

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فراآوری مواد معدنی

بررسی تأثیر امواج مافوق صوت بر فلوتاسیون زغالسنگ البرز شرقی

نگارنده: نسرین رضوانی

استاد راهنما:

دکتر محمد کارآموزیان

بهمن ۱۳۹۵

این مجموعه را به پدر و مادر عزیز و خواهر مهربانم تقدیم می‌کنم

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

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران
بهترین پشتیبان است...

به پاس قلب‌های بزرگ‌شان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناه‌شان به
شجاعت می‌گراید...

و به پاس محبت‌های بی دریغ‌شان که هرگز فروکش نمی‌کند...

تشکر و قدردانی

سپاس مخصوص خداوند مهربان که به انسان توانایی و دانایی بخشید تا به بندگان شفق و دردت، مهربانی کند و در حل مشکلاتشان یاریشان نماید. از راحت خویش بگذرد و آسایش هم‌نوعان را مقدم دارد، با او معامله کند و در این خلوص انباز نگیرد و خوش باشد که پروردگار سمیع و بصیر است.

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

چکیده

یکی از پارامترهای اصلی تعیین کننده کیفیت زغالسنگ، تعیین میزان خاکستر آن است. خاکستر زغالسنگ باعث افزایش مصرف معرفها، ایجاد مشکل در فرآیند تولید فولاد، افزایش اکسایش کک و در نهایت کاهش حساسیت و کارایی کوره‌ها می‌شود. فلوتاسیون با توجه به آبران بودن طبیعی ذرات زغالسنگ یکی از بهترین روش‌ها برای کاهش میزان خاکستر در زغالسنگ است. آماده‌سازی سطح ذرات برای انجام واکنش‌های شیمیایی موردنظر باعث افزایش راندمان فلوتاسیون می‌شود. به کارگیری امواج مافوق صوت به طور گسترده‌ای برای آماده‌سازی و شستشوی سطح موثر ذرات طی فرآیندهای کانه آرایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این‌رو، در این تحقیق تأثیر امواج مافوق صوت بر بهبود راندمان فلوتاسیون زغالسنگ، مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از ویژگی امواج مافوق صوت در تمیز کردن سطح مؤثر ذرات و نیز پارامترهای عملیاتی فلوتاسیون زغالسنگ، طرح آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوچی آماده شد و آزمایش‌ها انجام شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها، توسط نرم‌افزار Qualitek-4 مورد تحلیل آماری قرار گرفت. بعد از تعیین مقدار بهینه‌ی هر پارامتر توسط نرم‌افزار، آزمایش‌های اعتبارسنجی انجام شد. نتایج به دست آمده با مقادیر پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار کاملاً مطابقت داشت. نتایج نشان داد که به کارگیری امواج مافوق صوت می‌تواند باعث کاهش درصد خاکستر به میزان ۴۵ درصد، افزایش کارایی جدایش به میزان ۱۷ درصد، کاهش ۶۵ درصدی میزان کلکتور، کاهش ۵۰ درصدی میزان کف ساز و کاهش ۵۰ درصدی مدت زمان کف‌گیری شود. همچنین می‌توان از امواج مافوق صوت برای افزایش دما در فلوتاسیون استفاده کرد.

کلمات کلیدی : فلوتاسیون، زغالسنگ، امواج مافوق صوت، خاکستر

مقالات مستخرج از پایان نامه

✓ رضوانی ن، کارآموزیان م، (۱۳۹۵) " تأثیر امواج مافوق صوت بر کاهش میزان خاکستر در فلوتاسیون زغالسنگ البرز شرقی"، سومین کنگره ملی زغالسنگ ایران، ص ۹۵، دانشگاه صنعتی شاهرود.

✓ رضوانی ن، کارآموزیان م، (۱۳۹۵) " بررسی اندرکنش پارامترهای عملیاتی و امواج التراسونیک بر فلوتاسیون زغالسنگ البرز شرقی"، سومین کنگره ملی زغالسنگ ایران، ص ۹۴، دانشگاه صنعتی شاهرود.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول : کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- ساختار زغالسنگ	۲
۱-۳- فلوتاسیون	۳
۱-۴- امواج مافوق صوت	۴
۱-۵- معادن زغالسنگ البرزشرقی	۷
۱-۵-۱- کارخانه‌ی زغالشویی شاهرود	۷
۱-۶- طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی	۹
۱-۷- بیان مساله	۱۱
۱-۸- ضرورت تحقیق	۱۲
۱-۹- اهداف تحقیق	۱۲
۱-۱۰- ساختار تحقیق	۱۲
فصل دوم : مروری بر پژوهش‌های پیشین	۱۵
۲-۱- مقدمه	۱۶
۲-۲- بررسی سابقه‌ی تحقیق	۱۶
۲-۳- جمع‌بندی	۱۸
فصل سوم : مواد و روش تحقیق	۲۱
۳-۱- مقدمه	۲۲
۳-۲- آماده‌سازی نمونه	۲۲
۳-۳- روش تعیین درصد خاکستر	۲۵

۳-۴-۲۷	روش تعیین درصد مواد فرار
۳-۵-۲۸	روش تعیین درصد عیار زغالسنگ
۳-۶-۲۹	آنالیز اولیه‌ی خوراک فلوئتاسیون
۳-۷-۲۹	روش محاسبه‌ی کارآیی جدایش عملیات فلوئتاسیون
۳-۸-۳۰	روش محاسبه‌ی درصد کاهش خاکستر عملیات فلوئتاسیون
۳-۹-۳۱	انتخاب پارامترهای مورد بررسی و سطوح هر یک از آنها
۳-۱۰-۳۳	شرایط انجام آزمایش‌ها
۳-۱۱-۳۸	تعیین درصد کارآیی جدایش و درصد کاهش خاکستر
۳-۱۲-۴۰	جمع‌بندی
۴۱	فصل چهارم : یافته‌های تحقیق
۴-۱-۴۲	مقدمه
۴-۲-۴۳	نتایج درصد کاهش خاکستر کنسانتره
۴-۲-۴-۴۳	مقدمه
۴-۲-۲-۴۳	بررسی و تحلیل نتایج خروجی نرم‌افزار
۴-۲-۳-۴۴	تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی بر میزان درصد کاهش خاکستر کنسانتره
۴-۲-۴-۴۸	آزمون اعتبار سنجی
۴-۲-۵-۴۸	تحلیل نتایج درصد کاهش خاکستر
۴-۳-۴۹	نتایج میزان کارآیی جدایش
۴-۳-۱-۴۹	مقدمه
۴-۳-۲-۴۹	بررسی و تحلیل نتایج خروجی نرم‌افزار
۴-۳-۳-۵۰	تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی بر میزان کارآیی جدایش
۴-۳-۴-۵۳	اعتبارسنجی
۴-۳-۵-۵۴	تحلیل نتایج کارآیی جدایش

۴-۴	تأثیر همزمان هر یک از پارامترها و فرکانس بر روی پارامترهای هدف	۵۴
۴-۵	مشاهدات جانبی آزمایش‌ها	۶۲
	فصل پنجم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۶۷
۵-۱	مقدمه	۶۸
۵-۲	جمع‌بندی	۶۸
۵-۳	نتیجه‌گیری	۶۹
۵-۳	پیشنهادهای	۷۰
	منابع	۷۳
	منابع فارسی	۷۴
	منابع لاتین	۷۴

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: سیستم فلوتاسیون.....	۳
شکل ۲-۱: دامنه‌ی فرکانس صدا.....	۵
شکل ۱-۳: سنگ شکن فکی آزمایشگاهی.....	۲۱
شکل ۲-۳: شیکر خشک آزمایشگاهی.....	۲۲
شکل ۳-۳: کوره‌ی الکتریکی آزمایشگاهی.....	۲۴
شکل ۴-۳: ترازوی دیجیتالی.....	۲۴
شکل ۵-۳: نمایش از بوته‌های اندازه‌گیری خاکستر، قبل و بعد از کوره.....	۲۵
شکل ۶-۳: نمایش از بوته‌ی اندازه‌گیری مواد فرار بعد از کوره.....	۲۶
شکل ۷-۳: ماشین فلوتاسیون مکانیکی.....	۳۱
شکل ۷-۳: تشکیل حباب روی سطح سلول در اواخر آماده‌سازی.....	۳۳
شکل ۸-۳: حمام امواج مافوق صوت.....	۳۳
شکل ۹-۳: حمام امواج مافوق صوت و ماشین فلوتاسیون مکانیکی.....	۳۴
شکل ۱۰-۳: فیلتر کردن کنسانتره.....	۳۵
شکل ۱۱-۳: فیلتر کردن باطله.....	۳۵
شکل ۱۲-۳: گرمخانه یا آون.....	۳۶
شکل ۱-۴: تأثیر جداگانه‌ی پارامترهای دما و زمان کف‌گیری بر روی درصد کاهش خاکستر کنسانتره.....	۴۲
شکل ۲-۴: تأثیر جداگانه‌ی پارامترهای اندازه ذرات و فرکانس بر روی درصد کاهش خاکستر کنسانتره.....	۴۳
شکل ۳-۴: تأثیر جداگانه‌ی پارامترهای کف ساز و کلکتور بر روی درصد کاهش خاکستر کنسانتره.....	۴۳
شکل ۴-۴: تأثیر جداگانه‌ی پارامتر توان اعمالی دستگاه بر روی درصد کاهش خاکستر کنسانتره.....	۴۳
شکل ۵-۴: درصد تأثیر هر یک پارامترها بر فلوتاسیون.....	۴۵

- شکل ۴-۶: تأثیر مجزای پارامترهای زمان کف‌گیری و اندازه ذرات بر روی کارایی جدایش ۴۸
- شکل ۴-۷: تأثیر مجزای پارامترهای دما و فرکانس بر روی کارایی جدایش ۴۹
- شکل ۴-۸: تأثیر مجزای پارامترهای کلکتور و کف‌ساز بر روی کارایی جدایش ۴۹
- شکل ۴-۹: تأثیر مجزای پارامتر توان اعمالی دستگاه بر روی کارایی جدایش ۴۹
- شکل ۴-۱۰: درصد تأثیر هر یک پارامترها بر فلوتاسیون ۵۱
- شکل ۴-۱۱: تأثیر هم‌زمان ابعاد ذرات و فرکانس بر کارایی جدایش (الف)، درصد کاهش خاکستر (ب) ۵۳
- شکل ۴-۱۲: تأثیر هم‌زمان مدت زمان کف‌گیری و فرکانس بر کارایی جدایش (الف)، درصد کاهش خاکستر (ب) ۵۵
- شکل ۴-۱۳: تأثیر هم‌زمان کلکتور و فرکانس بر کارایی جدایش (الف)، درصد کاهش خاکستر (ب) ۵۶
- شکل ۴-۱۴: تأثیر هم‌زمان کف‌ساز و فرکانس بر کارایی جدایش (الف)، درصد کاهش خاکستر (ب) ۵۸
- شکل ۴-۱۵: تأثیر هم‌زمان دما و فرکانس بر کارایی جدایش (الف)، درصد کاهش خاکستر (ب) ۵۹
- شکل ۴-۱۶: بوته‌های سنجش خاکستر بعد از کوره (کنسانتره آزمایش‌های شماره‌ی ۱۳ و ۱۴) ۶۰
- شکل ۴-۱۷: بوته‌ی سنجش مواد فرار بعد از کوره (کنسانتره‌ی آزمایش شماره‌ی ۱۳) ۶۱
- شکل ۴-۱۸: نمونه‌ی مواد فرار خوراک بعد از خروج از کوره ۶۲
- شکل ۴-۱۹: نمونه‌ی مواد فرار آزمایش ۱۰ (سمت راست) و ۱۴ (سمت چپ) ۶۲
- شکل ۴-۲۰: نمونه‌ی مواد فرار آزمایش ۱۵ (سمت راست) و ۲۴ (سمت چپ) ۶۳
- شکل ۴-۲۱: نمونه‌ی مواد فرار آزمایش ۲۳ (سمت راست) و ۲۷ (سمت چپ) ۶۳
- شکل ۴-۲۲: نمونه‌ی مواد فرار آزمایش ۲۶ ۶۳

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳: دانه‌بندی خوراک	۲۲
جدول ۲-۳: آنالیز اولیه‌ی خوراک	۲۷
جدول ۳-۳: پارامترهای مورد بررسی و سطوح هر یک از آن‌ها در آزمایش‌ها.....	۲۹
جدول ۴-۳: طرح آزمایش‌ها (L27)	۳۰
جدول ۵-۳: محاسبه‌ی درصد کاهش خاکستر و کارایی جدایش	۳۷
جدول ۱-۴: میزان خاکستر در خوراک، کنسانتره و باطله	۴۱
جدول ۲-۴: جدول آنالیز واریانس	۴۴
جدول ۳-۴: مقادیر بهینه‌ی هر یک از پارامترها	۴۶
جدول ۴-۴: کارایی جدایش	۴۷
جدول ۵-۴: جدول آنالیز واریانس	۵۰
جدول ۶-۴: مقادیر بهینه‌ی هر یک از پارامترها	۵۲

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

یکی از پایه‌های اساسی توسعه‌ی صنعتی هر کشوری، توسعه‌ی صنایع فولاد آن است. از جمله‌ی مواردی که در تولید فولاد نقش ضروری دارد، زغالسنگ است (یزدی، ۱۳۸۲). زغالسنگ چندین قرن قبل از میلاد مسیح شناخته شده بود، اما برای نخستین بار، چینی‌ها از آن به عنوان مواد سوخت استفاده کردند (گرینگر^۱ و گیبسون^۲، ۱۹۸۱). زغالسنگ در بسیاری از کشورهای جهان تولید و در تعدادی از این کشورها نقش مهمی در اقتصاد آن‌ها ایفا می‌کند. در طول سالیان متمادی، بشر از زغالسنگ برای تأمین گرمای فضا، تأمین انرژی صنایعی همچون سیمان و فولادسازی، تولید الکتریسیته، تبدیل آن به کک و استفاده از کک در صنایع چدن و فولادسازی، در تبدیل به نفت و گاز برای صنایع حمل و نقل و شیمیایی و غیره استفاده کرده است (اصانلو، ۱۳۷۸).

۱-۲- ساختار زغالسنگ

زغالسنگ در واقع مجموعه‌ای مرکب از ماسرال‌ها (مواد آلی با منشا گیاهی) و کانی‌ها (مینرال‌ها) است. کانی‌ها در واقع بخش غیر مفید زغالسنگ‌ها و خاکستر آن‌ها را تشکیل می‌دهند (یزدی، ۱۳۸۲). از مهم‌ترین کانی‌های موجود در زغالسنگ می‌توان به رس‌ها، کربنات‌ها، سیلیس‌ها و سیلیکات‌ها، سولفیدها، سولفات‌ها و غیره اشاره کرد که بخش غیرقابل سوختن زغالسنگ را تشکیل می‌دهد. زغالسنگ ماده‌ای به طور طبیعی آبران است (گایوگر^۳ و بردی^۴، ۱۹۴۰). از این ویژگی زغالسنگ در کنار آبدوست بودن کانی‌های همراه آن، برای جداسازی استفاده می‌شود.

¹.Grainger

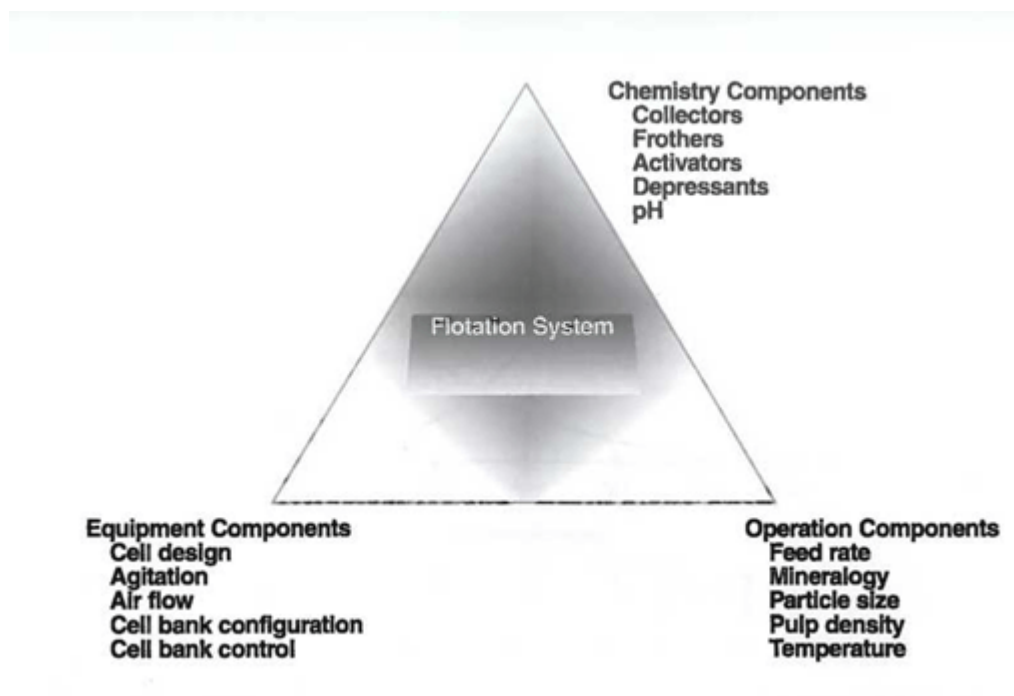
².Gibson

³.Gauger

⁴.Brady

۱-۳- فلوتاسیون^۱

فلوتاسیون یکی از روش‌های آرایش مواد معدنی است که بر مبنای خواص شیمی - فیزیکی سطوح جامدات برای ذرات ۲۰ تا ۲۰۰ مش در یک محیط سیال و جریان هوا برای ایجاد حباب‌های مناسب بنا شده است. برای ذراتی با ابعاد کمتر از ۲۰ مش (به علت عدم توانایی حباب هوا) و بیشتر از ۲۰۰ مش به دلیل تولید نرمة، فلوتاسیون بازیابی مطلوبی ندارد (رضائی، ۱۳۷۵).



شکل ۱-۱: سیستم فلوتاسیون (کلایمپل، ۱۹۹۵)

نتایج موفق صنعتی نشان داده است که یک سیستم فلوتاسیون کف نیازمند عوامل متعددی است که می‌توان آن‌ها را به صورت سه ضلع یک مثلث دسته بندی کرد (شکل ۱-۱). دسته‌ی اول پارامترهای شیمیایی^۲

^۱. Flotation

^۲. Chemistry Components

دسته‌ی دوم پارامترهای عملیاتی^۱ و دسته‌ی سوم پارامترهای تجهیزاتی^۲ که تأثیر مثبت و منفی همزمان این پارامترها بر موفق بودن یا نبودن فلوتاسیون موثر است.

فرآیند جدایش مواد معدنی به وسیله‌ی فلوتاسیون کف، در ابتدا به خاصیت ترشوندگی ذرات مختلف بستگی دارد. ذراتی که شناور می‌شوند باید به صورت انتخابی^۳ به حباب‌های هوا متصل شوند بنابراین این ذرات باید آب‌گریز^۴ (هوا دوست) باشند (فیورستنو^۵ و هان^۶؛ ۲۰۰۹). تعداد کمی از مواد معدنی مثل زغالسنگ به طور طبیعی آب‌گریز هستند، بنابراین آن‌ها به طور مستقیم شناور می‌شوند اما اغلب مواد معدنی آب‌دوست^۷ بوده و باید آن‌ها را با اضافه کردن مواد شیمیایی به نام کلکتور^۸ آب‌گریز کرد. کلکتورها با فعال کردن سطح کانی‌ها امکان اتصال کانی به حباب هوا را به صورت انتخابی فراهم می‌آورد. با وجود این که زغالسنگ به صورت ذاتی خواص آب‌گریزی دارد اما به دلیل پوشش‌دهی نقاط آب‌دوست در سطح زغالسنگ، باید از کلکتور استفاده کرد (رضائی، ۱۳۷۵).

برای ایجاد پایداری کف در سطح سلول باید از موادی با نام کف ساز^۹ استفاده کرد. کف سازها به دلیل جلوگیری از نزدیک شدن حباب‌ها به یکدیگر از بزرگ شدن آن ممانعت می‌کنند (بنیسی، ۱۳۸۸).

۴-۱- امواج مافوق صوت^{۱۰}

صوت از شناخته‌ترین پدیده‌های طبیعی برای انسان است. نه تنها انسان بلکه حتی سایر موجودات نیز از این پدیده فیزیکی در فعالیت‌های روزانه خود استفاده می‌کنند. صوت در اثر ارتعاش یک منبع صوتی تولید می‌شود. شناخته شده ترین صداها، آن‌هایی هستند که توسط تارهای صوتی انسان تولید می‌شوند و در هوا

¹.Operation Components

².Equipment Components

³.Selectively

⁴.Hydrophobic

⁵.Fuerstenau

⁶.Han

⁷.Hydrophilic

⁸.Collector

⁹.Frother

¹⁰.Ultrasonic Wave

انتشار می‌یابند. تارهای صوتی با ارتعاش خود هوای دهان (ذرات گاز) را به نوسان در می‌آورند و این نوسان‌ها به شکل امواج صوتی انتشار می‌یابند و به شنونده می‌رسند.

وجود یک محیط مادی (ذرات ماده) لازمه انتشار امواج صوتی است زیرا صوت چیزی جز ارتعاش این ذرات مادی نیست. به همین دلیل در خلاء که ذرات مادی وجود ندارد، صوت انتشار نمی‌یابد. ارتعاش منبع، ذرات مجاور را به نوسان در می‌آورد و این ذرات نیز ذرات مجاور خود را مرتعش می‌سازند و ارتعاش ماده زنجیروار ادامه یافته و پیش می‌رود. انتقال این ارتعاشات از ذره‌ای به ذره دیگر در واقع همان موج صوتی است که در محیط منتشر می‌شود. به عبارت دیگر انتشار صوت و به دنبال آن امواج مافوق صوت، انتقال انرژی در محیط به لحاظ نوسان ذرات ماده است. انسان می‌تواند صداهایی را که فرکانس آنها حدوداً بین ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز است را با گوش خود بشنود.

امواج مافوق صوت، امواج صوتی هستند که فرکانس آن‌ها بالاتر از حد شنوایی انسان یعنی ۲۰۰۰۰ هرتز است (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱: دامنه‌ی فرکانس صدا (امیدگار، ۲۰۱۲)

امواج مافوق صوت اولین بار در سال ۱۸۸۳ میلادی توسط گالتون کشف شد و طی جنگ‌های جهانی اول و دوم به سرعت توسعه یافت. امواج مافوق صوت به طور گسترده‌ای برای آماده‌سازی و شستشوی سطح، طی

فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و شیمی - فیزیکی در کانه‌آرایی استفاده می‌شوند که می‌تواند بر بازیابی محصول تأثیر چشمگیری داشته باشد. این تأثیر بخاطر پاک شدن مؤثر سطوح ذرات از پوشش لایه‌های نازک موسوم به نرمه است (دانشمند، ۱۳۹۴).

تأثیرات مافوق صوت در سیستم فلوتاسیون، عموماً توسط پدیده حفره‌زایی^۱ و همراه با یک افزایش موضعی در فشار و درجه حرارت، توصیف شده است. از آن جایی که اندرکنش‌های جامد - مایع ضعیف‌تر از نیروهای چسبندگی مایع است، فصل مشترک جامد-مایع بیشتر تابع حفره‌زایی می‌باشد. ذرات آب‌گریز در پالپ فلوتاسیون با کمک امواج مافوق صوت، حتی با اندرکنش جامد-مایع ضعیف‌تر، راحت‌تر تولید می‌شوند زیرا حفره‌زایی در چنین فصول مشترکی با سرعت بیشتری اتفاق می‌افتد. شرایط متلاطم که به فصل مشترک جامد-مایع تحمیل می‌شود، با تغییراتی که در جذب کلکتورها روی کانی‌ها و در نتیجه جواب دادن آن‌ها به فلوتاسیون ایجاد می‌کند، می‌تواند خواص سطح کانی‌ها را اصلاح کند.

انرژی مافوق صوت، جذب معرف را با قرار دادن سطح تمیز کانی در معرض معرف و تشکیل مراکز پر انرژی روی سطح کانی برای جذب مولکول معرف‌ها، آسان کرده و شرایط فلوتاسیون را بهبود می‌بخشد. امواج مافوق صوت ترسیب ذرات گاز حاصل از تشکیل هسته‌های حباب را افزایش می‌دهد. تجمع چنین حباب‌های ریز مقاومی به‌ویژه روی ذرات آب‌گریز، می‌تواند کارایی تماس حباب - ذره را بهبود دهد.

عملیات فلوتاسیون کف تحت تأثیر تعداد زیادی از عوامل شیمیایی، تجهیزات و متغیرهای عملیاتی قرار دارد. تغییر در یکی از این متغیرها به طور مسلم روی نتایج فلوتاسیون و عواملی مانند عیار و بازیابی تأثیر می‌گذارد. استفاده از امواج مافوق صوت یکی از مهم‌ترین روش‌هایی است که برای عملیات فلوتاسیون پیشرفته مورد استفاده قرار می‌گیرد.

^۱. Cavitation

امواج مافوق صوت دارای مزایایی هستند که تعدادی از آن‌ها عبارت است از:

امواج مافوق صوت دارای خواص جهت‌دار هستند و هر چه فرکانس بیشتر باشد، این امواج جهت‌دارتر خواهند بود که با تاثیر روی ذرات به یکنواخت شدن محلول کمک می‌کنند. فراصوت صدایی ایجاد نمی‌کند و این امر در کاربردهای امواج با شدت زیاد مطلوب است. هر چند به کارگیری فرکانس‌هایی که در محدوده شنوایی انسان هستند، می‌تواند موثرتر باشد، اما سروصدای ایجاد شده، غیر قابل تحمل بوده و حتی ممکن است موجب صدماتی به شنوایی شود.

۵-۱- معادن زغالسنگ البرز شرقی

کارهای اکتشافات مقدماتی منطقه‌ی زغال‌خیز تزره در اواسط سال ۱۳۴۸ شروع شد. معادن زغالسنگ البرز شرقی در رشته کوه‌های البرز واقع شده که ارتفاع منطقه از سطح دریا بین ۲۰۰۰ تا ۲۸۰۰ متر است (به جز منطقه قشلاق) و اکثر اوقات آب و هوایی کوهستانی دارد و شامل منطقه‌ی تزره (معادن پشکلات، کلاریز، رزمجا و ممدویه)، اولنگ و دیگر مناطق البرز مانند بخش جوزچال و قشلاق است (رضایی، ۱۳۸۰).

۱-۵-۱- کارخانه‌ی زغالشویی شاهرود

این کارخانه در شمال شرقی دامغان و در کیلومتر ۵۷ شاهرود، بین مناطق مهماندوست و تزره قرار گرفته است. ساختمان کارخانه از سال ۱۳۵۲ آغاز شد و در سال ۱۳۵۳ به بهره‌برداری رسید.

طبق طرح اولیه، ظرفیت کارخانه ۸۰ تن در ساعت است و در سه شیفت باید به طور متوسط ۱۵۰۰ تن زغالسنگ را شستشو دهد. برق مورد نیاز کارخانه ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلووات است. میزان مصرف آب ۵ متر مکعب بر تن زغال است و از چاه تامین می‌شود. زغالسنگ از معادن مختلف با حداقل ۲۵ درصد خاکستر و رطوبت نسبی ۱۲ درصد توسط لودر به داخل بونکر ریخته می‌شود. قطعات درشت‌تر از ۱۲ سانتی‌متر توسط نرده جدا و مواد به دستگاه تغذیه کننده وارد می‌شود. ظرفیت هر تغذیه کننده ۱۰۰ تن در ساعت است. نوار نقاله به طول ۱۷/۵ متر و به عرض ۸۰ سانتی‌متر با ظرفیت ۱۰۰ تن در ساعت و سرعت ۱/۴ متر در ثانیه

زغالسنگ را به سرند اولیه هدایت می‌کند. چشمه‌ی سرند ۱ میلی‌متر و سطح آن ۱۰ متر مربع است. ذرات ۱ تا ۱۲۵ میلی‌متر به وسیله‌ی ناودانی به داخل جیگ وارد شده و ذرات زیر ۱ میلی‌متر به کلاسیفایر هدایت می‌شوند. کنسانتره جیگ پس از عملیات سرند کردن به سه بخش درشت‌تر از ۱۳ میلی‌متر، ۱ تا ۱۳ میلی‌متر و زیر ۱ میلی‌متر تفکیک می‌شوند (رضایی، ۱۳۸۰).

بخش درشت‌تر از ۱۳ میلی‌متر توسط نوار نقاله به انبار مخصوص خود هدایت می‌شود، اما بخش ۱ تا ۱۳ میلی‌متر برای آبیگری به دستگاه سانتریفوژ وارد شده و سپس توسط نوار نقاله دیگری به انبار کنسانتره هدایت می‌شود. ذرات زیر ۱ میلی‌متر نیز به کلاسیفایر انتقال می‌یابد (رضایی، ۱۳۸۰).

کلیه‌ی ذرات زیر ۱ میلی‌متر از بخش‌های مختلف کارخانه پس از ورود به کلاسیفایر به سه بخش تفکیک می‌شوند. بخش درشت توسط پمپ به هیدروسیکلون منتقل می‌شود. سرریز هیدروسیکلون مجدداً به کلاسیفایر، اما ته‌ریز به جیگ وارد می‌شود. ذرات $0/6$ تا $0/8$ میلی‌متر و $0/2$ تا $0/6$ میلی‌متر نیز بخش‌های دیگر کلاسیفایر را تشکیل می‌دهند. بدین ترتیب مواد طبقه‌بندی شده توسط کلاسیفایر توسط لوله‌ی مخصوصی به تانک‌های آماده‌سازی قبل از فلوتاسیون وارد می‌شوند. مواد پس از آماده‌سازی با گازوئیل، MIBC، روغن کاج و موادی دیگر به سلول‌های فلوتاسیون که شامل ۷ ردیف ۳ تایی است وارد می‌شود. کنسانتره‌ی حاصل از سلول‌ها به بخش آبیگری (فیلتر دیسکی) هدایت و پس از آبیگری توسط نوار نقاله به انبار مخصوص به خود وارد می‌شود. آب حاصل از این بخش به همراه باطله حاصل از فلوتاسیون به تیکنر وارد و مواد باطله پس از آبیگری به سد باطله هدایت می‌شود. حدوداً نیمی از آب حاصل از تیکنر پس از بازیافت مجدداً برای مصرف مورد استفاده قرار می‌گیرد (رضایی، ۱۳۸۰).

۱-۶- طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی^۱

یکی از اهداف طراحی آزمایش این است که با تغییراتی آگاهانه در متغیرهای ورودی فرآیند، بتوان تغییرات خروجی را مشاهده کرد. روش‌های مختلفی برای طراحی آزمایش‌ها وجود دارد. یکی از اولین روش‌هایی که در این زمینه ارائه شد، روش فاکتوریل بود که تعداد آزمایش‌ها در این روش را به وسیله‌ی رابطه‌ی ۱-۱ به دست می‌آورند.

$$N = L^m \quad (1-1)$$

N = تعداد کل آزمایش‌ها

L = تعداد سطوح

m = تعداد فاکتورها

فاکتورها، پارامترهایی هستند که در طی آزمایش قرار است تغییر کنند و بر پاسخ خروجی آزمایش تأثیر می‌گذارند. سطوح، مقادیری هستند که فاکتورها در طی آزمایش به خود می‌گیرند (مقدار متغیر عامل). اشکال عمده‌ی این روش این بود که در صورت وجود متغیرهای زیاد، تعداد آزمایش‌ها خیلی زیاد می‌شود و این مسأله از نظر زمان و هزینه به صرفه نیست.

بنابراین محققان به جست‌وجوی راه‌هایی پرداختند که تعداد آزمایش‌ها را کاهش دهند. یکی از این روش‌ها، روش تاگوچی بود. در این روش سه عامل مورد توجه است:

۱. کیفیت محصول در مرحله‌ی طراحی در نظر گرفته می‌شود.

۲. تأثیر عواملی که نمی‌توان کنترل کرد را کم کرده و در صورت ممکن تأثیر آن‌ها حذف شوند (عدم

وابستگی کیفیت به فاکتورهای غیر قابل کنترل).

۳. میزان ضرر و زیان، به انحراف از حالت استاندارد (کیفیتی که برای ما مطلوب است) بستگی دارد.

^۱. Taguchi

تاگوچی یک آزمایش را، به عنوان ایجاد تغییر در یک فرآیند جهت مطالعه‌ی اثرات آن تعریف می‌کند. ایشان موثرترین شیوه‌ی انجام آزمایش‌ها را شیوه‌ی چند عامل در هر زمان می‌داند. از دیدگاه او مراحل انجام آزمایش عبارت است از:

۱. برنامه‌ریزی آزمایش
 ۲. طراحی آزمایش‌ها
 ۳. انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری داده‌ها
 ۴. تجزیه و تحلیل داده‌ها و تعیین نقطه‌ی بهینه (ترکیب بهینه‌ی عوامل)
 ۵. اجرا و بازخورد جهت کنترل و تطبیق پیش‌بینی‌ها در عمل
- در این روش انتظار می‌رود از تحلیل جواب‌ها نتایج زیر حاصل شود:
۱. شرایط بهینه‌ای که در آن کیفیت مطلوب به دست می‌آید.
 ۲. میزانی که هر فاکتور روی عملکرد و کیفیت تاثیرگذار است و کدام فاکتور بیشترین تاثیر را دارد.
 ۳. آیا در شرایط بهینه‌ای که پیشنهاد شده، پاسخ همان است که به دست آمده است؟
- برای تحلیل آزمایش دو روش وجود دارد:

❖ روش استاندارد ANOVA (تحلیل واریانس)

❖ استفاده از نسبت سیگنال به نویز (S/N)

مقدار S/N، میزان پراکندگی حول یک مقدار مشخص را بیان می‌کند یا به بیان دیگر، جواب‌های به دست آمده در بین چند آزمایش انجام شده چگونه تغییر کرده‌اند.

برای به دست آوردن این مقدار، سه حالت وجود دارد که هر کدام در شرایط خاصی کاربرد دارند:

• هر چه کمتر باشد، بهتر است  کاربرد: بررسی یک خصوصیت منفی که حالت ایده‌آل

آن صفر است. در این حالت هر چه مقدار به دست آمده کمتر باشد، بهتر است.

- هر چه بیشتر باشد، بهتر است ← کاربرد: بررسی یک خصوصیت مثبت که در این صورت هر چه مقدار به دست آمده بیشتر باشد، بهتر است.

- یک مقدار عددی بهتر است ← کاربرد: هنگام بررسی یک خصوصیت مشخص که نباید از مقدار مورد نظر منحرف شد.

در تمام مواردی که در بالا ذکر شد، زمانی که از مقدار S/N برای تحلیل استفاده می‌شود آزمایش‌ها چند بار تکرار می‌شوند و در نهایت شرایط بهینه برای آزمایش به دست می‌آید. البته ممکن است این شرایط، جزء آزمایش‌هایی که انجام گرفته است، نباشد. در نهایت بایستی این شرایط را در نظر گرفته و آزمایش را تحت آن انجام داد تا به دست آمدن یا نیامدن بازدهی مطلوب مشخص شود.

در صورتی که هدف پیدا کردن عامل با بیشترین تأثیر باشد، از تحلیل واریانس استفاده می‌شود.

۱-۷- بیان مساله

فلوتاسیون مهم‌ترین و کامل‌ترین روش کانه‌آرایی است. در این روش مواد باارزش به حباب‌های هوا می‌چسبند و تشکیل کف می‌دهند (کنسانتره) و باطله‌آدر آب باقی می‌ماند. فلوتاسیون یک فرآیند انتخابی بوده و براساس خواص فیزیکی - شیمیایی خاص کانی‌ها انجام می‌شود. برای چسبیدن کانی به حباب هوا، شرط اول آب‌گریز بودن ذره است.

زغالسنگ به طور طبیعی آب‌گریز بوده و از فلوتاسیون برای جدایش این کانی از باطله همراه آن استفاده می‌شود. از آن جا که وجود خاکسترآدر زغالسنگ مضر است، بایستی در طی فرآیند های فلوتاسیون سهم حضور آن را کاهش داد. در این پایان‌نامه، تأثیر امواج مافوق صوت بر عملکرد فلوتاسیون زغالسنگ بررسی

¹.Concentrate

².Gangue

³.Ash

شده است و با انجام آزمایش های متعدد با تغییر پارامترهایی نظیر میزان مصرف کلکتور و کف ساز، درصد جامد پالپ، شدت امواج مافوق صوت و غیره افزایش عیار و بازیابی بررسی شده است.

۸-۱- ضرورت تحقیق

وجود خاکستر در زغال سنگ باعث افزایش مصرف معرف ها، ایجاد مشکل در فرآیند تولید فولاد، افزایش اکسایش کک و در نهایت کاهش حساسیت و کارآیی کوره ها می شود. از این رو کارخانه های زغال شویی بایستی با بهره گیری از روش های جدید میزان خاکستر کنسانتره خود را کاهش دهند. یکی از این روش ها می تواند استفاده از امواج مافوق صوت باشد که در این پایان نامه مورد بررسی قرار می گیرد.

۹-۱- اهداف تحقیق

۱. تعیین شدت فرکانس امواج مافوق صوت مناسب برای به دست آوردن بهترین حالت جدایش.
۲. تعیین تاثیر موج مافوق صوت در رابطه با اندازه ذرات ورودی، میزان کلکتور و کف ساز مصرفی در بخش فلو تاسیون.

۱۰-۱- ساختار تحقیق

تحقیق حاضر از پنج فصل تشکیل شده است که در ادامه به طور مختصر توضیح داده می شود:

فصل حاضر شامل کلیات مطلب از جمله مقدمه ای از صنعت زغال سنگ، معرفی ساختار زغال سنگ، فلو تاسیون و امواج مافوق صوت بوده و در ادامه شامل بیان مساله، ضرورت انجام تحقیق و اهداف تحقیق است.

فصل دوم با عنوان مروری بر پژوهش های پیشین مطرح شده است که بعد از بیان تاریخچه ای مختصر از موضوع، تحقیقات صورت گرفته و نتایج آن ها آورده شده است.

در فصل سوم مواد و روش های به کار گرفته شده در تحقیق معرفی و مراحل انجام آزمایش ها و اندازه گیری پارامترهای هدف به صورت کامل و جامع توضیح داده شده است.

در فصل چهارم با عنوان یافته‌های تحقیق، در ابتدا روش و نرم افزار استفاده شده برای تحلیل نتایج، معرفی شده است و در ادامه به کمک نمودار به بررسی تاثیر هر یک پارامترها بر روی پارامترهای هدف پرداخته شده است.

در فصل پنجم، نتایج حاصل از این تحقیق و نیز پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر پژوهش‌های پیشین

۱-۲- مقدمه

پیشرفت دانش بشری وابسته به استفاده از علوم و تجربه گذشتگان و به کارگیری روش‌های نوین برای اصلاح و یا تکمیل آن‌ها است. هر پژوهش ضمن آن که مبتنی بر پژوهش‌های قبلی است، مقدمه و پایه‌ای نیز برای پژوهش‌های بعدی است. هر چه تعداد ارتباط‌ها و پیوندهای ممکن یک پژوهش با پژوهش‌های پیشین و نظریه‌های موجود بیشتر باشد، اهمیت و سهم آن پژوهش در گسترش دانش آدمی بیشتر خواهد بود. پژوهش پیش‌رو، دارای سابقه‌ی کوتاه ولی بسیار مفید و کاربردی است. امید است سایر پژوهشگران تحقیقات تکمیلی روی این نوع فرآیندها را انجام داده و سرانجام صنعت زغالسنگ بتواند از فواید آن بهره‌برد.

۲-۲- بررسی سابقه‌ی تحقیق

سابقه‌ی استفاده از امواج مافوق صوت در فرآوری مواد معدنی به سال ۱۹۶۷ میلادی بر می‌گردد، اگرچه هنوز در فلوتاسیون زغالسنگ استفاده نشده بود (Schlesinger, 1989).

در سال ۱۹۸۸ پاچاک^۱ و کرزسینسکا^۲ سرعت انتشار امواج مافوق صوت را در محلول‌های تتراهیدروفوران^۳ ($(CH_2)_4O$) برای جداسازی زغالسنگ از زغال‌های مختلف (در محدوده ی $۸۵/۶ - ۶۴/۹$ درصد کربن) اندازه‌گیری کرده و به ارتباط خطی بین کیفیت کنسانتره استخراج شده و سرعت امواج مافوق صوت پی‌بردند (Pajak and Krzesinska, 1988).

موتر^۴ و شلسینگر^۵ در سال ۱۹۸۹ از امواج مافوق صوت برای فرآوری زغالسنگ منطقه‌ی پیتسبرگ^۶ استفاده کردند که آزمایش‌های آن‌ها نشان داد زمانی که شدت امواج مافوق صوت افزایش می‌یابد، خاکستر و محتوی

^۱.Pajak

^۲.Krzesinska

^۳.Tetrahydrofuran

^۴.Muter

^۵.Schlesinger

^۶.Pittsburgh

سولفور کاهش یافته و در این شرایط با افزایش سرعت همزن، عیار افزایش می‌یابد که به کارگیری این شرایط در دامنه‌ی ابعادی زیر ۱۰۰ میکرون یعنی بخش نرمه‌ها تاثیر بسیار زیادی داشته است (Muter and Schlesinger, 1989).

در سال ۲۰۰۶ ازکان^۱ و کویومکا^۲ مکانیزم امواج مافوق صوت در فلوتاسیون زغالسنگ (نمونه استفاده شده: نرمه‌های سخت زغال از کارخانه‌ای در آلمان) را بررسی کردند و دریافتند که امواج مافوق صوت با تمیز کردن سطح موثر ذرات زغال، پخش شدن یکسان اندازه ذرات حباب‌های هوا یا کف درون سلول و کاهش زمان فلوتاسیون، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی بازیابی و کاهش میزان خاکستر در کنسانتره نسبت به حالت استفاده معمولی از مقدار مشخص معرف‌ها دارند (Kuyumcu and Ozkan, 2006).

مجدداً همین محققان در سال ۲۰۰۶ اقدام به طراحی سلول فلوتاسیونی مجهز به ترانسفورماتور (مبدل) امواج مافوق صوت نموده تا بازیابی فلوتاسیون زغالسنگ را افزایش دهند. آن‌ها بعد از انجام آزمایش‌ها دریافتند، استفاده از امواج مافوق صوت در تمام مراحل (قبل و در حین فرآیند فلوتاسیون) فرآوری زغالسنگ تأثیر مثبتی روی راندمان کلی فرآیند شستشوی دارد (Kuyumcu and Ozkan, 2006).

در سال ۲۰۰۷ میلادی کانگ وین زی^۳ و همکاران برای کاهش بیشتر خاکستر و نیز گوگرد محتوی کنسانتره از امواج مافوق صوت در حین عملیات فلوتاسیون نرمه‌ها استفاده کردند و بعد از انجام آزمایش‌ها دریافتند که این امواج باعث تغییر در سطح ذرات زغالسنگ و پیریت شده است و همین مساله باعث افزایش آبرانی زغال و آبدوستی پیریت و باطله می‌شود (Kang Wen – ze et al, 2007).

^۱. Ozkan

^۲. Kuyumcu

^۳. Kang Wen - ze

مجددا همین محققان در سال ۲۰۰۹ میلادی با استفاده از امواج مافوق صوت در فلوتاسیون زغالسنگ دریافتند که این شرایط باعث کاهش محتوی اکسیژن و تنش سطحی، افزایش مقدار حباب‌های ایجاد شده در طول فرآیند، افزایش مقدار pH و دما در پالپ و در نهایت شاخص درستی^۱ فلوتاسیون و گوگردزدایی در نرّمه‌های زغالسنگ را افزایش می‌دهد (Kang Wen – ze et al, 2009).

در سال ۲۰۱۱ میلادی ازکان^۲ به بررسی اثر هم‌زمان شرایط آلتراسونیک بر روی فلوتاسیون نرّمه‌های زغالسنگ پرداخت و بعد از انجام آزمایش‌ها دریافت که امواج مافوق صوت شرایط فلوتاسیون نمونه‌ی زغالسنگ را بهبود داده است. با اصلاح نحوه‌ی اتصال کلکتور، کف‌ساز و ذرات زغال، مصرف معرف‌ها را کاهش داده، میزان راه‌یابی زغالسنگ به باطله را کاهش و با اثر پاک‌کنندگی ذرات زغال باعث افزایش بازیابی عملیات شده است (Ozkan, 2011).

در سال ۲۰۱۳ میلادی آسلا^۳ و شاهین اغلو^۴ از امواج مافوق صوت قبل از فلوتاسیون تجمعی زغالسنگ استفاده کرده و دریافتند استفاده از این امواج در هنگام شکست روی ذرات زغالسنگ باعث برداشتن لایه‌ی اکسید شده روی زغال و تولید سطحی تازه مملو از شکستگی و حفره می‌شود. محتوی کربن روی سطح افزایش یافته و اکسیژن کاهش می‌یابد و همچنین سایر گانگ‌ها از جمله آلومینیوم، آهن، کلسیم، پتاسیم، سیلیکات‌ها و رس‌ها نیز از روی سطح ذرات زغال رفع می‌شوند (Uslu and Sahinoglu, 2013).

۳-۲- جمع‌بندی

مروری بر تحقیقات پیشین نشان می‌دهد تحقیق در مورد استفاده از امواج مافوق صوت در فلوتاسیون از اواخر قرن بیستم آغاز شده است اما تحقیقات مختصری در این مورد صورت گرفته است. از این رو در این پایان نامه به بررسی اثرات استفاده از امواج بر روی فلوتاسیون زغالسنگ پرداخته شد و این روش با روش

^۱ perfect index

^۲ Ozkan

^۳ Uslu

^۴ Sahinoglu

معمولی فلوتاسیون مقایسه شد. با توجه به اهمیت زغالسنگ و فولاد در توسعه‌ی زیربنایی کشورها، امید است صنعت زغالسنگ ایران نیز با بهره‌گیری از روش‌های نوین، کارا و پر بازده شود.

فصل سوم

مواد و روش تحقیق

۱-۳- مقدمه

انجام عملیات فلوتاسیون مستلزم فراهم کردن مواد اولیه، آشنایی با دستگاه‌ها و شناخت دقیق عملکردشان، 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.

از این رو باید از ابتدای فعالیت با مشخص کردن طرح کلی اقدامات و برنامه‌ریزی برای انجام آن‌ها، به جلو حرکت کرد. اهمیت این نحوه‌ی عملکرد زمانی مشخص می‌شود که در صورت بروز مشکل کوچک و حتی در نگاه اول بی اهمیت، مجبور به شروع مجدد کل فرآیند شده و از نظر زمانی و مالی متضرر شد. به همین علت بهتر آن است که ابتدا شناخت اولیه و کاملی بر موضوع پیدا کرده سپس دست به کار شد.

۲-۳- آماده‌سازی نمونه

در این پژوهش برای انجام آزمایش‌ها از نمونه‌ی زغالسنگ معادن البرزشرقی استفاده شده است. نمونه‌ی مورد آزمایش از معدن، تونل ۴۲ لایه‌ی ۱۰ k تهیه شده و به آزمایشگاه منتقل شد. در آزمایشگاه، ابتدا نمونه‌ی ۱۰ کیلوگرمی زغالسنگ به وسیله‌ی سنگ شکن فکی آزمایشگاهی ساخت شرکت دانش فراوران ایران تحت خردایش قرار گرفت (شکل ۱-۳).

بعد از انجام خردایش، نمونه‌ی زغالسنگ تحت دانه‌بندی قرار گرفت. یکی از متداولترین روشهای تعیین دانه‌بندی زغالسنگ، روش تجزیه سرنندی است. سرندهای آزمایشگاهی در سری‌های مختلفی ساخته می‌شوند. رایج‌ترین آن‌ها سری استاندارد تیلور و ASTM است.



شکل ۳-۱: سنگ شکن فکی آزمایشگاهی

مبنای دانه‌بندی، انجام فلوتاسیون روی ذرات زیر ۱ میلی‌متر گذاشته شد که دلیل این انتخاب، استاندارد به کار گرفته شده در کارخانه زغالشویی البرزشرقی است. به علت بررسی دامنه‌ی اندازه ذرات به عنوان یکی از متغیرهای آزمایش، ذرات زیر ۱ میلی‌متر به سه دسته تقسیم شدند (جدول ۳-۱).

جدول ۳-۱: دانه‌بندی خوراک

وزن نهایی نمونه روی هر سرنده (گرم)	شماره سرنده(مش) ASTM	دامنه‌ی اندازه ذرات
۲۹۶۷	۱۸ - ۳۵	۵۰۰ میکرون - ۱ میلی‌متر
۳۳۷۰	۳۵ - ۷۰	۲۱۲ میکرون - ۵۰۰ میکرون
۲۳۶۵	۷۰ - ۲۰۰	۷۵ میکرون - ۲۱۲ میکرون
۱۲۹۸	۲۰۰ >	> ۷۵ میکرون

^۱. Mesh.

یکی از مشکلات فلوتاسیون ذرات درشت عدم کنترل حذف ذرات پیریت و خاکستر در بخش‌های دانه‌ریز زغالسنگ است زیرا در اکثر اوقات بخش‌های دانه‌ریز زغالسنگ مقدار قابل توجهی نرمه‌ی رس و کانی‌های سیلیکاته دارند که حذف انتخابی این ذرات از بخش دانه‌ریز زغال بسیار مشکل است. بنابراین بهتر است قبل از عملیات فلوتاسیون ابتدا بخش‌های دانه‌ریز از ذرات درشت جدا شوند (رضائی، ۱۳۷۵). به همین علت ذرات زیر ۷۵ میکرون به دلیل دارا بودن مقدار قابل توجهی از نرمه زغال، رس و کانی‌های سیلیکاته به صورت انتخابی از فرآیند حذف شدند.



شکل ۳-۲: شیکر خشک آزمایشگاهی

عملیات دانه بندی توسط شیکر^۱ خشک آزمایشگاهی ساخت شرکت دانش فراوران ایران انجام شد (شکل ۳-۲). دانه بندی خوراک به وسیله‌ی سرنده‌های شماره ۱۸، ۳۵، ۷۰ و ۲۰۰ انجام شده و ابعاد زیر ۲۰۰ مش برای حذف از فرآیند کنار گذاشته شد. مقدار خوراک نهایی به دست آمده از هر دامنه‌ی ابعادی و میزان نرمه

^۱. Shaker

در جدول ۳-۱ آمده است. در هر بار عملیات دانه‌بندی، مقدار حدودی ۱۵۰ تا ۲۰۰ گرم از نمونه به مدت ۱۵ دقیقه توسط شیکر دانه‌بندی شد سپس نمونه‌ها بعد از همگن شدن به کیسه پلاستیکی منتقل شده و تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری شدند.

۳-۳- روش تعیین درصد خاکستر

یکی از پارامترهای اصلی تعیین‌کننده‌ی کیفیت زغالسنگ، تعیین میزان خاکستر است. مواد غیر قابل سوختن در زغالسنگ را خاکستر می‌نامند و از آنجا که این مواد نقش منفی و نامطلوبی دارند، لذا قبل از استفاده باید شستشو و از محیط عمل خارج شوند (رضایی، ۱۳۸۰).

طبق استاندارد ASTM D-3174 برای تعیین خاکستر، مقدار ۱ تا ۲ گرم زغالسنگ را در بوتله چینی وزن کرده، سپس بوتله به مدت یک ساعت و سی دقیقه در کوره که دمای آن به ۸۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رسیده است، قرار داده شد. کوره‌ی آزمایشگاه، کوره‌ی الکتریکی ساخت ایران (Amalgam) بوده و برای تولید دماهای بالا تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌شود. از این کوره برای تعیین خاکستر و مواد فرار زغالسنگ استفاده می‌شود (شکل ۳-۳).



شکل ۳-۳: کوره‌ی الکتریکی آزمایشگاهی

بوته‌ها از کوره خارج شده و روی آجر نسوز قرار می‌گیرند تا به دمای محیط برسند و بتوان آن‌ها را وزن کرد. برای محاسبه‌ی خاکستر از توزین بوته‌ی خالی، بوته حاوی زغالسنگ و وزن بوته بعد از کوره استفاده می‌شود به همین علت باید بوته را بعد از کوره روی آجر نسوز قرار داد تا در وهله‌ی اول باعث آتش‌سوزی نشود و در مرحله‌ی دوم در اثر چسبیدن ذرات به بوته‌های داغ در وزن نهایی مشکلی پیش نیاید. تمامی وزن کردن‌ها توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ صورت می‌گیرد (شکل ۳-۴)



شکل ۳-۴: ترازوی دیجیتال

درصد خاکستر طبق معادله ۳-۱ تعیین می‌شود (مونتگومری، ۱۹۷۸).

$$\text{Ash} = \left(\frac{A-B}{C} \right) * 100 \quad (۳-۱)$$

Ash = خاکستر موجود در نمونه (%)

A = وزن بوته و خاکستر مانده بعد از کوره (g)

B = وزن بوته خالی (g)

C = وزن نمونه زغالسنگ (g)

شکل ۳-۵ نمونه‌ای از اندازه‌گیری خاکستر را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵: نمایی از بوت‌های اندازه‌گیری خاکستر، قبل و بعد از کوره

۳-۴- روش تعیین درصد مواد فرار

مواد فرار عبارت از گازهایی است که در اثر تقطیر زغالسنگ در ظروف سرپسته در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد از آن خارج می‌شود و شامل هیدروکربن‌ها، گازهای گوگردی، آمونیاک، هیدروژن، منواکسید کربن، متان، بخار قطران، دی‌اکسید کربن و بخار آب است (رضایی، ۱۳۸۰).

طبق استاندارد ASTM D-3175 برای اندازه‌گیری مواد فرار، مقدار ۵ گرم زغالسنگ را داخل بوت‌ه درب‌دار ریخته و به مدت ۷ دقیقه در دمای ۸۷۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شوند. پس از خنک شدن بوت‌ه، مطابق رابطه‌ی ۳-۲ میزان مواد فرار محاسبه می‌شود (مونتگومری، ۱۹۷۸).

$$Q = \left[\left(\frac{A-B}{C} \right) - \text{Ash} \right] * 100 \quad (3-2)$$

Q = مواد فرار موجود در نمونه (%)

A = وزن بوت‌ه و نمونه مانده بعد از کوره (g)

B = وزن بوت‌ه خالی (g)

C = وزن نمونه زغالسنگ (g)

Ash = خاکستر موجود در نمونه

شکل ۳-۶ نمونه‌ای از اندازه‌گیری مواد فرار را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶: نمایی از بوته‌ی اندازه‌گیری مواد فرار بعد از کوره

۵-۳- روش تعیین درصد عیار زغالسنگ

مقدار درصد عیار زغالسنگ از رابطه‌ی ۳-۳ به‌دست می‌آید، اما از آن‌جا که محاسبه‌ی رطوبت زغالسنگ باید بلافاصله بعد از استخراج انجام شود ولی نمونه‌ی معرف استفاده شده، مدت زمان زیادی را از استخراج تا آزمایشگاه سپری کرده بود، میزان رطوبت آن صفر در نظر گرفته شد.

$$C = 100 - [Ash + Q + W] \quad (3-3)$$

C = عیار زغالسنگ (%)

Ash = خاکستر موجود در نمونه (%)

Q = مواد فرار موجود در نمونه (%)

W = میزان رطوبت (%)

۳-۶- آنالیز اولیه‌ی خوراک فلوتاسیون

بعد از انجام مراحل آماده‌سازی نمونه و دانه‌بندی، میزان خاکستر و مواد فرار در هر یک از دامنهی اندازه ذرات تعیین شد که نتایج آن در جدول ۲-۳ آمده است.

جدول ۲-۳: آنالیز اولیه‌ی خوراک

پارامترها	ابعاد (مش)			
	زیر ۲۰۰	۷۰ - ۲۰۰	۳۵ - ۷۰	۱۸ - ۳۵
مقدار خاکستر (%)	۳۰	۳۰	۳۲	۳۴
مقدار مواد فرار (%)	۵۳	۵۳	۵۱	۵۰

۳-۷- روش محاسبه‌ی کارآیی جدایش^۱ عملیات فلوتاسیون

در روش‌های فرآوری مواد معدنی (به ویژه فلوتاسیون)، وقتی از دو سری آزمایش مشابه نتایج مختلفی به دست آید، مثلاً در یک سری از آزمایش‌ها عیار و بازیابی بیشتر از سری دیگر باشد، انتخاب بین سری اول و دوم کار بسیار ساده‌ای است اما اگر در یک سری از آزمایش‌ها عیار بالا و بازیابی پایین و یا برعکس، عیار پایین و بازیابی بالا باشد، انتخاب بین سری اول آزمایش‌ها و سری دوم به پارامترهایی بستگی دارد که تحت

^۱. Separation Efficiency; S.E.

عنوان کارآیی جدایش قابل بررسی است (رضائی، ۱۳۷۵). با استفاده از رابطه‌ی ۳-۴ می‌توان این مقدار را محاسبه نمود (بنیسی، ۱۳۸۸).

$$S.E. = \frac{c*(f-t)*(c-f)*(100-t)}{f*(c-t)^2*(100-f)} * 100 \quad (3-4)$$

S.E. = کارآیی جدایش (%)

c = عیار زغالسنگ در کنسانتره (%)

f = عیار زغالسنگ در خوراک (%)

t = عیار زغالسنگ در باطله (%)

از مطالعه‌ی کارآیی جدایش می‌توان در مقایسه‌ی کارآیی وضعیت‌های مختلف عملیات براساس عملکرد انتخابی استفاده کرد اما در مورد پارامترهای اقتصادی نقش مهمی ندارد. بنابراین بالا بودن کارآیی جدایش دلیلی بر بازگشت سرمایه نیست (رضائی، ۱۳۷۵).

۸-۳- روش محاسبه‌ی درصد کاهش خاکستر^۱ عملیات فلو تاسیون

برای محاسبه‌ی کاهش محتوای خاکستر، از رابطه‌ی ۳-۵ بهره گرفته شد (موکرجی و بورتاکور، ۲۰۰۳).

$$\text{Ash reduction} = \left(\frac{C_f - C_c}{C_f} \right) * 100 \quad (3-5)$$

Ash reduction = کاهش خاکستر (%)

C_f = خاکستر موجود در خوراک

C_c = خاکستر موجود در کنسانتره

^۱ .Ash reduction

۹-۳- انتخاب پارامترهای مورد بررسی و سطوح هر یک از آن‌ها

فاکتورهای مورد بررسی شامل زمان، فرکانس، دما، کلکتور، کف ساز، اندازه ذرات و توان دستگاه است که با وارد کردن هر کدام از آن‌ها و میزان هر یک به عنوان ورودی نرم‌افزار Qualitek-4، طرح اولیه‌ی آزمایش با ۲۷ آزمایش تعیین شد و سپس برای جلوگیری از عملکرد انتخابی، آزمایش‌ها به صورت تصادفی انجام شدند. در جدول ۳-۳ هر یک از پارامترهای استفاده شده در آزمایش‌ها به همراه سطوح‌شان آمده است.

جدول ۳-۳: پارامترهای مورد بررسی و سطوح هر یک از آن‌ها در آزمایش‌ها

۳	۲	۱	سطح پارامتر
۳	۲	۱	زمان کف‌گیری (دقیقه)
۸۰	۳۷	۰	فرکانس (کیلو هرتز)
۷۵	۵۰	۲۵	دما (درجه‌ی سانتی‌گراد)
۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	کلکتور (نفت سفید) (گرم بر تن)
۱۳۰	۸۰	۳۰	کف‌ساز (متیل ایزوبوتیل کربونیل) ^۲ (گرم بر تن)
۳	۲	۱	اندازه ذرات (مش)
۸۰	۴۰	۰	توان دستگاه (درصد)

انتخاب پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش، طبق تحقیقات گذشته که در دانشگاه صنعتی شاهرود بر روی زغالسنگ انجام شده، صورت گرفته است. پارامترهای هدف در این پژوهش، میزان درصد کاهش خاکستر در کنسانتره و افزایش کارایی جدایش انتخاب شدند که یافتن مقدار بهینه‌ی پارامترهای آزمایش برای دست یافتن به مقدار بیشینه‌ی کارایی جدایش از الویت‌های نخست تحقیق حاضر است. در ادامه بعد

^۱ Kerosene

^۲ Methyl Isobutyl Carbonyl

از وارد کردن پارامترها و مقادیر سطوح هر یک در نرم‌افزار Qualitek-4، طرح ۲۷ آزمایشی توسط نرم‌افزار معرفی شد. طرح کلی آزمایش‌ها در جدول ۳-۴ آمده است.

جدول ۳-۴: طرح آزمایش‌ها (L27)

شماره تست	اجرای تست	پارامتر ۱ زمان (دقیقه)	پارامتر ۲ فرکانس (کیلو هرتز)	پارامتر ۳ دما (درجه‌ی سانتی‌گراد)	پارامتر ۴ کلکتور (گرم بر تن)	پارامتر ۵ کفساز (گرم بر تن)	پارامتر ۶ اندازه ذرات (مش)	پارامتر ۷ توان (درصد)
۱	۲۳	۱	۰	۲۵	۵۰۰	۳۰	۱	۰
۲	۷	۱	۰	۲۵	۵۰۰	۸۰	۲	۰
۳	۱۴	۱	۰	۲۵	۵۰۰	۱۳۰	۳	۰
۴	۵	۱	۳۷	۵۰	۱۰۰۰	۳۰	۱	۴۰
۵	۱۶	۱	۳۷	۵۰	۱۰۰۰	۸۰	۲	۸۰
۶	۲۵	۱	۳۷	۵۰	۱۰۰۰	۱۳۰	۳	۴۰
۷	۲۰	۱	۸۰	۷۵	۱۵۰۰	۳۰	۱	۴۰
۸	۲۲	۱	۸۰	۷۵	۱۵۰۰	۸۰	۲	۸۰
۹	۱۳	۱	۸۰	۷۵	۱۵۰۰	۱۳۰	۳	۴۰
۱۰	۱۸	۲	۰	۵۰	۱۵۰۰	۳۰	۲	۰
۱۱	۲۶	۲	۰	۵۰	۱۵۰۰	۸۰	۳	۰
۱۲	۳	۲	۰	۵۰	۱۵۰۰	۱۳۰	۱	۰
۱۳	۱۲	۲	۳۷	۷۵	۵۰۰	۳۰	۲	۴۰
۱۴	۱۹	۲	۳۷	۷۵	۵۰۰	۸۰	۳	۸۰
۱۵	۲	۲	۳۷	۷۵	۵۰۰	۱۳۰	۱	۸۰
۱۶	۴	۲	۸۰	۲۵	۱۰۰۰	۳۰	۲	۴۰
۱۷	۶	۲	۸۰	۲۵	۱۰۰۰	۸۰	۳	۸۰
۱۸	۲۷	۲	۸۰	۲۵	۱۰۰۰	۱۳۰	۱	۸۰
۱۹	۱۰	۳	۰	۷۵	۱۰۰۰	۳۰	۳	۰
۲۰	۹	۳	۰	۷۵	۱۰۰۰	۸۰	۱	۰
۲۱	۱	۳	۰	۷۵	۱۰۰۰	۱۳۰	۲	۰
۲۲	۲۱	۳	۳۷	۲۵	۱۵۰۰	۳۰	۳	۴۰
۲۳	۱۵	۳	۳۷	۲۵	۱۵۰۰	۸۰	۱	۴۰
۲۴	۲۴	۳	۳۷	۲۵	۱۵۰۰	۱۳۰	۲	۸۰
۲۵	۱۷	۳	۸۰	۵۰	۵۰۰	۳۰	۳	۸۰

ادامه‌ی جدول ۳-۴: طرح آزمایش‌ها (L27)

۸۰	۱	۸۰	۵۰۰	۵۰	۸۰	۳	۸	۲۶
۴۰	۲	۱۳۰	۵۰۰	۵۰	۸۰	۳	۱۱	۲۷

۱۰-۳- شرایط انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌های فلوتاسیون از ماشین فلوتاسیون مکانیکی نوع دنور ساخت کشور انگلستان با حجم سلول یک لیتری استفاده شد (شکل ۳-۷).

پارامترهای عملیاتی مانند سرعت چرخش روتور، pH، زمان آماده‌سازی اولیه (زغالسنگ و آب)، زمان آماده‌سازی کلکتور و کف‌ساز (تاثیرگذاری بر روی ذرات زغال) طبق استاندارد ASTM D5114 – 90، جهت به دست آوردن شرایط بهینه، ثابت در نظر گرفته شد البته با مطالعه‌ی تحقیقات پیشین فلوتاسیون زغالسنگ، تغییرات جزئی در این پارامترها اعمال شد. ثابت نگه داشتن این پارامترها با استناد بر تجربه‌ی کارهای عملی انجام شده در دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفت.



شکل ۳-۷: ماشین فلوتاسیون مکانیکی

آب استفاده شده برای تمامی آزمایش‌ها، آب مقطر با pH خنثی ($pH = 7$) بوده است تا از تاثیرگذاری محیط قلیایی یا اسیدی بر فلوتاسیون جلوگیری شود. سرعت چرخش روتور ثابت و ۹۵۰ دور در دقیقه در نظر گرفته شد تا فرآیند در محیطی آرام و بدون اغتشاش انجام شود. دانه‌بندی یکی از پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش است لذا برای هر آزمایش بعد از آماده کردن خوراک طبق طرح آزمایش، پالپ با درصد جامد ۱۰٪، به این ترتیب که ۱۰۰ گرم زغال با ۹۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط می‌شود، آماده شده و طبق استاندارد ASTM D5114 – 90 به مدت ۵ دقیقه تحت آماده‌سازی اولیه (دور روتور ۹۵۰ دور در دقیقه) قرار گرفت. به علت آبران بودن طبیعی ذرات زغالسنگ، هدف از این آماده‌سازی خیس شدن کامل سطح زغالسنگ جهت ایجاد آمادگی برای تاثیر کلکتور و کفساز بوده است که در نهایت منجر به متصل شدن ذرات زغالسنگ به حباب هوا، صعود به کف و در نهایت راه یافتن به کنسانتره می‌شود.

بعد از سپری شدن ۵ دقیقه آماده‌سازی اولیه، مقدار مشخص کلکتور طبق طرح آزمایش به سلول اضافه می‌شود و به مدت ۹۰ ثانیه برای آبران کردن کامل ذرات زمان دارد سپس با اتمام ۹۰ ثانیه، کفساز طبق مقدار معین خود در هر آزمایش به سلول اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه با تاثیر خود بر پالپ باعث ایجاد پایداری کف در سطح سلول می‌شود. در شکل ۳-۷ نمونه‌ای از حباب‌های تشکیل شده روی سطح سلول در زمان آماده‌سازی مشاهده می‌شود.

بعد از گذشت ۷ دقیقه از شروع فرآیند آماده‌سازی، شیر هوا باز شده و عملیات کف‌گیری آغاز می‌شود. مدت زمان کف‌گیری یکی از پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش است لذا متناسب با شرایط هر آزمایش، کف‌گیری انجام می‌شود. عمل کف‌گیری بایستی با آهنگ یکسانی انجام شود تا در مراحل بعدی مشخص کردن پارامترهای پاسخ با مشکلی مانند غیر واقعی بودن اعداد بازیابی و کاهش عیار زغال و غیره مواجه نشویم (خطای آزمایش کم باشد).



شکل ۳-۷: تشکیل حباب روی سطح سلول در اواخر آماده‌سازی

هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی تاثیر امواج مافوق صوت بر فلوتاسیون زغالسنگ است از این رو ۱۸ آزمایش از ۲۷ آزمایش طرح آزمایشی در حضور امواج مافوق صوت انجام می‌شود (جدول ۳-۴). برای داشتن محیطی با انتشار یکنواخت امواج، از حمام تولید امواج مافوق صوت استفاده شده است. این دستگاه ساخت شرکت Elma کشور آلمان است (شکل ۳-۸).



شکل ۳-۸: حمام امواج مافوق صوت

حمام امواج مافوق صوت در واقع یک ظرف فلزی است که مقداری آب داخل آن ریخته می‌شود. دستگاه متصل به این ظرف، امواج مافوق صوت تولید می‌کند. این امواج می‌توانند پیوندهای بین تکه‌های کلوخه شده را بشکنند و باعث افزایش کیفیت محلول شوند.

از موارد کاربرد این دستگاه در صنعت می‌توان به پخش ذرات داخل محلول و در نتیجه یکنواخت شدن محلول و تمیزکردن تجهیزات اشاره کرد که در این تحقیق با کمک گرفتن از همین دو ویژگی اول به تمیز کردن سطح ذرات زغالسنگ پرداخته و در مرحله‌ی بعد ذرات زغالسنگ را به صورت یکنواخت درون سلول توزیع خواهند شد. برای انجام آزمایش‌ها، سلول یک لیتری فلوتاسیون درون ظرف حمام به صورت غوطه‌ور قرار گرفته سپس این مجموعه در پایین دستگاه فلوتاسیون مکانیکی جای گرفت (شکل ۳-۹). ظرف حمام توسط آب مقطر پر شد تا آسیبی به دستگاه وارد نشود.



شکل ۳-۹: حمام امواج مافوق صوت و ماشین فلوتاسیون مکانیکی

بعد از اتمام فرآیند فلو تاسیون، کنسانتره و باطله فرآیند توسط کاغذ فیلتر، فیلتر شده و به مدت ۲۴ ساعت جهت خشک شدن، درون آون قرار می گیرند. در شکل ۳-۱۰ و ۳-۱۱ نمونه هایی از فیلتر کردن کنسانتره و باطله نشان داده شده است.

به دلیل کم بودن حجم آب کنسانتره، فیلتر آن توسط قیف و ارلن انجام شد اما در مورد باطله به علت زیاد بودن آب باطله از فیلتر پرس استفاده شد.



شکل ۳-۱۰: فیلتر کردن کنسانتره



شکل ۳-۱۱: فیلتر کردن باطله

گرمخانه یا آون آزمایشگاه ساخت کشور آلمان (Memmert) بوده و با تنظیم دمای آن روی ۱۰۰ درجه سانتی گراد بعد از گذشت ۲۴ ساعت به طور کامل رطوبت نمونه‌ها را از بین می‌برد (شکل ۳-۱۲).



شکل ۳-۱۲: گرمخانه یا آون

به علت اهمیت وزن نمونه‌ها برای محاسبه‌ی بازیابی فرآیند، بایستی ابتدا نمونه‌ها را وزن کرده آن‌گاه کنسانتره و باطله‌ی خشک شده برای محاسبه‌ی خاکستر و مواد فرار درون کیسه‌های پلاستیکی نگهداری می‌شوند.

۳-۱۱- تعیین درصد کارآیی جدایش و درصد کاهش خاکستر

بعد از انجام آزمایش‌ها و به‌دست آوردن عیار زغالسنگ در خوراک، کنسانتره و باطله با استفاده از رابطه‌ی ۳-۴ کارآیی جدایش هر آزمایش محاسبه شد. همچنین میزان خاکستر موجود در کنسانتره هر آزمایش نیز اندازه‌گیری می‌شود آن‌گاه با استفاده از رابطه‌ی ۳-۵ میزان درصد کاهش خاکستر محاسبه شد (جدول ۳-۵).

جدول ۳-۵: محاسبه‌ی درصد کاهش خاکستر و کارایی جدایش

شماره آزمایش	عیار زغالسنگ در خوراک	عیار زغالسنگ در کنسانتره	عیار زغالسنگ در باطله	درصد کاهش خاکستر (%)	کارایی جدایش (%)
۱	۱۵/۳۰	۱۶/۷۶	۱۱/۴۶	۳۹/۳۵	۲۲/۸۹
۲	۱۶/۰۵	۱۶/۴۹	۱۱/۶۶	۳۲/۱۰	۹/۰۱
۳	۱۶/۷۲	۱۷/۷۵	۱۳/۷۱	۲۴/۱۱	۲۰/۸۶
۴	۱۶/۰۵	۱۶/۸۰	۱۰/۷۰	۲۱/۸۸	۱۲/۰۴
۵	۱۶/۷۲	۱۷/۸۱	۱۱/۳۲	۲۶/۱۸	۱۵/۸۰
۶	۱۵/۳۰	۱۶/۷۲	۲/۲۴	۳۹/۴۲	۱۱/۱۸
۷	۱۶/۷۲	۱۶/۹۷	۱۲/۸۳	۴۱/۹۱	۵/۹۹
۸	۱۵/۳۰	۱۵/۹۳	۱۱/۵۴	۶۰/۱۲	۱۳/۴۴
۹	۱۶/۰۵	۱۶/۴۹	۱۱/۸۷	۳۵/۹۹	۹/۳۵
۱۰	۱۵/۳۰	۱۷/۷۶	۱۳/۵۱	۶۴/۱۸	۲۸/۸۸
۱۱	۱۶/۰۵	۱۶/۳۲	۱۲/۳۶	۳۰/۲۶	۶/۷۴
۱۲	۱۶/۷۲	۱۷/۱۸	۱۳/۱۴	۲۱/۵۷	۱۰/۷۷
۱۳	۱۶/۰۵	۱۹/۲۷	۱۴/۶۲	۷۸/۳۲	۲۵/۹۸
۱۴	۱۶/۷۲	۱۸/۵۵	۱۴/۴۹	۶۹/۴۶	۲۸/۲۲
۱۵	۱۵/۳۰	۱۸/۶۴	۱۴/۲۳	۷۸/۷۴	۲۲/۶۰
۱۶	۱۶/۰۵	۱۶/۶۶	۱۱/۵۰	۳۵/۲۶	۱۱/۴۷
۱۷	۱۶/۷۲	۱۷/۳۴	۱۲/۷۰	۲۵/۲۷	۱۸/۲۴
۱۸	۱۵/۳۰	۱۶/۱۲	۱۱/۱۱	۲۳/۰۱	۱۵/۱۰
۱۹	۱۶/۷۲	۱۷/۳۴	۱۱/۹۵	۳۴/۰۰	۱۱/۲۲
۲۰	۱۵/۳۰	۱۶/۰۸	۱۰/۲۴	۳۱/۴۷	۱۲/۸۹
۲۱	۱۶/۰۵	۱۶/۸۷	۹/۵۰	۲۵/۱۹	۱۱/۲۰
۲۲	۱۶/۷۲	۱۶/۹۷	۱۳/۳۱	۵۷/۳۶	۶/۸۱
۲۳	۱۵/۳۰	۱۷/۶۷	۱۲/۵۴	۶۱/۸۹	۲۹/۶۶
۲۴	۱۶/۰۵	۱۷/۵۴	۱۳/۵۷	۵۷/۷۳	۲۶/۳۷
۲۵	۱۵/۳۰	۱۸/۷۸	۱۴/۰۳	۷۲/۹۴	۲۴/۴۰
۲۶	۱۶/۰۵	۱۹/۰۱	۱۴/۲۲	۷۰/۵۳	۲۸/۵۸
۲۷	۱۶/۷۲	۱۸/۱۱	۱۴/۷۲	۵۷/۶۲	۲۶/۸۲

۱۲-۳- جمع‌بندی

در این فصل روند آزمایش از آماده‌سازی اولیه‌ی نمونه تا مشخص کردن طرح آزمایشی برای انجام آزمایش‌ها مشخص شد. پارامترهای هدف و نحوه‌ی محاسبه‌ی آن‌ها بیان شده و در نهایت شرایط انجام آزمایش‌ها، اندازه‌گیری پارامترهای مختلف و نحوه‌ی انجام آن‌ها به تفصیل بیان شده است.

از این رو با شناخت دقیق فرآیند، در فصل چهارم تحلیل یافته‌های حاصل از آزمایش‌ها انجام شده است.

فصل چهارم

یافته‌های تحقیق

۱-۴- مقدمه

همان‌طور که در فصل سوم اشاره شد، آزمایش‌های فلوتاسیون با تعداد ۷ پارامتر در سه سطح متغیر، انجام شدند. در این پژوهش به علت اهمیت میزان درصد کاهش خاکستر در کنسانتره و افزایش کارایی جدایش برای صنعت زغالسنگ، این دو پارامتر به عنوان پارامترهای هدف معرفی شدند.

برای تحلیل پارامترهای هدف از نرم‌افزار Qualitek-4 استفاده می‌شود. در این نرم افزار ابتدا نوع طرح آزمایشی تعیین می‌شود که این اقدام نیز با استفاده از تعداد پارامترهای مورد بررسی و سطوح آن‌ها صورت می‌گیرد. در این پژوهش با توجه به ۷ پارامتر سه سطحی، طرح L27 انتخاب شده و تعداد ۲۷ آزمایش تحت شرایط نرم‌افزار و به صورت تصادفی انجام شد.

در نرم‌افزار Qualitek-4 هر پاسخ به صورت جداگانه وارد می‌شود و نرم افزار به بررسی آن می‌پردازد. در انتهای محاسبات نرم افزاری، نرم افزار شرایط بهینه‌ای را معرفی کرده و میزان هر پارامتر پاسخ را برای آن مشخص می‌کند. از این رو برای اعتبارسنجی شرایط بهینه، آزمایش مدل پیشنهادی در آزمایشگاه انجام شده و نتیجه‌ی حاصل با نرم‌افزار مقایسه شد. برای حداقل کردن میزان خطا، هر آزمایش اعتبارسنجی، سه بار انجام گرفت.

بعد از انجام آزمایش‌ها و به‌دست آوردن عیار زغالسنگ در خوراک، کنسانتره و باطله، با استفاده از رابطه‌های ۳-۴ و ۵-۳ به ترتیب میزان کارایی جدایش و درصد کاهش خاکستر در هر آزمایش محاسبه شد.

در این فصل با استفاده از خروجی نرم‌افزار به تحلیل پارامترهای پاسخ پرداخته و حالت بهینه آزمایش‌ها مشخص می‌شود. در ادامه نتایج آزمایش‌های اعتبارسنجی حالت بهینه نیز گزارش شده است.

۴-۲- نتایج درصد کاهش خاکستر کنسانتره

۴-۲-۱- مقدمه

وجود خاکستر در زغال سنگ باعث افزایش مصرف معرف‌ها، ایجاد مشکل در فرآیند تولید فولاد، افزایش اکسایش کک و در نهایت کاهش حساسیت و کارایی کوره‌ها می‌شود لذا در فرآوری زغالسنگ توجه به میزان کاهش خاکستر از اهمیت فراوانی برخوردار است.

۴-۲-۲- بررسی و تحلیل نتایج خروجی نرم‌افزار

خوراک ورودی آزمایش‌های فلوتاسیون به طور میانگین دارای ۳۰ درصد خاکستر بود که بعد انجام یک مرحله فلوتاسیون، میزان خاکستر به طور میانگین تا ۵۰ درصد کاهش یافته و به ۱۵ درصد رسید. همانطور که در جدول ۴-۱ آمده، میزان خاکستر در تعدادی از آزمایش‌ها از ۳۰ درصد خوراک به ۷ تا ۹ درصد در کنسانتره رسید. این میزان کاهش خاکستر در مرحله‌ی اول فلوتاسیون (مرحله‌ی رافر) دست‌آورد خوبی به شمار می‌آید.

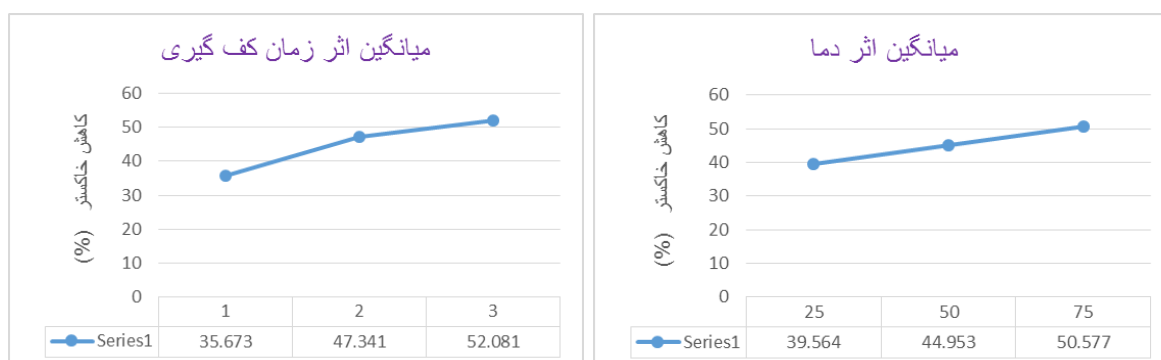
جدول ۴-۱: میزان خاکستر در خوراک، کنسانتره و باطله

شماره آزمایش	خاکستر خوراک	خاکستر کنسانتره	خاکستر باطله	شماره آزمایش	خاکستر خوراک	خاکستر کنسانتره	خاکستر باطله
۱	۳۴	۲۰/۶۲	۵۷/۳۷	۱۵	۳۴	۷/۲۳	۳۷/۳۲
۲	۳۲/۴۳	۲۲/۰۲	۵۷/۸۸	۱۶	۳۲/۴۳	۲۱/۰۰	۵۳/۶۶
۳	۲۹/۹۲	۲۲/۷۱	۴۵/۹۱	۱۷	۲۹/۹۲	۲۲/۳۶	۴۹/۱۴
۴	۳۲/۴۳	۲۵/۳۳	۶۷/۰۲	۱۸	۳۴	۲۶/۱۸	۶۱/۷۶
۵	۲۹/۹۲	۲۲/۰۹	۶۰/۶۳	۱۹	۲۹/۹۲	۱۹/۷۵	۵۷/۰۱
۶	۳۴	۲۰/۶۰	۶۲/۰۱	۲۰	۳۴	۲۳/۳۰	۶۵/۳۵

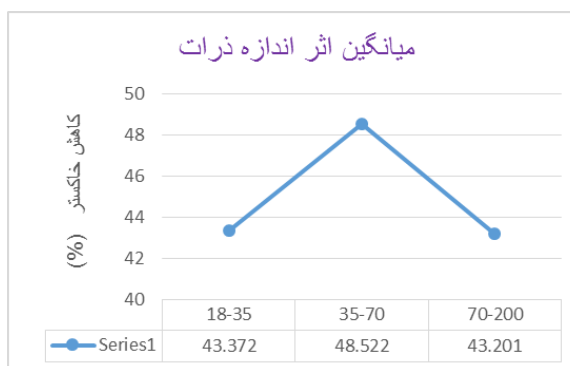
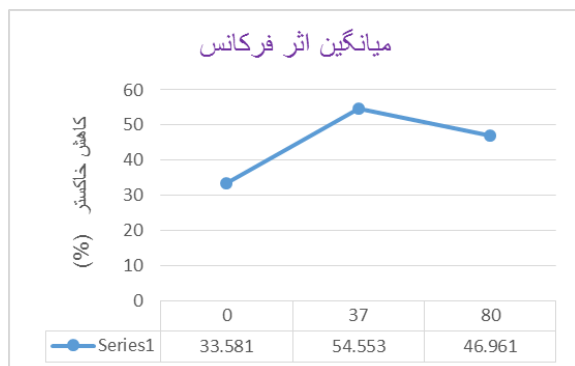
ادامه ی جدول ۴-۱: میزان خاکستر در خوراک، کنسانتره و باطله

۷	۲۹/۹۲	۱۷/۳۸	۴۶/۹۸	۲۱	۳۲/۴۳	۲۴/۲۶	۷۴/۰۵
۸	۳۴	۱۳/۵۶	۴۷/۵۷	۲۲	۲۹/۹۲	۱۲/۷۶	۳۹/۲۵
۹	۳۲/۴۳	۲۰/۷۶	۵۴/۰۱	۲۳	۳۴	۱۲/۹۶	۴۷/۹۰
۱۰	۳۴	۱۲/۱۸	۴۱/۹۵	۲۴	۳۲/۴۳	۱۳/۷۱	۴۴/۲۱
۱۱	۳۲/۴۳	۲۲/۶۲	۵۳/۰۷	۲۵	۳۴	۹/۲۰	۳۹/۸۶
۱۲	۲۹/۹۲	۲۳/۴۷	۴۵/۰۱	۲۶	۳۲/۴۳	۹/۵۶	۳۷/۸۲
۱۳	۳۲/۴۳	۷/۰۳	۳۴/۴۴	۲۷	۲۹/۹۲	۱۲/۶۸	۳۷/۳۳
۱۴	۲۹/۹۲	۹/۱۴	۳۳/۱۳	طرح معرفی شده: ۲۷ آزمایش			

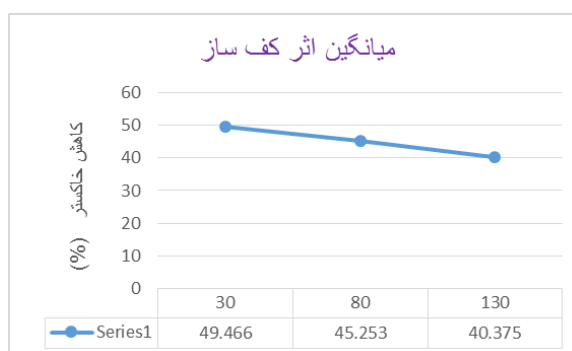
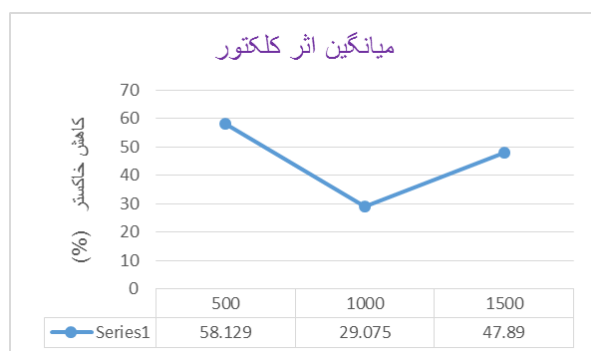
۳-۲-۴- تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی بر میزان درصد کاهش خاکستر کنسانتره همان طور که در شکل های ۴-۱ و ۴-۴ مشاهده می شود میانگین اثر هر یک از پارامترها در سه سطح تأثیرگذاری، به مجزا مورد بررسی قرار گرفته است. به این ترتیب بیشترین میزان تأثیر پارامترهای زمان کف گیری، دما و توان اعمالی دستگاه در سطح سوم، فرکانس و اندازه ذرات در سطح دوم و کلکتور و کف ساز در سطح اول گزارش شده است.



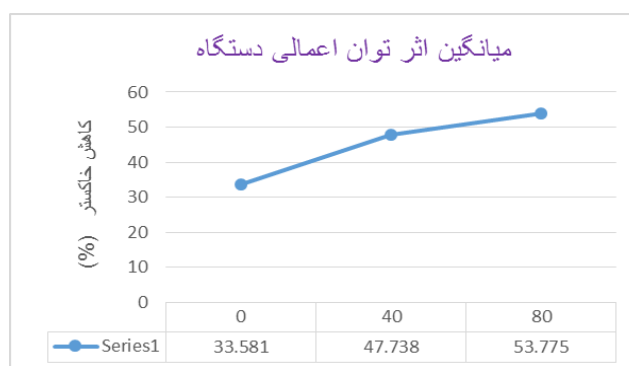
شکل ۴-۱: تأثیر جداگانه ی پارامترهای دما و زمان کف گیری بر روی درصد کاهش خاکستر کنسانتره



شکل ۴-۲: تأثیر جداگانه‌ی پارامترهای اندازه ذرات و فرکانس بر روی درصد کاهش خاکستر کنسانتره



شکل ۴-۳: تأثیر جداگانه‌ی پارامترهای کف ساز و کلکتور بر روی درصد کاهش خاکستر کنسانتره



شکل ۴-۴: تأثیر جداگانه‌ی پارامتر توان اعمالی دستگاه بر روی درصد کاهش خاکستر کنسانتره

در طی فلو تاسیون، فرآیند تحت تأثیر پارامترهای مختلفی قرار می‌گیرد که علاوه بر تأثیر مجزایی که هر یک بر فرآیند دارند، در کنار هم تأثیرات متقابلی نیز بر فرآیند دارند، به این ترتیب که می‌توانند باعث افزایش یا کاهش تأثیر یکدیگر شوند. در ادامه تأثیر متقابل پارامترها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به منظور دستیابی به میزان تأثیر هر یک از پارامترها در کاهش میزان خاکستر کنسانتره، جدول آنالیز واریانس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این جدول با محاسبه‌ی درجه آزادی^۱، مجموع مربعات^۲، واریانس^۳ و مجموع حذف شده‌ها^۴، ستون درصد تأثیر^۵ محاسبه می‌شود که این میزان، نشان دهنده‌ی تأثیر هر یک از فاکتورها و اندرکنش آن‌ها در تغییرپذیری نتایج آزمایش‌ها است (جدول ۴-۲).

جدول ۴-۲: جدول آنالیز واریانس

پارامترها	درجه‌ی آزادی	مجموع مربعات	واریانس	مجموع حذف شده‌ها	درصد تأثیر
زمان	۲	۱۲۸۳/۴۵۹	۶۴۱/۷۲۹	۱۲۸۳/۴۵۹	۱۲/۵۳۴
فرکانس	۲	۲۰۲۹/۴۹۸	۱۰۱۴/۷۴۹	۲۰۲۹/۴۹۸	۱۹/۸۲
دما	۲	۵۴۵/۸۹۷	۲۷۲/۹۴۸	۵۴۵/۸۹۷	۵/۳۳۱
کلکتور	۲	۳۹۰۳/۰۰۴	۱۹۵۴/۵۰۲	۳۹۰۳/۰۰۴	۳۸/۱۷۷
کف‌ساز	۲	۳۷۲/۵۸۲	۱۸۶/۲۹۱	۳۷۲/۵۸۲	۳/۶۳۸
اندازه ذرات	۲	۱۶۴/۶۰۱	۸۲/۳	۱۶۴/۶۰۱	۱/۶۰۷
توان	۲	۱۹۳۴/۰۹۶	۹۶۷/۰۴۸	۱۹۳۴/۰۹۶	۱۸/۸۸۹
خطا	۱۲	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱		۰/۰۰۴
مجموع	۲۶	۱۱۳۵۷/۹۹۸			۱۰۰/٪۰۰

^۱. Degree Of Liberation (DOF), (f)

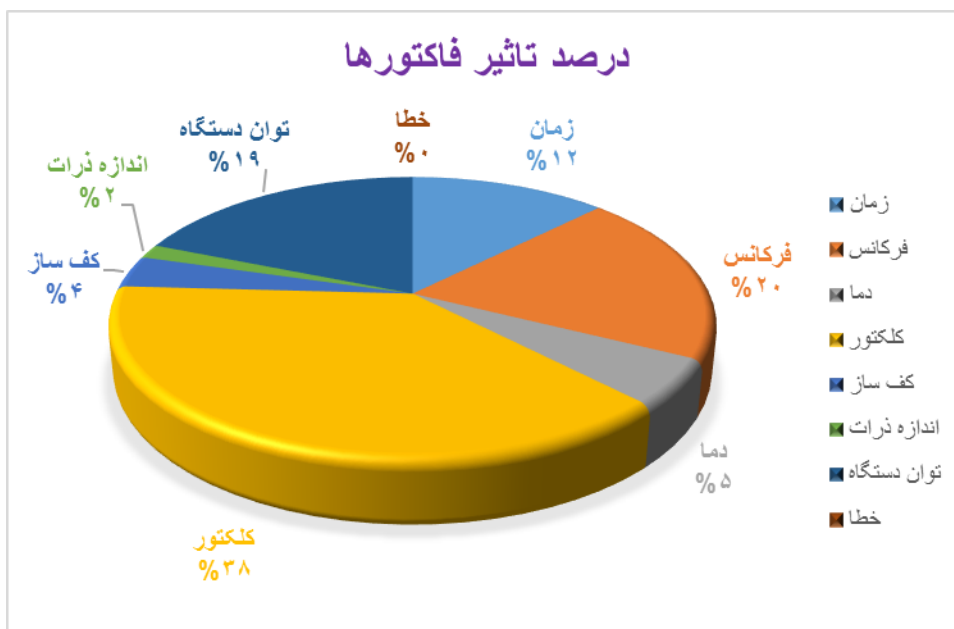
^۲. Sum Of Sqr (f)

^۳. Variance (V)

^۴. Pure Sum (S'')

^۵. Percent (%), (P)

نتایج جدول ۴-۲ با سطح اطمینان ۹۰ درصد و خطای ± 0.004 معنی‌دار بوده و نشان می‌دهد بیش‌ترین پارامترهای موثر در درصد کاهش خاکستر در فرآیند فلوتاسیون زغالسنگ، ابتدا میزان کلکتور و در مرحله ی بعد فرکانس و توان اعمالی امواج مافوق صوت است. برای بهتر نشان دادن تأثیر نسبی فاکتورها بر روی فرآیند از نمودار دایره‌ای استفاده می‌شود (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵: درصد تأثیر هر یک پارامترها بر فلوتاسیون

بعد از مشخص کردن درصد تأثیر هر یک از پارامترها به کمک جدول آنالیز واریانس، مقدار بهینه‌ی هر یک از پارامترها به کمک بهینه سازی فرآیند، مشخص شدند (جدول ۴-۳). بر این اساس میزان کلکتور ۵۰۰ گرم بر تن، شدت فرکانس اعمالی ۳۷ کیلو هرتز و توان اعمالی دستگاه ۸۰ درصد پیشنهاد شده است. درصد کاهش خاکستر زغال از سطوح بهینه پارامترها که توسط نرم افزار معرفی شده، ۸۰/۳ است. میانگین درصد کاهش خاکستر زغال ۴۵/۰۳ درصد بوده که میزان انحراف آن از شرایط بهینه‌ی پیش‌بینی شده نرم‌افزار، ۳۴/۲۶۹ است.

جدول ۴-۳: مقادیر بهینه‌ی هر یک از پارامترها

پارامتر	توصیف سطح	سطح	سهم حضور
زمان	۳	۳	۷/۰۴۹
فرکانس	۳۷	۲	۹/۵۲۱
دما	۷۵	۳	۵/۵۴۵
کلکتور	۵۰۰	۱	۱۳/۰۹۸
کف‌ساز	۳۰	۱	۴/۴۳۴
اندازه ذرات	۳۵ - ۷۰	۲	۳/۴۹
توان	۸۰	۳	۸/۷۴۳
میزان انحراف از شرایط بهینه‌ی پیش‌بینی شده			۳۴/۲۶۹
میانگین درصد کاهش خاکستر زغال			۴۵/۰۳۱
درصد کاهش خاکستر زغال از سطوح بهینه پارامترها			۸۰/۳

۴-۲-۴- آزمون اعتبار سنجی

آزمایش فلوتاسیون با شرایط معرفی شده برای سه بار، جهت اطمینان از درست بودن حالت بهینه‌ی معرفی شده توسط نرم‌افزار، انجام می‌شود. در نهایت میانگین نتیجه‌های به‌دست آمده با پیش‌بینی نرم‌افزار مقایسه می‌شود. میزان درصد کاهش خاکستر در آزمایش اول ۸۰/۳۶ درصد، در آزمایش دوم ۸۱/۱۵ درصد و در آزمایش سوم ۸۳/۶۲ درصد به‌دست آمد که میانگین این سه عدد با پیش‌بینی نرم‌افزار مطابقت دارد.

۴-۲-۵- تحلیل نتایج درصد کاهش خاکستر

نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای مقدار کلکتور، شدت فرکانس و توان امواج مافوق صوت تأثیر زیادی در کاهش خاکستر زغالسنگ دارد که این مقدار در این تحقیق ۸۰/۳ درصد به دست آمد. از این رو استفاده از امواج مافوق صوت در طول فرآیند فلوتاسیون زغال باعث کاهش درصد خاکستر شده است و محصول باکیفیتی را تولید می‌کند که مشکلات بعدی در صنعت را نیز تا حدود زیادی کاهش می‌دهد.

۴-۳- نتایج میزان کارآیی جدایش

۴-۳-۱- مقدمه

در بررسی عملکرد روش‌های فرآوری مواد معدنی (به ویژه فلوئتاسیون)، دو متغیر عیار و بازیابی مورد بررسی قرار می‌گیرند. این دو پارامتر با نسبت عکس با یکدیگر در ارتباط هستند. از این رو پارامتر سوم به عنوان کارآیی جدایش برای بررسی قابلیت انتخاب پذیری فرآیند مورد بررسی قرار می‌گیرد که این پارامتر جدید، هر دو پارامتر قبل را پوشش می‌دهد.

۴-۳-۲- بررسی و تحلیل نتایج خروجی نرم‌افزار

به علت اهمیت هم‌زمان افزایش عیار و بازیابی زغالسنگ، یافتن مقدار بهینه‌ی پارامترهای آزمایش برای دست یافتن به مقدار بیشینه‌ی کارآیی جدایش از الویت‌های نخست تحقیق پیش روست. اطلاعات جدول ۴-۴ به عنوان دومین پارامتر هدف در اختیار نرم‌افزار قرار گرفت.

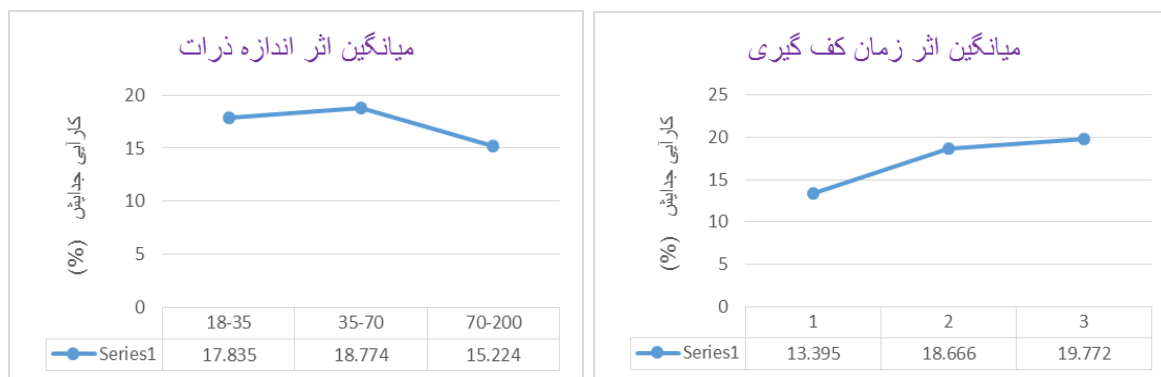
جدول ۴-۴: کارآیی جدایش

شماره آزمایش	کارآیی جدایش (%)	شماره آزمایش	کارآیی جدایش (%)
۱	۲۲/۸۹	۱۵	۲۲/۶۰
۲	۹/۰۱	۱۶	۱۱/۴۷
۳	۲۰/۸۶	۱۷	۱۸/۲۴
۴	۱۲/۰۴	۱۸	۱۵/۱۰
۵	۱۵/۸۰	۱۹	۱۱/۲۲
۶	۱۱/۱۸	۲۰	۱۲/۸۹
۷	۵/۹۹	۲۱	۱۱/۲۰
۸	۱۳/۴۴	۲۲	۶/۸۱

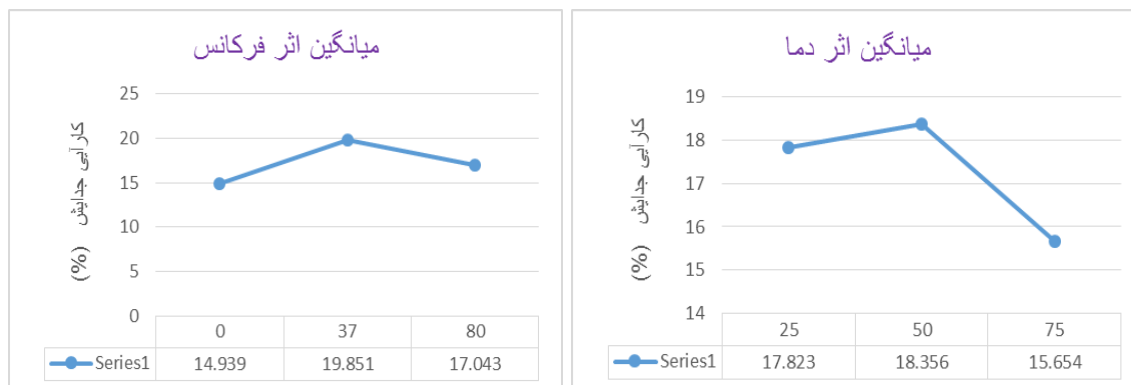
ادامه‌ی جدول ۴-۵: کارآیی جدایش

۲۹/۶۶	۲۳	۹/۳۵	۹
۲۶/۳۷	۲۴	۲۸/۸۸	۱۰
۲۴/۴۰	۲۵	۶/۷۴	۱۱
۲۸/۵۸	۲۶	۱۰/۷۷	۱۲
۲۶/۸۲	۲۷	۲۵/۹۸	۱۳
طرح معرفی شده : ۲۷ آزمایش		۲۸/۲۲	۱۴

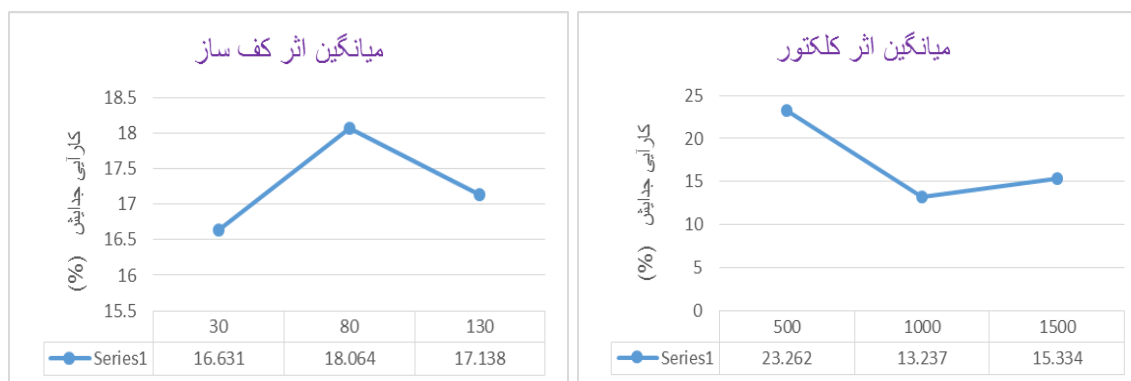
۳-۳-۴- تأثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی بر میزان کارآیی جدایش همان‌طور که در شکل‌های ۴-۶ و ۴-۹ مشاهده می‌شود میانگین اثر هر یک از پارامترها در سه سطح تأثیرگذاری، به مجزا مورد بررسی قرار گرفته است. به این ترتیب بیشترین میزان تأثیر پارامترهای زمان کف‌گیری و توان اعمالی دستگاه در سطح سوم، فرکانس، دما، اندازه ذرات و کف ساز در سطح دوم و کلکتور در سطح اول گزارش شده است.



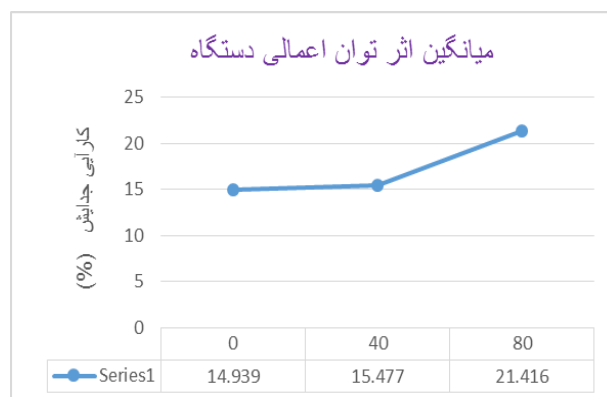
شکل ۴-۶: تأثیر مجزای پارامترهای زمان کف‌گیری و اندازه ذرات بر روی کارآیی جدایش



شکل ۴-۷: تأثیر مجزای پارامترهای دما و فرکانس بر روی کارایی جدایش



شکل ۴-۸: تأثیر مجزای پارامترهای کلکتور و کف ساز بر روی کارایی جدایش



شکل ۴-۹: تأثیر مجزای پارامتر توان اعمالی دستگاه بر روی کارایی جدایش

با استفاده از جدول ۴-۵ و بررسی آنالیز واریانس، میزان تأثیر هر یک از پارامترها بر روی کارآیی جدایش مشخص می‌شود.

به این ترتیب کلکتور بیش‌ترین تأثیر را بر کارآیی جدایش داشته است و در مرحله‌ی بعد پارامترهای توان، مدت زمان کف‌گیری و شدت فرکانس اعمالی دارای تأثیر زیادی هستند. در مقابل دما، کف‌ساز و اندازه ذرات تأثیری ناچیز و نزدیک به صفر دارند.

نتایج جدول ۴-۵ با سطح اطمینان ۹۰ درصد و خطای $\pm 7/765$ معنی‌دار بوده و نشان می‌دهد بیش‌ترین تأثیر متعلق به کلکتور است. درصد تأثیر پارامترها در شکل ۴-۱۰ به صورت شماتیک قابل مشاهده است. میزان خطای آمده در جدول آنالیز واریانس، ستون‌هایی هستند که در طرح اولیه‌ی آزمایش به صورت خطا در نظر گرفته شده‌اند و این مقدار خطا، خطای آزمایش نیست.

جدول ۴-۵: جدول آنالیز واریانس

پارامترها	درجه‌ی آزادی	مجموع مربعات	واریانس	نسبت فیشر	مجموع حذف شده‌ها	درصد تاثیر
زمان	۲	۲۰۹/۰۰۷	۱۰۴/۵۰۳	۲/۵۹۹	۱۲۸/۶۱۵	۷/۸۲۵
فرکانس	۲	۱۰۹/۲۷۹	۵۴/۶۳۹	۱/۳۵۹	۲۸/۸۸۷	۱/۷۵۷
دما	۲	۳۶/۸۷۱	۱۸/۴۳۵	۰/۴۵۸	۰	۰
کلکتور	۲	۵۰۳/۲۰۶	۲۵۱/۶۰۳	۶/۲۵۹	۴۲۲/۸۱۴	۲۵/۷۲۴
کف‌ساز	۲	۹/۵۰۷	۴/۷۵۳	۰/۱۱۸	۰	۰
اندازه ذرات	۲	۶۰/۹۰۵	۳۰/۴۵۲	۰/۷۵۷	۰	۰
توان	۲	۲۳۲/۵۱۸	۱۱۶/۲۵۹	۰/۸۹۲	۱۵۲/۱۲۷	۹/۲۵۵
خطا	۱۲	۴۸۲/۳۴۷	۴۰/۱۹۵			۵۵/۴۳۹
نهایی	۲۶	۱۶۴۳/۶۴۳				۱۰۰/٪۰۰



شکل ۴-۱۰: درصد تأثیر هر یک پارامترها بر فلوتاسیون

بعد از بررسی جدول آنالیز واریانس، بهینه‌سازی فرآیند برای به‌دست آوردن مقادیر بهینه‌ی هر یک از پارامترها انجام می‌شود (جدول ۴-۶). درصد کارایی جدایش زغالسنگ از سطوح بهینه پارامترها که توسط نرم افزار معرفی شده، ۲۸/۶۱ است. میانگین درصد کارایی جدایش زغال ۱۷/۲۸ درصد بوده که میزان انحراف از شرایط بهینه‌ی پیش‌بینی شده نرم‌افزار، ۱۱/۳۳ است.

۴-۳-۴- اعتبارسنجی

جهت اطمینان از شرایط بهینه‌ی فرآیند که توسط نرم‌افزار معرفی شده است، سه آزمایش را با شرایط مشخص شده، انجام شد. کارایی جدایش آزمایش اول ۲۶/۱۵، آزمایش دوم ۲۸/۲۱ و آزمایش سوم ۲۷/۰۹ به دست آمد که میانگین کارایی جدایش‌ها حاصل ۲۷/۱۵ درصد بود که با مقدار پیش‌بینی شده مطابقت دارد.

جدول ۴-۶: مقادیر بهینه‌ی هر یک از پارامترها

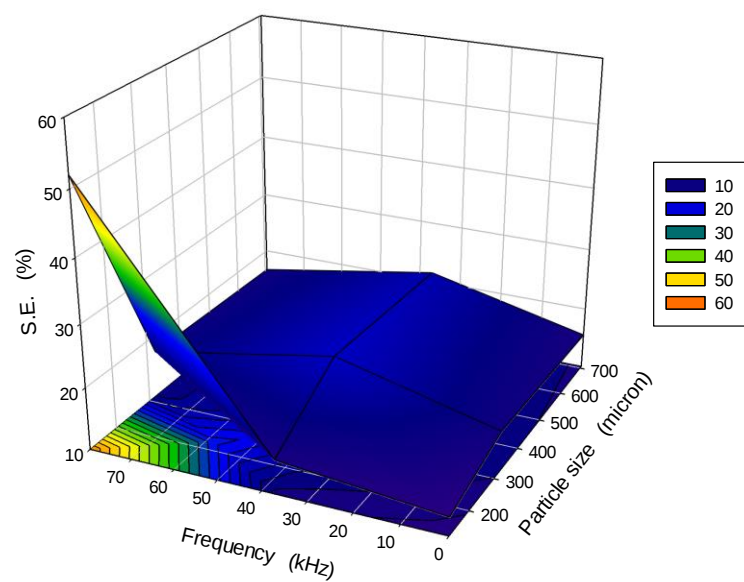
پارامتر	توصیف سطح	سطح	سهم حضور
زمان	۳	۳	۲/۴۹۴
فرکانس	۳۷	۲	۲/۵۷۲
دما	۵۰	۲	۱/۰۷۸
کلکتور	۵۰۰	۱	۵/۹۸۴
کف‌ساز	۸۰	۲	۰/۷۸۶
اندازه ذرات	۳۵ – ۷۰	۲	۱/۴۹۶
توان	۸۰	۳	۴/۱۳۸
میزان انحراف از شرایط بهینه‌ی پیش‌بینی شده			۱۱/۳۳۲
میانگین درصد کارآیی جدایش زغال			۱۷/۲۷۸
درصد کارآیی جدایش زغال از سطوح بهینه پارامترها			۲۸/۶۱

۵-۳-۴- تحلیل نتایج کارآیی جدایش

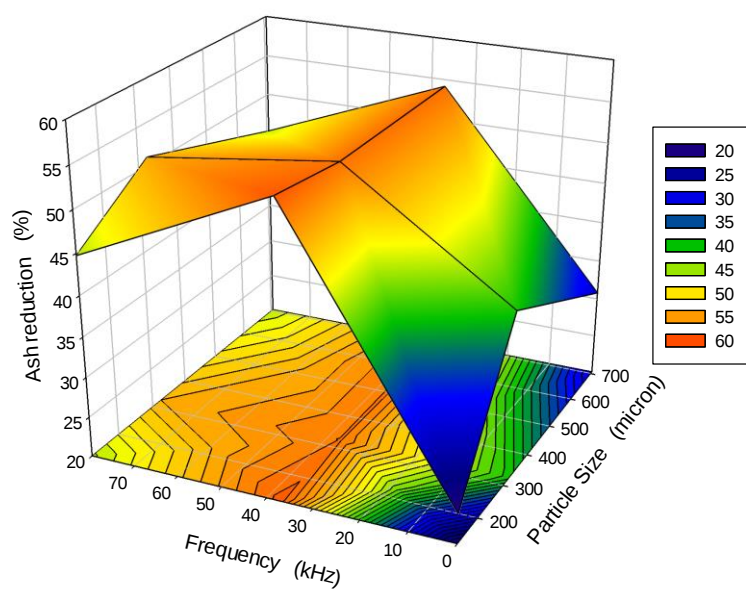
بررسی نتایج نشان می‌دهد میزان کلکتور بیش‌ترین تأثیر را بر روی کارآیی جدایش فلو‌تاسیون دارد و پارامترهای توان، فرکانس و زمان کف‌گیری در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

۴-۴- تأثیر همزمان هر یک از پارامترها و فرکانس بر روی پارامترهای هدف

در طول انجام یک فرآیند فرآوری مواد معدنی هر یک از پارامترها علاوه بر تأثیر مجزایی که بر فرآیند دارند تحت تأثیرات یکدیگر نیز قرار می‌گیرند. تأثیرات متقابل باعث افزایش یا کاهش تأثیر مجزای هر پارامتر می‌شوند. از این رو در تحقیق حاضر تأثیرات دوگانه‌ی هر یک از پارامترها و فرکانس، بر روی درصد کاهش خاکستر و کارآیی جدایش مورد بررسی قرار گرفت.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۱: تأثیر هم‌زمان ابعاد ذرات و فرکانس بر کارایی جدایش (الف)، درصد کاهش خاکستر (ب)

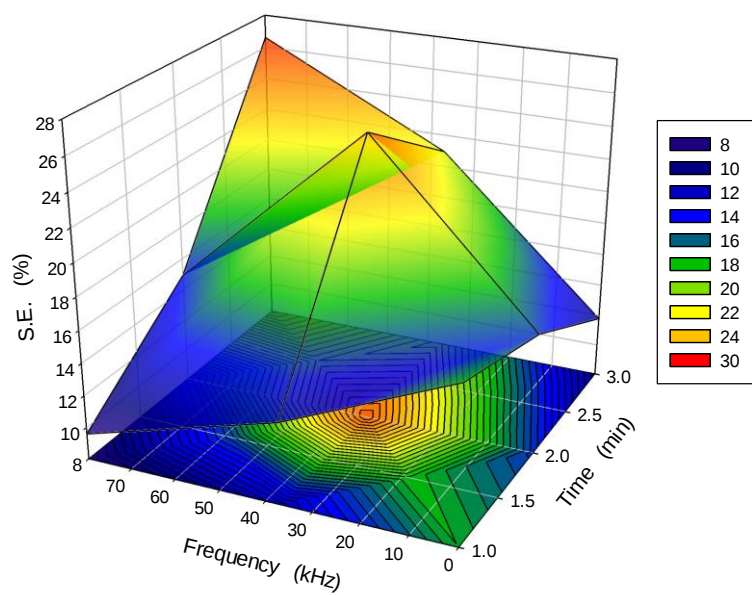
همانطور که در شکل ۴-۱۱ قسمت الف مشاهده می‌شود ذرات زیر یک میلی‌متر برای فلوتاسیون استفاده شده‌اند. در تمامی دامنه‌ی ابعادی ذرات با شدت فرکانس‌های مختلف، کارآیی جدایش ثابت است. اما در بخش ریز دانه، کارآیی جدایش رشد زیادی کرده و به بالاترین حد خود رسیده است و اگر محدودیت دستگاه در تولید امواج با شدت فرکانس بیشتر وجود نداشت، احتمالاً روند افزایشی کارآیی جدایش ادامه پیدا می‌کرد.

شکل ۴-۱۱ قسمت ب تأثیر ابعاد ذرات و فرکانس بر درصد کاهش خاکستر را نشان می‌دهد که در این حالت نیز تأثیر اعمال فرکانس در بخش ریز دانه و مقدار متوسط فرکانس بسیار موفق بوده است.

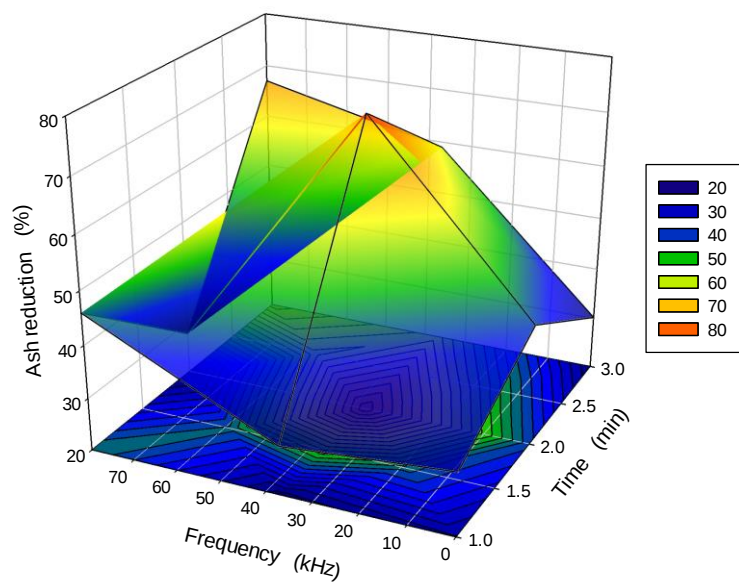
به طور کلی استفاده از امواج مافوق صوت در ابعاد ریز دانه عملکرد مثبتی نشان داده است که علت آن بهبود قابلیت اتصال ذرات زغالسنگ به حباب هوا است زیرا سطح ذرات توسط انرژی امواج مافوق صوت، کاملاً تمیز شده است. از طرفی حباب‌های ریزی که بر اثر امواج مافوق صوت در محیط پالپ ایجاد شده است، شرایط صعود به منطقه‌ی کف را برای ذرات ریز دانه فراهم کرده است.

تأثیر هم‌زمان مدت زمان کف‌گیری و فرکانس بر کارآیی جدایش و درصد کاهش خاکستر به ترتیب در شکل ۱۲-۴ قسمت الف و ب نشان داده شده است. بیشینه مقدار کارآیی جدایش و درصد کاهش خاکستر در سطح متوسط از مدت زمان کف‌گیری و فرکانس رخ داده است که علت این امر افزایش انتخابیت در فرآیند و در نهایت افزایش کارآیی جدایش است. در این حالت نیز در صورت افزایش شدت فرکانس اعمالی، احتمال بالاتر رفتن پارامترهای هدف وجود دارد.

همانطور که در شکل ۴-۱۳، قسمت الف و ب مشاهده می‌شود با کاهش میزان مصرف کلکتور در حضور امواج مافوق صوت هر دو پارامتر کارآیی جدایش و درصد کاهش خاکستر بهبود یافته است. از نظر اقتصادی کاهش مصرف کلکتور و استفاده از امواج در طول فلوتاسیون، صرفه‌ی اقتصادی زیادی خواهد داشت.

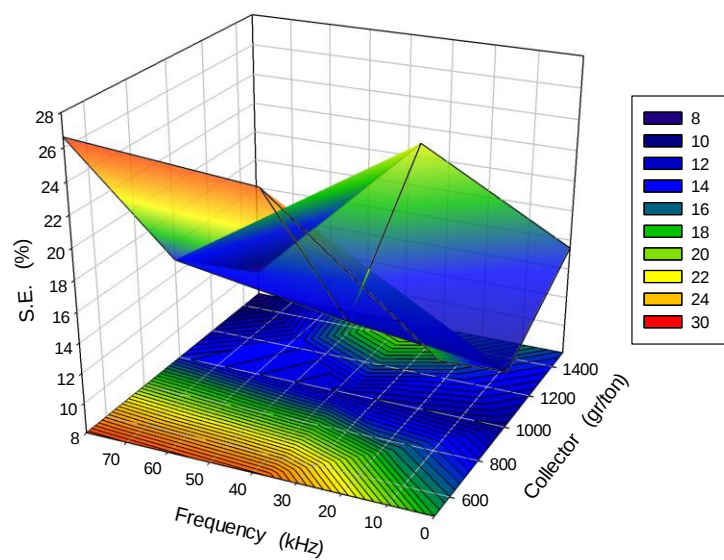


(الف)

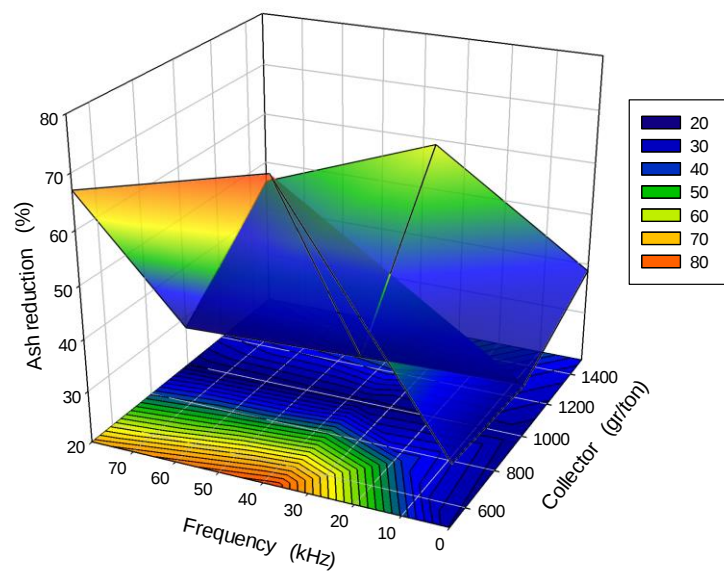


(ب)

شکل ۴-۱۲: تأثیر هم‌زمان مدت زمان کف‌گیری و فرکانس بر کارایی جدایش (الف)، درصد کاهش خاکستر (ب)



(الف)



(ب)

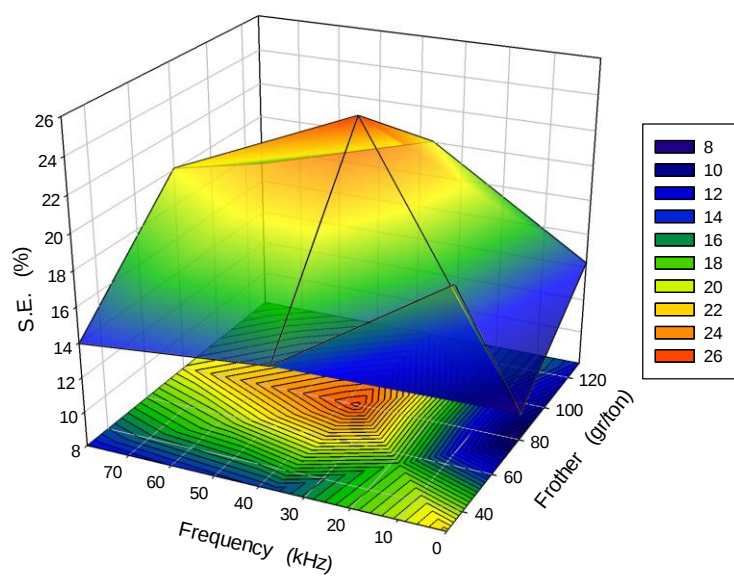
شکل ۴-۱۳: تأثیر هم‌زمان کلکتور و فرکانس بر کارایی جدایش (الف)، درصد کاهش خاکستر (ب)

همانطور که در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است، میزان بیشینه‌ی کارآیی جدایش و درصد کاهش خاکستر در مقدار متوسط شدت فرکانس اعمالی اتفاق افتاده است که علت این مساله پایدار شدن حباب هوا در پالپ بوده است. این حباب ها به کمک حباب های ایجاد شده توسط امواج مافوق صوت، شرایط حمل ذرات زغالسنگ را بهبود داده اند که در نتیجه انتخابیت فرآیند افزایش یافته است.

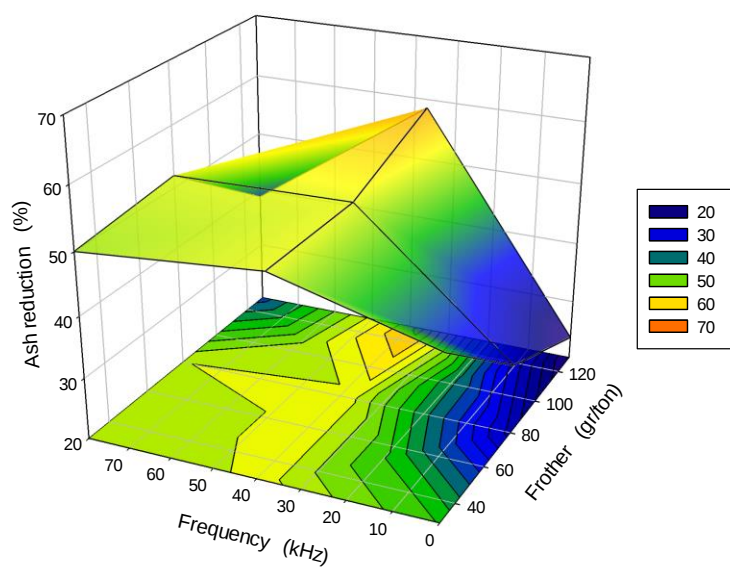
تأثیر هم‌زمان دما و فرکانس بر کارآیی جدایش و درصد کاهش خاکستر به ترتیب در قسمت الف و ب شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. در افزایش دما و شدت پایین فرکانس امواج و بالعکس، کاهش دما و فرکانس بالای امواج تولید شده، بهبود کارآیی جدایش و کاهش درصد خاکستر مشاهده می‌شود. علت این امر اندرکنش این دو پارامتر با یکدیگر است.

امواج مافوق صوت با انرژی بالای خود مولکول‌های محیط انتشار خود را به لرزش در آورده و جنبش ایجاد شده، دما را افزایش می‌دهد. به موازات این مسأله، دما به عنوان یک پارامتر مورد بررسی نیز افزایش یافته است. لذا این افزایش دمای تجمعی باعث افزایش سرعت واکنش‌های شیمیایی اعم از پاک شدن سطح ذرات زغالسنگ، اتصال بهتر ذرات به حباب هوا و در نهایت بهبود وضعیت حمل ذرات توسط حباب هوا می‌شود.

همانطور که گفته شد فلوئوتاسیون به عنوان یک روش جداسازی شیمیایی - فیزیکی، در دمای بالا عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. از طرفی می‌توان با استفاده از اندرکنشی که بین دما و فرکانس وجود دارد، مشکل صنعت در فراهم آوردن دمای بالا و ثابت نگه داشتن آن را با استفاده از انتشار امواج مافوق صوت در طول فرآیند فلوئوتاسیون حل کرد.

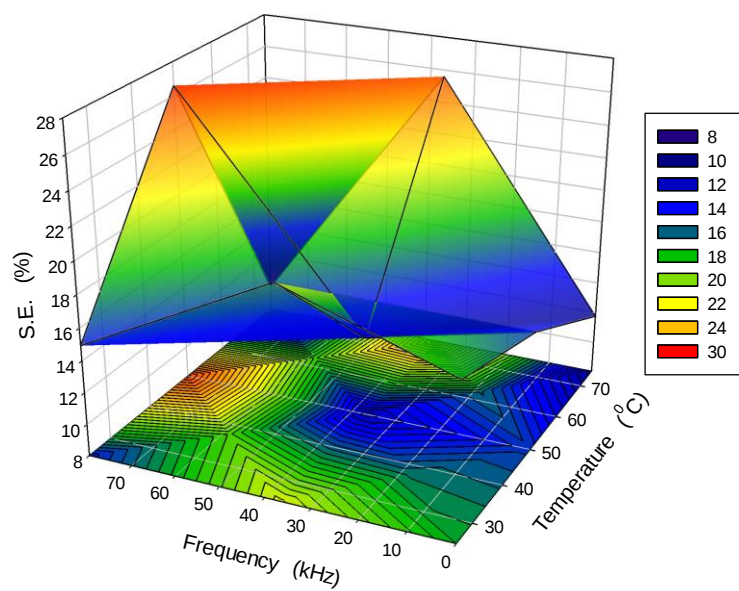


(الف)

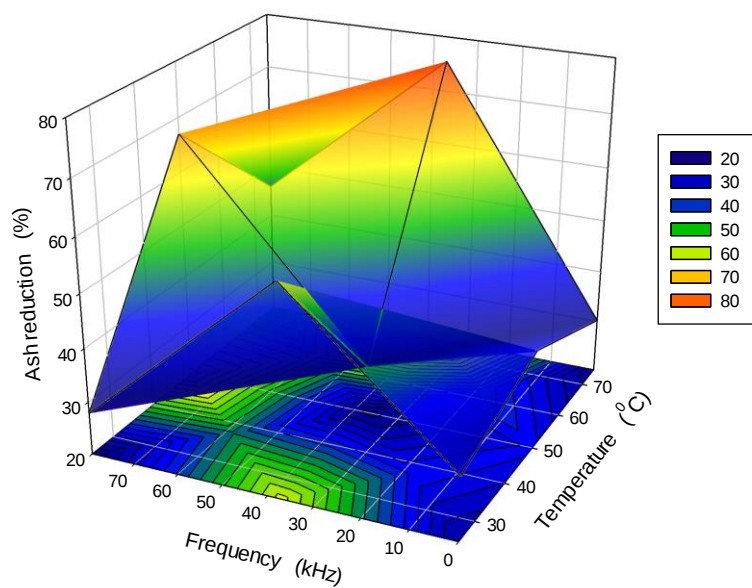


(ب)

شکل ۴-۱۴: تأثیر هم‌زمان کف‌ساز و فرکانس بر کارایی جدایش (الف)، درصد کاهش خاکستر (ب)



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۵: تأثیر هم‌زمان دما و فرکانس بر کارایی جدایش (الف)، درصد کاهش خاکستر (ب)

۴-۵- مشاهدات جانبی آزمایش‌ها

امواج مافوق صوت با تمیز کردن سطح ذرات زغالسنگ، به فلوتاسیون کمک می‌کند. این امواج با اصلاح شرایط فرآیند، کیفیت محصول را بهبود می‌بخشد. مشاهده‌ی جالبی که در اغلب تست‌های مافوق صوت مشاهده شد، در هنگام اندازه‌گیری خاکستر و مواد فرار کنسانتره‌ی آزمایش‌ها اتفاق می‌افتد.

ابتدا بوته‌های سنجش خاکستر و مواد فرار آماده شده و در کوره قرار گرفت. بعد از سپری شدن یک ساعت و سی دقیقه برای خاکستر و هفت دقیقه برای مواد فرار، بوته‌ها جهت سرد شدن و توزین نهایی از کوره خارج شدند. همان‌طور که در شکل ۴-۱۶ مشاهده می‌شود، زغالسنگ درون بوته‌ها به صورت انفجاری سوخته است. در بوته‌ی خاکسترسنجی حالت پفکی به‌وجود آمده است که در قسمت زیر حالت پفکی کاملاً خالی شده است.



شکل ۴-۱۶: بوته‌های سنجش خاکستر بعد از کوره (کنسانتره آزمایش‌های شماره‌ی ۱۳ و ۱۴)

برای سنجش مواد فرار باید درب بوتله‌ها بسته باشد ولی در این مورد شدت سوختن زغالسنگ به حدی بوده است که درب بوتله را باز کرده و زغالسنگ به دیواره‌ها و درب بوتله پاشیده شده است (شکل ۴-۱۷).



شکل ۴-۱۷: بوتله‌ی سنجش مواد فرار بعد از کوره (کنسانتره‌ی آزمایش شماره‌ی ۱۳)

مدل سوختن زغالسنگ در بوتله‌های مواد فرار سایر آزمایش‌های تحت امواج مافوق صوت با مواد فرار خوراک و آزمایش‌های بدون امواج مافوق صوت تفاوت چشم‌گیری داشت. در شکل ۴-۱۸ مدل سوختن مواد فرار نمونه‌ی خوراک مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۸: نمونه‌ی مواد فرار خوراک بعد از خروج از کوره

در شکل‌های ۴-۱۹ تا ۴-۲۲ نمونه‌ی مواد فرار کنسانتره‌ی آزمایش‌های ۱۰، ۱۴، ۱۵، ۲۳، ۲۴، ۲۶ و ۲۷ آورده شده است.



شکل ۴-۱۹: نمونه‌ی مواد فرار آزمایش ۱۰ (سمت راست) و ۱۴ (سمت چپ)



شکل ۴-۲۰: نمونه‌ی مواد فرار آزمایش ۱۵ (سمت راست) و ۲۴ (سمت چپ)



شکل ۴-۲۱: نمونه‌ی مواد فرار آزمایش ۲۳ (سمت راست) و ۲۷ (سمت چپ)



شکل ۴-۲۲: نمونه‌ی مواد فرار آزمایش ۲۶

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۵- مقدمه

همان‌طور که در پژوهش حاضر بیان شد، کاهش میزان خاکستر زغالسنگ به علت به وجود آوردن مشکل در فرآیند تولید فولاد، افزایش اکسایش کک و کاهش حساسیت و کارایی کوره‌ها، ضرورتی غیر قابل انکار است. به همین علت در این پژوهش به مطالعه‌ی نرخ کاهش خاکستر محتوی نمونه خوراک زغالسنگ البرزشرقی، با انجام آزمایش‌های فلوتاسیون تحت شرایط امواج مافوق صوت پرداخته شد. در ادامه بعد از به دست آوردن شرایط بهینه‌ی فلوتاسیون تحت امواج مافوق صوت، نتیجه‌ی حاصل از انجام این آزمایش‌ها را با متوقف کردن تولید امواج مافوق صوت در زمان کف‌گیری سنجیده و بهترین روش استفاده از امواج مشخص شد.

۲-۵- جمع‌بندی

در این پایان‌نامه، امواج مافوق صوت به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در تمیز کردن سطح ذرات زغالسنگ از آلودگی و افزایش احتمال برخورد ذرات با حباب‌های هوا مورد بررسی قرار گرفت.

در مرحله‌ی اول، تحقیقات مهم و مؤثری در مورد سابقه‌ی استفاده از امواج مافوق صوت در فلوتاسیون زغالسنگ صورت گرفت. با اطلاع از شرایط و محدوده‌ی استفاده از این روش، چارچوب کلی پژوهش مشخص شد.

در مرحله‌ی بعد کلیه‌ی پارامترهای مؤثر بر فلوتاسیون زغالسنگ بررسی شده و مورد ارزیابی قرار گرفتند. با مطالعه‌ی کارهای انجام شده گذشته مشخص شد که برای پی بردن به تاثیر امواج مافوق صوت بر فلوتاسیون زغالسنگ بایستی یک دسته از پارامترهای مؤثر، یکسان در نظر گرفته شود.

پارامترهای درصد جامد پالپ (۱۰ درصد)، pH خنثی (استفاده از آب مقطر)، زمان آماده‌سازی زغالسنگ و آب (۵ دقیقه)، زمان اثرگذاری کلکتور (۹۰ ثانیه) و کف ساز (۳۰ ثانیه) بر روی ذرات زغالسنگ، نوع ماشین

فلوتاسیون، نحوه‌ی هواده‌ی و سرعت هم زدن پالپ (۹۵۰ دور در دقیقه) از جمله‌ی این عوامل هستند. در انتخاب پارامترهای هدف با استناد از تحقیق‌های گذشته و تجربه‌ی کارهای عملی نوع کلکتور و کفساز مصرفی به ترتیب نفت سفید و MIBC در نظر گرفته شد.

۳-۵- نتیجه‌گیری

بعد از مشخص کردن طرح اولیه‌ی آزمایش‌ها با ۲۷ آزمایش، اقدامات آزمایشگاهی انجام شد. سپس نتایج به‌دست آمده مورد تحلیل عملی و نرم‌افزاری قرار گرفت و نتایج ذیل به‌دست آمد:

(۱) در آنالیز درصد کاهش خاکستر کنسانتره، کلکتور با ۱۳ درصد تاثیر، موثرترین فاکتور بوده است و

بعد از آن شدت فرکانس امواج مافوق صوت با ۹/۵ درصد تاثیر، در جایگاه دوم قرار می‌گیرد.

(۲) در بررسی تاثیرات هم‌زمان کلکتور و شدت فرکانس امواج مافوق صوت بر روی کارایی جدایش و

کاهش درصد خاکستر، مشاهده شد با انجام فلوتاسیون تحت امواج، مصرف کلکتور تا ۶۰ درصد

کاهش می‌یابد که این کاهش مصرف، صرفه‌ی اقتصادی بالایی برای صنعت زغالسنگ خواهد داشت.

(۳) تاثیرات هم‌زمان ابعاد ذرات و فرکانس بر روی کارایی جدایش نشان داد، مقدار بیشینه‌ی این پارامتر

در بخش ریزدانه بوده و کارایی جدایی با یک روند صعودی از مقدار متوسط ۲۳ درصد در ابعاد

درشت و متوسط، به ۵۲ درصد در بخش ریزدانه می‌رسد.

(۴) بالاترین مقدار تاثیر هم‌زمان مدت زمان کف‌گیری و فرکانس در مدت زمان، ۲ دقیقه کف‌گیری

اتفاق می‌افتد که کارایی جدایش و کاهش درصد خاکستر به ترتیب دارای مقادیر ۲۵ درصد و ۷۵

درصد است.

(۵) در بررسی تاثیرات هم‌زمان کفساز و شدت فرکانس امواج مافوق صوت بر روی کارایی جدایش و

کاهش درصد خاکستر، مشاهده شد با انجام فلوتاسیون تحت امواج مافوق صوت، با مصرف ۸۰ گرم

بر تن از کف ساز متیل ایزوبوتیل کربونیل در شدت فرکانس ۳۷ کیلو هرتز می توان کارآیی جدایش به میزان ۲۴/۵ درصد و کاهش درصد خاکستر به میزان ۵۲/۵ درصد به دست آورد.

(۶) افزایش دما به علت سرعت بخشیدن به انجام واکنش های شیمیایی یکی از عوامل تاثیر گذار است، از این رو در صنعت به علت مشکل در رساندن دما و ثابت نگه داشتن آن از امواج مافوق صوت استفاده شود. در بررسی تاثیرات هم زمان دما و فرکانس مشخص شد با ثابت نگه داشتن دما در ۲۵ درجه سانتی گراد (دمای محیط) و افزایش شدت فرکانس امواج مافوق صوت تا ۳۷ کیلو هرتز، کارآیی جدایش و کاهش درصد خاکستر به ترتیب ۲۰ و ۵۹ درصد خواهند شد. با ادامه روند افزایش دما تا ۵۰ درجه سانتی گراد (دمای مناطق کویری در تابستان) و استفاده از امواج با شدت فرکانس ۸۰ کیلو هرتز، کارآیی جدایش به ۲۶/۶ درصد و کاهش درصد خاکستر به میزان ۶۷ درصد افزایش یافته است.

۳-۵- پیشنهادها

استفاده از امواج مافوق صوت در فلوتاسیون زغالسنگ نتایج قابل قبولی در بالا بردن بازیابی، کاهش میزان خاکستر و بهبود کارآیی جدایش داشته است. از این رو پژوهش پیش رو به تحقیق بیشتر نیاز برای بهبود شرایط دارد. به طور خلاصه موارد ذیل برای تحقیقات آینده پیشنهاد می شود:

(۱) در تحقیق حاضر فلوتاسیون تحت امواج مافوق صوت، تنها بر روی یک نوع زغالسنگ انجام شده است. لذا پیشنهاد می شود این کار بر روی زغالسنگ های متنوعی انجام شده و نتایج آن ها با یکدیگر مقایسه شود.

(۲) در این تحقیق تمرکز استفاده از امواج مافوق صوت در حین فرآیند فلوتاسیون قرار گرفت لذا پیشنهاد می شود استفاده از امواج قبل و بعد از فلوتاسیون نیز مورد ارزیابی دقیق تری صورت گیرد.

۳) به علت محدودیت دستگاه در تولید امواج با شدت بالاتر، در این تحقیق از امواج با شدت کمتر استفاده شد، لذا پیشنهاد می‌شود آزمایش‌های فلوتاسیون در شدت فرکانس‌های بالاتر نیز مورد آزمایش قرار گیرند.

۴) مواد باقیمانده از اندازه‌گیری مواد فرار حالت متفاوتی نسبت به حالت عادی فلوتاسیون پیدا کردند از این رو پیشنهاد می‌شود ساختار آن‌ها مورد ارزیابی‌های دقیق‌تری قرار گیرد.

منابع

منابع فارسی

- اصائلو م ، (۱۳۷۸) "مهندسی زغالسنگ"، انتشارات ناقوس.
- بنیسی ص ، (۱۳۸۸) "مسایل کاربردی فرآوری مواد معدنی به همراه درسنامه"، جلد اول، چاپ اول، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ص ۸ تا ۱۳.
- بنیسی ص ، (۱۳۸۸) "مسایل کاربردی فرآوری مواد معدنی به همراه درسنامه"، جلد دوم، چاپ اول، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، ص ۶۱۶.
- رضایی ب ، (۱۳۸۰) "تکنولوژی زغال شویی"، چاپ دوم، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- رضائی ب ، (۱۳۷۵) "فلوتاسیون"، چاپ اول، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان.
- یزدی م ، (۱۳۸۲) "زغال سنگ (از منشاء تا اثرات زیست محیطی)"، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

منابع لاتین

- Ambedkar B., (2012), PhD. Thesis, “**Ultrasonic Coal-Wash for De-Ashing and De-Sulfurization**”, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India.
- Brady G.A. and Gauger A.W., (1940) “**Properties of Coal Surface**”, I Eeng. Chem. Vol-32. P.1599-1604.
- Fuerstenau M. C. and Han K. N., (2009), “**Principles of Mineral Processing**”, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, Colorado, USA, pp. 245.
- Gibson J., (1979), “**Coal: an introduction to its formation and properties Coal and modern coal processing**”, Academic press, pp. 1-25.

- Grainger and J. Gibson, (1981), “**Coal utilization technology, economic and policy**”, pp. 3-36.
- Kang W.Z. and Xun H.X. and Chen J.T., (2007), “**Study of Enhanced Fine Coal De-sulphurization and De-ashing by Ultrasonic Flotation**”, In: J China Univ Mining & Technol, 17(3) pp. 0358-0362.
- Kang W.Z. and Xun H.X. and Kong X.H. and Li M.M., (2009), “**Effects from changes in pulp nature after ultrasonic conditioning on high-sulfur coal flotation**”, In: Mining Science and Technology, 19 pp.0498-0502.
- Klimpel R. R., (1995), “**The Influence of Frother Structure on Industrial Coal Flotation**”, High-Efficiency Coal Preparation (Kawatra, ed.), Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton.
- Krzesinska M. and Pajak J., (1988), “**Application of ultrasonic measurements to the determination of concentration of coal extracts**”, In: Fuel Processing Technology, pp. 229-233.
- Montgomery W.J., (1978), “**Design and Analysis of Experiments**” 8th Edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 1, 478, 479.
- Ozkan S.G., (2011), “**Effects of Simultaneous Ultrasonic Treatment on Flotation of Hard Coal Slimes**”, In: Fuel Processing Technology, 93 pp. 576–580.
- Ozkan S.G. and Kuyumcu H.Z., (2006), “**Investigation of mechanism of ultrasound on coal flotation**”, In: Int. J. Miner. Process, 81 pp. 201-203.
- Ozkan S.G. and Kuyumcu H.Z., (2007), “**Design of a flotation cell equipped with ultrasound transducers to enhance coal flotation**”, In: Ultrasonics Sonochemistry, 14 pp. 639-645.
- Sahinoglu E. and Uslu T., (2013), “**Increasing coal quality by oil agglomeration after ultrasonic treatment**”, In: Fuel Processing Technology, 116: 332-338.
- Schlesinger L.N., (1989), “**The Effect of Ultrasonic Conditioning Upon the Froth Flotation of Pittsburgh No: 8 Coal**”, Thesis, West Virginia University, Morgantown, West Virginia.

- Schlesinger L. and Muter R. B., (1989), “**The effect of ultrasonic conditioning on the froth flotation of Pittsburgh No: 8 Coal**”, In: Proc of the 6th annual international pittsburgh coal conference, pp. 1163-1172.
- Visit the ASTM website, Standard Test Method for Laboratory Froth Flotation of Coal in a Mechanical Cell, View history in November 25 2015, Accessible via address www.astm.org.
- Visit the Elma Company (Manufacturer of ultrasonic baths), View history in November 15 2015, Accessible via address www.elma-ultrasonic.com.

Abstract

One of the main parameters that determine the quality of coal, is the ash content. Ash existence in coal increases the reagent consumption, causing problems in the steel production process, increases oxidation of coke and ultimately reduce the sensitivity and efficiency of furnaces. Flotation due to the natural hydrophobic particles of coal is one of the best methods to reduce the ash content in coal. Preparing the surface of the particles for performing chemical reactions increases the flotation efficiency. Applying ultrasound is widely effective for surface preparation and cleaning processes. Therefore, In This research the impact of ultrasound in improving the efficiency of coal flotation, were studied. By taking the effectiveness of ultrasonic waves in cleaning the surface of coal particles and determination of the operating parameters, experiments were designed using the Taguchi method. The results were analyzed by software. Determining the optimum values for each parameter by software, the validation experiments were performed. The results were well correlated with predicted values by software. The results showed that the use of ultrasound can reduce the ash by 45 percent, increase the separation efficiency by 17 percent, 65 percent reduction in the collector, 50% in frother reduction, 50% reduction in time. Also ultrasonic waves can be used for increasing temperature in flotation process.

Key words: Flotation, Coal, Ultrasonic Waves, Ash



Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Mineral Processing

Investigation of effect of ultrasonic waves on Alborz-Sharghi coal flotation

By: Nasrin Rezvani

Supervisor:

Dr Mohammad Karamoozian

February 2017