

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
رشته مهندسی معدن گرایش فرآوری مواد معدنی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی امکان جایگزینی گازوییل با نفت سفید در مدار فلوتاسیون کارخانه زغال شویی البرز شرقی

نگارنده: رامین آهوار

استاد راهنما:

دکتر محمد کارآموزیان

شهریورماه ۱۳۹۵

تقديم به :

یگانه منجی عالم بشریت، حضرت قائم (عج)

تشکر و قدردانی:

بر حسب وظیفه از استاد باکمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر محمد کارآموزیان که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛ از کارشناسان محترم کارخانه زغال شویی البرزشرقی (مهندس یزدی، صالحی و اسدی) و از اساتید فرزانه و دلسوز؛ جناب آقایان دکتر جهانی و دکتر عزیزی که زحمت داوری این پایان نامه را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این تقدیر و تشکر، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تعهد نامه

اینجانب رامین آهوار دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فراوری مواد معدنی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی امکان جایگزینی گازوییل با نفت سفید در مدار فلو تاسیون کارخانه زغال شویی البرز شرقی تحت راهنمایی دکتر محمد کارآموزیان متعهد می شوم .

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

در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده:

زغال سنگ سوخت گذشته و آینده است و به لحاظ تولید انرژی و سایر کاربردهایش در صنعت از مهم ترین منابع معدنی جهان می باشد. کاهش ذخایر نفت، بحران انرژی و نیازهای روز افزون بشر افق های روشنی را در صنعت فرآوری زغال سنگ ترسیم کرده است. فلوتاسیون یکی از روش هایی است که جهت جداسازی مواد بی ارزش از کانی های باارزش به کار می رود. از عوامل مؤثر در فرآیند فلوتاسیون می توان به عوامل شیمیایی (نوع و مقدار کلکتور، نوع و مقدار کف ساز و غیره)، مشخصات زغال سنگ (اندازه ذرات، ترکیب کانی شناسی و غیره) و نیز مشخصات وابسته به تجهیزات (نوع، موانع دهش هوا، ظرفیت حمل و غیره) اشاره کرد. این تحقیق بر نقش عوامل شیمیایی در فلوتاسیون زغال سنگ متمرکز شده است، همچنین یافتن مقدار بهینه آنها و نیز امکان جایگزینی گازوییل با نفت سفید به عنوان کلکتور (به دلیل قیمت ارزانتر نفت سفید) هدف اصلی این تحقیق بوده است. برای طراحی آزمایش ها از نرم افزار DX10، طرح آزمایشی سطح پاسخ (RSM) و روش ترکیب مرکزی (CCD) استفاده شد. با انتخاب پنج فاکتور سه سطحی و شش نقطه میانی، سی و دو آزمایش پیش بینی شد که پاسخ های بازیابی، کارایی جدایش و میزان خاکستر راه یافته به کنسانتره برای ارزیابی راندمان فلوتاسیون مدنظر قرار گرفت. نتایج با مطلوبیت کلی ۸۹٪ نشان داد که شرایط بهینه برای دستیابی به ماکسیمم بازیابی (۸۷/۵۱٪)، ماکسیمم کارایی جدایش (۲۶/۰۸٪) و مینیمم خاکستر راه یافته به کنسانتره (۱۲/۷٪) عبارت است از: مقدار مصرف کلکتور (گازوییل): ۱۰۰۰ g/t، مقدار مصرف کف ساز روغن کاج: ۱۵۸/۳۴ g/t، درصد جامد پالپ: ۱۰/۲۹٪ و محدوده ابعاد ذرات: (۳۵۵+۱۰۰۰ Micron). در طی انجام این آزمایش ها توسط سلول مکانیکی، سایر شرایط از جمله: دور همزن در ۱۰۰۰ دور در دقیقه، pH پالپ برابر ۷، نوع کف ساز روغن کاج و زمان کف گیری بهینه در حالت استفاده از گازوییل، نفت سفید و حالت ترکیب مساوی از این دو به ترتیب در ۳، ۲/۵ و ۲/۷۵ دقیقه، ثابت و یکسان در نظر گرفته شدند. ضمناً ترکیبی از آب و نرمه زغال سنگ به همراه درصد جزئی از رزینها، به عنوان کلکتور جدید معرفی و با همان روش آزمایشی اشاره شده در فوق به تعداد ده آزمایش انجام شد. شرایط ثابت در طی انجام این آزمایش ها نیز مطابق شرایط سی و دو آزمایش قبلی بود، ضمن این که عواملی از جمله: ۳۵۰ g/t مقدار مصرف کف ساز (روغن کاج)، ۵ kg/t میزان مصرف این نوع کلکتور و ۲/۵ دقیقه زمان کف گیری در طی انجام این ده آزمایش به طور ثابت در نظر گرفته شدند. فاکتورهای درصد جامد و محدوده دانه بندی به عنوان متغیرها و خاکستر محتوی کنسانتره و کارایی جدایش به عنوان پاسخ ها در نظر گرفته شدند. نتایج با مطلوبیت کلی ۹۰٪ نشان داد که شرایط بهینه

برای دستیابی به مینیمم خاکستر راه یافته به کنسانتره (۹/۱٪) و ماکسیمم کارایی جدایش (۲۷/۸۲٪) عبارت است از: ۱۰/۳٪ درصد جامد و (۳۵۵-۱۰۰۰ Micron) محدوده ابعاد ذرات. مقایسه مقادیر به دست آمده برای کارایی جدایش و کاهش خاکستر به دست آمده در این روش (روش دوم)، مزیت و برتری این کلکتور را به روشنی اثبات می کند.

کلمات کلیدی: فلوتاسیون، زغال سنگ البرز شرقی، کلکتور، نفت سفید، گازویل.

لیست مقالات مستخرجه از پایان نامه:

➤ اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های نوین در علوم فنی و مهندسی - خرداد ماه ۱۳۹۵

با عنوان: « تعیین زمان کف‌گیری بهینه درمقیاس آزمایشگاهی برای فلوتاسیون زغال‌سنگ البرز شرقی

هنگام استفاده از کلکتورهای نفت و گازوییل »

➤ سومین کنگره ملی زغال‌سنگ ایران

با عنوان: « ارزیابی راندمان فلوتاسیون زغال‌سنگ البرز شرقی در حضور کلکتورهای نفت و گازوییل »

فهرست مطالب

۱	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- هدف تحقیق
۴	۳-۱- ضرورت انجام تحقیق
۵	۴-۱- طبقه‌بندی زغال سنگ
۶	۵-۱- عوامل مؤثر در فلوتاسیون زغال سنگ
۸	۱-۵-۱- اجزای شیمیایی (معرف‌های مورد استفاده در فلوتاسیون زغال سنگ)
۸	۱-۵-۱- مقدمه
۹	۱-۵-۱-۲- کلکتورها
۱۲	۱-۵-۱-۳- کف‌سازها
۱۵	۱-۵-۱-۴- ترویج دهنده‌ها
۱۵	۱-۵-۱-۵- بازداشت‌کننده‌ها
۱۵	۱-۵-۲- نحوه عملکرد معرف‌ها
۱۵	۱-۵-۲-۱- کلکتورهای روغنی نامحلول در آب
۱۵	۱-۵-۲-۱- مقدمه
۱۸	۱-۵-۲-۲- انتشار هیدروکربن‌ها در سطح مشترک جامد/آب
۲۰	۱-۵-۲-۳- اتصال قطرات روغن بر روی سطوح کانی‌ها
۲۶	۱-۵-۲-۴- تأثیر کلکتورهای روغنی در فلوتاسیون زغال سنگ
۲۶	۱-۵-۲-۲- استفاده مشترک از کلکتورهای روغنی و کف‌سازها
۳۰	۱-۶- کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی و مدار فلوتاسیون آن (طبق طرح اولیه)
۳۱	۱-۷- مراحل انجام پایان‌نامه
۳۳	فصل دوم: مروری بر تحقیق‌های گذشته
۳۴	۱-۲- تحقیق انجام شده در خصوص کارخانه زغال‌شویی زرنند کرمان
۳۵	۲-۲- سایر پژوهش‌های انجام شده در خصوص استفاده از سطح‌سازها در فلوتاسیون زغال سنگ

۴۳	فصل سوم: مواد و روش‌ها
۴۴	۳-۱- نمونه‌برداری و آماده‌سازی جهت انجام آزمایش‌های فلوتاسیون مکانیکی
۴۴	۳-۱-۱- نحوه نمونه‌برداری
۴۴	۳-۱-۲- رسم نمودار دانه‌بندی و تعیین d_{80}
۴۶	۳-۱-۳- آزمایش‌های سینتیکی
۴۶	۳-۱-۳-۱- روش اجرا
۴۷	۳-۱-۳-۲- نحوه محاسبه مقدار زغال‌سنگ لازم در آزمایش‌های سینتیکی
۴۸	۳-۱-۳-۳- اندازه‌گیری درصد خاکستر زغال‌سنگ
۴۹	۳-۱-۳-۴- آزمایش تعیین درصد مواد فرار زغال‌سنگ
۴۹	۳-۱-۳-۵- تعیین عیار زغال‌سنگ
۵۰	۳-۱-۳-۶- روش محاسبه بازیابی و کارایی جدایش
۵۰	۳-۱-۳-۷- نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های سینتیکی
۵۳	۳-۲- آنالیز اولیه خوراک فلوتاسیون
۵۳	۳-۳- انتخاب فاکتورها، سطوح و پاسخ‌ها
۵۵	۳-۴- شرایط انجام آزمایش‌ها
۵۷	فصل چهارم: ارائه یافته‌ها و نتایج
۵۸	۴-۱- مطالعه و تفسیر داده‌های مربوط به پاسخ‌ها
۵۸	۴-۱-۱- مدل برازش شده برای پاسخ‌ها
۵۸	۴-۱-۲- آنالیز واریانس
۶۲	۴-۱-۳- توزیع نرمال باقیمانده‌ها
۶۴	۴-۱-۴- آنالیز خطای پاسخ‌ها
۶۵	۴-۱-۵- نمودار Box-Cox
۶۸	۴-۱-۶- مطالعه و تفسیر داده‌های مربوط به پاسخ اول (بازیابی)
۶۸	۴-۱-۶-۱- تأثیر فاکتورهای اصلی
۷۱	۴-۱-۶-۲- نمودار حساسیت
۷۱	۴-۱-۷- مطالعه و تفسیر داده‌های مربوط به پاسخ دوم (کارایی جدایش)

۷۱	۴-۱-۷-۱- تأثیر فاکتورهای اصلی
۷۳	۴-۱-۷-۲- نمودار حساسیت
۷۴	۴-۱-۸- مطالعه و تفسیر داده‌های مربوط به پاسخ سوم (خاکستر محتوی کنسانتره)
۷۴	۴-۱-۸-۱- تأثیر فاکتورهای اصلی
۷۶	۴-۱-۸-۲- نمودار حساسیت
۷۶	۴-۲- بهینه سازی
۷۹	۴-۳- انجام آزمایش اعتبارسنجی
۷۹	۴-۴- استفاده از ترکیب جدید به‌عنوان کلکتور در فلو‌تاسیون مکانیکی زغال سنگ
۸۰	۴-۴-۱- آنالیز واریانس
۸۱	۴-۴-۲- نتیجه آزمایش و مقدار بهینه فاکتورها
۸۳	۴-۴-۳- آزمایش اعتبارسنجی
۸۵	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۸۶	۵-۱- نتیجه‌گیری
۸۹	۵-۲- پیشنهادها
۹۰	منابع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): پارامترهای مؤثر در یک سیستم فلوتاسیون..... ۷
- شکل (۲-۱): تغییرات زاویه تماس نسبت به تغییرات درصد کربن موجود در زغال سنگ..... ۷
- شکل (۳-۱): نمودار کشش سطحی بین آب/روغن نسبت به pH برای انواع نفت خام..... ۱۲
- شکل (۴-۱): تجمعی پایدار از ذرات زغال سنگ آبران در داخل روغن با عملکرد محلول آب به عنوان پل..... ۱۶
- شکل (۵-۱): مدل شماتیکی از انتشار روغن در سطح مشترک جامد/آب..... ۱۹
- شکل (۶-۱): زاویه تماس در اتصال سه فاز جامد/آب/روغن..... ۱۹
- شکل (۷-۱): توزیع قطرات روغن بر سطح زغال سنگ آبران در داخل آب..... ۲۰
- شکل (۸-۱): اتصال قطره روغن به ذره جامد در داخل آب..... ۲۰
- شکل (۹-۱): نمودارهای زتاپتانسیل - pH برای انواع زغال سنگ ها..... ۲۳
- شکل (۱۰-۱): نمودار زتاپتانسیل - pH هنگام تعلیق انواع هیدروکربن ها در داخل آب..... ۲۴
- شکل (۱۱-۱): نمودار زتاپتانسیل - pH برای امولسیون حاوی نفت سفید و سوخت های نفتی در داخل آب..... ۲۵
- شکل (۱۲-۱): تأثیر غلظت «کلرید دودسیل - آمونیم» بر پتانسیل الکتروستاتیکی قطرات هگزادکان در داخل آب..... ۲۵
- شکل (۱۳-۱): تأثیر طبقه زغال سنگ بر فلوتاسیون آن..... ۲۹
- شکل (۱۴-۱): فلوشیت اولیه کارخانه زغال شویی البرز شرقی..... ۳۲
- شکل (۱-۲): نمایش ساختار حلقوی dioxane-1,3 و dioxane-1,4..... ۳۵
- شکل (۲-۲): نمایش ساختار حلقوی (4,4-dimethyl 1,3-dioxane) و (4-methyl 1,3-dioxane)..... ۳۵
- شکل (۳-۲): شماتیک بیانگر جذب سطحی مولکول کلکتور بر روی سطح زغال سنگ..... ۳۶
- شکل (۴-۲): فلوتاسیون زغال سنگ سنگ تحت انواع شرایط: (۱) کاربرد منفرد نفت سفید، (۲) کاربرد ۰/۵ Kg/t نفت سفید
توأم با افزایش مقدار الکل n-octyl..... ۳۸
- شکل (۵-۲): نمودار ترشوندگی سطح زغال سنگ توسط دکان نسبت به مقادیر مختلف اوکتانول حل شده در دکان و
نیز تأثیر آن بر کشش سطحی آب/دکان..... ۳۸
- شکل (۱-۳): نمودار دانه بندی خوراک فلوتاسیون زغال سنگ البرز شرقی..... ۴۵
- شکل (۲-۳): نمودار بازبایی بر حسب زمان کف گیری (کلکتور نفت سفید)..... ۵۲
- شکل (۳-۳): نمودار بازبایی بر حسب زمان کف گیری (کلکتور گازوئیل)..... ۵۲

- شکل (۴-۱): نمودار توزیع نرمال باقیمانده برای بازیابی ۶۲
- شکل (۴-۲): نمودار توزیع نرمال باقیمانده برای کارآیی جدایش ۶۳
- شکل (۴-۳): نمودار توزیع نرمال باقیمانده درخصوص خاکستر راه یافته به کنسانتره ۶۳
- شکل (۴-۴): نمودار باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ‌ها ۶۵
- شکل (۴-۵): نمودار Box-Cox برای پاسخ بازیابی ۶۶
- شکل (۴-۶): نمودار Box-Cox برای پاسخ کارآیی جدایش ۶۷
- شکل (۴-۷): نمودار Box-Cox برای پاسخ خاکستر محتوی کنسانتره ۶۷
- شکل (۴-۸): تأثیر مقدار کلکتور (فاکتور A) بر میزان بازیابی ۶۸
- شکل (۴-۹): تأثیر مقدار کف‌ساز روغن کاج (فاکتور B) بر میزان بازیابی ۶۹
- شکل (۴-۱۰): تأثیر درصد جامد پالپ (فاکتور C) بر میزان بازیابی ۶۹
- شکل (۴-۱۱): تأثیر درصد اختلاط نفت سفید با گازوییل (فاکتور D) بر میزان بازیابی ۷۰
- شکل (۴-۱۲): تأثیر نماد دانه‌بندی زغال‌سنگ (فاکتور E) بر میزان بازیابی ۷۰
- شکل (۴-۱۳): نمودار حساسیت بازیابی به فاکتورهای آزمایش ۷۱
- شکل (۴-۱۴): نمودارهای تأثیر جداگانه فاکتورهای اصلی بر کارآیی جدایش ۷۲
- شکل (۴-۱۵): نمودار حساسیت برای پاسخ کارآیی جدایش ۷۳
- شکل (۴-۱۶): تأثیر جداگانه هر کدام از فاکتورهای A، B و C بر خاکستر محتوی کنسانتره ۷۴
- شکل (۴-۱۷): اثر جداگانه فاکتورهای D و E بر خاکستر محتوی کنسانتره ۷۵
- شکل (۴-۱۸): نمودار حساسیت فاکتورها حول نقطه مبنا برای خاکستر محتوی کنسانتره ۷۶
- شکل (۴-۱۹): سطوح مقدار بهینه برای فاکتورها ۷۷
- شکل (۴-۲۰): مقدار خاکستر راه یافته به کنسانتره، بازیابی و کارآیی جدایش پیش‌بینی شده به ازای انتخاب مقدار بهینه فاکتورها ۷۸
- شکل (۴-۲۱): نمودار مطلوبیت کلی و مطلوبیت جداگانه پاسخ‌ها برای ده آزمایش ۸۲

فهرست جداول

جدول (۱-۱): طبقه‌بندی زغال‌سنگ‌ها بر مبنای درجه زغال‌شدگی بر اساس استاندارد ASTM.....	۵
جدول (۲-۱): معرف‌های فلوتاسیون زغال‌سنگ.....	۹
جدول (۳-۱): انواع مختلف محصولات نفت خام.....	۱۰
جدول (۴-۱): کف‌سازهای فلوتاسیون.....	۱۳
جدول (۵-۱): کاربرد و مشخصات روغن مورد استفاده برای انواع فرآیند جدایش زغال‌سنگ.....	۱۷
جدول (۶-۱): فلوتاسیون زغال‌سنگ‌های با طبقه متفاوت در حضور انواع معرف‌ها.....	۲۷
جدول (۷-۱): تأثیر سطح سازها بر ضریب انتشار روغن پارافینی برای زغال‌سنگ صیقل داده شده Betteshanger.....	۲۸
جدول (۸-۱): راهنمای اعداد فلوشیت کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی.....	۳۲
جدول (۱-۲): مطالعات مربوطه پیشین.....	۳۹
جدول (۱-۳): آنالیز سرنبدی نمونه خوراک فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی.....	۴۵
جدول (۲-۳): بازیابی‌های به‌دست آمده در حالت استفاده از کلکتور نفت سفید.....	۵۱
جدول (۳-۳): بازیابی‌های به‌دست آمده در حالت استفاده از کلکتور گازوییل.....	۵۱
جدول (۴-۳): آنالیز اولیه خوراک فلوتاسیون کارخانه در محدوده‌های ابعادی مورد آزمایش.....	۵۳
جدول (۵-۳): پنج فاکتور و سطوح آن‌ها در طرح آزمایش با انتخاب $\alpha = 1$	۵۴
جدول (۶-۳): مشخصات سی و دو آزمایش و سطوح فاکتورهای آن به همراه مقادیر پاسخ‌های محاسبه شده.....	۵۵
جدول (۱-۴): آنالیز واریانس مربوط به پاسخ اول (بازیابی).....	۵۹
جدول (۲-۴): آنالیز واریانس مربوط به پاسخ دوم (کارایی جدایش).....	۶۰
جدول (۳-۴): آنالیز واریانس مربوط به پاسخ سوم (خاکستر کنسانتره).....	۶۱
جدول (۴-۴): مقدار بهینه پیشنهاد شده برای فاکتورها.....	۷۸
جدول (۵-۴): پیش‌بینی نتایج حاصل از انجام آزمایش بهینه.....	۷۹
جدول (۶-۴): مشخصات ده آزمایش و سطوح فاکتورهای آن به همراه مقادیر پاسخ‌های محاسبه شده.....	۸۰
جدول (۷-۴): نتایج آنالیز واریانس برای پاسخ اول (خاکستر کنسانتره).....	۸۱
جدول (۸-۴): نتایج آنالیز واریانس برای پاسخ دوم (کارایی جدایش).....	۸۱
جدول (۹-۴): مقدار بهینه پیشنهاد شده برای فاکتورها.....	۸۲

جدول (۴-۱۰): پیش‌بینی نتایج حاصل از انتخاب مقدار بهینه فاکتورها برای ده آزمایش ۸۳

فصل اول:

کلیات

تمدن عصر جدید بدون وجود منابع انرژی نمی‌تواند دوام داشته باشد. زغال‌سنگ یکی از منابع انرژی مهمی است که رشد جمعیت و توسعه تکنولوژی استفاده از آن را تشدید می‌کند. توسعه استفاده از زغال‌سنگ از یک سو و نیاز به کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی از سوی دیگر، نیازهای روزافزون برای تکنولوژی‌های شستشوی زغال‌سنگ را تشدید می‌کند و این امر مهم بدون داشتن درک روشنی از اصول کانه‌آرایی و روش‌های صحیح بهره‌برداری از آن امکان‌پذیر نیست.

مصرف زغال‌سنگ در صنایع مختلف به‌عنوان منبع انرژی جایگزین نفت و گاز در آینده‌ای نزدیک این ماده معدنی را به یک ماده استراتژیک تبدیل خواهد کرد. مصرف عمده و مهم زغال‌سنگ در تولید برق، صنایع ذوب‌آهن و فولاد است.

ایران از نظر ذخائر زغال‌سنگ مقام سی و پنجم و از دیدگاه تولید، رتبه سی و هفتم را دارد (رضایی، ۱۳۹۴).

زغال‌سنگ نوعی سنگ رسوبی آلی، قابل احتراق و از دسته کانسارهای بیوشیمیایی است که به‌طور کلی از عناصر کربن، هیدروژن، ازت، نیتروژن و مقداری ناخالصی تشکیل شده است و درصد این عناصر در زغال‌سنگ‌های مختلف متغیر است.

تفاوت بین فلوتاسیون زغال‌سنگ و سایر مواد معدنی در آن است که در مورد سایر مواد معدنی خردایش باید تا حد لازم و در محدوده کاربرد فلوتاسیون انجام گیرد، ولی در مورد زغال‌سنگ فقط آن بخشی را که نمی‌توان به‌وسیله روش‌های ثقلی پرعیار کرد (ذرات زیر ۰/۵ میلی‌متر) با روش فلوتاسیون شناور می‌شوند. روش‌های ثقلی از جمله روش واسطه سنگین موفق‌ترین روش‌های شستشوی زغال‌سنگ و جدایش مواد مزاحم همراه آن هستند که در ابعاد نسبتاً دانه درشت با زغال‌سنگ

درگیرند. ولی نمی‌توان از این روش‌ها به‌عنوان روشی مطلوب در جدایش مواد معدنی آبی که به‌صورت بسیار دانه‌ریز با ذرات زغال‌سنگ درگیر هستند، استفاده نمود (رضایی، ۱۳۹۴).

کیفیت زغال‌سنگ توسط عملیاتی در واحدهای آماده‌سازی، با کاهش مقدار ناخالصی‌ها بهبود می‌یابد. به‌طور سنتی در طراحی واحدهای شستشوی زغال‌سنگ، چنانچه ممکن باشد مرحله سنگ‌شکنی را به منظور کاهش بازیابی نرمه‌ها به کنسانتره و بالطبع کاهش هزینه فرآوری، آگیری و جابجایی این ذرات، حذف می‌کنند. به هر حال نتایج جداسازی به‌طور مستقیم به میزان درجه آزادی بستگی دارد که این موضوع نیز با کاهش ابعاد ذرات محقق می‌شود. همین امر و تشدید مکانیزاسیون، به‌طور پیوسته بازیابی نرمه‌ها را درخوراک کارخانه‌های شستشوی زغال‌سنگ افزایش داده و نهایتاً امکان راهیابی این ذرات به مدارهای فلوتاسیون را مهیا می‌سازد. با بهره‌برداری از ذرات ریز زغال‌سنگ به شکل پالپ‌های شامل آب/زغال‌سنگ، نیاز به فرآیندهای آگیری و خشک‌کنی از بین می‌رود و امکان جابجایی بدون گرد و غبار ذرات ریز زغال‌سنگ فراهم می‌شود و مشکلات انبارکردن و احتراق خودبه‌خودی در نتیجه ترابری خشک ذرات زغال‌سنگ، از بین می‌رود (Laskowski, 2001).

از آنجایی که در تمام فرآیندهای شستشوی زغال‌سنگ از آب به‌عنوان عامل واسطه استفاده می‌شود، لذا بررسی سطح مشترک آب/زغال‌سنگ از اهمیت زیادی درخصوص عملیات فلوتاسیون و به‌ویژه فرآوری ذرات ریز زغال‌سنگ برخوردار است. شیمی سطح نقش بسیار مهمی را در تمام واحدهای عملیاتی جابجایی ذرات ریز زغال‌سنگ بازی می‌کند. در مطالعه رفتار سیستم ذرات، ریزترین ذرات بیشترین تأثیر را در بررسی خواص سطحی این سیستم‌ها دارا هستند (Laskowski, 2001).

۱-۲- هدف تحقیق

در مدار فلوتاسیون هر کارخانه‌ای توجه زیادی به نوع و میزان کلکتور جهت دستیابی به عیار و بازیابی مورد نظر وجود دارد و هدف از افزودن مواد شیمیایی در فرآیند فلوتاسیون زغال‌سنگ، افزایش نرخ

فلوتاسیون، افزایش راندمان و غیره می‌باشد. در این راستا یکی از کلکتورهای قابل جایگزینی با گازوییل، نفت سفید است.

در صنعت پرقابلیت امروز دستیابی به شرایط بهینه در مدت زمانی کوتاه با صرف کمترین هزینه از عوامل مهم در کارخانجات صنعتی است. روش‌های طراحی آزمایش راهکاری مناسب برای دستیابی به این اهداف می‌باشند که در این روش‌ها به جای انجام آزمایش‌های زیاد و پرهزینه، با انجام حداقل تعداد آزمایش‌ها می‌توان به نتایجی با دقت خوب و حتی بالا دست پیدا کرد. در این تحقیق از نرم افزار Design-Expert¹⁰ و روش مطالعه «¹RSM» و نوع طرح «²CCD» جهت طرح‌ریزی آزمایش و تعیین حالت بهینه برخی فاکتورهای مهم و دخیل در عملیات فلوتاسیون مکانیکی با در نظر گرفتن برخی فاکتورهای ثابت و عملیاتی کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی استفاده شد که نهایتاً امکان‌سنجی جایگزینی کلکتور گازوییل با نفت سفید در کارخانه مذکور هدف اصلی این تحقیق بوده است.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

سال ۱۳۹۳ ه.ش سال پرمخاطره‌ای برای طلای سیاه (نفت خام) بود. در ابتدای این سال قیمت نفت خام حدود ۱۰۰ دلار در هر بشکه بود، اما در روزهای پایانی سال قیمت آن به ۴۵ دلار در هر بشکه کاهش یافت که به معنای افت قیمتی بیش از ۵۰ درصد است. در این سال نفت به کمترین قیمت خود طی شش سال قبل رسید. طبق پیش‌بینی کارشناسان این حوزه، روند نزول قیمت نفت خام و به تبع آن نفت سفید و افزایش هزینه تولید سایر مشتقات نفتی از جمله گازوییل تا اواخر سال ۲۰۲۰ میلادی نیز تداوم خواهد داشت. همین موضوع مسئولین و مهندسان کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی را برآن داشت تا در صورت محقق شدن راندمان مطلوب امکان جایگزینی کلکتور گازوییل با نفت سفید در مدار فلوتاسیون این مجتمع را با هدف کاهش هزینه‌های عملیاتی در قالب طرحی مطرح کنند که همین امر ضرورت انجام این تحقیق بوده است.

¹ Response Surface Method

² Central Composite Design

۴-۱- طبقه‌بندی زغال سنگ

زغال سنگ ماده‌ای ناهمگن و ترکیبی از مواد آلی و معدنی است و طبقه‌بندی آن تا حدودی به منشاء مواد اولیه زغال سنگ، زمان تشکیل، تغییرات انجام گرفته در مرحله زغال‌شدگی و بسیاری از پارامترهای دیگر وابسته است. تلاش برای طبقه‌بندی زغال سنگ از یک و نیم قرن پیش آغاز شد و هدف اصلی آن تفکیک و مشخص کردن نسبی انواع مختلف زغال سنگ بوده است. به تدریج از سال ۱۹۰۰ میلادی به بعد، طبقه‌بندی زغال سنگ در قالب طرح‌های ملی بسط و گسترش یافت. یکی از متداول‌ترین روش‌های موجود برای طبقه‌بندی زغال سنگ استفاده از پارامتر «زغال‌شدگی» است (رضایی، ۱۳۹۴).

جدول (۱-۱) طبقه‌بندی انواع زغال سنگ را بر مبنای درجه زغال‌شدگی و منطبق بر استاندارد ASTM نشان می‌دهد (ASTM D388-12).

جدول (۱-۱): طبقه‌بندی زغال سنگ‌ها بر مبنای درجه زغال‌شدگی بر اساس استاندارد ASTM (ASTM D388-12)

طبقه زغال	کربن ثابت (% dmmf)	مواد فرار (% dmmf)	ارزش حرارتی ناخالص (Btu/lb)	مشخصات متراکم کنندگی
آنتراسیت	متاآنتراسیت	> 98	< 2	غیر متراکم کننده
	آنتراسیت	$92-98$	$2-8$	
	نیمه آنتراسیت	$86-92$	$8-14$	
بیتومینه	بیتومینه کم فرار	$78-86$	$14-22$	متراکم کنندگی عادی
	بیتومینه متوسط فرار	$69-78$	$22-31$	
	بیتومینه بسیار فرار گروه A	< 69	> 31	

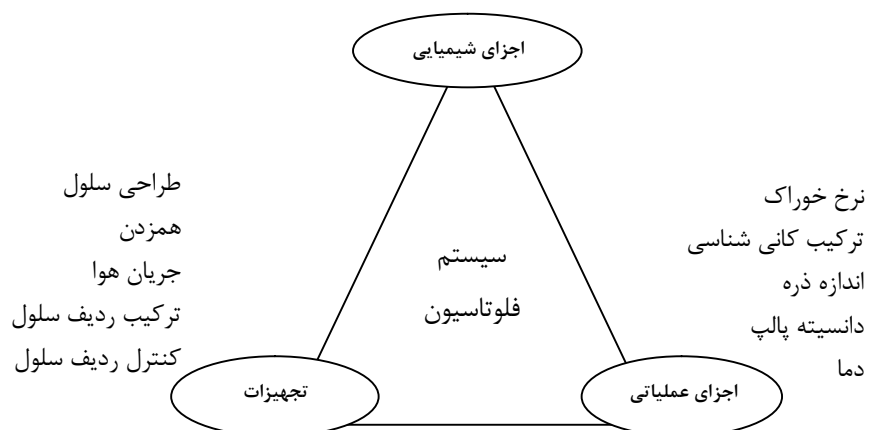
ادامه جدول (۱-۱)

مشخصات متراکم کنندگی	ارزش حرارتی ناخالص (Btu/lb)	مواد فرار (% dmmf)	کربن ثابت (% dmmf)	طبقه زغال	
متراکم کنندگی عادی	۱۳۰۰۰ - ۱۴۰۰۰	> ۳۱	< ۶۹	بیتومینه بسیار فرار گروه B	بیتومینه
	۱۱۵۰۰ - ۱۳۰۰۰	> ۳۱	< ۶۹	بیتومینه بسیار فرار گروه C	
کاملاً متراکم کننده	۱۰۵۰۰ - ۱۱۵۰۰	> ۳۱	-	بیتومینه بسیار فرار گروه C	
غیر متراکم کننده	۱۰۵۰۰ - ۱۱۵۰۰	۱۴-۲۲	-	نیمه بیتومینه گروه A	نیمه بیتومینه
	۹۵۰۰ - ۱۰۵۰۰	۲۲-۳۱	-	نیمه بیتومینه گروه B	
	۸۳۰۰ - ۹۵۰۰	< ۳۱	-	نیمه بیتومینه گروه C	
غیر متراکم کننده	۶۳۰۰ - ۸۳۰۰	< ۳۱	-	لیگنیت گروه A	لیگنیت
	< ۶۳۰۰	-	-	لیگنیت گروه B	

۱-۵- عوامل مؤثر در فلوتاسیون زغال سنگ

شکل (۱-۱) شماتیکی از پارامترهای کلی مؤثر بر فلوتاسیون را نشان می‌دهد. این پارامترها به سه گروه: «عوامل شیمیایی، پارامترهای عملیاتی و تجهیزاتی» دسته‌بندی می‌شوند (Kawatra., 2011). پارامترهای سطح اول آنهایی هستند که می‌توانند در طول عملیات روزانه برای بهینه کردن عملکرد تغییر یابند و تنظیم شوند. پارامترهای سطح دوم آنهایی هستند که می‌توانند در مرحله طرح یا بعد از یک تعمیرات اساسی تنظیم شوند. پارامترهای سطح سوم آنهایی هستند که توسط طرح اولیه یا مهندس فرآیند کنترل نمی‌شوند (حق پرست ده عرب، ۱۳۸۱).

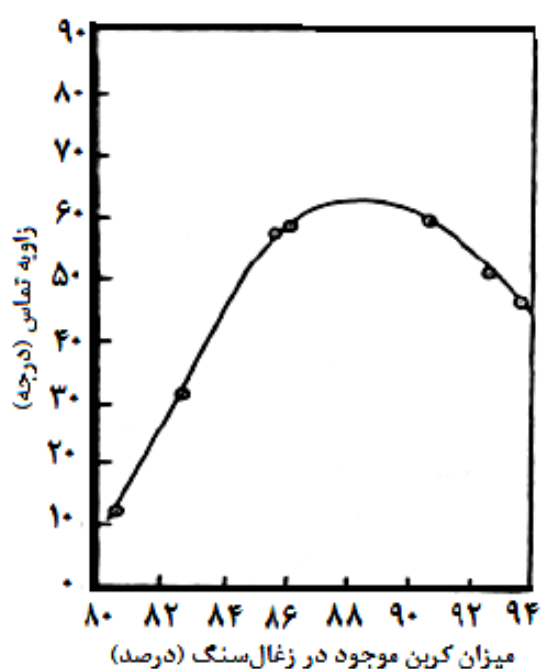
اجزای شیمیایی: (کلکتورها، کف‌سازها، فعال‌کننده‌ها، بازدارنده‌ها، تنظیم‌کننده‌های pH)



شکل (۱-۱): پارامترهای مؤثر در یک سیستم فلوئوتاسیون (Kawatra., 2011)

شکل (۲-۱) آبرانی انواع زغال‌سنگ‌ها را با استفاده از تکنیک اندازه‌گیری زاویه تماس نشان می‌دهد

(رضایی، ۱۳۹۴). مطابق شکل زیر آبرانی در 4 ± 88 درصد کربن، دارای بیشترین مقدار است.



شکل (۲-۱): تغییرات زاویه تماس نسبت به تغییرات درصد کربن موجود در زغال سنگ (رضایی، ۱۳۹۴)

مواد شناور عناصر هیدروژن، کربن و غیره را شامل می‌شود، اما اجزای غیر قابل شناور درصدهای نسبتاً پایینی از جمله: آب، اکسیژن و خاکستر است. قابلیت شناوری نسبتاً پایین زغال سنگ بیتومینه به

میزان بالای آب و اکسیژن ارتباط دارد و دلیل اصلی برای قابلیت شناوری پایین زغال سنگ آنتراسیت نسبت به نوع بیتومینه، به درصد پایین هیدروژن مربوط است. زغال سنگ‌های به میزان کافی اکسید شده در درجه حرارت‌های بالا به دلیل افزایش قابل توجه مقادیر اکسیژن و خاکستر، همراه با کاهش زیاد هیدروژن و کربن، دارای قابلیت شناوری پایینی هستند. دلیل افزایش قابلیت شناوری لیگنیت و آنتراسیت اکسید شده در دمای پایین به خواص جمع‌کنندگی یا کف‌کنندگی محصولات اکسید شده قابل حل در آب، نسبت داده می‌شود. اکسیداسیون لیگنیت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش شدید مقدار رطوبت و کاهش نسبتاً کمی در مقادیر هیدروژن و کربن آن‌ها می‌شود. مزیت حاصل از کاهش آب بیش از زیان ناشی از کاهش هیدروژن و کربن است (حق‌پرست ده عرب، ۱۳۸۱).

۱-۵-۱- اجزای شیمیایی (معرف‌های مورد استفاده در فلوتاسیون زغال سنگ)

۱-۵-۱-۱- مقدمه

رفتار زغال سنگ در فرآیند فلوتاسیون علاوه بر خاصیت شناوری ذاتی آن (آبرانی ذاتی)، با میزان شناوری اکتسابی ناشی از کاربرد معرف‌های فلوتاسیون نیز تعیین می‌شود.

فلوتاسیون زغال سنگ مشابه سایر فرآیندهای شناورسازی، نیازمند استفاده از معرف‌ها (واکنشگرهای فلوتاسیون) است. از آنجایی که زغال سنگ‌ها از نظر آبرانی ذاتی مانند گرافیت، تالک، سولفور و مولیبدنیت در گروه جامدات یکسانی طبقه‌بندی می‌شوند، فلوتاسیون آن‌ها نیازمند معرف‌های یکسانی است. ویژگی بارز این گروه از کانی‌ها استفاده از هیدروکربن‌ها (روغن‌های نفتی) به عنوان کلکتور است. اولین و شاید بارزترین تفاوت موجود بین این گروه از کلکتورها با کلکتورهای یونی مورد استفاده در فلوتاسیون سایر کانی‌ها در نامحلول بودن این گروه از کلکتورها در آب می‌باشد. استفاده هم‌زمان از روغن نامحلول در آب (به عنوان کلکتور) و کف‌ساز محلول در آب یک سیستم فیزیکی- شیمیایی را به وجود می‌آورد که این مکانیسم به طور ضعیف درک شده است (Laskowski., 2001).

طبقه‌بندی عمومی در خصوص معرف‌های مورد استفاده در فلوتاسیون زغال‌سنگ در جدول (۲-۱) آورده شده است (Fuerstenau et al., 2007).

جدول (۲-۱): معرف‌های فلوتاسیون زغال‌سنگ (Fuerstenau et al., 2007)

نوع	کاربرد در فلوتاسیون به‌عنوان	گروه عاملی	مثال‌ها	عملکرد
غیرقطبی (نامحلول در آب)	کلکتورها	-	نفت سفید، سوخت کوره (گازوییل)	ترکندگی انتخابی و اتصال قطرات روغن به ذرات زغال‌سنگ
فعال کننده سطحی (محلول در آب)	کف‌سازها	هیدروکسیلی نیتروژنی	الکل‌های چربی‌دار، روغن‌های قطران شامل Pyridine	کف‌سازهای دارای خاصیت کلکتوری، همچنین بهبود دهنده فرآیند امولسیون سازی کلکتورهای روغنی
امولسیفایرها (محلول در کلکتور روغنی)	ترویج‌دهنده‌ها	هیدروکسیلی، نیتروژنی، کربوکسیلی	الکل‌های پلی اتوکسیلات، اسیدهای چرب و غیره	کمک‌کننده کلکتور در جهت امولسیون سازی و انتشار آن در سطح زغال‌سنگ
غیرآلی (نمک‌های محلول در آب)	تعدیل کننده‌ها	-	NaCl, CaCl ₂ , Na ₂ SO ₄ , H ₂ SO ₄ , CaO	ترویج‌دهنده‌ها، تنظیم کننده pH و بازداشت کننده سولفید
کلوئیدهای حفاظت کننده	بازداشت کننده‌ها	هیدروکسیلی، کربوکسیلی	پلیمرها: نشاسته، دکسترین، "کربوکسی متیل سلولز" و غیره	تعدیل کننده‌ها و بازداشت کننده‌های زغال‌سنگ

۱-۵-۲- کلکتورها

دو نوع از هیدروکربن‌ها به‌عنوان کلکتور در فلوتاسیون زغال‌سنگ استفاده شده است. هیدروکربن‌های حاصل از محصولات جانبی کوره زغالی و دیگری هیدروکربن‌های حاصل از نفت خام. طی سی سال گذشته، کاربرد این نوع کلکتورها بسیار رایج بوده است، اما استفاده از آن‌ها در فلوتاسیون زغال‌سنگ

به دلیل داشتن فنول ها و سایر هیدروکربن های حلقوی سمی، متوقف شد و در نتیجه این محصولات با روغن های به دست آمده از نفت خام، جایگزین شدند (Laskowski., 2001).

طبق استاندارد (ASTM-D288)، نفت خام به عنوان یک ترکیب به وجود آمده طبیعی تعریف می شود که از درون لایه های زمین به حالت فاز مایع جابجا شده و به طور برجسته شامل هیدروکربن ها و یا سولفور، نیتروژن و اکسیژن حاصل از تقطیر هیدروکربن ها می باشد (Laskowski., 2001).

جدول (۳-۱) اطلاعاتی در خصوص انواع مختلف محصولات نفت خام و چگونگی تقسیم بندی انواع هیدروکربن ها در قسمت های مختلف را نشان می دهد (Seitz and Kawatra., 1986).

جدول (۳-۱): انواع مختلف محصولات نفت خام (Seitz and Kawatra., 1986)

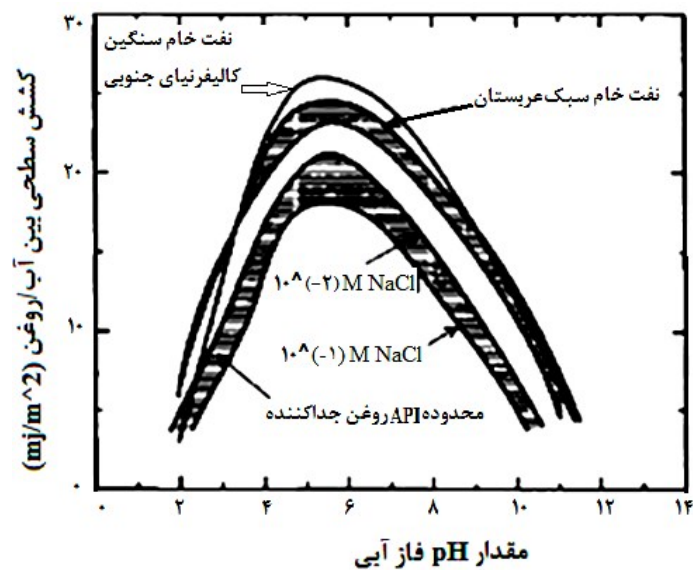
گروه	مثال ها
A (سوخت موتورهای بنزینی)	گاز طبیعی
B (مقطرهای سبک)	۱- بنزین موتور ۲- نفتاهای حل کننده ۳- نفت سفید ۴- روغن های حرارتی سبک
C (مقطرهای میانی)	۱- نفت کوره (مازوت) های سنگین ۲- نفت کوره (مازوت) های موتورهای دیزلی ۳- گازوئیل ها
D (مقطرهای سنگین)	۱- روغن های معدنی (نفت غیر سفید) سنگین ۲- روغن های سنگین قابل شناور ۳- واکس ها ۴- روغن های روان کننده *
E (باقی مانده های تقطیر)	۱- روغن های روان کننده ۲- نفت های کوره (مازوت) ۳- وازلین ۴- آسفالت ها ۵- روغن های مخصوص راهسازی ۶- کک نفتی

* تقسیم بندی روغن های روان کننده بر اساس خاصیت ویسکوزیته و دما-ویسکوزیته می باشد.

سوخت کوره شماره ۲ (گازویل) که در اکثر موارد در فلوتاسیون زغال سنگ استفاده می‌شود، یکی از محصول‌هایی است که در محدوده دمای تقطیر ۳۴۳-۲۰۴ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. این سوخت شامل پارافین‌ها، ایزوپارافین‌ها، آروماتیک‌ها، نفتن‌ها و همچنین هیدروکربن‌های حاوی پیوند سولفور، نیتروژن و اکسیژن‌داری است که در مرحله تصفیه جدا نشده‌اند. سوخت‌های کوره همچنین در میان محصولات لیست شده در پایین بخش باقی‌مانده‌های تقطیر دیده می‌شوند. این‌ها هیدروکربن‌های پارافینی و حلقوی با وزن مولکولی بالایی هستند که با مشتقات اکسیژن، گوگرد و نیتروژن همراه هستند. از آنجایی که این روغن‌های نفتی با برخورداری از ویسکوزیته بالا شناخته می‌شوند، لذا با مقطرهای میانی مخلوط می‌شوند. ترکیباتی که شامل ۲۵-۲۰٪ مقطرهای میانی باشند، به‌عنوان سوخت‌های کوره شماره ۴ و ۵ نام‌گذاری می‌شوند و ترکیب محتوی فقط ۲۰-۵٪ مقطر، به‌عنوان سوخت کوره شماره ۶ نام‌گذاری می‌شود که این گروه (گروه شماره ۶)، شامل مقدار جزئی عناصر وانادیوم و نیکل (۵۰۰ ppm - ۱۰) می‌باشند.

برای هیدروکربن‌های چربی‌دار^۱، نیروی کشش سطحی بین آب و هیدروکربن به مقدار جزئی از 25 mj/m^2 بیشتر است. کشش سطحی بین آب و روغن برای محصولات حاصل از نفت خام اغلب در محدوده $25-32 \text{ mj/m}^2$ تا حد پایین 12 mj/m^2 تغییر می‌کند. این نشان می‌دهد که این محصول‌ها دارای هیدروکربن‌های با گروه‌های قطبی هستند. شکل (۱-۳) از وودز و دیامادوپلوز (Woods and Diamadopoulos., 1988) برگرفته شده است که کشش سطحی بین آب و روغن نفتی را به‌عنوان تابعی از pH برای چند مورد از نفت‌های خام نشان می‌دهد. این رابطه ثابت می‌کند که نفت‌های خام دارای اجزای فعال سطحی هستند، خصوصاً این که تأثیر بارز pH بر کشش سطحی آب/روغن برای بخش‌های سنگین نفت خام از جمله آسفالتن‌ها (مایع‌های قیری) گزارش شده است (Laskowski., 2001).

^۱ Aliphatic



شکل (۳-۱): نمودار کشش سطحی بین آب/روغن نسبت به pH برای انواع نفت خام (Laskowski., 2001)

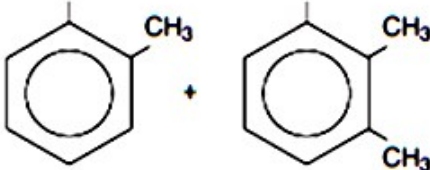
۱-۵-۳- کف‌سازها

لیست کف‌سازهای رایج فلوتاسیون در جدول (۴-۱) آورده شده است (Fuerstenau et al., 2007).

در گذشته از زیلنول‌ها^۱ (خانواده‌ایی از هیدروکربن‌های سمی، قابل اشتعال و معطر) و کریزول‌ها (اسیدهای کریزلیک) به مقدار زیاد در فلوتاسیون زغال سنگ استفاده می‌شد که امروزه با الکل‌های چربی‌دار و یا اترهای پلی‌گلیکول جایگزین شده‌اند.

^۱ xlenols

جدول (۴-۱): کف‌سازهای فلوئتاسیون (Fuerstenau et al., 2007)

نام	فرمول شیمیایی	قابلیت انحلال در آب
الکل‌های چربی‌دار MIBC 2-ethyl hexanol 2,2,4-trimethylpenta nediol 1,3-mono iso butyrate (Texanol)	$ \begin{array}{c} \text{R-OH} \\ \text{CH}_3 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{OH} \end{array} $ $ \text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{OH} \\ \\ \text{CH}_2 - \text{CH}_3 $ $ \begin{array}{ccccccc} & \text{CH}_3 & & \text{CH}_3 & & \text{O} & \text{CH}_3 \\ & & & & & & \\ \text{CH}_3 - & \text{CH} & - & \text{CH} & - & \text{C} & - \text{CH}_2 - \text{O} - \text{C} - \text{CH} \\ & & & & & & \\ & \text{OH} & & \text{CH}_3 & & & \text{CH}_3 \end{array} $	کم کم نامحلول
الکل‌های حلقوی α -Terpinol سیکلو‌هگزانول	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C} \\ / \quad \backslash \\ \text{H}_2\text{C} \quad \text{CH} \\ \quad \\ \text{H}_2\text{C} \quad \text{CH}_2 \\ \backslash \quad / \\ \text{C} \\ \\ \text{CH}_3 - \text{C} - \text{CH}_3 \\ \\ \text{OH} \end{array} $ $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{OH}$	کم کم
الکل‌های معطر اسید کریزیلیک		کم
کف‌سازهای نوع پلی گلیکول	$\text{R (x)}_n\text{OH}$, $\text{R}=\text{H}$ یا $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$, $\text{X}=\text{EO}$, PO یا BO	بسیار خوب یا مطلق
	$\text{CH}_3(\text{PO})_4\text{OH}$	مطلق
	$\text{CH}_3(\text{PO})_6\text{OH}$	۳۲٪
	$\text{H (PO)}_6\text{OH}$	مطلق
	$\text{CH}_3(\text{PO})_4(\text{BO})\text{OH}$	بسیار خوب
		DF 250 DF 1012 Aerofroth 65 DF 400 DF- 1263

آن دسته از الکل‌های گروه چربی‌دار که شامل گروه‌های منفرد OH- هستند، معمولاً در آب به‌صورت جزئی حل می‌شوند. کف‌سازهای این گروه در زنجیر هیدروکربنی خود ۵ تا ۸ اتم کربن دارند، این گروه شامل: «الکل ایزوآمیل، هگزانول، سیکلو هگزانول و هپتانول» است. بهترین نمونه شناخته شده از این گروه MIBC^۱ و «دو اتیل هگزانول» است. امروزه تولیدکننده‌های متعددی MIBC را مشابه سایر محصول‌های تجاری (مثلاً کلوئیدهای پروکل F937^۲، ویتکو آئروسورف^۴ F-139 و F-141) عرضه می‌کنند.

کف‌سازهای نوع پلی‌گلیکول مشتقات پلیمری حاصل از اکسید اتیلن یا اکسید پروپیلن هستند. این گروه شامل کف‌سازهای به‌خوبی شناخته شده و عرضه شده با نام تجاری داو فروث^۵ هستند. این محصولات توسط اتحادیه کاربید^۶ (به نام کف‌سازهای PPG)، سیانامید^۷ (آئرو فروث^۸)، موسسه ICI استرالیا (به نام کف‌سازهای سری Terick 400)، شرکت هانتسمن^۹ (کف‌سازهای Unifroth 250) و شرکت ویتکو (آئروسورف F-214 و F-215) و سایر تولیدکنندگان عرضه می‌شوند. کف‌سازهای این گروه براساس قابلیت انحلال کلی یا جزئی شان در آب طبقه‌بندی می‌شوند که این طبقه‌بندی بر اساس اختلاف نسبت گروه‌های آبران (مثلاً گروه‌های -CH₂-) به گروه‌های آب‌پذیر (-CH₂-CH₂O) در مولکول کف‌ساز، انجام می‌شود.

در ادامه بیان می‌شود که کف‌سازها در فلوتاسیون زغال سنگ برخی خواص کلکتوری نیز از خود نشان می‌دهند (Laskowski., 2001).

^۱ methyl-iso-butyl carbinol

^۲ Allied Colloids

^۳ Procol F937

^۴ Witco Arosurf

^۵ Dowfroth

^۶ Union Carbide

^۷ Cyanamid

^۸ Aerothroth

^۹ Huntsman

۱-۵-۱-۴- ترویج دهنده‌ها^۱

از آنجایی که اکثر مدارهای فلوتاسیون زغال سنگ، شرایط امولسیون سازی و به عنوان مثال آماده سازی برای کلکتور را به رغم استفاده از کلکتورهای نامحلول در آب فراهم نمی کنند، استفاده از امولسیفایرهای فعال کننده سطح (ترویج دهنده‌ها) می تواند امولسیون سازی (متفرق سازی) و جذب سطحی کلکتور روغنی (نفتی) توسط ذرات زغال سنگ را بهبود بخشد. این موضوع دلیل اصلی توسعه مواد به اصطلاح ترویج دهنده‌ها است.

۱-۵-۱-۵- بازداشت کننده‌ها

نحوه عملکرد یک بازداشت کننده دقیقاً برخلاف عملکرد یک کلکتور است و مانع شناوری کانی خاص می شود. از آنجایی که زغال سنگ‌ها آبران هستند، بازداشت آن‌ها در فرآیند فلوتاسیون تنها با آب دوست کردن سطح آن‌ها انجام می شود.

برای بازداشت زغال سنگ معمولاً از نشاسته‌ها، به خصوص دکستروز و هیدروکلئیدهای طبیعی استفاده می شود. به طور کلی هر ماده شیمیایی که سطح زغال سنگ را اکسیده کند، خواص آبرانی آن را مختل می سازد و نقش بازداشت کنندگی دارد (رضایی، ۱۳۹۴).

۱-۵-۲- نحوه عملکرد معرف‌ها

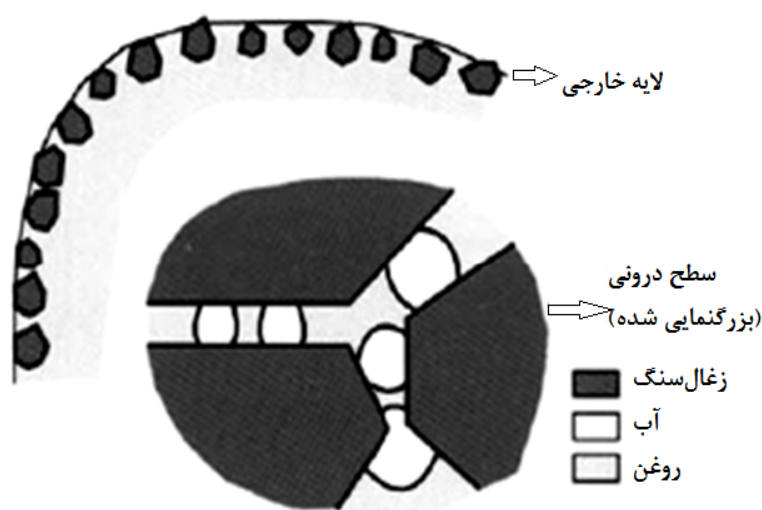
۱-۵-۲-۱- کلکتورهای روغنی نامحلول در آب

۱-۵-۲-۱-۱- مقدمه

سوسپانسیون‌ها و امولسیون‌ها یا به طور کلی سیستم‌های متفرق ساز توسط مقدار بالایی از انرژی آزاد مشخص می شوند که این انرژی آزاد از ایجاد سطح مشترک و اختلاف نیروی کششی موجود بین این

^۱ Promoters

سطوح به وجود می‌آید. از آنجایی که سطح مشترک بین ذرات ریز معلق و نیز قطرات معلق روغن یا آب در درون فاز آبی وسیع است، لذا تمایل سیستم از هم گسیخته در این است که بتواند از طریق تجمع ذرات، این سطح را محدود کند (انعقاد یا به هم پیوستن قطرات امولسیون) که این امر توسط کواگولاسیون و یا فلوکولاسیون می‌تواند انجام شود. هنگامی که روغن به فرم قطرات ریز به داخل محلول سوسپانسیون آبی شامل ذرات آبران پخش می‌شود، این احتمال وجود دارد که ذرات جامد آبران بتوانند توسط قطرات روغن دور هم تجمع یابند. در نتیجه روغن به طور ترجیحی سطح ذرات آبران را تر می‌کند (شکل ۱-۴) (Good et al., 1994). این فرآیند به آگلومراسیون روغنی^۱ معروف است و در بسیاری از فرآیندهای جدایش نقش مهمی را ایفا می‌کند (Laskowski., 2001).



شکل (۱-۴): تجمعی پایدار از ذرات زغال سنگ آبران در داخل روغن با عملکرد محلول آب به عنوان پل (Good et al., 1994)

مطابق جدول (۱-۵) بسته به کمیت مایع مخلوط نشدنی (روغن نفتی)، شرایط هیدرودینامیکی و نوع روش به کار رفته برای جداسازی ذرات به هم چسبیده، نتیجه نهایی ممکن است بسیار متفاوت باشد (Finkelstein., 1979).

¹ Oil agglomeration

جدول (۱-۵): کاربرد و مشخصات روغن مورد استفاده برای انواع فرآیند جدایش زغال سنگ (Finkelstein., 1979)

تکنیک (روش)	کلکتور یونی	کلکتور روغنی	مصرف روغن (kg/t)	شرایط	روش جداسازی
فلوتاسیون توسعه دهنده	بلی	بلی	۰/۵ - ۰/۰۵	عادی (منظم)	فلوتاسیون
فلوتاسیون به روش آگلومراسیون	بلی	بلی	چند کیلوگرم بر تن	سخت (شدید)	فلوتاسیون
فلوتاسیون به روش امولسیون سازی	خیر	بلی	تا حدود چند کیلوگرم بر تن	عادی (منظم)	فلوتاسیون
آگلومراسیون روغنی	بلی	بلی	۵ - ۱۰ %	عادی / سخت	دانه بندی
استخراج مایع - مایع	بلی	بلی	کاربرد ندارد	سخت (شدید)	جدایش فازی

اولین فرآیند در جدول یعنی «فلوتاسیون توسعه دهنده»^۱ می باشد که در آن از یک روغن با مقدار کم (حداکثر چند هزار گرم به ازای هر تن ماده معدنی) جهت بهبود عملکرد کلکتور و یا کاهش میزان مصرف آن استفاده می شود. روغن های توسعه دهنده به تناوب جهت بهبود فلوتاسیون ذرات درشت استفاده شده اند.

فلوتاسیون به روش آگلومراسیون^۲ در خصوص ذرات بسیار ریزی که در روش های مرسوم فلوتاسیون دارای بازیابی مطلوبی نبودند، ابداع شد. در این روش از روغن جهت افزایش ابعاد ذرات به واسطه آگلومراسیون آن ها استفاده می شود. این روش در گام اول شامل آماده سازی پالپ در چگالی بالا از کلکتور مناسب به منظور انتقال ذرات آبران می باشد و قدم دوم افزودن روغن جهت ایجاد پلی برای اتصال ذرات ریز به همدیگر است. رقیق سازی پالپ و سپس انجام فلوتاسیون مرسوم کفی جزء مراحل بعدی می باشند (Laskowski., 2001).

^۱ Extender flotation

^۲ Agglomerate flotation

کاربرد روش فلوتاسیون به روش امولسیون^۱ در ارتباط با جامدات ذاتاً آبران از جمله: زغال سنگ‌ها، تالک، مولیبدنیت، سولفور و گرافیت مطرح شده است. در این فرآیند از روغن نامحلول در آب، به عنوان کلکتور استفاده می‌شود. در هر دو روش فلوتاسیون به روش آگلومراسیون و امولسیون، مقدار استفاده از روغن نسبت به روش فلوتاسیون بسط‌دهنده بیشتر است (حداکثر تا چند کیلوگرم بر تن).

سه فرآیند اول اشاره شده در جدول (۵-۱) به یک خانواده از فرآیندهای فلوتاسیون تعلق دارند، اما دو مورد بعدی چنین نیستند. فرآیند به اصطلاح آگلومراسیون توسط فاز مایع^۲ که توسط کاپس^۳ رایج شد، می‌تواند جهت فرآوری ذرات ریز زغال سنگ توسط جداسازی ذرات آبران از باطله غیرآلی و آب‌دوست آن استفاده شود (Capes., 1989).

در تمام این فرآیندها، محلول ثانویه اضافه شده تحت شرایط مناسب هیدرودینامیکی، بایستی با محلول به حالت تعلیق درآمده، مخلوط پذیر نبوده (مانند آب در آماده‌سازی زغال سنگ) و نیز توانایی جابجایی این محلول از سطح ذرات مورد نظر (زغال سنگ) را داشته باشد (Laskowski., 2001).

۱-۵-۲-۱-۲- انتشار هیدروکربن‌ها در سطح مشترک جامد/آب

انتشار فاز آلی در سطح مشترک جامد/آب (شکل ۱-۵)، نیازمند یک تغییر در انرژی آزاد است (طبق رابطه زیر):

$$\Delta G_{Spread} = \gamma_{SO} + \gamma_{OW} - \gamma_{SW} \quad (1-1)$$

از جایگذاری γ_{SW} حاصل از رابطه یانگ (رابطه ۱-۸) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta G_{Spread} = \gamma_{OW}(1 - \cos\theta_{oil}) \quad (2-1)$$

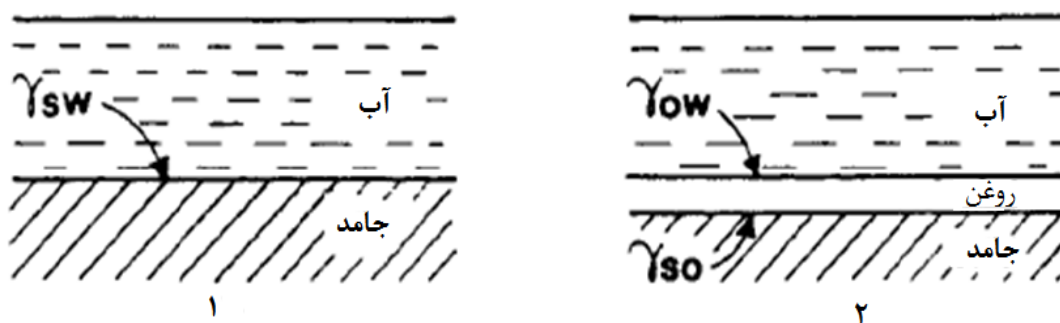
اما از آنجایی که $\theta_{oil} = 180 - \theta$ (شکل ۱-۶) در نتیجه:

$$\Delta G_{Spread} = \gamma_{OW}(1 + \cos\theta) \quad (3-1)$$

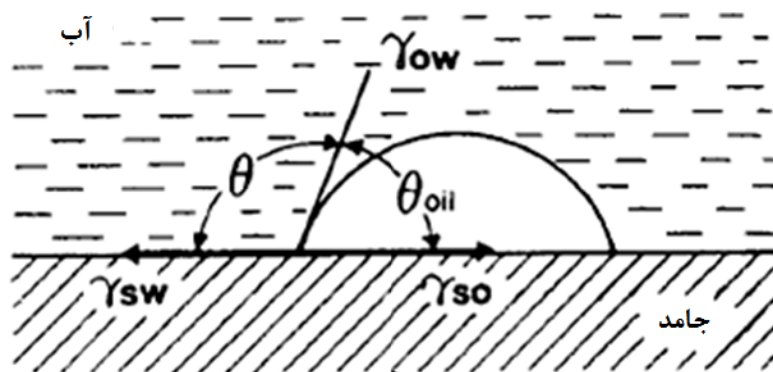
¹ Emulsion Flotation

² Liquid phase agglomeration

³ Capes



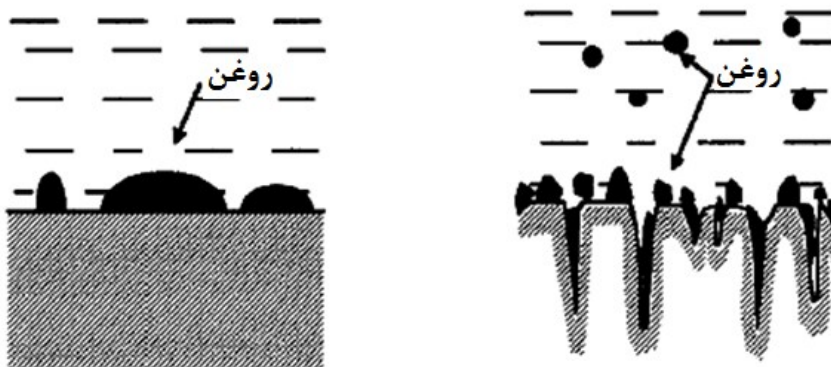
شکل (۵-۱): مدل شماتیکی از انتشار روغن در سطح مشترک جامد/آب (Laskowski., 2001).



شکل (۶-۱): زاویه تماس در اتصال سه فاز جامد/آب/روغن (Laskowski., 2001)

ΔG_{Spread} همواره مقدار مثبتی است که نشان می‌دهد انتشار روغن به داخل پرده نازک واقع در سطح مشترک جامد/آب، از نظر ترمودینامیکی همواره ناممکن است. فقط زمانی که $\cos\theta = -1$ (یعنی $\theta = 180^\circ$)، در این حالت $\Delta G_{Spread} = 0$ خواهد بود، که عملاً این شرایط هیچ‌گاه رخ نمی‌دهد (Laskowski., 2001).

مطابق شکل (۷-۱) تا زمانی که شرایط برای جانشینی روغن با آب یا هوا در ترک‌های مویین یا فضای خالی بین ذرات زغال‌سنگ مهیا باشد، خلل و فرج موجود در سطح زغال‌سنگ به مقدار ناچیز با روغن پر می‌شوند (Laskowski., 2001).

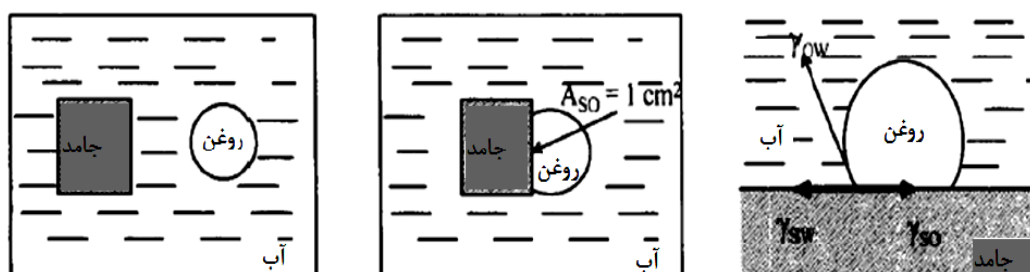


شکل (۷-۱): توزیع قطرات روغن بر سطح زغال سنگ آبران در داخل آب (Laskowski., 2001)

مشاهده‌های اخیر نشان دادند که در خصوص ذرات زغال سنگ آبران غوطه‌ور در آب، هنوز ممکن است که خلل و فرج‌ها برای مدت طولانی با هوا پر شده باشند، درحالی که خلل و فرج‌های موجود در اکثر ذرات آب‌دوست، سریعاً با آب پر می‌شوند. به علاوه این موضوع اختلاف در میزان ترشوندگی ذراتی را که مثلاً مقدار خاکستر محتوی شان با یکدیگر فرق داشته باشد را افزایش داده و شرایطی را فراهم می‌آورد که در آن روغن (چنانچه به پالپ دارای چنین ذراتی اضافه شود) بتواند به راحتی تر شده و به داخل منافذ این ذرات آبران نفوذ کند (He & Laskowski., 1992).

۱-۵-۲-۱-۳- اتصال قطرات روغن بر روی سطوح کانی‌ها

شکل (۸-۱) اندرکنش بین قطره روغن/ جامد را قبل و بعد از اتصال نشان می‌دهد (Laskowski., 2001).



شکل (۸-۱): اتصال قطره روغن به ذره جامد در داخل آب (Laskowski., 2001)

اگر یک قطره روغن به طور هم‌دما تحت نیرو قرار بگیرد و به طور برگشت پذیر برخلاف یک ذره جامد در آب غوطه‌ور شود، کار انجام شده دقیقاً برابر با تغییر انرژی آزاد سیستم خواهد بود.

$$\Delta G_{attach} = G_2^S - G_1^S \quad (4-1)$$

$$G_1^S = A_{sw}\gamma_{sw} + A_{ow}\gamma_{ow} \quad (5-1)$$

در روابط فوق A_{sw} و A_{ow} به ترتیب بیانگر مساحت سطح ذره جامد و قطره روغن، γ_{sw} و γ_{ow} نیز به ترتیب نمایانگر مقدار کشش سطحی (جامد/ آب) و (روغن/ آب) هستند. چنانچه مساحت سطح اتصال (A_{so}) مقدار واحد در نظر گرفته شود، روابط (4-1) و (5-1) را خواهیم داشت:

$$G_2^S = (A_{sw} - 1)\gamma_{sw} + (A_{ow} - 1)\gamma_{ow} + 1.\gamma_{so} \quad (6-1)$$

$$\Delta G_{attach} = G_2^S - G_1^S = \gamma_{so} - \gamma_{sw} - \gamma_{ow} \quad (7-1)$$

از آنجایی که از رابطه یانگ داریم:

$$\gamma_{sw} = \gamma_{so} + \gamma_{ow}\cos\theta \quad (8-1)$$

در نتیجه:

$$\Delta G_{attach} = \gamma_{ow}(\cos\theta - 1) \quad (9-1)$$

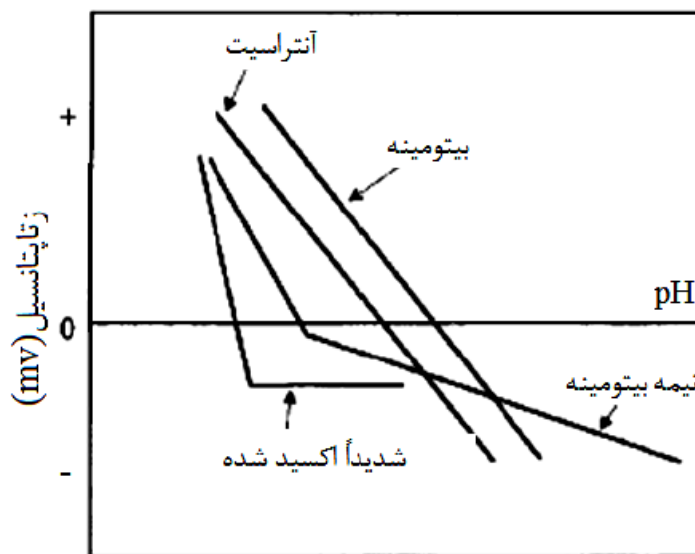
نتیجه این است که اتصال یک قطره روغن بر سطح یک ذره کانی، تنها زمانی رخ می‌دهد که θ دارای مقادیر مثبت باشد. به ازای $\theta=0$ ، $\cos\theta=1$ و $\Delta G_{attach} = 0$ ، لذا اتصال غیرممکن است. این نتیجه دلیل استفاده از کلکتورهای روغنی، آن‌هم فقط در فلوتاسیون کانی‌های آبران طبیعی را به خوبی تشریح می‌کند. در فرآیند فلوتاسیون توسعه دهنده ابتدا قبل از افزودن روغن، کلکتوری که بتواند سطح کانی را آبران کند، مورد نیاز است (Laskowski., 2001).

رابطه (۹-۱) که بیان گر میزان تغییر انرژی آزاد بین حالت های ۱ و ۲ (بدون در نظر گرفتن مراحل واسطه) است (شکل ۱- ۱۰)، فقط احتمال رخداد اتصال را نشان می دهد. وقتی $\Delta G_{attach} = 0$ ، امکان اتصال ذره به قطره روغن وجود ندارد. فقط تحت شرایط $\Delta G_{attach} < 0$ امکان اتصال وجود دارد، همان گونه که توسط بورکین و برملی^۱ در سال ۱۹۶۱ میلادی بحث شده است، در تقابل بین قطره روغن و ذره زغال سنگ، ممکن است هر دو مورد معلق شده در محلول آبی منجر به اتصال شوند، به شرطی که انرژی سینتیک آن ها جهت غلبه بر سد انرژی به اندازه کافی زیاد باشد. بورکین و برملین دو نوع سد انرژی را مطرح و بحث کرده اند: اولی مانع برخورد و اتصال و دیگری مانع انتشار روغن بر سطح زغال سنگ می شود. «سد مانع از برخورد» به مقدار پتانسیل سطوح تلاقی کننده بستگی دارد که با پتانسیل های الکتروستاتیکی متعلق به قطرات روغن و ذرات زغال سنگ و نیز میزان مقاومت یونی الکترولیت آبی، مشخص می شود (Laskowski., 2001).

«سد مانع از انتشار» با تفاوت در مقدار زوایای تماس کاهنده و افزایشده نشان داده می شود. لازم به ذکر است عمل انتشار با کشش های سطحی مربوطه، تخلخل جامد، ساختار سطح، ناهمگنی و سایر موارد کنترل می شود. شکل (۹-۱) نمودارهای زتاپتانسیل^۲ رسم شده به ازای مقادیر pH را برای انواع زغال سنگ ها نشان می دهد (Laskowski., 2001).

¹ Burkin and Bramley

² Zeta potential



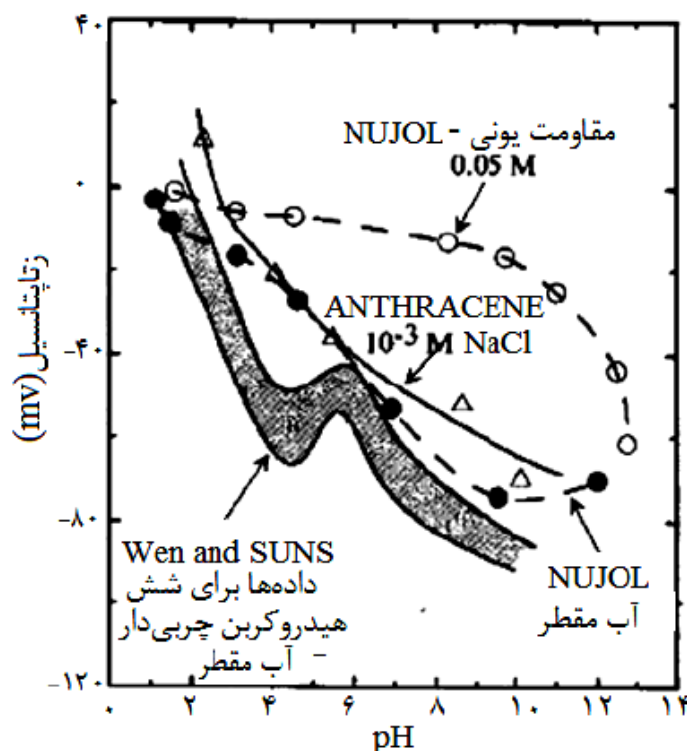
شکل (۱-۹): نمودارهای زتاپتانسیل-pH برای انواع زغال سنگ ها (Laskowski., 2001)

لازم به ذکر است pH در مدارهای فلوئاسیون زغال سنگ کنترل نمی‌شود و اساساً با نوع زغال سنگ، ترکیب مینرالوژیکی گانگ و با خصوصیت شیمیایی آب، تغییر می‌کند. به‌وضوح مشخص است که زغال سنگ‌های طبقه پایین یا به‌شدت اکسید شده، نسبت به محدوده pH ایی که در آن عملیات فلوئاسیون انجام می‌شود، توسط بارالکتریکی منفی مشخص شده اند. شکل (۱-۱۰) نمودارهای زتاپتانسیل-pH را برای انواع هیدروکربن‌ها نشان می‌دهد (Laskowski., 1992). از مقایسه شکل‌های (۱-۹) و (۱-۱۰) این نکته روشن می‌شود که در اکثر موارد هر دو مورد ذرات زغال و قطرات روغن، حامل بارهای الکتریکی منفی می‌باشند که این امر می‌تواند حاصل یک نیروی دافعه باشد. طبق نظریه ^۱DLVO مقدار انرژی تبدلی بین دو ذره را می‌توان از نیروهای جذب لاندون- واندروالس^۲ محاسبه کرد و چنانچه سطح ذرات دارای بار الکتریکی یکسان باشد، این مقدار انرژی تبدلی را می‌توان از نیروی دافعه کولومبی^۳ محاسبه کرد.

^۱ Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek

^۲ London-van der Waals

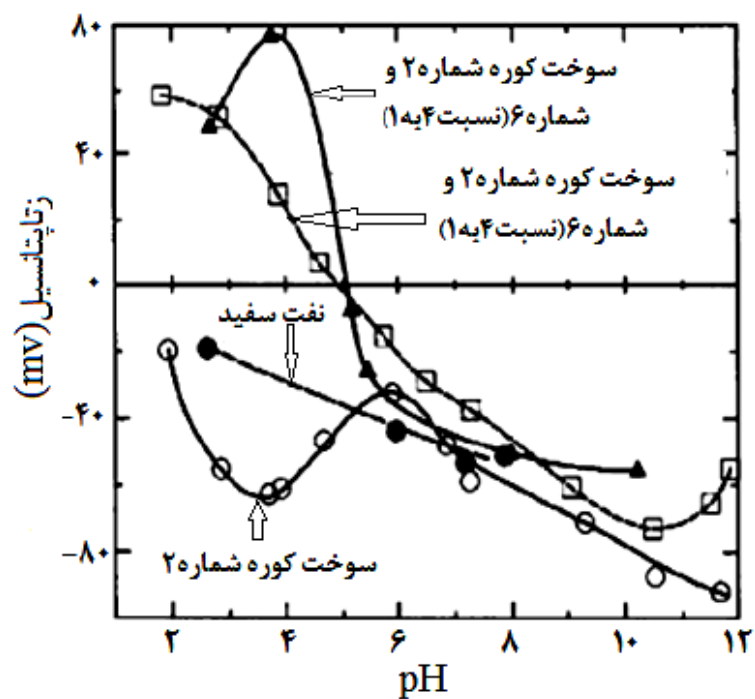
^۳ Coulombic repulsion



شکل (۱۰-۱): نمودار زتاپتانسیل - pH هنگام تعلیق انواع هیدروکربن‌ها در داخل آب (Laskowski., 2001)

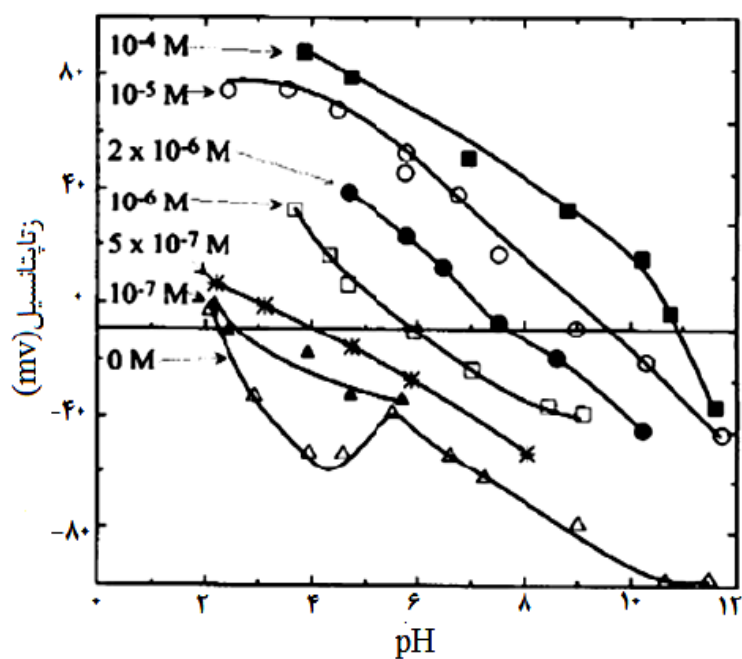
شکل (۱۱-۱) نمودارهای زتاپتانسیل - pH را برای نفت سفید، گازوییل و یک ترکیبی از گازوییل و «سوخت نفتی شماره ۶» (با نسبت ۴ به ۱) نشان می‌دهد. شکل مذکور همانند یافته ون و سان^۱ (Wen & Sun., 1981) در مورد زغال سنگ‌های به‌سختی فلوته شونده به‌خوبی بازگو کننده علت اینکه ترکیبی از گازوییل و سوخت نفتی شماره ۶ می‌تواند به‌عنوان کلکتوری بسیار بهتر از نفت سفید و یا گازوییل مطرح باشد را بیان می‌کند. ظاهراً سوخت نفتی شماره ۶، دارای برخی ترکیب‌های فعال سطحی است که نقطه ایزوالکتریک روغن مورد آزمایش را به سمت راست (در جهت ازدیاد) شیفیت داده است. مطابق شکل (۱۲-۱) روند تغییر نمودار زتاپتانسیل - pH برای گازوییل در حضور سوخت نفتی شماره ۶، بسیار شبیه به روند تغییر زتاپتانسیل هیدروکربن‌ها، در حضور سطح‌سازهای کاتیونی (آمین‌ها) است. نمودارها به‌سمت موقعیت نقطه ایزوالکتریک «دودسیل آمین کلئیدی» و حوالی pH=11 انتقال یافته‌اند (Laskowski., 1989).

¹ Wen and Sun



شکل (۱۱-۱): نمودارهای زتاپتانسیل-pH برای امولسیون حاوی نفت سفید و سوخت‌های نفتی در داخل آب

(Laskowski., 2001)



شکل (۱۲-۱): تأثیر غلظت «کلرید دودسیل - آمونیم» بر پتانسیل الکتروستاتیکی قطرات هگزادکان در داخل آب

(Laskowski., 2001)

در راستای بهبود فلوتاسیون به روش امولسیون، قطرات روغن باید به ذرات زغال سنگ اتصال یابند. از آنجایی که روغن در سطح زغال سنگ به فرم قطره باقی می ماند (شکل ۱-۷)، این پرسش در ذهن به وجود می آید که چه نوع مکانیزمی باعث بهبود عملیات فلوتاسیون توسط روغن می شود؟

به رغم مقادیر مثبت ΔG_{spread} (رابطه ۱-۳)، که حاکی از عدم جایگزینی آب با روغن است، چنانچه هنوز سطح مشترک چهار فاز جامد/روغن/آب/هوا پایدار باقی بماند، احتمال جایگزینی روغن با آب وجود دارد.

۱-۵-۲-۱-۴- تأثیر کلکتورهای روغنی در فلوتاسیون زغال سنگ

یک برنامه تحقیقاتی بسیار مؤثر توسط کلاسن و همکارانش در سال ۱۹۶۰ میلادی انجام شده است و این نتیجه به دست آمد که هیدروکربن های ساده و خالص را نمی توان به عنوان کلکتورهای کارآمد تلقی کرد. علی رغم این که این نوع کلکتورها میزان شناوری متالورژیکی زغال سنگ غیراکسیده را تا حدی بهبود می بخشند، اما جهت شناورسازی زغال سنگ های طبقه پایین مناسب نیستند. مشخص شد آن دسته از هیدروکربن هایی که بیش از هشت اتم کربن (اوکتان) در ساختارشان دارند، به خصوص هیدروکربن های حلقوی مانند سیکلودکان ($C_{10}H_{18}$) می توانند نسبت به هیدروکربن های مشابه اما زنجیر کوتاه، عملکرد بهتری داشته باشند.

۱-۵-۲-۲- استفاده مشترک از کلکتورهای روغنی و کف سازها

جدول (۱-۶) این امر را اثبات می کند که هر نوع معرفی جهت شناوری زغال سنگ های نوع بیتومینه با مواد فرار کم، به خوبی کفایت می کند. یک «روغن قطران»^۱ (محصول جانبی کوره زغالی) عموماً در گذشته استفاده می شد. به طور کلی معرف رایج مشابه برای فلوتاسیون زغال سنگ های طبقه پایین کارآمد نیست. پس آیا این امر به معنای آن است که زغال سنگ های طبقه پایین را نمی توان به روش

¹ Tar oil

فلوتاسیون فرآوری کرد؟ همان طور که جدول زیر نشان می دهد، چنانچه معرف های فلوتاسیون به طور مناسب انتخاب شوند، این نوع زغال سنگ ها نیز قابل فلوتاسیون هستند. ترکیبی از نفت سفید و الکل نانیل^۱ جهت شناوری زغال سنگی که با استفاده منفرد از معرف رایج شناور نمی شود، نشان داده شده است (Laskowski., 2001).

جدول (۶-۱): فلوتاسیون زغال سنگ های با طبقه متفاوت در حضور انواع معرف ها (Laskowski., 2001)

نوع زغال سنگ	عامل شیمیایی فلوتاسیون و مقدار آن	بخش کنسانتره		بخش باطله	
		خاکستر (%)	بازیابی وزنی (%)	خاکستر (%)	بازیابی وزنی (%)
بیتومینه با مواد فرار متوسط	روغن قطران: ۲/۵ kg/t	۴/۵	۷۱/۷	۶۳/۹	۲۸/۳
بیتومینه نوع C با مواد فرار زیاد	روغن قطران: ۲/۵ kg/t	۳/۹	۳۸/۹	۲۳/۲	۶۱/۱
بیتومینه نوع C با مواد فرار زیاد	نفت سفید: ۲ kg/t و الکل نانیل: ۰/۶۲ kg/t	۴/۱	۷۹/۱	۶۱/۲	۲۰/۹

در یک سیستم شامل ذرات زغال سنگ و قطرات روغن، یک کف ساز علاوه بر جذب سطحی در سطح مشترک زغال سنگ/آب، در سطح مشترک آب/روغن نیز به صورت سطحی جذب می شود. عمل جذب سطحی در سطح مشترک آب/روغن، کشش سطحی بین دو عامل مذکور را کاهش و در نتیجه فرایند امولسیون سازی توسط روغن بهبود می یابد که این امر نیز باعث بهبود روش فلوتاسیون به روش امولسیون می شود.

اثر سطح ساز «Lubrol MOA» یا همان «الکل چرب اتوکسیلات»^۲ و همچنین «m-cresol» بر کشش سطحی بین روغن پارافینی/آب، نیز روی انرژی آزاد انتشار همان کلکتور روغنی روی ویتترین صیقل داده شده (زغال سنگ بیتومینه آبران) در جدول (۷-۱) نشان داده شده است (Laskowski., 2001).

^۱ Nonyl alcohol

^۲ ethoxylated fatty alcohol

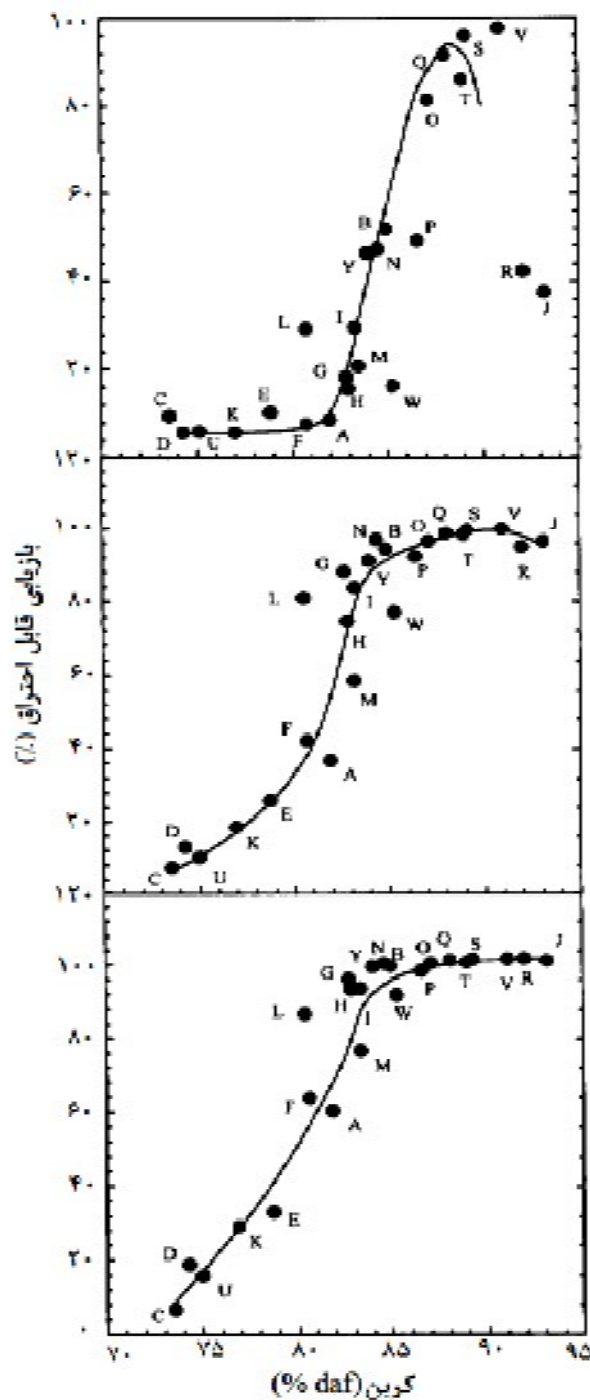
جدول (۷-۱): تأثیر سطح‌سازها بر ضریب انتشار روغن پارافینی برای زغال‌سنگ صیقل داده شده Betteshanger (Laskowski., 2001)

غلظت (%)	زاویه تماس پیشرو (درجه)	تعداد مطالعه (دفعه)	کشش سطحی آب/روغن $(\text{mj}/\text{m}^2)_{\text{ow}}$	کشش سطحی
:Lubrol				
۰	82 ± 4	۳۰	۴۳/۸	۳۷/۷
۰/۰۱	109 ± 2	۸	۲۵/۰	۳۳/۱
۰/۰۲۱	115 ± 2	۷	۱۲/۱	۱۷/۲
۰/۰۴۴	141 ± 4	۱۰	۴/۱	۷/۳
۰/۰۸	150 ± 1	۶	۲/۷	۵/۰
:m-Cresol				
۰	82 ± 4	۳۰	۴۳/۸	۳۷/۷
۰/۰۵۲	90 ± 0	۶	۳۴/۹	۳۴/۹
۰/۱۳۲	90 ± 0	۷	۲۳/۲	۲۳/۲
۱/۳۲۰	91 ± 2	۷	۱۸/۵	۱۸/۸

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در حضور سطح‌ساز مورد آزمایش، کشش سطحی بین آب/روغن کاهش یافته است. θ_{oil} افزایش و ΔG_{spread} از مقدار اولیه $37/7 \text{ mj}/\text{m}^2$ تا مقدار ۵ درمورد لابرول و تا ۱۸/۸ درخصوص m-cresol کاهش داشته است. درحالی‌که کاهش کشش سطحی آب/کلکتور روغنی، نشانگر بهبود فرآیند امولسیون‌سازیست، کاهش مقادیر ΔG_{spread} نشانگر انتشار آسان روغن بر روی سطح زغال‌سنگ است. در مجموع به دلیل این‌که مقادیر ΔG_{spread} مثبت است، فرآیند انتشار (پخش یکسان روغن) به‌طور خودبه‌خودی انجام نمی‌شود. درحالی‌که برای کریزول، کاهش مقادیر ΔG_{spread} تنها ناشی از کاهش مقادیر کشش سطحی آب/روغن بوده و درنتیجه این مقدار کوچک است، اما در خصوص گزینه Lubrol، هر دو مورد کشش سطحی بین آب/روغن و نیز زاویه تماس دخیل بوده و کاهش مقادیر ΔG_{spread} بارزتر است (Laskowski., 2001).

شکل (۱۳-۱) به‌طور خیلی واضح و خلاصه تأثیر MIBC و افزایش مقدار سوخت کوره را در فلو تاسیون انواع زغال‌سنگ‌ها نشان می‌دهد. این اشکال تأکید بر این دارند درحالی‌که یک کف‌ساز به

تنهایی جهت شناوری زغال سنگ‌های بیتومینه با مواد فرار کم و متوسط کافی می‌باشد، اما ترکیبی از کلکتور روغنی و کف‌ساز جهت شناوری زغال سنگ‌های با مواد فرار زیاد، احتیاج است (Laskowski., 2001).



شکل (۱۳-۱): تأثیر طبقه زغال سنگ بر فلوتاسیون آن، 0.2 Kg/t (MIBC) (پانل فوقانی)، 0.2 Kg/t (MIBC) با 0.2 Kg/t (پنل میانی) و 0.5 Kg/t سوخت کوره (پنل پایینی) (Laskowski., 2001)

۷-۱- کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی و مدار فلوتاسیون آن (طبق طرح اولیه)

این کارخانه در شمال‌شرقی شهرستان دامغان و در ۵۷ کیلومتری شهرستان شاهرود، بین مناطق مهماندوست، تزره و مهماندویه قرار دارد. احداث ساختمان کارخانه در سال ۱۳۵۲ آغاز و در سال ۱۳۵۳ به بهره‌برداری رسیده است. طبق طرح اولیه ظرفیت کارخانه ۸۰ تن در ساعت و در سه شیفت باید به‌طور متوسط ۱۵۰۰ تن زغال‌سنگ را شستشو دهد. برق مورد نیاز کارخانه ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلووات است. میزان مصرف آب ۵ مترمکعب بوده و از چاه تأمین 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 به داخل فیدر وارد می‌شود. ظرفیت هر تغذیه‌کننده ۱۰۰ تن در ساعت است. ذرات ۱ تا ۱۲۵ میلی‌متر به‌وسیله ناودانی به داخل جیگ وارد و ذرات کوچکتر از ۱ میلی‌متر، به داخل کلاسیفایر هدایت می‌شوند. کنسانتره جیگ پس از عملیات سرند کنی، به سه بخش بزرگتر از ۱۳ میلی‌متر، ۱ تا ۱۳ میلی‌متر و زیر ۱ میلی‌متر تفکیک می‌شوند. بخش درشت‌تر از ۱۳ میلی‌متر توسط نوارنقاله به انبار مخصوص خود هدایت می‌شود، ولی بخش ۱ تا ۱۳ میلی‌متر برای آگیری به‌دستگاه سانتریفیوژ وارد و سپس توسط نوارنقاله دیگری به انبار کنسانتره هدایت می‌شود. ذرات زیر ۱ میلی‌متر نیز به داخل کلاسیفایر راه می‌یابند (رضایی، ۱۳۹۴).

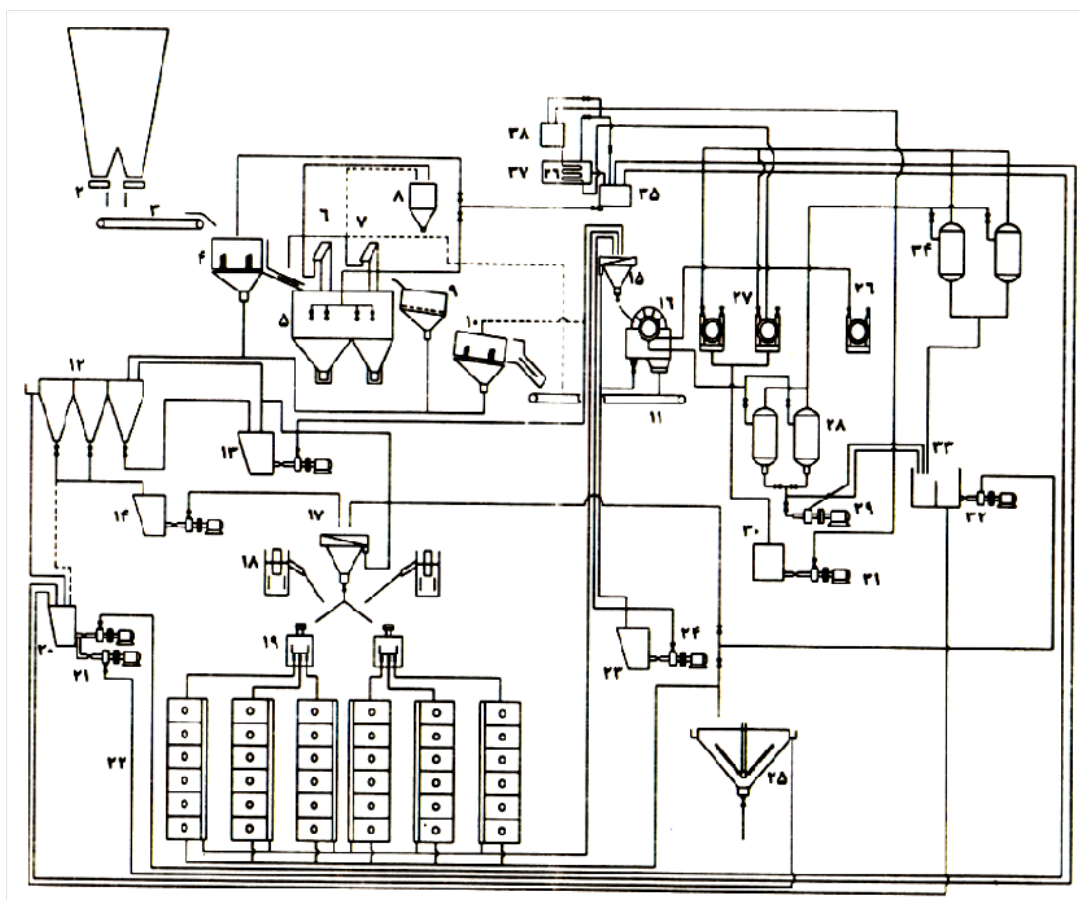
کلیه ذرات زیر ۱ میلی‌متر (به‌دست آمده از بخش‌های مختلف کارخانه) پس از ورود به کلاسیفایر به سه بخش تفکیک می‌شوند. بخش درشت (ذرات پولکی شکل با ضخامت کم و طول زیاد) توسط پمپ به هیدروسیکلون منتقل می‌شوند. سرریز هیدروسیکلون مجدداً به کلاسیفایر و ته ریز آن به جیگ وارد می‌شود. ذرات ۰/۶ تا ۰/۸ و نیز ذرات ۰/۲ تا ۰/۶ میلی‌متر، بخش‌های دیگر کلاسیفایر را تشکیل می‌دهند. به‌این‌ترتیب مواد طبقه‌بندی شده توسط کلاسیفایر، توسط لوله مخصوصی به تانک‌های آماده‌سازی قبل از فلوتاسیون وارد می‌شوند. مواد پس از آماده‌سازی با گازوییل، MIBC، روغن کاج و موادی دیگر به سمت سلول‌های فلوتاسیون که شامل هفت ردیف سه تایی است، وارد می‌شوند.

کنسانتره حاصل از سلول‌ها به بخش آبگیری (فیلتر دیسکی) هدایت و پس از آبگیری توسط نوارنقاله به انبار مخصوص خود وارد می‌شود. آب حاصل از این بخش به همراه باطله حاصل از فلوتاسیون به تیکنر وارد و مواد باطله پس از آبگیری به سد باطله هدایت می‌شود. در حدود نیمی از آب حاصل از تیکنر، پس از بازیافت مجدداً برای مصرف دوباره، مورد استفاده قرار می‌گیرد (رضایی، ۱۳۹۴).

محصول خروجی کارخانه، با رطوبت نسبی ۳ درصد، به‌طور متوسط محتوی ۱۴ درصد خاکستر است. بازیابی وزنی بین ۶۰ تا ۷۵ درصد می‌باشد. شکل (۱-۱۴) فلوشیت (طبق طرح اولیه) شستشوی زغال‌سنگ در این کارخانه را نشان می‌دهد (رضایی، ۱۳۹۴).

۱-۷- مراحل انجام پایان‌نامه

فصل اول این پایان‌نامه شامل کلیات و مقدمه‌ای بر فلوتاسیون است و در آن به فرآیند فلوتاسیون زغال‌سنگ پرداخته می‌شود و هدف تحقیق نیز در آن گنجانده شده است. فصل دوم به بررسی مروری بر تحقیقات گذشته و نتایج آن می‌پردازد. فصل سوم به روش انجام کار مربوط می‌شود و در انتها نتایج حاصل از انجام آزمایش و تحلیل آن‌ها در فصل چهارم ارائه خواهند شد. نتیجه‌گیری و پیشنهادها نیز فصل آخر این پایان‌نامه خواهند بود.



شکل (۱-۱۴): فلوشیت اولیه کارخانه زغال شویی البرز شرقی (رضایی، ۱۳۹۴)

جدول (۱-۸): راهنمای اعداد فلوشیت کارخانه زغال شویی البرز شرقی

۱ - بونکر	۲۰ - مخزن
۲ - تغذیه کننده	۲۱ - پمپ پالپ کش
۳ - نوار نقاله	۲۲ - نوار نقاله
۴ - سرند اولیه	۲۳ - مخزن
۵ - جیگ	۲۴ - پمپ خلاء
۶ - الواتر	۲۵ - پمپ پالپ کش
۷ - الواتر	۲۶ - حوضچه ته نشینی
۸ - بونکر باطله	۲۷ - دمنده
۹ - سرند	۲۸ - تانکر ذخیره
۱۰ - سرند آبکشی	۲۹ - پمپ لجن کش
۱۱ - نوار نقاله	۳۰ - مخزن
۱۲ - کلاسیفایر	۳۱ - پمپ پالپ کش
۱۳ - مخزن	۳۲ - پمپ پالپ کش
۱۴ - مخزن	۳۳ - مخزن
۱۵ - مخزن فیلتر	۳۴ - تانکر آبگیری
۱۶ - فیلتر	۳۵ - مخزن آب برگشتی
۱۷ - مخزن آماده سازی	۳۶ - مارپیچ سردکن
۱۸ - مخزن مواد شیمیایی	۳۷ - منبع اصلی آب
۱۹ - مخزن آماده سازی	۳۸ - منبع آب صنعتی

فصل دوم:

مروری بر تحقیق‌های گذشته

۱-۲- تحقیق انجام شده در خصوص کارخانه زغال‌شویی زرنند کرمان

اخیراً در همین خصوص در کشور ما و در سال ۱۳۸۱ پایان‌نامه‌ای با عنوان "بررسی امکان جایگزینی نفت سفید با گازوییل در مدار فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی زرنند کرمان" انجام شد. با توجه به قیمت بالای نفت سفید در آن زمان و مشکل تهیه آن، جایگزینی یک کلکتور ارزانتر که در دسترس باشد، ضروری بود. در این تحقیق از طرح آزمایشی هادامارد جهت تعیین مقدار بهینه معرف‌ها (کلکتورهای نفت و گازوییل و کف‌سازها) در راستای رسیدن به حداکثر راندمان (بازیابی و کارایی جدایش) استفاده شد. نتیجه‌گیری کلی حاصله در خصوص جایگزینی کلکتور نفت سفید با گازوییل در این کارخانه به شرح ذیل بوده است (حق پرست ده‌عرب، ۱۳۸۱):

الف- در مدار فلوتاسیون زغال‌شویی زرنند، محدوده بهینه مصرف گازوییل بین $3/5 - 1/5$ kg/t به دست آمد. در صورت جایگزینی نفت سفید با گازوییل در مقدار مصرف بالای گازوییل، نه تنها راندمان کاهش نمی‌یابد، بلکه کارایی جدایش بهبود یافته و $88/3\%$ صرفه‌جویی اقتصادی می‌شود.

ب- برای ابعاد بزرگتر از ۴۵۰ میکرون، کلکتور نفت نسبت به گازوییل به میزان $7/8\%$ راندمان بالاتری نشان داد، اما در محدوده ابعادی زیر ۱۵۰ میکرون، گازوییل به میزان $10/6\%$ از نفت دارای راندمان بالاتری بود.

ج- در زمان استفاده از گازوییل، مقدار بهینه روغن‌کاج در محدوده $40-80$ g/t بوده است. کف‌ساز روغن‌کاج کارایی جدایش بالاتری به میزان 2% نسبت به MIBC و 1% نسبت به A65 داشته است.

د- از مقایسه بهترین شرایط عملیاتی هنگام استفاده از کلکتورهای نفت و گازوییل (به دست آمده از طرح آزمایش)، نتایج نشان داد که کارایی جدایش گازوییل به میزان $2/3\%$ بالاتر از نفت است.

۲-۲- سایر پژوهش‌های انجام شده در خصوص استفاده از سطح‌سازها در فلوتاسیون

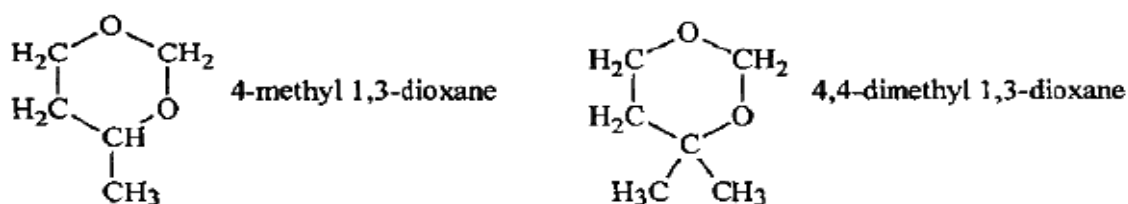
زغال سنگ

در کتاب «فلوتاسیون زغال سنگ و نحوه فرآوری ذرات ریز زغال سنگ» (Laskowski., 2001)، چنین گزارش شده است که پتخو و همکاران در سال ۱۹۷۶ میلادی در خصوص فعالیت شناورسازی استال‌های حلقوی، مطالبی را ارائه کرده‌اند. آن‌ها دریافتند که عملکرد 1,4-dioxane و 1,3-dioxane -1.3 به‌عنوان کلکتور در فلوتاسیون زغال سنگ و گرافیت، ضعیف است (شکل ۱-۲).



شکل (۱-۲): نمایش ساختار حلقوی 1,4-dioxane و 1,3-dioxane

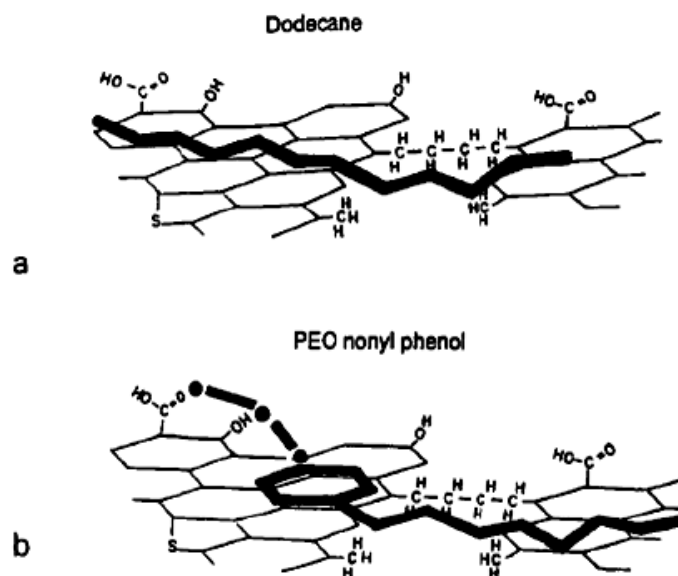
اما مشخص شد 1,3-dioxane همراه با برخی زنجیرهای کناری، به‌عنوان مثال (4-methyl 1,3-dioxane) و (4,4-dimethyl 1,3-dioxane) می‌توانند به‌عنوان بهترین کلکتور برای هر دو ماده زغال سنگ و گرافیت مطرح باشند (شکل ۲-۲) (Laskowski., 2001).



شکل (۲-۲): نمایش ساختار حلقوی (4-methyl 1,3-dioxane) و (4,4-dimethyl 1,3-dioxane)

این موضوع قبلاً نیز توسط هریس و همکاران^۱ مطالعه شده بود (Harris & Fuerstenau., 1993). آن‌ها در آزمایش‌های مقایسه‌ای خود، نرخ شناوری زغال سنگ را در حضور دو نوع کلکتور دودکان^۲ و فنول‌های نانیل اتوکسیلات^۳ ارزیابی و چنین گزارش کردند که راهیابی حلقه بنزن به داخل زنجیر هیدروکربن، میزان کارایی آن را به عنوان یک کلکتور در فلوئتاسیون زغال سنگ، به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد، همچنین مشخص شد «فنول‌های نانیل اتوکسیلات» می‌توانند به عنوان کلکتورهای بسیار مؤثر مطرح باشند. به منظور تشریح این نتایج، آن‌ها چنین فرض کردند که اندرکنش‌های ضعیف بین دودکان و سطح زغال سنگ، تا اندازه‌ای نیست که مولکولهای آب بتوانند توسط دودکان از سطح زغال سنگ جابجا شوند، از سوی دیگر «فنول‌های نانیل اتوکسیلات» می‌تواند هم با حلقه‌های گرافیتی موجود در ساختار زغال سنگ مانند پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های «اتوکسی»^۴ واکنش دهند و هم این‌که با گروه‌های فرعی اکسیژن موجود در سطح زغال سنگ، تبادل سطحی انجام دهند (شکل ۲-۳).

(Laskowski., 2001).



شکل (۲-۳): شماتیک بیانگر جذب سطحی مولکول کلکتور بر روی سطح زغال سنگ: (a) دودکان و (b) فنول نانیل

اتوکسیلات (Laskowski., 2001)

¹ Harris et al

² Dodecane

³ Ethoxylated Nonyl Phenols

⁴ ethoxy

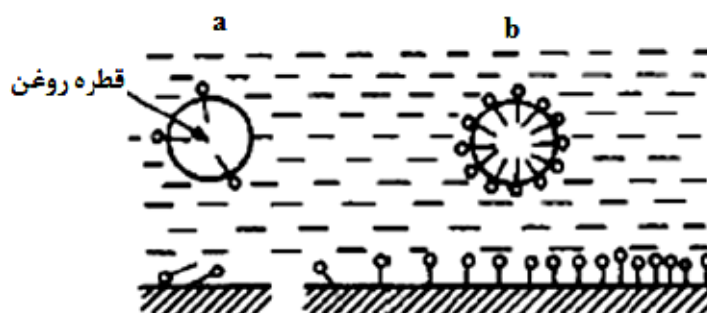
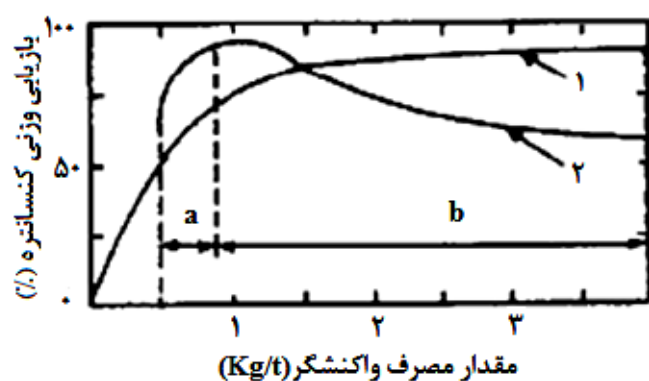
نویسندگان متعددی نتایجی را با در نظر گرفتن تأثیر کلکتورهای روغنی در فرآیند فلوتاسیون ارائه کرده‌اند، اما آن‌ها در آزمایش‌های خود همواره از کف‌سازها نیز به‌طور هم‌زمان با کلکتورها استفاده کرده‌اند (Aplan., 1993).

مجدداً در کتاب «فلوتاسیون زغال‌سنگ و نحوه فرآوری ذرات ریز زغال‌سنگ» (Laskowski., 2001)، اثبات و تشریح سودمند واقع شدن یک کف‌ساز در فرآیند فلوتاسیون همراه با کلکتور روغنی توسط ملیک- گایکازیان^۱ و همکاران بیان شده است. در آنجا چنین ذکر شده است که کف‌ساز در سطح مشترک آب/روغن جذب سطحی شده و کشش سطحی را کاهش و امولسیون‌سازی را بهبود می‌بخشد، اما در عین حال در سطح مشترک آب/زغال‌سنگ نیز جذب سطحی می‌شود و تکیه گاهی را برای قطرات روغن جهت اتصال به سطح زغال‌سنگ ایجاد می‌کند. مطابق شکل (۲-۴) در غلظت‌های بالای کف‌ساز تأثیر متضادی ممکن است دیده شود.

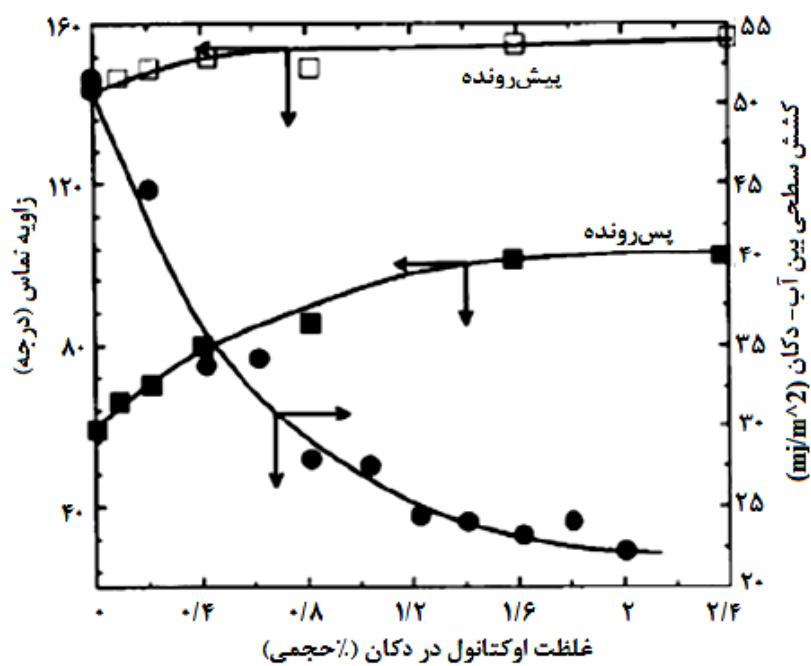
گود و همکاران جهت بهبود فرآیند آگلومراسیون روغنی برای زغال‌سنگ طبقه پایین، n-octanol را به روغن جهت احیاء خاصیت آبرانی زغال‌سنگ اضافه کردند (Good et al., 1994). به دلیل این که قابلیت انحلال اوکتانول در آب بسیار پایین است، تقریباً به‌طور کامل در فاز آلی باقی می‌ماند. شکل (۲-۵) اثر n-octanol را بر زاویه تماس بین دکان-آب (اندازه‌گیری شده در آب) در سطح زغال‌سنگ نشان می‌دهد. واضح است که به‌طور محسوسی اوکتانول باعث آبرانی بیشتر زغال‌سنگ می‌شود. نتایج مشابهی را هنگام استفاده از عامل مناسب فعال سطحی و یک کلکتور روغنی می‌توان انتظار داشت (Laskowski., 2001).

علاوه بر مطالب اشاره شده در قسمت‌های فوق، تعدادی از محققین نیز در خصوص کلکتورها و معرف‌های قابل کاربرد در فلوتاسیون زغال‌سنگ، پژوهش‌هایی را انجام داده‌اند که به‌طور خلاصه در جدول زیر گردآوری شده است (جدول ۲-۱).

¹ Melik-Gaykazyan



شکل (۲-۴): فلوتاسیون زغال سنگ تحت انواع شرایط: (۱) کاربرد منفرد نفت سفید، (۲) کاربرد ۵ Kg/t نفت سفید توأم با افزایش مقدار الکل n-octyl (بعد از ملیک-گایکازیان و همکاران) (Laskowski., 2001)



شکل (۲-۵): نمودار ترشوندگی سطح زغال سنگ توسط دکان نسبت به مقادیر مختلف اوکتانول حل شده در دکان و نیز تأثیر آن بر کشش سطحی آب/دکان (Laskowski., 2001)

جدول (۲-۱): مطالعات مربوطه پیشین

مرجع	عنوان تحقیق	خلاصه ایی از مطالعه	نتیجه مطالعه
کر م، ۱۳۸۶	مطالعه قابلیت شستشوی زغال سنگ البرز شرقی به روش فلوتاسیون ستونی	بهینه سازی فرآیند با هدف شناخت عوامل مؤثر و فهم بیشتر رابطه بین آن‌ها در فرآیند فلوتاسیون زغال سنگ توسط سلول ستونی با روش سطح پاسخ و انتخاب سه فاکتور نرخ آب شستشو، نرخ هوادهی و میزان مصرف کف‌ساز بررسی شد.	با انتخاب مقدار بهینه فاکتورها توسط طراحی آزمایش‌ها، پاسخ آزمایش‌ها شامل: درصد خاکستر محصول، بازیابی و کارایی جدایش به ترتیب برابر ۹/۱۸٪، ۸۶/۰۸٪ و ۷۱/۱۱٪ به دست آمدند.
محمودی خ، ۱۳۹۰	بررسی تأثیر ماسرال‌های زغال سنگ در فرآیند فلوتاسیون زغال سنگ های مختلف منطقه البرز شرقی	این تحقیق گروه‌های ماسرالی و تأثیر حضور آن‌ها در فرآیند فلوتاسیون را بررسی کرده است. نوع و میزان سه گروه ماسرالی برای زغال سنگ‌های منطقه البرز شرقی در مقاطع صیقلی قبل از انجام آزمایش‌های فلوتاسیون تشخیص داده شد. آزمایش‌های فلوتاسیون روی نمونه‌ها انجام و ارتباط شستشوپذیری زغال سنگ با پتروگرافی آن مورد بررسی قرار گرفت. برای تمام نمونه‌ها چهار فاکتور، مقدار کلکتور (گازوییل)، کف‌ساز (روغن کاج)، درصد جامد و عامل pH در سه سطح (مقدار زیاد، مقدار متوسط، مقدار کم) در نظر گرفته شد و با استفاده از روش طرح آزمایش تاگوچی بازیابی بهینه پیش‌بینی شد.	با تعیین نمونه بهینه از نظر بازیابی ماکزیمم توسط نرم افزار، مقدار درصد جامد بهینه ۱۱٪، مقدار کف ساز ۱۵۰ g/t، pH=8 و مقدار کلکتور ۲۰۰۰ g/t به عنوان سطوح بهینه انتخاب شدند. نتایج نشان دهنده نقش تعیین کننده ماسرال‌ها در فرآیند فلوتاسیون بوده‌اند، به طوری که ویترینیت دارای بالاترین قابلیت شناوری و اینترینیت و اگزینیت، به ترتیب در مراتب بعدی از نظر قابلیت شناوری قرار گرفتند.

ادامه جدول (۲-۱)

مرجع	عنوان تحقیق	خلاصه ایی از مطالعه	نتیجه مطالعه
Bonner & Aplan., 1993	تأثیر مقدار مصرف معرف ها روی شناوری پیریت طی فلوتاسیون زغال سنگ	عموماً هنگام افزودن کلکتورها و کف سازها (به خصوص از نوع روغنی) علاوه بر شناوری زغال سنگ، به طور ناخواسته شناوری پیریت همراه نیز افزایش می یابد که به ناچار جهت افزایش بازیابی از کلکتور روغنی (مثلاً گازویل) استفاده می شود. این مطالعه تأثیر کمی مقدار مصرف معرف ها را روی شناوری زغال سنگ و پیریت همراه آن و انواع روش های تقلیل شناوری پیریت طی فلوتاسیون زغال سنگ، بررسی کرده است.	۱- نرخ شناوری و همچنین بازیابی با افزایش مقدار کف ساز (روغن کاج یا MIBC) افزایش می یابد، ضمن این که ذرات درشت زغال سنگ نسبت به ذرات ریز، نیازمند مقدار بیشتری از کف ساز هستند. ۲- استفاده مشترک از گازویل و کف ساز روغن کاج، نرخ شناوری و بازیابی فلوتاسیون ذرات زغال سنگ را افزایش می دهد. ۳- با افزایش مقدار مصرف گازویل نسبت به کف ساز (در نسبت بالاتر از ۵ به ۱) شناوری پیریت توأم با شناوری زغال سنگ به کنسانتره، افزایش می یابد که در واقع در این نقطه حدی شناوری کفی به آگلومراسیون روغنی و فلوتاسیون به روش امولسیون تغییر رویه می دهد.
Aktas et al., 2003	تأثیر معرف ها و اختلاط آن ها بر شناوری کفی زغال سنگ های دارای ابعاد ریز	در این تحقیق از کاربرد منفرد معرف های غیر یونی MIBC Triton x-100, Brij-35 و سدیم دودسیل سولفات (SDS) و همچنین حالت ترکیبی از Triton x-100 یا Brij-35 با مقادیر مختلف MIBC در فلوتاسیون مکانیکی زغال سنگ مورد بررسی قرار گرفت.	۱- بیشترین بازیابی (بالای ۹۰٪) با کاربرد معرف های مرسوم (SDS یا MIBC) حاصل شد، اما مقادیر حذف خاکستر در حضور همین معرف ها کمتر بود. در حالی که با کاربرد ترکیب این معرف ها حذف خاکستر در محصول به طور قابل ملاحظه ایی بهبود یافت. ۲- مقدار بازیابی و همچنین حذف خاکستر طی عملیات فلوتاسیون به پارامتر وجود ابعاد ریز در خوراک به شدت وابستگی نشان داد.

ادامه جدول (۲-۱)

مرجع	عنوان تحقیق	خلاصه ایی از مطالعه	نتیجه مطالعه
Naik et al., 2004	بهینه سازی فلوتاسیون زغال سنگ با استفاده از تکنیک آماري	مطالعات بر روی ذرات زغال سنگ زیر ۱ میلی متر و غیرکک شو منطقه Talcher هند و محتوی ۳۷/۷٪ خاکستر انجام شد. با انجام ۲۵ آزمایش (روش طراحی آزمایش های فول فاکتوریل) به ازای پنج فاکتور: میزان کلکتور (گازوئیل)، میزان کف ساز (MIBC)، ترویج دهنده (سیلیکات سدیم)، pH و محدوده دانه بندی، مقادیر بهینه این فاکتورها و نیز تأثیر آنها در عیار و بازیابی حاصل از انجام فلوتاسیون مکانیکی بررسی شد.	مقدار بهینه فاکتورها در ۴۲۰ g/t گازوئیل، pH=7.5، روغن کاج ۹۰ g/t، سیلیکات سدیم ۲۰ g/t و محدوده ابعادی کوچکتر از ۰/۶ mm حاصل شد که با انتخاب این مقادیر، محصولی با ۲۵/۳۸٪ خاکستر و ۸۸/۰۳٪ درخصوص بازیابی، «ابعاد» بیشترین تأثیر اما منفی و بقیه فاکتورها تأثیر مثبتی داشته اند. فاکتور «کلکتور» تنها فاکتوری بوده است که برای هر دو مورد عیار و بازیابی تأثیر مثبتی در عملیات فلوتاسیون داشته است.
Naik et al., 2005	تفسیر تأثیر متقابل ها و بهینه سازی مقدار مصرف معرف ها در فلوتاسیون ذرات ریز زغال سنگ	تأثیر سه مورد از مهمترین معرف های مورد استفاده در فلوتاسیون زغال سنگ، یعنی مقدار کلکتور (نفت سفید)، کف ساز (MIBC) و سدیم متاسیلیکات (ترویج دهنده) با انجام ۲۳ آزمایش و از طریق طرح آزمایشی «فاکتوریل کامل» بررسی و از برآزش مدل حاصله جهت برآورد مقدار عیار و بازیابی مواد قابل سوختن به ازای مقادیر مختلف معرف ها استفاده شد.	با سطح اطمینان ۹۵٪ تأثیرات عمده سدیم متاسیلیکات، کلکتور و کف ساز بر «بازیابی» بوده و اما درخصوص «عیار» فاکتورهای کلکتور و کف ساز تأثیر عمده داشته اند. سدیم متاسیلیکات تأثیر مثبت بر بازیابی داشته در حالی که نفت سفید و MIBC در بازیابی تأثیر مثبت و در عیار تأثیر منفی داشته اند. تأثیر متقابل (MIBC و متاسیلیکات سدیم) و نیز (نفت سفید و MIBC) در بازیابی نقش منفی داشته اند. با تعیین و جایگذاری مقدار بهینه فاکتورها، یعنی سیلیکات سدیم، نفت سفید و MIBC به ترتیب در مقادیر ۱۰۰، ۴۰۰ g/t و ۷۵، محصولی با ۹۵/۵۸٪ بازیابی و ۸/۸۹٪ خاکستر به دست آمد.

ادامه جدول (۲-۱)

مرجع	عنوان تحقیق	خلاصه ایی از مطالعه	نتیجه مطالعه
Kelebek et al., 2008	بررسی تأثیر دودسیل آمین، نفت سفید و pH بر روی فلوتاسیون زغال سنگ Tuncbilek ترکیه در مقیاس آزمایشگاهی	با انتخاب طرح فاکتوریل کامل جهت بررسی تأثیر سه فاکتور دودسیل آمین (DDA)، نفت سفید و pH، ۳ آزمایش برای زغال سنگ لیگنیت Tuncbilek ترکیه طرح ریزی شد که عیار و بازیابی مطلوب مد نظر بوده است.	تأثیر اصلی هر سه فاکتور در پاسخ بازیابی، مثبت بوده است. معنی دار بودن DDA به عنوان کلکتور، تا حدی بیشتر از نفت سفید بوده است، اما در سطح اطمینان ۹۵٪ انتخابیت آن در کاهش میزان خاکستر، کمتر از نفت سفید بوده است.
Jena et al., 2008	مطالعه بر روی خصوصیات شناوری زغال سنگ های ساب بیتومینه اکسیده هند و خاکستر زیاد	برای این نوع زغال سنگ و ابعاد زیر ۱ میلی متر، در سلول مکانیکی ترکیبی از معرف ها، از جمله الکل های نوع اتانول و بوتانول جهت احیای سطح زغال سنگ اکسید شده استفاده شد. در ادامه از روغن سیاه «Black Oil» نیز (به عنوان ترویج دهنده)، جهت بهبود شناوری این نوع زغال سنگ در سلول ستونی استفاده شد.	میزان احیا شدن این نوع زغال سنگ اکسیده در حضور بوتانول بیشتر از اتانول بوده و در ادامه با انجام آزمایش فلوتاسیون ستونی روی این نوع زغال سنگ احیا شده و با مقادیر بهینه معرف ها (۲ Kg/t نفت سفید، ۰/۳ Kg/t روغن کاج و ۰/۵ kg/t سدیم هگزا-متا فسفات)، نتایج مطالعه FTIR نشان داد که با افزایش مقدار «Black Oil» به عنوان ترویج دهنده، با ثابت ماندن درصد خاکستر کنسانتره، میزان بازیابی خاکستر به کنسانتره از ۵۵٪ به ۲۳-۲۴٪ کاهش یافت.

فصل سوم:

مواد و روش‌ها

۳-۱- نمونه برداری و آماده سازی جهت انجام آزمایش های فلوتاسیون مکانیکی

۳-۱-۱- نحوه نمونه برداری

برای انجام آزمایش های آزمایشگاهی فلوتاسیون به کارخانه زغال شویی البرزشرقی مراجعه شد و از خوراک بخش فلوتاسیون (به صورت پالپ) و درحالتی که هیچ گونه مواد شیمیایی آماده ساز اضافه نمی شد، به مقدار تقریباً ۱۰ کیلوگرم در فواصل زمانی مختلف نمونه گیری شد. این نمونه به آزمایشگاه کانه آرایي دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود منتقل و در مکانی به دور از آلاینده های محیطی، کاملاً خشک و دانه بندی شد.

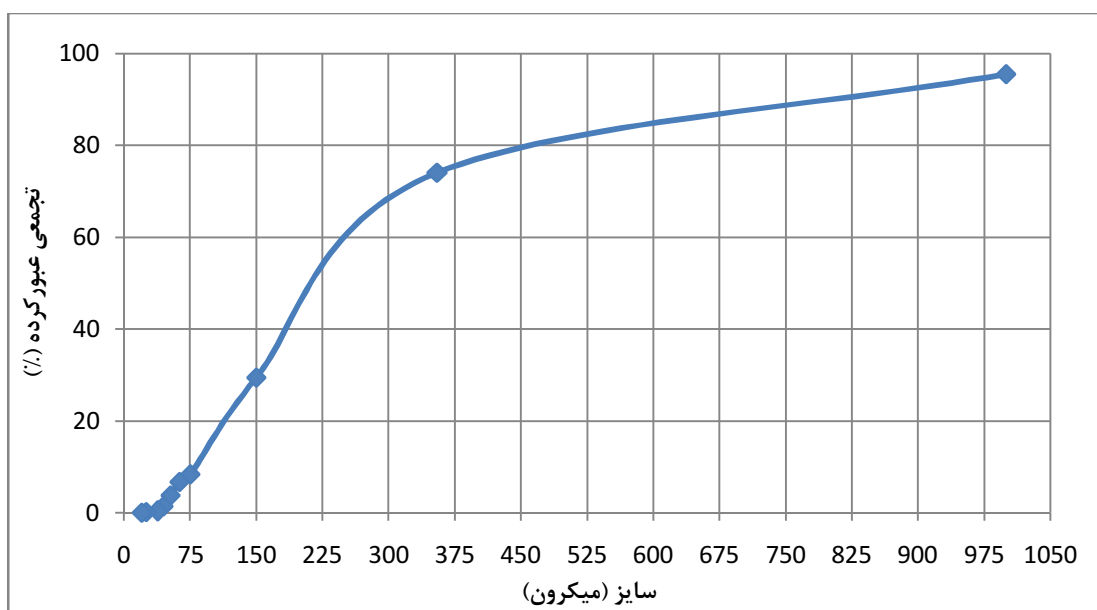
۳-۱-۲- رسم نمودار دانه بندی و تعیین d_{80}

برای کاهش وزن نمونه و ایجاد نمونه معرف ابتدا کل نمونه به طور یکنواخت مخلوط و سپس به چهار قسمت مساوی تقسیم شد. آنگاه به صورت ضربدری نمونه های روبروی هم با هم مخلوط شدند و نمونه معرفی به دست آمد. به منظور آنالیز سرندي نمونه معرف، مانند فوق به جزء نمونه های کوچکتر تقسیم شد. این نمونه زغال سنگ در ده سرندي به مدت پانزده دقیقه آنالیز سرندي شد، سپس مواد باقی مانده روی سرندي توزین و برای رسم نمودار از درصد تجمعی مواد عبور کرده از سرندي استفاده شد. جدول (۳-۱) آنالیز سرندي این نمونه را نشان می دهد.

جدول (۱-۳): آنالیز سرنندی نمونه خوراک فلوتاسیون کارخانه زغال شویی البرز شرقی

اندازه سرنند (میکرون)	تجمعی باقی مانده (%)	تجمعی عبور کرده (%)
۱۰۰۰	۴/۴۷	۹۵/۵۳
۳۵۵	۲۵/۹۵	۷۴/۰۵
۱۵۰	۷۰/۵۷	۲۹/۴۳
۷۵	۹۱/۶۴	۸/۳۶
۶۳	۹۳/۳۴	۶/۶۵
۵۳	۹۶/۲۵	۳/۷۴
۴۵	۹۸/۵۸	۱/۴۳
۳۸	۹۹/۶۴	۰/۳۶
۲۵	۹۹/۸۳	۰/۱۶
۲۰	۱۰۰	۰

برای رسم نمودار دانه‌بندی، از سری سرندهای استاندارد ASTM به‌ترتیب از بزرگترین سایز (Mesh) ۱۸ تا کوچکترین سایز سرنند (Mesh ۶۳۵) استفاده و عملیات دانه‌بندی انجام شد. نمودار دانه‌بندی (شکل ۱-۳) رسم شده و d_{80} برای این نمونه از زغال سنگ، در ۴۵۰ میکرون به‌دست آمد.



شکل (۱-۳): نمودار دانه‌بندی خوراک فلوتاسیون زغال سنگ البرز شرقی

۳-۱-۳- آزمایش‌های سینتیکی

۳-۱-۳-۱- روش اجرا

برای انجام آزمایش‌های سینتیکی و تعیین زمان کف‌گیری بهینه هنگام استفاده از کلکتورهای نفت سفید و گازوییل، پنج کیلوگرم از نمونه زغال‌سنگ اشاره شده در بخش (۳-۱-۱) انتخاب و توسط سری سرندهای استاندارد ASTM از بزرگترین سایز (۱۸مش) تا (۲۰۰مش) عملیات سرند کنی انجام و بخش کوچکت‌ر (زیر ۷۵ میکرون)، به‌عنوان نرمه جدا شد. ده آزمایش سینتیکی (پنج آزمایش برای استفاده از کلکتور نفت سفید و پنج آزمایش درحالت استفاده از گازوییل) با ثابت درنظر گرفتن فاکتورهای ذیل انجام شدند:

- حجم سلول یک لیتری و نوع سلول مکانیکی: دنور مدل D12.

- دور همزن: ۹۵۰ - ۱۰۰۰ rpm

- pH=7 (آب مقطر) - لازم به ذکر است قبل از انجام آزمایش‌های سینتیکی از آب مصرفی کارخانه نمونه تهیه شد که مقدار pH این آب برابر ۶/۸۹ شد که بهترین بازیابی عملیات فلوتاسیون زغال‌سنگ در همین محدوده قرار دارد. به‌دلیل این‌که آب مصرفی آزمایشگاه (آزمایشگاه کانه آرایی دانشگاه صنعتی شاهرود) دارای pH برابر با ۷/۴۰ بود، بنابراین از آب مقطر برای انجام آزمایش‌های سینتیکی استفاده شد.

- مقدار درصد جامد: ۱۱٪ (طبق گزارشات فنی کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی در سال ۱۳۸۹).

- نوع و مقدار کف‌ساز: روغن کاج به میزان ۱۰۰ g/t (طبق گزارشات فنی کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی در سال ۱۳۸۹).

- مقدار مصرف کلکتور: ۱۰۰۰ g/t

- زمان آماده‌سازی اولیه : ۵ دقیقه (طبق استاندارد ASTM D 5114-90)، فقط برای همزدن و توزیع یکسان زغال سنگ در سرتاسر پالپ.

- زمان آماده‌سازی کلکتور: ۹۰ ثانیه (طبق استاندارد ASTM D 5114-90)

- زمان آماده‌سازی کف‌ساز: ۳۰ ثانیه (طبق استاندارد ASTM D 5114-90)

- انجام عملیات فلوتاسیون در دمای اتاق و فشار اتمسفر.

برای پنج آزمایش اول (آزمایش یک الی پنج) با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها فقط از کلکتور نوع نفت سفید و برای پنج آزمایش بعدی، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها فقط از کلکتور گازوییل استفاده شد.

۳-۱-۳-۲- نحوه محاسبه مقدار زغال سنگ لازم در آزمایش‌های سینتیکی

طبق تعریف، درصد جامد (X) برابر است با:

$$X (\%) = \frac{\text{وزن جامد} + \text{وزن آب}}{\text{وزن جامد}} \times 100 \quad (۱-۳)$$

اگر رابطه فوق بر حسب وزن جامد بیان شود، به رابطه (۲-۳) می‌رسیم که در آن عدد ۱۰۰۰ مقدار آب مخلوط شده بر حسب لیتر است.

$$(۲-۳) \quad \text{مقدار زغال سنگ (وزن جامد بر حسب گرم)} = \frac{(X \times 1000)}{(100 - X)}$$

لازم به ذکر است که وزن مخصوص این نمونه زغال سنگ تقریباً برابر ۱ تن بر متر مکعب در نظر گرفته شده است و به همین دلیل رابطه محاسبه مقدار جامد به شکل ساده شده رابطه (۱-۳) تبدیل شده است.

$$(۳-۳) \quad \text{مقدار زغال سنگ (گرم)} = \frac{(11 \times 1000)}{(100 - 11)} = 123/59 \text{ g}$$

مثلاً در آزمایش اول، مقدار ۱۲۳/۵۹ گرم زغال سنگ با ۱ لیتر آب مقطر در سلول مکانیکی مخلوط و به مدت ۵ دقیقه در ۹۵۰ rpm آماده سازی اولیه انجام شد (شیر هوا در حالت بسته).

در دقیقه پنجم مقدار ۰/۱۲۳ گرم نفت سفید (کلکتور) به پالپ افزوده شد و ۹۰ ثانیه نیز به آماده سازی کلکتور اختصاص یافت، نهایتاً ۰/۰۱۲۳ گرم روغن کاج (کف ساز) نیز با زمان آماده سازی ۳۰ ثانیه به پالپ افزوده و در دقیقه هفتم شیر ورودی هوا به سلول باز شد. عملیات کف گیری شروع و در مورد آزمایش اول تا دقیقه ۸/۵ کف گیری انجام شد. برای نه آزمایش باقی نیز همین روال تکرار شد، با این تفاوت که زمان های کف گیری برای چهار آزمایش بعدی به ترتیب برابر با ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ دقیقه بود. روال انجام پنج آزمایش بعدی (از آزمایش شش الی ده) نیز مطابق شرح فوق بوده با این تفاوت که به جای نفت سفید، از گازوییل استفاده شد.

۳-۱-۳- اندازه گیری درصد خاکستر زغال سنگ

منظور از خاکستر مواد غیر قابل سوختنی است که پس از احتراق کامل زغال سنگ، باقی می ماند و چون از مواد مزاحم در کک سازی است، لذا تعیین درصد آن مهم است.

طبق استاندارد ASTM D-3174 برای تعیین خاکستر، ۱ تا ۲ گرم زغال سنگ (خوراک، کنسانتره، باطله) در بوته چینی توسط ترازوی دقیق دیجیتالی وزن شد. سپس بوته را در کوره قرار می دهیم و کوره روشن می شود. درجه حرارت کوره باید به 850 ± 25 درجه سانتی گراد برسد. به مدت ۱ ساعت و ۳۰ دقیقه در این درجه حرارت نمونه قرار می گیرد، سپس از کوره خارج و پس از سرد شدن وزن آن در ترازوی دیجیتالی اندازه گیری می شود و طبق معادله (۳-۴) درصد خاکستر نمونه تعیین می شود. شایان ذکر است که اندازه گیری ها آن قدر تکرار می شوند تا میزان خطای مقدار خاکستر سنجی مرحله نهایی با مرحله قبلی کمتر از ۰/۰۰۰۵ گرم باشد.

$$W = ((A-B)/C) \times 100$$

(۴-۳)

W = درصد خاکستر موجود در نمونه

A = وزن بوته و خاکستر مانده (g)

B = وزن بوته خالی (g)

C = وزن نمونه مورد استفاده (g)

۳-۱-۳-۴- آزمایش تعیین درصد مواد فرار زغال سنگ

طبق استاندارد ASTM D-3175 برای اندازه گیری مواد فرار (که عمدتاً شامل گازهای نیتروژن، سولفور و غیره می باشد) مقدار ۵ گرم زغال سنگ را داخل بوته درب دار ریخته و به مدت ۷ دقیقه در دمای ۸۷۰ درجه سانتی گراد حرارت داده می شود (درب بوته فرار سنجی در حالت بسته). پس از خنک شدن و کسر درصد خاکستر از عدد به دست آمده مطابق رابطه زیر، مقدار درصد مواد فرار حاصل می شود:

$$q = (A/C) \times 100 \quad (۵-۳)$$

q = درصد مواد فرار موجود در نمونه

A = کاهش وزن نمونه (g)

C = وزن نمونه مورد استفاده (g)

۳-۱-۳-۵- تعیین عیار زغال سنگ

اصولاً مقدار درصد زغال سنگ (عیار زغال سنگ) از رابطه (۳-۶) به دست می آید، اما از آنجایی که نمونه گرفته شده از خوراک فلوتاسیون به صورت پالپ بود و در آزمایشگاه این رطوبت ذاتی و اکتسابی کاملاً از بین رفت، لذا مقدار رطوبت در رابطه زیر همواره برابر عدد صفر قرار می گیرد.

$$(۳-۶) \quad \text{عیار زغال سنگ (درصد)} = 100 - (\text{Vol \%}) - (\text{Water \%}) - (\text{Ash \%})$$

Ash : درصد خاکستر زغال سنگ

Vol : درصد مواد فرار زغال سنگ

Water : درصد رطوبت کلی زغال سنگ

۳-۱-۳-۶- روش محاسبه بازیابی و کارآیی جدایش

بعد از انجام هر تست، دو محصول به دست می آید که یکی کنسانتره و دیگری باطله بوده و این محصولات بعد از فیلتر شدن، در اجاق^۱ به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد برای خشک شدن قرار می گیرند. پس از اندازه گیری درصد خاکستر و مواد فرار برای هر فراکسیون (کنسانتره، خوراک و باطله) و کسر این مقادیر از عدد ۱۰۰، مقدار درصد زغال سنگ در هر فراکسیون برای هر تست، به دست می آید و با استفاده از رابطه (۳-۷) مقدار بازدهی (بازیابی) محاسبه می شود (رضایی، ۱۳۹۴):

$$\text{Efficiency (\%)} = \frac{(f-t)}{(c-t)} \times \frac{c}{f} \times 100 \quad (3-7)$$

f: درصد زغال سنگ در خوراک

c: درصد زغال سنگ در کنسانتره

t: درصد زغال سنگ در باطله

برای محاسبه کارآیی جدایش^۲ نیز از رابطه (۳-۸) استفاده شد که پارامترهای c ، f و t مطابق فوق می باشند (رضایی، ۱۳۹۴):

$$S.E. (\%) = \frac{c(f-t)(c-f)(100-t)}{f(c-t)^2(100-f)} \times 100 \quad (3-8)$$

¹ Oven

² Separation Efficiency

۳-۱-۳-۷- نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های سینتیکی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های درصد خاکستر و مواد فرار برای کنسانتره و باطله حاصل از هر آزمایش و محاسبه بازیابی زغال‌سنگ شسته شده توسط رابطه (۳-۷)، در جداول (۳-۲) و (۳-۳) به ترتیب برای نفت سفید و گازوییل آورده شده است.

جدول (۳-۲): بازیابی‌های به‌دست آمده در حالت استفاده از کلکتور نفت سفید

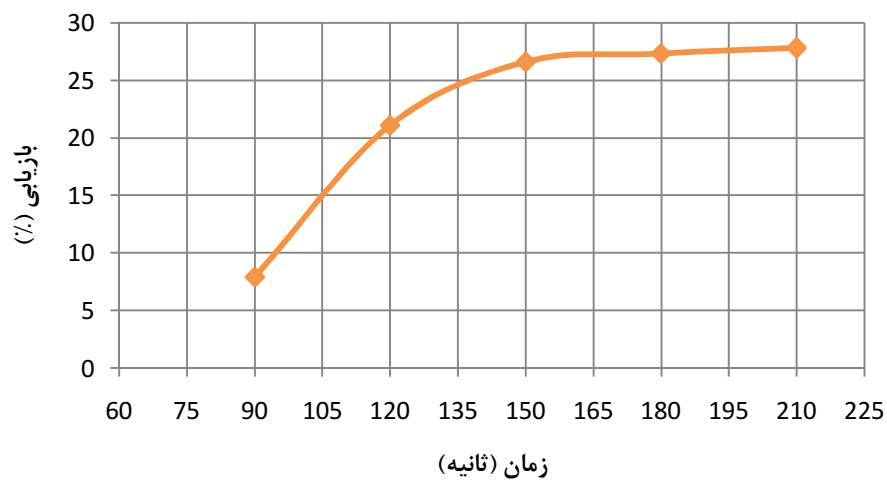
شماره آزمایش (Run)	زمان (ثانیه)	خاکستر در کنسانتره (%)	بازیابی (%)
۱	۹۰	۱۲/۰۸	۷/۹۲
۲	۱۲۰	۱۵	۲۱/۱
۳	۱۵۰	۱۶/۶۶	۲۶/۵۹
۴	۱۸۰	۱۹/۱۱	۲۷/۳۰
۵	۲۱۰	۲۰	۲۷/۷۹

جدول (۳-۳): بازیابی‌های به‌دست آمده در حالت استفاده از کلکتور گازوییل

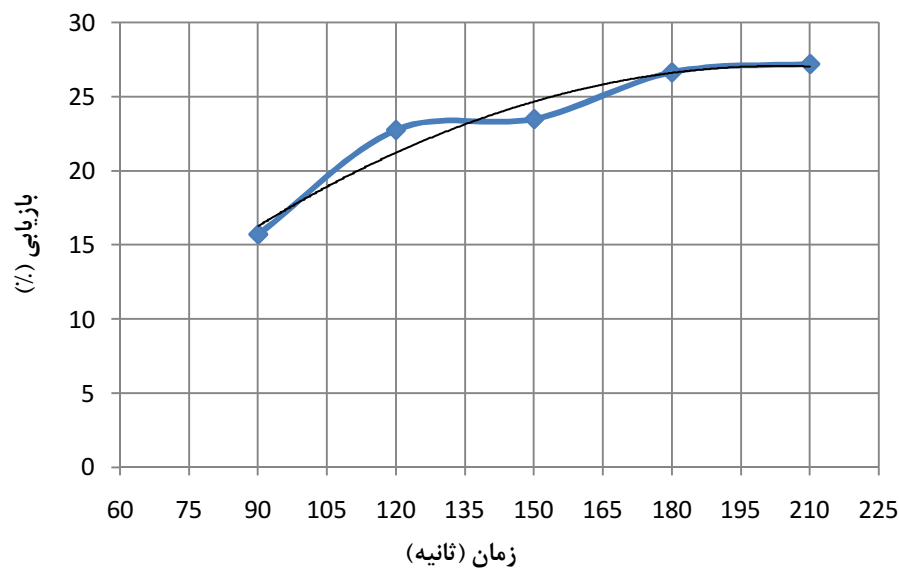
شماره آزمایش (Run)	زمان (ثانیه)	خاکستر در کنسانتره (%)	بازیابی (%)
۶	۹۰	۱۳/۹۵	۱۵/۷۴
۷	۱۲۰	۱۴/۴۴	۲۲/۷۶
۸	۱۵۰	۱۴/۵۷	۲۳/۵۱
۹	۱۸۰	۱۵/۱۳	۲۶/۶۶
۱۰	۲۱۰	۱۵/۱۴	۲۷/۲۱

نمودار مربوط به استفاده از کلکتور نفت سفید (آزمایش‌های ۱ تا ۵) در شکل (۳-۲) و در حالت استفاده از گازوییل در شکل (۳-۳) آورده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل احتمال وجود خطا در اندازه‌گیری یا روال انجام آزمایش شماره هشت، از گزینه خط روند^۱ در رسم نمودار مربوط به شکل (۳-۳) استفاده شده است تا یک برازش کلی از روند نمودار حاصل شود.

^۱ Trendline



شکل (۳-۲): نمودار بازیابی برحسب زمان کف‌گیری (کلکتور نفت سفید)



شکل (۳-۳): نمودار بازیابی برحسب زمان کف‌گیری (کلکتور گازوئیل)

با توجه به اشکال (۳-۲) و (۳-۳) زمان مناسب کف‌گیری بهینه برای فلوتاسیون نمونه زغال‌سنگ البرز شرقی با ثابت نگه داشتن سایر فاکتورها، در حالت استفاده از نفت سفید و گازوئیل به ترتیب ۱۵۰ و ۱۸۰ ثانیه به دست آمد، ضمن این‌که در حالت استفاده ترکیبی از این دو نوع کلکتور (۵۰٪ از نفت سفید و ۵۰٪ از گازوئیل)، زمان کف‌گیری بهینه ۱۶۵ ثانیه (میانگین زمان به دست آمده در حالت مجزا برای هر کدام) در نظر گرفته شد.

۳-۲- آنالیز اولیه خوراک فلوتاسیون

بعد از نمونه‌برداری از خوراک فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی و آماده‌سازی آن مطابق روال اشاره شده در بخش‌های پیشین، آنالیز اولیه این خوراک به‌منظور تعیین درصد خاکستر و مواد فرار و بالطبع عیار زغال‌سنگ در خوراک، مطابق استاندارد های ASTM D3174 و ASTM D-3175 انجام شد که نتایج مطابق جدول (۳-۴) می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به این که d_{80} برای خوراک در ۴۵۰ میکرون به‌دست آمد، لذا سه محدوده ابعادی را جهت انجام آزمایش‌های فلوتاسیون انتخاب کرده و آنالیز هر بخش به‌طور مجزا آورده شده است، ضمناً ابعاد ۷۵- میکرون نیز به‌عنوان نرمه زغال‌سنگ جدا شد.

جدول (۳-۴): آنالیز اولیه خوراک فلوتاسیون کارخانه در محدوده‌های ابعادی مورد آزمایش

ابعاد (میکرون) پارامترها	+۷۵-۱۵۰ (f_1)	+۱۵۰-۳۵۵ (f_2)	+۳۵۵-۱۰۰۰ (f_3)
مقدار خاکستر (%)	۳۵/۰۴	۲۶/۹۱	۲۴/۹۲
مقدار مواد فرار (%)	۴۳/۴۴	۵۱/۳۸	۵۳/۲۳
عیار زغال‌سنگ (%)	۲۱/۵۲	۲۱/۷۱	۲۱/۸۵

۳-۳- انتخاب فاکتورها، سطوح و پاسخ‌ها

در این سری از آزمایش‌ها پنج فاکتور «مقدار کلکتور، مقدار کف‌ساز روغن‌کاج، درصد جامد پالپ، درصد اختلاط نفت سفید به‌عنوان کلکتور و محدوده دانه‌بندی» انتخاب و سطوح مربوط به هر کدام از آن‌ها در جدول (۳-۵) آورده شده است. لازم به ذکر است به‌دلیل این که فاکتور محدوده دانه‌بندی جزو پارامترهای کیفی طرح آزمایشی بود، اما با گنجاندن این فاکتور به‌صورت کیفی تعداد آزمایش‌ها زیاد می‌شد، لذا با انتخاب ترغند نماد برای دانه‌بندی، این فاکتور نیز به‌حالت کمی به نرم افزار معرفی

شد، به نحوی که نماد ابعاد ۲۵۰، ۱۰۰ و ۴۰۰ میکرون، به ترتیب متعلق به محدوده‌های دانه‌بندی (+۷۵-۱۵۰ Micron)، (+۱۵۰-۳۵۵ Micron) و (۳۵۵-۱۰۰۰ Micron) می‌باشند.

جدول (۳-۵): پنج فاکتور و سطوح آن‌ها در طرح آزمایش با انتخاب $\alpha = 1$

فاکتور	واحد	نشانه	سطح پایین (-۱)	سطح میانی (۰)	سطح بالا (+۱)
مقدار کلکتور	g/t	A	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰
مقدار کف‌ساز (Pine Oil)	g/t	B	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰
درصد جامد پالپ	%	C	۱۰	۱۵	۲۰
درصد اختلاط نفت سفید به عنوان کلکتور	%	D	۰	۵۰	۱۰۰
بعد بیانگر محدوده دانه‌بندی	میکرون	E	۱۰۰ (f ₁)	۲۵۰ (f ₂)	۴۰۰ (f ₃)

پاسخ‌های مدنظر در این تحقیق «درصد خاکستر در کنسانتره، درصد بازیابی و کارایی جدایش» انتخاب شدند که یافتن مقدار بهینه این فاکتورها در جهت بیشینه کردن بازیابی و کارایی جدایش و نیز کمینه کردن خاکستر محتوی کنسانتره از اولویت این تحقیق است.

به دلیل این که آزمایش‌ها در یک بازه زمانی انجام شدند، لذا برای کلیه آزمایش‌ها یک بلوک انتخاب شد. مطابق جدول (۳-۵) و با احتساب شش نقطه میانی^۱ (شش آزمایش تکراری برای کم کردن خطای آزمایش‌ها) به تعداد سی و دو آزمایش پیش‌بینی شد. اطلاعات کامل از این طرح و مقادیر پاسخ‌های حاصل از هر آزمایش در جدول (۳-۶) آورده شده است.

¹ Center Point

جدول (۳-۶): مشخصات سی و دو آزمایش و سطوح فاکتورهای آن، به همراه مقادیر پاسخ‌های محاسبه شده

شماره تست	A (g/t)	B (g/t)	C (%)	D (%)	E (میکرون)	بازیابی (Recovery) (%)	خاکستر کنسانتره (Ash in C) (%)	کارایی جدایش (S.E) (%)
۱	۱۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۰	۴۰۰	۸۲/۱۹	۱۳/۵۴	۲۲/۴۷
۲	۲۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۰	۱۰۰	۹۸/۲۸	۲۳/۰۴	۲/۴۸
۳	۱۰۰۰	۱۰۰	۲۰	۰	۱۰۰	۷۷/۸۴	۱۷/۶۶	۲۱/۰۹
۴	۲۰۰۰	۱۰۰	۲۰	۰	۴۰۰	۶۱/۵۸	۱۴/۲۳	۲۷/۱۲
۵	۱۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۶۹/۸۲	۲۰/۳۱	۲۴/۳۷
۶	۲۰۰۰	۱۰۰	۱۰	۱۰۰	۴۰۰	۶۰/۱۰	۱۴/۰۳	۲۸/۰۳
۷	۱۰۰۰	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۴۰۰	۷۵/۷۷	۱۴/۹۹	۲۳/۴۲
۸	۲۰۰۰	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۶۲/۴۱	۲۲/۱۳	۲۸/۶۸
۹	۱۵۰۰	۱۰۰	۱۵	۵۰	۲۵۰	۴۶/۵۲	۱۸/۷۸	۲۶/۷۵
۱۰	۱۰۰۰	۱۵۰	۱۵	۵۰	۲۵۰	۷۸/۴۴	۱۷/۹۷	۲۱/۱۸
۱۱	۲۰۰۰	۱۵۰	۱۵	۵۰	۲۵۰	۶۷/۴۹	۱۸/۲۶	۲۴/۹۸
۱۲	۱۵۰۰	۱۵۰	۱۰	۵۰	۲۵۰	۷۵/۹۲	۱۷/۹۸	۲۱/۳۰
۱۳	۱۵۰۰	۱۵۰	۲۰	۵۰	۲۵۰	۵۶/۱۷	۱۸/۶۰	۲۷/۸۶
۱۴	۱۵۰۰	۱۵۰	۱۵	۰	۲۵۰	۵۲/۱۰	۱۳/۸۸	۲۸/۵۴
۱۵	۱۵۰۰	۱۵۰	۱۵	۱۰۰	۲۵۰	۸۳/۹۳	۱۷/۸۰	۱۷/۲۵
۱۶	۱۵۰۰	۱۵۰	۱۵	۵۰	۱۰۰	۸۰/۷۶	۲۱/۷۱	۱۹/۳۶
۱۷	۱۵۰۰	۱۵۰	۱۵	۵۰	۴۰۰	۷۸/۵۶	۱۳/۲۸	۲۲/۶۹
۱۸	۱۵۰۰	۱۵۰	۱۵	۵۰	۲۵۰	۷۶/۷۲	۱۷/۲۰	۲۱/۵۱
۱۹	۱۵۰۰	۱۵۰	۱۵	۵۰	۲۵۰	۵۶/۴۸	۱۷/۱۳	۲۷/۹۰
۲۰	۱۵۰۰	۱۵۰	۱۵	۵۰	۲۵۰	۶۲/۴۴	۱۸/۷۹	۲۶/۹۴
۲۱	۱۵۰۰	۱۵۰	۱۵	۵۰	۲۵۰	۷۱/۳۱	۱۸/۳۳	۲۴/۵۵
۲۲	۱۵۰۰	۱۵۰	۱۵	۵۰	۲۵۰	۴۴/۲۱	۲۰/۶۵	۲۶/۶۰
۲۳	۱۵۰۰	۱۵۰	۱۵	۵۰	۲۵۰	۷۱/۱۱	۱۵/۷۰	۲۳/۸۱
۲۴	۱۰۰۰	۲۰۰	۱۰	۰	۱۰۰	۹۷/۵۹	۱۵/۶۲	۳/۱۳
۲۵	۲۰۰۰	۲۰۰	۱۰	۰	۴۰۰	۶۸/۸۴	۱۳/۷۲	۲۶/۷۲
۲۶	۱۰۰۰	۲۰۰	۲۰	۰	۴۰۰	۶۹/۴۴	۱۴/۴۹	۲۶/۲۷
۲۷	۲۰۰۰	۲۰۰	۲۰	۰	۱۰۰	۸۷/۷۰	۲۰/۸۰	۱۵/۳۸
۲۸	۱۰۰۰	۲۰۰	۱۰	۱۰۰	۴۰۰	۶۹/۰۲	۱۳/۱۶	۲۶/۵۶
۲۹	۲۰۰۰	۲۰۰	۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۴/۲۴	۱۹/۵۸	۲۳/۰۰
۳۰	۱۰۰۰	۲۰۰	۲۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۴/۶۷	۱۸/۹۴	۷/۱۲
۳۱	۲۰۰۰	۲۰۰	۲۰	۱۰۰	۴۰۰	۶۳/۹۰	۱۵/۰۵	۲۶/۷۷
۳۲	۱۵۰۰	۲۰۰	۱۵	۵۰	۲۵۰	۵۷/۲۰	۱۷/۸۴	۲۷/۵۴

۳-۴- شرایط انجام آزمایش‌ها

کلیه آزمایش‌ها توسط ماشین فلو تاسیون مکانیکی نوع دنور با حجم سلول یک لیتری انجام شد. سایر فاکتورهای عملیاتی مانند سرعت چرخش روتور، pH، زمان آماده‌سازی اولیه، زمان آماده‌سازی برای

کلکتور و کف‌ساز و زمان فلوتاسیون برای همه آزمایش‌ها به‌منظور تعیین مقدار بهینه برخی فاکتورهای مورد نظر در فلوتاسیون زغال‌سنگ با استفاده از دستگاه فلوتاسیون مکانیکی ثابت نگه داشته شدند. در کلیه آزمایش‌ها پالپ حاوی آب مقطر و زغال‌سنگ با دانه‌بندی مشخص به‌مدت ۵ دقیقه با دور بهینه تجربی به‌دست آمده برای زغال‌سنگ در ۹۵۰-۱۰۰۰ rpm با درصد جامد تعیین شده در داخل سلول مخلوط و آماده‌سازی شد. در هر آزمایش مقدار کلکتور تعیین شده از نفت سفید، گازوئیل و یا مخلوطی از این دو در دقیقه پنجم افزوده شد و به مدت ۹۰ ثانیه زمان آماده‌سازی به کلکتور اختصاص داده شد. با توجه به این‌که طبق گزارشات فنی کارخانه در سال ۱۳۸۹ و نیز طی مراجعات حضوری به کارخانه از روغن کاج به‌عنوان کف‌ساز در کارخانه استفاده می‌شد، جهت انطباق با این امر در تمام آزمایش‌ها نیز از روغن کاج مصرفی کارخانه به‌عنوان کف‌ساز استفاده شد و ۳۰ ثانیه نیز زمان آماده‌سازی برای این کف‌ساز لحاظ شد. در دقیقه هفتم شیر هوا باز و زمان کف‌گیری (فلوتاسیون) بهینه با توجه به نوع کلکتور مصرفی (فقط نفت سفید: ۱۵۰ ثانیه، فقط گازوئیل: ۱۸۰ ثانیه و حالت استفاده ۵۰ درصدی از هر کدام: ۱۶۵ ثانیه) انتخاب شد. در هر آزمایش به‌منظور ثابت ماندن درصد جامد در حین کف‌گیری مقداری آب نیز به سلول اضافه شد. کنسانتره و باطله به‌دست آمده از هر سری تست، توسط فیلتر آبیگری و به مدت ۲۴ ساعت در اجاق الکتریکی جهت خشک شدن قرار داده شدند. پس از خشک شدن کنسانتره و باطله حاصل از هر آزمایش وزن شده و درصدهای خاکستر و مواد فرار آن‌ها اندازه‌گیری شد. درنهایت عیار زغال‌سنگ در کنسانتره و باطله محاسبه شده و درصدهای بازیابی و کارایی جدایش نیز مطابق روابط (۳-۴) و (۳-۵) محاسبه شدند. نتایج حاصل از این سری اندازه‌گیری‌ها در جدول (۳-۶) به‌طور کامل آورده شده است.

فصل چهارم:

ارائه یافته‌ها و نتایج

۴-۱- مطالعه و تفسیر داده‌های مربوط به پاسخ‌ها

به‌طوری که قبلاً نیز اشاره شد، در این سری از آزمایش‌ها پنج فاکتور «مقدار کلکتور، مقدار کف‌ساز، درصد جامد، درصد اختلاط نفت سفید به‌عنوان کلکتور و نماد محدوده دانه‌بندی زغال‌سنگ» به‌عنوان فاکتورهای اصلی و دخیل در عملیات فلوتاسیون مکانیکی مدنظر قرار گرفتند. از طرفی «درصد خاکستر راه یافته به کنسانتره، بازیابی و کارآیی جدایش» نیز به‌عنوان پاسخ‌های این آزمایش‌ها انتخاب شدند.

۴-۱-۱- مدل برازش شده برای پاسخ‌ها

همان‌طور که در بخش (۳-۴) اشاره شد، در نرم افزار DX10 از روش مطالعه «سطح پاسخ» و نوع طرح «ترکیب مرکزی» استفاده شد و مدل کلی طرح از نوع درجه دوم^۱ پیش‌بینی شد که برای پاسخ‌های «بازیابی، کارآیی جدایش و خاکستر کنسانتره» به‌ترتیب نوع مدل‌های «درجه دوم تعدیل یافته^۲، اثر متقابل فاکتورها^۳ و خطی^۴» پیش‌بینی و در طرح استفاده شد.

۴-۱-۲- آنالیز واریانس

از آنجایی که انتخاب مدل برای تعیین ارتباط فاکتورها بر روی پاسخ آزمایش‌ها امری ضروری و لازم است، لذا با انتخاب بهترین مدل و بهترین فاکتورها با درنظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪ (میزان خطای حداکثر ۵٪)، آنالیز داده‌ها انجام شد و جدول آنالیز آماری واریانس (ANOVA) به‌دست آمد. در آنالیز واریانس هدف شناسایی عوامل مؤثر و نیز ترتیب آن‌ها از نظر اهمیت در پاسخ آزمایش‌ها است. به‌عبارتی این جدول معنادار یا بی‌معنا بودن مدل برازش شده برای پاسخ را نشان می‌دهد. جدول (۴-۱) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ اول (بازیابی) را نشان می‌دهد.

^۱ Quadratic

^۲ RQuadratic

^۳ R2FI

^۴ Linear

جدول (۴-۱): آنالیز واریانس مربوط به پاسخ اول (بازیابی)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	۳۸۳۸/۷۳	۱۴	۲۷۴/۱۹	۲/۵۸	۰/۰۳۳۲	معنا دار
A-Collector Dosage	۲۷۱/۸۶	۱	۲۷۱/۸۶	۲/۵۵	۰/۱۲۸۴	
B-Frother Dosage	۱۲۶/۹۹	۱	۱۲۶/۹۹	۱/۱۹	۰/۲۸۹۹	
C-Pulp Solid	۱۱۸/۸۴	۱	۱۱۸/۸۴	۱/۱۲	۰/۳۰۵۴	
D-Kerosen Dosage	۹۷/۹۱	۱	۹۷/۹۱	۰/۹۲	۰/۳۵۰۹	
E-Symbol Size Distribution	۷۱۷/۳۹	۱	۷۱۷/۳۹	۶/۷۴	۰/۰۱۸۸	
AC	۳۸/۱۴	۱	۳۸/۱۴	۰/۳۶	۰/۵۵۷۳	
AD	۹۱/۳۷	۱	۹۱/۳۷	۰/۸۶	۰/۳۶۷۱	
BC	۹۲/۸۵	۱	۹۲/۸۵	۰/۸۷	۰/۳۶۳۳	
BE	۱۸۶/۱۹	۱	۱۸۶/۱۹	۱/۷۵	۰/۲۰۳۴	
CD	۳۳۸/۷۱	۱	۳۳۸/۷۱	۳/۱۸	۰/۰۹۲۳	
DE	۱۳۶/۶۲	۱	۱۳۶/۶۲	۱/۲۸	۰/۲۷۲۹	
A ²	۲۰۳/۵۰	۱	۲۰۳/۵۰	۱/۹۱	۰/۱۸۴۶	
B ²	۴۵۷/۷۶	۱	۴۵۷/۷۶	۴/۳۰	۰/۰۵۳۶	
E ²	۶۵۴/۱۱	۱	۶۵۴/۱۱	۶/۱۵	۰/۰۲۳۹	
Residual	۱۸۰۸/۹۶	۱۷	۱۰۶/۴۱			
Lack of Fit	۱۰۹۳/۰۱	۱۲	۹۱/۰۸	۰/۶۴	۰/۷۵۹۱	بی معنا

همان طور که در جدول فوق مشخص است p-Value (خطای تأثیر) برای مدل برابر ۰/۰۳۳۲ است که کمتر از ۰/۰۵ و نشان دهنده اینست که با سطح اطمینان ۹۵٪ مدل برازش شده از نظر آماری معنی دار است. در واقع تنها ۳/۳۲٪ این احتمال وجود دارد که F Value (مقدار تابع توزیع فیشر) بزرگتری بر اساس تأثیر اغتشاش ها به وجود آید و مدل به صورت تصادفی اتفاق افتاده باشد.

عبارت دیگری که در این جدول نیاز به تفسیر دارد، Lack of Fit است که مقایسه کننده خطای پیش بینی شده پاسخ توسط مدل با خطای مطلق است. که اگر مدل برازش شده برای پاسخ موردنظر مناسب نباشد، این عبارت از نظر آماری معنادار خواهد بود. در جدول فوق این مقدار در سطح اطمینان ۹۵٪ بیشتر از ۵٪ است که مبین بی معنا بودن میزان اختلاف خطاها و در نتیجه برازش صحیح مدل برای پاسخ اول یا همان بازیابی است.

مدل ارائه شده توسط نرم افزار DX10 به صورت معادله (۴-۱) است.

$$\text{Recovery} = 64.90 - 3.89 A + 2.66 B - 2.57 C - 2.33 D \quad (4-1)$$

$$- 6.31 E - 1.54 AC - 2.39 AD + 2.41 BC - 3.41 BE + 4.60 CD$$

$$+ 2.92 DE + 8.44 A^2 - 12.66 B^2 + 15.14 E^2$$

جداول (۴-۲) و (۴-۳) به ترتیب آنالیز واریانس مربوط به پاسخ دوم (کارآیی جدایش) و پاسخ سوم (خاکستر محتوی کنسانتره) را نشان می دهند.

جدول (۴-۲): آنالیز واریانس مربوط به پاسخ دوم (کارآیی جدایش)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	۱۱۱۸/۰۴	۱۴	۷۹/۸۶	۴/۰۳	۰/۰۰۳۹	معنا دار
A-Collector Dosage	۴۲/۰۹	۱	۴۲/۰۹	۲/۱۲	۰/۱۶۳۲	
B-Frother Dosage	۲۶/۷۰	۱	۲۶/۷۰	۱/۳۵	۰/۲۶۱۸	
C-Pulp Solid	۳۶/۶۰	۱	۳۶/۶۰	۱/۸۵	۰/۱۹۱۹	
D-Kerosen Dosage	۵۶/۹۱	۱	۵۶/۹۱	۲/۸۷	۰/۱۰۸۴	
E-Symbol Size Distribution	۴۰۵/۶۲	۱	۴۰۵/۶۲	۲۰/۴۷	۰/۰۰۰۳	
AB	۷۱/۶۰	۱	۷۱/۶۰	۳/۶۱	۰/۰۷۴۴	
AC	۱۶/۷۱	۱	۱۶/۷۱	۰/۸۴	۰/۳۷۱۳	
AD	۴۳/۱۴	۱	۴۳/۱۴	۲/۱۸	۰/۱۵۸۴	
BC	۴۴/۹۹	۱	۴۴/۹۹	۲/۲۷	۰/۱۵۰۲	
BD	۲۳/۴۶	۱	۲۳/۴۶	۱/۱۸	۰/۲۹۱۸	
BE	۶۹/۱۴	۱	۶۹/۱۴	۳/۴۹	۰/۰۷۹۱	
CD	۱۶۲/۸۰	۱	۱۶۲/۸۰	۸/۲۲	۰/۰۱۰۷	
CE	۲۳/۷۱	۱	۲۳/۷۱	۱/۲۰	۰/۲۸۹۳	
DE	۹۴/۵۸	۱	۹۴/۵۸	۴/۷۷	۰/۰۴۳۲	
Residual	۳۳۶/۸۹	۱۷	۱۹/۸۲			
Lack of Fit	۳۰۸/۶۲	۱۲	۲۵/۷۲	۴/۵۵	۰/۰۵۲۹	بی معنا

توضیحات جدول فوق نیز مطابق حالت قبل می باشد. P-value کوچکتر از ۰/۰۵ بوده و لذا با اطمینان

۹۵٪ برازش مدل برای پاسخ کارآیی جدایش معنی دار می باشد. ضمن این که بی معنا بودن Lack of Fit

نیز، صحت مدل انتخابی را تأیید می‌کند. مدل ارائه شده برای کارآیی جدایش نیز مطابق رابطه (۲-۴) است.

$$S.E = +22.55 + 1.53 A - 1.22 B + 1.43 C + 1.78 D + 4.75 E \quad (۲-۴)$$

$$+ 2.12 AB + 1.02 AC + 1.64 AD - 1.68 BC - 1.21 BD$$

$$+ 2.08 BE - 3.19 CD - 1.22 CE - 2.43 DE$$

جدول (۳-۴): آنالیز واریانس مربوط به پاسخ سوم (خاکستر کنسانتره)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	۱۸۰/۴۴	۵	۳۶/۰۹	۱۵/۳۶	۰/۰۰۰۱	معنا دار
A-Collector Dosage	۱۱/۱۴	۱	۱۱/۱۴	۴/۷۴	۰/۰۳۸۷	
B-Frother Dosage	۵/۰۲	۱	۵/۰۲	۲/۱۴	۰/۱۵۵۶	
C-Pulp Solid	۱/۹۴	۱	۱/۹۴	۰/۸۳	۰/۳۷۱۸	
D-Kerosen Dosage	۴/۵۱	۱	۴/۵۱	۱/۹۲	۰/۱۷۷۶	
E-Symbol Size Distribution	۱۵۷/۸۳	۱	۱۵۷/۸۳	۱۹/۶۷	۰/۰۰۰۱	
Residual	۶۱/۰۷	۲۶	۲/۳۵	-	-	
Lack of Fit	۴۶/۶۴	۲۱	۲/۲۲	۰/۷۷	۰/۶۹۸۴	بی معنا

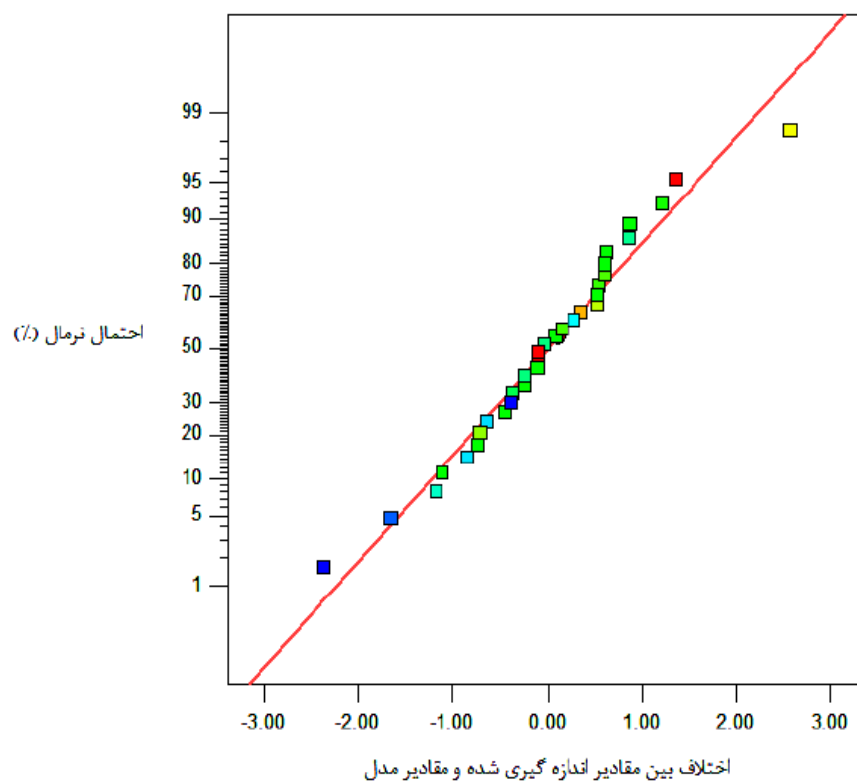
مدل برازش شده برای پاسخ سوم (خاکستر کنسانتره) به دلیل این‌که دارای p-value خیلی کمتر از ۰/۰۵ (۰/۰۰۰۱) است، لذا از اعتبار و اطمینان بیشتری نسبت به مدل برازشی برای دو پاسخ قبل برخوردار است. مدل پیشنهادی توسط نرم‌افزار برای خاکستر کنسانتره نیز مطابق رابطه (۳-۴) می‌باشد.

$$\text{Ash In Concentrate} = +17.35 + 0.79A - 0.53B + 0.33C + 0.50 D - 2.96 E \quad (۳-۴)$$

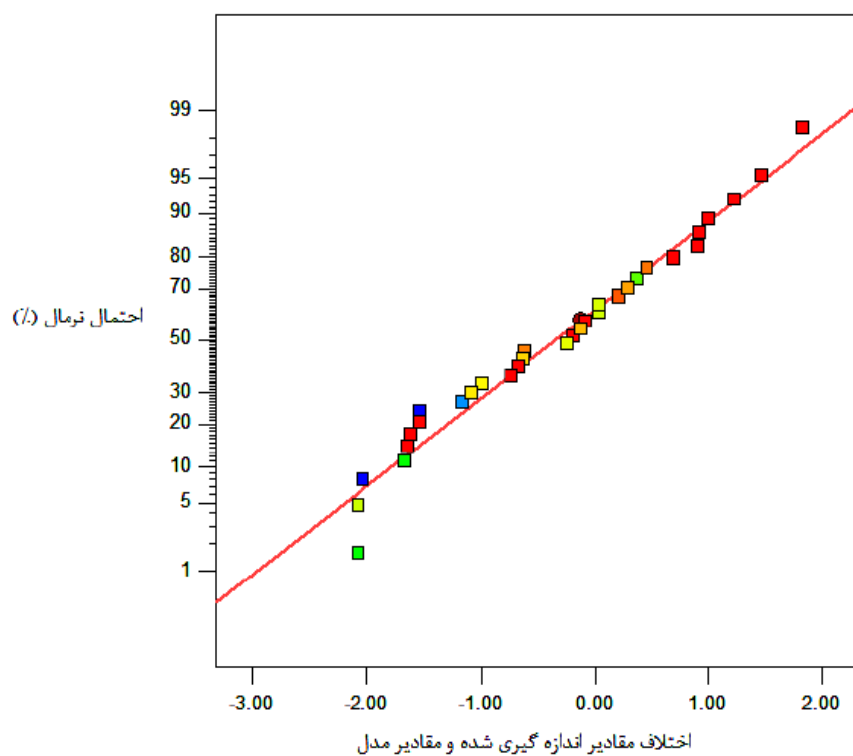
۴-۱-۳- توزیع نرمال باقی مانده‌ها

باقی مانده‌ها در واقع تفاوت مقادیر به دست آمده به وسیله مدل و مقادیر اندازه گیری شده در آزمایش‌ها هستند.

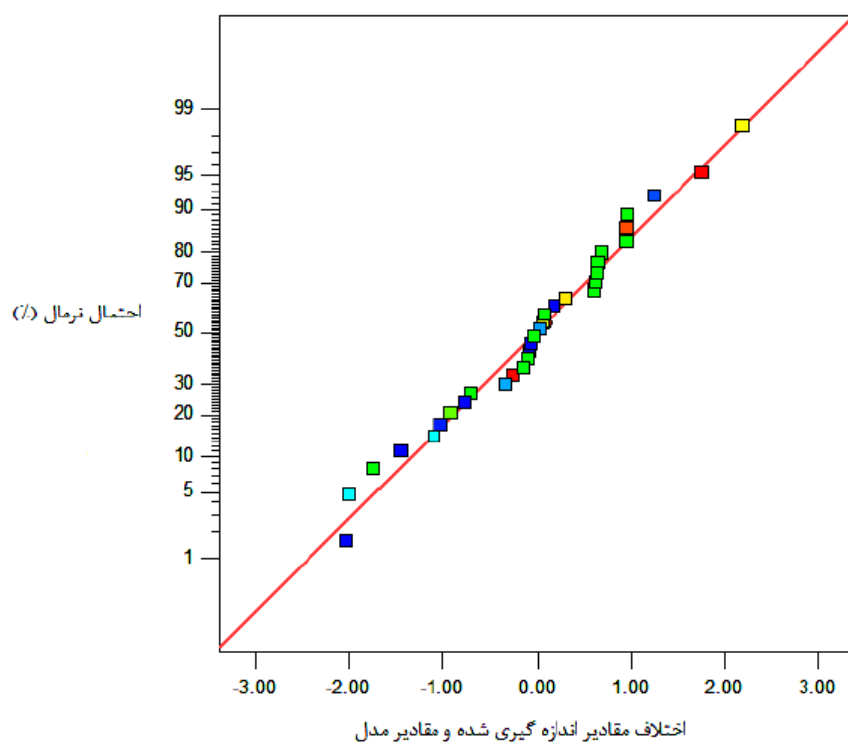
اشکال (۱-۴)، (۲-۴) و (۳-۴) به ترتیب نمودارهای احتمال نرمال باقی مانده‌ها برای بازیابی، کارآیی جدایش و خاکستر کنسانتره را نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود باقی مانده‌های هر سه پاسخ، در امتداد یک خط قرار گرفته اند و انحراف قابل توجهی از خط نرمال ندارند. در نتیجه مدل‌های انتخابی پاسخ‌های مورد نظر را در محدوده انتخابی فاکتورها به خوبی پیش بینی می‌کند و با استفاده از مدل‌های برازش شده، می‌توان مقادیر بهینه را محاسبه کرد.



شکل (۱-۴): نمودار توزیع نرمال باقی مانده برای بازیابی



شکل (۴-۲): نمودار توزیع نرمال باقی‌مانده برای کارآیی جدایش

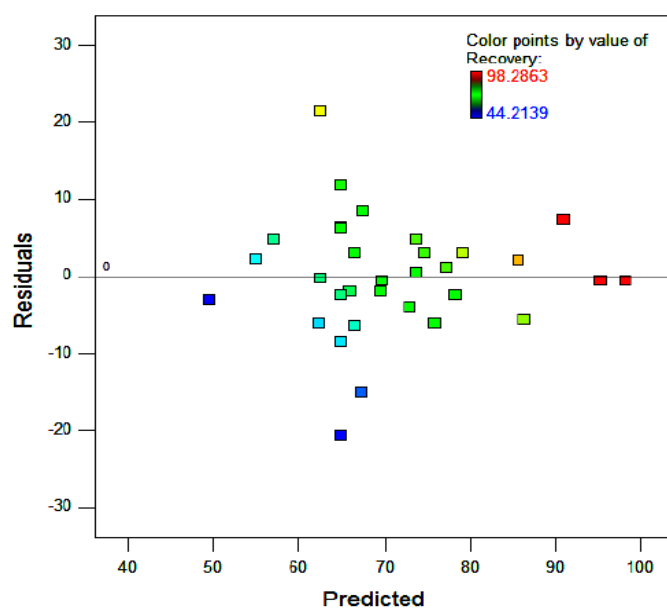


شکل (۴-۳): نمودار توزیع نرمال باقی‌مانده درخصوص خاکستر راه یافته به کنسانتره

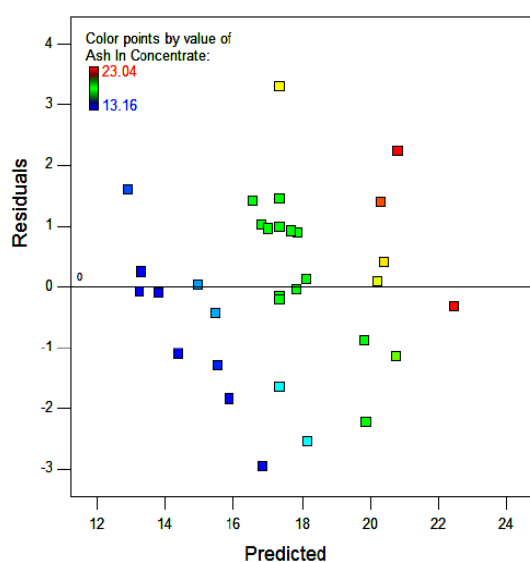
۴-۱-۴- آنالیز خطای پاسخ ها

راهکار دیگر جهت اعتبارسنجی مدل پیش‌بینی شده برای پاسخ موردنظر، استفاده از آنالیز خطاست. هنگامی که مانده‌ها نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ از نظم خاصی پیروی نکنند و به صورت کاملاً تصادفی توزیع شده باشند، این امر نشان‌دهنده صحت مدل در خصوص پیش‌بینی پاسخ می‌باشد. لازم به ذکر است که در بررسی نموداری میزان خطای مدل چهار روش برای اعتبارسنجی وجود دارد: «نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده»، «نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل توالی آزمایش‌ها»، «نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر واقعی» و «نمودار باقی‌مانده‌ها در مقابل فاکتورها» که در این جا فقط نوع اول بررسی می‌شود.

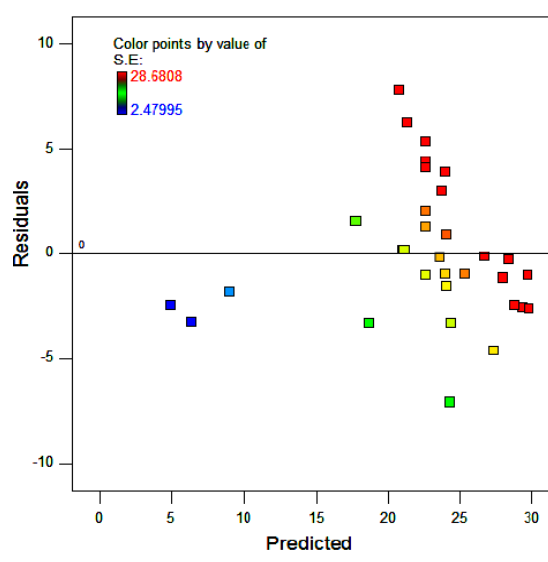
شکل (۴-۴-الف) تا (۴-۴-ج) نمودارهای باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده را به ترتیب برای پاسخ‌های بازیابی، کارآیی جدایش و خاکستر کنسانتره نشان می‌دهند. در این نمودارها چنانچه مانده‌ها نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ، از الگو یا نظم خاصی پیروی نکرده و به صورت اتفاقی پراکنده شده باشند، نشان‌دهنده صحت مدل در پیش‌بینی پاسخ می‌باشد که این موضوع مطابق نمودارهای ذیل برای هر سه پاسخ برقرار است.



(الف)



(ج)



(ب)

شکل (۴-۴): نمودارهای باقی مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده: (الف) برای پاسخ بازیابی (ب): مختص کارایی

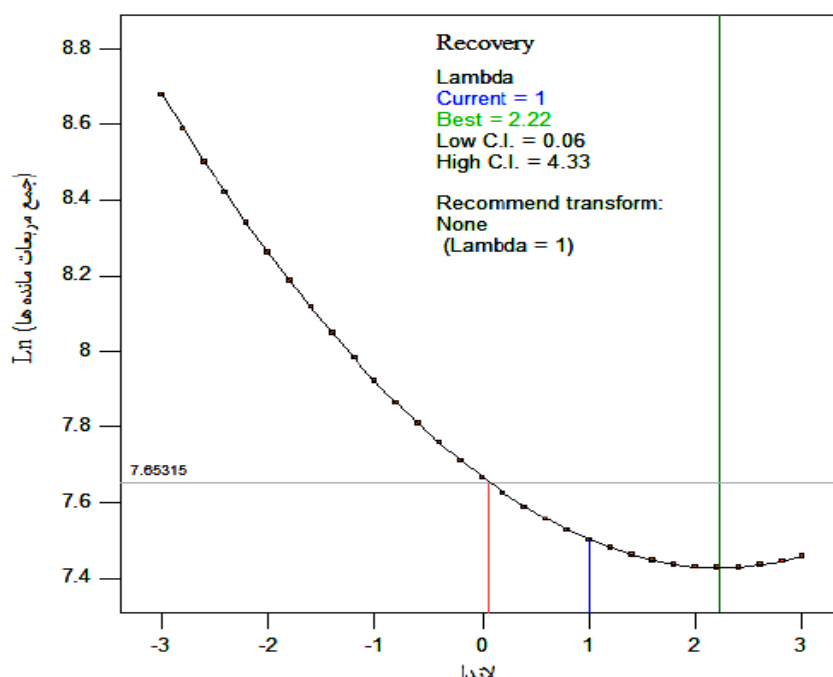
جدایش و (ج): مختص خاکستر کنسانتره

۴-۱-۵- نمودار Box-Cox

استفاده از نمودارهای Box-Cox روشی است جهت نرمال‌سازی یک سری از داده‌ها تا این‌که آزمایش‌های آماری بتوانند جهت اعتبارسنجی این داده‌ها به کار روند. به عبارتی این نمودار ابزاری برای کمک به تشخیص مناسب‌ترین تابع انتقال توانی به منظور اعمال بر پاسخ می‌باشد. پایین‌ترین نقطه در

نمودار Box-Cox، بهترین مقدار توان (لاندا)^۱ را که در آن حداقل مجموع مربعات باقی مانده‌ها در مدل تبدیل شده ایجاد می‌شود را نشان می‌دهد. همچنین در این نمودار محدوده اطمینان ۹۵٪ نیز نمایش داده می‌شود.

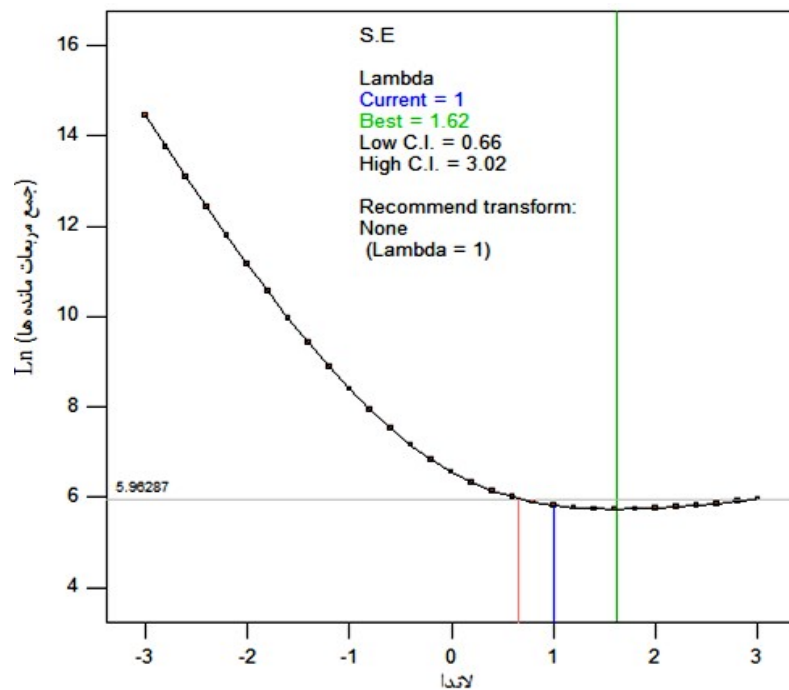
مثلاً در شکل (۴-۵) که برای بازیابی آورده شده است، مقدار لاندا (تابع انتقال توانی داده‌ها) برابر ۱ است که در محدوده مجاز (بین ۰/۰۶ و ۴/۳۳) قرار دارد و بهترین مقدار برای آن ۲/۲۲ پیش‌بینی شده است، درحالی‌که هیچ‌نوع انتقال توانی (Recommend transform) برای پاسخ مورد نظر پیش‌بینی نشده است. با این تفاسیر صحت و عدم خطای مدل برازش شده برای بازیابی نیز تأیید می‌شود.



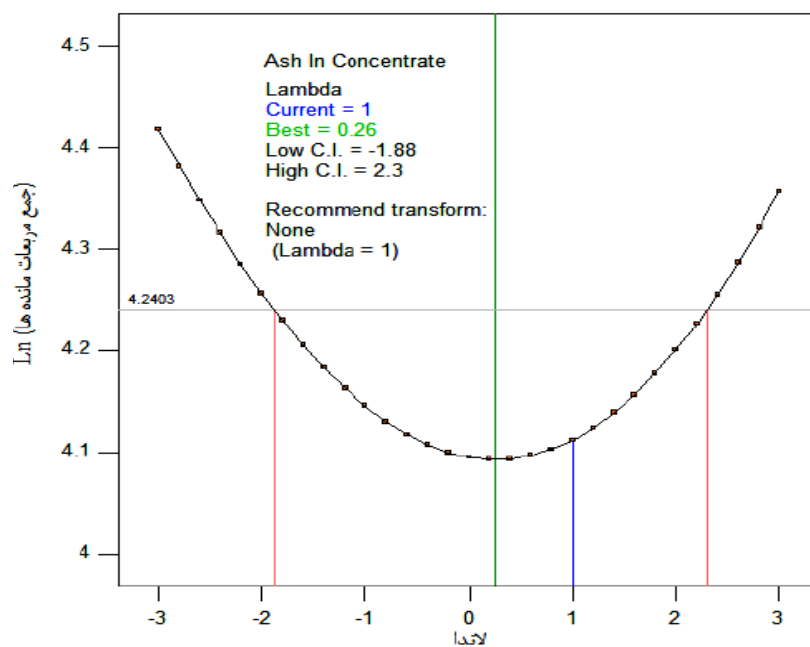
شکل (۴-۵): نمودار Box-Cox برای پاسخ بازیابی

اشکال (۴-۶) و (۴-۷) به ترتیب نمودارهای Box-Cox مربوط به کارآیی جدایش و خاکستر محتوی کنسانتره را نشان می‌دهند.

¹ Lambda



شکل (۴-۶): نمودار Box-Cox برای پاسخ کارآیی جدایش



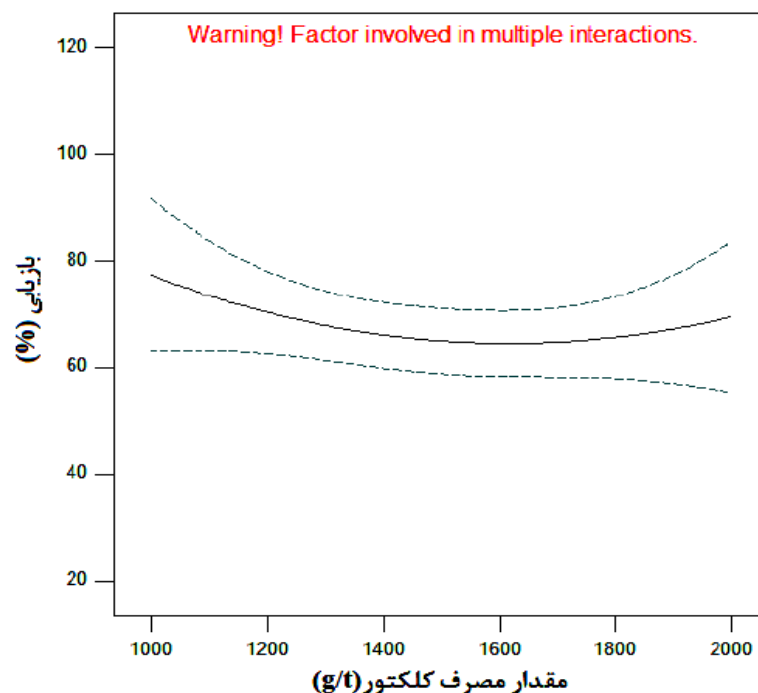
شکل (۴-۷): نمودار Box-Cox برای پاسخ خاکستر محتوی کنسانتره

توضیحات اشکال (۴-۶) و (۴-۷) مطابق (۴-۵) بوده و براساس این نمودارها هیچ انتقال توان (Transform) جهت برازش مدل برای پاسخ ها پیش‌بینی نشده است و صحت مدل پاسخ‌های کارآیی جدایش و خاکستر محتوی کنسانتره نیز با کمک این نمودارها تأیید می‌شود.

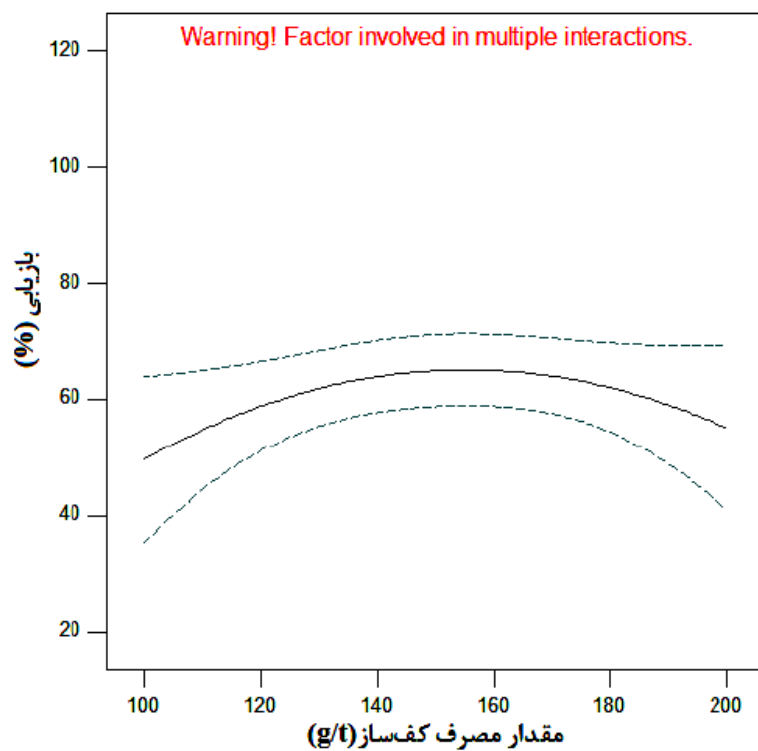
۴-۱-۶- مطالعه و تفسیر داده‌های مربوط به پاسخ اول (بازیابی)

۴-۱-۶-۱- تأثیر فاکتورهای اصلی

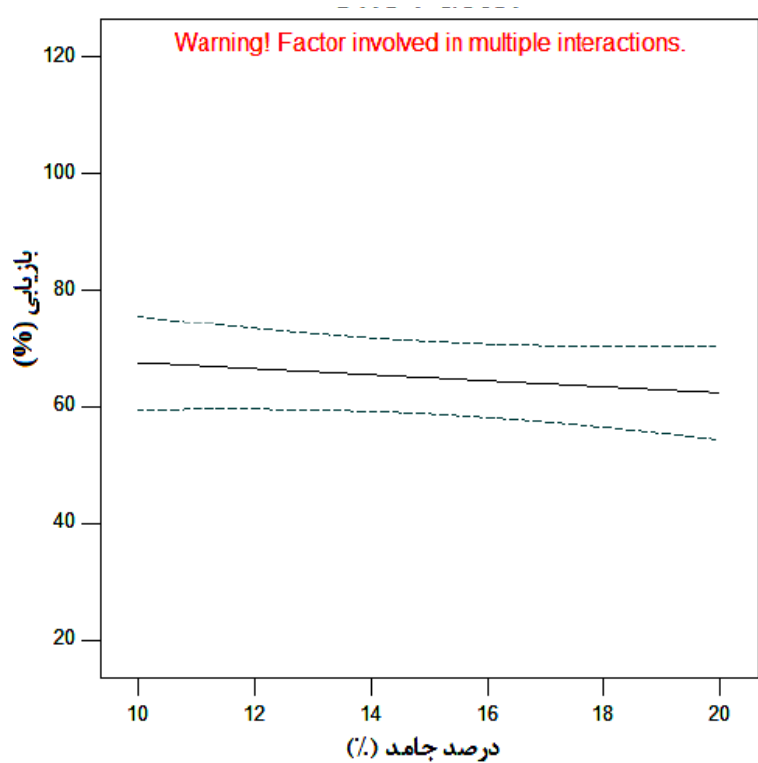
شکل‌های (۴-۸) تا (۴-۱۲) تأثیر فاکتورهای اصلی بر میزان بازیابی زغال‌سنگ به کنسانتره را نشان می‌دهند. در شکل (۴-۸) تأثیر فاکتور اصلی مقدار کلکتور بر میزان بازیابی با ثابت ماندن سایر فاکتورها (چهار فاکتور انتخابی) بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حوالی مقادیر کمتر (1000 g/t) مقدار بازیابی ماکزیمم بوده و با افزایش مقدار کلکتور درصد بازیابی زغال‌سنگ روند کاهشی داشته است تا این‌که مجدداً در حد بالا (2000 g/t) نیز بازیابی افزایش داشته است اما این افزایش کمتر از حد پایین بوده است.



شکل (۴-۸): تأثیر مقدار کلکتور (فاکتور A) بر میزان بازیابی

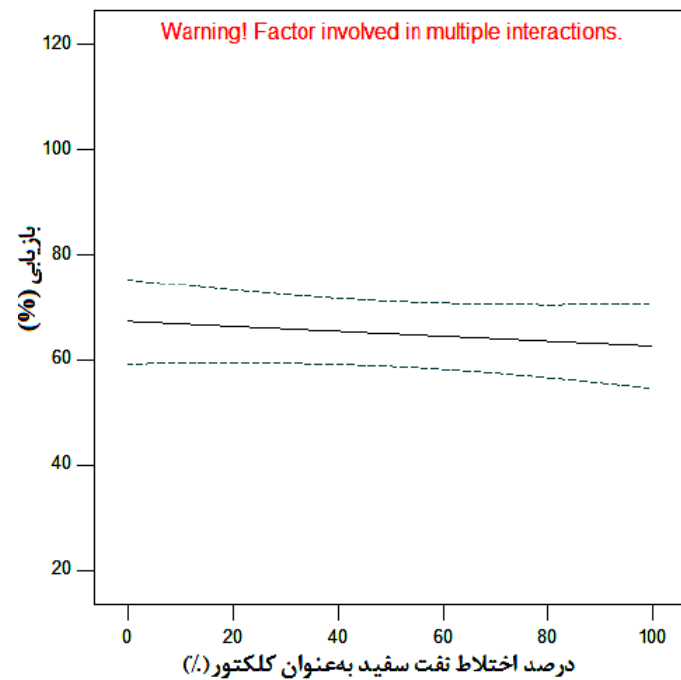


شکل (۴-۹): تأثیر مقدار کفساز روغن کاج (فاکتور B) بر میزان بازیابی

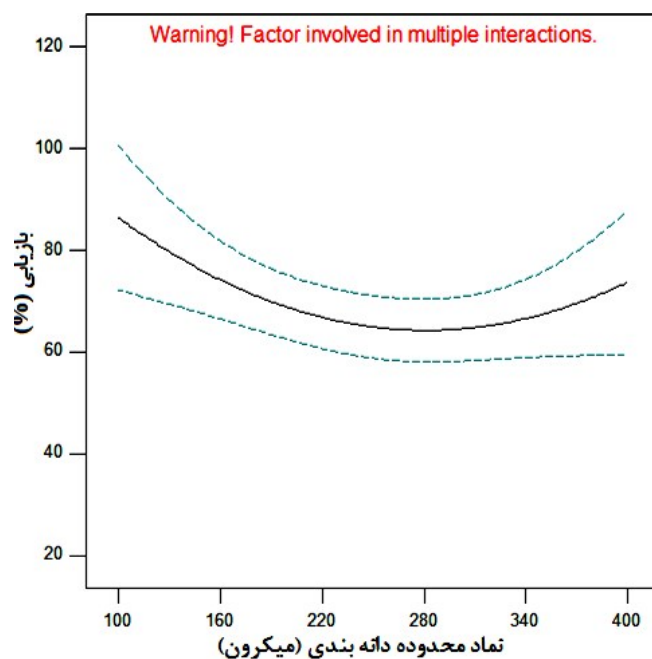


شکل (۴-۱۰): تأثیر درصد جامد پالپ (فاکتور C) بر میزان بازیابی

همان‌طور که در شکل (۴-۱۰) دیده می‌شود، بازیابی به تغییرات درصد جامد زیاد وابسته نبوده و روندی تقریباً خطی دارد که درمورد بازیابی این امر برای فاکتور D (درصد اختلاط نفت سفید به‌عنوان کلکتور) نیز صادق است.



شکل (۴-۱۱): تأثیر درصد اختلاط نفت سفید به‌عنوان کلکتور با گازوییل (فاکتور D) بر میزان بازیابی

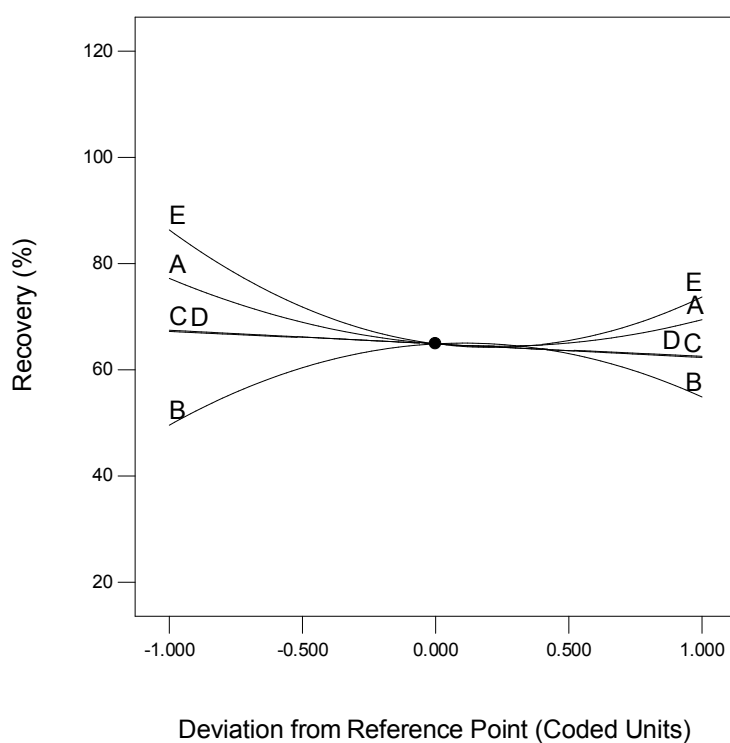


شکل (۴-۱۲): تأثیر نماد دانه‌بندی زغال‌سنگ (فاکتور E) بر میزان بازیابی

۴-۱-۶-۲- نمودار حساسیت

شکل (۴-۱۳) نمودار حساسیت پاسخ (در اینجا بازیابی) را نسبت به تمام فاکتورها از یک نقطه مبنا نشان می‌دهد. این نمودار کمک می‌کند تا تأثیرات فاکتورهای مختلف در یک نقطه خاص با هم مقایسه شوند. شیب تند یا خمیدگی در یک عامل حساسیت پاسخ به آن فاکتور را نشان می‌دهد.

مثلا در شکل زیر می‌توان گفت که بازیابی به ترتیب به تغییرات محدوده دانه‌بندی و مقدار کلکتور نسبت به سایر فاکتورها حساس‌تر است.

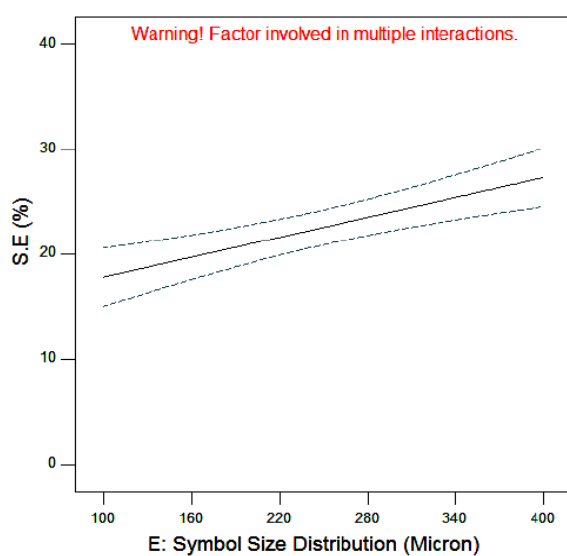
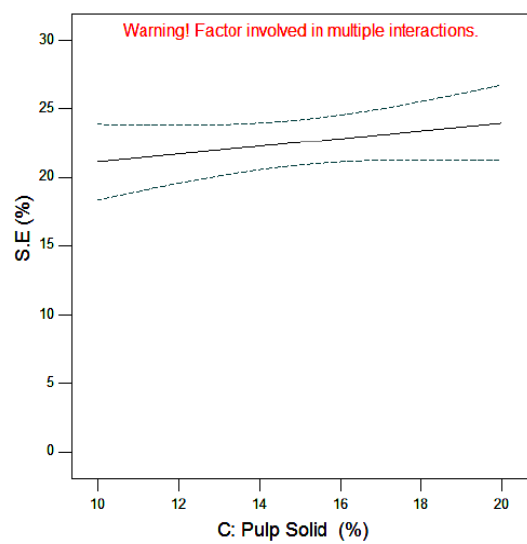
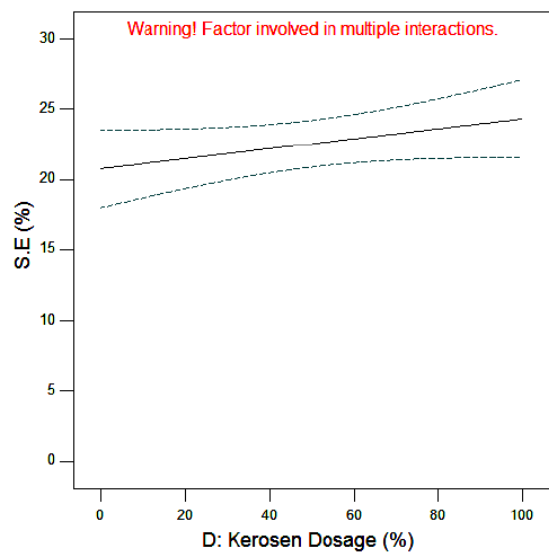
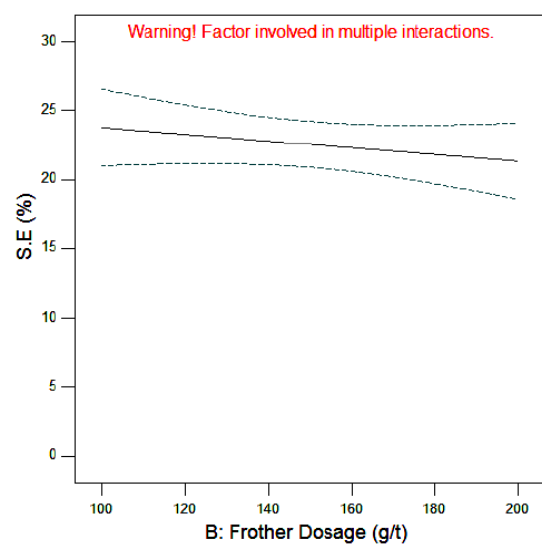
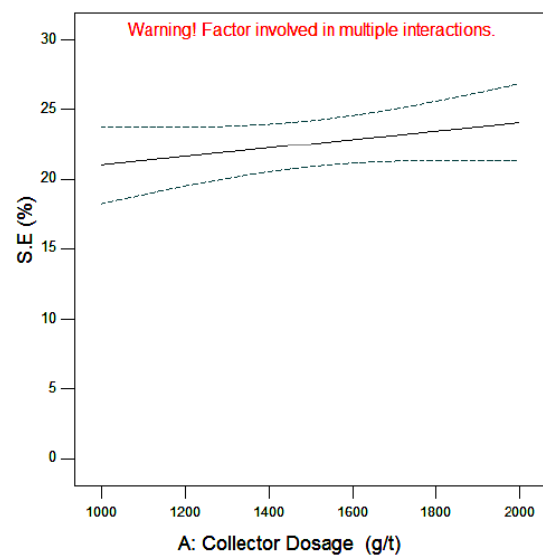


شکل (۴-۱۳): نمودار حساسیت بازیابی به فاکتورهای آزمایش

۴-۱-۷- مطالعه و تفسیر داده‌های مربوط به پاسخ دوم (کارآیی جدایش)

۴-۱-۷-۱- تأثیر فاکتورهای اصلی

شکل (۴-۱۴) تأثیر کلیه فاکتورها را بر پاسخ دوم (کارآیی جدایش) نشان می‌دهد.

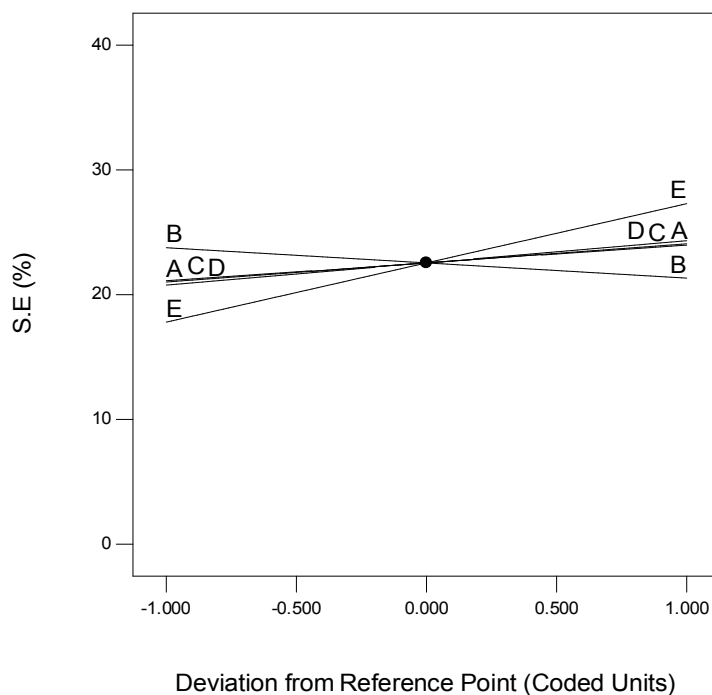


شکل (۴-۱۴): نمودارهای تأثیر جداگانه فاکتورهای اصلی بر کارایی جدایش

مطابق شکل قبلی با افزایش مقادیر تمام فاکتورها به غیر از فاکتور B (مقدار کف‌ساز روغن کاج)، میزان کارایی جدایش نیز افزایش می‌یابد که از اهداف این تحقیق است. اما دلیل پایین آمدن کارایی جدایش با افزایش مقدار کف‌ساز را این‌گونه می‌توان توجیه کرد که با افزایش مقدار آن، انتخابی عمل کردن حباب‌ها کاهش و در نتیجه ذرات باطله و قفل شده را با خود به کف حمل می‌کنند که در نتیجه بازیابی گانگ به کنسانتره افزایش و بالطبع کارایی جدایش کاهش می‌یابد.

۴-۱-۷-۲- نمودار حساسیت

شکل (۴-۱۵) نمودار حساسیت پاسخ (در اینجا کارایی جدایش) را نسبت به تمام فاکتورها در یک نقطه مبنا نشان می‌دهد. مطابق توضیحات بخش (۴-۱-۶-۲) در اینجا نیز کارایی جدایش به فاکتورهای B (مقدار کف‌ساز) و E (محدوده دانه‌بندی) حساسیت بیشتری دارد.

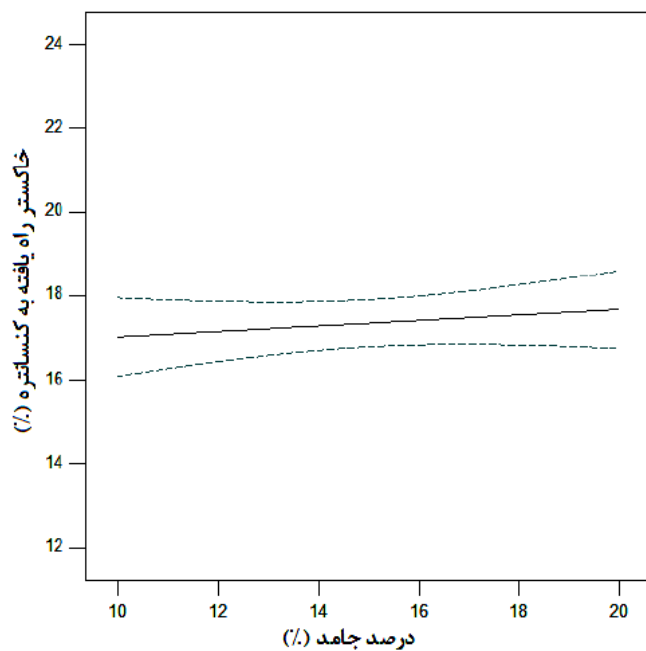
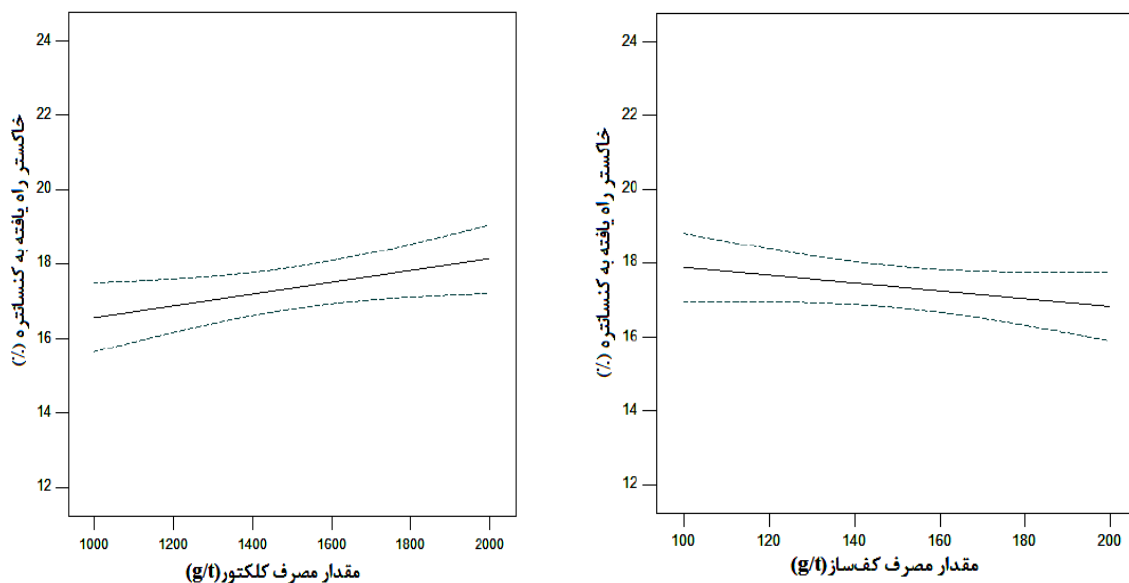


شکل (۴-۱۵): نمودار حساسیت برای پاسخ کارایی جدایش

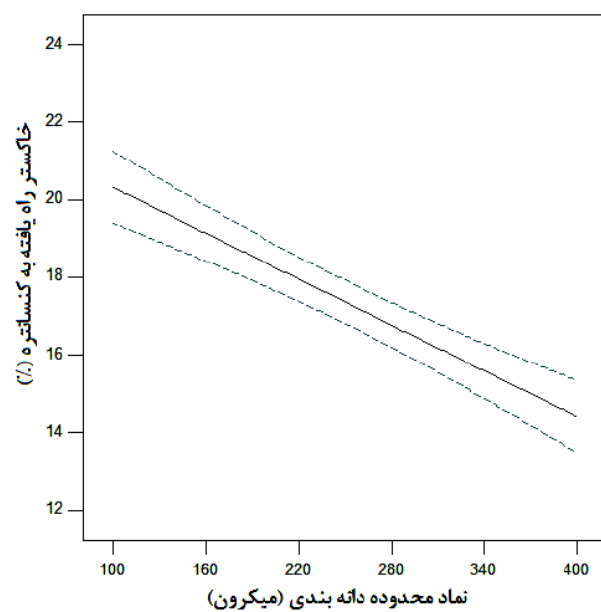
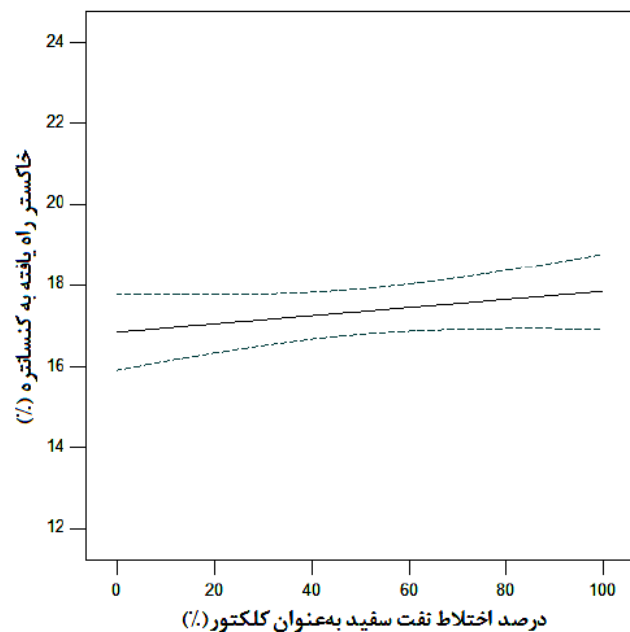
۴-۱-۸- مطالعه و تفسیر داده‌های مربوط به پاسخ سوم (خاکستر محتوی کنسانتره)

۴-۱-۸-۱- تأثیر فاکتورهای اصلی

اشکال (۴-۱۶) و (۴-۱۷) تأثیر کلیه فاکتورها را بر پاسخ سوم (خاکستر محتوی کنسانتره) نشان می‌دهند.



شکل (۴-۱۶): تأثیر جداگانه هر کدام از فاکتورهای A، B و C بر خاکستر محتوی کنسانتره

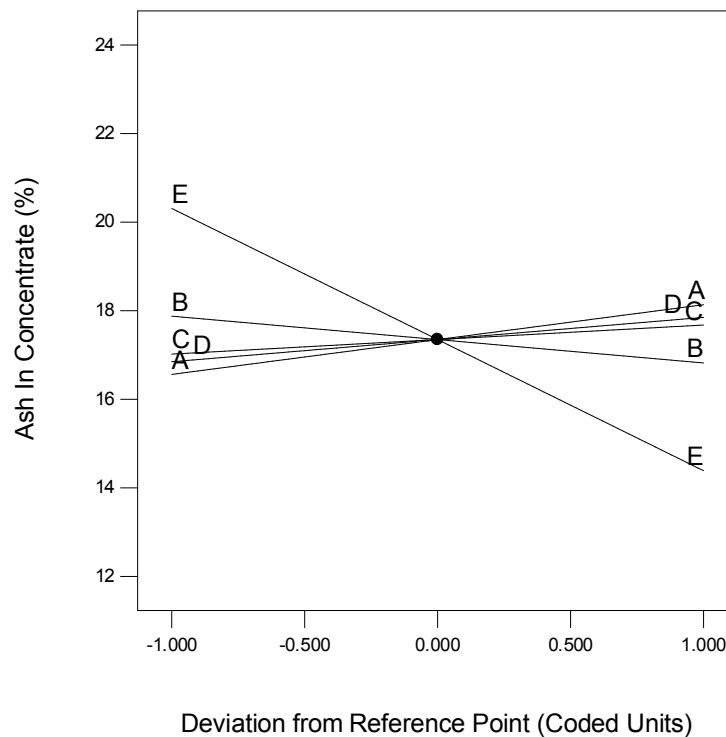


شکل (۴-۱۷): اثر جداگانه فاکتورهای D و E بر خاکستر محتوی کنسانتره

با توجه به شکل‌های این قسمت مشخص است که با افزایش «مقدار کلکتور» و «درصد اختلاط نفت سفید به عنوان کلکتور» خاکستر راه یافته به کنسانتره افزایش و روند صعودی «مقدار کفساز» و بالاخص «محدوده دانه‌بندی» مقدار آن را کاهش می‌دهند.

۴-۱-۸-۲- نمودار حساسیت

همان گونه که از شکل (۴-۱۸) برگرفته می شود، مقدار خاکستر راه یافته به کنسانتره به طور بارزی به فاکتور E (محدوده دانه بندی زغال سنگ) وابسته است.

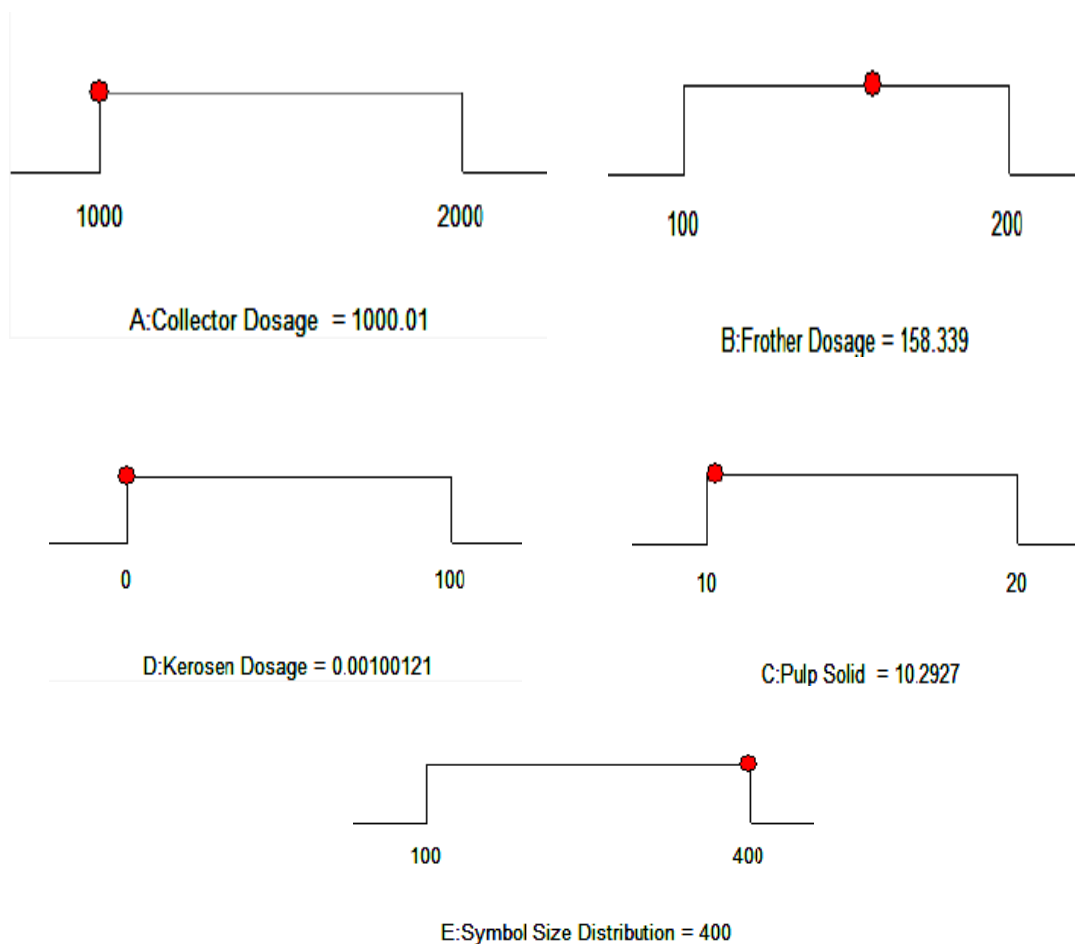


شکل (۴-۱۸): نمودار حساسیت فاکتورها حول نقطه مبنا برای پاسخ سوم (خاکستر محتوی کنسانتره)

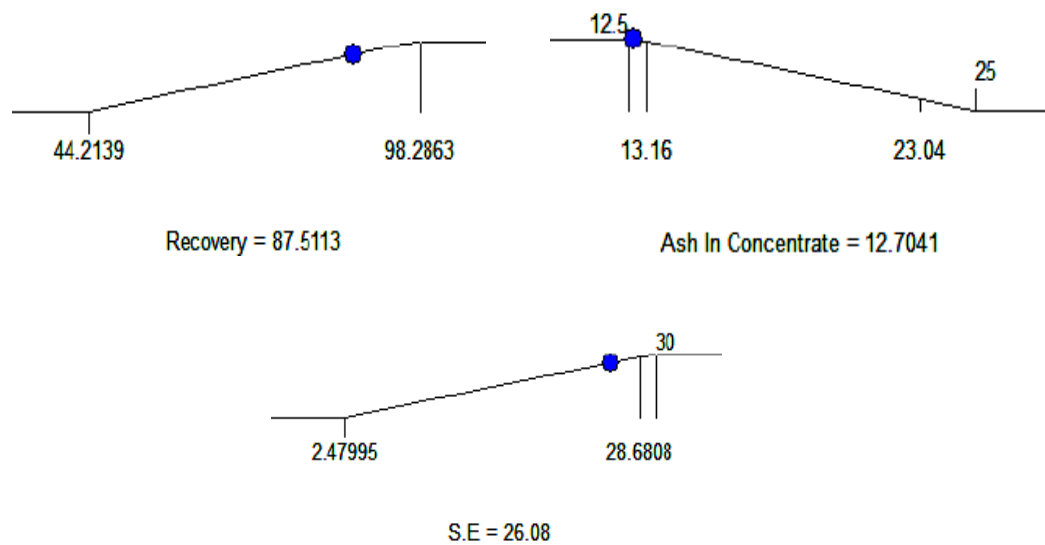
۴-۲- بهینه سازی

آخرین گام در آزمایش ها پیش بینی شرایطی است که تحت آن شرایط، مقدار بهینه پاسخ ها حاصل می شود. پس از انتخاب مدل مناسب برای طرح آزمایشی و اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب باقی مانده ها، نتایج حاصل از آزمایش های مربوط به شرایط بهینه اختلاط بررسی می شوند. در انتخاب حالت بهینه، فاکتورها می توانند سطح پایین یا بالای خود را داشته باشند، در واقع نرم افزار با توجه به مدل برازش شده برای داده ها اقتصادی ترین حالت از فاکتورها را انتخاب می کند.

در تحقیق حاضر که از روش مطالعه RSM و روش طراحی CCD جهت بهینه‌سازی پاسخ‌های مورد نظر (بازیابی، کارایی جدایش و خاکستر محتوی کنسانتره) استفاده شد، برای رسیدن به حداکثر بازیابی و کارایی جدایش و نیز کمینه کردن خاکستر کنسانتره، فاکتورهای «مقدار کلکتور (A)، مقدار کف‌ساز روغن کاج (B)، درصد جامد (C)، میزان اختلاط نفت سفید (D) و نماد محدوده دانه‌بندی (E)» به ترتیب در مقادیر « 1000 (g/t) ، $158/34 \text{ (g/t)}$ ، $10/3 \text{ (\%)}$ ، $0 \text{ (\%)}$ و f_3 (بزرگترین سایز دانه‌بندی)» پیش‌بینی شدند. شکل (۴-۱۹) به‌طور شماتیکی محدوده بهینه فاکتورها جهت دستیابی به حداکثر بازیابی ($87/5 \text{ (\%)}$)، حداکثر کارایی جدایش ($26/08 \text{ (\%)}$) و حداقل مقدار خاکستر راه یافته به کنسانتره ($12/7 \text{ (\%)}$) را با مطلوبیت کلی 89% نشان می‌دهد (شکل ۴-۲۰).



شکل (۴-۱۹): سطوح مقدار بهینه برای فاکتورها



شکل (۴-۲۰): مقدار خاکستر راه یافته به کنسانتره، بازیابی و کارایی جدایش پیش‌بینی شده به ازای انتخاب مقدار بهینه فاکتورها

جدول (۴-۴) نیز مقدار بهینه پیش‌بینی شده پنج فاکتور انتخاب شده را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.

جدول (۴-۴): مقدار بهینه پیشنهاد شده برای فاکتورها

نام فاکتور	سطح پایین	سطح بالا	مقدار پیش‌بینی شده
مقدار کلکتور (گرم بر تن)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰/۰۱
مقدار کف‌ساز (گرم بر تن)	۱۰۰	۲۰۰	۱۵۸/۳۴
درصد جامد پالپ (%)	۱۰	۲۰	۱۰/۲۹
درصد اختلاط نفت سفید (%)	۰	۱۰۰	۰
نماد توزیع دانه‌بندی (میکرون)	۱۰۰	۴۰۰	۴۰۰

جدول (۴-۵) نیز مقادیر پاسخ‌های اکتسابی در مقابل انتخاب حالت بهینه فاکتورها را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۵): پیش‌بینی نتایج حاصل از انجام آزمایش بهینه

پاسخ	مقدار متوسط پیش‌بینی شده	انحراف استاندارد مقدار متوسط ^۱ متوسط ^۱	انحراف استاندارد
بازیابی (%)	۸۷/۵۱	۹/۲۵	۱۰/۳۱
کارآیی جدایش (%)	۲۶/۰۸	۳/۲۹	۴/۴۵
خاکستر در کنسانتره (%)	۱۲/۷۰	۰/۷۷	۱/۵۳

۴-۳- انجام آزمایش اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی نتایج، آزمایش اطمینان بر مبنای شرایط بهینه فاکتورها دو بار انجام شد که مقادیر به دست آمده توسط این آزمایش‌ها با مقادیر پیش‌بینی شده نرم افزار در مورد خاکستر محتوی کنسانتره، بازیابی و کارآیی جدایش به ترتیب به میزان 0.5% ، 1% و $1/2\%$ خطا داشت که می‌توان با دقت خوبی صحت شرایط بهینه پیشنهادی توسط نرم‌افزار را برای این نوع زغال سنگ تأیید کرد.

۴-۴- استفاده از ترکیب جدید به عنوان کلکتور در فلو تاسیون مکانیکی زغال سنگ

با بررسی تحقیق‌های اخیر انجام شده در خصوص زغال سنگ، بر آن شدیم تا از نتایج تکنولوژی CWM^۲ و ترکیب آب و زغال سنگ به عنوان جایگزین نفت به نحوی استفاده شود. البته این تکنولوژی در مقیاس صنعتی در کشور اندوزی و ژاپن در قالب فرآیند CWM راه اندازی شده و محصول خروجی آن مازوت می‌باشد.

از آنجایی که در این تحقیق هدف استفاده از نفت سفید به عنوان کلکتور بوده و هدف تولید مازوت و استفاده از آن نبوده است (به لحاظ این که درصد گوگرد و برخی عناصر مزاحم در مازوت زیاد است)، با

^۱ SE Mean

^۲ Coal Water Mixture

توجه به شرایط عملیاتی CWM و از روش سعی و خطا ترکیبی از نرمه زغال سنگ البرز شرقی (زیر ۷۵ میکرون) و آب به علاوه ترکیبی از رزین های خاص با درصد مشخص مخلوط شده و ترکیبی به دست آمد که با انجام دو آزمایش آزمایشگاهی و حصول اطمینان از عملکرد مطلوب این ترکیب به عنوان کلکتور، جهت بهینه سازی فاکتورهای آن از جمله «درصد جامد و محدوده دانه بندی»، تعداد ده آزمایش با همان روش «سطح پاسخ و ترکیب مرکزی» توسط نرم افزار DX10 انجام شد. شرایط انجام آزمایش مطابق بخش (۳-۴-۱) می باشد، با این تفاوت که زمان کف گیری ۲/۵ دقیقه، مقدار مصرف این نوع کلکتور جدید ۵ Kg/t و مقدار روغن کاج مصرفی (کف ساز) ۳۵۰ g/t بوده است. نتایج آزمایش ها در جدول (۴-۶) آورده شده است. فاکتورهای A و B به ترتیب بیان گر درصد جامد پالپ (٪) و نماد محدوده دانه بندی (میکرون) می باشند.

جدول (۴-۶): مشخصات ده آزمایش و سطوح فاکتورهای آن به همراه مقادیر پاسخ های محاسبه شده

شماره آزمایش	A (٪)	B (میکرون)	خاکستر کنسانتره (٪)(Ash in C)	کارایی جدایش (S.E) (٪)
۱	۱۰	۱۰۰	۱۷/۱۷	۲۸/۵۶
۲	۱۰	۲۵۰	۱۳/۶۵	۲۶/۵۴
۳	۱۰	۴۰۰	۷/۹۷	۲۸/۳۱
۴	۱۵	۲۵۰	۱۰/۸۸	۲۲/۹۲
۵	۱۵	۱۰۰	۱۳/۲۸	۱۶/۵۳
۶	۱۵	۲۵۰	۱۳/۴۶	۲۵/۸۶
۷	۱۵	۴۰۰	۱۰/۴۱	۲۸/۰۶
۸	۲۰	۴۰۰	۱۱/۱۰	۲۸/۴۱
۹	۲۰	۱۰۰	۱۷/۶۵	۲۵/۰۳
۱۰	۲۰	۲۵۰	۱۶/۳۴	۲۷/۰۵

۴-۴-۱- آنالیز واریانس

صحت مدل برازش شده برای دو پاسخ مورد نظر از تحلیل جدول آنالیز واریانس (ANOVA) سنجیده شد و نتایج مطابق جداول (۴-۷) و (۴-۸) آورده شده است. با توجه به این جدول ها مشخص است که

مدل برازش شده به دلیل معنادار بودن P-value و بی معنا بودن Lake of Fit، با اطمینان ۹۵٪ از صحت کافی برخوردار است.

جدول (۷-۴): نتایج آنالیز واریانس برای پاسخ اول (خاکستر کنسانتره)

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F Value	p-value Prob > F	
<i>Model</i>	۶۴/۴۰	۲	۳۲/۲۰	۸/۵۹	۰/۰۱۳۰	معنا دار
<i>A-Pulp Solid</i>	۶/۶۱	۱	۶/۶۱	۱/۷۷	۰/۲۲۵۶	
<i>B-Size Distribution</i>	۵۷/۷۸	۱	۵۷/۷۸	۱۵/۴۲	۰/۰۰۵۷	
<i>Residual</i>	۲۶/۲۳	۷	۳/۷۵			
<i>Lack of Fit</i>	۲۲/۹۰	۶	۳/۸۲	۱/۱۵	۰/۶۱۳۶	بی معنا
<i>Pure Error</i>	۳/۳۳	۱	۳/۳۳			

جدول (۸-۴): نتایج آنالیز واریانس برای پاسخ دوم (کارآیی جدایش)

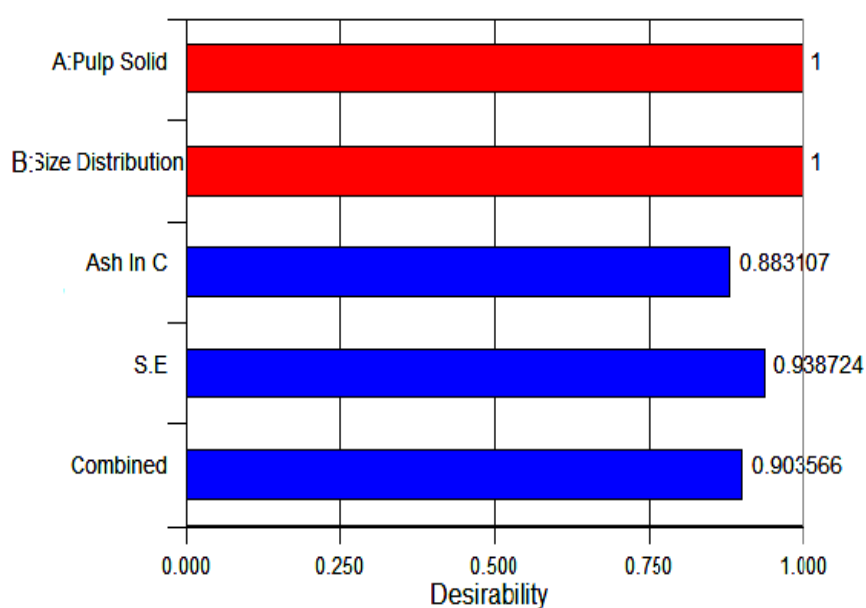
منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F Value	p-value Prob > F	
<i>Model</i>	۱۱۱/۵۴	۵	۲۲/۳۱	۷/۹۸	۰/۰۳۳۰	معنا دار
<i>A-Pulp Solid</i>	۱/۴۲	۱	۱/۴۲	۰/۵۱	۰/۵۱۵۲	
<i>B-Size Distribution</i>	۶۶/۴۷	۱	۶۶/۴۷	۲۳/۷۹	۰/۰۰۸۲	
<i>AB</i>	۳/۲۹	۱	۳/۲۹	۱/۱۸	۰/۳۳۸۶	
<i>A²</i>	۳۷/۹۱	۱	۳۷/۹۱	۱۳/۵۷	۰/۰۲۱۱	
<i>A²B</i>	۳۳/۱۰	۱	۳۳/۱۰	۱۱/۸۵	۰/۰۲۶۳	
<i>Residual</i>	۱۱/۱۸	۴	۲/۷۹			
<i>Lack of Fit</i>	۶/۸۶	۳	۲/۲۹	۰/۵۳	۰/۷۳۷۲	بی معنا
<i>Pure Error</i>	۴/۳۲	۱	۴/۳۲			

۴-۴-۲- نتیجه آزمایش و مقدار بهینه فاکتورها

با انتخاب گزینه بهینه‌سازی، مقدار بهینه فاکتورها مطابق جدول (۹-۴) به دست آمد.

جدول (۴-۹): مقدار بهینه پیشنهاد شده برای فاکتورها

نام فاکتور	سطح پایین	سطح بالا	مقدار پیش‌بینی شده
درصد جامد پالپ (٪)	۱۰	۲۰	۱۰/۳۰
نماد توزیع دانه‌بندی (میکرون)	۱۰۰	۴۰۰	۴۰۰



شکل (۴-۲۱): نمودار مطلوبیت کلی و مطلوبیت جداگانه پاسخ‌ها برای ده تست

نهایتاً در صورت انتخاب مقدار بهینه فاکتورها، مطابق شکل (۴-۲۱) با مطلوبیت کلی ۹۰٪ مقادیر خاکستر محتوی کنسانتره و کارآیی جدایش به ترتیب برابر ۹/۱٪ و ۲۷/۸۲٪ حاصل شد (جدول ۴-۱۰).

جدول (۴-۱۰): پیش‌بینی نتایج حاصل از انتخاب مقدار بهینه فاکتورها برای ده آزمایش

پاسخ	مقدار متوسط پیش‌بینی شده	انحراف استاندارد مقدار متوسط	انحراف استاندارد
کارآیی جدایش (%)	۲۷/۸۲	۱/۴	۱/۶۷
خاکستر در کنسانتره (%)	۹/۱	۱/۲۴	۱/۹۳

۴-۴-۳- آزمایش اعتبارسنجی

در نهایت با انجام دو آزمایش اعتبارسنجی و با در نظر گرفتن همان مقدار بهینه پیشنهادی برای دو فاکتور مزبور، مقدار «کارآیی جدایش و خاکستر محتوی کنسانتره» به ترتیب ۲۷/۱۲٪ و ۹/۴۲٪ به دست آمدند که با تقریب خوبی می‌توان صحت آزمایش را تأیید کرد.

فصل پنجم:

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

براساس مطالعات و آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه زغال‌سنگ خوراک فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی البرزشرقی و درجهت رسیدن به حداکثر بازیابی و کارایی جدایش و نیز داشتن کنسانتره‌ای با حداقل خاکستر، می‌توان نتایج کلی زیر را بیان کرد:

۱- با انجام ده آزمایش سینتیکی در حالت کاربرد منفرد نفت سفید و گازوییل، با شبیه‌سازی فاکتورهای شیمیایی، عملیاتی و تجهیزاتی مشابه کارخانه و ثابت گرفتن آنها، زمان‌های بهینه کف‌گیری برای نفت سفید در ۲/۵ دقیقه و گازوییل ۳ دقیقه به‌دست آمد. ضمناً در آزمایش‌های مربوطه نیز درحالت اختلاط ۵۰ درصدی نفت سفید، زمان کف‌گیری ۱۶۵ ثانیه به‌کار گرفته شد.

۲- مناسب‌ترین مقدار کلکتور برای نیل به اهداف سه‌گانه (بازیابی حداکثر، کارایی جدایش حداکثر و کنسانتره با حداقل خاکستر) در 1000 g/t به‌دست آمد. با افزایش مقدار کلکتور تا حد بالای آن، بازیابی افزایش، مقدار خاکسترراه‌یافته به کنسانتره افزایش و کارایی جدایش کاهش جزئی نشان می‌دهد.

۳- مقدار بهینه مصرف کفساز روغن‌کاج در $158/34 \text{ g/t}$ حاصل شد که در مقادیر کمتر و یا بیشتر از این مقدار، بازیابی کاهش داشته است که این روند را چنین می‌توان توجیه کرد که در مقادیر کمتر کفساز، حباب کمتری تولید شده و درنتیجه کارایی برخورد ($E_{\text{Collision}}$) کاهش و بالطبع بازیابی کم می‌شود و درحالتی که مقدار کفساز زیاد باشد، احتمالاً ذرات حباب به همدیگر برخورد کرده و سطح مخصوص حباب‌ها برای نگهداری ذرات زغال‌سنگ کاهش و درنتیجه ی کاهش درجه اتصال ($E_{\text{Attachment}}$) بازیابی ذرات زغال‌سنگ (اعم از آزاد بارزش و قفل شده) به منطقه کف، کم می‌شود. نکته مهم این‌که مطابق نمودارهای مربوطه کلاً با افزایش مقدار کفساز، خاکستر کمتری به کنسانتره راه یافته است، یعنی مطابق شرح فوق ذراتی که واقعاً آبران شده‌اند، قدرت جذب بیشتری به

حباب‌های هوا داشته‌اند و در نتیجه کارایی جدایش نیز بهبود می‌یابد که این توجیه مطابق نمودارهای مربوط به کارایی جدایش است.

۴- مقدار بهینه درصد جامد برابر $10/29\%$ است که با افزایش آن تا حد بالای خود، S.E و خاکستر محتوی کنسانتره افزایش اما بازیابی کاهش داشته است. توجیه علت بدین صورت است که با افزایش مقدار ذرات جامد زغال‌سنگ در پالپ، همه ذرات فرصت کافی برای آبرانی و اتصال به حباب هوا را پیدا نمی‌کنند و آنهایی که در این فرصت توانسته‌اند خود را به منطقه کف برسانند، از قابلیت آبرانی خوبی برخوردار بوده‌اند، لذا با کاهش خاکستر در کنسانتره، کارایی جدایش بهبود و بازیابی تنزل می‌یابد.

۵- برای درصد اختلاط نفت سفید با گازوییل به عنوان کلکتور، نرم‌افزار کمترین مقدار (0%) را به عنوان حالت بهینه فنی پیش‌بینی کرده است. همان‌طور که در فصل اول نیز اشاره شد، انتظاری فراتر از این این نیز با توجه به ویژگی‌های ساختاری نفت سفید نمی‌رفت. افزایش اختلاط نفت سفید تأثیر جزئی بر روند بازیابی و کارایی جدایش داشته است، اما با بالا رفتن درصد آن، مقدار خاکستر راه یافته به کنسانتره بیشتر می‌شود، به‌طوری که با انتخاب مقدار بهینه چهار فاکتور دیگر و استفاده 100% از نفت سفید، دقیقاً 1% $(13/7\%)$ به خاکستر کنسانتره افزوده می‌شود که مطلوب نیست. اما با شرایط اختلاط 50% درصدی، $0/5\%$ به خاکستر محتوی کنسانتره افزوده می‌شود که با قیمت امروزی نفت سفید، نیاز به ارزیابی اقتصادی و فنی است.

۶- نرم‌افزار ابعاد دانه‌بندی بهینه برای ذرات زغال‌سنگ خوراک فلوتاسیون کارخانه را در محدوده بزرگترین اندازه $(1000-355\text{ میکرون})$ پیش‌بینی کرد، به‌طوری که با افزایش ابعاد (تا حد 1 میلی‌متر)، S.E روند صعودی و خاکستر کنسانتره روند نزولی پیدا می‌کنند که هر دو مطلوب ما می‌باشد.

۷- با پیش‌بینی حالت بهینه مقادیر پنج فاکتور انتخابی، مقدار بازیابی، کارایی جدایش و خاکستر کنسانتره به ترتیب $\% ۸۷/۵۱$ ، $\% ۲۶/۰۸$ و $\% ۱۲/۷$ به دست آمد.

۸- با انجام آزمایش اعتبارسنجی میزان بازیابی، کارایی جدایش و خاکستر کنسانتره به ترتیب در مقادیر $\% ۸۶/۶۳$ ، $\% ۲۶/۳۹$ و $\% ۱۲/۶۳$ به دست آمد که با دقت بالایی صحت مقادیر پیش‌بینی را تأیید می‌کند.

۹- با استفاده منفرد از ترکیب جدید ساخته شده به مقدار ۵ Kg/t به عنوان کلکتور و نیز استفاده از روغن کاج به مقدار ۳۵۰ g/t ، خاکستر کنسانتره و کارایی جدایش به ترتیب $\% ۹/۱$ و $\% ۲۷/۸۲$ به دست آمدند که در مقایسه با دو کلکتور رایج (نفت و گازوییل) این کلکتور دارای عملکردی بسیار خوبی بوده است.

۱۰- از آنجایی که کلکتور جدید تنها با ترکیبی از آب و نرمه زغال سنگ به همراه درصد جزئی از مواد دیگر ساخته شده است و مقدار خاکستر در کنسانتره به کمتر از $\% ۱۰$ رسیده است، لذا از چهار جهت فنی و اقتصادی مزیت دارد:

اولاً: با مصرف نرمه زغال سنگ (ابعاد زیر ۷۵ میکرون) از انباشت باطله در سد باطله کاسته و بر ظرفیت ورودی مدار فلو تاسیون افزوده می‌شود که این امر نیز به نوبه خود باعث افزایش تولید می‌شود.

ثانیاً: از آنجایی که نفت سفید یا گازوییل ترکیباتی آلی هستند و در فاز نامحلول با پساب کارخانه قرار می‌گیرند و مقداری از آن‌ها به دلیل عدم بازیابی $\% ۱۰۰$ ، روانه محیط زیست می‌شود. اما این کلکتور جدید از آب و زغال سنگ ساخته شده است و آب آن قابل بازیابیست و نهایتاً آلاینده کمتری وارد محیط زیست می‌کند.

ثالثاً: کلاً هزینه افزودن کلکتورهای آلی (نفت سفید یا گازویل) حذف می‌شود (اما بایستی مقدار کف‌ساز را افزایش داد و شرایط عملیاتی برای ساخت این کلکتور را مهیا کرد که به نظر نمی‌رسد هزینه آنچنانی داشته باشد).

رابعاً: خاکستر کنسانتره در صورت استفاده از این کلکتور برای ابعاد (۱۰۰۰-۳۵۵+ میکرون) به کمتر از ۱۰٪ می‌رسد که تأثیر به‌سزایی در قیمت نهایی فروش کنسانتره خواهد داشت.

۵-۲- پیشنهادها

۱- به جهت این که قیمت کنونی (سال ۱۳۹۵ ه.ش) نفت سفید دقیقاً نصف قیمت گازویل می‌باشد، لذا با توجه به تأثیر جزیی کاربرد نفت سفید در مقادیر بازیابی و کارآیی جدایش، ارزیابی اقتصادی بین حالت کاهش قیمت کنسانتره زغال‌سنگ در اثر افزایش مقدار خاکستر آن در مقابل کاهش ۵۰ درصدی مصرف کلکتور (آن هم برای ابعاد ۱۰۰۰-۳۵۵+ میکرون) در کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی به نظر امری حیاتی می‌رسد، بگونه‌ایی که حتی با اختلاط ۵۰ درصدی نفت سفید به‌عنوان کلکتور، ۲۵٪ در هزینه کلکتور صرفه جویی می‌شود که حتی می‌توان این کاهش احتمالی سود در اثر افزایش ۰/۵ درصدی مقدار خاکستر محصول را با افزایش ظرفیت کارخانه و در مدار قرار دادن دو ردیف سلول سه‌تایی دیگر جبران کرد.

۲- با توجه به این که کلیه ذرات زیر ۱ میلی‌متر که d_{80} آن‌ها برابر ۴۵۰ میکرون به‌دست آمد، فقط با سلول‌های مکانیکی شسته می‌شوند، به نظر می‌رسد در صورت جداسازی ابعاد زیر ۴۵۰ میکرون و شستشوی آن‌ها در سلول‌های ستونی، درکل عیار و بازیابی به مراتب بهتری نسبت به سلول‌های مکانیکی حاصل شود.

۳- با توجه به مزیت‌های شمرده شده برای کلکتور جدید در بخش قبلی، پیشنهاد می‌شود در مقیاس نیمه‌صنعتی از این نوع کلکتور در کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی استفاده و سود حاصله بررسی شود.

منابع

حق پرست ده‌عرب م. (۱۳۸۱) ”بررسی امکان جایگزینی نفت با گازوییل در مدار فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی زرنده“، پایان نامه کارشناسی ارشد، بخش معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

رضایی ب. (۱۳۹۴) ”تکنولوژی زغال‌شویی“، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، چاپ دوم، ص ۴.

رضایی ب. (۱۳۹۴) ”فلوتاسیون“، انتشارات دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، چاپ ششم، ص ۴۸.

سمیعی بیرق ع و آرام ر. (۱۳۸۹) ”استحصال زغال‌سنگ از باطله فلوتاسیون کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی به روش فلوتاسیون ستونی“، پنجمین همایش ملی زمین‌شناسی و محیط زیست، ص ۷۶، اسلامشهر.

قاسمی ج. (۱۳۹۱) ”ارایه طرح بهینه خوراک دهی کارخانه زغال‌شویی البرز شرقی، با توجه به ماسرال‌های موجود منطقه به منظور بهبود راندمان کارخانه“، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود.

کر م. (۱۳۸۶) ”مطالعه قابلیت شستشوی ذغال البرز شرقی به روش فلوتاسیون ستونی“، پایان نامه کارشناسی ارشد، بخش معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود.

محمودی خ. (۱۳۹۰) ”بررسی تأثیر ماسرال‌های زغال‌سنگ در فرآیند فلوتاسیون زغال‌سنگ‌های مختلف منطقه البرز شرقی“، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Agus M, Carbin E, Ciccu R, Ghiani M, Satta E and Tilocca C. (1996). “**The influence of coal properties on surface-based separation processes**”. In: Blaschke W (ed.), *New Trends in Coal Preparation Technologies and Equipment* n Proceedings of the 12th Int. *Coal Preparation Congress*, Gordon and Breach, New York, pp. 571-578.

Aktas Z, Erol M & Colduroglu C. (2003). “**The effect of reagents and reagent mixtures on froth flotation of coal fines**”. *International Journal of Mineral Processing*, 71(1), pp. 131-145.

Aplan F.F. (1993). “**Coal properties dictate coal flotation strategies**”. *Trans. AIME*, 294, pp. 83.

Aplan F.F. (1999). “**The historical development of coal flotation in the United States**”, In: Parekh, B.K., Miller, J.D. (Eds.), *Advances in Flotation Technology*., SME, pp. 269– 287.

ASTM Designation: D388-12. (2012). “**Standard Classification of Coals by Rank**”, American Society for Testing and Materials-ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bonner C.M Aplan F.F. (1993). “**The influence of reagent dosage on the floatability of pyrite during coal flotation**”. *Sep, Sci, Technol*, 28, pp.747-764.

Capes C.E. (1989). “**Liquid phase agglomeration: process opportunities for economic and environmental challenges**”. In: Sastry K.V.S and Fuerstenau M.C (eds), *Challenges in Mineral Processing*. SME, Littleton, CO, pp. 237-252.

Finkelstein N.E. (1979). “**Oil flotations -- discussion**”. In: Somasundaran. E and Arbitr., N (eds), *Beneficiation of Mineral Fines*. AIME, pp. 331-340.

Fuerstenau M.C, Jameson G.J and Yoon R.H. (2007). “**Froth flotation: a century of innovation**”. *SME*. part 3, pp., 618.

Good R.J, Badgular M.K., Huang T.L. and Handur-Kulkarni S.N. (1994). “**Hydrophilic colloids and the elimination of inorganic sulfur from coal: a study**

employing contact angle measurements". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 93, pp.39-48.

Harris G.H, Diao J and Fuerstenau D.W. (1993). "**Coal flotation with nonionic surfactants**". SME Annual Meeting, Reno, NV, Preprint 93-241.

He Y.B and Laskowski J.S. (1992). "**Contact Angle Measurements on Discs Compressed from Fine Coal**". International Journal of Coal Preparation and Utilization, Vol. 10, pp.19-36.

Jena M.S, Biswal S.K and Rudramuniyappa M.V. (2008). "**Study on flotation characteristics of oxidised Indian high ash sub-bituminous coal**", Int. J. Miner. Process, 87, pp. 42–50.

Kawatra S.K. (2011). "**Fundamental principles of froth flotation**". In: Darling P(ed), Mining Engineering Handbook, SME, USA, pp., 1517–1532.

Kelebek S, Demir U, Sahbaz O, Ucar A, Cinar M, Karaguzel C and Oteyaka B. (2008). '**The effects of dodecylamine, kerosene and pH on batch flotation of Turkey's Tuncbilek coal**', Int. J. Miner. Process., 88, pp. 65–71.

Laskowski J.S. (2001). "**Coal Flotation and Fine Coal Utilization**". In: D.W. Fuerstenau (ed), Developments in Mineral Processing, Vol. 14, 1th ed. Elsevier, Amsterdam, pp. 8-10.

Laskowski J.S. (1992). "**Oil assisted fine particle processing**". In: Laskowski J.S and Ralston J (eds), Colloid Chemistry in Mineral Processing. Elsevier, Amsterdam, pp. 361-394.

Laskowski J.S. (1989). "**The colloid chemistry and flotation properties of primary aliphatic amines**". In: Sastry., K.V.S and Fuerstenau., M.C (eds), Challenges in Mineral Processing. SME, Littleton, CO, pp. 15-34.

Naik P.K, Reddy P.S.R and Misra V.N. (2004). "**Optimization of coal flotation using statistical technique**", Fuel Process, Technol, 85, pp.1473–1485.

Naik P.K, Reddy P.S.R and Misra V.N. (2005). **“Interpretation of interaction effects and optimization of reagent dosages for fine coal flotation”**, Int. J. Miner. Process., 75,pp. 83–90.

Seitz R.A and Kawatra S.K. (1986). **“The role of nonpolar oils as flotation reagents”**. Chapter 19, pp.171-180.

Steenberg E and Harris P. (1984). **“Adsorption of carboxymethyl cellulose, guar gum, and starch onto talc, sulfides, oxides and salt-type minerals”**. South Afr. J. Chem., pp.,37-85.

Vamvuka D, Agridiotis V. (2001). **“The effect of chemical reagents on lignite flotation”**. Int. J. Miner. Process. 61, pp. 209–224.

Wen W.W and Sun S.C. (1981). **“An electrokinetic study on the oil flotation of oxidized coal. Separation Science and Technology”**, 16(10), pp.1491-1521.

Woods D.R and Diamadopoulos E. (1988). **“Surfactants in Chemical Process Engineering”**. In: Wasan D.T., Ginn M.E and Shah D.O (eds), Marcel Dekker, New York, pp. 369-539.

Abstract

Coal is the fuel of the past and the future and in terms of energy production and other applications in the industry is the most important world's mineral resources. Declining oil reserves, energy crisis and the increasing demands of human bright horizons has outlined coal processing industry. Flotation is a method used for separating the valuable minerals from waste materials. The factors affecting the coal flotation process can be pointed as: chemistry impacts (such as: type and amount of collector, type and amount of frother, etc.), coal characteristics (such as: particle size, petrography, mineralogy, etc.), machine characteristics (such as: type, gas hold up, carrying capacity, etc.). In this research, we focus on chemistry impacts, Also finding the optimum values of them, as well as the possibility of replacing gasoil with kerosene as a collector (due to its lower price), is the main objective of this thesis. Using DX10 software and RSM, CCD are respectively study type and design type. Experiments was conducted five numeric factors with three surface for each factor and select six center point. thirty-two experiment was predicted. Responses was: recovery, separation efficiency and the ash content in flotation concentrate, So this responses was applied to evaluate flotation efficiency. Results show that (With 90% desirability) optimum Factor values to access maximum efficiency (87.51%), maximum separation efficiency (26.08%) and minimum ash content in concentrate, include collector dosage (only gasoil): 1000 g/t, frother dosage: 158.34 g/t, pulp solid percent: 10.3%, particle size range distribution in (+355-1000) micron. During experiments some other factors was constant, such as: pH=7, scorification time in the case of using kerosene:2.5 minutes, gasoil: 3 minutes, 50% kerosene: 2.75 minutes, agitator speed: 1000 rpm, frother type: pine oil. By the way a new combination of fine coal and water Along with inappreciable percent of resins introduced as a new collector, with the same design method (mentioned above), ten experiments done. other parametrs was just like that of thirty-two experiments, Except that scorification time and dosage of this new collector and frother (pine oil), was respectively: 2.5 minutes, 5 kg/t and 350 g/t. Two factors such as: "solid percent" and "particle size range distribution" considered to obtain maximum separation efficiency and minimum ash content in concentrate. Results with 90% desirability show that, maximum S.E. (27.82%) and minimum ash content transferred to concentrate (9.1%) impetrate in optimum factors, Pulp solid percent: 10.3% , particle size range distribution: (+355-1000) micron. Comparing the results of separation efficiency and ash reduction amounts in the second manner, affirm the advantage of this collector.

Keywords: Flotation, East-Alborz coal plant , Collector, Kerosene, Gasoil.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, petroleum and Geophysics

MSc Thesis in Mining engineering, Mineral processing

**Feasibility study of replacing gasoil with kerosene in the
flotation circuit of the East-Alborz coal washing plant**

By: Ramin Ahovar

Supervisor:

Dr. Mohammad Karamoozian

September 2016