

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج معدن

بررسی امکان فرآوری مجدد باطله‌های جیگ کارخانه زغالشویی زیرآب

نگارش:

زهرا بهری

اساتید راهنما:

دکتر سید ضیاء الدین شفائی تنکابنی

دکتر محمد کارآموزیان

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تابستان ۱۳۹۰



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم زهرا بهری رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان : بررسی امکان فرآوری مجدد باطله‌های جیگ کارخانه زغالشویی زیرآب که در تاریخ ۱۳۹۰/۶/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> عالی (امتیاز ۱۹/۵)
--------------------------------	------------------------------------	--

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	دکتر سید ضیال‌الدین شفقانی تنکابنی	۱- استاد راهنما
	استادیار	دکتر کار آموزیان	
	استادیار		۲- استاد مشاور
	استاد	دکتر محمد عطائی	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استاد	دکتر محمد نوع پرست	۴- استاد ممتحن
	دانشیار	دکتر فرهنگ سرشکی	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده : دکتر محمد عطائی

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان هستند، به پاس قلب‌های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید، به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند، این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

تقدیر و تشکر

سپاس و ستایش سزاوار خداوند متعال است که بدون یاری او انجام هیچ کاری میسر نیست. از راهنماییها و زحمات بیشائبه اساتید راهنمای گرانقدرم، آقایان دکتر سید ضیاءالدین شفایی و دکتر محمد کارآموزیان که وقت خود را در طی انجام این تحقیق در اختیار اینجانب گذاشتند، نهایت سپاس و تشکر را دارم.

از مساعدت و همکاری بیشائبه جناب آقای مهندس محمد کُر که مرا از نقطه نظرات سازنده خود بهره‌مند ساختند، نهایت تشکر را دارم.

از جناب آقای مهندس مصطفی نادری کارشناس محترم آزمایشگاه کانه‌آرایی، که زمینه انجام هرچه سریعتر این تحقیق را فراهم نمودند سپاسگزارم.

از آقایان رستگار، منصور عباسی و مهندس محمد کبیریان که ساعت‌ها با اینجانب در آزمایشگاه همکاری نمودند نهایت تشکر را دارم. در ضمن از مدیریت و کارکنان پر تلاش کارخانه زغالشویی البرز مرکزی که در نمونه برداری از دمپ باطله همکاری کردند سپاسگزاری می شود.

تعهد نامه

اینجانب زهرا اهری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن
دانشکده سمن، قزوین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی امکان فرآیند استخراج چمبر
با استفاده از تحت راهنمایی متعهد می شوم .

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

از زمان شروع به کار کارخانه زغالشویی البرز مرکزی تاکنون، بیش از ۱/۵ میلیون تن باطله در زمینی به مساحت چندین هکتار دپو شده است. مطالعات نشان داده است حدود ۷۰ درصد باطله‌های کارخانه البرز مرکزی مربوط به باطله جیگ ماشین که حاوی حدود ۴۴ درصد زغال با ارزش و ۵۶ درصد خاکستر است. از آنجا که باطله‌های کارخانه پتانسیل آلودگی زیست محیطی را دارد و با توجه به درصد بالای زغالسنگ در این بخش از باطله‌ها، ارائه راهکاری جهت بازیافت آنها، علاوه بر کاهش حجم باطله‌ها، مقدار قابل توجهی از زغال قابل فروش حاصل خواهد شد که موجب افزایش بهره‌وری می‌شود. در واقع استحصال باطله‌های زغالسنگ نه تنها از لحاظ اقتصادی بلکه از لحاظ زیست محیطی حائز اهمیت است. با توجه به تاثیر مثبت فلوتاسیون ستونی در فراوری مواد معدنی ریز دانه و کم عیار، در این تحقیق قابلیت شستشوپذیری باطله کارخانه زغالشویی البرز مرکزی برای ابعاد کمتر از ۰/۶ میلی‌متر با متوسط ۵۶ درصد خاکستر توسط فلوتاسیون ستونی مطالعه شده است. به منظور بررسی تاثیر پارامترهای شاخص بر عملیات فلوتاسیون ستونی باطله جیگ کارخانه زغالشویی البرز مرکزی، مقدار و نوع بهینه معرفها (کلکتور، کف ساز) با استفاده از روش فلوتاسیون مکانیکی بررسی شد. با توجه به تحلیل‌ها و بررسی‌هایی که در این مرحله از آزمایشها انجام شد، شناخت نسبتاً خوبی نسبت به قابلیت شناورسازی، مقدار و نوع معرفها در شستشوپذیری زغال بدست آمد که مقدمات لازم را برای مطالعات بیشتر و بهینه‌سازی عملیات شستشوپذیری زغال توسط فلوتاسیون ستونی فراهم کرد. نتایج حاصل از آزمایشهای فلوتاسیون مکانیکی نشان داد که شرایط بهینه برای مقدار کلکتور (نفت) g/t ۳۰۰۰ و مقدار کف‌ساز (MIBC) g/t ۳۰۰ است که تحت این شرایط بازیابی ۶۰/۶٪، خاکستر ۲۸/۸٪ و کارایی جدایش ۴۹٪ حاصل شد. همچنین بعد از آزمایشهای فلوتاسیون مکانیکی، مشاهده شد که به علت عیار پایین نمونه، بهترین نتیجه در سطوح بالا (پارامترها) مقدار کلکتور و کف‌ساز بدست آمد. بنابراین بر اساس نتایج آزمایشهای فلوتاسیون مکانیکی، مقدار معرفهای بیشتری برای کارایی بهتر در آزمایشهای فلوتاسیون ستونی استفاده شد. با توجه به اطلاعات و شناختی که از آزمایشهای فلوتاسیون

مکانیکی حاصل شد شرایط بهینه عملیاتی ستون مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین ۱۸ آزمایش در قالب طراحی فاکتوریل دو سطحی جزئی برای تعیین مقدار بهینه پارامترهای عملیاتی سلول ستونی از قبیل نرخ خوراک‌دهی، نرخ گازدهی، نرخ آب شستشو، مقدار کلکتور، مقدار MIBC به منظور جدایش مطلوب در فلوتاسیون انجام شد. بدین ترتیب نتایج حاصل از آزمایشهای فلوتاسیون ستونی نشان داد، شرایط بهینه پارامترها شامل مقدار کلکتور 2909 g/t ، مقدار کف‌ساز (MIBC) 350 g/t ، نرخ هوادهی 0.96 cm/s ، نرخ خوراک‌دهی $3/6 \text{ lit/min}$ و نرخ آب شستشو 0.98 lit/min است که تحت این شرایط کنسانتره با درصد خاکستر $12/1 \%$ و بازیابی $28/5$ درصد حاصل شد. تحلیل ماندگی گاز در سلول فلوتاسیون ستونی به خوبی نتایج آزمایشهای انجام شده را تایید کرد.

کلمات کلیدی: باطله، زغالسنگ، فلوتاسیون ستونی، طراحی آزمایشها، ماندگی گاز، اثرات زیست محیطی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- تعیین پارامترهای بهینه عملیاتی فلوتاسیون ستونی جهت بازیافت باطله های جیگ زغالسنگ کارخانه زغالشویی انجیر تنگه، بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، ۱۳۸۹، تهران ایران.

۲- کاهش اثرات زیست محیطی باطله های کارخانه زغالشویی البرز مرکزی با کمک فناوری فلوتاسیون ستونی، هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، شهریور ۱۳۹۰، دانشگاه صنعتی شاهرود.

3- **Coal tailings reprocessing using column flotation**, *International Journal of Mining and Environmental*, 2011.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیاتی از زغالسنگ و روشهای فراوری آن

۱-۱ مقدمه ----- ۲

۲-۱ ضرورت انجام و هدف از تحقیق ----- ۵

فصل دوم: فلوتاسیون ستونی

۱-۲ مقدمه‌ای بر فلوتاسیون ستونی ----- ۸

۲-۲ پارامترهای عملیاتی سلول فلوتاسیون ستونی ----- ۱۰

۱-۲-۲ زمان ماند ----- ۱۰

۲-۲-۲ نرخ خوراک‌دهی ----- ۱۱

۳-۲-۲ نرخ آب شستشو ----- ۱۲

۴-۲-۲ نرخ گازدهی ----- ۱۲

۵-۲-۲ مقدار معرف‌های شیمیایی ----- ۱۳

۶-۲-۲ زمان آماده‌سازی ----- ۱۳

۷-۲-۲ درصد جامد پالپ ----- ۱۳

۸-۲-۲ ارتفاع کف ----- ۱۳

۹-۲-۲ ماندگی گاز ----- ۱۴

۱۰-۲-۲ اندازه‌گیری ماندگی گاز ----- ۱۴

۳-۲ مطالعات پیشین ----- ۱۵

فصل سوم: معرفی کارخانه البرز مرکزی

۱-۳ مقدمه ----- ۲۰

۲-۳ نگاهی به خوراک کارخانه ----- ۲۱

فصل چهارم: آزمایشهای فلوتاسیون مکانیکی

۱-۴ مقدمه ----- ۲۶

۲۷	-----	۲-۴ روش اجرای آزمایش‌ها فلوتاسیون مکانیکی
۲۷	-----	۱-۲-۴ روش انجام آزمایش فلوتاسیون مکانیکی
۲۸	-----	۲-۲-۴ نحوه اندازه‌گیری خاکستر زغال
۲۹	-----	۳-۲-۴ طراحی آزمایش‌ها
۳۰	-----	۳-۴ مطالعه و تفسیر داده‌های کارایی جدایش
۳۱	-----	۱-۳-۴ توزیع نرمال باقیمانده‌ها
۳۱	-----	۲-۳-۴ آنالیز واریانس
۳۲	-----	۳-۳-۴ آنالیز خطاهای پاسخ سوم (کارایی جدایش)
۳۴	-----	۴-۳-۴ بررسی نتایج پاسخ (درصد بازدهی جدایش)
۳۷	-----	۴-۴ نتایج بهینه‌سازی مقدار و نوع معرفها بر روی درصد بازدهی جدایش
۳۸	-----	۵-۴ نتیجه‌گیری

فصل پنجم: آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی

۴۰	-----	۱-۵ روش اجرای آزمایش‌های فلوتاسیون ستونی
۴۰	-----	۱-۱-۵ روش انجام آزمایش‌ها
۴۲	-----	۲-۱-۵ طراحی آزمایش‌ها
۴۴	-----	۲-۵ مطالعه و تفسیر داده‌های پاسخ اول (درصد خاکستر)
۴۴	-----	۱-۲-۵ برازش مدل بر روی داده‌های پاسخ اول (درصد خاکستر)
۴۵	-----	۲-۲-۵ توزیع نرمال باقیمانده‌ها
۴۶	-----	۳-۲-۵ آنالیز واریانس
۴۷	-----	۴-۲-۵ آنالیز خطاهای پاسخ اول (درصد خاکستر)
۴۹	-----	۵-۲-۵ بررسی نتایج پاسخ اول (درصد خاکستر)
۵۶	-----	۳-۵ مطالعه و تفسیر داده‌های پاسخ دوم (درصد بازیابی)
۵۶	-----	۱-۳-۵ برازش مدل بر روی داده‌های پاسخ دوم (درصد بازیابی)
۵۷	-----	۲-۳-۵ توزیع نرمال باقیمانده‌ها
۵۷	-----	۳-۳-۵ آنالیز واریانس

۵۸	-----	۴-۳-۵ آنالیز خطاهای پاسخ دوم (درصد بازیابی)
۶۰	-----	۵-۳-۵ بررسی نتایج پاسخ دوم (درصد بازیابی)
۶۳	-----	۴-۵ مطالعه و تفسیر داده‌های پاسخ سوم (ماندگی گاز)
۶۳	-----	۱-۴-۵ برازش مدل بر روی داده‌های پاسخ سوم (ماندگی گاز)
۶۳	-----	۲-۴-۵ توزیع نرمال باقیمانده‌ها
۶۴	-----	۳-۴-۵ آنالیز واریانس
۶۵	-----	۴-۴-۵ آنالیز خطاهای پاسخ سوم (ماندگی گاز)
۶۷	-----	۵-۴-۵ بررسی نتایج پاسخ سوم (ماندگی گاز)
۷۰	-----	۵-۵ نتایج بهینه‌سازی متغیرها بر روی درصد بازیابی و درصد خاکستر
۷۱	-----	۶-۵ اعتبار سنجی نتایج بهینه‌سازی

فصل ششم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷۳	-----	۱-۶ خلاصه و نتیجه‌گیری
۷۵	-----	۲-۶ پیشنهادات
۷۸	-----	پیوست و ضمائم
۸۹	-----	مراجع و منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ روشهای مورد استفاده برای فراوری زغال با توجه به ابعاد آنها از دهه ۱۹۵۰ ۴
- شکل ۱-۲ شمای کلی یک ستون فلوتاسیون ۸
- شکل ۲-۲ اثر زمان ماند بر بازیابی زغال برای درصد جامدهای مختلف ۱۱
- شکل ۲-۳ اندازه‌گیری ماندگی گاز با استفاده از اختلاف فشار ۱۵
- شکل ۳-۱ مقایسه بین درصد خاکستر معادن خوراک ده به کارخانه در سال‌های ۱۳۷۳ و ۱۳۸۶ ۲۲
- شکل ۳-۲ فلوشیت کارخانه البرز مرکزی ۲۳
- شکل ۴-۱ نمایی از شکل سلول فلوتاسیون مکانیکی مورد استفاده در آزمایش‌ها ۲۸
- شکل ۴-۲ نمودار ساده عملیات فلوتاسیون مکانیکی ۲۸
- شکل ۴-۳ نمودار توزیع نرمال باقیمانده‌ها مربوط به کارایی جدایش ۳۱
- شکل ۴-۴ نمودار تغییرات مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به کارایی جدایش ۳۳
- شکل ۴-۵ نمودار تغییرات باقیمانده‌ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به کارایی جدایش ۳۳
- شکل ۴-۶ نمودار مقادیر واقعی پاسخ (کارایی جدایش) نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده آن توسط مدل ۳۴
- شکل ۴-۷ نمودار تاثیر عوامل (a) نوع کلکتور، (b) مقدار کلکتور و (c) مقدار MIBC بر درصد بازدهی جدایش ۳۵
- شکل ۴-۸ نمودار اثر متقابل دو عامل نوع کلکتور و میزان MIBC بر روی درصد بازدهی جدایش ۳۶
- شکل ۴-۹ نمودار اثر متقابل دو عامل مقدار کلکتور و میزان MIBC بر روی درصد بازدهی جدایش ۳۷
- شکل ۴-۱۰ نتایج بهینه‌سازی پارامترها ۳۷
- شکل ۵-۱ نمای شماتیک از ستون فلوتاسیون ۴۰
- شکل ۵-۲ نمودار اثرات عوامل مربوط به پاسخ اول (درصد خاکستر) ۴۵
- شکل ۵-۳ نمودار توزیع نرمال باقیمانده‌ها مربوط به درصد خاکستر ۴۶
- شکل ۵-۴ نمودار تغییرات مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به درصد خاکستر ۴۸
- شکل ۵-۵ نمودار تغییرات باقیمانده‌ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به درصد خاکستر ۴۸

- شکل ۵-۶ نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد خاکستر) نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده آن توسط مدل
- شکل ۵-۷ نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ اول (درصد خاکستر)
- شکل ۵-۸ نمودار تأثیر عوامل (a) نرخ گازدهی، (b) میزان مصرف MIBC، (c) نرخ خوراک‌دهی (d) نرخ آب شستشو
- شکل ۵-۹ اثر متقابل دو عامل مقدار کلکتور و نرخ آب شستشو بر درصد خاکستر
- شکل ۵-۱۰ اثر متقابل دو عامل نرخ خوراک‌دهی و مقدار MIBC بر درصد خاکستر
- شکل ۵-۱۱ اثر متقابل دو عامل نرخ هواددهی و مقدار MIBC بر درصد خاکستر
- شکل ۵-۱۲ اثر متقابل دو عامل نرخ آب شستشو و نرخ خوراک‌دهی بر درصد خاکستر
- شکل ۵-۱۳ اثر متقابل دو عامل مقدار کلکتور و نرخ خوراک‌دهی بر درصد خاکستر
- شکل ۵-۱۴ نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل مقدار کلکتور و نرخ آب شستشو در (a) سطح پائین نرخ گازدهی (b) سطح بالای نرخ گازدهی بر درصد خاکستر
- شکل ۵-۱۵ نمودار دو بعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ خوراک‌دهی و نرخ آب شستشو در (a) سطح پائین مقدار MIBC و (b) سطح بالای مقدار MIBC بر درصد خاکستر
- شکل ۵-۱۶ نمودار اثرات عوامل مربوط به پاسخ دوم (درصد بازیابی)
- شکل ۵-۱۷ نمودار توزیع نرمال باقیمانده‌ها مربوط به درصد بازیابی
- شکل ۵-۱۸ نمودار تغییرات مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به درصد بازیابی
- شکل ۵-۱۹ نمودار تغییرات باقیمانده‌ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به درصد بازیابی
- شکل ۵-۲۰ نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده آن توسط مدل
- شکل ۵-۲۱ نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ دوم (درصد بازیابی)
- شکل ۵-۲۲ نمودار تأثیر عوامل (a) میزان مصرف MIBC، (b) نرخ خوراک‌دهی، (c) نرخ هواددهی، (d) نرخ آب شستشو
- شکل ۵-۲۳ اثر متقابل دو عامل نرخ هواددهی و نرخ خوراک‌دهی بر درصد بازیابی
- شکل ۵-۲۴ اثر متقابل دو عامل نرخ آب شستشو و نرخ خوراک‌دهی بر درصد بازیابی
- شکل ۵-۲۵ نمودار اثرات عوامل مربوط به پاسخ سوم (ماندگی گاز)
- شکل ۵-۲۶ نمودار توزیع نرمال باقیمانده‌ها مربوط به ماندگی گاز

-
- شکل ۵- ۲۷ نمودار تغییرات مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به ماندگی گاز ۶۵
- شکل ۵- ۲۸ نمودار تغییرات باقیمانده‌ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به ماندگی گاز ۶۶
- شکل ۵- ۲۹ نمودار مقادیر واقعی پاسخ (ماندگی گاز) نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده آن توسط مدل ۶۶
- شکل ۵- ۳۰ نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ سوم (ماندگی گاز) ۶۷
- شکل ۵- ۳۱ نمودار تأثیر عوامل نرخ هوادهی بر ماندگی گاز ۶۷
- شکل ۵- ۳۲ ماندگی گاز بر حسب نرخ‌گازدهی، تأثیر سرعت رو به پایین مایع ۶۹
- شکل ۵- ۳۳ ماندگی گاز بر حسب نرخ‌گازدهی، تأثیر میزان کف‌ساز ۶۹
- شکل ۵- ۳۴ ماندگی گاز بر حسب (a) مقدار کلکتور (b) نرخ آب شستشو ۷۰
- شکل ۵- ۳۵ نتایج بهینه‌سازی پارامترها ۷۰

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ پیشینه مطالعات ۱۶
- جدول ۱-۴ پارامترهای انتخابی و سطوح تغییرات ۲۹
- جدول ۲-۴ طراحی از آزمایشها برای ارزیابی اثری از مقدار و نوع معرفها بر اجرای عملیات فلوئاسیون مکانیکی ۳۰
- جدول ۳-۴ آنالیز واریانس مربوط به بازدهی جدایش ۳۲
- جدول ۱-۵ مشخصات ستون فلوئاسیون مورد استفاده جهت انجام آزمایشها ۴۱
- جدول ۲-۵ عوامل و سطوح مربوط به طراحی آزمایشات به روش فاکتوریل دو سطحی ۴۲
- جدول ۳-۵ طراحی از آزمایشها برای ارزیابی اثری از پارامترها بر روی اجرای عملیات فلوئاسیون ستونی ۴۳
- جدول ۴-۵ آنالیز واریانس مربوط به درصد خاکستر ۴۷
- جدول ۵-۵ آنالیز واریانس مربوط به درصد بازیابی ۵۸
- جدول ۶-۵ آنالیز واریانس مربوط به ماندگی گاز ۶۵
- جدول ۷-۵ نتایج اعتبار سنجی تحت شرایط بهینه نرم افزار ۷۱

فصل اول

کلیاتی از زغالسنگ و

روشهای فرآوری آن

۱-۱ مقدمه

زغالسنگ ماده‌ای ناهمگن است که از مواد آلی و غیر آلی تشکیل شده است. مواد غیر آلی موجود در زغالسنگ شامل خاکستر، گوگرد و ترکیبات دیگر است و مواد آلی آن محتوی کربن و بخش قابل احتراق است. در حقیقت زغالسنگ ماده‌ای سیاه و یا سیاه - قهوه‌ای و سوخت فسیلی است که از تغییر شکل بقایای گیاهی تحت شرایط مختلف رطوبت، دما، فشار و زمان در بین لایه‌های رسوبی و سنگ‌ها، طی دورانهای گذشته زمین شناسی به وجود آمده است. بنابراین بسته به شرایط محیط، نوع گیاه و میزان تغییر شکل حاصله، محصولات تولید شده طیف وسیعی دارند و ممکن است شامل موادی مانند اسید هیومیک^۱، پیت^۲، لیگنیتیک^۳، ساب‌بیتومینه^۴، بیتومینه^۵، نیمه‌آنتراسیت^۶، آنتراسیت و فوق آنتراسیت^۷ نیز باشد. که تشکیل پیت تا آنتراسیت را مرحله تشکیل زغال^۸ می‌نامند. درجه زغال‌شدگی از لیگنیت به آنتراسیت افزایش می‌یابد و به عبارتی میزان کربن افزایش ولی اکسیژن، هیدروژن و واکنش‌دهی محصولات تولید شده کاهش می‌یابد [۱]. هدف از زغالشویی، جدایش ترکیبات غیر قابل احتراق است. یکی از مهمترین اهداف شستشوی زغال سنگ، بهبود کیفیت زغال در تهیه کک متالوژی به منظور تولید فولاد است. در تهیه کک متالوژی، روش‌های شستشو زغال جایگاه ویژه‌ای دارد. به عنوان مثال وجود خاکستر و عناصر مضر مشکلات زیر را پدید می‌آورد [۲]:

- با افزایش یک درصد خاکستر زغال کک‌شو، تولید فولاد به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

- خاکستر زیاد حجم سرباره را افزایش می‌دهد.

- اکسایش کک افزایش می‌یابد.

^۱ - Humic acid

^۲ - Peat

^۳ - Lignitic

^۴ - Subbituminous

^۵ - Bituminous

^۶ - Semianthracite

^۷ - Metaanthracite

^۸ - Coalification

- حساسیت و کارآیی کوره کاهش می‌یابد.

بنابراین تهیه کک متالورژی با شرایط فنی قابل قبول بدون عملیات شستشو امکان پذیر نیست. مواد غیر قابل سوختن در زغال را خاکستر زغال می‌نامند و از آنجا که این مواد نقش منفی و نامطلوبی دارند، لذا قبل از استفاده باید شستشو شوند. خاکستر زغال از دیدگاه شستشو به چند گروه دسته بندی می‌شوند [۲]:

-موادی که با زغال ترکیب شیمیایی دارند و جدایش آنها بسیار پیچیده و مشکل است.

-موادی که به صورت ذرات بسیار ریز در زغال پراکنده‌اند و جدایش آنها با آسیا کردن زغال امکان پذیر است.

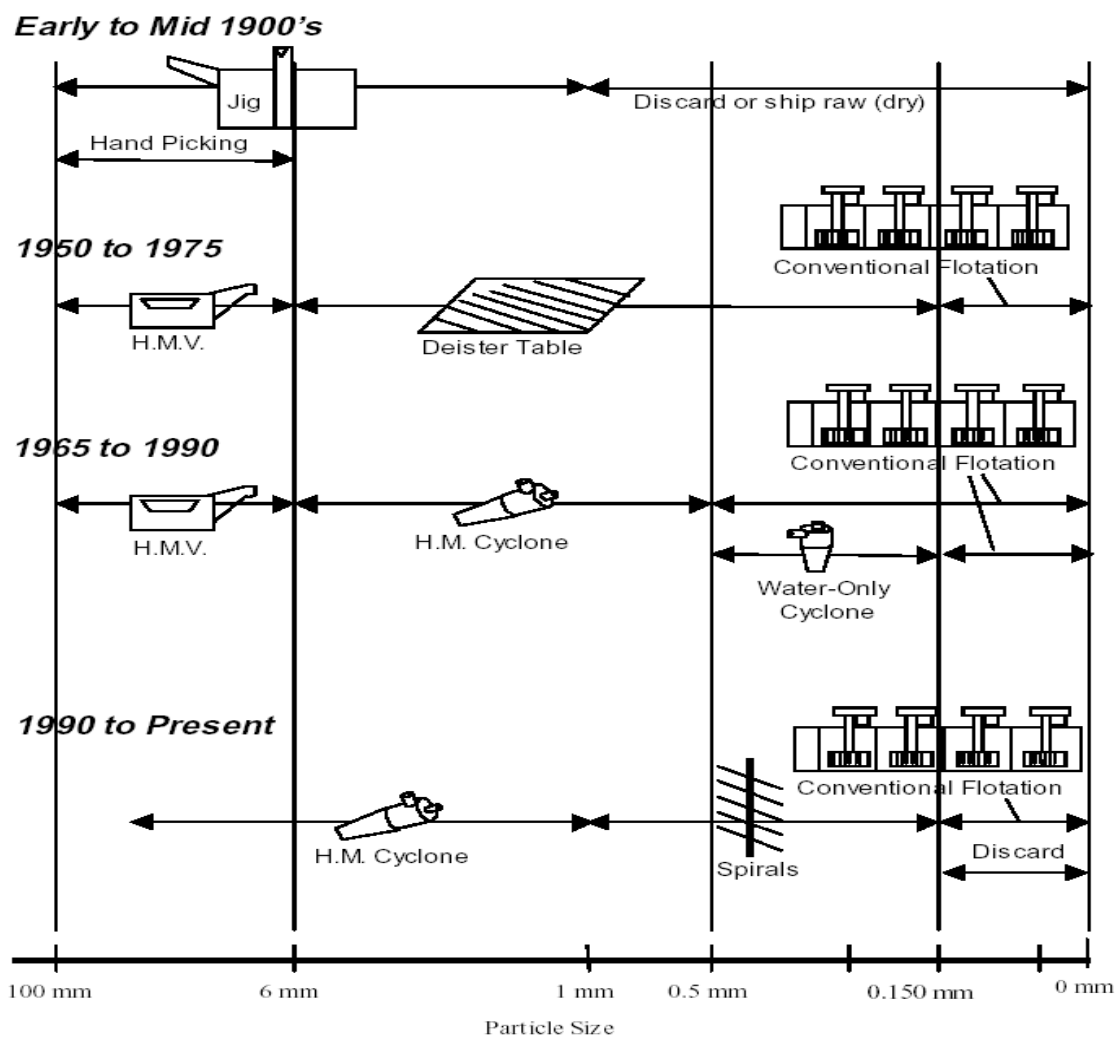
-موادی که به صورت نوار عدسی و قطعه‌هایی از رس، شیل، لای استون و ماسه سنگ در داخل لایه-های زغال و در زمان‌های متناوب تشکیل زغال رسوب کرده‌اند و جدایش آنها به سادگی صورت می‌گیرد.

-موادی که از طریق لایه‌های درونگیر (کمر بالا و پائین) با زغال استخراج شده مخلوط شده و به سادگی قابل جدایش‌اند.

با توجه به دانه‌بندیهای مختلف و خواص فیزیکی و شیمیایی سطح ذرات زغال، روشهای متنوعی جهت شستشوی زغال بکار می‌رود. برخی از روشهای مورد استفاده در فراوری زغال با توجه به ابعاد آنها از دهه ۱۹۵۰ تا بحال در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. معمولاً برای شستشوی ذرات زیر ۱mm، از روشهای فلوتاسیون (مکانیکی و ستونی)^۹ استفاده می‌شود. اساس فلوتاسیون ایجاد یا بالا بردن اختلاف، در خاصیت آبرانی است. به وسیله آبرانی سطح مواد معدنی به صورت طبیعی یا شیمیایی، جدایش ذرات مختلف را می‌توان با استفاده از تزریق هوا در پالپ بدست آورد. تفاوت بین قابلیت آبرانی زغال و سنگ همراه، در فلوتاسیون زغال به خوبی شناخته شده است. ذرات آبران به حباب هوا

^۹ - Column Flotation

برخورد کرده و می‌چسبند. این جذب وقتی اتفاق می‌افتد که سطح ذره اکسیده نشده باشد و ذرات زغال جذب شده به حباب هوا در سطح پالپ شناور و ذرات باقیمانده در پالپ به عنوان باطله بجای می‌مانند.



شکل (۱-۱) روشهای مورد استفاده برای فرآوری زغال با توجه به ابعاد آنها از دهه ۱۹۵۰ [۳]

فلوتاسیون یکی از مهمترین روشها برای جدایش مواد معدنی با ارزش است. با توجه به قابلیت کاربرد آن برای فرآوری ذرات ریز دانه، این روش از لحاظ اقتصادی برای مواد معدنی کم عیار کاربرد بیشتری نسبت به بقیه روشهای جدایش دارد. بنابراین با توجه به قابلیت فرآوری زغال معمولاً از این روش در مراحل مختلف برای کاهش خاکستر زغال و میزان مجاز ناخالصیها بکار گرفته می‌شود.

روشهای ثقیلی از جمله روش واسطه سنگین، موفقترین روشهای شستشوی زغال و جدایش مواد مزاحم همراه زغالاند که در ابعاد نسبتاً دانه درشت با زغال درگیرند. ولی نمی‌توان از آن به عنوان

روشی مطلوب در جدایش مواد معدنی که به صورت بسیار ریز با زغال درگیر هستند، استفاده کرد [۱].

۲-۱ ضرورت انجام و هدف از تحقیق

مجموعه معادن زغال سنگ زیرآب (البرز مرکزی) حدود ۳۰ سال است که بهره‌برداری صنعتی می‌شود. منطقه سوادکوه (زیرآب، پل سفید) از مناطق زیبای مازندران است که از سال ۱۳۶۸ کارخانه زغالشویی انجیر تنگه شرکت زغال سنگ البرز مرکزی با تکنولوژی روسی در این منطقه شروع به کار کرد و از همان زمان باطله حاصل از شستشوی زغال در کارخانه در محلی دپو شده است. این کارخانه برای شستشوی زغال سنگ، از دو روش فراوری ثقلی (جیگ) و فلوتاسیون استفاده می‌کند [۴]. از زمان شروع به کار کارخانه زغالشویی انجیر تنگه تاکنون، بیش از ۱/۵ میلیون تن باطله در زمینی به مساحت چندین هکتار و به ارتفاع بیش از ۳۰ متر دپو شده است. مطالعات قبلی انجام شده توسط شرکت زغالسنگ البرز مرکزی نشان می‌دهد که، حدود ۷۰ درصد این باطله‌ها از فرایند ثقلی (جیگ) بدست آمده‌اند که به طور متوسط حاوی حدود ۴۴ درصد زغال با ارزش و ۵۶ درصد خاکستر است. باطله‌های کارخانه پتانسیل آلودگی زیست محیطی را دارد به عنوان مثال اکسید شدن پیریت موجود در باطله حاصل از شستشوی زغال در معرض اکسیژن هوا و رطوبت، باعث تولید زهاب اسیدی (AMD)^{۱۰} می‌شود و با توجه به اینکه رودخانه دلیم در جوار منطقه دپو شده باطله جریان دارد، این زهاب اسیدی وارد چرخه آب رودخانه و آب‌های زیرزمینی شده و سبب آلودگی‌های زیست محیطی و آلوده شدن آب‌های مورد استفاده برای زراعت و آشامیدن می‌شود [۵-۶]. در نتیجه با توجه به درصد بالای زغالسنگ در این بخش از باطله‌ها و ارائه راهکاری جهت بازیافت آنها، علاوه بر کاهش حجم باطله‌ها، مقدار قابل توجهی از زغال قابل فروش حاصل خواهد شد که موجب افزایش بهره‌وری می‌شود. بنابراین استحصال زغال موجود در این باطله‌ها، با استفاده از روش فلوتاسیون ستونی یا روش-

^{۱۰}-Acid Mine Drainage

های دیگر اهمیت پیدا می‌کند. در واقع استحصال باطله‌های زغال سنگ نه تنها از لحاظ اقتصادی بلکه از لحاظ زیست محیطی حائز اهمیت است. این مطالعه در زمینه امکان کاربردی بازیافت زغال از باطله کارخانه زغالشویی البرز مرکزی و تولید زغال کک شو برای مصرف در صنایع متالوژی است.

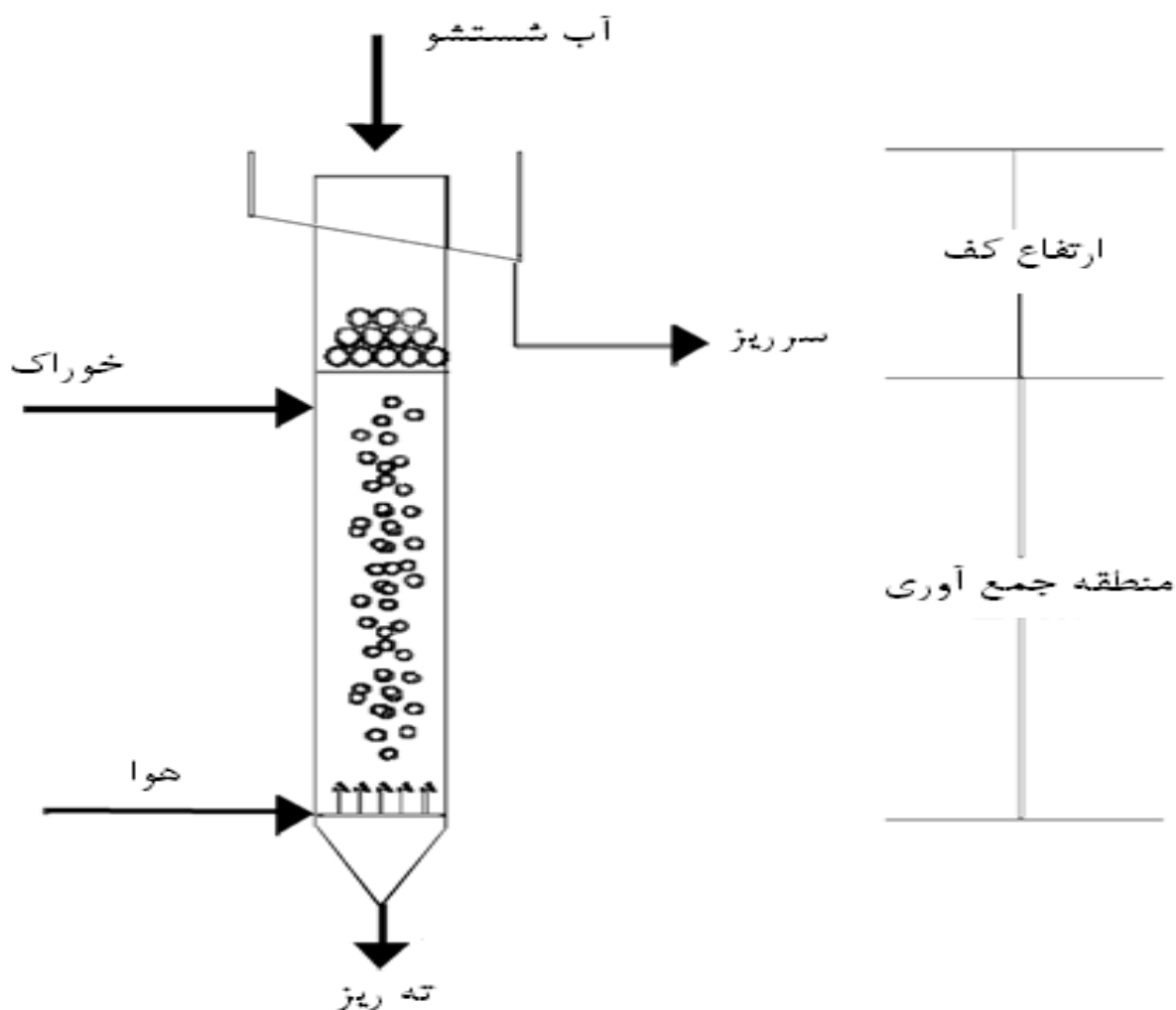
با توجه به اینکه فلوتاسیون ستونی در دهه اخیر در فراوری مواد معدنی مختلف مانند مس، روی و آهن مورد استفاده قرار گرفته است، تاثیر مثبت آن در افزایش بازیابی و عیار کنسانتره حاصل موجب شده است که استفاده از آن در مواد معدنی دیگر و در مدارهای رافر، رمق‌گیر و شستشو مورد بررسی قرار گیرد. از طرف دیگر بازیابی مواد معدنی از کانسنگ‌های کم عیار و همچنین بازیافت مواد معدنی مفید از باطله‌های کارخانجات فراوری از دیگر زمینه‌های استفاده از روش فلوتاسیون است. در ادامه مروری بر فلوتاسیون ستونی و عملکرد آن در فراوری زغال ارائه می‌شود.

فصل دوم

فلوتاسیون ستونی

۱-۲ مقدمه‌ای بر فلوتاسیون ستونی

فلوتاسیون رایج‌ترین روش جدایش استفاده شده برای شستشوی ذرات ریز زغال، از سال ۱۹۵۰ می‌باشد. شمای کلی سلول فلوتاسیون ستونی در شکل (۱-۲) آمده است. ارتفاع ستون‌های صنعتی معمولاً ۹-۱۵ متر و قطر آنها ۰/۵-۳ متر است که مقطع ستون ممکن است مربع و یا دایره باشد. به غیر از شکل ظاهری، دو مشخصه دیگر ستون را از سایر ماشینهای فلوتاسیون متمایز می‌کند که عبارتند از: سیستم تولید حباب و استفاده از آب شستشو [۷].



شکل (۱-۲) شمای کلی یک ستون فلوتاسیون

حباب‌ها معمولاً از طریق عبور گاز از لوله‌های سوراخ شده روکش‌دار (مانند روکشی از جنس پارچه فیلتر) و یا از لاستیک‌های سوراخ شده ایجاد می‌شوند. آب شستشو معمولاً با استفاده از لوله‌های سوراخ داری که درست در زیر لبه سرریز قرار می‌گیرند به کف اضافه می‌شود. خوراک در فاصله یک سوم از بالای ستون وارد می‌شود و هنگام پایین رفتن در مقابل انبوه حبابهای تولید شده توسط حباب ساز قرار می‌گیرد. حبابها، ذرات قابل شناور شدن را جمع آوری می‌کنند، به همین دلیل به این منطقه از ستون ناحیه جمع‌آوری^۱ گفته می‌شود شکل (۲- ۱). این ناحیه معادل ناحیه بازیابی یا پالپ در سلولهای فلوتاسیون معمولی است. ذرات جمع شده به کفی که توسط آب شستشو پایدار شده است، متصل می‌شوند. نقش اصلی آب شستشو، پاک کردن کف از ذرات بی‌ارزشی است که به همراه آب یا حبابهای هوا بالا آمده و از منطقه جمع‌آوری خارج می‌شوند. از اینرو ناحیه کف^۲، ناحیه شستشو^۳ و تمیز کننده نیز نامیده می‌شود. ایرادهای اصلی فلوتاسیون ستونی، اختلاط در محور ستون، انسداد اسپارژ (حباب‌ساز) و مشکلاتی در مورد ارتفاع ستون در دستگاه می‌باشند [۷]. در چند دهه اخیر تعدادی از محققین و طراحان برای حذف این ایرادها و افزایش بازیابی به وسیله تولید حباب‌های ریزتر، ستون‌هایی را توسعه دادند. برخی از آنها شامل ستون Leeds، ستون Packed، ستون Flotaire، ستون Hydrochem، ستون Jameson، ستون Microcel، ستون Cyclonic و ستون-Cyclo Microbubble است [۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵].

فلوتاسیون ستونی مزیت‌های زیادی در مقایسه با سلول مکانیکی دارد. برخی از ویژگی‌های کنسانتره حاصل از فرآوری در سلول فلوتاسیون ستونی شامل: عیار بالاتر، بازیابی بیشتر، هزینه عملیاتی کمتر و بهبود کنترل عملیات است. اجرای عملیات بهتر سلول فلوتاسیون ستونی در مقایسه با سلول مکانیکی به علت برخی از دلایل شامل: زمان ماند طولانی‌تری از ماده معدنی با ارزش در داخل ستون، جریان

^۱ - Collection Zone

^۲ - Froth Zone

^۳ - Cleaning Zone

مخالف پالپ در برابر حبابهای هوا و آب شستشوی^۴ اضافه شده بر روی کف در ناحیه شستشو است که این آب شستشو در سلول ستونی، امکان تولید زغال با خاکستر کمتر (عیار بالاتر) را فراهم می کند.

۲-۲ پارامترهای عملیاتی سلول فلوتاسیون ستونی

فرایند و اجرای سلول فلوتاسیون ستونی به برخی پارامترهای عملیاتی وابسته است. بنابراین شناخت کلی از این پارامترها برای محصول با عیار و بازیابی مناسب لازم است. پارامترهای عملیاتی ستون شامل نرخ ظاهری آب شستشو، نرخ ظاهری گازدهی^۵، نرخ خوراکدهی^۶، میزان استفاده از کف ساز و کلکتور، ارتفاع کف در ستون، درصد جامد، دانه بندی و غیره است که این پارامترها می توانند بر روی سینیتیک فلوتاسیون تاثیر بگذارند.

۲-۲-۱ زمان ماند

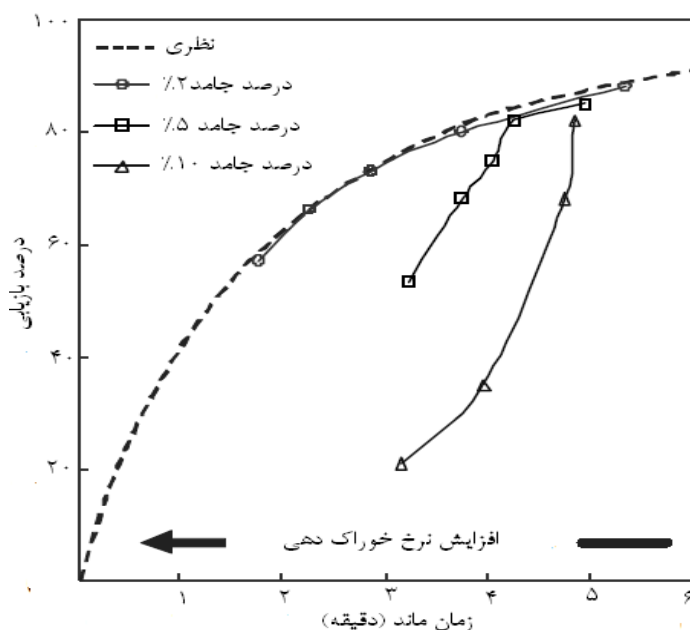
زمان توقف ذرات زغال در داخل ستون را زمان ماند می گویند. به عبارت دیگر زمان قابل توجهی برای برخورد و چسبیدن ذرات زغال با حبابهای هوا در داخل ستون مورد نیاز هست که این زمان را زمان ماند گویند. زمان ماند ذرات زغال در ستون، یکی از عوامل مهم کنترل کننده بازیابی و عیار می باشد. زمان ماند مورد نیاز برای فراوری زغال توسط فلوتاسیون مکانیکی ۳/۵ الی ۴ دقیقه پیشنهاد شده است. سلول فلوتاسیون ستونی به دو برابر زمان ماند سلول مکانیکی نیاز دارد. بنابراین زمان ماند سلولهای فلوتاسیون ستونی ۷ تا ۸ دقیقه است [۱۶ و ۱۷].

شکل (۲-۲) رابطه بین بازیابی و زمان ماند مطالعه موردی برای فلوتاسیون زغال توسط سلول ستونی را نشان می دهد.

^۴ - Wash Water

^۵ - Air Rate

^۶ - Feed Rate



شکل (۲-۲) اثر زمان ماند بر بازیابی زغال برای درصد جامدهای مختلف [۱۸]

ملاحظه می‌شود که ابتدا با افزایش زمان ماند، بازیابی به سرعت زیاد می‌شود ولی برای زغال از زمان ماند ۶ دقیقه به بالا در حالت نظری افزایش محسوسی در بازیابی بوجود نمی‌آید بنابراین زمان ماند ۶ دقیقه برای زغال زمان بهینه خواهد بود.

۲-۲-۲ نرخ خوراک‌دهی

افزایش در میزان خوراک‌دهی تأثیر مستقیم بر روی زمان ماند ذرات می‌گذارد و باعث کاهش زمان ماند می‌شود که اثر نرخ خوراک‌دهی بر روی زمان ماند برای مطالعه موردی شکل (۲-۲) نیز گویای این مطلب است که به منظور کاهش زمان ماند در این سری از آزمایشها نرخ جریان حجمی از خوراک به داخل ستون به طور پیوسته و یکنواخت افزایش یافته است. بعلاوه افزایش نرخ خوراک‌دهی که باعث افزایش جریان رو به پایین پالپ می‌شود سرعت بالا آمدن حبابها را کاهش می‌دهد که به تبع آن میزان ماندگی گاز^۷ افزایش می‌یابد [۱۹].

^۷- Gas Holdup

۲-۲-۳ نرخ آب شستشو

آب شستشو مقدار آبی است که از بالای ستون بر روی کف به منظور شستشو و تامین آب کف بر روی کف اضافه می‌شود. استفاده از آب شستشو، باعث افزایش عیار می‌شود و در واقع آب شستشو ذرات آبدوست که در ناحیه پشت سر حباب صعود کرده‌اند را شستشو داده و به ناحیه جمع‌آوری بر می‌گرداند [۲۰]. همچنین آب شستشوی خیلی بالا ممکن است به علت بهم‌آمیختگی محوری کف، تاثیر معکوس بر روی عیار کنسانتره داشته باشد و منجر به کاهش کارایی آب شستشو شود [۲۱]. آب شستشو به دو بخش تقسیم می‌شود: یک قسمت به سرریز راه پیدا می‌کند و ذرات جمع شده را خارج می‌کند و قسمت دیگر به سمت کف و ناحیه جمع‌آوری پایین رفته و عمل شستشوی کف را انجام می‌دهد. آبی که به طرف پایین حرکت می‌کند آب بایاس نامیده می‌شود. برای موثر بودن عمل شستشو، وجود آب بایاس رو به پایین الزامی است که به آن بایاس مثبت گفته است. زمانی که بایاس مثبت است، نرخ جریان آب باطله بیش از نرخ جریان آب خوراک می‌باشد. بایاس منفی جریانی است که گاهی به دلایل مختلف از جمله وجود مقدار بیش از حد نرخ گازدهی در ستون بوجود می‌آید. در این حالت آب از ناحیه جمع‌آوری وارد ناحیه کف شده و به علت داشتن شدت زیاد، به آب بایاس و آب شستشو غلبه کرده و از سرریز خارج می‌شود. در این صورت شرایط کار ستون از حالت عادی خارج شده و باید به حالت تعادل باز گردد [۷].

۲-۲-۴ نرخ گازدهی

نرخ یا سرعت ظاهری گاز عبارت است از نسبت دبی حجمی گاز به سطح مقطع ستون و یا [۷]:

$$J_g = \frac{Q_g}{A_c}$$

مقدار نرخ جریان هوادهی باید به اندازه‌ای باشد که مساحت سطح حباب مناسب را برای حمل ذرات به ناحیه شستشو فراهم کند. نرخ شناوری زغال (بازیابی) با کاهش نرخ جریان هوادهی کاهش می‌یابد [۲۲]. با زیاد شدن نرخ ظاهری گازدهی میزان ماندگی گاز نیز افزایش می‌یابد ولی باید توجه

داشت که افزایش نرخ ظاهری گازدهی باعث بوجود آمدن بایاس منفی نشود. همچنین نرخ گازدهی بسیار کم باعث ریزش کف می شود که در این صورت ارتفاع کف به شدت کاهش می یابد [۱۹].

۲-۲-۵ مقدار معرف های شیمیایی

تعیین نوع کلکتور و مقدار آن از پارامترهای مهم در فلوتاسیون می باشد. کلکتور با آبران نمودن سطح کانی ها آن را آماده شناورسازی در سلول می نماید. افزایش غیر بهینه مواد شیمیایی نه تنها در بازدهی فلوتاسیون موثر است بلکه هزینه های عملیاتی را نیز افزایش می دهد. محاسبه مقدار بهینه مواد شیمیایی مستلزم انجام آزمایشها و بررسی آماری طراحی آنهاست. در فلوتاسیون زغال تاثیر کف ساز بمراتب پر اهمیت تر از تاثیر کلکتور است (در خصوص خاکستر و بازیابی). به کارگیری ترکیبی از کف- ساز و کلکتور در بهبود بازیابی پیشنهاد شده است [۱].

۲-۲-۶ زمان آماده سازی

بعد از افزایش مواد شیمیایی به محلول مدت زمانی لازم است تا تماس بین ذرات معلق و محلول که حاوی مواد شیمیایی است صورت گیرد. این زمان را زمان آماده سازی می گویند و بر اساس ماهیت ماده معدنی و مواد شیمیایی و شرایط شیمی محلول این زمان ممکن است از ۵ تا ۲۰ دقیقه در فلوتاسیون غیر پیوسته متغیر باشد [۱].

۲-۲-۷ درصد جامد پالپ

فلوتاسیون زغال با غلظت ۱۰ تا ۱۲ درصد جامد صورت میگیرد و وابسته به میزان مصرف کف ساز و با افزایش درصد جامد مصرف کف ساز نیز افزایش می یابد. در مورد ذرات درشت میزان درصد جامد افزایش می یابد و بیش از ۲۰ درصد جامد، فلوتاسیون را با مشکلات زیادی مواجه می سازد. حد فوقانی و بهینه ۱۸ درصد است و کمتر از ۳ درصد نیز پیشنهاد نمی شود [۲].

۲-۲-۸ ارتفاع کف

با افزایش ارتفاع کف به قیمت کاهش مقدار بازیابی، عیار افزایش پیدا می کند. از طرفی افزایش بیش از اندازه ارتفاع کف (مثلاً بالای ۱/۵ متر) باعث سنگین شدن کف و به تبع آن باعث ریزش آن می شود.

همچنین کم بودن بیش از اندازه ارتفاع کف نیز احتمال از بین رفتن سطح مشترک بین ناحیه شستشو و ناحیه جمع آوری را افزایش می‌دهد که با از بین رفتن این سطح مشترک، ستون عملاً کارایی خود را از دست می‌دهد.

۹-۲-۲ ماندگی گاز

زمانی که گاز داخل ستون می‌شود، پالپ جابجا می‌گردد که این بخش از حجم پالپ جابجا شده ماندگی گاز نامیده می‌شود. در واقع ماندگی گاز، میزان گاز موجود در سیستم گاز-مایع و یا گاز پالپ را نشان می‌دهد [۷].

۱۰-۲-۲ اندازه‌گیری ماندگی گاز

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری ماندگی گاز وجود دارد که در اینجا حالتی که کاربرد عملی بیشتری دارد، یعنی سیستم گاز-پالپ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت مولفه دینامیکی فشار، ناچیز فرض شده و بار متصل به حبابها نیز کوچک در نظر گرفته می‌شود که در نتیجه آن دانسیته مجموع حباب-ذره قابل نظر کردن خواهد بود. با توجه به شکل (۲-۳) فشار در نقاط A و B به صورت زیر بدست می‌آید.

$$P_A = \rho_{sl} g L_A (1 - \varepsilon_{gA})$$

و

$$P_B = \rho_{sl} g L_B (1 - \varepsilon_{gB})$$

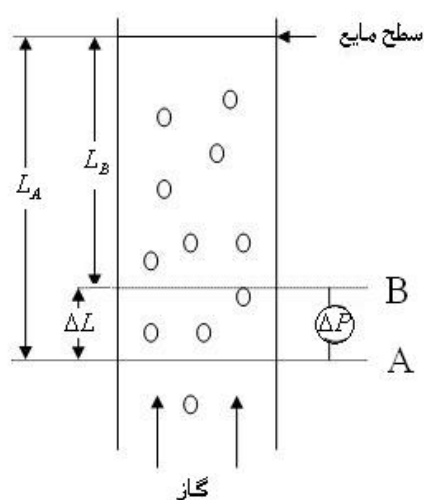
که در آنها، ρ_{sl} دانسیته پالپ، ε_{gA} و ε_{gB} به ترتیب ماندگی گاز در بالای نقاط A و B می‌باشد. بنابراین اختلاف فشار بین نقاط A و B عبارت است از:

$$\Delta P = \rho_{sl} g \Delta L (1 - \varepsilon_g)$$

در این رابطه، ε_g مقدار ماندگی گاز بین نقاط A و B است. ε_g را از رابطه قبل می‌توان به این صورت بدست آورد:

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_{sl} g \Delta L}$$

باید توجه داشت که ε_g بدست آمده تنها برای فاصله ΔL می‌باشد [۷].



شکل (۲-۳) اندازه‌گیری ماندگی گاز با استفاده از اختلاف فشار [۷]

۳-۲ مطالعات پیشین

تعداد زیادی از محققین کارایی فلوتاسیون ستونی را بر روی جدایش زغال با درصد خاکستر بالا بررسی کرده‌اند که به تعدادی از آنها در جدول (۲-۱) اشاره شده است

جدول (۲-۱) پیشینه مطالعات

مرجع	هدف از مطالعه	خلاصه‌ای از مطالعه	نتیجه مطالعه
[۲۳] Jena 2008	افزایش قابلیت شناوری زغال‌های ساب‌بیتومینه اکسیده هند با ۴۲٪ خاکستر و ابعاد کوچکتر از ۱ میلی‌متر	بررسی و مقایسه الکل‌های چربی‌دار ethanol و butanol برای کاهش اکسایش سطح زغال و تاثیر بر قابلیت شناوری.	محصولی با ۳۱٪ خاکستر و ۸۰/۴٪ بازیابی توسط فلوتاسیون مکانیکی و همچنین محصولی با ۲۶/۶٪ خاکستر و بازیابی ۶۶/۵٪ توسط فلوتاسیون ستونی حاصل شده است.
[۲۰] Hacifazlioglu 2007	شستشو زغال معدن Zonguldak ترکیه با ۴۷/۵٪ خاکستر و ابعاد کوچکتر از ۱۳۰ میکرون توسط فلوتاسیون ستونی و مکانیکی	بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی فلوتاسیون ستونی برای دستیابی به جدایش مطلوب و مقایسه سلول فلوتاسیون ستونی و سلول فلوتاسیون مکانیکی	محصولی با ۱۵/۶٪ خاکستر و بازیابی ۵۰/۹۲٪ توسط فلوتاسیون ستونی حاصل شده است و درصد خاکستر زغال توسط فلوتاسیون مکانیکی به ۱۹/۵۲٪ با بازیابی ۸۲/۳۲٪ کاهش یافته است
[۲۴] Hacifazlioglu 2007	شستشو زغال بیتومینه معدن Zonguldak ترکیه با ۴۳/۵٪ خاکستر و ابعاد کوچکتر از ۱۵۰ میکرون توسط سلول فلوتاسیون Jameson	بهینه‌سازی مشخصات (پارامترهای طراحی) سلول فلوتاسیون Jameson و پارامترهای عملیاتی فلوتاسیون مثل، مقدار کلکتور، مقدار کف‌ساز و درصد جامد برای دستیابی به جدایش مطلوب	روند تاثیر پارامترهای مورد بررسی بر درصد خاکستر و درصد بازیابی که تحت شرایط بهینه زغال با ۱۴/۹۰٪ خاکستر و بازیابی ۷۴/۲۰٪ حاصل شده است.
[۲۵] Jena 2008	شستشو نرمه‌های زغال کک شو Bhojudih هند با ۲۴/۴٪ خاکستر و ابعاد کوچکتر از ۳۰۰ میکرون توسط فلوتاسیون ستونی و مکانیکی	تاثیر پارامترهای عملیاتی مختلف برای ارزیابی جدایش توسط هر دو فلوتاسیون مکانیکی و ستونی	نتایج حاصل از فلوتاسیون مکانیکی زغال با ۱۴/۴٪ خاکستر و بازیابی ۷۸٪ و درصد خاکستر زغال توسط فلوتاسیون ستونی با ۱۰/۱٪ و بازیابی ۷۲٪ کاهش بیشتری را نشان میدهد
[۲۶] Demirbas 2002	استفاده از روش‌های مختلف جهت حذف سولفور پیریت از جمله فلوتاسیون ستونی	بررسی و مقایسه روش‌های مختلف جهت حذف سولفور پیریت	با استفاده از روش فلوتاسیون ستونی امکان حذف سولفور بالا از زغال لیگنیت امکان پذیر است

ادامه جدول پیشینه مطالعات

مرجع	هدف از مطالعه	خلاصه‌ای از مطالعه	نتیجه مطالعه
[۲۷] Çınar 2009	رفتار قابلیت شناوری زغال‌های لیگنیتیک هیدروفیلیک Soyak ترکیه برای ابعاد کوچکتر از ۲۰۰ میکرون	بررسی تاثیر عملیات حرارتی دما پائین و بدون دما بر روی قابلیت شناوری با استفاده از سلول فلوتاسیون ستونی و مکانیکی	بهبود در بازیابی و درصد خاکستر با استفاده از عملیات حرارتی دمای پایین حتی بدون استفاده از کلکتور در هر دو سلول فلوتاسیون ستونی و مکانیکی
[۲۸] Naik 2004	بهینه‌سازی فلوتاسیون زغال با استفاده از طراحی آماری آزمایشها برای زغال‌های غیر کک شو با ۳۷/۷٪ خاکستر برای ابعاد کوچکتر از ۶۰۰ میکرون با استفاده از فلوتاسیون مکانیکی	مطالعه تاثیر ۵ پارامتر عملیاتی شامل، مقدار کلکتور، مقدار کف‌ساز MIBC، pH، اندازه ذرات و تاثیر سدیم سلیکات با استفاده از طرح فاکتوریل ۲ ^۵	با شناخت اینکه مقدار کلکتور بیشترین تاثیر را در بین عوامل دارد، تحت شرایط بهینه بازیابی ۸۸٪ برای درصد خاکستر ۲۵/۴ حاصل شده است.
[۲۹] Shukla 2010	بررسی و مطالعه ماندگی گاز در سلول فلوتاسیون ستونی توسط زغال	بررسی تاثیر متغیرهای فرایند شامل نرخ خوراک-دهی، نرخ گازدهی، غلظت کف‌ساز و درصد جامد بر ماندگی گاز	نتایج نشان داده است که ماندگی گاز در ناحیه جمع آوری تحت تاثیر هر دو نرخ هوادهی و نرخ خوراک‌دهی است. هرچند اثر نرخ خوراک در برابر نرخ گازدهی ناچیز است اما هنگامی که نرخ خوراک-دهی از ۱ cm/s به ۲ cm/s تغییر می‌کند بالای ۶ درصد تغییر در ماندگی گاز اتفاق افتاده است همچنین اضافه کردن کف‌ساز تاثیر مثبت را نشان داده است در حالی که با افزایش درصد جامد ماندگی گاز کاهش یافته است
[۳۰] Banisi 1995	بررسی و مطالعه ماندگی گاز در سلول فلوتاسیون ستونی	بررسی تاثیر متغیر-های فرایند شامل، درصد جامد، اندازه ذرات، خاصیت آبرانی و آبدوستی ذرات بر ماندگی گاز	نتایج نشان داده است که حضور جامد اثر معنی‌داری بر ماندگی گاز دارد و با افزایش غلظت جامد منجر به کاهش آن می‌شود و افزایش اندازه ذرات نیز باعث کاهش ماندگی گاز می‌شود همچنین با انجام تست بر دو نمونه هیدروفوبیک و هیدروفیلیک زغال و کلسیت نشان داده شده است که با خاصیت هیدروفوبیک منجر به کاهش ماندگی گاز می‌شود

ادامه جدول پیشینه مطالعات

مرجع	هدف از مطالعه	خلاصه‌ای از مطالعه	نتیجه مطالعه
[۳۱] کر ۱۳۸۶	قابلیت شستشوپذیری زغالسنگ البرز شرقی با ۳۶٪ خاکستر برای ابعاد کوچکتر از ۶۰۰ میکرون فلوتاسیون ستونی	بهینه‌سازی فرایند با هدف شناخت عوامل موثر و فهم بیشتر رابطه بین آنها در فرآیند شستشوی زغال توسط ستون	پاسخ آزمایشها توسط نرم افزار با ۹/۱۸٪ خاکستر و بازیابی ۸۶/۰۸٪ پیش‌بینی گردیده است
[۳۲] سمیعی بیرق و آرام ۱۳۸۹	استحصال زغال‌سنگ از باطله فلوتاسیون کارخانه زغالشویی البرز شرقی با ۵۹/۶٪ خاکستر برای ابعاد کوچکتر از ۵۰۰ میکرون به روش فلوتاسیون ستونی	بهینه سازی پارامترهای عملیاتی شامل نرخ خوراک، نرخ ته ریز، نرخ هوا و نرخ آب شستشو و ثابت نگه داشتن مقادیر معرفهای نفت، سیلیکات سدیم و کف ساز برای شستشوی باطله زغال‌سنگ	بهترین مقادیر بازیابی مواد قابل احتراق ۳۲/۱۱٪ بدست آمد. قابل ذکر است که خاکستر زغال‌سنگ برای محدوده دانه‌بندی ۵۰۰- میکرون از ۵۹/۶ درصد به ۱۷/۳۵ درصد کاهش یافت
[۳۳] جان‌نثار- ملکوتی و جودکی ۱۳۸۷	بازیابی زغال از باطله جیگ کارخانه زغالشویی انجیر تنگه (البرز مرکزی) با متوسط ۵۸٪ خاکستر برای دو دانه‌بندی زیر ۶۰۰ میکرون و زیر ۱۰۰۰ میکرون به روش فلوتاسیون	امکان تهیه زغالسنگ با خاکستر کمتر از ۱۱ درصد از این باطله ها و بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر در فلوتاسیون این ماده بررسی شده است	نتایج حاصل از این آزمایش ها دلالت بر آن داشت که با اعمال یک مرحله شستشو بر روی کنسانتره حاصل از مرحله رافرد (در آزمایش تحت شرایط بهینه)، زغالی با خاکستر ۱۰/۲۴ درصد و بازیابی ۴۲/۳۱٪ برای دانه بندی زیر ۱۰۰۰ میکرون و زغال با خاکستر ۱۱/۲۴ درصد و بازیابی ۴۸/۲۰٪ برای دانه بندی زیر ۶۰۰ میکرون به دست می‌آید

فصل سوم

معرفی کارخانه البرز مرکزی

۳-۱ مقدمه

کارخانه زغالشویی شرکت البرز مرکزی در سال ۱۳۶۷ در شهر زیرآب در ۴۵ کیلومتری جنوب شهرستان قائم شهر و در محل انجیرتنکه احداث شده است. کارخانه مذکور با هدف شستشو و تغلیظ (کاهش خاکستر) زغالسنگ‌های استخراج شده از معادن کارمزد و کارسنگ بوده و برای تولید زغالسنگ با پارامترهای مطلوب برای مصرف در کارخانه ذوب آهن اصفهان توسط کارشناسان روسی طراحی شده است [۳۴]. کلیه تجهیزات کارخانه برای فرآوری زغالسنگ در یک ساختمان چهار طبقه قرار گرفته است. هدف از اجرای پروژه تاسیس کارخانه زغالشویی زیرآب، شستشوی زغالسنگ استخراجی از معادن کارمزد و کارسنگ بوده که بعدها با گسترش معدن کیاسر، زغالسنگ استخراجی از این معدن نیز برای شستشو به کارخانه زغالشویی زیرآب آورده شد. البته زغالسنگ‌های استخراج شده از بعضی معادن متفرقه نیز برای شستشو وارد این کارخانه می‌شوند. فرآوری زغالسنگ در این واحد زغالشویی شامل سه روش عمده سنگجوری، ثقلی (جیگ) و فلوتاسیون است. زغال ورودی به این کارخانه توسط سرندهای ثابت و لرزان به سه بخش تقسیم می‌شوند [۴]:

۱- ذرات درشت‌تر از ۸۰ میلی‌متر (خوراک قسمت سنگ‌جوری)، ۲- ذرات بین ۸۰-۰/۵ میلی‌متر (خوراک قسمت جیگ)، ۳- ذرات ریزتر از ۰/۵ میلی‌متر (خوراک قسمت فلوتاسیون).
محصول کارخانه (کنسانتره) نیز با توجه به اندازه ذرات، فرآیند اعمال شده و نحوه آگیری آنها از چند قسمت از کارخانه خارج می‌شود:

۱- کنسانتره با ابعاد درشت‌تر از ۸۰ میلی‌متر (محصول قسمت سنگ‌جوری)، ۲- کنسانتره با ابعاد ۸۰-۱۳ میلی‌متر (محصول درشت قسمت جیگ)، ۳- کنسانتره با ابعاد ۱۳-۰/۵ میلی‌متر (محصول ریز بخش جدایش جیگ که توسط سانتریفوژ آگیری می‌شود)، ۴- کنسانتره با ابعاد ریزتر از ۰/۵ میلی‌متر (محصول بخش فلوتاسیون).

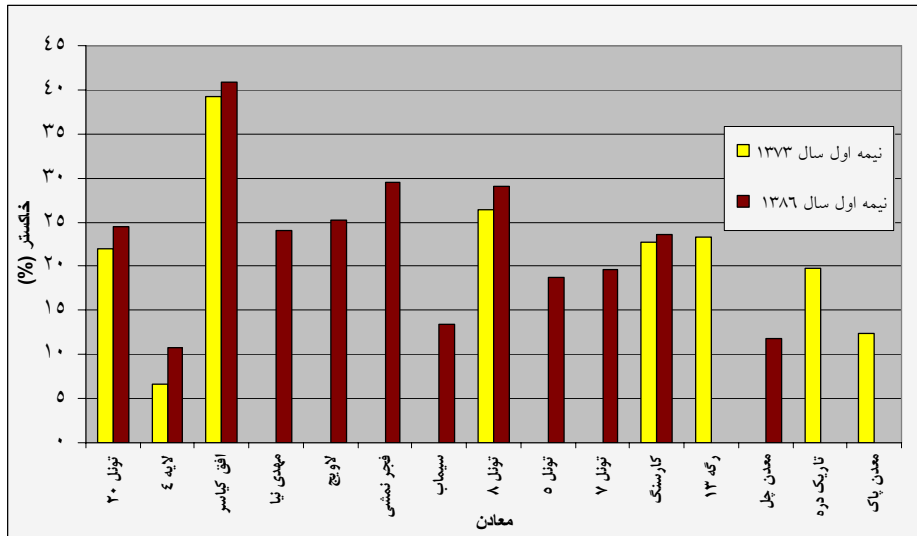
آب مصرفی به طور متوسط ۴۰ متر مکعب در ساعت و از سه محل، آب چاه شش رودبار، آب رودخانه دلیم، آب برگشتی به کارخانه تامین می‌گردد و برق مصرفی کارخانه حدوداً یک مگاوات در ساعت

می‌باشد. بار ورودی به کارخانه دارای خاکستر تقریبی ۲۷-۳۳ درصد است، که پس از شستشو در کارخانه به ۱۱-۱۰ درصد کاهش داده شده و به ذوب آهن اصفهان ارسال می‌شود [۴].

ظرفیت اسمی کارخانه طبق طراحی روسها شستشوی حدود ۵۰۰۰۰۰ تن در سال زغال خام بوده است. در حال حاضر به علت کاهش استخراج از معادن و عدم وجود بار ورودی کافی با ظرفیت سالانه ۱۲۰۰۰۰ تن در سال کار می‌کند. تجهیزات کارخانه شامل سرنده، جیگ، کلاسیفایر، نوار نقاله، فیلتر گردان، سلول‌های فلوتاسیون، تیکنر و الواتر است. کنسانتره نهایی باید مشخصات قابل قبول زیر را داشته باشد [۳۵]: رطوبت: ۸-۶ درصد، خاکستر: ۱۱-۱۲ درصد، مواد فرار: ۳۰-۲۸ درصد، گوگرد: ۱ درصد، خاصیت کک شوندگی (نمره کک): ۸-۶، فسفر: ۱ درصد.

۲-۳ نگاهی به خوراک کارخانه

با توجه به ارتباط مستقیم هر بخش از کارخانه زغالشویی با سایر قسمت‌ها، بار اولیه ورودی باید دارای دامنه تغییرات مشخص باشد. این مهم از اساسی‌ترین موارد مورد رعایت در طراحی اولیه کارخانه زغالشویی است. جهت رعایت این امر در معادن بخش کنترل سنگ و در کارخانه‌های فرآوری، مخازن (بونکر) بزرگ پیش از ورود خوراک به کارخانه، هرکدام به طور جداگانه، وظیفه کنترل عیار خوراک ورودی را به عهده دارند. دلیل این امر نیز جلوگیری از اختلال در امر تولید و سازگار کردن خوراک کارخانه با شرایط کاری کارخانه است. در کارخانه زغالشویی البرز مرکزی همانند سایر کارخانه‌های فرآوری این وظیفه بر عهده بخش کنترل کیفیت کارخانه است. که در طول روز از بخش‌های مختلف کارخانه نمونه برداری کرده و اطلاعات مربوط به درصد خاکستر را در گزارش روزانه خود ارائه می‌دهد. به منظور تعیین مقدار تغییرات صورت گرفته در خوراک کارخانه در حال حاضر و به دلیل عدم وجود اطلاعات مربوط به سال‌های آغازین، قدیمی‌ترین اطلاعات موجود را به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شده است. بنابراین مقایسه‌ای بین خوراک کارخانه در سال‌های اولیه تاسیس (۱۳۷۳) و شرایط کارخانه در سال (۱۳۸۶) انجام گرفته است.

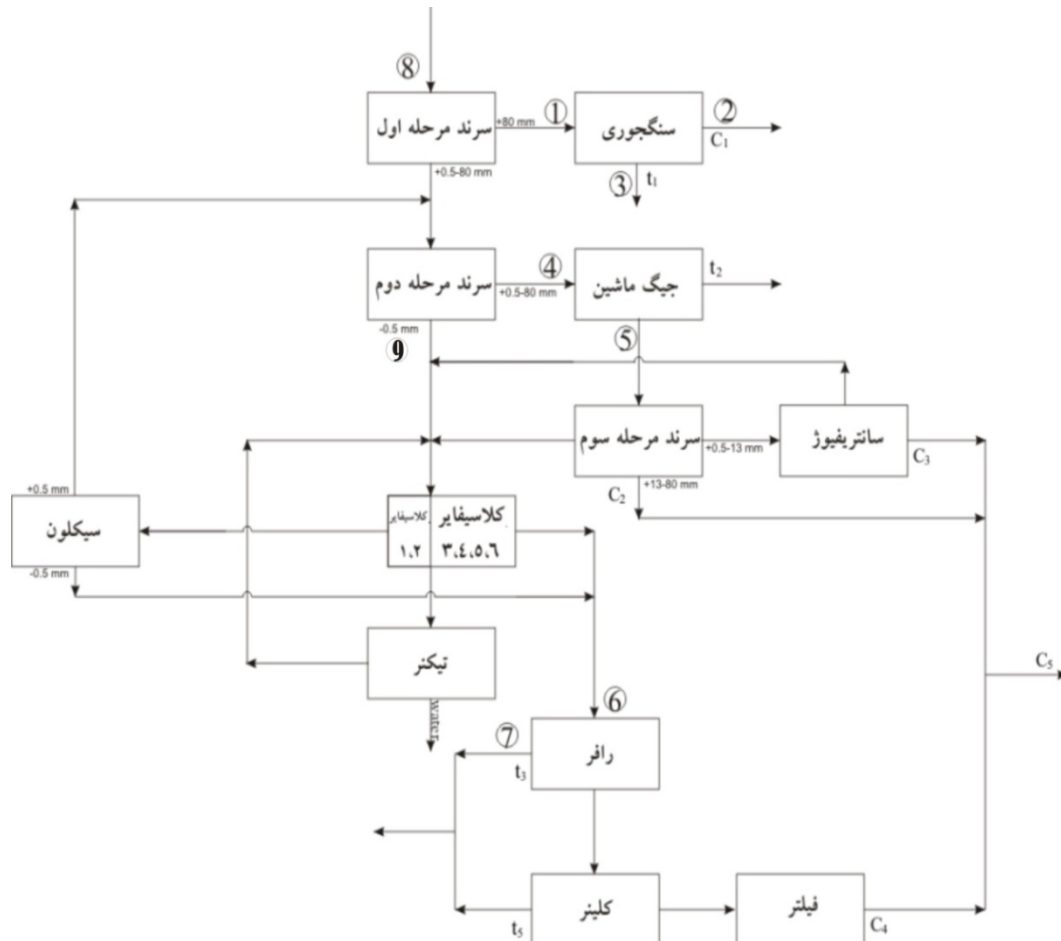


شکل (۳-۱) مقایسه بین درصد خاکستر معادن خوراک ده به کارخانه در سال‌های ۱۳۷۳ و ۱۳۸۶ [۳۶]

از شکل (۳-۱) دو نکته برداشت می‌شود نخست آنکه همانطور که در شکل دیده می‌شود در سال ۱۳۷۳، خوراک کارخانه از ۸ معدن، ۲۰، لایه ۴، کیاسر، ۸ تونل، کارسنگ، رگه ۱۳، تاریک دره و معدن پاک تامین می‌شد. در حالی که در سال ۱۳۸۶ کارخانه از ۱۲ معدن، ۲۰، لایه ۴، کیاسر، مهدی نیا، لاویج، فجر نمشی، سیماب، ۸ تونل، ۵، تونل ۷، کارسنگ و معدن چل زغال می‌پذیرد. از آنجایی که طی این سالها (۷۳-۸۶) سه معدن از لیست معادن تامین کننده زغال کارخانه خارج شده و از طرفی ۷ معدن به این لیست اضافه شده است. در واقع اختلاف خوراک کارخانه در این دو سال ۱۰ معدن می‌باشد. این بدان معناست که خوراک کارخانه دچار تغییرات فراوانی شده است. نکته دوم این است که با دقت در معادنی که در طی این سالها به طور مداوم به کارخانه خوراک داده‌اند (تونل ۲۰، لایه ۴، کیاسر، ۸ تونل و کارسنگ) این نتیجه برداشت می‌شود که به مرور زمان خاکستر معادن افزایش می‌یابد [۳۶]. از طرف دیگر یکی از عمده ترین مشکلات کارخانه نبود یک سیستم مشخص برای مخلوط کردن^۱ و همگن سازی خوراک کارخانه است که در صورت وجود سیستم مشخص برای مخلوط کردن و نسبت اختلاط مناسب از هر کدام از معادن می‌توان بازیابی کارخانه را به

^۱ - Blend

۹۵٪ و خاکستر ۱۲٪ رساند [۳۷]. در شکل (۳-۲) فلوشیت کارخانه البرز مرکزی را نشان می‌دهد. به منظور بررسی عملکرد کارخانه و هر بخش به خصوص جیگ ماشین و فلوتاسیون باید برای هر دستگاه از سه بخش ورودی، باطله و کنسانتره نمونه برداری شود و درصد خاکستر و رطوبت آنها تعیین شود؛ تا بتوان قضاوت صحیحی در مورد کارایی وسایل و کارخانه ارائه نمود.



شکل (۳-۲) فلوشیت کارخانه البرز مرکزی

هر یک از نقاط نشان داده شده در فلوشیت کارخانه بیانگر بخشی از کارخانه هستند که در زیر به آنها اشاره شده:

نقطه ۱: ذرات درشت‌تر از ۸۰ میکرومتر خوراک اولیه که خود خوراک بخش سنگجوری است. نقطه ۲: کنسانتره بخش سنگجوری، نقطه ۳: باطله سنگجوری، نقطه ۴: سرریز سرنند مرحله دوم، نقطه ۵: کنسانتره جیگ، نقطه ۶: ورودی بخش فلوتاسیون، نقطه ۷: باطله رافر (۶ سلولی)، نقطه ۸: خوراک اولیه کارخانه پس از اختلاط، نقطه ۹: ته ریز سرنند مرحله دوم (۵/۰ - میلی‌متر).

خلاصه نتیجه بعمل آمده در رابطه با بهینه‌سازی خطوط تولید کارخانه نشان می‌دهد که تغییرات معنی‌داری در خوراک و محصولات جیگ صورت پذیرفته که می‌تواند ناشی از تغییرات کمی و کیفی خوراک طی این سالها و همچنین استهلاک جیگ ماشین باشد.

فصل چهارم

آزمایشهای فلوتاسیون

مکانیکی

۱-۴ مقدمه

اجرای عملیات فلوتاسیون ستونی وابسته به برخی پارامترها مانند نرخ گازدهی، نرخ خوراک‌دهی، ارتفاع کف ستون، نرخ آب شستشو، درصد جامد و دانه‌بندی و مقدار و نوع معرف‌های شیمیایی است و این پارامترها می‌توانند بر روی سینیتیک فلوتاسیون تاثیر بگذارند. اثر مقدار و نوع معرف‌ها (کلکتورها و کف‌سازها) بر اجرای عملیات فلوتاسیون ستونی تقریباً مشابه با سلول‌های مکانیکی است [۲۵]. در مطالعات متعدد نشان داده شده است که مقدار و نوع معرف‌هایی که بهترین کارایی را در فلوتاسیون مکانیکی ارائه می‌کنند، می‌توانند به عنوان معرف در فلوتاسیون ستونی استفاده شوند [۳۸-۴۰]. در نتیجه در این تحقیق، پیش از انجام آزمایشهای فلوتاسیون ستونی، حدود نوع و مقدار کلکتور و کف‌سازی که بیشترین بازیابی، کمترین درصد خاکستر و بیشترین کارایی جدایش را برای باطله فراهم می‌کنند، با استفاده از فلوتاسیون مکانیکی به عنوان هدف انتخاب شد. در واقع هدف از اجرای سلول فلوتاسیون مکانیکی در این سری از آزمایشها در جهت بهینه‌سازی سه پارامتر سلول فلوتاسیون ستونی (مقدار کلکتور، مقدار MIBC، و نوع کلکتور) که نقش خیلی مهم و معنی‌داری را در فلوتاسیون ستونی بازی می‌کنند است.

به منظور افزایش تماس بین ذرات زغال و حباب هوا، از کلکتور استفاده می‌شود با وجودی که زغال ذاتاً خواص آبرانی دارد ولی به دلیل پوشش‌دهی نقاط آبگیر در سطح زغال، باید از این مواد استفاده شود. کلکتورها معرف‌هایی هستند که فیلم هیدروفوبیک روی ذرات مواد معدنی ایجاد می‌کنند. رایج‌ترین نوع کلکتور برای فلوتاسیون زغال گازوئیل و نفت هستند که مقدار مصرف آن از ۲۰ تا ۲۵۰۰ g/t می‌باشد. زغال‌های با عیار بالاتر ممکن است نیاز به کلکتور نداشته باشند اما زغال با عیار پایین ممکن است به اندازه ۱۵۰۰ g/t از زغال نیاز به کلکتور داشته باشد و زغال اکسیده ممکن به مقدار ۲۵۰۰ g/t به کلکتور نیاز داشته باشد [۲۲]. هدف از بکارگیری کف‌ساز، ایجاد پایداری کف در سطح سلول است. معروف‌ترین کف‌سازها برای فلوتاسیون زغال روغن کاج و MIBC (متیل ایزو بوتیل کربونیل) است.

این مواد در سطح زغال جذب نمی‌شوند و بنابراین خواص کلکتوری ندارند. اصولاً مقدار مصرف آنها از ۴۵ تا ۲۲۵ گرم بر تن ماده معدنی است [۲].

آزمایشها برای بررسی تاثیر هر یک از پارامترها و تعامل بین آنها برای هر دو سری از آزمایشهای سلول فلوتاسیون مکانیکی و ستونی توسط نرم افزار DX7 اجرا شد. مقدمه‌ای بر طراحی آماری آزمایشها در پیوست ذکر شده است.

۲-۴ روش اجرای آزمایشها فلوتاسیون مکانیکی

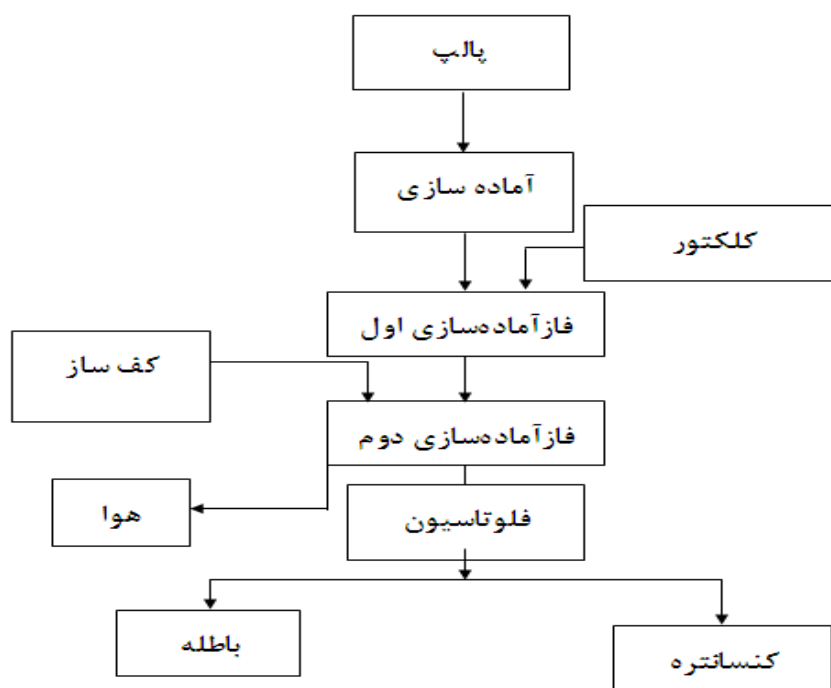
۱-۲-۴ روش انجام آزمایش فلوتاسیون مکانیکی

آزمایشها با استفاده از ماشین فلوتاسیون آزمایشگاهی با ظرفیت ۱ لیتر از نوع دنور^۱ انجام شد. درصد جامد پالپ در ۱۰٪ ثابت نگه داشته شد. پارامترهای عملیاتی مانند سرعت چرخش روتور سلول و pH و زمان آماده‌سازی و زمان فلوتاسیون برای همه آزمایشها به منظور تعیین مقدار و نوع معرفها در فرآوری زغال با استفاده از دستگاه فلوتاسیون مکانیکی ثابت نگه داشته شدند. پالپ ۱۰٪، برای مدت ۱ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰ rpm در سلول فلوتاسیون شکل (۴-۱) مخلوط و آماده‌سازی شد. که سزعت ۱۰۰۰ rpm بر اساس حجم پالپ ۱ لیتری انتخاب شد. سپس مقدار کلکتور تعیین شده در هر سری از آزمایشها اضافه و بعد از ۹۰ ثانیه آماده‌سازی، کف‌ساز تعیین شده اضافه و سپس بعد از ۳۰ ثانیه سوپاپ هوا باز و کف‌گیری به مدت ۳ دقیقه انجام شد. به منظور ثابت ماندن درصد جامد در حین کف‌گیری مقداری آب اضافه می‌شد سپس کنسانتره و باطله بدست آماده فیلتر و خشک و به طور جداگانه برای هر یک از آزمایشها، درصد بازیابی محاسبه شد. زمانهای آماده‌سازی در هر مرحله با توجه به تجربیات گذشته بر روی باطله‌های زغال در نظر گرفته شده است [۳۳]. مراحل عملیات فلوتاسیون را می‌توان به صورت نمودار شکل (۴-۲) نشان داد.

^۱ - Denver D-12



شکل (۴-۱) نمایی از شکل سلول فلوتاسیون مکانیکی مورد استفاده در آزمایشها



شکل (۴-۲) نمودار ساده عملیات فلوتاسیون مکانیکی

۴-۲-۲ نحوه اندازه گیری خاکستر زغال

روش اندازه گیری خاکستر زغال سنگ مانند روش اندازه گیری مواد فرار و در واقع ادامه عملیات محسوب می شود. در این روش ۱ گرم نمونه زغال از کنسانتره را در داخل جام پلاتینی (بوته) قرار داده و جام را

در داخل کوره حرارتی و تحت تاثیر حرارت با شدت ۸۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱۰۰ دقیقه قرار داده می‌شود تا کربن نمونه بسوزد و از محیط خارج گردد. پس از برقراری این شرایط جام حاوی نمونه به منظور خنک کردن و اندازه‌گیری وزن مواد بجا مانده از کوره خارج می‌شود. همچنین به منظور بدست آوردن زمان مناسب سوختن نمونه، ابتدا به مدت ۶۰ دقیقه حدود ۱ گرم از نمونه در دمای ۸۵۰ درجه قرار داده شد و پس از خنک شدن و تعیین وزن، مجدداً به مدت ۲۰ دقیقه در کوره قرار داده شد سپس نمونه از کوره خارج و پس از خنک شدن مجدداً وزن شد. بعد از وزن، اختلاف بین اندازه گیریهای انجام شده در دو مرحله بیشتر از ۰/۰۰۰۵ گرم شد که به منظور کاهش این اختلاف مجدداً نمونه به مدت ۲۰ دقیقه دیگر در کوره قرار داده شد، که نتیجه حاصله این بار اختلاف کمتر از ۰/۰۰۰۵ را نشان داد. بدین گونه ۱۰۰ دقیقه مناسب ترین زمان انتخاب شد.

۴-۲-۳ طراحی آزمایشها

در این سری از آزمایشها سه عامل مقدار MIBC، مقدار کلکتور و نوع کلکتور به عنوان پارامترهای عملیاتی سلول فلوتاسیون مکانیکی و درصد بازیابی، درصد میزان خاکستر محصول و بازدهی جدایش نیز به عنوان پاسخهای آزمایشها در نظر گرفته شدند. در جدول (۴-۱) عوامل مورد مطالعه (معرفها) و تغییرات مربوط به سطوح آنها نشان داده شده است. گازوئیل و نفت و ترکیبی از این دو نوع به عنوان کلکتور در آزمایشها و MIBC به عنوان کف‌ساز استفاده شد.

جدول (۴-۱) پارامترهای انتخابی و سطوح تغییرات

نشانه	عوامل	واحد	سطوح تغییرات
A	نوع کلکتور	-	(O) نفت (O+D) نفت+گازوئیل
B	مقدار کلکتور	g/t	۳۰۰۰
C	مقدار MIBC	g/t	۱۵۰

در این مرحله ضمن آوردن شناخت بهتر عوامل موثر (مقدار و نوع معرفها) و فهم بیشتر رابطه بین آنها با استفاده از روش طراحی فاکتوریل کلی^۲، سطوح عوامل برای بیشینه کردن کارایی جدایش در فلوتاسیون مکانیکی مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایشها، به دلیل کاهش خطاهای ناشناخته با ترتیب کاملاً تصادفی انجام گرفتند. شرایط و پاسخ آزمایشها در جدول (۴-۲) نشان داده شده است.

جدول (۴-۲) طراحی از آزمایشها برای ارزیابی اثری از مقدار و نوع معرفها بر اجرای عملیات فلوتاسیون مکانیکی

Run	A	B	C	درصد بازیابی	درصد خاکستر	کارایی جدایش
۱	D+O	۳۰۰۰	۳۰۰	۵۹/۷	۲۸/۴۷	۴۸/۶۹
۲	O	۳۰۰۰	۱۵۰	۵۸/۲۶	۲۸/۸۳	۴۷/۵۹
۳	D	۲۵۰۰	۱۵۰	۵۰/۹۷	۲۸/۵۰	۴۲/۹۳
۴	D	۳۰۰۰	۳۰۰	۵۰/۰۵	۲۸/۸۷	۴۷/۵۲
۵	D+O	۳۰۰۰	۱۵۰	۵۶/۸۶	۲۸/۸۳	۴۶/۶۹
۶	O	۳۰۰۰	۳۰۰	۶۲/۰۶	۲۹/۲۸	۴۶/۶۹
۷	D	۲۵۰۰	۳۰۰	۵۵/۴۰	۲۸/۰۷	۴۶/۱۱
۸	D+O	۲۵۰۰	۳۰۰	۵۹/۱۳	۲۹/۸۲	۴۷/۶۰
۹	O	۲۵۰۰	۳۰۰	۵۵/۴۹	۲۷/۵۴	۴۶/۴۱
۱۰	D	۳۰۰۰	۱۵۰	۴۹/۶۰	۲۵/۲۱	۴۳/۱۶
۱۱	O	۲۵۰۰	۱۵۰	۵۹/۶۹	۳۰/۱۶	۴۷/۷۵
۱۲	D+O	۲۵۰۰	۱۵۰	۵۶/۹۷	۲۹/۳۳	۴۶/۵۱

همانطور که در جدول (۴-۲) نشان داده شده، دو عامل به صورت عوامل کمی بوده و در دو سطح پایین و بالا تغییر داده شده‌اند و یک عامل به صورت کیفی و در سه سطح تغییر داده شده است. بدین ترتیب بر اساس طرح فاکتوریل کلی تعداد ۱۲ آزمایش طراحی شد.

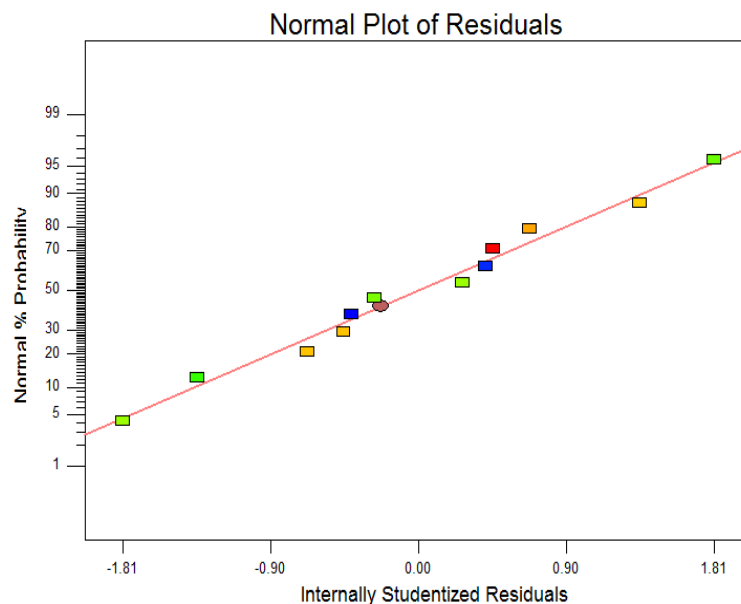
۴-۳ مطالعه و تفسیر داده‌های کارایی جدایش

^۲ - General Factorial

همانطور که قبلاً نیز گفته شد، در این سری از آزمایشها سه عامل مقدار MIBC، مقدار کلکتور و نوع کلکتور به عنوان پارامترهای عملیاتی سلول فلوتاسیون مکانیکی و درصد بازیابی، درصد میزان خاکستر محصول و بازدهی جدایش نیز به عنوان پاسخهای آزمایشها در نظر گرفته شدند. در این بخش به دلیل استفاده از نتایج این سری از آزمایشات فلوتاسیون مکانیکی برای اجرای سلول فلوتاسیون ستونی تفسیر داده‌های پاسخ سوم (کارایی جدایش) مد نظر است.

۴-۳-۱ توزیع نرمال باقیمانده‌ها

نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها بایستی در امتداد یک خط راست باشند. نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌های مورد بررسی، در شکل (۴-۳) آورده شده و چنانچه مشاهده می‌شود در امتداد یک خط راست واقع شده‌اند. بنابراین می‌توان ادعا نمود که مدل برازش شده، توانایی پیش‌بینی پاسخ آزمایش در محدوده پارامترهای مورد بررسی را دارد و با استفاده از این مدل تاثیر هر یک از پارامترها و مقادیر بهینه پاسخ قابل محاسبه است.



شکل (۴-۳) نمودار توزیع نرمال باقیمانده‌ها مربوط به کارایی جدایش

۴-۳-۲ آنالیز واریانس

از آنجایی که مدل برای تعیین ارتباط پارامترها بر روی پاسخ آزمایش ضروری است در نتیجه با انتخاب بهترین مدل و انتخاب بهترین عوامل با در نظر گرفتن سطح اعتماد ۹۵٪ با استفاده از نرم‌افزار Design

Expert7 آنالیز داده‌ها انجام شد و جدول آنالیز آماری واریانس^۳ بدست آمد. در آنالیز واریانس هدف شناسایی عوامل موثر و همچنین ترتیب آنها از نظر اهمیت در پاسخ آزمایشها است. جدول (۴-۳) آنالیز واریانس مربوط به بازدهی جدایش را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۳) آنالیز واریانس مربوط به بازدهی جدایش

منبع	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی	مربع میانگین MS	مقدار F (F-Value)	مقدار F استاندارد	احتمال بزرگتر بودن از F	P-Value
مدل	۳۳/۵۴	۷	۴/۷۹	۴۹/۸۷	۶/۰۹۴	۰/۰۰۱۰	
A	۱۴/۳۸	۲	۷/۱۹	۷۴/۸۶	۶/۹۴۴	۰/۰۰۰۷	
B	۰/۷۷	۱	۰/۷۷	۷/۹۶	۷/۷۰۹	۰/۰۴۷۷	
C	۵/۸۷	۱	۵/۸۷	۶۱/۰۶	۷/۷۰۹	۰/۰۰۱۴	
AC	۱۱/۹۹	۲	۵/۹۹	۶۲/۴۰	۶/۹۴۴	۰/۰۰۱۰	
BC	۰/۵۳	۱	۰/۵۳	۵/۵۵	۷/۷۰۹	۰/۰۷۸۰	
باقیمانده	۰/۳۸	۴	۰/۰۹۶				

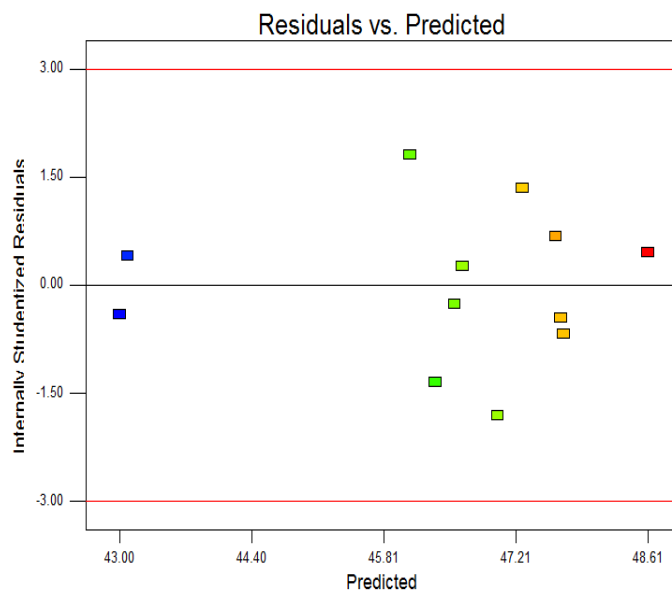
ملاحظه می‌شود که مدل برازش شده از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p\text{-value} < 0.05$) معنی دار می‌باشد و احتمال بزرگتر بودن از F (۰/۰۰۱۰) در مدل کمتر از ۰/۰۵ است. در واقع تنها ۰/۱۰٪ احتمال وجود دارد که F-value بزرگتری بر اساس تاثیر اغتشاشات به وجود آید. همچنین اثر عوامل اصلی، نوع کلکتور (A)، مقدار کلکتور (B) و مقدار MIBC (C) و اثر متقابل بین نوع کلکتور و مقدار MIBC (AC) از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p\text{-value} < 0.05$) در پاسخ آزمایش (بازدهی-جدایش) معنی دار و با اهمیت است.

۳-۳-۴ آنالیز خطاهای پاسخ سوم (کارایی جدایش)

باقیمانده‌ها در واقع اختلاف بین مقادیر بدست آمده به وسیله مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشها است که به منظور بررسی صحت مدل برازش شده در پیش‌بینی پاسخ آزمایش و همچنین

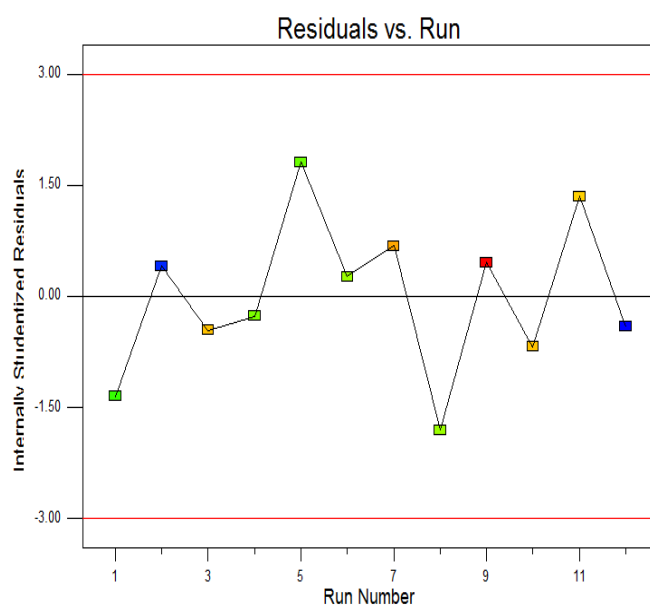
^۲- ANOVA

نحوه انجام آزمایشها لازم است که آنالیز خطاها (باقیماندهها) بررسی شوند بنابراین نتایج حاصله از آنالیز خطاها در شکلهای (۴-۴)، (۴-۵)، (۴-۶) آورده شده است.



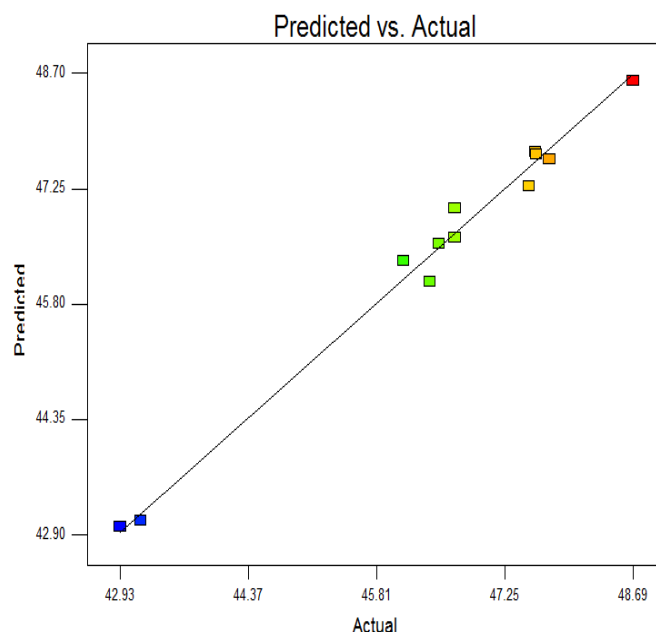
شکل (۴-۴) نمودار تغییرات ماندهها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به کارایی جدایش

شکل (۴-۴) وضعیت ماندهها را با توجه به مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ توسط مدل نشان می‌دهد. آنچه که انتظار می‌رود این است که ماندهها نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ توسط مدل وابسته نباشند و از الگوی خاصی پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده باشند که نمودار شکل (۴-۴) این وضعیت را تایید می‌کند.



شکل (۴-۵) نمودار تغییرات باقیماندهها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به کارایی جدایش

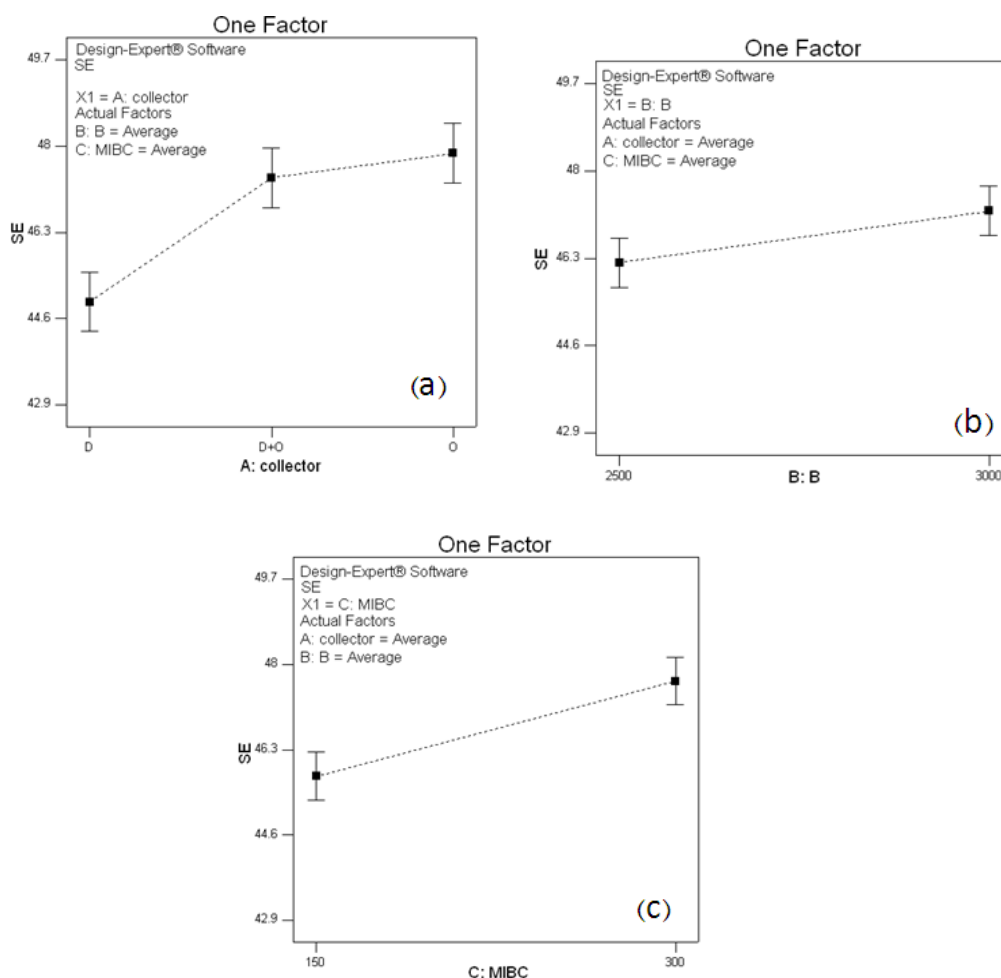
شکل (۴-۵) به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل توالی انجام آزمایشها پرداخته شده است. همانطور که در نمودار نیز مشاهده می‌شود مقادیر مانده‌ها به صورت تصادفی پراکنده شده‌اند که به مفهوم مستقل بودن باقیمانده‌ها نسبت به توالی انجام آزمایشها است، که مطلوب می‌باشد.



شکل (۴-۶) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (کارایی جدایش) نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده آن توسط مدل نمودار شکل (۴-۶) برای بررسی توانایی مدل در پیش‌بینی مقادیر واقعی پاسخ (کارایی جدایش) بکار می‌رود. از آنجایی که مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده پاسخ (کارایی جدایش) توسط مدل، به هم نزدیک بوده‌اند، نقاط در شکل، تقریباً در یک خط ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند که اعتماد را نسبت به مدل برازش شده بیشتر می‌کند.

۴-۳-۴ بررسی نتایج پاسخ (درصد بازدهی جدایش)

حال با انتخاب مدل پیش‌بینی شده مناسب و اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب باقیمانده‌ها، به بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های مربوط به درصد بازدهی جدایش پرداخته شده است. شکل (۴-۷) تأثیر هر کدام از عوامل را بر بازدهی جدایش به صورت خطی هنگامی که از پایین‌ترین سطحشان تا بالاترین سطحشان تغییر می‌کند را نشان می‌دهد.

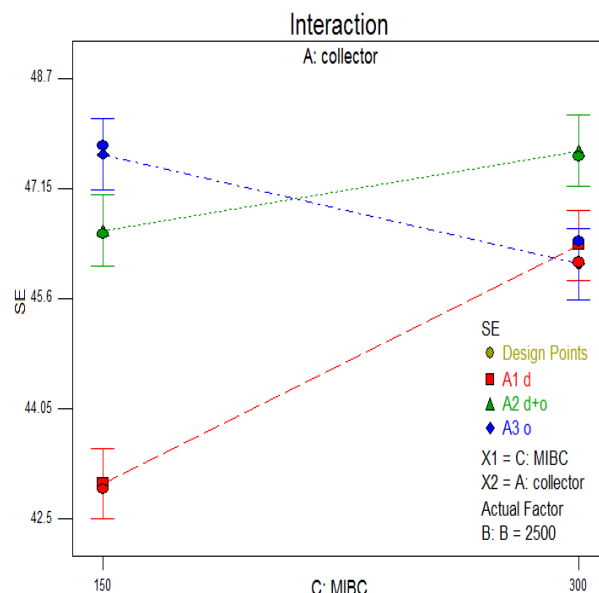


شکل (۴-۷) نمودار تاثیر عوامل (a) نوع کلکتور، (b) مقدار کلکتور و (c) مقدار MIBC بر درصد بازدهی جدایش نکته قابل توجه خطوط عمودی است که در ابتدا و انتهای نمودارها به شکل بازه نشان داده شده‌اند. این خطوط عمودی در سطح احتمال ۹۵٪ کمترین فاصله معنی‌دار بودن^۴ را نشان می‌دهند. به عبارت دیگر اگر این بازه‌ها در ابتدا و انتهای سطوح عامل مورد نظر با هم همپوشانی نداشته باشند، بدین مفهوم است که در سطح احتمال ۹۵٪ تغییر در سطوح بالا و پایین آن عامل، تاثیر معنی‌داری از نظر آماری در پاسخ داشته است. در شکل (۴-۷) قسمت (a) ملاحظه می‌شود که تغییر در سطوح بالا و پایین عامل نوع کلکتور تاثیر معنی‌داری بر درصد بازدهی جدایش نشان می‌دهد و با افزایش نوع کلکتور نفت درصد بازدهی جدایش افزایش می‌یابد همچنین قسمت (b) میزان مصرف کلکتور در بازدهی جدایش

^۴ - Least significant difference

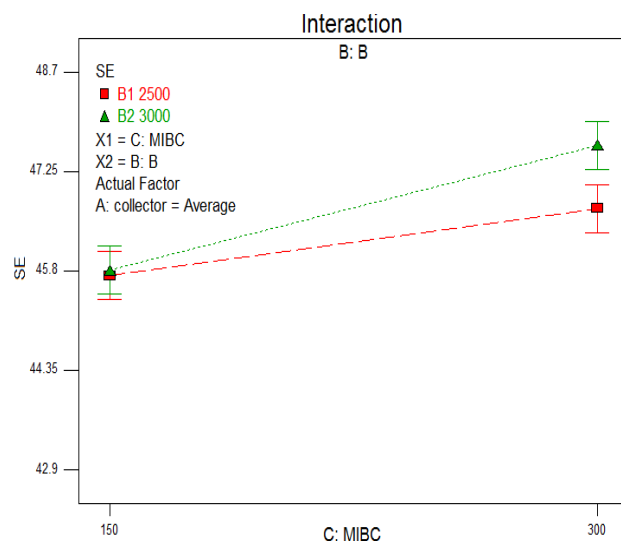
تاثیر مثبت و تقریباً با اهمیتی دارد تاثیر مثبت میزان کلکتور در بازدهی جدایش زغال منطقی است، چون با افزایش میزان کلکتور خاصیت آبرانی زغال تقویت شده و بهتر به حباب هوا متصل می‌شود. تاثیر مقدار MIBC بر روی درصد بازدهی جدایش نیز مثبت و معنی‌دار می‌باشد. در واقع کف‌ساز بازیابی را افزایش و در عوض عیار را کاهش می‌دهد زیرا بخشی از مواد غیر قابل شناور همراه با کف از لبه سلول سرریز می‌شوند.

علاوه بر بررسی اثرات عوامل اصلی، برای درک بهتر از فرآیند و شرایط عملیاتی می‌بایست اثرات متقابل بین عوامل نیز مورد مطالعه قرار گیرند. شکل (۴-۸) نمودار اثر متقابل دو عامل مقدار MIBC و نوع کلکتور، (AC) بر روی درصد بازدهی جدایش را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۸) نمودار اثر متقابل دو عامل نوع کلکتور و میزان MIBC بر روی درصد بازدهی جدایش

همانطور که در نمودار شکل (۴-۸) مشاهده می‌شود وجود اثر متقابل مشهود است چون هنگامی که کلکتور گازوئیل می‌باشد با افزایش MIBC درصد بازدهی جدایش افزایش می‌یابد و هنگامی که کلکتور نفت باشد با افزایش میزان MIBC درصد بازدهی جدایش کاهش می‌یابد. هنگامی که ترکیبی از این دو نوع کلکتور استفاده شود با افزایش مقدار MIBC درصد بازدهی جدایش تقریباً افزایش پیدا می‌کند. شکل (۴-۹) نمودار اثر متقابل دو عامل مقدار MIBC و مقدار کلکتور، (BC) بر روی درصد بازدهی جدایش را نشان می‌دهد.

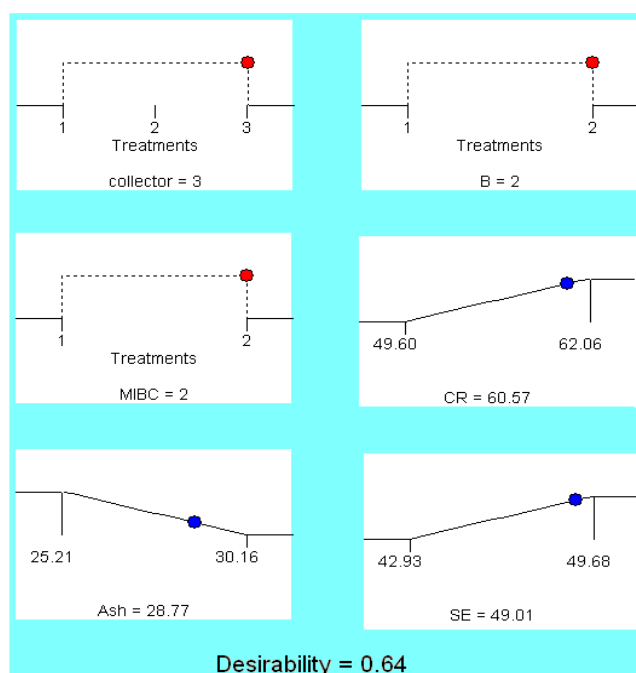


شکل (۴-۹) نمودار اثر متقابل دو عامل مقدار کلکتور و میزان MIBC بر روی درصد بازدهی جدایش

همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، تقابل بین دو عامل وجود دارد ولی چندان دارای اهمیت نمی‌باشد، چون رفتار منحنی در هر دو سطح مقدار کلکتور تقریباً مشابه است.

۴-۴ نتایج بهینه‌سازی مقدار و نوع معرفها بر روی درصد بازدهی جدایش

شکل (۴-۱۰) نتیجه بهینه‌سازی را نشان می‌دهد که شرایط بهینه برای کارایی جدایش ۴۹/۰۱٪ و بازیابی ۶۰/۵۷٪ و خاکستر ۲۸/۷۷٪ با سطح مطلوبیت ۶۴٪ در سطح پارامترهای، نوع کلکتور، نفت (O)؛ مقدار کلکتور، ۳۰۰۰ g/t و مقدار MIBC، ۳۰۰ g/t بدست آمد.



شکل (۴-۱۰) نتایج بهینه‌سازی پارامترها

۴-۵ نتیجه گیری از آزمایشهای فلوتاسیون مکانیکی

نتیجه حاصل از فلوتاسیون مکانیکی نشان می‌دهد که فراوری باطله کارخانه البرز مرکزی توسط فلوتاسیون مکانیکی در یک مرحله مطلوب نیست. بنابراین به منظور کاهش بیشتر درصد خاکستر با توجه به نیاز صنعت، کنسانتره حاصل از مرحله فراوری فلوتاسیون مکانیکی نیاز به یک مرحله فراوری دیگر دارد تا به ۱۲٪ خاکستر برسد.

به منظور کاهش تعداد مراحل فراوری در رسیدن به درصد خاکستر مورد نیاز در یک مرحله و با توجه به قابلیت کاربرد فلوتاسیون ستونی برای فرآوری ذرات ریز دانه و کم عیار، فراوری باطله کارخانه مذکور توسط فلوتاسیون ستونی نیز انجام شد.

بنابراین با توجه به تحلیل‌ها و بررسی‌هایی که در آزمایشهای فلوتاسیون مکانیکی انجام شد، شناخت نسبتاً خوبی نسبت به قابلیت شناوری و مقدار و نوع معرف‌ها در شستشوپذیری زغال بدست آمد که مقدمات لازم را برای مطالعات بیشتر و بهینه‌سازی عملیات شستشوپذیری زغال توسط فلوتاسیون ستونی را فراهم کرد.

بر اساس نتایجی که فلوتاسیون مکانیکی نشان داد نفت کارایی بهتر بر روی فرایند دارد بنابراین نفت به عنوان کلکتور در آزمایشهای فلوتاسیون ستونی انتخاب شد.

بطور کلی زغال‌های عیار پائین و اکسیده خاصیت آبدوستی بیشتری دارند بنابراین بعد از آزمایشهای فلوتاسیون مکانیکی، مشاهده شد که به علت عیار پائین نمونه، بهترین نتیجه در سطوح بالا (پارامترها) مقدار کلکتور و کفساز بدست آمد. بنابراین نتیجه‌ای که از آزمایشهای فلوتاسیون مکانیکی گرفته شد این است که ممکن است زغال نیاز به مقدار معرف‌های بیشتر برای کارایی بهتر داشته باشد بنابراین برای بررسی اثر مقدار بیشتر معرف‌ها در جدایش زغال، مجدداً مقدار بالاتری از معرف‌ها در آزمایشهای فلوتاسیون ستونی استفاده شد.

فصل پنجم

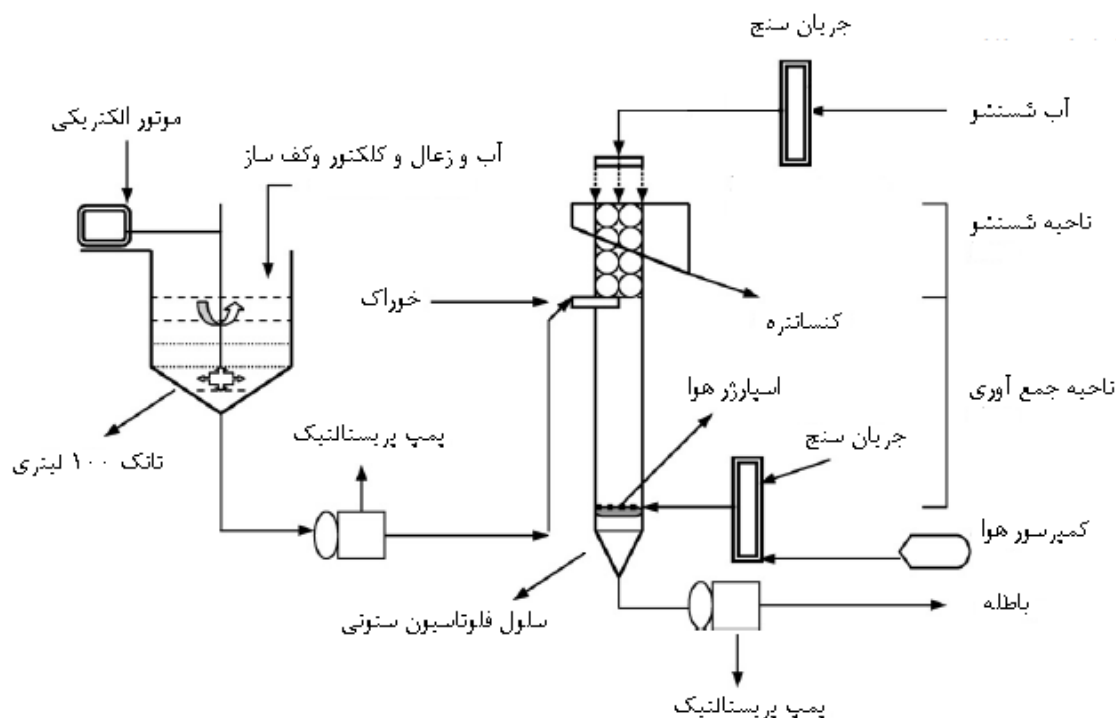
آزمایش‌های فلوتاسیون

ستونی

۱-۵ روش اجرای آزمایشهای فلوتاسیون ستونی

۱-۱-۵ روش انجام آزمایشها

طرح کلی از سلول فلوتاسیون ستونی که در آزمایشگاه استفاده شد در شکل (۵-۱) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱) نمای شماتیک از ستون فلوتاسیون

این سیستم سلول ستونی شامل تانک خوراک ۱۰۰ لیتری و کمپرسور هوا دو سیلندر و دو پمپ پریستالتیک^۱ برای خوراک و باطله و دو جریان سنج برای تنظیم نرخ هوادهی و نرخ آب شستشو است. خوراک بعد از آماده‌سازی در تانک ۱۰۰ لیتری، از یک سوم ارتفاع ستون از بالا، به وسیله پمپ پریستالتیک به ستون خوراک‌دهی می‌شود و هوای فشرده از طریق اسپارژر (حباب‌ساز) متخلخل بالاتر از نقطه خروجی باطله وارد ستون می‌شود در این راستا ذرات خوراک که از بالا به طرف پایین در حرکت هستند، با حباب‌های تشکیل شده توسط اسپارژر در ناحیه جمع‌آوری در ستون برخورد کرده

^۱ - Peristaltic Pump

سپس ذرات آبران^۲ جذب شده به حبابهای هوا به ناحیه شستشو حرکت می‌کنند و ذرات آبدوست^۳ از انتهای ستون به وسیله پمپ پرستالتیک خارج می‌شوند. مشخصات سخت‌افزاری و تجهیزات جانبی ستون فلوتاسیون مورد استفاده جهت انجام آزمایشات در جدول (۵-۱) آورده شده است.

جدول (۵-۱) مشخصات ستون فلوتاسیون مورد استفاده جهت انجام آزمایشات

ارتفاع ستون	۶ متر
قطر مقطع ستون (دایره‌ای)	۱۰ سانتی‌متر
ارتفاع ناحیه جمع‌آوری	۵۰۰ سانتی‌متر
محل قرارگیری ورودی خوراک	۴۵۰ سانتی‌متری لبه پایین ستون

حدود ۲۰۰ کیلوگرم نمونه از باطله جیگ ماشین کارخانه زغالشویی زیرآب برای فرآوری با استفاده از فلوتاسیون ستونی تهیه شد. نمونه گیری از دمپ باطله توسط مدیریت و کارکنان کارخانه البرز مرکزی انجام شد. به دلیل اینکه یک مرحله فرآوری توسط کارخانه البرز مرکزی بر روی نمونه‌ها انجام شده بود بنابراین نمونه‌ها بر اثر رطوبت به هم چسبیده بودند که منجر شد تا آنالیز دانه‌بندی و خاکسترسنجی انجام نشود. بدین منظور نمونه‌ها توسط سنگ شکن فکی خرد و از سرند ۳۰ مش (۶۰۰ میکرون) عبور داده شدند. سپس به منظور خوراک‌دهی به ستون، سلول ستونی تا سطح مورد نیاز برای ارتفاع کف، از آب پر شد. در این زمان پمپ پرستالتیک باطله به منظور ثابت نگه داشتن سطح آب (پایداری سطح مشترک منطقه جمع‌آوری و منطقه شستشو) در سلول به صورت اتوماتیک تنظیم شد. بنابراین برای هر آزمایش، ارتفاع کف به وسیله تخلیه باطله توسط پمپ پرستالتیک در مقدار ۲۰ سانتی متر ثابت نگه داشته شد. که این مقدار ارتفاع کف بر اساس انجام تست‌های اولیه و با توجه به اختلاط مواد ریز دانه باطله با بخش کف انتخاب شد. آب شستشو در مقدار تعیین شده در هر سری از آزمایشات از ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری از لبه سرریز ستون بر روی کف اضافه شد. آب شستشو و هوا در مقدار تعیین شده در هر سری از آزمایشات توسط جریان سنج‌ها تنظیم شدند. همزمان با آماده‌سازی سلول برای هر آزمایش، ۱۰۰ لیتر پالپ ۵ درصد جامد زغال به عنوان خوراک ستون با

^۲- Hydrophobic^۳- Hydrophilic

دانه‌بندی زیر ۶۰۰ میکرون و خاکستر ۵۶ درصد به مدت ۱۰ دقیقه در تانک خوراک آماده‌سازی شد. بدین صورت که پالپ به داخل همزن ریخته شد و سپس نفت به عنوان کلکتور به مدت ۵ دقیقه اضافه شد و محلول MIBC به عنوان کف‌ساز به مدت ۱ دقیقه بعد از کلکتور به پالپ اضافه شد. سپس پالپ، از یک سوم بالایی ستون با دبی طراحی شده توسط پمپ پرستالتیک به ستون در سرعت ثابت خوراک‌دهی شد. سپس به سیستم اجازه داده شد تا به شرایط پایدار برسد (شرایط پایدار، حالتی است که کف پایدار تشکیل شده است). در آزمایشها سعی شد که ارتفاع کف در حدود ۲۰ سانتی‌متر ثابت نگه داشته شود. همانطور که در فصل ۲ ذکر شد بهینه‌ترین زمان ماند لازم برای شناور شدن زغال در داخل ستون ۶ دقیقه است. از آنجایی که زمان لازم برای پایدار شدن شرایط ستون دو الی سه برابر زمان ماند است لذا نمونه‌گیری از جریان باطله و کنسانتره، بعد از پایدار شدن شرایط ستون، یعنی ۱۲ الی ۱۸ دقیقه بعد از اعمال آخرین تغییرات صورت می‌پذیرفت. شرایط پایدار ستون به وسیله نرخ جریان باطله و سرریز شدن کف حاصل می‌شد. نمونه‌ها از باطله و کنسانتره در یک زمان یکسان گرفته شد. برای تمام سری از آزمایشها pH و درصد جامد ثابت در نظر گرفته شد.

۵-۱-۲ طراحی آزمایشها

در این سری از آزمایشها، پنج عامل مقدار کلکتور نفت، مقدار MIBC، نرخ خوراک‌دهی، نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو انتخاب و درصد بازیابی و درصد خاکستر محصول نیز به عنوان پاسخهای آزمایشها در نظر گرفته شدند. در جدول (۵-۲) عوامل مورد مطالعه و تغییرات مربوط به سطوح آنها نشان داده شده است.

جدول (۵-۲) عوامل و سطوح مربوط به طراحی آزمایشات به روش فاکتوریل دو سطحی

نشانه	نام عوامل	واحد	سطح پایین	سطح مرکز	سطح بالا
A	مقدار کلکتور نفت	g/t	۲۷۰۰	۳۰۰۰	۳۳۰۰
B	مقدار MIBC	g/t	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰
C	نرخ هوادهی	cm/s	۰/۹۶	۱/۱۹	۱/۴۲
D	نرخ آب شستشو	Lit/min	۰/۴۶	۰/۷۲	۰/۹۸
E	نرخ خوراک‌دهی	Lit/min	۳/۶	۴	۴/۴

همانطور که در جدول (۵-۲) نشان داده شده، همه عوامل به صورت عوامل کمی بوده و در دو سطح پایین و بالا تغییر داده شده‌اند. در این مرحله ضمن بدست آوردن شناخت بهتر عوامل موثر و فهم بیشتر رابطه بین آنها با استفاده از روش طراحی فاکتوریل جزئی دو سطحی^۴، سطوح عوامل، مورد بررسی قرار گرفتند. طراحی آزمایشها شامل پنج پارامتر در دو سطح (2^{5-1}) و دو نقطه مرکزی است. طراحی فاکتوریل جزئی 2^{5-1} ، جزو تفکیک^۵، پنج است. که نشان دهنده این است که حداقل یک عامل اصلی با یک یا چند اثر متقابل چهار عاملی و یا یک اثر متقابل دو عاملی با یک یا چند اثر متقابل سه عاملی دارای هم‌اثرساز هستند. که هر یک از این روابط به صورت ۱ با ۴ و ۲ با ۳ در نظر گرفته می‌شود تا مجموع آنها ۵ شود. بدین‌منظور تعداد ۱۸ آزمایش طراحی شد که محدوده سطوح این متغیرهای عملیاتی به خواص شیمیایی مواد معدنی و همچنین مشخصات سلول ستونی بستگی دارد. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار معرفیها مجدداً به عنوان پارامتر در نظر گرفته شدند و سطوح این دو عامل بر مبنای آزمایشهای صورت گرفته توسط فلوتاسیون مکانیکی انتخاب شد. آزمایشها، به دلیل کاهش خطاهای ناشناخته با ترتیب کاملاً تصادفی انجام گرفتند. شرایط و پاسخ آزمایشها در جدول (۵-۳) نشان داده شده است.

جدول (۵-۳) طراحی از آزمایشها برای ارزیابی اثری از پارامترها بر روی اجرای عملیات فلوتاسیون ستونی

Run	A: g/t	B: g/t	C: cm/s	D: Lit/min	E: Lit/min	درصد خاکستر	درصد بازیابی	ماندگی گاز
۱	۲۷۰۰	۲۵۰	۰/۹۶	۰/۹۸	۳/۶	۱۲/۷۶	۱۶/۵۲	۶
۲	۲۷۰۰	۳۵۰	۱/۴۲	۰/۹۸	۳/۶	۱۹/۱۸	۱۴/۶۲	۱۰
۳	۲۷۰۰	۳۵۰	۰/۹۶	۰/۹۸	۴/۴	۱۴/۲۱	۲۲/۹۲	۷
۴	۳۳۰۰	۳۵۰	۱/۴۲	۰/۴۶	۳/۶	۱۹/۸۸	۱۸/۸۹	۱۰
۵	۳۳۰۰	۲۵۰	۰/۹۶	۰/۴۶	۳/۶	۱۲/۱۱	۱۶/۵۲	۶
۶	۲۷۰۰	۲۵۰	۱/۴۲	۰/۹۸	۴/۴	۱۳/۹۱	۲۱	۱۱
۷	۳۳۰۰	۲۵۰	۱/۴۲	۰/۹۸	۳/۶	۱۶/۳۳	۷/۵۵	۱۰
۸	۲۷۰۰	۲۵۰	۱/۴۲	۰/۴۶	۳/۶	۱۹/۸۰	۴/۵۵	۱۰
۹	۳۳۰۰	۲۵۰	۰/۹۶	۰/۹۸	۴/۴	۱۳/۶۵	۳/۶۰	۷

^۴ - Fractional Factorial Design^۵ - Resolution

ادامه جدول (۵-۳)

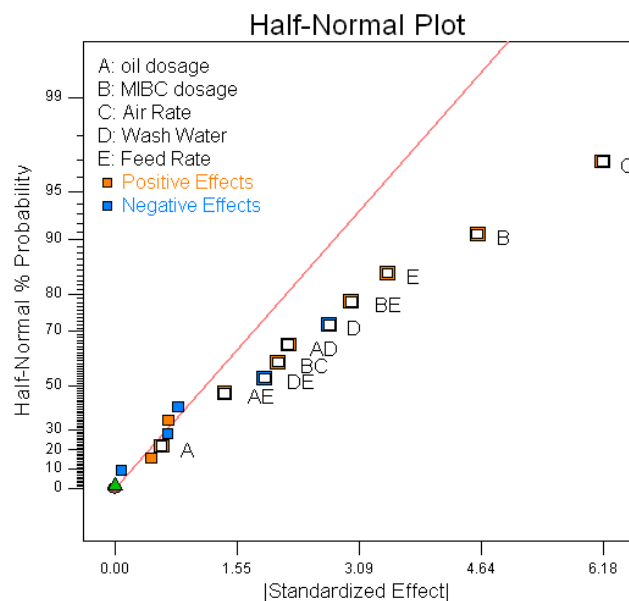
Run	A: g/t	B: g/t	C: cm/s	D: Lit/min	E: Lit/min	درصد خاکستر	درصد بازیابی	ماندگی گاز
۱۰	۳۳۰۰	۳۵۰	۰/۹۶	۰/۴۶	۴/۴	۲۱/۲۵	۳۱/۴۶	۸
۱۱	۳۳۰۰	۳۵۰	۰/۹۶	۰/۹۸	۳/۶	۱۴/۲۸	۳۵/۲۳	۷
۱۲	۳۰۰۰	۳۰۰	۱/۱۹	۰/۷۲	۴	۱۷/۱۳	۲۷/۵۹	۹
۱۳	۳۰۰۰	۳۰۰	۱/۱۹	۰/۷۲	۴	۱۷/۳۵	۲۶/۶۹	۹
۱۴	۲۷۰۰	۲۵۰	۰/۹۶	۰/۴۶	۴/۶	۱۵/۱۷	۱۸/۹۸	۶
۱۵	۲۷۰۰	۳۵۰	۰/۹۶	۰/۴۶	۳/۶	۱۴/۰۴	۱۲/۵۸	۶
۱۶	۳۳۰۰	۳۵۰	۱/۴۲	۰/۹۸	۴/۴	۲۷/۰۱	۳۷/۴۵	۱۱
۱۷	۲۷۰۰	۳۵۰	۱/۴۲	۰/۴۶	۴/۴	۳۰/۷۵	۴۱/۲۱	۱۲
۱۸	۳۳۰۰	۲۵۰	۱/۴۲	۰/۴۶	۴/۴	۲۰/۱۰	۳۵/۳۳	۱۰

۵-۲ مطالعه و تفسیر داده‌های پاسخ اول (درصد خاکستر)

همانطور که قبلاً نیز گفته شد. در این سری از آزمایشها، پنج عامل میزان کلکتور نفت، میزان MIBC، نرخ خوراک‌دهی، نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو انتخاب و درصد بازیابی، درصد خاکستر محصول نیز به عنوان پاسخهای آزمایشها در نظر گرفته شدند که در این بخش تفسیر داده‌های پاسخ اول (درصد خاکستر) مد نظر است.

۵-۲-۱ برآزش مدل بر روی داده‌های پاسخ اول (درصد خاکستر)

برای بررسی رفتار متغیرها بر روی پاسخ، احتیاج به برآزش مدل بر پاسخ آزمایشها است. مدل در واقع یک معادله ریاضی است که برای پیش‌بینی پاسخ بکار می‌رود. در تشکیل مدل اکثراً از عوامل و تعاملهایی استفاده می‌شود که از نظر آماری دارای اهمیت باشند. بنابراین در شکل (۵-۱) اثر پارامترها و تقابلهایی که دارای تاثیر بیشتری در آزمایشها دارند و در تشکیل مدل بکار می‌روند به صورت گرافیکی نشان داده شده است.

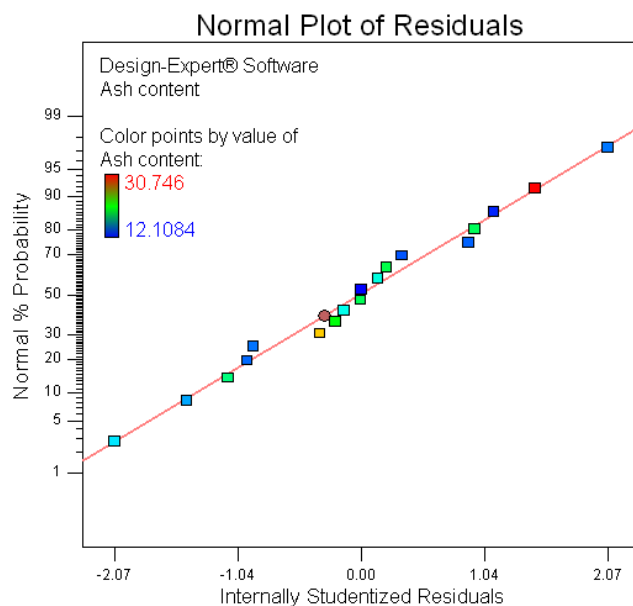


شکل (۵-۲) نمودار اثرات عوامل مربوط به پاسخ اول (درصد خاکستر)

همانطور که در شکل (۵-۲) ملاحظه می‌شود عامل مقدار کلکتور (A)، با وجود اینکه از حالت نرمال جدایافتگی ندارد و تقریباً روی خط نرمال قرار دارد در تشکیل مدل بکار رفته است. به طور کلی در روشهای طراحی آماری آزمایشها اگر اثرات متقابل عوامل در تشکیل مدل شرکت داشته باشند، بهتر است که عوامل اصلی تشکیل دهنده آن اثر متقابل نیز در تشکیل مدل بکار رود [۴۱].

۵-۲-۲ توزیع نرمال باقیماندهها

همانطور که گفته شد نمودار احتمال نرمال باقیماندهها بایستی در امتداد یک خط راست باشند. در شکل (۵-۳) نمودار احتمال نرمال باقیماندهها برای درصد خاکستر نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود باقیماندههای "درصد خاکستر" انحراف قابل توجهی از خط نرمال ندارند. بنابراین مدل برازش شده، توانایی پیش‌بینی پاسخ آزمایش در محدوده پارامترهای مورد بررسی را دارد و با استفاده از این مدل تاثیر هر یک از پارامترها و مقادیر بهینه پاسخ قابل محاسبه است.



شکل (۵-۳) نمودار توزیع نرمال باقیمانده‌ها مربوط به درصد خاکستر

۳-۲-۵ آنالیز واریانس

با انتخاب بهترین مدل و انتخاب بهترین عوامل با در نظر گرفتن سطح اعتماد ۹۵٪ با استفاده از نرم-افزار Design Expert7 آنالیز داده‌ها انجام شد و جدول آنالیز آماری واریانس بدست آمد. جدول (۵-۴) آنالیز واریانس مربوط به درصد خاکستر را نشان می‌دهد.

ملاحظه می‌شود که مدل برازش شده از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p\text{-value} < 0.05$) معنی‌دار است و احتمال بزرگتر بودن از $F(0.0002)$ در مدل کمتر از ۰/۰۵ است. در واقع تنها ۰/۰۲٪ احتمال وجود دارد که $F\text{-value}$ بزرگتری بر اساس تاثیر اغتشاشات به وجود آید و همچنین اثر عوامل اصلی، مقدار MIBC (B)، نرخ هوادهی (C)، نرخ خوراک‌دهی (E)، نرخ آب شستشو (D) و اثر متقابل بین مقدار کلکتور و نرخ آب شستشو (AD)، بین مقدار کلکتور و نرخ خوراک‌دهی (AE)، بین مقدار MIBC و نرخ هوادهی (BC)، بین مقدار MIBC و نرخ خوراک‌دهی (BE) و همچنین بین نرخ آب شستشو و نرخ خوراک‌دهی (DE) از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p\text{-value} < 0.05$) در پاسخ آزمایش (درصد خاکستر) معنی‌دار و با اهمیت است. همچنین نقصان در برازش مدل نیز از نظر آماری دارای اهمیت نمی‌باشد که مطلوب است. در واقع نقصان در برازش مدل به منظور بررسی توانایی مدل، برای پیش‌بینی پاسخ آزمایش در محدوده پارامترها است.

جدول (۵-۴) آنالیز واریانس مربوط به درصد خاکستر

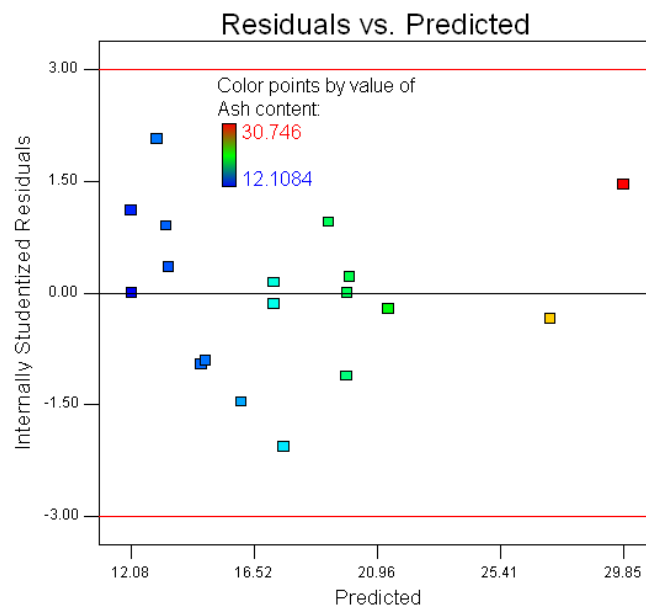
منبع	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی d.f.	میانگین مربعات MS	مقدار F (F-Value)	مقدار F استاندارد	احتمال بزرگتر بودن از F
مدل	۴۱۱/۱۳	۱۰	۴۱/۱۱	۳۴/۱۰	۴/۰۶۰	۰/۰۰۰۲
A (Oil Dosage)	۱/۴۳	۱	۱/۴۳	۱/۱۹	۵/۹۸۷	۰/۳۱۷۲
B(MIBC Dosage)	۸۴/۵۲	۱	۸۴/۵۲	۷۰/۱۰	۵/۹۸۷	۰/۰۰۰۲
C(Air Rate)	۱۵۲/۹۹	۱	۱۵۲/۹۹	۱۲۶/۸۹	۵/۹۸۷	<۰/۰۰۰۱
D(water Rate)	۲۹/۶۱	۱	۲۹/۶۱	۲۴/۵۶	۵/۹۸۷	۰/۰۰۲۶
E(Feed Rate)	۴۷/۷۹	۱	۴۷/۷۹	۳۹/۶۴	۵/۹۸۷	۰/۰۰۰۷
AD	۱۹/۴۰	۱	۱۹/۴۰	۱۶/۰۹	۵/۹۸۷	۰/۰۰۷۰
AE	۷/۷۶	۱	۷/۷۶	۶/۴۴	۵/۹۸۷	۰/۰۴۴۲
BC	۱۷/۱۶	۱	۱۷/۱۶	۱۴/۲۳	۵/۹۸۷	۰/۰۰۹۳
BE	۳۶/۰۲	۱	۳۶/۰۲	۲۹/۸۸	۵/۹۸۷	۰/۰۰۱۶
DE	۱۴/۴۵	۱	۱۴/۴۵	۱۱/۹۹	۵/۹۸۷	۰/۰۱۳۴
مقدار انحناء	۰/۵۱	۱	۰/۵۱	۰/۴۳	۵/۹۸۷	۰/۵۳۷۹
باقیمانده	۷/۲۳	۶	۱/۲۱			
نقصان در برازش	۷/۲۱	۵	۱/۴۴	۵۹/۴۲		۰/۰۹۸۲
خطای مطلق	۰/۰۲۴	۱	۰/۰۲۴			
Total	۴۱۸/۸۸	۱۷				

۵-۲-۴ آنالیز خطاهای پاسخ اول (درصد خاکستر)

به منظور بررسی صحت مدل برازش شده در پیش‌بینی پاسخ آزمایش و همچنین نحوه انجام آزمایشها

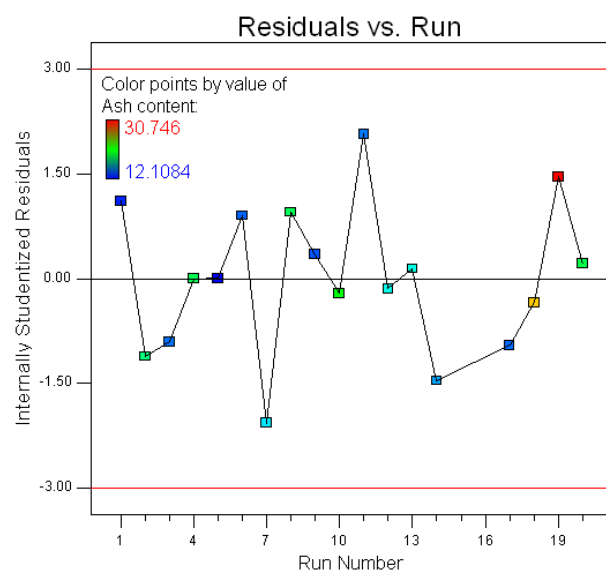
لازم است که آنالیز خطاها (باقیمانده‌ها) بررسی شوند بنابراین نتایج حاصله از آنالیز خطاها در شکل‌های

(۵-۴)، (۵-۵)، (۵-۶) آورده شده است.



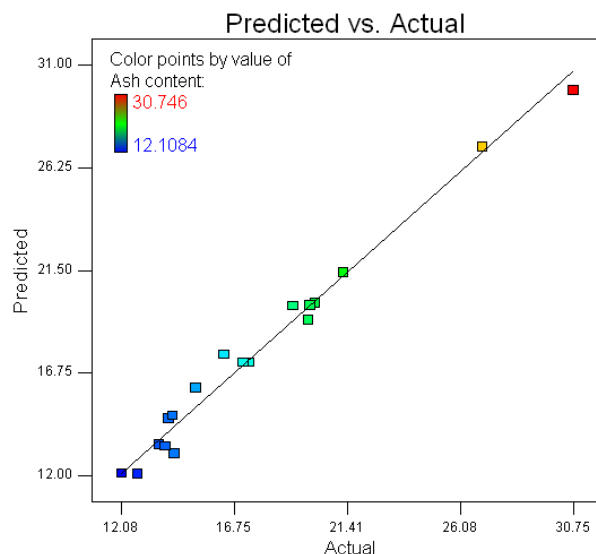
شکل (۴-۵) نمودار تغییرات مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به درصد خاکستر

شکل (۴-۵) وضعیت مانده‌ها را در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ توسط مدل نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مانده‌ها نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ، از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده‌اند.



شکل (۵-۵) نمودار تغییرات باقیمانده‌ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به درصد خاکستر

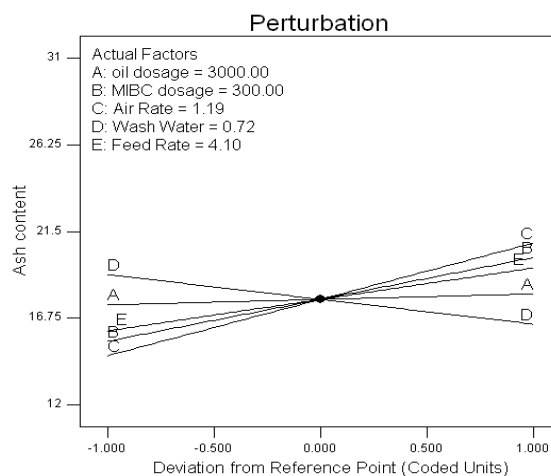
شکل (۵-۵) به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر باقیمانده‌ها در مقابل توالی انجام آزمایشها پرداخته شده است. آنچه انتظار می‌رود این است که مقادیر مانده‌ها نسبت به توالی انجام آزمایشها، مستقل و به صورت تصادفی پراکنده شده باشند که نمودار شکل (۵-۵) این وضعیت را تایید می‌کند.



شکل (۵-۶) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد خاکستر) نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده آن توسط مدل نمودار شکل (۵-۶) برای بررسی توانایی مدل در پیش‌بینی مقادیر واقعی پاسخ (درصد خاکستر) بکار می‌رود. که این نمودار مقدار یا گروهی از مقادیری که به آسانی توسط مدل قابل پیش‌گویی نیستند را مشخص می‌کند. از آنجایی که مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده پاسخ (درصد خاکستر) توسط مدل، به هم نزدیک بوده‌اند، اعتماد را نسبت به مدل برآزش شده بیشتر می‌کند.

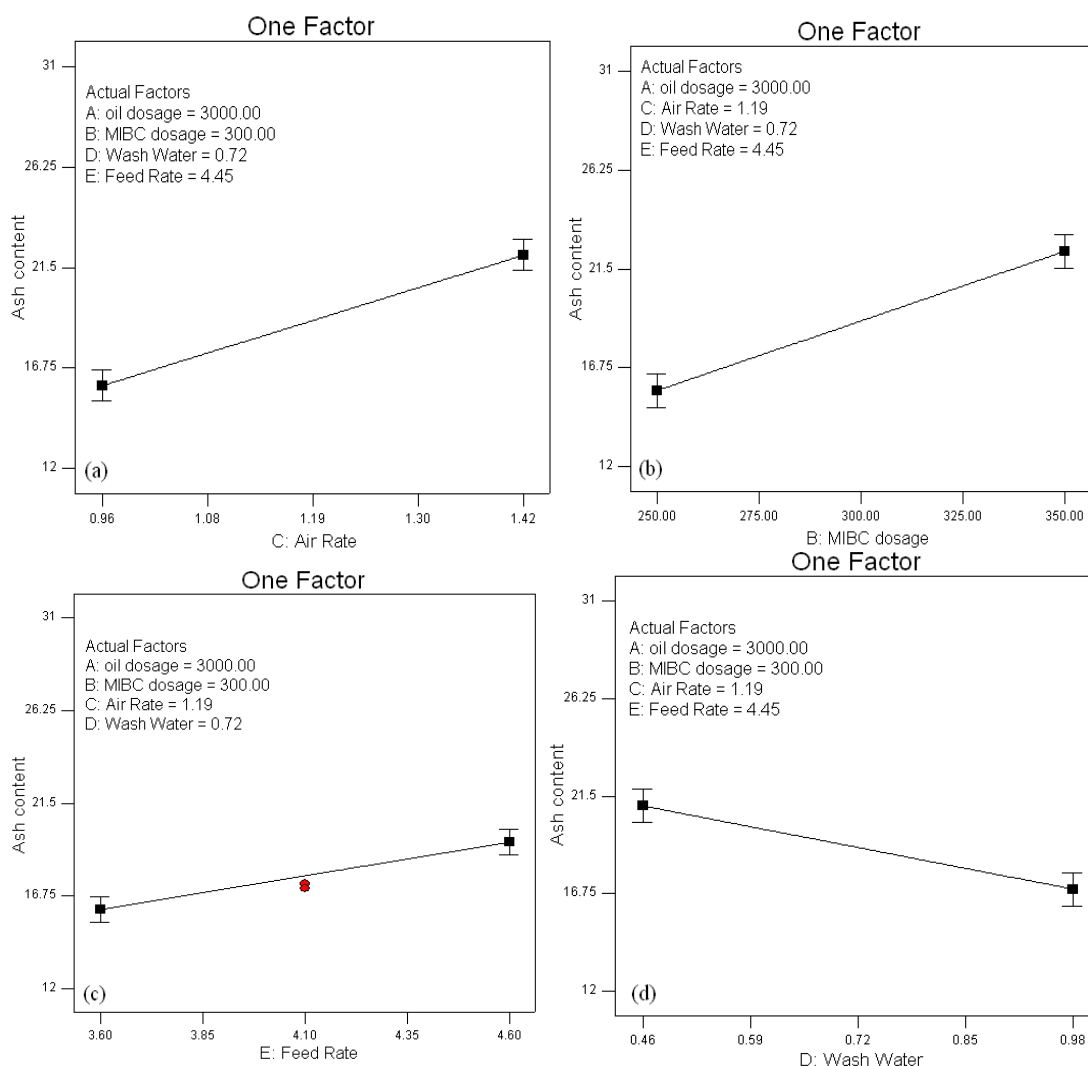
۵-۲-۵ بررسی نتایج پاسخ اول (درصد خاکستر)

با انتخاب مدل پیش‌بینی شده مناسب و اطمینان از برآزش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب باقیمانده‌ها، نتایج حاصل از آزمایش‌های مربوط به درصد خاکستر بررسی شده است. نمودار شکل (۵-۷) تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ (درصد خاکستر) را نشان می‌دهد.



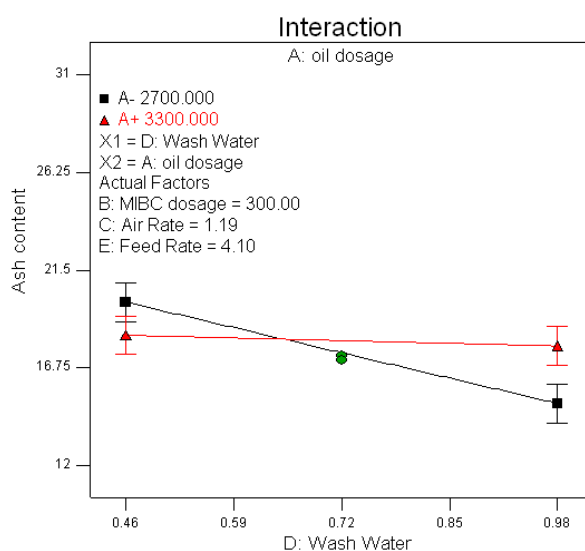
شکل (۵-۷) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ اول (درصد خاکستر)

همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود عوامل C، B، E و D به ترتیب عوامل حساس بر پاسخ آزمایش (درصد خاکستر) بوده و عامل A (مقدار کلکتور) که تقریباً به صورت خطی است حساسیت خاصی از خود نشان نمی‌دهد. شکل (۵-۸) تأثیر هر کدام از عوامل را بر درصد خاکستر به صورت خطی هنگامی که از پایین‌ترین سطحشان تا بالاترین سطحشان تغییر می‌کند را نشان می‌دهد.



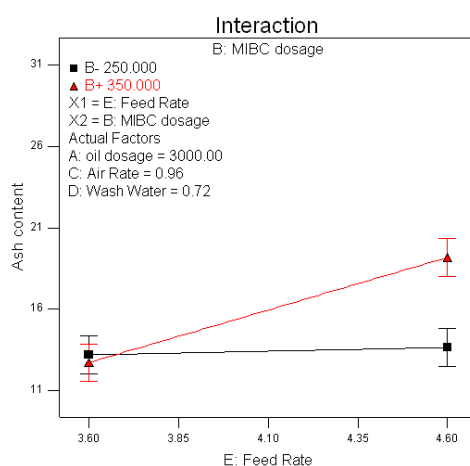
شکل (۵-۸) نمودار تأثیر عوامل (a) نرخ گازدهی، (b) میزان مصرف MIBC، (c) نرخ خوراک‌دهی (d) نرخ آب شستشو در شکل (۵-۸) قسمت (a) ملاحظه می‌شود که تغییر در سطوح بالا و پایین عامل گازدهی تأثیر معنی دار و مهمی بر روی پاسخ (درصد خاکستر) داشته است و بر اساس نتایج آزمایش در شکل، با افزایش نرخ‌هوادهی، درصد خاکستر افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش نرخ گازدهی، ماندگی گاز در ناحیه جمع‌آوری افزایش، که به تبع آن درصد خاکستر نیز افزایش خواهد یافت [۲۹، ۴۲، ۴۳ و ۴۴].

همچنین قسمت (b) نشان می‌دهد که تغییر در سطوح بالا و پایین عامل (B) مقدار MIBC تاثیر معنی‌داری را روی درصد خاکستر نشان می‌دهد در واقع کف‌ساز بازیابی را افزایش و در عوض عیار را کاهش (درصد خاکستر را افزایش) می‌دهد زیرا بخشی از مواد غیر قابل شناور همراه با کف از لبه سلول سرریز می‌شوند. در واقع کف‌ساز، منجر به کاهش اندازه حباب در پالپ می‌شود که در نتیجه باعث افزایش مساحت سطح هوای داخل شده به سلول می‌شود بنابراین شانس ذرات هیدروفیلیک (آبدوست) را برای شناور شدن به سطح سلول افزایش می‌دهد [۴۰ و ۴۵]. همانطور که در قسمت (c) شکل به وضوح مشهود است نرخ خوراک بالاتر منجر به افزایش درصد خاکستر در محدوده مورد بررسی می‌شود. در واقع وقتی نرخ خوراک‌دهی افزایش می‌یابد زمان ماند ذرات در ناحیه جمع‌آوری کاهش و بنابراین تعداد ذرات باطله راه یافته به ناحیه شستشو افزایش و بنابراین درصد خاکستر افزایش می‌یابد [۷ و ۴۶]. در نهایت با افزایش آب شستشو، درصد خاکستر در محدوده مورد بررسی در قسمت (d) کاهش می‌یابد. با افزایش آب شستشو ذرات باطله راه یافته به ناحیه شستشو، شسته و به ناحیه جمع‌آوری برگشت داده می‌شود که باعث کاهش درصد خاکستر می‌گردد [۴۴ و ۴۵]. علاوه بر بررسی اثرات عوامل اصلی، برای درک بهتر از فرآیند و شرایط عملیاتی باید اثرات متقابل بین عوامل نیز مورد مطالعه قرار گیرند. شکل (۵-۹) تعامل بین مقدار کلکتور و نرخ آب شستشو را نشان می‌دهد.



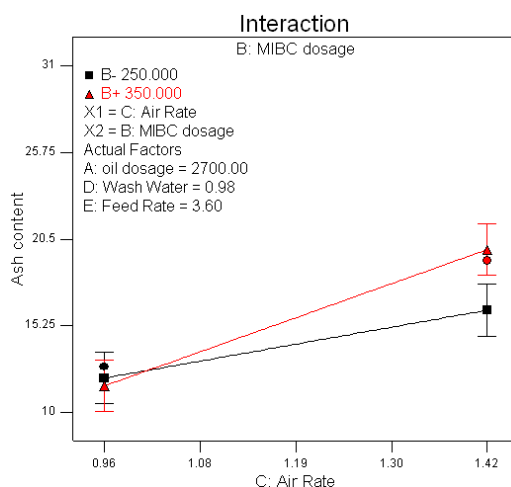
شکل (۵-۹) اثر متقابل دو عامل مقدار کلکتور و نرخ آب شستشو بر درصد خاکستر

به وضوح در شکل مشهود است که این دو عامل در تعامل با هم قرار دارند هنگامی که مقدار مصرف کلکتور در سطح پایین قرار دارد با افزایش نرخ آب شستشو درصد خاکستر کاهش می‌یابد و هنگامی که نرخ آب شستشو در سطح بالا قرار دارد با افزایش نرخ آب شستشو درصد خاکستر تغییر معنی‌داری نمی‌کند. شکل (۵-۱۰) نمودار اثر متقابل دو عامل مقدار MIBC و عامل نرخ خوراک‌دهی را نشان می‌دهد



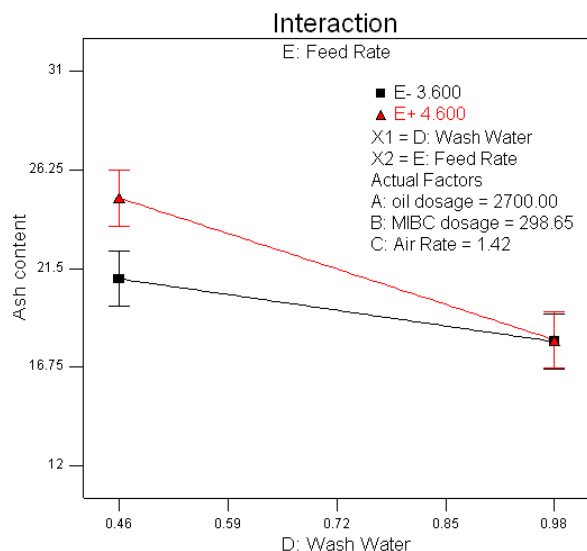
شکل (۵-۱۰) اثر متقابل دو عامل نرخ خوراک‌دهی و مقدار MIBC بر درصد خاکستر

همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود وجود اثر متقابل مشهود است. چون در سطح پایین مصرف مقدار MIBC با افزایش نرخ خوراک‌دهی درصد خاکستر تغییر خاص و معنی‌داری نمی‌کند. اما زمانی که مقدار MIBC در سطح بالا است با افزایش نرخ خوراک‌دهی درصد خاکستر افزایش یافته است. شکل (۵-۱۱) نمودار اثر متقابل دو عامل مقدار MIBC و عامل نرخ هوادهی را نشان می‌دهد.



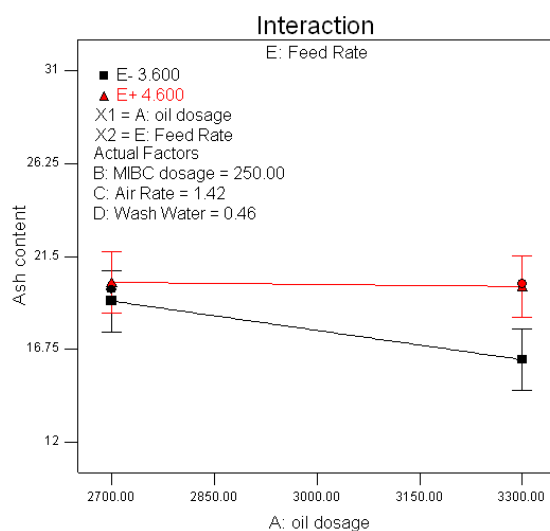
شکل (۵-۱۱) اثر متقابل دو عامل نرخ هوادهی و مقدار MIBC بر درصد خاکستر

ملاحظه می‌شود که خطوط عمودی فاصله معنی‌داری دارند و هر دو عامل نرخ خوراک‌دهی و مقدار MIBC با هم همپوشانی دارند. شکل (۵-۱۲) تعامل بین دو عامل نرخ آب شستشو و نرخ خوراک‌دهی را نشان می‌دهد.



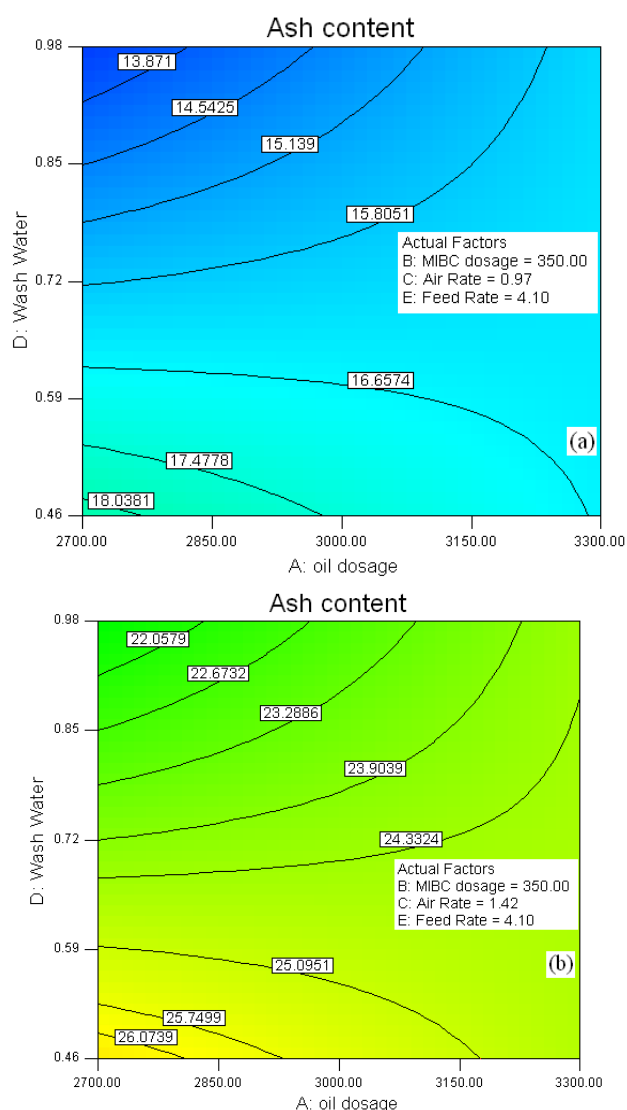
شکل (۵-۱۲) اثر متقابل دو عامل نرخ آب شستشو و نرخ خوراک‌دهی بر درصد خاکستر

همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، هر دو عامل نرخ آب‌شستشو و نرخ خوراک‌دهی با هم همپوشانی دارند و بنابراین تقابل بین دو عامل وجود دارد ولی چندان این تعامل دارای اهمیت نمی‌باشد، چون رفتار منحنی در هر دو سطح نرخ خوراک‌دهی تقریباً مشابه است. شکل (۵-۱۳) تعامل بین مقدار کلکتور و نرخ آب‌شستشو را نشان می‌دهد.



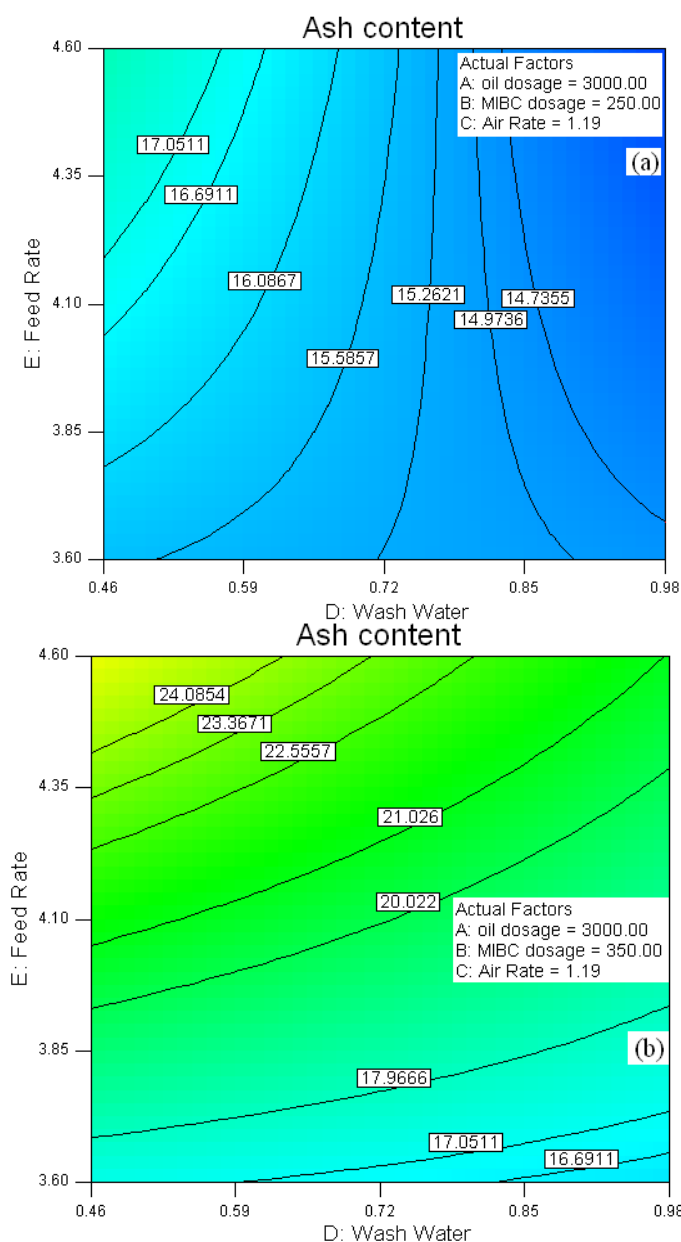
شکل (۵-۱۳) اثر متقابل دو عامل مقدار کلکتور و نرخ خوراک‌دهی بر درصد خاکستر

ملاحظه می‌شود که خطوط عمودی فاصله معنی‌داری دارند و هنگامی که نرخ خوراک‌دهی در سطح پایین قرار دارد افزایش مقدار کلکتور منجر به کاهش جزئی بر روی درصد خاکستر می‌شود اما هنگامی که نرخ خوراک‌دهی در سطح بالا قرار دارد افزایش مقدار کلکتور تغییری بر روی درصد خاکستر ایجاد نمی‌کند. شکل (۵-۱۴) نمودار دو بعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل مقدار کلکتور و نرخ آب‌شستشو بر پاسخ آزمایش (درصد خاکستر) هنگامی که نرخ هوادهی در بالاترین و پایین‌ترین سطح تغییر کرده نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۴) نمودار دو بعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل مقدار کلکتور و نرخ آب‌شستشو در (a) سطح پایین نرخ گازدهی (b) سطح بالای نرخ گازدهی بر درصد خاکستر

همانطور که در نمودارها مشاهده می‌شود در هر دو با افزایش مقدار کلکتور و افزایش نرخ آب شستشو درصد خاکستر کاهش می‌یابد و در مقایسه دو نمودار ملاحظه می‌شود که سطح پائین نرخ هوادهی (خطوط همتراز) منجر به کاهش بیشتر درصد خاکستر زغال می‌شود. شکل (۵-۱۵) نمودار دو بعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و نرخ خوراک‌دهی بر پاسخ آزمایش (درصد خاکستر) هنگامی که مقدار MIBC در بالاترین و پایین‌ترین سطح تغییر کرده نشان داده شده است



شکل (۵-۱۵) نمودار دو بعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ خوراک‌دهی و نرخ آب شستشو در (a) سطح پائین

مقدار MIBC و (b) سطح بالای مقدار MIBC بر درصد خاکستر

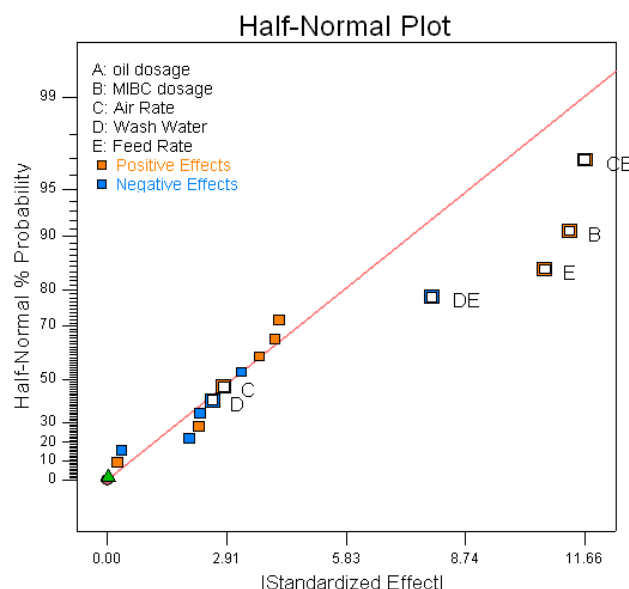
همانطور که در دو نمودار ملاحظه می‌شود در هر دو سطح مقدار MIBC، با افزایش نرخ آب شستشو و کاهش نرخ خوراک‌دهی درصد خاکستر کاهش می‌یابد اما تفاوتی که در این دو نمودار مشاهده می‌شود این است که هنگامی که مقدار MIBC در سطح پایین قرار دارد، درصد خاکستر کاهش بیشتری می‌یابد.

۳-۵ مطالعه و تفسیر داده‌های پاسخ دوم (درصد بازیابی)

در این بخش تفسیر داده‌های پاسخ دوم (درصد بازیابی) مد نظر است.

۱-۳-۵ برازش مدل بر روی داده‌های پاسخ دوم (درصد بازیابی)

برای بررسی رفتار فاکتورها بر روی پاسخ، احتیاج به برازش مدل بر پاسخ آزمایشها می‌باشد. همانطور که گفته شد مدل در واقع یک معادله ریاضی است که برای پیش‌بینی پاسخ بکار می‌رود. بنابراین در شکل (۵-۱۶) اثر پارامترها و تقابلهایی که دارای تاثیر بیشتری در آزمایشها دارند و در تشکیل مدل بکار می‌روند به صورت گرافیکی نشان داده شده است.



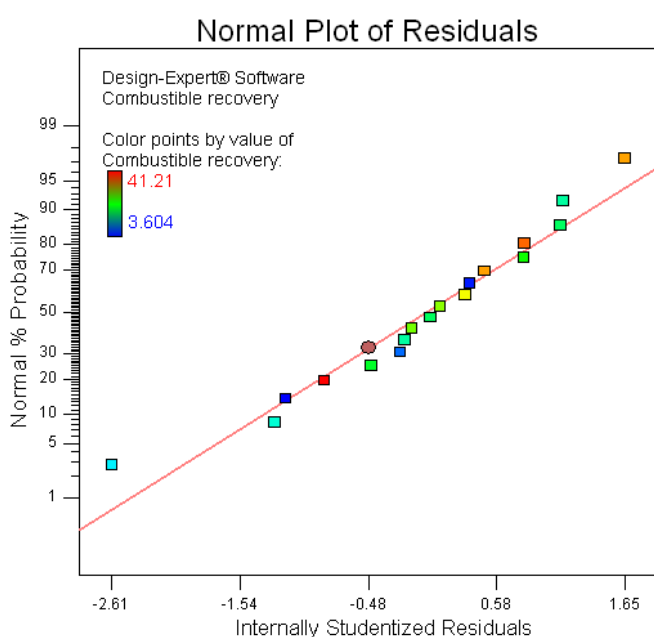
شکل (۵-۱۶) نمودار اثرات عوامل مربوط به پاسخ دوم (درصد بازیابی)

همانطور که در شکل (۵-۱۶) ملاحظه می‌شود عامل D نرخ آب شستشو و عامل C نرخ هوادهی با وجود اینکه از حالت نرمال جدایافتگی ندارد و تقریباً روی خط نرمال قرار دارد در تشکیل مدل بکار

رفته است. همانطور که گفته شد به دلیل اینکه اثرات متقابل عوامل در تشکیل مدل شرکت داشته اند، بنابراین عوامل اصلی تشکیل دهنده آن اثر متقابل نیز در تشکیل مدل بکار رفته است.

۵-۳-۲ توزیع نرمال باقیمانده‌ها

در شکل (۵-۱۷) نمودار احتمال نرمال خطاها را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود خطاها در امتداد یک خط راست قرار گرفته‌اند در نتیجه مدل انتخابی، بازیابی زغال را در محدوده پارامترهای مورد بررسی به خوبی پیش‌بینی می‌کند.



شکل (۵-۱۷) نمودار توزیع نرمال باقیمانده‌ها مربوط به درصد بازیابی

۵-۳-۳ آنالیز واریانس

از آنجایی که مدل برای تعیین ارتباط پارامترها بر روی پاسخ آزمایش ضروری است در نتیجه با انتخاب بهترین مدل و انتخاب بهترین عوامل با در نظر گرفتن سطح اعتماد ۹۵٪ با استفاده از نرم‌افزار Design Expert7 آنالیز داده‌ها انجام شد و جدول آنالیز آماری واریانس بدست آمد. در آنالیز واریانس هدف شناسایی عوامل موثر و همچنین ترتیب آنها از نظر اهمیت در پاسخ آزمایشها است. جدول (۵-۵) آنالیز واریانس مربوط به درصد بازیابی را نشان می‌دهد.

جدول (۵-۵) آنالیز واریانس مربوط به درصد بازیابی

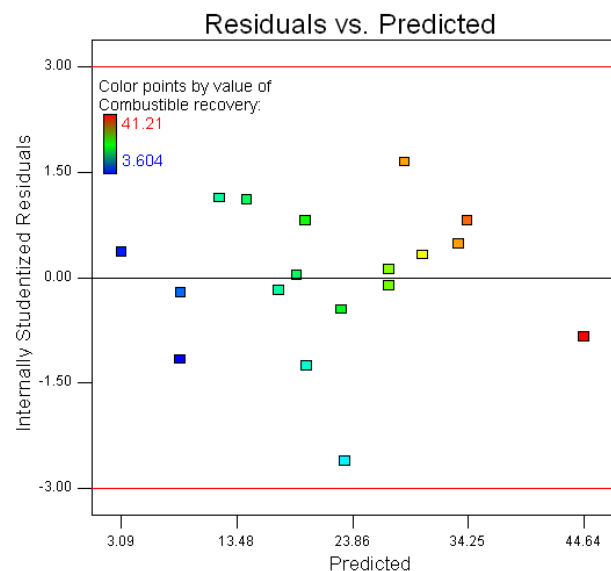
احتمال بزرگتر بودن F از	مقدار F استاندارد	مقدار F- Value)	میانگین مربعات MS	درجه آزادی d.f.	مجموع مربعات (SS)	منبع
۰/۰۰۰۹	۳/۲۱۷	۱۰/۳۱	۳۰۳/۳۹	۶	۱۸۲۰/۳۴	مدل
۰/۰۰۱۹	۴/۹۶۵	۱۷/۳۳	۵۰۹/۹۰	۱	۵۰۹/۹۰	B(MIBC Dosage)
۰/۳۱۸۵	۴/۹۶۵	۱/۱۰	۳۲/۴۳	۱	۳۲/۴۳	C(Air Rate)
۰/۳۶۴۲	۴/۹۶۵	۰/۹۰	۲۶/۵۹	۱	۲۶/۵۹	D(water Rate)
۰/۰۰۲۸	۴/۹۶۵	۱۵/۵۳	۴۵۶/۷۴	۱	۴۵۶/۷۴	E(Feed Rate)
۰/۰۰۱۶	۴/۹۶۵	۱۸/۴۸	۵۴۳/۶۴	۱	۵۴۳/۶۴	CE
۰/۰۱۵۳	۴/۹۶۵	۸/۵۳	۲۵۱/۰۵	۱	۲۵۱/۰۵	DE
۰/۱۷۱۸	۴/۹۶۵	۲/۱۷	۶۳/۷۴	۱	۶۳/۷۴	مقدار انحناء
			۲۹/۴۲	۱۰	۲۹۴/۱۷	باقیمانده
۰/۰۸۶۲		۸۰/۵۹	۳۲/۶۴	۹	۲۹۳/۷۶	نقصان در برازش مدل
			۰/۴۰	۱	۰/۴۰	خطای مطلق
				۱۷	۲۱۷۸/۲۵	Total

ملاحظه می‌شود که مدل برازش شده از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p\text{-value} < 0.05$) معنی دار می‌باشد و احتمال بزرگتر بودن از F (۰/۰۰۰۹) در مدل کمتر از ۰/۰۵ است. در واقع تنها ۰/۰۰۹٪ احتمال وجود دارد که F-value بزرگتری بر اساس تاثیر اغتشاشات به وجود آید و همچنین اثر عوامل اصلی، مقدار MIBC (B)، نرخ خوراک‌دهی (E)، اثر متقابل بین نرخ هوادهی و نرخ خوراک‌دهی (CE)، همچنین بین نرخ آب شستشو و نرخ خوراک‌دهی (DE) از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p\text{-value} < 0.05$) در پاسخ آزمایش (درصد بازیابی) معنی دار و با اهمیت می‌باشند.

۵-۳-۴ آنالیز خطاهای پاسخ دوم (درصد بازیابی)

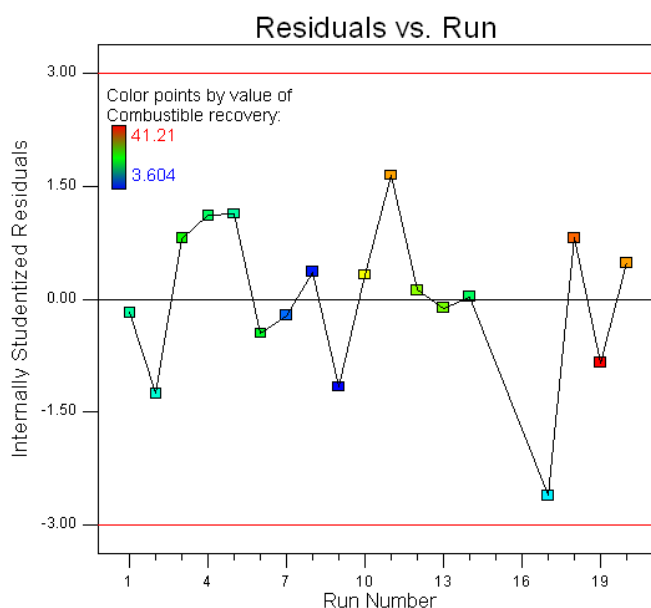
باقیمانده‌ها در واقع تفاوت مقادیر بدست آمده به وسیله مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها است که به منظور بررسی صحت مدل برازش شده در پیش‌بینی پاسخ آزمایش و همچنین نحوه انجام

آزمایشها لازم است که آنالیز خطاها (باقیماندهها) بررسی شوند بنابراین نتایج حاصله از آنالیز خطاها در شکلهای (۵-۱۸)، (۵-۱۹)، (۵-۲۰) آورده شده است.



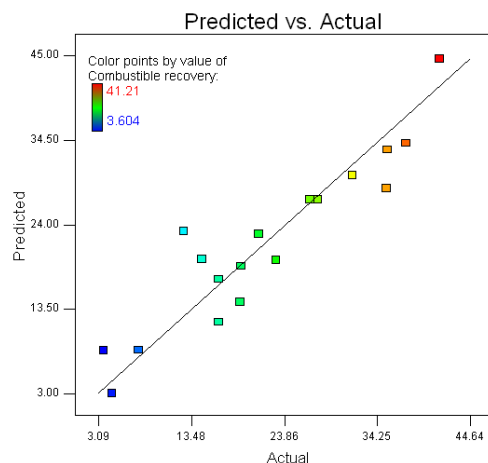
شکل (۵-۱۸) نمودار تغییرات ماندهها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به درصد بازیابی

در شکل (۵-۱۸) نمودار باقیماندهها در برابر مقادیر پیش‌بینی شده برای پاسخ دوم نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار پیش‌بینی شده هیچگونه افزایش مشهودی در باقیماندهها مشاهده نمی‌شود و از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند.



شکل (۵-۱۹) نمودار تغییرات باقیماندهها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به درصد بازیابی

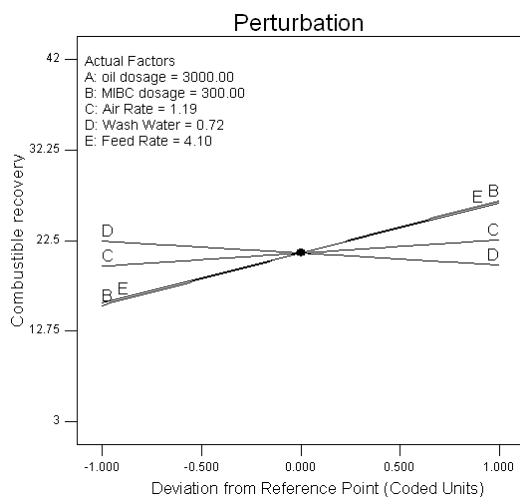
شکل (۵-۱۹) نشان می‌دهد که مقادیر باقیمانده‌ها به صورت تصادفی پراکنده شده‌اند که این نشان-دهنده مستقل بودن باقیمانده‌ها نسبت به توالی انجام آزمایش‌ها است.



شکل (۵-۲۰) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده آن توسط مدل نمودار شکل (۵-۲۰) مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده آن توسط مدل را نشان می‌دهد که با نزدیک بودن مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده پاسخ (درصد بازیابی)، بر روی یک خط تقریباً ۴۵ درجه اعتماد را نسبت به مدل برازش شده بیشتر می‌کند.

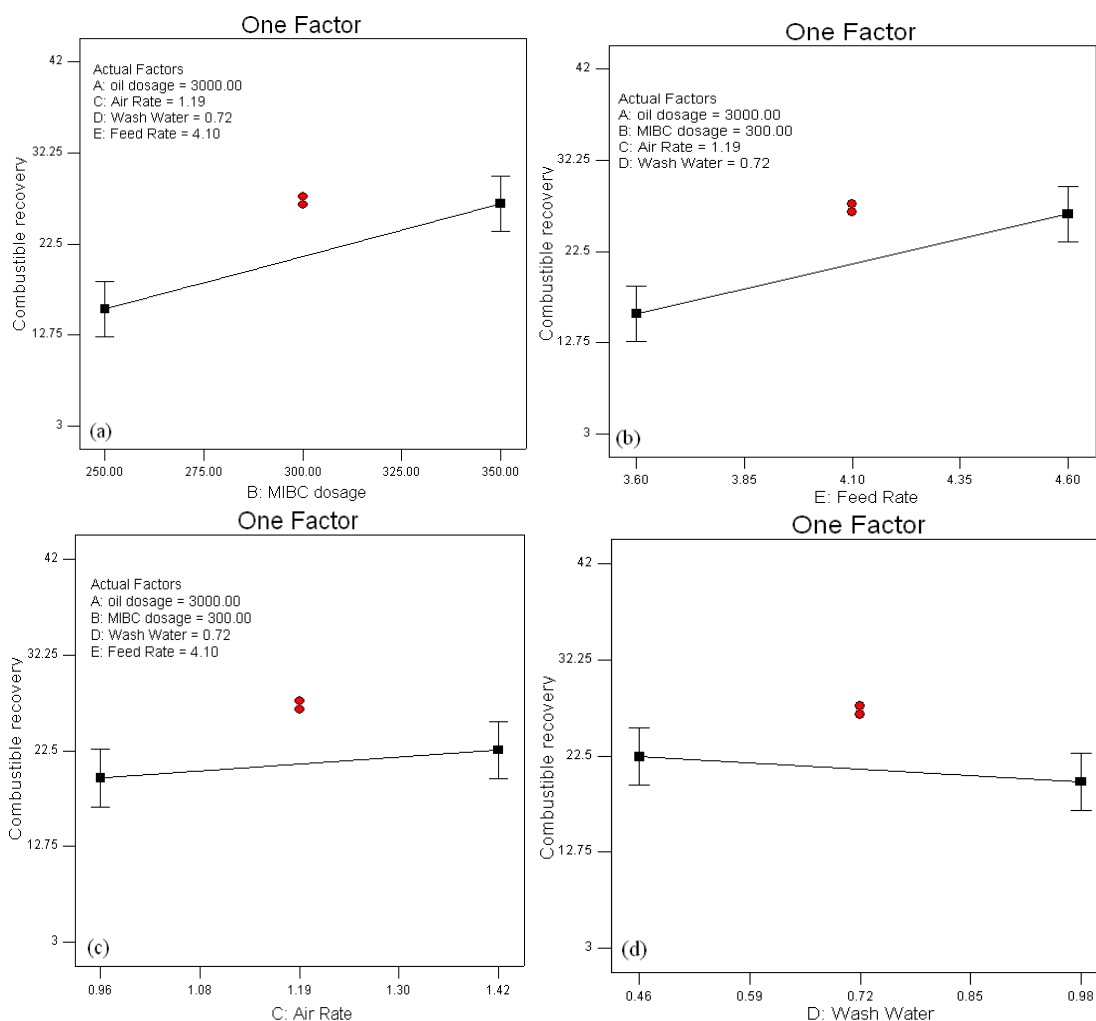
۵-۳-۵ بررسی نتایج پاسخ دوم (درصد بازیابی)

با انتخاب مدل پیش‌بینی شده مناسب و اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب باقیمانده‌ها، به بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های مربوط به درصد بازیابی پرداخته شده است. نمودار شکل (۵-۲۱) تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ (درصد بازیابی) را نشان می‌دهد.



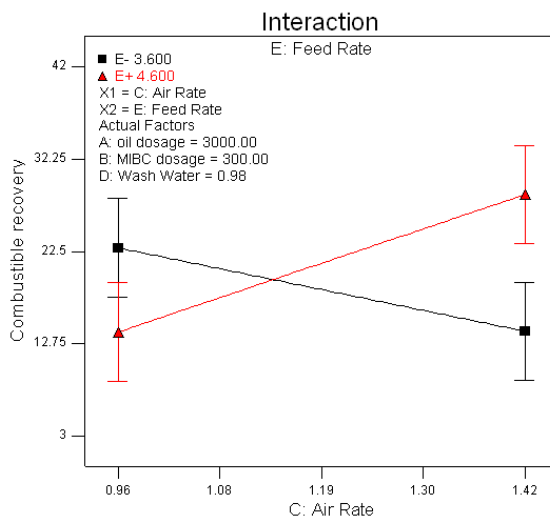
شکل (۵-۲۱) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ دوم (درصد بازیابی)

همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود عوامل B و E به ترتیب عوامل حساس بر پاسخ آزمایش (درصد بازیابی) بوده و عامل C و D که تقریباً به صورت خطی هستند، حساسیت خاصی از خود نشان نمی‌دهد. شکل (۵-۲۲) تأثیر هر کدام از عوامل را بر درصد بازیابی به صورت خطی هنگامی که از پایین‌ترین سطحشان تا بالاترین سطحشان تغییر می‌کند را نشان می‌دهد.



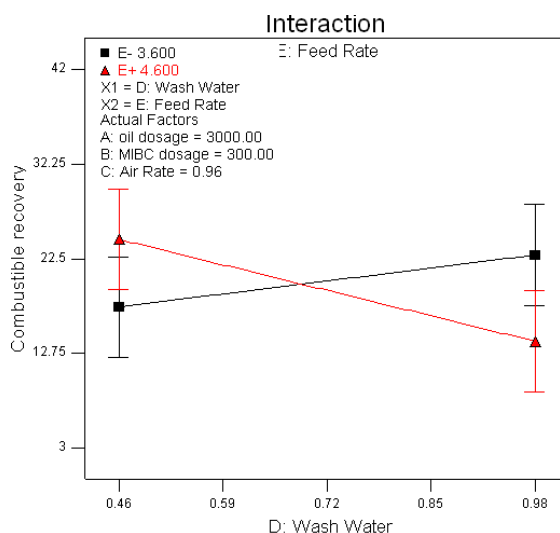
شکل (۵-۲۲) نمودار تأثیر عوامل (a) میزان مصرف MIBC، (b) نرخ خوراک‌دهی، (c) نرخ هوادهی، (d) نرخ آب شستشو مشاهده می‌شود که هر دو سطح احتمال نرخ خوراک‌دهی و همچنین هر دو سطح مقدار کف ساز همپوشانی ندارند و تأثیر معنی‌دار و مهمی بر روی درصد بازیابی دارند. در نهایت با افزایش آب شستشو و نرخ هوادهی درصد بازیابی در محدوده مورد بررسی تغییر معنی‌داری نمی‌کند. علاوه بر بررسی اثرات عوامل اصلی، برای درک بهتر از فرآیند و شرایط عملیاتی می‌باید اثرات متقابل بین عوامل نیز مورد مطالعه قرار گیرند

شکل (۵-۲۳) تعامل بین نرخ خوراک‌دهی و نرخ گازدهی را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۳) اثر متقابل دو عامل نرخ هوادهی و نرخ خوراک‌دهی بر درصد بازیابی

به وضوح در شکل مشهود است که این دو عامل در تعامل با هم قرار دارند و هر دو سطح احتمال این دو عامل با هم همپوشانی دارند. هنگامی که نرخ خوراک‌دهی در سطح پایین قرار دارد با افزایش نرخ هوادهی درصد بازیابی کاهش می‌یابد و هنگامی که نرخ خوراک‌دهی در سطح بالا قرار دارد با افزایش نرخ هوادهی درصد بازیابی افزایش می‌یابد. شکل (۵-۲۴) تعامل بین نرخ خوراک‌دهی و نرخ آب شستشو را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۴) اثر متقابل دو عامل نرخ آب شستشو و نرخ خوراک‌دهی بر درصد بازیابی

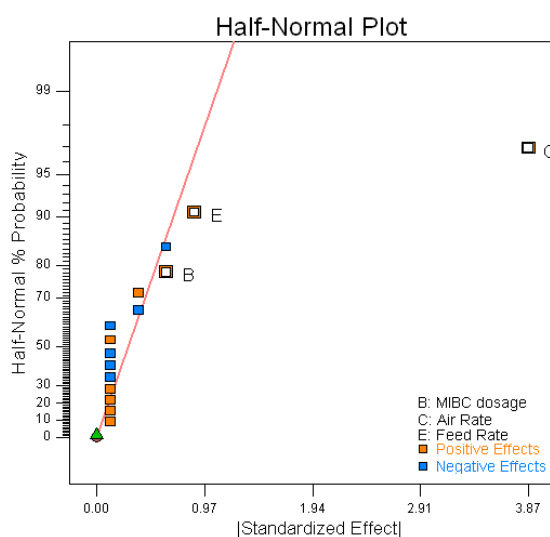
همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود وجود اثر متقابل مشهود است. چون در سطح پایین مصرف مقدار MIBC با افزایش نرخ خوراک‌دهی درصد خاکستر تغییر خاص و معنی‌داری نمی‌کند. اما زمانی که مقدار MIBC در سطح بالا است با افزایش نرخ خوراک‌دهی درصد خاکستر افزایش یافته است.

۴-۵ مطالعه و تفسیر داده‌های پاسخ سوم (ماندگی گاز)

در این بخش تفسیر داده‌های پاسخ سوم (ماندگی گاز) مد نظر است.

۱-۴-۵ برازش مدل بر روی داده‌های پاسخ سوم (ماندگی گاز)

برای بررسی رفتار پارامترها بر ماندگی گاز، احتیاج به برازش مدل بر پاسخ آزمایشها می‌باشد.

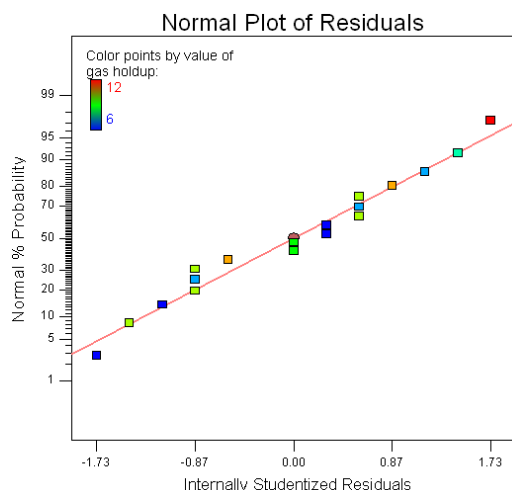


شکل (۵-۲۵) نمودار اثرات عوامل مربوط به پاسخ سوم (ماندگی گاز)

بنابراین در شکل (۵-۲۵) اثر پارامترهایی که دارای تاثیر بیشتری در آزمایشها هستند و در تشکیل مدل بکار می‌روند به صورت گرافیکی نشان داده شده است.

۲-۴-۵ توزیع نرمال باقیمانده‌ها

برای صحت مدل، از نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها استفاده گردید که داده‌های حاصل از باقیمانده‌ها در امتداد یک خط راست قرار گرفتند و صحت مدل برازش شده را تایید می‌کند شکل (۵-۲۶).



شکل (۵-۲۶) نمودار توزیع نرمال باقیمانده‌ها مربوط به ماندگی گاز

۳-۴-۵ آنالیز واریانس

از آنجایی که مدل برای تعیین ارتباط پارامترها بر روی پاسخ آزمایش ضروری است در نتیجه با انتخاب بهترین مدل و انتخاب بهترین عوامل با در نظر گرفتن سطح اعتماد ۹۵٪ با استفاده از نرم‌افزار Design Expert7 آنالیز داده‌ها انجام شد و جدول آنالیز آماری واریانس بدست آمد. جدول (۵-۶) آنالیز واریانس مربوط به ماندگی گاز را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که مدل برازش شده از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p\text{-value} < 0.05$) معنی‌دار می‌باشد و احتمال بزرگتر بودن از $F(0.0001)$ در مدل کمتر از ۰/۰۵٪ است. در واقع تنها ۰/۰۱٪ احتمال وجود دارد که $F\text{-value}$ بزرگتری بر اساس تاثیر اغتشاشات به وجود آید و همچنین اثر عوامل اصلی، مقدار MIBC (B)، نرخ خوراک‌دهی (E)، نرخ هوادهی (C) از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p\text{-value} < 0.05$) در پاسخ آزمایش (ماندگی گاز) معنی‌دار و با اهمیت می‌باشند.

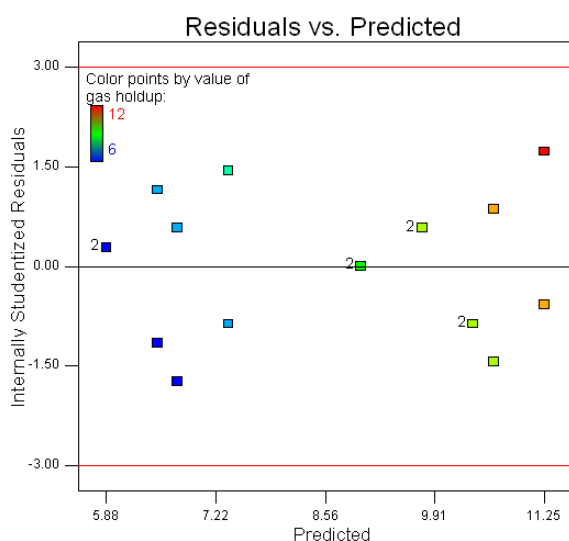
همچنین همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار انحناء برازش شده از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p\text{-value} < 0.05$) معنی‌دار نیست و احتمال بزرگتر بودن از $F(0.2643)$ در مدل بیشتر از ۰/۰۵٪ است. در واقع $F\text{-value}$ مقدار انحناء که اندازه‌گیری اختلاف بین متوسط نقاط مرکزی و متوسط نقاط عوامل است در طراحی بر اساس تاثیر اغتشاشات معنادار نیست.

جدول (۵-۶) آنالیز واریانس مربوط به ماندگی گاز

منبع	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی d.f.	میانگین مربعات MS	مقدار F (F-Value)	مقدار F استاندارد	احتمال بزرگتر بودن از F P-Value
مدل	۶۴/۶۹	۳	۲۱/۵۶	۸۶/۲۵	۳/۴۱۱	۰/۰۰۰۱
B(MIBC Dosage)	۱/۵۶	۱	۱/۵۶	۶/۲۵	۴/۶۶۷	۰/۰۲۶۶
C(Air Rate)	۶۰/۰۶	۱	۶۰/۰۶	۲۴۰/۲۵	۴/۶۶۷	۰/۰۰۰۱
E(Feed Rate)	۳/۰۶	۱	۳/۰۶	۱۲/۲۵	۴/۶۶۷	۰/۰۰۳۹
مقدار انحناء	۰/۳۴	۱	۰/۳۴	۱/۳۶	۴/۶۶۷	۰/۲۶۴۳
باقیمانده	۳/۲۵	۱۳	۰/۲۷			
نقصان در برازش	۳/۲۵	۱۲	۰/۲۷			
Total	۶۸/۲۸	۱۷				

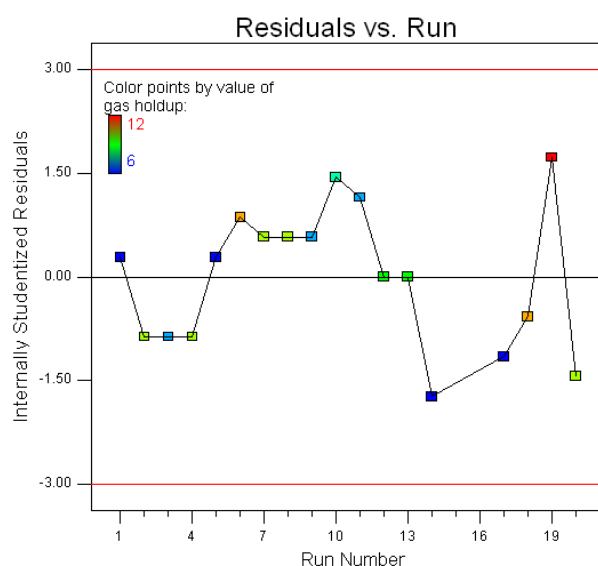
۵-۴-۴ آنالیز خطاهای پاسخ سوم (ماندگی گاز)

همان طور که گفته شد به منظور بررسی صحت مدل برازش شده در پیش‌بینی پاسخ آزمایش و همچنین نحوه انجام آزمایشها لازم است که آنالیز خطاها (باقیماندهها) بررسی شوند بنابراین نتایج حاصله از آنالیز خطاها در شکلهای (۵-۲۷)، (۵-۲۸)، (۵-۲۹) آورده شده است. شکل (۵-۲۷) وضعیت مانده‌ها را در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ توسط مدل نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود مانده‌ها نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده پاسخ توسط مدل وابسته نیستند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده اند.



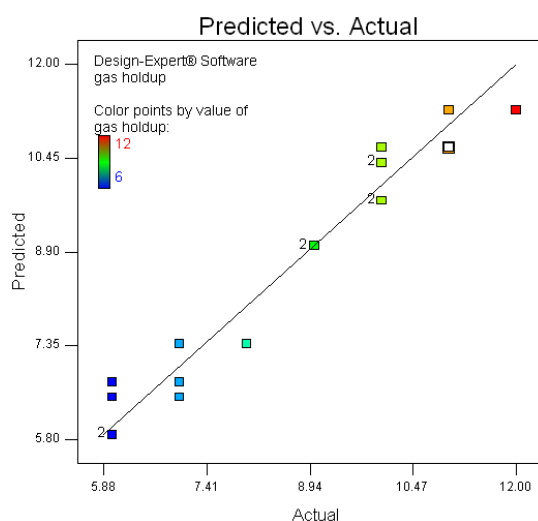
شکل (۵-۲۷) نمودار تغییرات مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده مربوط به ماندگی گاز

شکل (۵- ۲۸) به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر باقیماندهها با توجه به توالی انجام آزمایشها پرداخته شده است. همانطور که این نمودار نشان می دهد باقیماندهها نسبت به توالی انجام آزمایشها به صورت تصادفی توزیع شده اند.



شکل (۵- ۲۸) نمودار تغییرات باقیماندهها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به ماندگی گاز

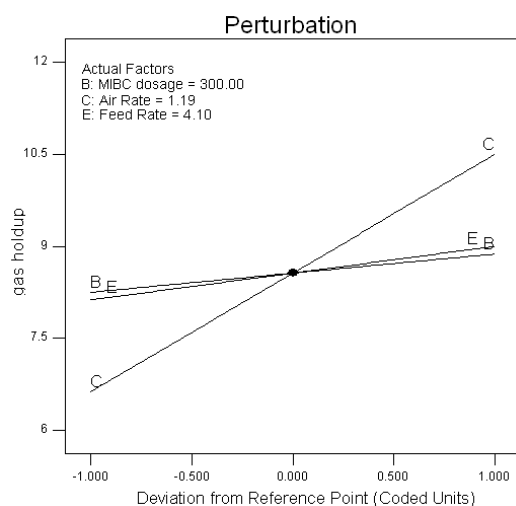
نمودار شکل (۵- ۲۹) برای بررسی توانایی مدل پیشنهادی توسط نرم افزار در پیش بینی مقادیر واقعی پاسخ (ماندگی گاز) بکار می رود. همانطور که ملاحظه می شود، مقادیر واقعی، و پیش بینی شده پاسخ (ماندگی گاز) توسط مدل، به هم نزدیک بوده اند و اعتماد را نسبت به مدل برآزش شده بیشتر می کند.



شکل (۵- ۲۹) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (ماندگی گاز) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل

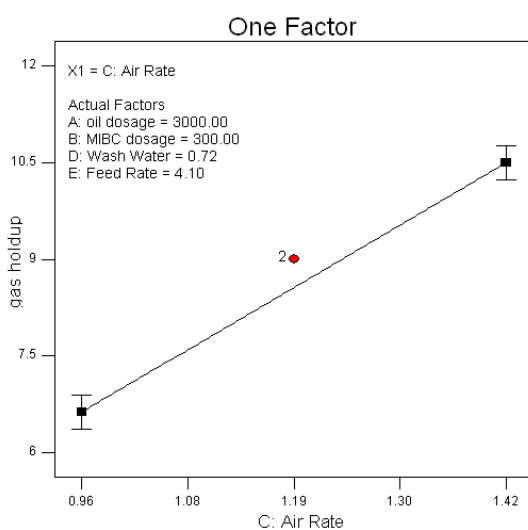
۵-۴-۵ بررسی نتایج پاسخ سوم (ماندگی گاز)

با انتخاب مدل پیش‌بینی شده مناسب و اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب باقیمانده‌ها، به بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های مربوط به ماندگی گاز پرداخته می‌شود. نمودار شکل (۵-۳۰) تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ (ماندگی گاز) را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۳۰) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ سوم (ماندگی گاز)

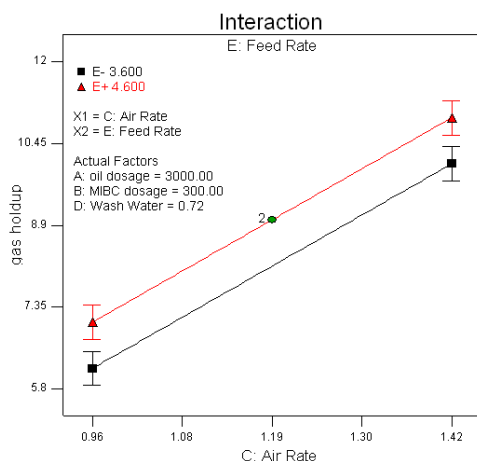
همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود عوامل C، E و B به ترتیب عوامل حساس بر پاسخ آزمایش (ماندگی گاز) است. شکل (۵-۳۱) تأثیر نرخ هوادهی را بر ماندگی گاز به صورت خطی هنگامی که از پایین‌ترین سطح تا بالاترین سطح تغییر می‌کند را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۳۱) نمودار تأثیر عوامل نرخ هوادهی بر ماندگی گاز

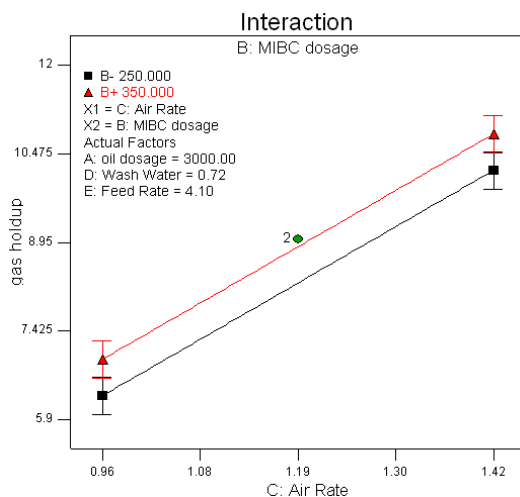
در شکل (۵- ۳۱) ملاحظه می‌شود که تغییر در سطوح بالا و پایین عامل گازدهی تاثیر معنی‌دار و مهمی بر روی پاسخ (ماندگی گاز) داشته است و بر اساس نتایج آزمایش در این شکل، با افزایش نرخ هوادهی، ماندگی گاز در ناحیه جمع‌آوری افزایش می‌یابد. به طور کلی عملکرد نرخ گازدهی بر ماندگی گاز بدین گونه است که تا زمانی که افزایش نرخ گازدهی منجر به تشکیل رژیم جریان حبابی می‌شود با افزایش نرخ هوادهی، ماندگی گاز تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد اما به محض اینکه افزایش بیش از اندازه نرخ هوادهی منجر به تشکیل رژیم جریان زنجیری-آشفته می‌شود با افزایش نرخ هوادهی، ماندگی گاز ناپایدار شده و جریان به صورت حبابهای بزرگ در می‌آید که بسرعت بالا می‌روند و آب و حبابهای ریز را به سمت پایین جابجا می‌کند. در واقع با ایجاد جریان آشفته ماندگی گاز از حالت خطی خارج شده و مقدار انحناء نمودار زیاد می‌شود که در حالت کلی عملکرد مطلوب ستون در رژیم جریان حبابی است که مشخصه توزیع همگن حبابها با ابعاد و نرخ صعود تقریباً یکسان می‌باشد [۷]. همانطور که در شکل (۵- ۳۱) نیز مشاهده می‌کنید با افزایش نرخ هوادهی ماندگی گاز افزایش یافته است و همچنین با توجه به این شکل و جدول (۵- ۶) در می‌یابیم که به دلیل معنا دار نبودن مقدار انحناء، ماندگی گاز تقریباً به صورت خطی و در بخش رژیم جریان حبابی قرار دارد.

شکل (۵- ۳۲) نتیجه افزایش نرخ خوراک‌دهی که جریان آن بر خلاف جهت حبابهاست را نشان می‌دهد. برای مقدار معین نرخ گازدهی، افزایش نرخ خوراک‌دهی منجر به افزایش ماندگی گاز می‌شود. این امر به دلیل کاهش سرعت صعود حبابها قابل انتظار است که کاهش صعود حبابها منجر به افزایش زمان اقامت ذرات در منطقه جمع‌آوری می‌شود که در نتیجه آن باعث افزایش تعداد حبابها و ماندگی گاز در ناحیه جمع‌آوری می‌شود [۷ و ۲۹].



شکل (۵-۳۲) ماندگی گاز بر حسب نرخ گازدهی، تاثیر سرعت رو به پایین مایع

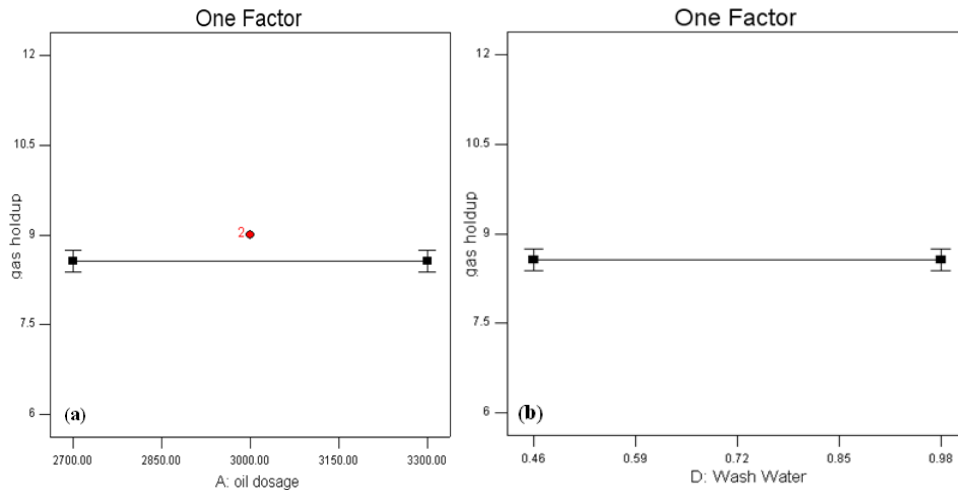
افزایش میزان کف‌ساز تاثیر چشمگیری در کاهش اندازه حباب دارد. کاهش اندازه حباب به معنای کاهش سرعت رو به بالای حباب است و در نتیجه ماندگی گاز افزایش می‌یابد [۷ و ۲۹]. تاثیر غلظت کف‌ساز بر روی ماندگی گاز در این سری از آزمایشها در شکل (۵-۳۳) نشان داده شده است. در این سری از آزمایشها نیز با افزایش کف ساز (۳۵۰ g/t) برای مقدار معین نرخ گازدهی منجر به افزایش ماندگی گاز می‌شود.



شکل (۵-۳۳) ماندگی گاز بر حسب نرخ گازدهی، تاثیر میزان کف‌ساز

همانطور که در دو نمودار شکل (۵-۳۲) و شکل (۵-۳۳) مشاهده شد تاثیر نرخ خوراک‌دهی بر ماندگی گاز بیشتر از مقدار کف‌ساز است.

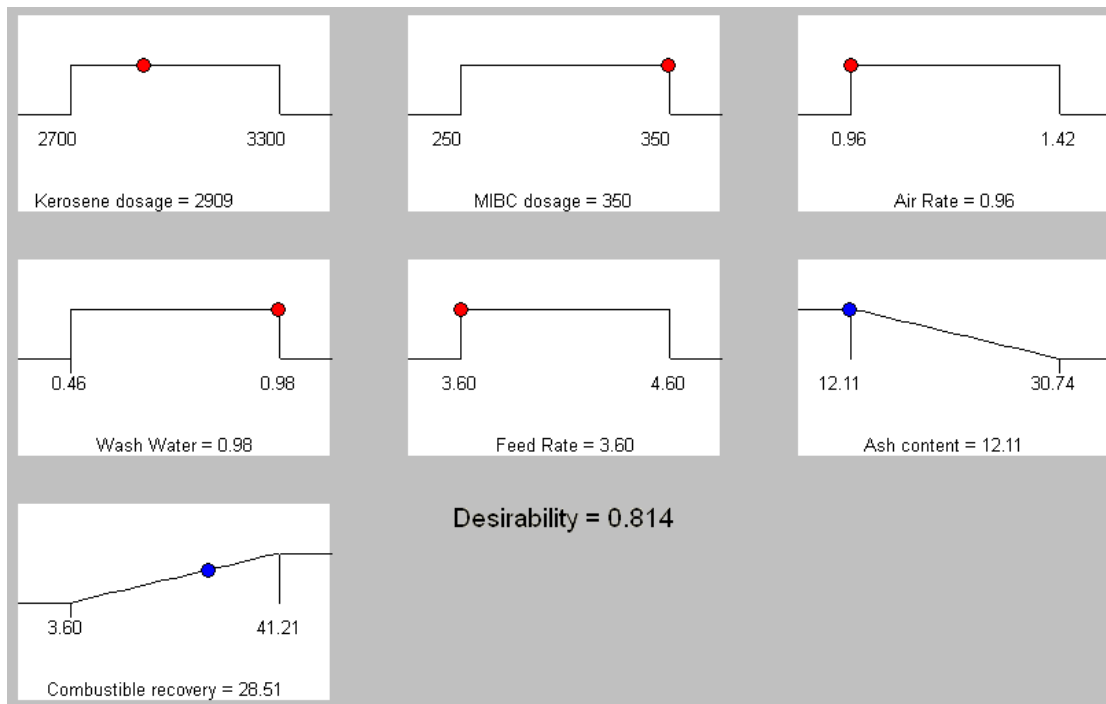
همچنین نتایج حاصل از این سری آزمایشها نشان داد که مقدار کلکتور و نرخ آب شستشو در محدوده پارامترهای مورد بررسی هیچ تاثیری بر روی ماندگی گاز ندارند شکل (۵-۳۴).



شکل (۵-۳۴) ماندگی گاز بر حسب (a) مقدار کلکتور (b) نرخ آب شستشو

۵-۵ نتایج بهینه‌سازی متغیرها بر روی درصد بازیابی و درصد خاکستر

شکل (۵-۳۵) نتیجه بهینه‌سازی را نشان می‌دهد که شرایط بهینه برای بازیابی ۲۸/۵۱٪ و درصد خاکستر ۱۲/۱۱٪ با سطح مطلوبیت ۸۱٪ در سطح پارامترهای، مقدار کلکتور ۲۹۰۹ g/t، مقدار MIBC، ۳۵۰ g/t، نرخ هوادهی ۰/۹۶ cm/s، نرخ آب شستشو ۰/۹۸ lit/min، نرخ خوراک دهی ۳/۶ lit/min بدست آمد.



شکل (۵-۳۵) نتایج بهینه‌سازی پارامترها

۵-۶ اعتبار سنجی نتایج بهینه سازی

با توجه به شرایط بهینه نرم افزار، سه تست انجام شد که یک تست به علت نقص دستگاه قابل استناد نبود و نتایج دو تست دیگر به شرح زیر است.

جدول (۵-۷) نتایج اعتبار سنجی تحت شرایط بهینه نرم افزار

Run	مقدار کلکتور g/t	مقدار MIBC g/t	نرخ هوادهی Cm/s	نرخ آبشستشو Lit/min	نرخ خوراک دهی Lit/min	خاکستر %	بازیابی %
۱	۲۹۰۹	۳۵۰	۰/۹۶	۰/۹۸	۳/۶	۱۲/۶۰	۲۷
۲	۲۹۰۹	۳۵۰	۰/۹۶	۰/۹۸	۳/۶	۱۱/۵۵	۲۵

بنابراین با توجه به نتایج دو تست اعتبار مدل تأیید می شود.

فصل ششم

جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و

پیشنهادات

۱-۶ خلاصه و نتیجه گیری

- ۱- از طراحی آزمایشها و با استفاده از نرم افزار Design Expert برای بررسی شستشوپذیری باطله کارخانه زغالشویی البرز مرکزی با ابعاد کمتر از ۰/۶ میلی‌متر و ۵۶ درصد خاکستر استفاده شد.
- ۲- به منظور کاهش تاثیر پارامترهای شاخص بر عملیات فلوتاسیون ستونی باطله جیگ کارخانه زغالشویی انجیر تنگه، مقدار و نوع بهینه معرف‌ها با استفاده از دستگاه فلوتاسیون مکانیکی بررسی شد و با توجه به تحلیل‌ها و بررسی‌هایی که در این مرحله از آزمایشها انجام شد، شناخت نسبتاً خوبی نسبت به قابلیت شناوری و مقدار و نوع معرف‌ها در شستشوپذیری زغال بدست آمد که مقدمات لازم را برای مطالعات بیشتر و بهینه‌سازی عملیات شستشوپذیری زغال توسط فلوتاسیون ستونی را فراهم کرد. بدین منظور به تعداد دوازده آزمایش در قالب طراحی فاکتوریل کلی با هدف بهینه‌سازی معرف‌ها، توسط فلوتاسیون مکانیکی انجام شد.
- ۳- به دلیل استفاده از نتایج حاصل از آزمایشات فلوتاسیون مکانیکی برای فلوتاسیون ستونی، اثر عوامل بر روی بازدهی جدایش بحث شد که آنالیز واریانس نتایج حاصل از آزمایشات فلوتاسیون مکانیکی نشان داد اثر عوامل اصلی، نوع کلکتور و مقدار کلکتور و مقدار MIBC و اثر متقابل بین نوع کلکتور و مقدار MIBC از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p\text{-value} < 0.05$) در بازدهی جدایش معنی‌دار می‌باشد. با توجه به نمودار اثرات عوامل اصلی، عامل نوع کلکتور نشان داد که با افزایش کلکتور نفت بازدهی جدایش افزایش می‌یابد و در بین عوامل اصلی این عامل (نوع کلکتور) بیشترین تاثیر را بر روی بازدهی جدایش داشت و همچنین افزایش عوامل اصلی، مقدار MIBC و مقدار کلکتور در محدوده مطرح شده تاثیر مثبت بر بازدهی جدایش داشت.
- ۴- نتایج حاصل از آزمایشات فلوتاسیون مکانیکی نشان داد که شرایط بهینه برای مقدار کلکتور g/t ۳۰۰۰ و مقدار کف‌ساز (MIBC) g/t ۳۰۰ و نوع کلکتور نفت است.

۵- آزمایشهای فلوتاسیون ستونی با هدف شناخت تاثیر فاکتورها و مقادیر بهینه از آنها برای دستیابی به جدایش مطلوب انجام شد. بدین منظور به تعداد ۱۸ آزمایش در قالب طراحی فاکتوریل جزئی دو سطحی، توسط فلوتاسیون ستونی انجام شد.

۶- آنالیز واریانس درصد خاکستر نتایج حاصل از آزمایشها فلوتاسیون ستونی نشان داد که اثر عوامل اصلی، مقدار کف‌ساز (MIBC)، نرخ هوادهی، نرخ خوراک‌دهی و نرخ آب شستشو از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ ($p\text{-value} < 0.05$) بر درصد خاکستر معنی‌دار است. با توجه به نمودار اثرات عوامل اصلی، عامل نرخ هوادهی در بین عوامل اصلی بیشترین تاثیر را بر درصد خاکستر داشت که با افزایش آن درصد خاکستر افزایش می‌یافت و همچنین افزایش عوامل اصلی، مقدار MIBC، نرخ خوراک‌دهی در محدوده مطرح شده منجر به افزایش درصد خاکستر شد در صورتی که عامل نرخ آب شستشو، کاهش درصد خاکستر را در پی داشت.

۷- آنالیز واریانس درصد بازیابی نتایج حاصل از آزمایشات فلوتاسیون ستونی نشان داد که اثر عوامل اصلی، مقدار کف‌ساز (MIBC) و نرخ خوراک‌دهی از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵٪ بر درصد بازیابی معنی‌دار است.

۸- نتایج حاصل از ماندگی گاز نشان داد که در بین عوامل، عامل نرخ گازدهی بیشترین تاثیر را بر ماندگی گاز دارد و با افزایش آن ماندگی گاز افزایش می‌یابد و در ناحیه جریان حبابی قرار دارد.

۹- بنابراین از نتایج حاصل از ماندگی گاز می‌توان پی به دلیل افزایش درصد خاکستر با افزایش نرخ گازدهی برد که همانطور که بحث شد با افزایش نرخ گازدهی به دلیل افزایش ماندگی گاز در ناحیه جمع‌آوری درصد خاکستر افزایش می‌یابد.

۱۰- همچنین از نتایج حاصل از ماندگی گاز افزایش درصد خاکستر با افزایش مقدار کف‌ساز توجیه می‌شود. بر این اساس افزایش مقدار کف‌ساز، منجر به تولید حباب‌های کوچک‌تر و کاهش سرعت صعود حباب‌ها در ناحیه جمع‌آوری و در نهایت منجر به افزایش ماندگی گاز و افزایش درصد خاکستر می‌شود.

۱۱- نتایج حاصل از ماندگی گاز نشان داد که برای مقدار معین نرخ گازدهی، افزایش نرخ خوراک‌دهی و مقدار MIBC منجر به افزایش ماندگی گاز می‌شود که تاثیر مقدار MIBC بر روی ماندگی گاز بیشتر بود.

۱۲- عوامل نرخ آب شستشو و مقدار کلکتور تاثیری بر ماندگی گاز نشان ندادند.

۱۳- بدین ترتیب نتایج حاصل از آزمایشات فلوتاسیون ستونی نشان داد، شرایط بهینه پارامترها شامل مقدار کلکتور ۲۹۰۹ g/t، مقدار کف‌ساز (MIBC) ۳۵۰ g/t، نرخ هوادهی ۰/۹۶ cm/s، نرخ خوراک-دهی ۳/۶ lit/min و نرخ آب شستشو ۰/۹۸ lit/min است که تحت این شرایط کنسانتره با درصد خاکستر ۱۲/۱٪ و بازیابی ۲۸/۵ درصد حاصل می‌شود.

۱۴- همچنین نتایج حاصل از آزمایشات فلوتاسیون مکانیکی و ستونی نشان داد که فلوتاسیون ستونی با ۱۲/۱٪ خاکستر و ۲۸/۵٪ بازیابی کارایی بهتر برای تولید زغال کک شو مورد نیاز صنعت نسبت به فلوتاسیون مکانیکی با ۲۸/۸٪ خاکستر و ۶۰/۶٪ بازیابی دارد.

۱۵- همان طور که ملاحظه شد از باطله ای که ۵۶ درصد خاکستر دارد زغال با حدود ۱۲/۱ درصد خاکستر فراوری شد که این علاوه بر کمک به راندمان کارخانه زغالشویی البرز مرکزی، از لحاظ اقتصادی بلکه از لحاظ زیست محیطی حائز اهمیت است.

۱۶- در اثر مصرف مفید باطله و کاهش حجم باطله، پتانسیل آلاینده‌گی آنها کمتر می‌شود.

۱۷- به علت ریزی دانه‌بندی باطله فلوتاسیون زغالشویی در هزینه خردایش درصدی از باطله مصرفی برای تولید زغال صرفه‌جویی خواهد شد.

۲-۶ پیشنهادات

به منظور کاربردی شدن هر چه بیشتر تحقیق بهتر است:

۱- این تحقیق فقط از نظر فنی امکان شستشوپذیری باطله زغال البرز مرکزی را توسط فلوتاسیون ستونی مورد بحث قرار داده است به نظر می‌رسد که بررسی اقتصادی نیز در مقایسه شرایط فعلی کارخانه با شرایطی که ستونهای فلوتاسیون در مدار قرار گیرند نیز انجام شود.

۲- تکرار آزمایشها در مقیاس نیمه صنعتی برای تاثیر دانه بندی، با انجام نرمه گیری و بدون نرمه گیری

که معمولاً نرمه گیری زیر ۴۰۰ مش می تواند مفید واقع شود.

پیوست و ضمائم

مقدمه‌ای بر طراحی آماری آزمایشها

مقدمه

برای انجام آزمایشها از تکنیک‌های متداول در طراحی آماری آزمایشها^{۲۸} (DOE) استفاده می‌گردد که طراحی آماری آزمایشها روشی است که توسط Fisher در دهه ۱۹۲۰ میلادی برای بررسی و تعیین تاثیر عوامل موثر بر افزایش محصولات کشاورزی ابداع گردید. در واقع طراحی آزمایشها شامل یکسری آزمایشها می‌شود که به طور آگاهانه مقدار متغیرهای ورودی عوض می‌شود تا از این طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرآیند مشاهده و شناسایی شود. روشهای طراحی آزمایشها را می‌توان در توسعه یا رفع مشکلات فرآیند و نتیجتاً بهبود عملکرد آن، موثر دانست. کاربرد این فنون می‌تواند باعث بهبود بازده، کاهش زمان آزمایشها، یا حتی کاهش هزینه‌ها شود.

در غالب فرآیندهای مهندسی فاکتورهای متعددی موثرند که شناخت تعداد و میزان تاثیر هر یک می‌تواند در طراحی و انجام اقتصادی فرآیند مورد بهره‌برداری قرار گیرند. اینکه چگونه می‌توان پارامترهای موثر و میزان تاثیر آنها را با انجام حداقل آزمایشهای ممکن بدست آورد نیازمند تسلط بر مکانیزم فرآیند و اعمال نظر کارشناسانه و همچنین بکارگیری از روشهای آماری طراحی و تحلیل آزمایشها می‌باشد [۴۷].

مهمترین اهدافی که از استفاده از این روشها انتظار می‌رود را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- ۱- فهم چگونگی ارتباط بین متغیرها و پاسخها ۲- کدام یک از متغیرها تأثیر معنی‌دار از لحاظ آماری بر پاسخ فرآیندها دارند و کدام بی‌تأثیرند ۳- بررسی و فهم اثرات متقابل^{۲۹} بین متغیرها، نسبت به پاسخ فرآیند ۴- تلاش در بهینه‌سازی فرآیند، یعنی مقدار هر یک از متغیرها چگونه انتخاب شود تا

^{۲۸}- Design Of Experiment

^{۲۹}- Interaction

میانگین پاسخ فرآیند مطلوبتر شود ۵- تلاش درمقاوم سازی^{۳۰} فرآیند، یعنی پاسخ فرآیند را در مقابل تغییرات غیر قابل کنترل، مقاوم ساخت [۴۸].

مفاهیم و تعاریف اساسی

در ابتدا، برخی از اصطلاحات مورد استفاده در مبحث طراحی آماری آزمایشها، تعریف می‌شود [۴۸]:

پاسخ

متغیر خروجی است که مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد. این متغیر باید کمی^{۳۱} باشد و در صورت وجود متغیر کیفی^{۳۲} حتماً آنرا باید کمی کرد. از جمله این متغیرها می‌توان به بازیابی و عیار اشاره کرد.

عامل^{۳۳}

عامل، متغیر مستقلی است که با تغییرات آن در هر آزمایش، پاسخ یا متغیر وابسته اندازه‌گیری یا محاسبه و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای مثال مقدار کف ساز و مقدار کلکتور.

سطح^{۳۴}

سطح یک عامل مقداری است که عامل در طول آزمایش می‌گیرد در حقیقت وضعیت عوامل کمی (مانند ۷۰ گرم بر تن در برابر ۹۰ گرم بر تن مقدار کلکتور) یا مشخصه‌های کیفی از یک عامل کیفی (مانند کاغذ در برابر پلاستیک) را سطح می‌گویند.

^{۳۰}- Robust

^{۳۱}- Quantitative

^{۳۲}- Qualitative

^{۳۳}- Factor

^{۳۴} Level

تاثیر اصلی^{۳۵}

تاثیر اصلی یک عامل روی پاسخ خروجی معیاری است که مشخص می‌کند عامل چقدر پاسخ خروجی را از یک مقدار مرجع تغییر می‌دهد مقدار مرجع را اغلب مقدار میانگین پاسخ‌های خروجی در نظر می‌گیرند.

تاثیر متقابل یا تاثیر مجازی^{۳۶}

تاثیر دو یا چند عامل به طور همزمان روی پاسخ خروجی معیاری است که مشخص می‌کند دو یا چند عامل به طور همزمان چقدر پاسخ خروجی را از یک مقدار مرجع تغییر می‌دهند.

طراحی آزمایشها به روش فاکتوریل کامل^{۳۷}

در این روش تمام ترکیبات ممکن از عوامل، مورد آزمایش قرار می‌گیرند. به عنوان مثال در جدول (۱) طرح فاکتوریل کامل با سه عامل A، B و C نشان داده شده که این عوامل در دو سطح - و + تغییر داده شده‌اند و آزمایشهای زیر را شامل می‌شوند.

جدول (۱) طرح فاکتوریل کامل دو سطحی

Standard Order	Run Order	A	B	C
۱	۸	-	-	-
۲	۱	+	-	-
۳	۲	-	+	-
۴	۴	+	+	-
۵	۳	-	-	+
۶	۵	+	-	+
۷	۷	-	+	+
۸	۶	+	+	+

تعداد آزمایشهای لازم در این روش از معادله (۱) بدست می‌آید:

$$N = L^F$$

معادله (۱)

^{۳۵}- Main Effect

^{۳۶}- Intraction

^{۳۷}- Full Factorial

که در این رابطه:

N: تعداد آزمایشهای لازم، L: تعداد سطوح، F: تعداد عوامل می‌باشد. چنانچه تعداد سطوح همه عوامل مورد بررسی، برابر نباشد از معادله (۲) می‌توان برای محاسبه تعداد آزمایشها استفاده نمود.

$$N = L_1^{F_1} \times L_2^{F_2} \quad \text{معادله (۲)}$$

مزیت عمده این روش در این است که تمامی حالت‌های ممکن (از جمله کلیه اثرات متقابل) را پوشش می‌دهد و لذا بیشترین میزان اطلاعات را در اختیار آزمایشگر قرار خواهد داد. عمده‌ترین اشکال این روش در این است که تعداد آزمایشها در آن زیاد است و بنابراین زمان و هزینه اجرای این روش زیاد می‌شود. روش فاکتوریل کامل، هنگامی بکار می‌رود که تعداد محدودی عامل و سطح وجود داشته باشد.

طراحی آزمایشها به روش طراحی فاکتوریل جزئی^{۳۸}

توسط فاکتوریل کامل برای انجام آزمایشات، تمامی ترکیبات ممکن از عامل‌ها را دربر گرفته و بدین ترتیب اطلاعات ارزشمندی را در خصوص اثرات متقابل مابین این عوامل ارائه می‌دهد. با این وجود، تعداد دفعات اجرای آزمایش حتی اگر عوامل تنها در دو سطح تست شوند به سرعت افزایش می‌یابد. در این حالت با مرتب کردن عوامل به یک طرح عاملی جزئی می‌توان عوامل متعددی را بدون افزایش اندازه آزمایش مورد مطالعه و بررسی قرار داد.

به عنوان مثال پنج عامل در دو سطح برای فاکتوریل جزئی در ۱۶ مرتبه اجرا می‌شود (یک نیمه جزء). امتحان کردن کلیه ترکیبات ممکن این پنج عامل به ۳۲ بار اجرا نیاز دارد. که این آزمایش فاکتوریل کامل دو سطحی دارای ۳۱ اثر است: ۵ اثر اصلی، ۱۰ اثر متقابل دو عاملی، ۱۰ اثر متقابل سه عاملی، ۵ اثر متقابل چهار عاملی. احتمال وقوع اثرات متقابل سه عاملی به بالا بسیار نادر است. بدین ترتیب،

^{۳۸}- Fractional Factorials

پیوست و ضمائم

انجام یک آزمایش فاکتوریل کامل پنج عاملی موجب اتلاف تعداد زیادی از اثرات جهت تخمین‌های غیر ضروری خطا می‌شود.

بدین ترتیب با استفاده از یک نیمه کسر که به خوبی ساخته شده است می‌توان میانگین کل، پنج اثر اصلی و ۱۰ اثر متقابل دو عاملی را تخمین زد که چیدمان طراحی پنج عاملی با استفاده از فاکتوریل جزئی در جدول (۲) درج شده است.

جدول (۲) چیدمان طراحی برای آزمایش پنج عاملی

E	D	C	B	A	استاندارد
+	-	-	-	-	۱
-	-	-	-	+	۲
-	-	-	+	-	۳
+	-	-	+	+	۴
-	-	+	-	-	۵
-	-	+	-	+	۶
+	-	+	+	-	۷
-	-	+	+	+	۸
-	+	-	-	-	۹
+	+	-	-	+	۱۰
-	+	-	+	-	۱۱
-	+	-	+	+	۱۲
+	+	+	-	-	۱۳
-	+	+	-	+	۱۴
-	+	+	+	-	۱۵
+	+	+	+	+	۱۶

توجه شود که چهار ستون اول عاملها یک فاکتوریل کامل با ۱۶ مرتبه اجرا را تشکیل می‌دهند. ستون مربوط به عامل پنجم (E) حاصلضرب چهار ستون اول (ABCD) است.

با اجرای فاکتوریل جزئی به قیمت کاهش تعداد دفعات اجرای فاکتوریل کامل، منجر به هم اثرسازی اثرات می‌شود. که این هم اثر سازی‌ها از طریق تفکیک‌ها (Resolution) شمرده می‌شود. به عنوان مثال طراحی نیمه - جزئی برای پنج عامل دارای Resolution پنج است که نشان دهنده این است که حداقل یک عامل اصلی با یک یا چند اثر متقابل چهار عاملی و یا یک اثر متقابل دو عاملی با یک یا

چند اثر متقابل سه عاملی دارای هم اثرساز هستند. که هر یک از این روابط به صورت ۱ با ۴ و ۲ با ۳ در نظر گرفته می‌شود تا مجموع آنها ۵ شود.

محاسبه و بررسی اثرات عوامل

اثر اصلی یک عامل مطابق با تعریف عبارتست از، متوسط تغییر ایجاد شده در پاسخ به علت تغییر در سطح آن عامل [۴۹].

$$\text{Effect} = \frac{\sum Y_+}{n_+} - \frac{\sum Y_-}{n_-} \quad \text{معادله (۳)}$$

در معادله (۳) $\sum Y_+$ و $\sum Y_-$ به ترتیب مجموع پاسخها را در سطوح مثبت و منفی عامل مورد نظر نشان می‌دهد و n تعداد این پاسخها در آن سطوح می‌باشند. در جدول (۳) آزمایشهای، پاسخهای بدست آمده و اثرات عوامل A، B و C را برای یک طرح فاکتوریل کامل نشان می‌دهد.

جدول (۳) پاسخها و اثرات عوامل در طرح فاکتوریل کامل [۴۹]

Standard Order	Run Order	A	B	C	Y1	Y2
۱	۸	-	-	-	۷۴	۳/۱
۲	۱	+	-	-	۷۵	۳/۵
۳	۲	-	+	-	۷۱	۱/۶
۴	۴	+	+	-	۸۰	۱/۲
۵	۳	-	-	+	۸۱	۰/۷
۶	۵	+	-	+	۷۷	۰/۷
۷	۷	-	+	+	۴۲	۰/۵
۸	۶	+	+	+	۳۲	۰/۳
Effect Y1		-۱	-۲۰/۵	-۱۷	۶۶/۵	
Effect Y2		-۰/۰۵	-۱/۱	-۱/۸		۱/۴۵

به عنوان مثال برای تعیین تاثیر عامل A از پاسخ Y_1 داریم:

$$\text{Effect}_A = \frac{\sum Y_+}{n_+} - \frac{\sum Y_-}{n_-} = \frac{(75 + 80 + 77 + 32)}{4} - \frac{(74 + 71 + 81 + 42)}{4} = 66 - 67 = -1$$

در محاسبه اثرات متقابل بین عوامل، علامتهای سطوح منفی و مثبت عوامل اصلی تشکیل دهنده آنها را با همدیگر ضرب می‌کنیم تا علامتهای سطوح مربوط به آن اثر متقابل بدست آید. سپس همانند

پیوست و ضمائم

روش تعیین اثرات اصلی از معادله (۲) استفاده می‌کنیم. مثلاً برای اثر متقابل AB در آزمایش اول، دو آزمایش A و B هر دو در سطوح منفی خود قرار دارند، بنابراین با ضرب علامت سطوح آنها در همدیگر، علامت سطح مربوط به AB مثبت خواهد شد، و برای بقیه آزمایشها نیز، روند مشابه خواهد بود. در جدول (۴) اثرات اصلی و متقابل، برای هر سه عامل A، B و C برای سری اول پاسخ (Y1) محاسبه شده است.

جدول (۴) اثرات اصلی و متقابل، سه عامل، A، B و C [۴۹]

Standard Order	Main Effects			Interaction Effects				Response Y1
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	
۱	-	-	-	+	+	+	-	۷۴
۲	+	-	-	-	-	+	+	۷۵
۳	-	+	-	-	+	-	+	۷۱
۴	+	+	-	+	-	-	-	۸۰
۵	-	-	+	+	-	-	+	۸۱
۶	+	-	+	-	+	-	-	۷۷
۷	-	+	+	-	-	+	-	۴۲
۸	+	+	+	+	+	+	+	۳۲
Effect	-۱	-۲۰/۵	-۱۷	۰/۵	-۶	-۲۱/۵	-۳/۵	۶۶/۵

همان‌طور که در جدول (۴) دیده می‌شود نکته قابل توجه این است که برای این فرایند اثر متقابل BC به تنهایی بزرگتر از اثرات اصلی تشکیل دهنده آن یعنی B و C می‌باشد. به عبارت دیگر ترکیب دو عامل B و C تاثیر بیشتری در فرآیند داشته است. حال برای شناخت معنی‌دار بودن تغییر در اثر عوامل از نظر آماری، باید به روش گرافیکی اثرات در نمودار نرمال بررسی شوند. جدول (۵) مقادیر مربوط به رسم اثرات عوامل در کاغذ احتمال را نشان می‌دهد.

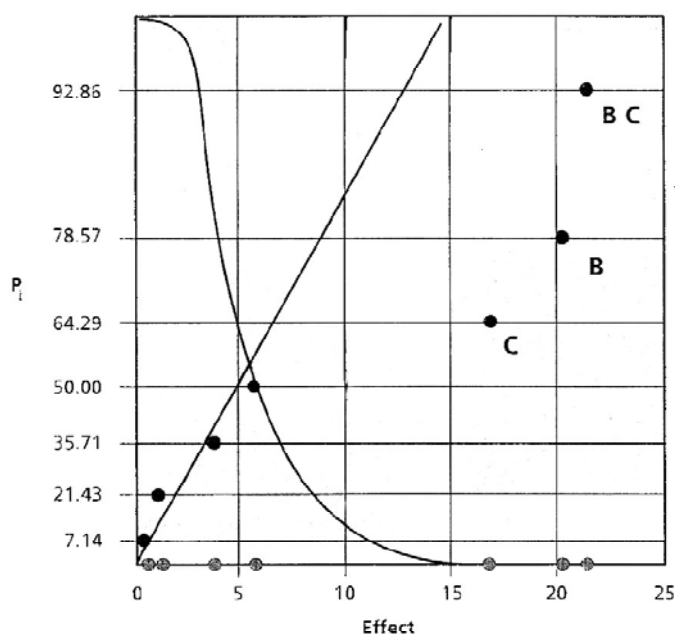
جدول (۵) مقادیر مربوط به رسم اثرات عوامل [۴۹]

Point	Effect	Absolute Value of Effect	Cumulative Probability
۱	AB	۰/۵	٪۷/۱۴
۲	A	-۱	٪۲۱/۴۳
۳	ABC	-۳/۵	٪۳۵/۷۱

پیوست و ضمائم

۴	AC	-۶	٪۵۰
۵	C	-۱۷	٪۶۴/۲۹
۶	B	-۲۰/۵	٪۷۸/۵۷
۷	BC	-۲۱/۵	٪۹۲/۸۶

همانطور که در جدول (۵) دیده می‌شود اثرات عوامل به صورت صعودی مرتب شده‌اند و میزان احتمال تجمعی نیز بر اساس تعداد اثرات محاسبه شده است، به طوری که برای هر بخش ۱۴/۲۸٪ ($\frac{100}{7}$) احتمال را شامل می‌شود که اگر بخواهیم نقاط را در وسط هر بخش قرار دهیم، نقطه اول که دارای کمترین اثر است احتمال ۷/۱۴٪ را شامل می‌شود. در شکل (۱) اثرات عوامل در کاغذ احتمال رسم شده است [۴۹].



شکل (۱) نمودار اثرات عوامل [۴۹]

همانطور که در شکل (۱) دیده می‌شود سه اثر، کاملاً از حالت نرمال جدا شده‌اند. بنابراین به نظر می‌رسد که از نظر آماری تاثیر این سه عامل (B, BC, C) دارای اهمیت و معنی‌دار باشند. چهار اثر دیگر که توزیع تغییرات آنها به صورت نرمال بوده است، و اثرات نزدیک به صفر داشته‌اند از نظر آماری تاثیر معنی‌دار و با اهمیتی در فرایند نداشته‌اند که بعداً از آنها برای تخمین خطا استفاده می‌شود.

شناسایی اثرات معنی دار به کمک آنالیز واریانس^{۳۹} (ANOVA)

اصول کلی آنالیز واریانس توسط Fisher بنیانگذاری شد. سپس آمارشناسان دیگر جزئیات آن را تکمیل نمودند. آنالیز واریانس بنا به تعریف، انجام یک سلسله عملیات ریاضی است که توسط آن می-توان مقدار کل تغییرات یا اختلاف موجود در یک آزمایش را به قسمت‌ها و اجزای مختلف آن تقسیم نمود. بعضی از تغییرات به علت تاثیر عواملی است که آزمایشگر عمداً آنها را در آزمایش قرار داده است تا اثر آنها را بررسی کند (تغییر در سطوح عوامل) و بعضی تغییرات دیگر به علت عوامل غیر قابل کنترل می‌باشند. که برای تشخیص این دو نوع، می‌توان از روش آنالیز واریانس نیز بهره برد. در این روش می‌بایست مجموع مربعات^{۴۰} اثرات عوامل و تقابلهای آنها مورد محاسبه قرار گیرد.

اگر بخواهیم جدول آنالیز واریانس را برای مثالی که در مبحث قبل و در جدول (۴) بررسی شد (طرح سه عاملی و دو سطحی فاکتوریل کامل) تشکیل دهیم، می‌بایست مقادیر مجموع مربعات را برای عوامل و اثرات متقابل آنها محاسبه کنیم. در آن آزمایشها اثرات عوامل B، C و BC دارای بیشترین تاثیر بودند که قبلاً توسط روش گرافیکی مشخص شده بود. حال در محاسبه مجموع مربعات نیز دارای مقادیر بزرگتری می‌باشند. که از این اثرات برای تشکیل مدل استفاده شده است.

باید مجموع مربعات مرتبط با تأثیرات را محاسبه کنیم

$$SS = \frac{N}{4} Effect^2$$

عواملی که تأثیر زیاد و معناداری دارند (B و C و BC) عواملی هستند که مدل طرح ما را می‌سازند

به عنوان مثال، محاسبه مجموع مربعات اثر B در جدول (۴) به صورت زیر است:

$$SS_B = \frac{8}{4} (-20.5)^2 = 840.5$$

بنابراین در محاسبه مجموع مربعات مدل، مجموع مربعات اثرات تشکیل دهنده آن با هم جمع می‌شود

که در زیر نشان داده شده است [۴۹].

^{۳۹}- Analysis Of Variance

^{۴۰}- Sum of Squares

پیوست و ضمائم

$$SS_{Model} = SS_B + SS_C + SS_{BC} = 840.5 + 578 + 924 = 2343$$

بقیه عوامل و اثرات متقابل آنها، که دارای تاثیر کمتری بودند نیز به عنوان تخمین خطا که مانده نامیده می‌شوند استفاده می‌شوند که در زیر مجموع مربعات مانده‌ها محاسبه شده است.

$$SS_{Residual} = SS_A + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{ABC} = 0.5 + 2 + 72 + 24.5 = 99$$

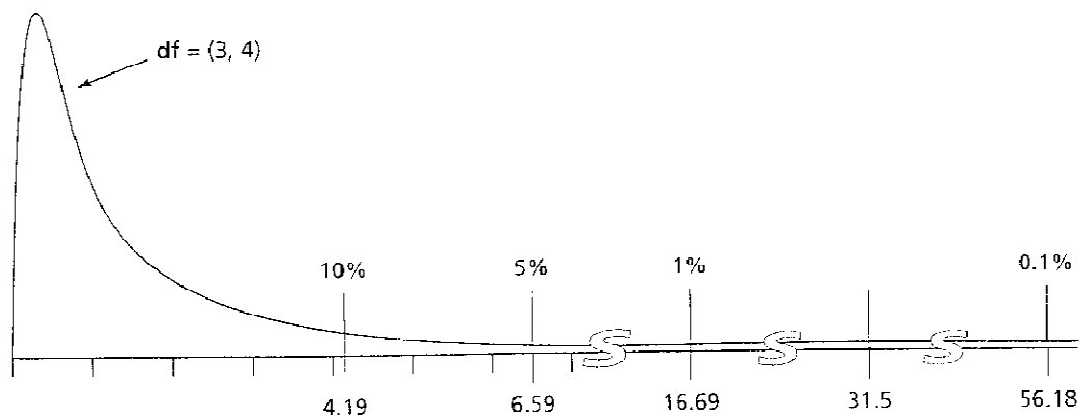
در جدول (۶) آنالیز واریانس، برای مثالی که بحث شد نشان داده شده است.

جدول (۶) آنالیز واریانس

Source	Sum of Squares(SS)	Df	Mean Squares(MS)	F Value	Prob>F
Model	۲۳۴۳	۳	۷۸۱	۳۱/۵	.<۰/۰۱
B	۸۴۰/۵	۱	۸۴۰/۵	۳۴	.<۰/۰۱
C	۵۷۸	۱	۵۷۸	۲۳/۳	.<۰/۰۱
BC	۹۲۴/۵	۱	۹۲۴/۵	۳۷/۳	.<۰/۰۱
Residual	۹۹	۴	۲۴/۸		
Cor Total	۲۴۴۲	۷			

در جدول (۶) مقادیر مجموع مربعات برای مدل، عوامل و مانده‌ها در ستون دوم نشان داده شده است. در ستون بعدی که با Df مشخص شده درجه آزادی مربوط به آن مقادیر نشان داده شده است. درجه آزادی برای مدل و مانده‌ها برابر تعداد عواملی است که در محاسبه آنها شرکت داده شده‌اند. برای مثال برای محاسبه مجموع مربعات مدل، از سه عامل B، C و BC استفاده شد که درجه آزادی مربوط به آن عدد سه بدست می‌آید. در محاسبه درجه آزادی برای عوامل و اثرات متقابل، اگر از تعداد سطوح تغییرات آنها یکی کم کنیم درجه آزادی مربوط به آن حاصل می‌شود. که برای این طرح چون عوامل در دو سطح بالا و پایین تغییر داده شدند، درجه آزادی مربوط به آنها ۱ بدست آمده است. در ستون بعدی میانگین مجموع مربعات محاسبه شده، که از تقسیم مجموع مربعات بر درجه آزادی آنها بدست می‌آید. از تقسیم میانگین مجموع مربعات بر میانگین مجموع مربعات مانده‌ها، عدد F بدست می‌آید. به عنوان مثال برای محاسبه عدد F برای مدل، از تقسیم $MS_{Model} / MS_{Residual}$ عدد ۳۱/۵ حاصل می‌شود. مقادیر F محاسبه شده می‌بایست با یک توزیع F مرجع، که دارای درجه آزادی مشابهی است

مقایسه شود. که در این مثال برای عدد F مربوط به مدل توزیع F مرجع با درجه آزادی $Df=(3,4)$ مد نظر است. که درجه آزادی ۳ مربوط به صورت کسر و درجه آزادی ۴ مربوط به مخرج کسر می‌باشد. شکل (۲) توزیع F را برای درجه آزادی (۳و۴) نشان می‌دهد [۴۹].



شکل (۲) توزیع F را برای درجه آزادی (۳و۴)

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده، مقادیر بحرانی در توزیع F مشخص شده است. عدد F مدل، یعنی $31/5$ در بین دو احتمال کمتر از 1% و بیشتر از 10% قرار گرفته که ستون $Prob>F$ نیز این مفهوم را می‌رساند. در واقع این ستون نتیجه مقایسه عدد F محاسبه شده را با توزیع F ، نشان می‌دهد. و این مطلب را بیان می‌کند که به احتمال کمتر از 1% ، مقدار عدد F بزرگتری به دلیل تاثیر اغتشاشات بوجود خواهد آمد. به عبارت دیگر در سطح احتمال بیش از 99% مدل از لحاظ آماری معنی‌دار خواهد بود.

فهرست منابع

۱. رضایی ب، (۱۳۷۵) "فلوتاسیون" چاپ اول، انتشارات دانشگاه هرمزگان، ایران.
۲. رضایی ب، (۱۳۸۰) "تکنولوژی زغالشویی" انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران).
3. Firth B, Edward D, Clarkson C and O'Brien M.O. (1995) "The Impact of Fine Classification on Coal Preparation Performance" Proc. Seventh Australian Coal Preparation Conference, Mudgee, Australia, Australian Coal Preparation Society.
۴. نعمتی ع، (۱۳۸۰) "گزارش عملکرد کارخانه زغالشویی زیرآب"، شرکت زغالسنگ البرز مرکزی، ایران.
۵. اسلامی اندارگلی م، (۱۳۸۴) "مطالعه و بررسی میزان آبهای اسیدی ناشی از باطله معدنی و کارخانه زغالشویی زغال سنگ البرز مرکزی و اثرات زیست محیطی آن" طرح پژوهشی تحقیقاتی، ایران.
۶. شاه حسینی م، شفایی تنکابنی س. ض. دولتی ف، (۱۳۸۹) "بررسی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات کارخانه زغالشویی انجیر تنگه با استفاده از شاخص های ژئوشیمیایی" بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، تهران ایران.
7. Finch J. A. and Dobby G. S. (1990) "Column Flotation" Pergamon Press, Oxford U.S.A. 180p.
8. Dell C. C and B.W Jenkins. (1976) "The Leeds Flotation Column" In: Proceedings of 7th International Coal Preparation Congress, Sydney, Australia.
9. Jameson G. J. (1988) "A New Concept in Flotation Column Design" Column Flotation'88: Proceedings of an International Symposium on Column Flotation, SME Annual Meeting, Phoenix Arizona, USA. pp. 281-286.
10. Lai R. W and Patton R. A. (2000) "Cross Flow Cyclonic Flotation Column for Coal and Minerals Benefication," U.S. Patent 6056125, OSTI ID:20050804.
11. Li B, Tao D, Ou Z and Liu J. (2003) "Cyclo-Microbubble Column Flotation of Fine Coal" Separation Science and Technology. Vol. 38, pp. 1125-1140.
12. Luttrell G. H, Keyser P. M, Adel G. T and Yoon R. H. (1985) "Improvements in Recovery and Selectivity with the Microbubble Flotation Process" In: Proceeding of Second Annual Pittsburgh Coal Conference, Pittsburg, Pennsylvania, U.S.A, Vol. 43.
13. Schneider J. C and Van G. (1988) "Design and Operation of the Hydrochem Flotation Column" Column Flotation'88: Proceedings of an International Symposium on Column Flotation, SME, Phoenix Arizona ISBN: 0-87335-073-1. pp. 287-293.
14. Yang D. C. (1988) "a New Packet Column Flotation System" Column Flotation'88: Proceedings of an International Symposium on Column Flotation, SME, Phoenix Arizona, 257.
15. Zipperian D. E and Svensson U.(1988) "Plant Practice of Flotaire Flotation Machine for Metallic, Non Metallic and Coal Flotation" Column Flotation'88: Proceedings of an International Symposium on Column Flotation, SME, Phoenix Arizona, 43.
16. Dobby G. S and Finch J. A. (1985) "Mixing Characteristics of Industrial Flotation Columns" Chemical Engineering Science. Vol. 40 (7), pp. 1061-1068.

17. Mankosa M. J, Luttrell G. H, Adel G. T and Yoon R. H. (1992). "A Study of Axial Mixing in Column Flotation" *International Journal of Mineral Processing*. Vol. 35, pp. 51-64.
18. Luttrell G. H, Stanley F. L and Bethell P. J. (2004). "Operating and Design Guidelines for Column Flotation" *Proceedings, 21st Annual International Coal, Aggregate and Mineral Processing Exhibition and Conference, Lexington, Kentucky*, pp. 227-238.
19. MPE International INC, (2003), "Column Flotation cell operating and maintenance instructions" 4⁹⁹ DIA.
20. Hacifazlioglu H and Sutcu H. (2007) "Optimization of some parameters in column flotation and a comparison of conventional cell and column cell in terms of flotation performance" *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*. Vol. 38, pp. 287-293.
21. Yianatos J. B, Finch J. A and LaPlante A. R. (1988) "Selectivity in Column Flotation Froths" *International Journal of Mineral Processing*. Vol. 23, pp. 279-292.
22. Kennedy D. L. (2008) "Redesign of industrial column flotation circuits based on a simple residence time distribution model" Thesis submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
23. Jena M. S, Biswal S. K, Rudramuniyappa M. V. (2008) "Study on flotation characteristics of oxidised Indian high ash sub-bituminous coal" *International Journal of Mineral Processing*. Vol. 87, pp. 42-50.
24. Hacifazlioglu H and Toroglu I. (2007) "Optimization of design and operating parameters in a pilot scale jameson cell for slime cleaning" *Fuel processing technology*. Vol. 88, pp. 731-736.
25. Jena M. S, Biswal S. K, Das S. P and Reddy P. S. R. (2008) "Comparative study of the performance of conventional and column flotation when treating coking coal fines" *Fuel processing Technology*. Vol. 89, pp. 1409-1415.
26. Demirbas A. (2002) "Demineralization and desulfurization of coals via column froth flotation and different methods" *Energy Conversion and Management*. Vol. 43, pp. 885-895.
27. Çınar M. (2009) "Floatability and desulfurization of a low-rank (Turkish) coal by low-temperature heat treatment" *Fuel Processing Technology*. Vol. 90, pp. 1300-1304.
28. Naik P, Reddy P. S. R and Misra V. N. (2004) "Optimization of coal flotation using statistical technique" *Fuel processing technology*. Vol. 85, pp. 1473-1485.
29. Shukla S C, Kundu G, Mukherjee D. (2010) "Study of gas holdup and pressure characteristics in a column flotation cell using coal" *Minerals Engineering*. Vol. 23, pp. 636-642.
30. Banisi S, Finch J. A and Laplante A. R. (1995) "Effect of solid particles on gas holdup in flotation columns-I. Measurement" *Chemical Engineering Science*. Vol. 50, pp. 2329-2334.

۳۱. کُر م، (۱۳۸۶) "مطالعه قابلیت شستشوی ذغال البرز شرقی به روش فلوتاسیون" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران.

۳۲. سمیعی بیرق ع و آرام ر، (۱۳۸۹) "استحصال ذغال سنگ از باطله فلوتاسیون کارخانه زغالشویی البرز شرقی به روش فلوتاسیون ستونی" پنجمین همایش ملی زمین شناسی و محیط زیست، ایران.

۳۳. جان نثار ملکوتی س، جودکی ا، نوع پرست م، شفائی س ض، (۱۳۸۷) "بازیابی زغال از باطله جیگ کارخانه زغالشویی انجیر تنگه (البرز مرکزی)، به روش فلوتاسیون" دومین کنفرانس مهندسی معدن، تهران ایران.

۳۴. علیجان ب، (۱۳۸۲) "گزارش موقعیت جغرافیایی معادن کارمزد"، شرکت زغالسنگ البرز مرکزی، ایران.

۳۵. نعمتی ع، (۱۳۷۹) "گزارش روشهای تعیین پلاستومتری"، شرکت زغالسنگ البرز مرکزی، ایران.

۳۶. گزارشات موجود در بخش کنترل کیفیت کارخانه ذغال شویی البرز مرکزی (۱۳۸۶)، ایران.

۳۷. بهری ز، (۱۳۸۷) "بررسی اختلاط انواع زغالهای البرز مرکزی به روش طراحی آمیخته" پایان نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران.

38. Cho Y. S and Laskowski J. S. (2002) "Effect of flotation frothers on bubble size and foam stability" International Journal of Mineral Processing. Vol. 64, pp. 69-80.
39. Flint I. M, MacPhail P, Dobby G. S. (1988) "Aerosol frother addition in column flotation" CIM Bull. Vol. 81, pp. 81-84.
40. Grau R. A, Laskowski J. S and Heiskanen K. (2005) "Effect of frothers on bubble size" International Journal of Mineral Processing. Vol. 76, pp. 225-223.
41. Stat – Ease. Inc, 2005, Design Expert Manual.
42. Groopo J. G. and Parekh B. K. (1990) "Continuous Pilot Scale Testing of Column Flotation for Recovery of Fine Coal" Mining Engineering. Vol. 42, pp. 1189-1199.
43. Mavros P, Kydros K. A and Matis K. A. (1993) "Arsenopyrite Enrichment by Column Flotation" Minerals Engineering. Vol. 6, pp. 1265-1277.
44. Tao D, Luttrell G. H and Yoon R. H. (2000) "A Parametric Study of Froth Stability and Its Effect on Column Flotation of Fine Particles" International Journal of Mineral Processing. Vol. 59, pp. 25-43.
45. Goodall C. M and OConnor C. T. (1991) "Pulp-Froth Interactions in a Laboratory Column Flotation Cell" Minerals Engineering. Vol. 4, pp. 951-958.
46. Goodall C. M and OConnor C. T. (1992) "Residence Time Distribution Studies in a Flotation Column. Part 2: The Relationship between Solids Residence Time Distribution and Metallurgical Performance" International Journal of Mineral Processing. Vol. 36, pp. 219-228.
۴۷. شفائی س. ض، (۱۳۸۳) "استفاده از طراحی آماری آزمایشها در تحقیقات مهندسی" جزوه درسی ایران.
48. Montgomery D. C. (2001) "Design and Analysis of Experiments" 5th Ed., ISBN: 0-471-331649-0
49. Anderson M. J. and Whitcomb P. J. (2000) "DOE Simplified: Practical tools for effective Eperimentation" ISBN: J-56327-225-3, Productivity, Inc.

Abstract

From starting Alborz Markazi coal washing plant to work, more than 1.5 million tons of waste in land has been allocated in the waste damp. About 70 percent of the Alborz Markazi coal washing plant wastes were related to jig tailings which contain high percentage of coal. On the other hand, the presence of these wastes cause environmental problem. Therefore this research was conducted to assess processing coal tailings of Alborz Markazi coal washing plant. Investigations were carried out on coal tailings by conventional and column flotation techniques. The effects of reagent type/dosage were investigated with conventional flotation and their results were used in the performance of column flotation. Thus the effects of air rate, feeding rate, wash water rate, frother and collector dosage were evaluated with column flotation. Based on the conventional flotation results kerosene had better efficiency in the process. Therefore kerosene was select as collector. The best results were obtained in the case of using a 3000 g/t kerosene as a collector and 300 g/t MIBC as frother. As low rank coals or oxidized coals are generally more hydrophilic, it was deducted by conventional flotation that due to low rank of particles even at higher dosage of collector (3000g/t) and frother (300g/t) may need more reagents for better efficiency. Thus, the effects of higher values of reagent were investigated in the performance of column flotation. The coal tailings had 56 percent ash averagly. Experimental design as a statistical method was used to optimizing grade and recovery of coal tailings. The column flotation results indicated concentrate produced under optimum conditions, kerosene, 2909 g/t; superficial air velocity, 0.96 cm/s; feeding rate, 3.6 lit/min; superficial wash water velocity, 0.98 lit/min; frother dosage, 350 g/t having an ash content of 12.1% and a combustible recovery of 28.5%. Analysing gas holdup in column flotation validated the performed experiments well. Accordingly, applying the column flotation method for cleaning the low rank tailings causes more profitable results, more efficiency and lower environmental pollution.

Key words: Coal, Tailings, Column Flotation, Experimental Design, Gas holdup, Environmental Effects.



Shahrood University
Of Technology

Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

**Title: Investigation of retreatment possibility of Zirab coal washing
factory Jig tailings**

By: Zahra Bahri

Supervisors: Prof. Seyed Ziaedin Shafaei

Dr. Mohammad Karamoozian

September, 2011