نانوحباب بیشتر از عدم حضور آن است، که بازیابی بیشتر در حضور میکرو-نانوحباب این مسئله را توجیه می‌کند. همچنین افزایش بازیابی در مقدار کفساز کم را می‌توان به دلیل حضور تعداد بیشتر حباب‌های پایدار نسبت به حالت عدم حضور میکرو-نانوحباب‌ها دانست.

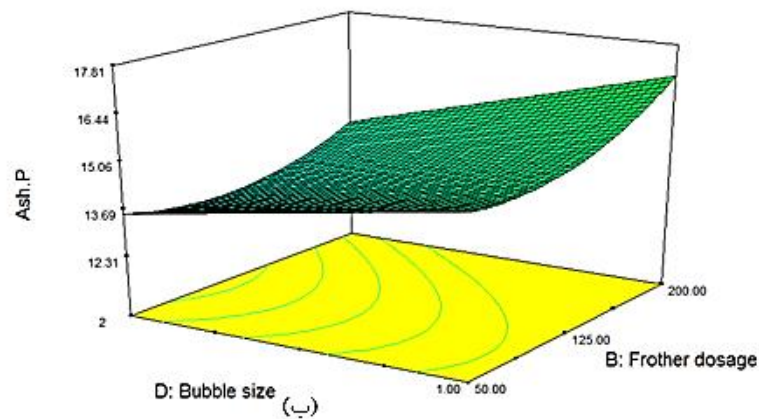
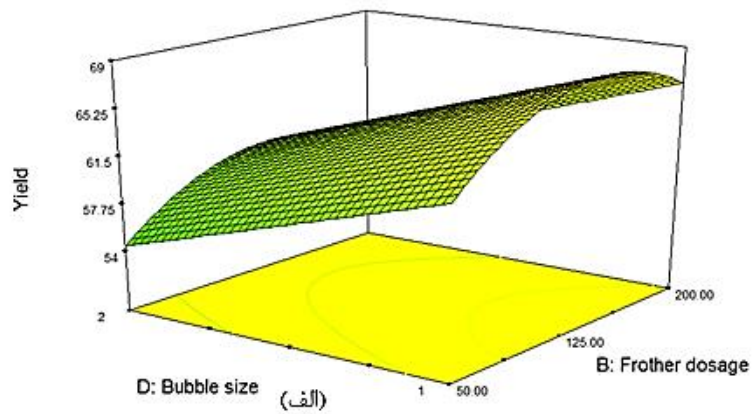
می‌توان نتیجه گرفت، همانند تأثیر میکرو-نانوحباب بر کلکتور، میزان کفساز مصرفی در حضور میکرو-نانو حباب کاهش یافته و می‌توان در حالتی که کفساز هزینه اقتصادی بیشتری نسبت به میکرو-نانوحباب‌ها تحمیل می‌کند به عنوان جایگزین از میکرو-نانوحباب‌ها استفاده کرد.

شکل ۳-۴ نشان می‌دهد که محلول میکرو-نانوحباب تأثیر قابل قبولی بر بازیابی ذرات در ابعاد مختلف نسبت به عدم حضور میکرو-نانوحباب‌ها دارد، به طوری که می‌توان مشاهده کرد، بازیابی ذرات درشت تا حدود ۱۰ درصد، ذرات متوسط بیش از ۱۰ درصد و ذرات ریز بیش از ۳۰ درصد، بهبود یافته است.

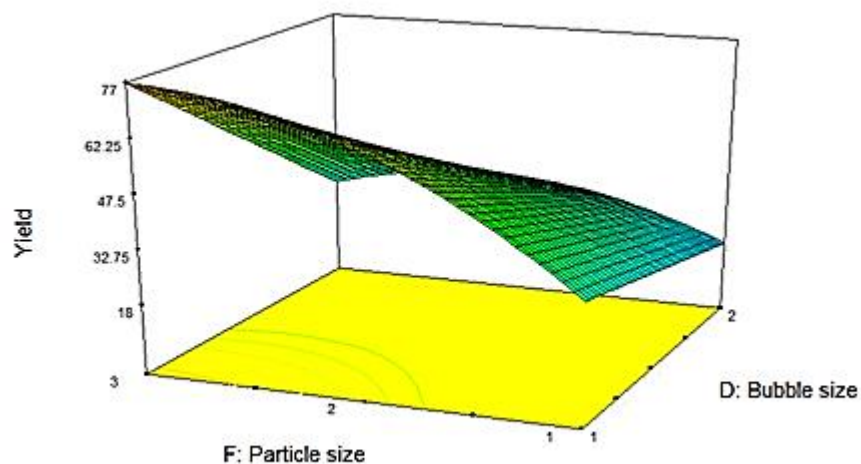
احتمال برخورد (P_C) بین ذره و حباب به صورت کسری از کل ذرات موجود در مسیر حباب در حال صعود که به حباب برخورد می‌کنند، تعریف می‌شود. مدل ریاضی احتمال برخورد در معادله ۱-۴ آمده است (Yoon & Luttrell, 1989):

$$P_C = \left[\frac{3}{2} + \frac{4Re^{0.72}}{15} \right] \left(\frac{D_p}{D_b} \right)^2 \quad (1-4)$$

که در آن D_p اندازه ذره، D_b اندازه حباب و Re عدد رینولدز است. بر اساس معادله مذکور، با کاهش اندازه حباب، احتمال برخورد افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۲: تأثیر هم‌زمان محلول میکرو-نانوحباب و مقدار کف‌ساز بر بازیابی (%)(الف)، خاکستر محصول (%)(ب) در مقدار کف‌ساز (گرم بر تن) و اندازه حباب: ۱ (محلول میکرو-نانوحباب)، ۲ (حباب معمولی).

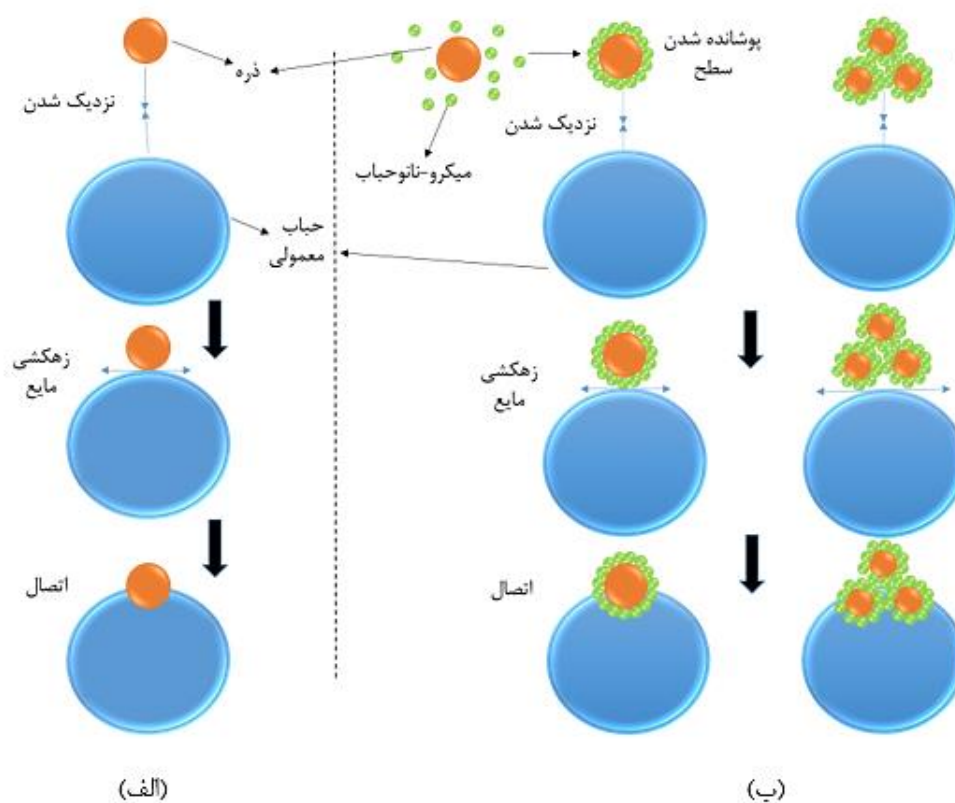


شکل ۴-۳: تأثیر هم‌زمان محلول میکرو-نانوحباب و اندازه ذرات (میکرون) بر بازیابی (%)، در اندازه ذرات: ۱: درشت (۸۰۰ - ۴۰۰ میکرون)، ۲: متوسط (۴۰۰ - ۱۰۰ میکرون)، ۳: ریز (۱۰۰ - میکرون) و موج فراصوت (کیلوهرتز).

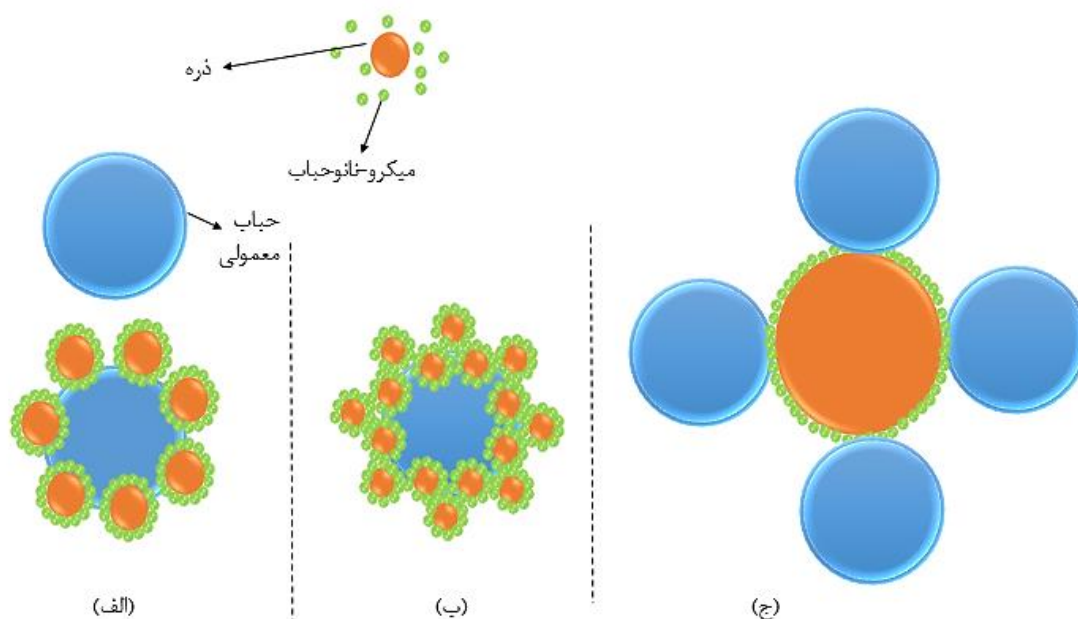
بر مبنای مطالعه‌های انجام شده، میکرو-نانوحباب‌ها با ایجاد یک پل ارتباطی بین سطوح ذرات جامد آب‌گریز باعث به هم چسبیدگی این ذرات می‌شوند. تجمع ذرات با این روش، به عنوان پدیده انبوهش حبابی نامیده می‌شود. بنابراین با پوشانده شدن سطح ذرات ریز توسط میکرو-نانوحباب‌ها و تجمع ذرات، بازیابی ذرات ریز افزایش می‌یابد (Hamptin & Nguyen, 2010).

همان‌طور که در قبل گفته شد، میکرو-نانوحباب‌ها بر روی سطح ذرات آبران قرار می‌گیرند و زاویه تماس حباب معمولی با ذرات را افزایش می‌دهند، پس می‌توان گفت به این دلیل بازیابی ذرات را بهبود می‌بخشند. به صورت شماتیک این امر را می‌توان در شکل ۴-۴ مشاهده نمود.

در شکل ۴-۵ نیز مکانیسم شناور شدن را برای ابعاد مختلف در حضور میکرو-نانوحباب‌ها می‌توان مشاهده کرد.

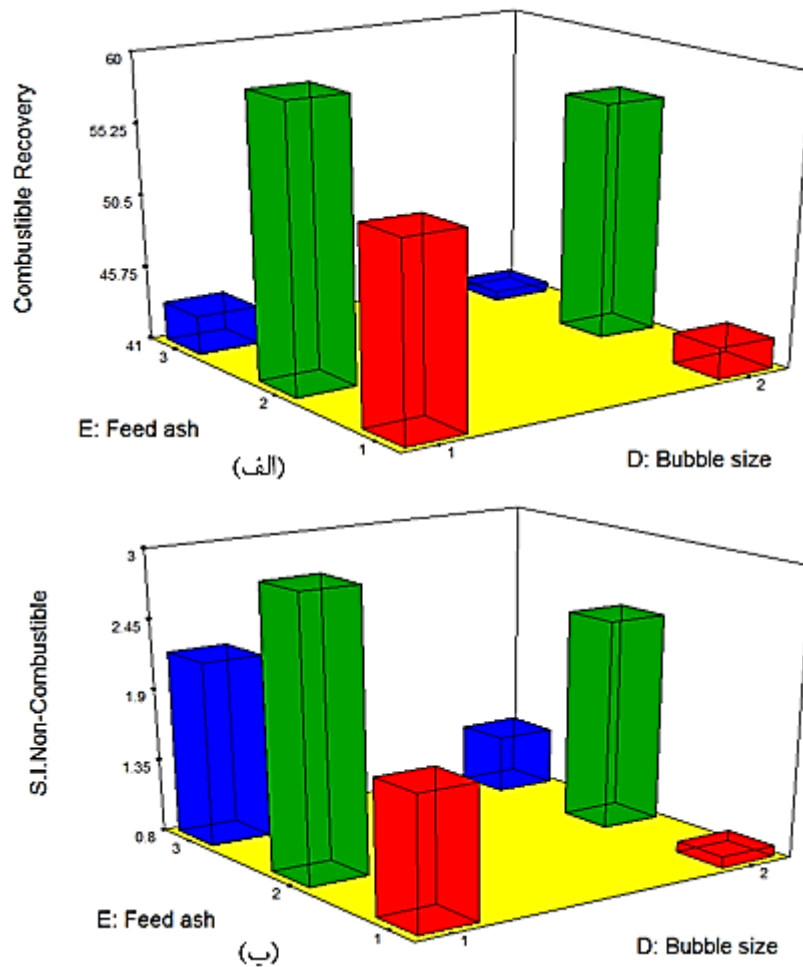


شکل ۴-۴: شماتیک اتصال ذره به حباب، قسمت (الف) اتصال ذره و حباب بدون حضور میکرو-نانو حباب، قسمت (ب) اتصال ذره و حباب در حضور میکرو-نانوحباب.



شکل ۴-۵: مکانیسم شناوری ذرات در حضور میکرو-نانوحباب، (الف) ذرات معمولی، (ب) ذرات ریز، (ج) ذرات درشت.

شکل ۴-۶ نشان می‌دهد که در حضور میکرو-نانوحباب‌ها بازیابی مواد سوختنی در درصد خاکسترها مختلف بهبود پیدا کرده و شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر نیز افزایش یافته‌است، که نشان از تمایل حضور میکرو-نانوحباب‌ها در سطح ذرات آبران دارد. همان‌طور که در قسمت (الف) مشاهده می‌شود، مقدار بازیابی ماده سوختنی در درصد خاکستر خوراک کم بیش از ۱۵ درصد، در خاکستر خوراک متوسط حدود ۵ درصد و خاکستر زیاد حدود ۳ درصد افزایش یافته است و قسمت (ب) بیان‌گر بیشترین تأثیر در خوراک با خاکستر زیاد است.



شکل ۴-۶: تأثیر هم‌زمان محلول میکرو-نانو حباب و خاکستر خوراک (%) بر بازیابی مواد سوختنی (%) (الف) و شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر در خاکستر خوراک: ۱ (کم)، ۲ (متوسط)، ۳ (زیاد) و اندازه حباب: ۱ (محلول میکرو-نانو حباب)، ۲ (حباب معمولی).

۴-۴-۲ فراصوت

۴-۴-۲-۱ عملکرد امواج فراصوت

در اثر انتشار امواج فراصوت در یک سیال، دو مکانیسم اصلی شامل کاویتاسیون و جریان صوتی ایجاد می‌شود. زمانی که موج فراصوت در یک محیط مایع منتشر می‌شود، به علت حرکت موج صوتی، الگوی متراکم شدن و کاهش تراکم، تکرار می‌شود. کاهش تراکم باعث ایجاد نواحی با فشار کم شده که در آن مایع گسیخته می‌شود. به علت کاهش فشار، حباب‌های بسیار ریز در نواحی که کاهش تراکم رخ می‌دهد، شکل می‌گیرند که به این حباب‌های ریز، حباب‌های کاویتاسیون می‌گویند

(Sonochemistry Website, 2017). این حباب‌های ریز که در فاز آبی شکل می‌گیرند تا یک اندازه

ناپایدار منبسط و سپس به سرعت متلاشی می‌شوند. تأثیرات پدیده کاویتاسیون بر سیال را می‌توان به صورت زیر بیان نمود (مهردادی و همکاران، ۱۳۹۱):

- تنش برشی هیدرودینامیکی بسیار زیاد که موجب تخریب مکانیکی ترکیب‌ها می‌شود؛
- پیش‌برد واکنش‌های شیمیایی به دلیل فشار زیاد و حرارت موضعی بسیار زیاد (حدود ۴۵۰۰ درجه سانتی‌گراد).

مکانیسم دیگری که هنگام پرتوافکنی فراصوت در محیط رخ می‌دهد، جریان صوتی است، جریان‌های صوتی در سطح مشترک جامد-مایع، هنگامی که سطح مشترک جامد با لرزش‌های منظم مرتعش می‌شود، ایجاد می‌شوند. مزیت اصلی جریان‌های صوتی می‌تواند اختلاط بهتر در محیط آبی باشد که موجب توزیع انرژی فراصوت به صورت یکنواخت در کل حجم پالپ شده، همچنین توزیع حرارت را تسریع می‌کند (مهردادی و همکاران، ۱۳۹۱).

می‌توان دو عامل کلیدی را به عنوان مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر عملکرد پرتوافکنی فراصوت در نظر گرفت که عبارتند از: فرکانس دستگاه و توان اعمال‌شده توسط دستگاه.

به منظور بررسی رابطه بین فرکانس و ابعاد حباب کاویتاسیون معادله ۲-۴ توسط یانگ^۱ ارائه شده است (Young, 1989).

$$R_{CB} = \sqrt{\frac{3 * \phi * P_{Air}}{\rho_{Water} * \omega^2}} \quad (2-4)$$

که در آن:

R_{CB} : شعاع حباب کاویتاسیون (متر)؛

ϕ : ضریب گرمایی ویژه گاز درون حباب (برای هوا در ۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۱/۴۱)؛

P_{Air} و ρ_{water} : به ترتیب فشار هوا و چگالی آب؛

^۱ Young

0: فرکانس زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه).

در نتیجه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار اتمسفر، رابطه بین فرکانس دستگاه و شعاع حباب کاویتاسیون از معادله ۳-۴ قابل محاسبه است (Young, 1989).

$$R_{CB} = \frac{0.328}{f} \quad (3-4)$$

که در آن f فرکانس بر حسب هرتز است.

بنابراین، در یک توان خروجی ثابت، هر چه فرکانس دستگاه فراصوت افزایش یابد ابعاد حباب‌های کاویتاسیون کوچک‌تر شده و در نتیجه فروپاشی، انرژی کم‌تری را در مقایسه با حباب‌های بزرگ تولید می‌نماید (حقی، ۱۳۹۵). در توجیه این پدیده می‌توان اظهار داشت که در فرکانس‌های پایین، طول موج بزرگ‌تر بوده و در نتیجه حباب‌های کاویتاسیون زمان بیشتری برای رشد داشته و قبل از فروپاشی به میزان بیشتری بزرگ می‌شوند و سطح انرژی بالایی ایجاد می‌کنند (Young, 1989).

حذف آلاینده از سطح ذرات نیاز به انرژی کافی و همچنین زاویه برخورد مناسب کاویتاسیون دارد (Ctgclean Website, 2017). با وجود آن‌که انرژی آزاد شده حاصل از فروپاشی حباب‌های کاویتاسیون درشت بیشتر است، این انرژی در مسیر سیال، حد فاصل بین محل فروپاشی حباب کاویتاسیون و محل تماس با ذره، تا حدی مستهلک خواهد شد و ممکن است زاویه برخورد نیز مؤثر نباشد. از طرف دیگر، حباب‌های کاویتاسیون ریزتر هر چند که انرژی کم‌تری آزاد می‌کند، اما در زاویه مناسب‌تری با ذره برخورد کرده و این برخورد می‌تواند جهت شکستن پیوندهای ضعیف‌تر آلاینده در ذره کوچک‌تر به طور مؤثرتری عمل کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که برای تحت تأثیر قرار دادن ذرات ریزتر، فرکانس بالاتر و برای تحت تأثیر قرار دادن ذرات درشت‌تر بهتر است از فرکانس پایین‌تر استفاده نمود (حقی، ۱۳۹۵).

۴-۲-۲ بررسی عملکرد فراصوت بر پارامترهای عملیاتی

شکل ۴-۷ (الف)، تأثیر امواج فراصوت بر روی بازیابی در مقدار کلکتورهای ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ گرم بر تن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که، با افزایش مقدار کلکتور، بازیابی افزایش می‌یابد و استفاده از

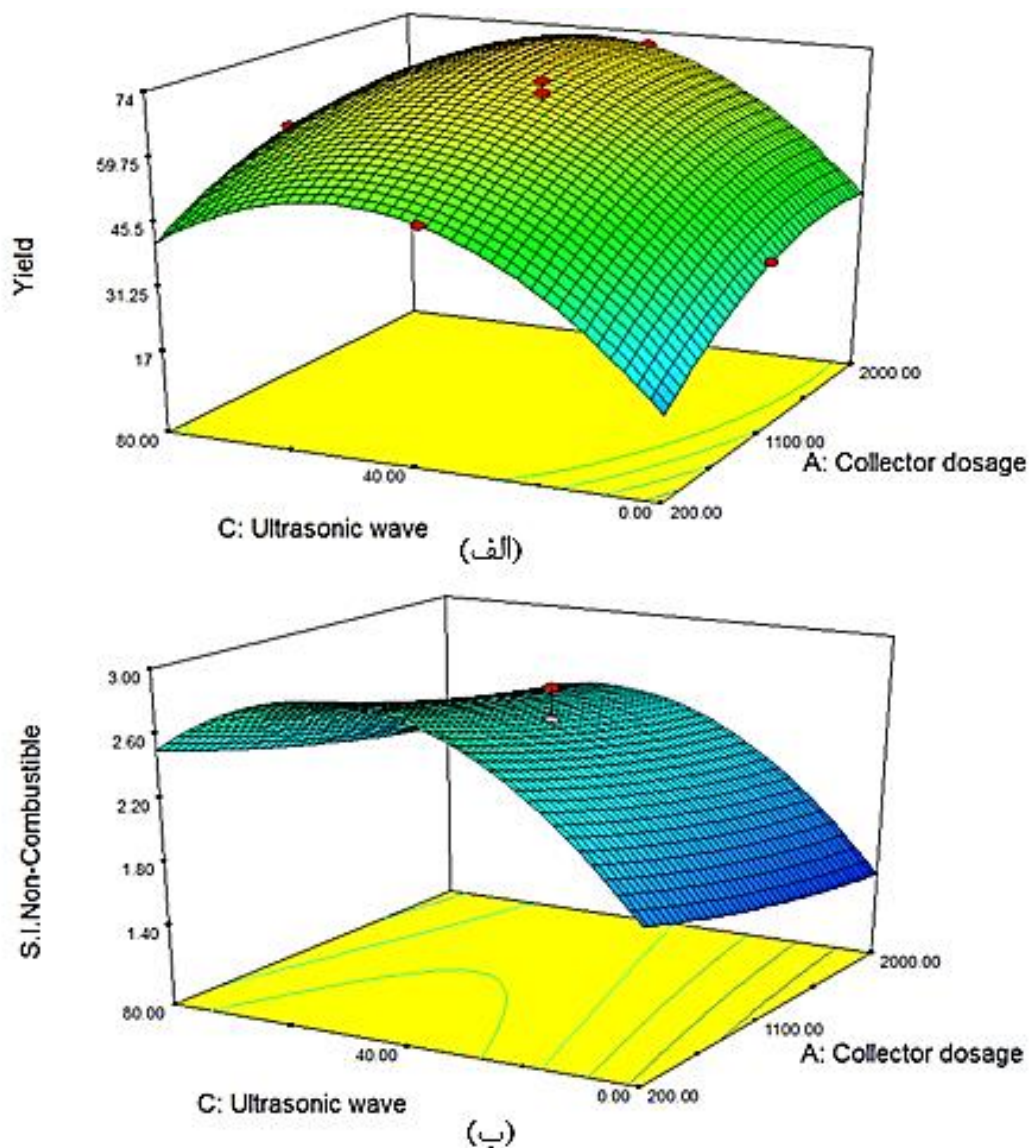
امواج فراصوت نیز بازیابی را بهبود می‌بخشد، به طوری که بازیابی با استفاده از این امواج بیش از ۳۰ درصد افزایش یافته است. بیشترین مقدار بازیابی در طول موج ۳۷ کیلوهرتز به دست می‌آید. با توجه به شکل ۴-۷ (ب)، شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر نیز با استفاده از امواج فراصوت افزایش یافته که نشان دهنده تمیز شدن سطح ذرات و عملکرد بهتر کلکتور است، که بیان‌گر این است که در طول موج ۳۷ کیلوهرتز سطح به شکل بهتری تمیز شده است. می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از امواج فراصوت صرفه‌جویی قابل توجهی در میزان کلکتور مصرفی می‌نماید.

شکل ۴-۸ (الف) و (ب)، به ترتیب تأثیر امواج فراصوت بر روی بازیابی و بازیابی مواد سوختنی در مقدار کف‌ساز ۵۰ تا ۲۰۰ گرم بر تن را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار کف‌ساز به دلیل پایداری و کوچک شدن ابعاد حباب، بازیابی و بازیابی مواد سوختنی افزایش پیدا کرده است. میزان تأثیر افزایش مقدار کف‌ساز با استفاده از امواج فراصوت، افزایش بیش از ۳۰ و ۲۰ درصدی در بازیابی و افزایش ۲۵ و ۱۰ درصدی در بازیابی مواد سوختنی به ترتیب در امواج ۳۷ و ۸۰ کیلوهرتز موجب می‌شود، که این امر نشان دهنده پایداری بیشتر حباب‌های کاویتاسیون ریز تولید شده در حضور امواج و افزایش غلظت این حباب‌ها در مایع و پاکسازی سطح ذرات است. می‌توان نتیجه گرفت که مانند کلکتور، با استفاده از امواج فراصوت در مقدار کف‌ساز مصرفی صرفه‌جویی می‌شود.

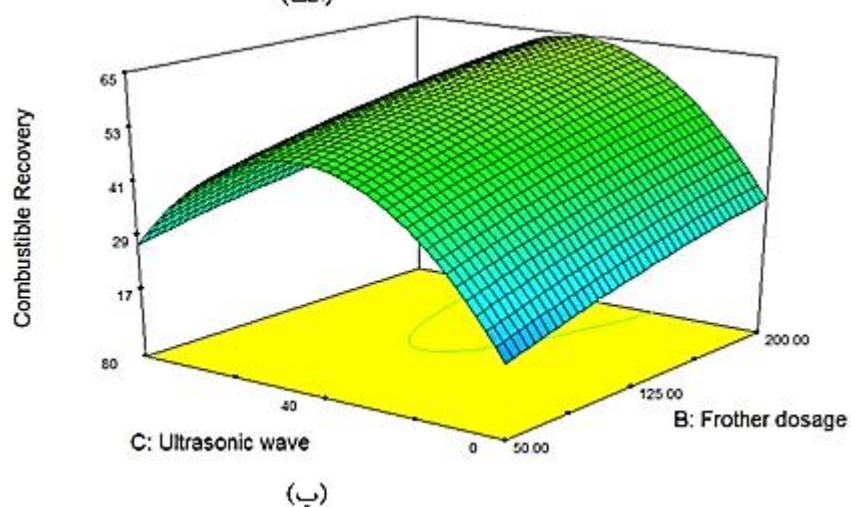
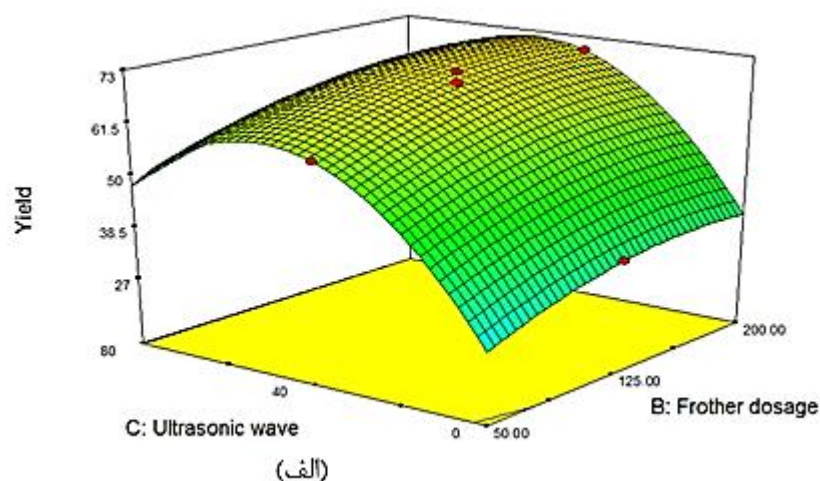
با توجه به شکل ۴-۹، با کاهش طول امواج فراصوت، بازیابی ذرات در ابعاد مختلف افزایش می‌یابد. این بهبود بازیابی در ذرات درشت بیش از ۳۵ درصد بوده که با کاهش ابعاد، این مقدار تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. انتظار می‌رود با کاهش بیشتر طول امواج، بازیابی ذرات ریز بهبود بیشتری یابد.

شکل ۴-۱۰ نشان می‌دهد که استفاده از امواج فراصوت، سبب بهبود بازیابی مواد سوختنی در درصد خاکسترها مختلف شده و شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر نیز افزایش یافته است، که نشان از تمیز شدن سطح ذرات دارد. همان‌طور که در قسمت (الف) مشاهده می‌شود، مقدار بازیابی ماده سوختنی در درصد خاکستر کم خوراک حدود ۱۵ درصد، در خاکستر متوسط خوراک ۲۰ درصد و

خاکستر زیاد خوراک حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است و قسمت (ب) بیان گر بیشترین تاثیر انتخاب پذیری خاکستر در خوراک با خاکستر زیاد است.

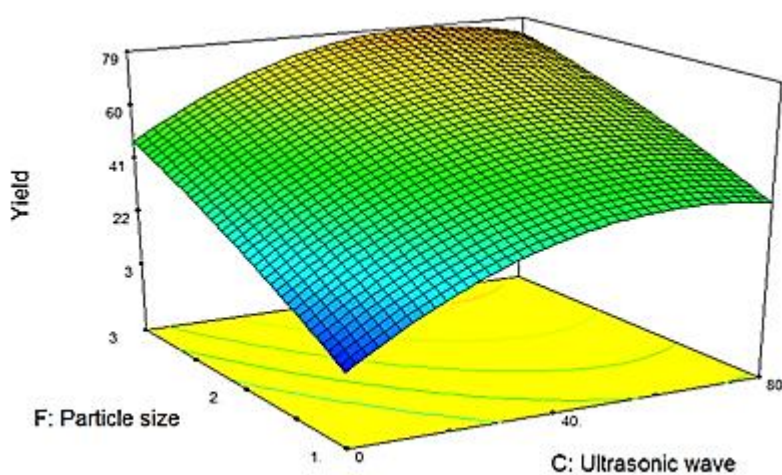


شکل ۴-۷: تأثیر هم زمان فراصوت و مقدار کلکتور بر بازیابی (%) (الف)، شاخص انتخاب پذیری خاکستر (ب) در مقدار کلکتور (گرم بر تن) و موج فراصوت (کیلوهرتز).

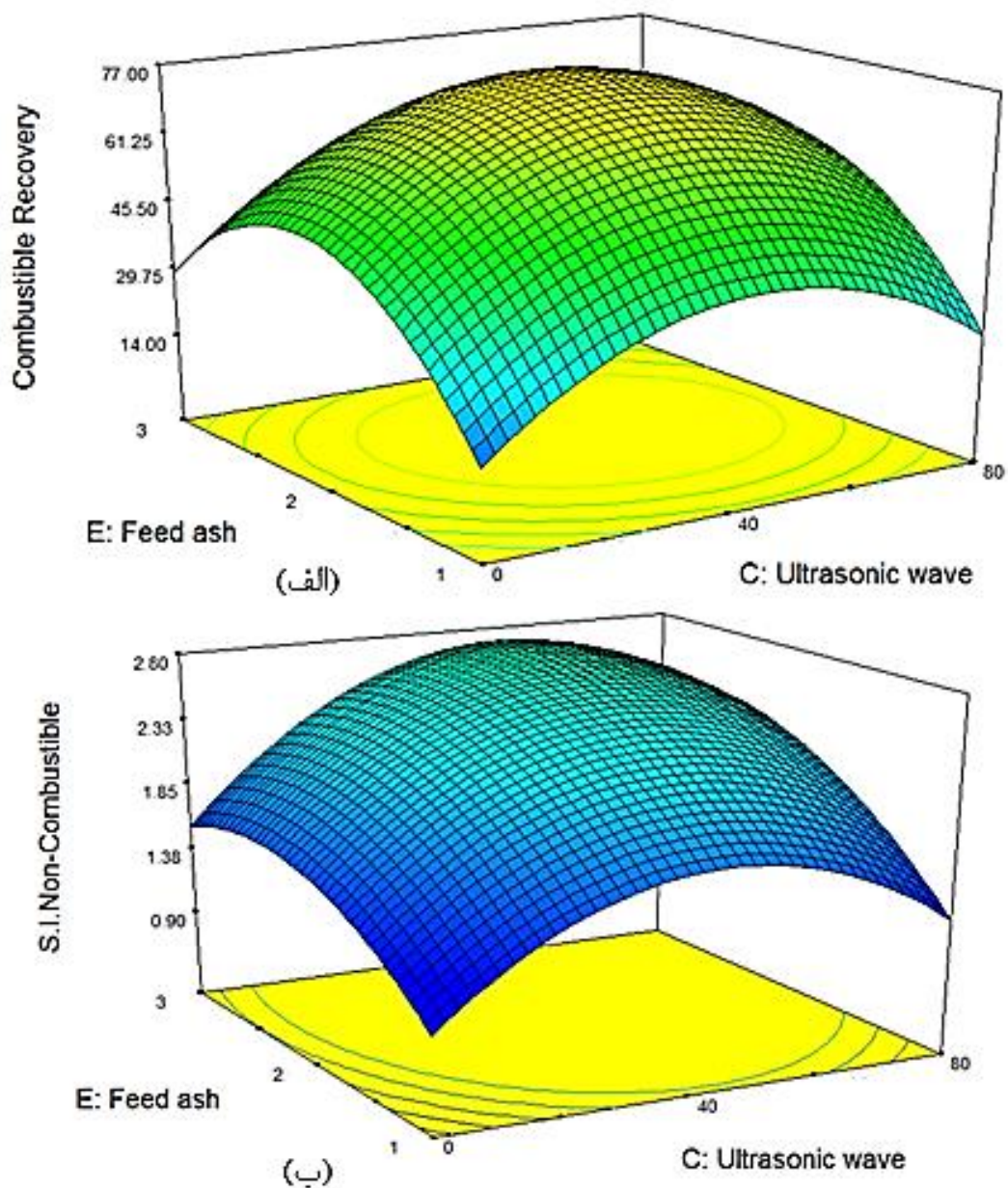


شکل ۴-۸: تأثیر هم‌زمان فراصوت و مقدار کف‌ساز بر بازیابی (%) (الف)، بازیابی مواد سوختی (ب)

در مقدار کف‌ساز (گرم بر تن) و موج فراصوت (کیلوهرتز).



شکل ۴-۹: تأثیر هم‌زمان امواج فراصوت و اندازه ذرات (میکرون) بر بازیابی (%). در اندازه ذرات: ۱: درشت (۸۰۰ - ۴۰۰ + میکرون)، ۲: متوسط (۴۰۰ - ۱۰۰ + میکرون)، ۳: ریز (۱۰۰ - میکرون) و موج فراصوت (کیلوهرتز).

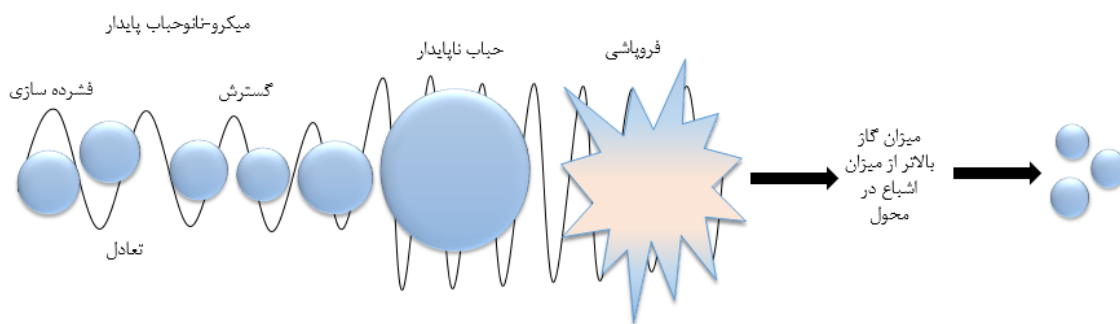


شکل ۴-۱۰: تأثیر هم‌زمان امواج فراصوت و خاکستر خوراک (%) بر بازیابی مواد سوختنی (%) (الف) و شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر در خاکستر خوراک: ۱ (کم)، ۲ (متوسط)، ۳ (زیاد) و موج فراصوت (کیلوهرتز).

۴-۴-۳ بررسی عملکرد محلول میکرو-نانوحباب و امواج فراصوت

شکل ۴-۱۱ بیان‌کننده اثر موج فراصوت بر محلول حاوی میکرو-نانوحباب‌ها است. این امواج در گام اول سبب ناپایداری میکرو-نانوحباب‌ها می‌شود. در گام دوم میکرو-نانوحباب ناپایدار شده، افزایش حجم داده و به مرحله فروپاشی می‌رسد. در گام سوم گاز درون حباب وارد محلول شده و به دلیل

بالتر بودن میزان گاز از حد اشباع مایع، در گام نهایی حباب‌های ریزتر از همان گاز تشکیل می‌شود. فروپاشی با آزادسازی انرژی، سبب تمیزشدن سطح ذرات می‌شود؛ غلظت حباب‌های ریز در پالپ افزایش می‌یابد؛ این دو عامل موجب بهبود عملکرد فلوئتاسیون می‌شود. در شکل ۴-۱۲ مشهود است که استفاده هم‌زمان میکرو-نانوحباب و فراصوت تأثیر مثبت بر فلوئتاسیون زغال سنگ دارد. می‌توان مشاهده کرد که، حضور هم‌زمان میکرو-نانوحباب در طول موج ۳۷ کیلوهرتز بازیابی ماده سوختنی حدود ۳۵ درصد و حدود ۲۵ درصد در طول موج ۸۰ کیلوهرتز نسبت به فلوئتاسیون در حضور میکرو-نانوحباب تنها، افزایش می‌دهد. خاکستر محصول نیز در به کارگیری هم‌زمان میکرو-نانوحباب و امواج فراصوت کاهش پیدا می‌کند.



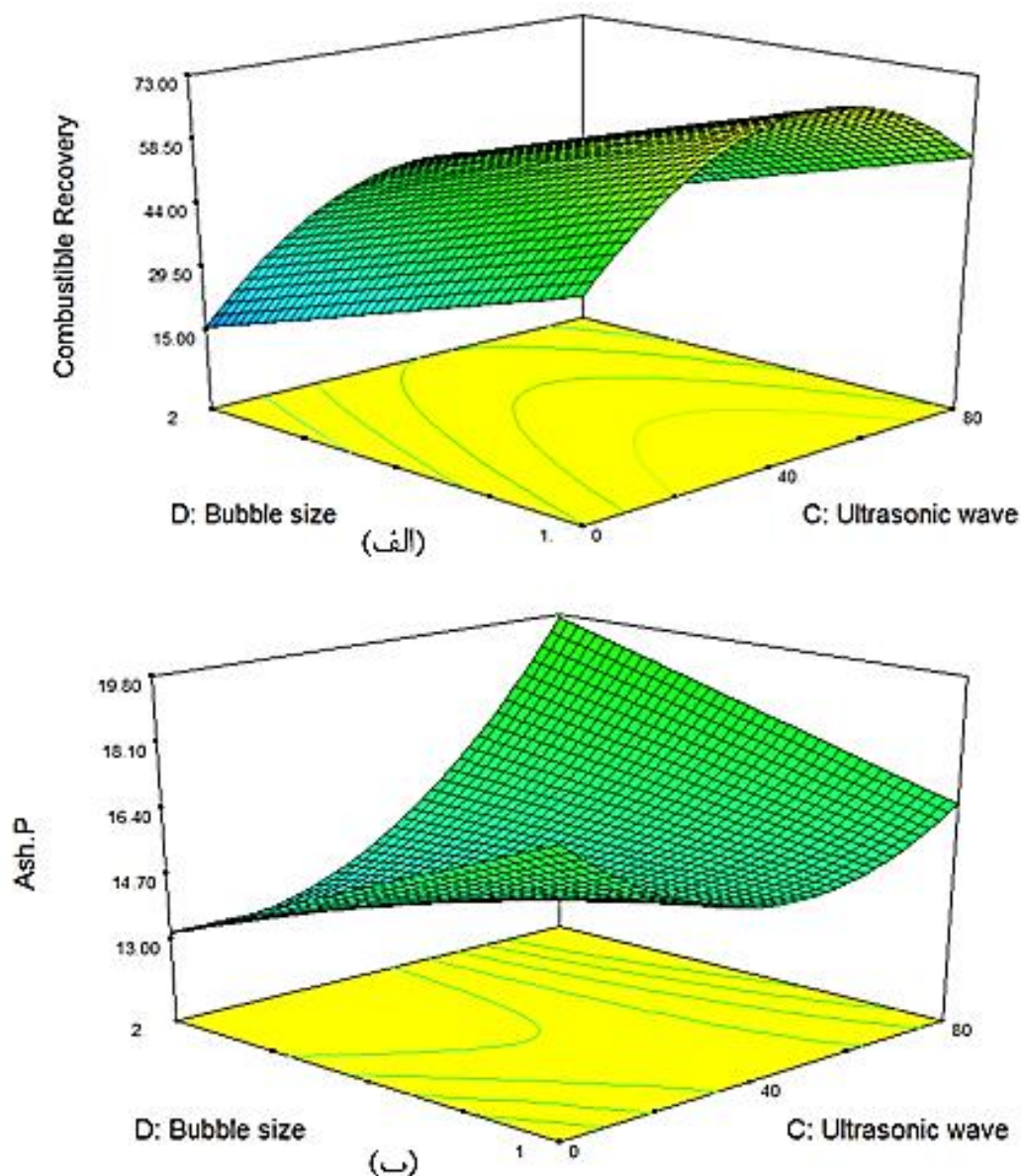
شکل ۴-۱۱: اثر موج فراصوت بر محلول حاوی میکرو-نانوحباب.

۴-۵ بررسی سینتیک فلوئتاسیون

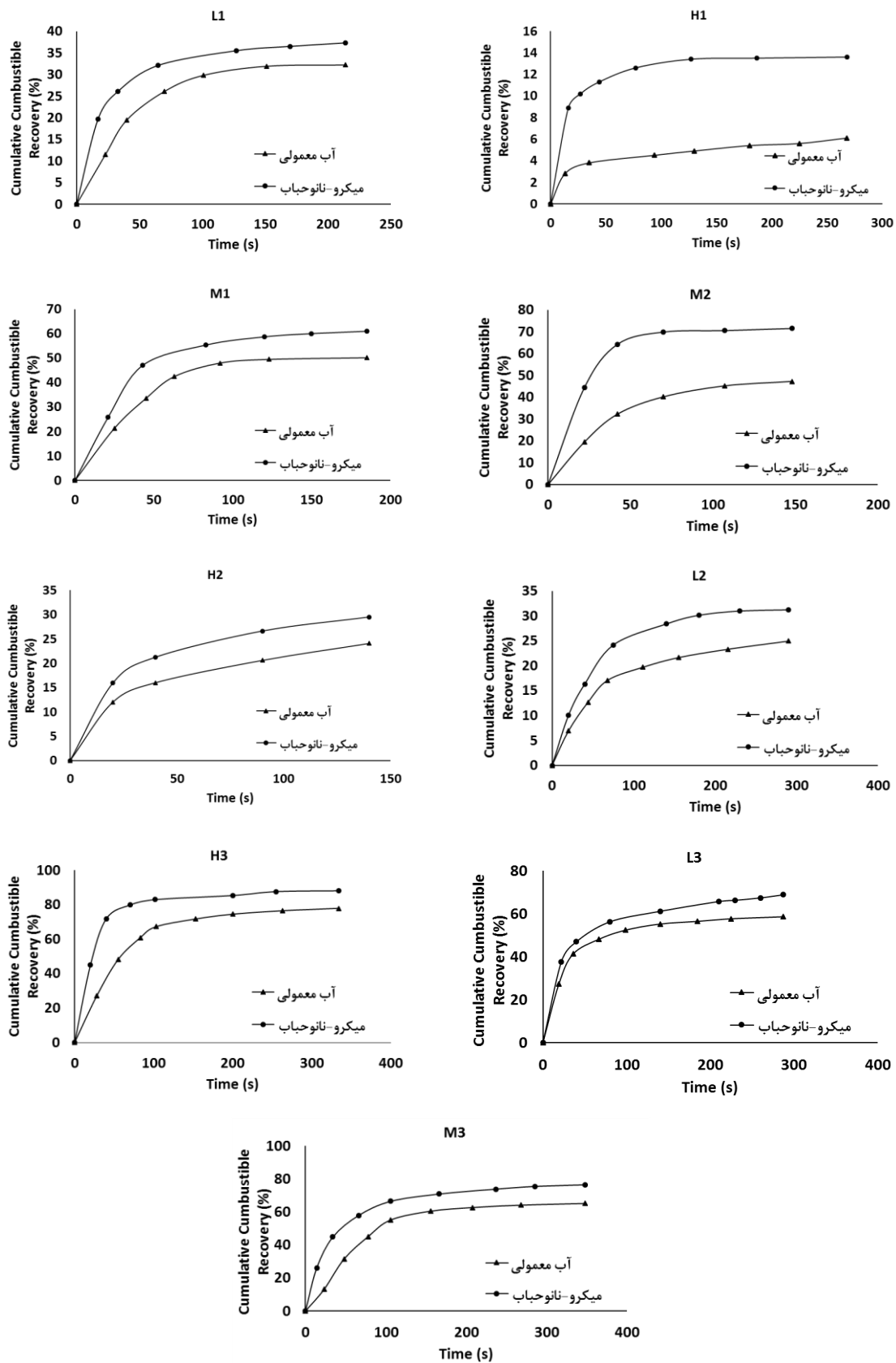
نتیجه‌های حاصل از استفاده محلول میکرو-نانوحباب و آب معمولی در فلوئتاسیون زغال سنگ روی بازیابی تجمعی ماده سوختنی در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارهای شکل ۴-۱۳ مشاهده می‌شود، حضور میکرو-نانوحباب باعث افزایش بازیابی ماده سوختنی شده است، همچنین از شیب ابتدایی نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که حضور میکرو-نانوحباب موجب افزایش سرعت فرآیند فلوئتاسیون می‌شود.

بازیابی تجمعی ماده سوختنی برای هر آزمایش سینتیک با استفاده از نرم‌افزار اکسل و ابزار حل‌کننده موجود در آن و به کارگیری روش کمینه‌سازی تفاضل مربعات، بر روی مدل سینتیکی فلوئتاسیون (معادله‌های ۳-۹، ۳-۱۰، ۳-۱۱ و ۳-۱۲) برازش شد و نرخ شناورسازی (k)، بازیابی بعد از

زمان بی‌نهایت (R_{∞})، ضریب همبستگی مدل (R^2) و مربع حدفاصل بازیابی ($(R_m - R_c)^2$) اندازه‌گیری و بازیابی مدل‌سازی شده، محاسبه شد. نتایج آن‌ها در جدول ۴-۴ تا جدول ۷-۴ ارائه شده است.



شکل ۴-۱۲: تأثیر هم‌زمان محلول میکرو-نانوحباب و امواج فراصوت بر بازیابی مواد سوختنی (الف) و خاکستر محصول (ب)؛ اندازه حباب: ۱ (محلول میکرو-نانوحباب)، ۲ (حباب معمولی) و موج فراصوت (کیلوهرتز).



شکل ۴-۱۳: نمودارهای بازیابی تجمعی ماده سوختنی در آزمایش‌های سینتیک فلو تاسیون.

جدول ۴-۴: نتایج حاصل از برآزش مدل ۱ در آزمایش‌های سینتیک فلو تاسیون.

نوع آب	اندازه ذرات	درصد خاکستر	پارامترهای مدل ۱			
			k_1	R_∞	R^2	$(R_m - R_c)^2$
میکرو-نانوحباب	۸۰۰-۴۰۰ میکرون	٪ ۱۴	۰/۰۴۱۰	۳۶/۱۳	۰/۹۸۷۸	۰/۰۰۰۶
		٪ ۳۴	۰/۰۲۹۹	۶۰/۸۶	۰/۹۹۱۷	۰/۰۰۱۶
		٪ ۳۹	۰/۰۵۹۶	۱۳/۱۵	۰/۹۵۳۰	۰/۰۰۰۲
	۴۰۰-۱۰۰ میکرون	٪ ۱۲	۰/۰۱۸۹	۳۱/۱۵	۰/۹۹۸۹	۰/۰۰۰۷
		٪ ۲۸	۰/۰۴۶۶	۷۱/۹۶	۰/۹۹۰۷	۰/۰۰۱۱
		٪ ۴۰	۰/۰۳۶۷	۲۸/۶۳	۰/۹۸۴۵	۰/۰۰۰۳
	۱۰۰- میکرون	٪ ۱۲	۰/۰۳۶۸	۶۵/۹۰	۰/۹۷۸۶	۰/۰۰۵۹
		٪ ۲۵	۰/۰۲۶۱	۷۳/۷۶	۰/۹۹۶۷	۰/۰۰۴۲
		٪ ۳۴	۰/۰۳۹۶	۸۶/۱۴	۰/۹۹۱۸	۰/۰۰۲۷
آب معمولی	۸۰۰-۴۰۰ میکرون	٪ ۱۴	۰/۰۲۱۳	۳۳/۱۲	۰/۹۹۷۸	۰/۰۰۰۲
		٪ ۳۴	۰/۰۲۳۶	۵۲/۲۵	۰/۹۹۸۱	۰/۰۰۱۳
		٪ ۳۹	۰/۰۴۲۷	۵/۳۱	۰/۹۸۲۸	۰/۰۰۰۱
	۴۰۰-۱۰۰ میکرون	٪ ۱۲	۰/۰۱۶۵	۲۴/۲۱	۰/۹۹۵۲	۰/۰۰۰۲
		٪ ۲۸	۰/۰۲۴۶	۴۸/۶۸	۰/۹۹۸۳	۰/۰۰۰۱
		٪ ۴۰	۰/۰۳۱۵	۲۳/۱۹	۰/۹۷۵۱	۰/۰۰۰۴
	۱۰۰- میکرون	٪ ۱۲	۰/۰۳۳۴	۵۶/۵۶	۰/۹۹۳۵	۰/۰۰۱۹
		٪ ۲۵	۰/۰۱۳۹	۶۶/۷۴	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۴۷
		٪ ۳۴	۰/۰۱۷۴	۷۷/۷۵	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۱۷

جدول ۴-۵: نتایج حاصل از برآزش مدل ۲ در آزمایش‌های سینتیک فلو تاسیون.

نوع آب	اندازه ذرات	درصد خاکستر	پارامترهای مدل ۲			
			k_2	R_∞	R^2	$(R_m - R_c)^2$
میکرو-نانوحباب	۸۰۰-۴۰۰ میکرون	٪ ۱۴	۰/۰۹۰۶	۳۸/۹۷	۰/۹۹۸۵	۰/۰۰۰۰۷
		٪ ۳۴	۰/۰۵۹۵	۶۸/۱۳	۰/۹۸۶۵	۰/۰۰۲۶
		٪ ۳۹	۰/۱۴۵۶	۱۳/۹۰	۰/۹۸۶۵	۰/۰۰۰۰۴
	۴۰۰-۱۰۰ میکرون	٪ ۱۲	۰/۰۳۷۳	۳۴/۹۸	۰/۹۹۸۶	۰/۰۰۰۱
		٪ ۲۸	۰/۱۰۱۲	۷۸/۸۰	۰/۹۶۹۷	۰/۰۰۳۱
		٪ ۴۰	۰/۰۷۴۷	۳۱/۹۱	۰/۹۹۴۱	۰/۰۰۰۱
	۱۰۰- میکرون	٪ ۱۲	۰/۰۸۳۸	۷۰/۸۰	۰/۹۹۱۳	۰/۰۰۱۴
		٪ ۲۵	۰/۰۵۷۲	۷۹/۷۹	۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۰۴
		٪ ۳۴	۰/۰۹۱۲	۹۱/۷۵	۰/۹۷۹۳	۰/۰۰۵۲

ادامه جدول ۴-۵.

۰/۰۰۰۶	۰/۹۹۸۱	۳۷/۷۷	۰/۰۴۰۷	% ۱۴	۸۰۰-۴۰۰ میکرون	آب معمولی
۰/۰۰۲۵	۰/۹۹۷۷	۵۹/۸۰	۰/۰۴۵۱	% ۳۴		
۰/۰۰۰۳	۰/۹۸۰۰	۴/۷۵	۰/۱۵۹۵	% ۳۹		
۰/۰۰۰۱۱	۰/۹۹۶۰	۲۷/۴۵	۰/۰۳۲۰	% ۱۲	۴۰۰-۱۰۰ میکرون	
۰/۰۰۳۱	۰/۹۹۹۹	۵۰/۹۰	۰/۰۶۷۰	% ۲۸		
۰/۰۰۰۲	۰/۹۸۵۱	۲۶/۱۵	۰/۰۶۲۴	% ۴۰		
۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۴۸	۶۰/۹۶	۰/۰۷۴۳	% ۱۲	۱۰۰- میکرون	
۰/۰۰۳۲	۰/۹۹۹۱	۶۴/۶۷	۰/۰۱۸۳	% ۲۵		
۰/۰۰۲۲	۰/۹۹۹۷	۹۵/۵۲	۰/۰۲۸۹	% ۳۴		

جدول ۴-۶: نتایج حاصل از برازش مدل ۳ در آزمایش‌های سینتیک فلو تاسیون.

پارامترهای مدل ۳				درصد خاکستر	اندازه ذرات	نوع آب
$(R_m-R_c)^2$	R^2	R_{∞}	k_3			
۰/۰۰۰۰۱	۰/۹۹۹۶	۴۰/۴۹	۰/۱۳۷۹	٪ ۱۴	۸۰۰-۴۰۰ میکرون	میکرو-نانوحباب
۰/۰۰۴۱	۰/۹۷۷۸	۷۲/۷۶	۰/۰۴۶۱	٪ ۳۴		
۰/۰۰۰۰۱۷	۰/۹۹۴۸	۱۴/۲۱	۰/۶۹۴۳	٪ ۳۹		
۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۶۷	۳۷/۶۷	۰/۰۵۴۱	٪ ۱۲	۴۰۰-۱۰۰ میکرون	
۰/۰۰۴۸	۰/۹۵۲۸	۸۱/۷۰	۰/۰۷۹۸	٪ ۲۸		
۰/۰۰۰۰۳	۰/۹۹۸۲	۳۴/۰۳	۰/۱۲۵۱	٪ ۴۰		
۰/۰۰۰۴	۰/۹۹۶۸	۷۳/۳۱	۰/۰۷۱۷	٪ ۱۲	۱۰۰- میکرون	
۰/۰۰۰۲	۰/۹۹۹۴	۸۳/۴۱	۰/۰۴۰۷	٪ ۲۵		
۰/۰۰۹۴	۰/۹۶۴۴	۹۴/۰۳	۰/۰۶۴۱	٪ ۳۴		
۰/۰۰۱۱	۰/۹۹۷۵	۴۱/۱۷	۰/۰۵۲۹	٪ ۱۴	۸۰۰-۴۰۰ میکرون	آب معمولی
۰/۰۰۳۹	۰/۹۹۷۰	۶۵/۰۴	۰/۰۳۷۶	٪ ۳۴		
۰/۰۰۰۰۷	۰/۹۹۴۶	۵/۹۴	۰/۹۱۵۸	٪ ۳۹		
۰/۰۰۰۱۶	۰/۹۹۵۴	۲۹/۹۴	۰/۰۵۷۰	٪ ۱۲	۴۰۰-۱۰۰ میکرون	
۰/۰۱۷۱	۰/۹۹۹۵	۴۴/۶۸	۰/۱۹۹۶	٪ ۲۸		
۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۱۸	۲۸/۲۹	۰/۱۲۰۵	٪ ۴۰		
۰/۰۰۰۸	۰/۹۹۲۲	۶۳/۷۳	۰/۰۷۰۵	٪ ۱۲	۱۰۰- میکرون	
۰/۰۱۱۹	۰/۹۸۹۶	۸۳/۲۶	۰/۰۱۶۸	٪ ۲۵		
۰/۰۰۸۳	۰/۹۹۹۹	۹۳/۰۷	۰/۰۲۱۲	٪ ۳۴		

جدول ۴-۷: نتایج حاصل از برازش مدل ۴ در آزمایش‌های سینتیک فلوتاسیون.

نوع آب	اندازه ذرات	درصد خاکستر	پارامترهای مدل ۴			
			k_4	R_{∞}	R^2	$(R_m - R_c)^2$
میکرو-نانوحباب	۸۰۰-۴۰۰ میکرون	۱۴٪	۰/۱۲۷۶	۴۲/۸۸	۰/۹۹۸۱	۰/۰۰۰۰۹
		۳۴٪	۰/۰۷۰۱	۷۹/۱۹	۰/۹۷۱۹	۰/۰۰۵۱
		۳۹٪	۰/۲۵۳۴	۱۴/۷۳	۰/۹۹۶۹	۰/۰۰۰۰۱۹
	۴۰۰-۱۰۰ میکرون	۱۲٪	۰/۰۴۱۳	۴۱/۳۴	۰/۹۹۵۱	۰/۰۰۰۰۷
		۲۸٪	۰/۱۵۳۲	۸۶/۴۵	۰/۹۴۱۱	۰/۰۰۵۹
		۴۰٪	۰/۰۹۰۰	۳۶/۹۴	۰/۹۹۹۴	۰/۰۰۰۰۱
	۱۰۰- میکرون	۱۲٪	۰/۱۲۳۳	۷۷/۲۵	۰/۹۹۸۰	۰/۰۰۰۰۳
		۲۵٪	۰/۰۷۴۷	۸۹/۰۰	۰/۹۹۸۱	۰/۰۰۱۱
		۳۴٪	۰/۱۴۸۴	۹۸/۱۱	۰/۹۵۳۰	۰/۰۱۲۹
آب معمولی	۸۰۰-۴۰۰ میکرون	۱۴٪	۰/۰۴۳۴	۴۵/۵۹	۰/۹۹۶۹	۰/۰۰۱۵
		۳۴٪	۰/۰۴۹۴	۷۱/۸۶	۰/۹۹۶۵	۰/۰۰۴۷
		۳۹٪	۰/۱۲۱۴	۶/۳۰	۰/۹۹۶۰	۰/۰۰۰۰۵
	۴۰۰-۱۰۰ میکرون	۱۲٪	۰/۰۳۳۹	۳۳/۱۶	۰/۹۹۵۰	۰/۰۰۰۰۲
		۲۸٪	۰/۰۶۰۰	۶۰/۹۹	۰/۹۹۶۴	۰/۰۰۳۳
		۴۰٪	۰/۰۶۹۴	۳۱/۰۸	۰/۹۹۴۴	۰/۰۰۰۰۹
	۱۰۰- میکرون	۱۲٪	۰/۱۰۲۴	۶۷/۵۸	۰/۹۹۰۶	۰/۰۰۱۵
		۲۵٪	۰/۰۲۷۴	۹۲/۵۴	۰/۹۷۹۶	۰/۰۱۴۵
		۳۴٪	۰/۰۴۱۳	۸۹/۶۵	۰/۹۹۹۹	۰/۰۱۱۱

به منظور انتخاب بهترین مدل برازش برای داده‌های سینتیکی چند مرحله به صورت سیستماتیک

انجام می‌شود که در ادامه این مراحل بیان می‌شود.

۱. مدلی که دارای ضریب همبستگی بالاتری است مدل برتر است.

۲. دو مدل با ضریب همبستگی نزدیک، از طریق مجموع مربعات خطا مقایسه می‌شوند. مدل با

خطای کمتر مدل برتر است.

بهترین بزارش برای هر یک از آزمایش‌های سینتیکی در جدول ۴-۸ ارائه شده است. می‌توان

مشاهده کرد در حضور میکرو-نانوحباب‌ها نرخ ثابت سینتیک بهبود یافته است. نتایج مربوط به میزان

تأثیر میکرو-نانوحباب‌ها بر سینتیک فلوتاسیون (سهم تأثیر) به صورت کیفی در جدول ۴-۹ بیان شده

است. در این جدول شماره ۱ بیشترین تغییر و شماره ۹ کم‌ترین تغییر در نرخ سینتیک را نمایندگی

می‌کند.

جدول ۴-۸: انتخاب برازش برای هر یک از مدل‌های سینتیکی.

نوع آب	اندازه ذرات	درصد خاکستر	شماره مدل	k	R _∞
میکرو-نانوحباب	۸۰۰-۴۰۰ میکرون	٪ ۱۴	۳	۰/۱۳۷۹	۴۰/۴۹
		٪ ۳۴	۱	۰/۰۲۹۹	۶۰/۸۶
		٪ ۳۹	۳	۰/۶۹۴۳	۱۴/۲۱
	۴۰۰-۱۰۰ میکرون	٪ ۱۲	۲	۰/۰۳۷۳	۳۴/۹۸
		٪ ۲۸	۱	۰/۰۴۶۶	۷۱/۹۶
		٪ ۴۰	۴	۰/۰۹۰۰	۳۶/۹۴
	۱۰۰- میکرون	٪ ۱۲	۴	۰/۱۲۳۳	۷۷/۲۵
		٪ ۲۵	۳	۰/۰۴۰۷	۸۳/۴۱
		٪ ۳۴	۱	۰/۰۳۹۶	۸۶/۱۴
آب معمولی	۸۰۰-۴۰۰ میکرون	٪ ۱۴	۱	۰/۰۲۱۳	۳۳/۱۲
		٪ ۳۴	۱	۰/۰۲۳۶	۵۲/۲۵
		٪ ۳۹	۴	۰/۱۲۱۴	۶/۳۰
	۴۰۰-۱۰۰ میکرون	٪ ۱۲	۲	۰/۰۳۲۰	۲۷/۴۵
		٪ ۲۸	۱	۰/۰۲۴۶	۴۸/۶۸
		٪ ۴۰	۴	۰/۰۶۹۴	۳۱/۰۸
	۱۰۰- میکرون	٪ ۱۲	۲	۰/۰۷۴۳	۶۰/۹۶
		٪ ۲۵	۲	۰/۰۱۸۳	۶۴/۶۷
		٪ ۳۴	۱	۰/۰۱۷۴	۷۷/۷۵

جدول ۴-۹: سهم تأثیر تغییر نرخ ثابت فلوتاسیون در حضور میکرو-نانوحباب‌ها.

نمونه زغال سنگ									
دامنه ابعادی (میکرون)			۸۰۰-۴۰۰			۴۰۰-۱۰۰			۱۰۰-
۱۴	۳۴	۳۹	۱۲	۲۸	۴۰	۱۲	۲۵	۳۴	
درصد خاکستر (٪)									
۱	۷	۲	۹	۵	۸	۶	۴	۳	
سهم تأثیر									

۴-۶ جمع‌بندی

در این فصل پس از ارائه مقدار خاکستر موجود در کنسانتره و باطله آزمایش‌ها با استفاده از شاخص‌های فرآیندی به بررسی عملکرد میکرو-نانوحباب و امواج فراصوت پرداخته شد و سپس نتایج سینتیک در حضور و عدم حضور میکرو-نانوحباب بررسی و چهار مدل بر روی داده‌های سینتیک

برآزش شد. مهم‌ترین نتایج این فصل را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

۱. محلول میکرو-نانوحباب بازیابی را بیشتر از ۴۰ و ۱۵ درصد به ترتیب در مقدار کلکتور ۲۰۰ و ۲۰۰۰ گرم بر تن افزایش داده، در حالی که بیشترین بازیابی در عدم حضور میکرو-نانوحباب‌ها ۷۲٪ و در مقدار کلکتور ۲۰۰۰ گرم بر تن است. شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر با افزایش کلکتور در عدم حضور میکرو-نانوحباب افزایش پیدا کرده است. در حالی که، در حضور میکرو-نانوحباب در مقدار کلکتور ۲۰۰ گرم بر تن، شاخص انتخاب‌پذیری بیشتر از عدم حضور میکرو-نانوحباب است و با افزایش مقدار کلکتور این شاخص کاهش پیدا می‌کند، که این امر بیان‌گر کاهش انتخاب‌پذیری است.
۲. در غیاب میکرو-نانوحباب‌ها بیشترین مقدار بازیابی حدود ۶۲٪ در غلظت ۲۰۰ گرم بر تن کفساز اتفاق می‌افتد، در حالی که، در حضور میکرو-نانوحباب‌ها در غلظت ۵۰ گرم بر تن کفساز، می‌توان به همان بازیابی دست یافت. در حضور میکرو-نانوحباب با غلظت ۲۰۰ گرم بر تن کفساز، بازیابی ۶۵٪ می‌شود.
۳. محلول میکرو-نانوحباب تأثیر قابل قبولی بر بازیابی ذرات در ابعاد مختلف نسبت به عدم حضور میکرو-نانوحباب‌ها دارد، به طوری که می‌توان مشاهده کرد، بازیابی ذرات درشت تا حدود ۱۰ درصد، ذرات متوسط بیش از ۱۰ درصد و ذرات ریز بیش از ۳۰ درصد، بهبود یافته است.
۴. در حضور میکرو-نانوحباب‌ها بازیابی مواد سوختنی در درصد خاکسترها مختلف بهبود پیدا کرده و شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر نیز افزایش یافته است.
۵. با افزایش مقدار کلکتور و استفاده از امواج فراصوت، بازیابی بهبود پیدا کرد، به طوری که بازیابی با استفاده از این امواج بیش از ۳۰ درصد افزایش یافته است. شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر نیز با استفاده از امواج فراصوت افزایش یافته که نشان دهنده تمیز شدن سطح ذرات و عملکرد بهتر کلکتور است.
۶. با افزایش مقدار کفساز به دلیل پایداری و کوچک شدن ابعاد حباب، بازیابی و بازیابی مواد

سوختنی افزایش پیدا کرده است. میزان تأثیر افزایش مقدار کف‌ساز با استفاده از امواج فراصوت، افزایش بیش از ۳۰ و ۲۰ درصدی در بازیابی و افزایش ۲۵ و ۱۰ درصدی در بازیابی مواد سوختنی به ترتیب در امواج ۳۷ و ۸۰ کیلوهرتز موجب می‌شود.

۷. با کاهش طول امواج فراصوت، بازیابی ذرات در ابعاد مختلف افزایش می‌یابد. این بهبود بازیابی در ذرات درشت بیش از ۳۵ درصد بوده که با کاهش ابعاد، این مقدار تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

۸. استفاده از امواج فراصوت، سبب بهبود بازیابی مواد سوختنی در درصد خاکسترها مختلف شده و شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر نیز افزایش یافته است، که نشان از تمیزشدن سطح ذرات دارد.

۹. استفاده هم‌زمان میکرو-نانوحباب و فراصوت تأثیر مثبت بر فلوتاسیون زغال‌سنگ دارد، که علت آن، فروپاشی میکرو-نانوحباب‌ها است که با آزادسازی انرژی و تولید مجدد حباب‌های ریز همراه است. این امر غلظت حباب‌های ریز را در پالپ افزایش داده و سطح ذرات را تمیز می‌کند.

۱۰. آزمایش‌های سینتیک در حضور و عدم حضور میکرو-نانوحباب‌ها نشان داد که میزان بازیابی تجمعی ماده سوختنی در حضور این محلول افزایش یافته است. حضور میکرو-نانوحباب موجب افزایش سرعت فرآیند فلوتاسیون می‌شود.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به بیان نتایج به دست آمده از این تحقیق پرداخته شده است، سپس به پیشنهادهایی برای ادامه تحقیقات در آینده اشاره می‌شود.

۵-۲ نتایج

مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱. حضور میکرو-نانوحباب در فلوئاسیون باعث بهبود بازیابی در تمام ابعاد با درصد خاکستر خوراک متفاوت شد. محلول میکرو-نانوحباب بازیابی را بیشتر از ۴۰ و ۱۵ درصد به ترتیب در مقدار کلکتور ۲۰۰ و ۲۰۰۰ گرم بر تن افزایش داد، در حالی که بیشترین بازیابی در عدم حضور میکرو-نانوحباب‌ها ۷۲٪ و در مقدار کلکتور ۲۰۰۰ گرم بر تن بود، که نشان‌دهنده حضور میکرو-نانوحباب به عنوان کلکتور ثانویه در سطح ذرات آبران بود. این محلول انتخابیت ذرات آبران را در مقدار کلکتور ۲۰۰ گرم بر تن نسبت به عدم حضور میکرو-نانوحباب بهبود بخشید. در این مورد تا ۹۰٪ صرفه‌جویی در مصرف کلکتور مشاهده شد.
۲. افزایش غلظت کف‌ساز باعث کاهش ابعاد حباب و افزایش غلظت حجمی میکرو-نانوحباب در مایع شد. این حباب غلظت مورد نیاز برای کف‌ساز را تا حدود یک چهارم کاهش داد. در غیاب میکرو-نانوحباب‌ها بیشترین مقدار بازیابی حدود ۶۲٪ در غلظت ۲۰۰ گرم بر تن کف‌ساز اتفاق افتاد، در حالی که، در حضور میکرو-نانوحباب‌ها در غلظت ۵۰ گرم بر تن کف‌ساز، می‌توانیم به همان بازیابی دست یابیم.
۳. محلول میکرو-نانوحباب تأثیر قابل قبولی بر بازیابی ذرات در ابعاد مختلف نسبت به عدم حضور میکرو-نانوحباب‌ها داشت، به طوری که، بازیابی ذرات درشت تا حدود ۱۰ درصد، ذرات متوسط بیش از ۱۰ درصد و ذرات ریز بیش از ۳۰ درصد، بهبود یافت.
۴. در حضور میکرو-نانوحباب‌ها بازیابی مواد سوختنی در درصد خاکسترهای مختلف بهبود پیدا کرد و شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر نیز افزایش یافت. مقدار بازیابی ماده سوختنی در درصد خاکستر

خوراک کم بیش از ۱۵ درصد، در خاکستر خوراک متوسط حدود ۵ درصد و خاکستر زیاد حدود ۳ درصد افزایش یافت. بیشترین تأثیر در خوراک با خاکستر زیاد است.

۵. با افزایش مقدار کلکتور، استفاده از امواج فراصوت بازیابی را بهبود بخشید، به طوری که بازیابی با استفاده از این امواج بیش از ۳۰ درصد افزایش یافت. بیشترین مقدار بازیابی در طول موج ۳۷ کیلوهرتز به دست آمد. شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر نیز با استفاده از امواج فراصوت افزایش یافت که نشان دهنده تمیز شدن سطح ذرات و عملکرد بهتر کلکتور بود. می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از امواج فراصوت صرفه‌جویی قابل توجهی در میزان کلکتور مصرفی می‌نماید.

۶. میزان تأثیر افزایش مقدار کف‌ساز با استفاده از امواج فراصوت، افزایش بیش از ۳۰ و ۲۰ درصدی در بازیابی و افزایش ۲۵ و ۱۰ درصدی در بازیابی مواد سوختنی به ترتیب در امواج ۳۷ و ۸۰ کیلوهرتز موجب شد، که این امر نشان دهنده پایداری بیشتر حباب‌های کاویتاسیون ریز تولید شده در حضور امواج و افزایش غلظت این حباب‌ها در مایع و پاکسازی سطح ذرات بود. استفاده از امواج فراصوت باعث صرفه‌جویی در مقدار کف‌ساز مصرفی شد.

۷. با کاهش طول امواج فراصوت، بازیابی ذرات در ابعاد مختلف افزایش یافت. این بهبود بازیابی در ذرات درشت بیش از ۳۵ درصد بود که با کاهش ابعاد، این مقدار تا ۲۵ درصد کاهش یافت. انتظار می‌رود با کاهش بیشتر طول امواج، بازیابی ذرات ریز بهبود بیشتری یابد.

۸. استفاده از امواج فراصوت، سبب بهبود بازیابی مواد سوختنی در درصد خاکسترها مختلف شد و شاخص انتخاب‌پذیری خاکستر نیز افزایش یافت. مقدار بازیابی ماده سوختنی در درصد خاکستر کم خوراک حدود ۱۵ درصد، در خاکستر متوسط خوراک حدود ۲۰ درصد و خاکستر زیاد خوراک حدود ۱۰ درصد افزایش یافت.

۹. استفاده هم‌زمان میکرو-نانوحباب و فراصوت تأثیر مثبت بر فلوتاسیون زغال سنگ داشت. حضور هم‌زمان میکرو-نانوحباب در طول موج ۳۷ کیلوهرتز بازیابی ماده سوختنی حدود ۳۵ درصد و حدود ۲۵ درصد در طول موج ۸۰ کیلوهرتز نسبت به فلوتاسیون در حضور میکرو-نانوحباب تنها،

افزایش داد. خاکستر محصول نیز در به کارگیری هم‌زمان میکرو-نانوحباب و امواج فراصوت کاهش پیدا می‌کند. علت آن، فروپاشی میکرو-نانوحباب‌ها بود که با آزادسازی انرژی و تولید مجدد حباب‌های ریز همراه است. این امر غلظت حباب‌های ریز را در پالپ افزایش داد و سطح ذرات را تمیز کرد.

۱۰. حضور میکرو-نانوحباب موجب افزایش سرعت فرآیند فلوتاسیون شد.

۳-۵ پیشنهادها

در زمینه استفاده از محلول میکرو-نانوحباب و امواج فراصوت در فلوتاسیون، پیشنهادهای زیر را می‌توان به منظور ادامه تحقیقات در آینده مد نظر قرار داد:

۱. استفاده از محلول میکرو-نانوحباب در فلوتاسیون سایر کانی‌ها مانند فسفات و کالکوپیریت،
۲. استفاده از محلول میکرو-نانو حباب با نمک‌های مختلف در فلوتاسیون زغال سنگ؛
۳. بررسی فاکتورهای صنعتی‌سازی فناوری میکرو-نانوحباب و فراصوت؛
۴. بررسی فواید و مضرات استفاده از محلول میکرو-نانوحباب در فلوتاسیون صنعتی؛
۵. بررسی سینتیک فلوتاسیون در حضور میکرو-نانوحباب و امواج فراصوت و پارامترهای مؤثر دیگر نظیر سرعت همزن، دما و درصد جامد خوراک در فلوتاسیون و معرفی مدل سینتیکی؛
۶. بررسی عملکرد میکرو-نانوحباب با تغییر پارامترهای عملیاتی دیگر مانند، دما و درصد جامدهای مختلف؛
۷. بررسی پیشنهادات بالا با میکرو-نانوحباب حاوی گازهای دیگر مانند، نیتروژن و اکسیژن.

منابع

- اولیاءزاده م، نوع پرست م، عبداللهی ه، (۱۳۸۴) "ماشین‌های فلوتاسیون (مبانی و اصول طراحی)"، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)، تهران.
- حقی ح، (۱۳۹۵) "بررسی تأثیر امواج اولتراسونیک-مایکروویو در پیش‌فرآوری کانی‌های سیلیکاته صنعتی"، رساله دکتری مهندسی معدن (فرآوری مواد معدنی)، نوع پرست م (استاد راهنما)، شفایی تنکابنی ض (استاد راهنما) و میر محمدی م (استاد مشاور)، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران.
- رضایی ب، (۱۳۹۴) "تکنولوژی زغال‌شویی"، چاپ دوم، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.
- ساغروانی ف، مظفری نائینی ر، (۱۳۹۲) "بررسی تأثیرات هیدرودینامیکی میکرو-نانوحباب هوا به کمک پردازش تصویر و چگونگی اثرات شناورسازی ذرات خاک"، دوازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران.
- سیدی ژ، حسینی ع، دهقانی ع، (۱۳۹۱) "مروری بر رویکرد فرآوری نرمه فسفات"، سی و یکمین گردهمایی علوم زمین.
- عارفی الف، (۱۳۹۳) "کاربرد میکرو-نانوحباب و نانومواد در بهبود رفتارهای مکانیکی و عایق بودن مصالح ساختمانی (با تأکید بر بتن)"، پایان نامه ارشد مهندسی عمران (مهندسی آب و محیط زیست)، ساغروانی ف (استاد راهنما)، نائینی م (استاد مشاور)، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود.
- قاسمی ج، (۱۳۹۱) "ارائه طرح بهینه خوراک‌دهی کارخانه زغال‌شویی، البرز شرقی با توجه

به ماسرال‌های موجود در منطقه به منظور بهبود راندمان کارخانه"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن (فرآوری مواد معدنی)، کارآموزیان م (استاد راهنما)، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.

- قدیانی الف، (۱۳۹۶) "بررسی امواج فراصوت بر بهبود فرآیند فلوئوتاسیون زغال سنگ"، رساله دکتری مهندسی معدن (فرآوری مواد معدنی)، نوع پرست م (استاد راهنما)، شفایی تنکابنی ض (استاد راهنما)، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران.

- محمودی م، (۱۳۹۰) "بررسی تأثیر ماسرال‌های زغال سنگ در فرآیند فلوئوتاسیون زغال‌های مختلف منطقه البرز شرقی"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن (فرآوری مواد معدنی)، شفایی تنکابنی ض (استاد راهنما)، کارآموزیان م (استاد راهنما)، انصاری جعفری م (استاد مشاور)، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.

- مهرداد ن، نبی بیدهندی غ، زاهدی ع، محمدی اقدام ع، آقاجانی یاسینی الف، (۱۳۹۱) "کاربرد سیستم امواج اولتراسونیک در تصفیه فاضلاب"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

- نعمت‌اللهی ح، (۱۳۸۷) "کانه آرائی"، جلد ۲، چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

- نوری ع، (۱۳۹۳) "ارائه طرح بهینه اختلاط مارک‌های مختلف زغالی معدن نرگسچال"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن (فرآوری مواد معدنی)، کارآموزیان م (استاد راهنما)، نادری م (استاد مشاور)، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.

- Ahmadi, R., Khodadadi, D. A., Abdollahy, M., & Fan, M. (2014). **Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine chalcopyrite particles**. International Journal of Mining Science and Technology, 24(4), 559-566.
- Ahmed, N., & Jameson, G. J. (1989). **Flotation kinetics**. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 5(1-4), 77-99.
- Aldrich, C., & Feng, D. (1999). **Effect of ultrasonic preconditioning of pulp on the flotation of sulphide ores**. Minerals Engineering, 12(6), 701-707

- Amini, E., Oliazadeh, M., & Kolahdoozan, M. (2009). **Kinetic comparison of biological and conventional flotation of coal**. Minerals Engineering, 22(4), 344-347.
- Azizi, D., Gharabaghi, M., & Saeedi, N. (2014). **Optimization of the coal flotation procedure using the Plackett–Burman design methodology and kinetic analysis**. Fuel Processing Technology, 128, 111-118.
- Bu, X., Xie, G., Chen, Y., & Ni, C. (2017). **The order of kinetic models in coal fines flotation**. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 37(3), 113-123.
- Bulatovic, S. M. (2007). **Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice: volume 1: flotation of sulfide ores**. Elsevier.
- Bulatovic, S. M. (2010). **Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice: Volume 2: Flotation of Gold, PGM and Oxide Minerals (Vol. 2)**. Elsevier.
- Calgaroto, S., Azevedo, A., & Rubio, J. (2015). **Flotation of quartz particles assisted by nanobubbles**. International Journal of Mineral Processing, 137, 64-70.
- Cho, S. H., Kim, J. Y., Chun, J. H., & Kim, J. D. (2005). **Ultrasonic formation of nanobubbles and their zeta-potentials in aqueous electrolyte and surfactant solutions**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 269(1), 28-34.
- Cleaning Technologies Group, (2017), Ultrasonics-Effect of Frequency Removing particles, <https://www.ctgclean.com/tech-blog/ultrasonic-effect-of-frequency-removing-particles>.
- Fan, M., Tao, D., Zhao, Y., & Honaker, R. (2013). **Effect of nanobubbles on the flotation of different sizes of coal particle**. Miner. Metall. Process, 30(3), 157-161.
- Fuerstenau, M. C., Jameson, G. J., & Yoon, R. H. (Eds.). (2007). **Froth flotation: a century of innovation**. SME.

- Gu, G., Sanders, R. S., Nandakumar, K., Xu, Z., & Masliyah, J. H. (2004). **A novel experimental technique to study single bubble–bitumen attachment in flotation**. *International Journal of Mineral Processing*, 74(1), 15-29.
- Gupta, A., & Yan, D. S. (2016). **Mineral processing design and operations: an introduction**. Elsevier.
- Hampton, M. A., & Nguyen, A. V. (2010). **Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force**. *Advances in colloid and interface science*, 154(1), 30-55.
- Hampton, M. A., Donose, B. C., & Nguyen, A. V. (2008). **Effect of alcohol–water exchange and surface scanning on nanobubbles and the attraction between hydrophobic surfaces**. *Journal of colloid and interface science*, 325(1), 267-274.
- Independent Statistics and Analysis U.S. Energy Information Administration, (2014), <https://www.eia.gov>.
- Johnson, B. D., & Cooke, R. C. (1981). **Generation of stabilized microbubbles in seawater**. *Science*, 213(4504), 209-211.
- Kang, W., Xun, H., & Hu, J. (2008). **Study of the effect of ultrasonic treatment on the surface composition and the flotation performance of high-sulfur coal**. *Fuel Processing Technology*, 89(12), 1337-1344.
- Laskowski, J. S. (2001). **Coal preparation**. *Developments in mineral processing*, 14, 1-8.
- Li, H., Afacan, A., Liu, Q., & Xu, Z. (2015). **Study interactions between fine particles and micron size bubbles generated by hydrodynamic cavitation**. *Minerals Engineering*, 84, 106-115.
- Li, Y. X., & Li, B. Q. (2000). **Study on the ultrasonic irradiation of coal water slurry**. *Fuel*, 79(3), 235-241.
- Maoming, F. A. N., Daniel, T. A. O., HONAKER, R., & Zhenfu, L. U. O. (2010). **Nanobubble generation and its application in froth flotation (part I): nanobubble generation and its effects on properties of microbubble and millimeter scale bubble solutions**. *Mining Science and Technology (China)*, 20(1),

1-19.

- Maoming, F., Daniel, T., Honaker, R., & Zhenfu, L. U. O. (2010). **Nanobubble generation and its applications in froth flotation (part II): fundamental study and theoretical analysis**. Mining Science and Technology (China), 20(2), 159-177.
- Mular, A. L., & Barratt, D. J. (Eds.). (2002). **Mineral processing plant design, practice and control: proceedings**. 1. SME.
- Napier-Munn, T., & Wills, B. A. (2006). **Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. Elsevier.
- Ofori, P., O'Brien, G., Hapugoda, P., & Firth, B. (2014). **Distributed flotation kinetics models—A new implementation approach for coal flotation**. Minerals Engineering, 66, 77-83.
- Ozkan, S. G. (2002). **Beneficiation of magnesite slimes with ultrasonic treatment**. Minerals Engineering, 15(1), 99-101.
- Ozkan, S. G., & Kuyumcu, H. Z. (2006). **Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation**. International Journal of Mineral Processing, 81(3), 201-203.
- Ozkan, S. G., & Veasey, T. J. (1996). **Effect of simultaneous ultrasonic treatment on colemanite flotation**. In Proceedings of the 6th International Mineral Processing Symposium (pp. 277-281).
- Peng, F., & Xiong, Y. (2013, February). **Picco-Nano Bubble Flotation Using Static Mixer-Venturi Tube For Pittsburgh No. 8 Seam Coal**. SME Preprint, 2013 SME Annual Meeting and Exhibit, Denver, CO.
- Rao, D. S. (2016). **Minerals and Coal Process Calculations**. CRC Press.
- Rao, S. R., & Leja, J. (2004). **Surface Chemistry of Forth Flotation: Reagents and Mechanisms**, 2nd Edition, Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Sobhy, A., & Tao, D. (2013). **High-efficiency nanobubble coal flotation**. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 33(5), 242-256.

- Sobhy, A., & Tao, D. (2013). **Nanobubble column flotation of fine coal particles and associated fundamentals**. International Journal of Mineral processing, 124, 109-116.
- Tao, D., Honaker, R., Parakh, B. K., & Fan, M. (2006). **Development of picobubble flotation for enhanced recovery of coarse phosphate particles**. Final report for Florida Institute of Phosphate Research, FIPR Contract, 02-02.
- The Sonochemistry centre at Coventry university, (2017), introduction to Sonochemistry, <http://www.sonochemistry.info/introduction.htm>.
- Wills, B.A., Finch, J.A., (2016). **Wills' Mineral Processing Technology**, Eighth edition, Elsevier Science & Technology Books.
- Xia, W., Yang, J., & Liang, C. (2013). **A short review of improvement in flotation of low rank/oxidized coals by pretreatments**. Powder Technology, 237, 1-8.
- Yoon, R. H., & Luttrell, G. H. (1989). **The effect of bubble size on fine particle flotation**. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 5(1-4), 101-122.
- Young, F. R. (1989). **Cavitation**.
- Zhou, Z. A., Chow, R. S., Cleyle, P., Xu, Z. H., & Masliyah, J. H. (2010). **Effect of dynamic bubble nucleation on bitumen flotation**. Canadian Metallurgical Quarterly, 49(4), 363-372.
- Zhou, Z. A., Xu, Z., Finch, J. A., Hu, H., & Rao, S. R. (1997). **Role of hydrodynamic cavitation in fine particle flotation**. International Journal of Mineral Processing, 51(1-4), 139-149.
- 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**. Minerals Engineering, 22(5), 419-433.

Abstract

Flotation is the most effective method for separating fine particles (less than 500 micrometers) of coal from the gunge. When the size of the coal particles is very fine (below 50 μm) or coarse (above 500 μm), the flotation efficiency is greatly reduced. Efforts to increase the recovery of these particles by increasing the concentration of oil collectors often lead to significant production of non-combustible materials that are floating along with coal. Therefore, the recovery of coal-flotation particles in very fine sizes, is low. In this study, the focus was on improving the efficiency of coal flotation, and after preparing a sample of coal and crushing it, the samples were divided into three dimensional fractions. Initial studies showed that each fraction had a different three percentage of ash feed. Flotation tests were designed to test different parameters for achieving higher recovery in two floatation and flotation kinetics fractions. According to recent studies on the presence of micro-nano bubbles and ultrasonic waves in various sciences and the observation of the significant results of these leading technologies, the effects of these two factors were studied separately and simultaneously in coal flotation. The results of these experiments on coal samples indicated that in the presence of micro-nano bubbles, recovery in all sizes with different feed ash content was improved. Also, ultrasonic wave tests showed positive effects on the recovery of coal flotation in the presence of these waves. The results of the experiments related to the application of these two factors suggest better micro-nano bubbles performance in the presence of ultrasonic waves. In the kinetic section, the constant flotation rate in the presence of micro-nano bubbles was improved.

Keywords: Flotation, Coal, micro-nanobubble, Ultrasonic Waves, Kinetics



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

MSc Thesis in Mineral Processing

**Coal separation efficiency improvement using micro bubble
technology**

By:

Hossein Ebrahimi

Supervisor:

Dr. Mohammad Karamoozian

Advisor:

Dr. Fazloallah Saghravani

January 2018