

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

مطالعه قابلیت شستشوی ذغال البرز شرقی به روش
فلوتاسیون ستونی

نگارنده:

محمد گر

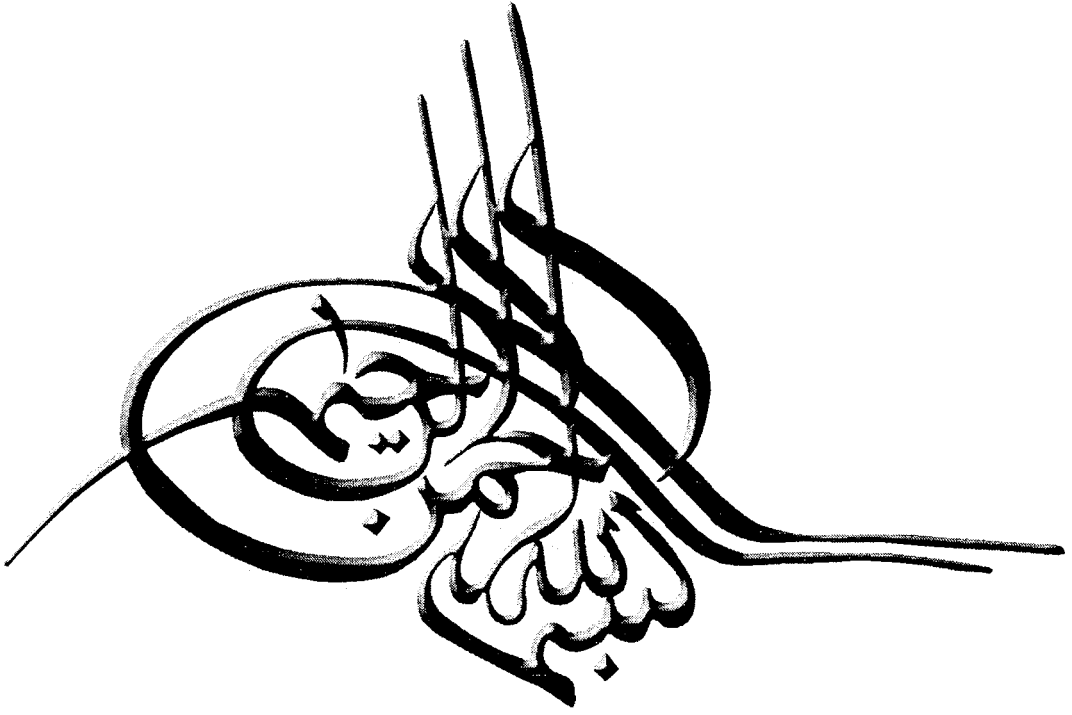
استاد راهنما:

دکتر سید ضیاءالدین شفائی

استاد مشاور:

دکتر فرامرز دولتی ارده جانی

تیر ۱۳۸۵



تقدیم به:

پدر

مادر

و تمام اعضای خانواده ام

تقدیر و تشکر:

بر خود لازم می دانم از زحمات:

استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر سید ضیاءالدین شفائی که در انجام این تحقیق مرا راهنمایی نمودند، استاد مشاور گرامی آقای دکتر فرامرز دولتی ارده جانی که از مشاوره ایشان در این تحقیق استفاده نمودم، آقایان مهندس محمد کبیریان و مهندس مهدی اخیانی و همکاران ایشان در سالن گارگاه ها، همچنین از دوستان عزیزم آقایان مهندس حسین جانجانی و مهندس مهدی غروی و همه دوستانی که مرا یاری نمودند تقدیر و تشکر نمایم.

چکیده

فرآوری زغالسنگ، با ابعاد کوچکتر از ۱ میلی متر در اغلب کارخانجات زغالشویی، مشکلات بیشتری نسبت به ابعاد درشت تر از آن را دارد. امروزه با افزایش درصد ابعاد ریز دانه در خوراک به علت روش استخراج مکانیزه و همچنین افزایش میزان خاکستر آن، بر حجم مشکلات افزوده شده است. به دلیل وجود چنین مشکلاتی، از کارایی سلولهای فلوئاسیون در شستشوی زغال نیز کاسته شده است. کارخانه زغالشویی البرز شرقی نیز از این امر مستثنی نبوده و وضعیت فرآوری زغال در سلولهای فلوئاسیون مطلوب نمی باشد. به نظر می رسد که با توجه به خصوصیات منحصر به فردی که در ستونهای فلوئاسیون وجود دارد، این سیستم بتواند به عنوان یک راه حل مناسب برای فرآوری زغال ریز دانه بشمار آید.

در این تحقیق سعی شده تا قابلیت شستشویذیری زغالسنگ البرز شرقی توسط فلوئاسیون ستونی با استفاده از روشهای طراحی آماری آزمایشها مطالعه شود.

در تحقیق حاضر طراحی و تحلیل آزمایشات توسط بسته نرم افزاری Design Expert صورت گرفته است. در ابتدا سنجش و اندازه گیری نحوه رفتار یک پمپ پریستالتیک در هنگام اعمال تغییرات بر روی هد فشاری و همچنین تغییر در نوع سیال، با استفاده از روش فاکتوریل کامل مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل، نشان داد که عملکرد پمپ پریستالتیک صحیح بوده است.

از آنجایی که یکی از اهداف اصلی انجام آزمایشها بهینه سازی فرایند توسط روشهای آماری آزمایشها بود، لذا طراحی آزمایشها در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول، که با هدف شناخت عوامل موثر و فهم بیشتر رابطه بین آنها در فرایند شستشوی زغال توسط ستون با انجام تعداد آزمایشها کمتر بود، از روش فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم^۱ بهره گرفته شد. در این سری از آزمایشات، چهار عامل نرخ خوراک دهی، میزان مصرف گازوئیل، نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو انتخاب و درصد بازیابی، درصد میزان خاکستر محصول و بازدهی جدایش نیز به عنوان پاسخهای آزمایشات مورد تحلیل قرار گرفتند.

^۱ Irregular Fractional Factorial Design

در مرحله دوم با توجه به اطلاعات و شناختی که از مرحله اول حاصل شده بود، بهینه سازی شرایط عملیاتی ستون مد نظر قرار گرفت. در این حالت از روشهای پاسخ سطح^۲ که از روشهای مربوط به بهینه سازی، در طراحی آماری آزمایشها استفاده گردید. در این سری آزمایشها نیز سه عامل نرخ آب شستشو، نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز، به عنوان متغیرهای قابل کنترل فرایند انتخاب و درصد بازیابی، میزان درصد خاکستر محصول و بازدهی جدایش به عنوان پاسخهای آزمایشات در نظر گرفته شدند. بعد از انجام تحلیل توسط نرم افزار طبق پیشنهاد آن اگر عامل نرخ آب شستشو در سطح 1.32Lit/min، و نرخ گازدهی در 1.74cm/s، (تقریباً در سطح متوسط آزمایشها) و میزان مصرف کف ساز در 0.575ml/kg (تقریباً در سطح بالای آزمایشها) تنظیم شود، پاسخ آزمایشها به صورت، ۸۶/۰۸ درصد بازیابی و ۹/۱۸ درصد خاکستر محصول و ۷۱/۱۱ درصد بازدهی جدایش پیش بینی می گردد. که نسبت به مورد رایج در کارخانه و به روش فلوئاسیون مکانیکی مطلوبتر می باشد.

واژه های کلیدی: فلوئاسیون ستونی، کارخانه زغالسویی شرکت البرز شرقی، طراحی آماری آزمایشها، روشهای پاسخ سطح، Box-Behnken، Design Expert

² Response Surface Methods

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه	۱
۱-۲- تاریخچه فراوری زغال ریز دانه	۱
۱-۳- مشکلات فعلی صنعت زغالشویی	۳
۱-۴- روش های جدید فراوری زغال ریز دانه	۵
۱-۵- واحد زغالشویی شرکت البرز شرقی	۶
۱-۶- نگاهی به خوراک کارخانه	۷

فصل دوم: کلیاتی درباره فلو تاسیون ستونی

۲-۱- مقدمه ای بر فلو تاسیون ستونی	۱۲
۲-۲- ماندگی گاز	۱۵
۲-۲-۱- اندازه گیری ماندگی گاز	۱۵
۲-۳- جریانهای حاکم بر سیستم فلو تاسیون	۱۶
۲-۴- سیستم تولید حباب	۱۷
۲-۵- زمان ماند	۱۷
۲-۶- نرخ خوراک دهی	۱۹
۲-۷- آب شستشو	۱۹
۲-۷-۱- تأثیر آب شستشو بر عیار و بازیابی	۱۹
۲-۷-۲- آب بایاس	۲۰
۲-۹- گازدهی (هوادهی)	۲۱
۲-۱۰- عمق کف	۲۲
۲-۱۱- نرخ حمل	۲۳
۲-۱۱-۱- ظرفیت حمل	۲۳

فصل سوم: مقدمه ای بر طراحی آماری آزمایشها

۳-۱- مقدمه	۲۵
۳-۲- تعاریف اولیه	۲۶
۳-۲-۱- طراحی آماری آزمایشها (DOE)	۲۶
۳-۲-۲- عامل	۲۶
۳-۲-۳- سطح	۲۷
۳-۲-۳- پاسخ	۲۷
۳-۳- اثرات متقابل بین عوامل	۲۷
۳-۴- بلوک بندی و تصادفی کردن آزمایشها	۲۹

شرح	صفحه
۴-۳- طراحی آزمایشها به روش فاکتوریل کامل	۳۰
۵-۳- محاسبه و بررسی اثرات عوامل	۳۱
۶-۳- شناسایی اثرات معنی دار به کمک آنالیز واریانس (ANOVA)	۳۵
۷-۳- مدلسازی اثرات معنی دار	۳۸
۸-۳- طراحی آزمایشها به روش فاکتوریل ناقص	۴۰
۹-۳- اتحاد و اختلاط در اثرات عوامل	۴۱
۱۰-۳- طراحی آزمایشها به روش پاسخ سطح برای بهینه سازی	۴۲
۱-۱۰-۳- روش Box-Behnken در طراحی پاسخ سطح	۴۴
۲-۱۰-۳- روش Central Composit در طراحی پاسخ سطح (CCD)	۴۶

فصل چهارم: کنترل و اعتبار بخشی به نتایج در آزمایشها

۱-۴- مقدمه	۵۰
۲-۴- اندازه گیری میزان دبی آب شستشو	۵۰
۳-۴- اندازه گیری میزان جریان گازدهی	۵۲
۴-۴- بررسی رفتار پمپ پرستالتیک با استفاده از روش طراحی فاکتوریل آزمایشها	۵۳
۱-۴-۴- طراحی و روش انجام آزمایشات	۵۴
۲-۴-۴- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ (دبی جریان سیال)	۵۷
۳-۴-۴- برازش مدل بر روی آزمایشات	۵۸
۴-۴-۴- آنالیز واریانس	۶۰
۵-۴-۴- آنالیز خطاها	۶۰
۶-۴-۴- بررسی نتایج	۶۴
۵-۴- تنظیم سطح مشترک پالپ - کف (عمق کف)	۶۸

فصل پنجم: مطالعه عوامل موثر در شستشویپذیری زغال در فلو تاسیون ستونی

۱-۵- مقدمه	۷۰
۲-۵- اهداف انجام آزمایشها	۷۱
۳-۵- منبع خوراک ستون	۷۱
۴-۵- طراحی و روش انجام آزمایشها	۷۲
۱-۴-۵- روش انجام آزمایشها	۷۳
۵-۵- آزمایشهای مربوط به مطالعه عوامل موثر در شستشویپذیری زغال در ستون	۷۳
۶-۵- ساختار اختلاط و اتحاد اثرات عوامل در آزمایشهای مرحله اول	۷۴
۷-۵- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)	۷۵
۱-۷-۵- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)	۷۶
۲-۷-۵- برازش مدل بر روی داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)	۷۶

شرح	صفحه
۳-۷-۵- آنالیز واریانس پاسخ اول (درصد بازیابی)	۷۸
۴-۷-۵- آنالیز خطاهای پاسخ اول (درصد بازیابی)	۷۹
۵-۷-۵- بررسی نتایج پاسخ اول (درصد بازیابی)	۸۲
۸-۵- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۹۱
۱-۸-۵- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۹۱
۲-۸-۵- برازش مدل بر روی داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۹۲
۳-۸-۵- آنالیز واریانس پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۹۳
۴-۸-۵- آنالیز خطاهای پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۹۴
۵-۸-۵- بررسی نتایج پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۹۶
۹-۵- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۰۳
۱-۹-۵- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۰۳
۲-۹-۵- برازش مدل بر روی داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۰۴
۳-۹-۵- آنالیز واریانس پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۰۵
۴-۹-۵- آنالیز خطاهای پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۰۶
۵-۹-۵- بررسی نتایج پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۰۸

فصل ششم: بهینه سازی شرایط عملیاتی ستون با استفاده از روشهای طراحی آماری آزمایشها

۱-۶- مقدمه	۱۱۴
۲-۶- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)	۱۱۵
۱-۲-۶- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)	۱۱۵
۲-۲-۶- برازش مدل بر روی داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)	۱۱۶
۳-۲-۶- آنالیز واریانس پاسخ اول (درصد بازیابی)	۱۱۸
۴-۲-۶- آنالیز خطاهای پاسخ اول (درصد بازیابی)	۱۱۹
۵-۲-۶- بررسی نتایج پاسخ اول (درصد بازیابی)	۱۲۱
۶-۲-۶- بررسی و تحلیل گسترش خطا در آزمایشهای پاسخ اول (درصد بازیابی)	۱۲۹
۳-۶- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۳
۱-۳-۶- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۳
۲-۳-۶- برازش مدل بر روی داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۴
۳-۳-۶- آنالیز واریانس پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۵
۴-۳-۶- آنالیز خطاهای پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۶
۵-۳-۶- بررسی نتایج پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۸
۴-۶- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۴۲
۱-۴-۶- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۴۲
۲-۴-۶- برازش مدل بر روی داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۴۲
۳-۴-۶- آنالیز واریانس پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۴۴

فهرست مطالب

شرح	صفحه
۴-۴-۶- آنالیز خطاهای پاسخ سوم (بازدهی جدایش).....	۱۴۵
۵-۴-۶- بررسی نتایج پاسخ سوم (بازدهی جدایش).....	۱۴۸
۶-۴-۶- بررسی و تحلیل گسترش خطا در آزمایشهای پاسخ سوم (بازدهی جدایش).....	۱۵۴
۵-۶- بهینه سازی شرایط عملیاتی ستون.....	۱۵۷

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهاد

۱-۷- نتایج.....	۱۶۳
۲-۷- پیشنهادات.....	۱۶۹

فهرست منابع.....	۱۷۱
پیوست الف.....	۱۷۴
پیوست ب.....	۱۸۱

فهرست جداول

صفحه

شرح

۴	جدول (۱-۱) داده های خاکستر یک نمونه زغال تمیز در رنج دانه بندی مختلف
۹	جدول (۲-۱) درصد خاکستر خوراک، کنسانتره و باطله جیگ و فلوتاسیون
۱۰	جدول (۳-۱) بازیابی وزنی متوسط زغال برای کل کارخانه (%)
۲۷	جدول (۱-۳) نتایج یک بررسی به منظور تعیین اثر متقابل
۲۸	جدول (۲-۳) نتایج یک بررسی به منظور تعیین اثر متقابل
۳۰	جدول (۳-۳) طرح فاکتوریل کامل دو سطحی
۳۱	جدول (۴-۳) پاسخها و اثرات عوامل در طرح فاکتوریل کامل
۳۳	جدول (۵-۳) اثرات اصلی و متقابل، سه عامل A، B و C
۳۳	جدول (۶-۳) مقادیر مربوط به رسم اثرات عوامل
۳۶	جدول (۷-۳) آنالیز واریانس
۳۹	جدول (۸-۳) مقادیر واقعی و پیش بینی شده پاسخها توسط مدل، و اختلاف آنها
۴۱	جدول (۹-۳) اثرات اصلی و متقابل عوامل برای طرحهای فاکتوریل کامل و ناقص
۴۴	جدول (۱۰-۳) طراحی به روش Box-Behnken برای دو فاکتور با نقاط مرکزی
۴۴	جدول (۱۱-۳) نمای کلی از طراحی و پاسخ آزمایشات به روش Box-Behnken
۴۵	جدول (۱۲-۳) آنالیز واریانس
۴۷	جدول (۱۳-۳) طراحی به روش Central Composit برای آزمایش دو عاملی
۴۷	جدول (۱۴-۳) آنالیز واریانس
۵۱	جدول (۱-۴) داده های کالیبراسیون جریان سنج آب شستشو
۵۲	جدول (۲-۴) داده های کالیبراسیون جریان سنج هوا
۵۵	جدول (۳-۴) عوامل و سطوح مختلف مربوط به طراحی آزمایشات
۵۶	جدول (۴-۴) شرایط آزمایشی و پاسخ ها
۵۸	جدول (۵-۴) بررسی وضعیت برازش مدلهای مختلف نسبت به یکدیگر
۵۹	جدول (۶-۴) بررسی آماری کیفیت برازش مدلهای مختلف
۶۰	جدول (۷-۴) آنالیز واریانس
۷۱	جدول (۱-۵) درصد وزنی و درصد خاکستر نمونه آماده سازی شده
۷۳	جدول (۲-۵) عوامل و سطوح مربوط به طراحی آزمایشات به روش فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم
۷۴	جدول (۳-۵) شرایط آزمایشی و پاسخها در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم
۷۵	جدول (۴-۵) ساختار اختلاط و اتحاد اثرات عوامل
۷۸	جدول (۵-۵) لیست اثرات عوامل و تقابلهای آنها مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی)
۷۹	جدول (۶-۵) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی)
۹۲	جدول (۷-۵) لیست اثرات عوامل و تقابلهای آنها مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)
۹۳	جدول (۸-۵) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)
۱۰۴	جدول (۹-۵) لیست اثرات عوامل و تقابلهای آنها مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)
۱۰۵	جدول (۱۰-۵) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)
۱۱۴	جدول (۱-۶) عوامل و سطوح مربوط به طراحی آزمایشات به روش Box-Behnken
۱۱۵	جدول (۲-۶) شرایط آزمایشی و پاسخها در طرح پاسخ سطح (روش Box-Behnken)
۱۱۶	جدول (۳-۶) بررسی وضعیت برازش مدلهای مختلف نسبت به یکدیگر در پاسخ اول (درصد بازیابی)

فهرست جداول

شرح	صفحه
جدول (۴-۶) بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف در پاسخ اول (درصد بازیابی)	۱۱۷
جدول (۵-۶) بررسی نقصان در برازش مدل (Lack of Fit) در پاسخ اول (درصد بازیابی)	۱۱۷
جدول (۶-۶) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی)	۱۱۸
جدول (۷-۶) بررسی وضعیت برازش مدل‌های مختلف نسبت به یکدیگر در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۴
جدول (۸-۶) بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۴
جدول (۹-۶) بررسی نقصان در برازش مدل (Lack of Fit) در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۵
جدول (۱۰-۶) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۵
جدول (۱۱-۶) بررسی وضعیت برازش مدل‌های مختلف نسبت به یکدیگر در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۴۳
جدول (۱۲-۶) بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۴۳
جدول (۱۳-۶) بررسی نقصان در برازش مدل (Lack of Fit) در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۴۳
جدول (۱۴-۶) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۴۴
جدول (۱۵-۶) محدودیت ها و تنظیم شرایط مربوط به مطلوبیت	۱۵۸
جدول (۱۶-۶) راه حل‌های پیشنهادی در بهینه سازی فرآیند توسط نرم افزار	۱۵۹
جدول (۱-۷) بازه سطوح عوامل طبق پیشنهاد اول توسط نرم افزار	۱۶۹

فهرست اشکال

شرح	صفحه
شکل (۱-۱) روشهای متداول فراوری زغال با توجه به ابعاد و سال آنها.....	۲
شکل (۲-۱) توزیع وزنی درصد خاکستر در خوراک ورودی به کارخانه.....	۸
شکل (۳-۱) مقایسه نرخ خوراک ورودی به کارخانه در ۸ ماهه اول سالهای ۱۳۵۴ و ۱۳۸۱.....	۹
شکل (۱-۲) نمای شماتیک از ستون فلوتاسیون.....	۱۳
شکل (۲-۲) اندازه گیری ماندگی گاز با استفاده از اختلاف فشار.....	۱۶
شکل (۳-۲) تأثیر ارتفاع ستون در بازیابی و درصد خاکستر زغال.....	۱۸
شکل (۴-۲) تأثیر زمان ماند ذرات در بازیابی زغال.....	۱۸
شکل (۵-۲) منحنی تغییرات بازیابی و بازداشت خاکستر با نرخ آب شستشو در لایه های زغال Elkhorn و Taggart.....	۲۰
شکل (۶-۲) نمای شماتیک از نرخ ظاهری آب بایاس J_B ، نرخ ظاهری خوراک J_F و نرخ ظاهری آب شستشو J_W	۲۱
شکل (۷-۲) تأثیر عمق کف در بازیابی و درصد خاکستر زغال.....	۲۲
شکل (۸-۲) نمودار تغییرات نرخ کنسانتره با نرخ خوراک دهی برای مقادیر مختلف نرخ هوادهی.....	۲۳
شکل (۱-۳) نمای شماتیک از فرایند و عوامل موثر بر آن.....	۲۷
شکل (۲-۳) نمودار بررسی انجام شده، در جدول (۱-۳).....	۲۸
شکل (۳-۳) نمودار بررسی انجام شده، در جدول (۲-۳).....	۲۹
شکل (۴-۳) نمای مکعب مربعی پاسخها برای بررسی اثر اصلی عامل A.....	۳۲
شکل (۵-۳) نمودار اثرات عوامل.....	۳۴
شکل (۶-۳) توزیع F را برای درجه آزادی (3,4).....	۳۷
شکل (۷-۳) نمای سه بعدی از روش پاسخ سطح.....	۴۳
شکل (۸-۳) روش طراحی CCD، برای (a) دو عامل (b) سه عامل.....	۴۶
شکل (۹-۳) پاسخ سطح برای آزمایشات کاغذهای تبلیغاتی.....	۴۸
شکل (۱-۴) نمودار کالیبراسیون آب شستشو.....	۵۱
شکل (۲-۴) نمودار کالیبراسیون گازدهی.....	۵۳
شکل (۳-۴) رابطه بین اعداد درجه بندی شده بر روی درایور پمپ پرستالتیک، و دبی پمپاژ.....	۵۵
شکل (۴-۴) منحنی توزیع نرمال خطاها قبل از اعمال تبدیل.....	۵۷
شکل (۵-۴) منحنی توزیع نرمال خطاها بعد از اعمال تبدیل لگاریتم طبیعی.....	۵۸
شکل (۶-۴) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل.....	۶۱
شکل (۷-۴) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشات.....	۶۲
شکل (۸-۴) نمودار مقادیر واقعی پاسخ نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل.....	۶۲
شکل (۹-۴) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی خطای استاندارد آزمایشات.....	۶۳
شکل (۱۰-۴) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ.....	۶۴
شکل (۱۱-۴) نمودار تأثیر عوامل بر پاسخ، (a) درجه سرعت چرخش موتور (b) درجه هد فشاری (c) نوع سیال.....	۶۵
شکل (۱۲-۴) بررسی تأثیر تقابل بین عوامل بر پاسخ.....	۶۶
شکل (۱۳-۴) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی تأثیر عوامل بر پاسخ.....	۶۷
شکل (۱-۵) منحنی توزیع نرمال مانده ها مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۷۶
شکل (۲-۵) نمودار اثرات عوامل در کاغذ احتمال مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۷۷
شکل (۳-۵) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل.....	۸۰

شرح	صفحه
شکل (۴-۵) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشات مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۸۰
شکل (۵-۵) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل.....	۸۱
شکل (۶-۵) نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۸۲
شکل (۷-۵) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۸۳
شکل (۸-۵) نمودار تأثیر عوامل (a) نرخ خوراک دهی، (b) میزان مصرف گازوئیل، (c) نرخ گازدهی بر پاسخ (درصد بازیابی).....	۸۴
شکل (۹-۵) نمودار تأثیر عامل نرخ آب شستشو بر بازیابی زغال.....	۸۵
شکل (۱۰-۵) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ خوراک دهی و میزان مصرف گازوئیل در پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۸۶
شکل (۱۱-۵) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ گازدهی و میزان مصرف گازوئیل در پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۸۶
شکل (۱۲-۵) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو در پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۸۷
شکل (۱۳-۵) نمودار عدم وجود اثر متقابل بین دو عامل نرخ آب شستشو و نرخ خوراک دهی در پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۸۷
شکل (۱۴-۵) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ خوراک دهی و میزان مصرف گازوئیل در (a) سطح پایین گازدهی و (b) سطح بالای گازدهی بر پاسخ (درصد بازیابی).....	۸۸
شکل (۱۵-۵) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ خوراک دهی و نرخ گازدهی در (a) سطح پایین میزان مصرف گازوئیل و (b) سطح بالای میزان مصرف گازوئیل بر پاسخ (درصد بازیابی).....	۸۹
شکل (۱۶-۵) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی در (a) سطح پایین نرخ خوراک دهی و (b) سطح بالای نرخ خوراک دهی بر پاسخ (درصد بازیابی).....	۹۰
شکل (۱۷-۵) منحنی توزیع نرمال مانده ها مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول).....	۹۱
شکل (۱۸-۵) نمودار اثرات عوامل در کاغذ احتمال مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول).....	۹۲
شکل (۱۹-۵) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد خاکستر محصول) توسط مدل.....	۹۴
شکل (۲۰-۵) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشات مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول).....	۹۵
شکل (۲۱-۵) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد خاکستر محصول) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل.....	۹۵
شکل (۲۲-۵) نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول).....	۹۶
شکل (۲۳-۵) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول).....	۹۷
شکل (۲۴-۵) نمودار تأثیر عوامل (a) نرخ خوراک دهی، (b) میزان مصرف گازوئیل، (c) نرخ گازدهی بر پاسخ (درصد خاکستر محصول).....	۹۸
شکل (۲۵-۵) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ خوراک دهی و میزان مصرف گازوئیل در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول).....	۹۹
شکل (۲۶-۵) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ خوراک دهی و میزان مصرف گازوئیل در (a) سطح پایین گازدهی و (b) سطح بالای گازدهی بر پاسخ (درصد خاکستر محصول).....	۱۰۰
شکل (۲۷-۵) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ خوراک دهی و نرخ گازدهی در (a) سطح پایین میزان مصرف گازوئیل و (b) سطح بالای میزان مصرف گازوئیل بر پاسخ (درصد خاکستر محصول).....	۱۰۱
شکل (۲۸-۵) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی در (a) سطح پایین نرخ خوراک دهی و (b) سطح بالای نرخ خوراک دهی بر پاسخ (درصد خاکستر محصول).....	۱۰۲

شرح	صفحه
شکل (۵-۲۹) منحنی توزیع نرمال مانده ها مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش).....	۱۰۳
شکل (۵-۳۰) نمودار اثرات عوامل در کاغذ احتمال مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش).....	۱۰۴
شکل (۵-۳۱) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (بازدهی جدایش) توسط مدل.....	۱۰۶
شکل (۵-۳۲) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشات مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش).....	۱۰۷
شکل (۵-۳۳) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (بازدهی جدایش) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل.....	۱۰۷
شکل (۵-۳۴) نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده در پاسخ سوم (بازدهی جدایش).....	۱۰۸
شکل (۵-۳۵) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ سوم (درصد خاکستر محصول).....	۱۰۹
شکل (۵-۳۶) نمودار تأثیر عامل میزان مصرف گازوئیل بر پاسخ (بازدهی جدایش).....	۱۰۹
شکل (۵-۳۷) نمودار اثر متقابل دو عامل میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی در پاسخ سوم (بازدهی جدایش).....	۱۱۰
شکل (۵-۳۸) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف گازوئیل در (a) سطح پایین نرخ آب شستشو و (b) سطح بالای نرخ آب شستشو بر پاسخ (بازدهی جدایش).....	۱۱۱
شکل (۶-۱) منحنی توزیع نرمال مانده ها بعد از اعمال تبدیل لگاریتم طبیعی در پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۱۱۶
شکل (۶-۲) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل.....	۱۱۹
شکل (۶-۳) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشات مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۱۲۰
شکل (۶-۴) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل.....	۱۲۰
شکل (۶-۵) نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۱۲۱
شکل (۶-۶) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۱۲۲
شکل (۶-۷) نمودار تأثیر عوامل (a) نرخ آب شستشو، (b) نرخ گازدهی، (c) میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (درصد بازیابی).....	۱۲۳
شکل (۶-۸) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز در پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۱۲۴
شکل (۶-۹) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز در پاسخ اول (درصد بازیابی).....	۱۲۵
شکل (۶-۱۰) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (درصد بازیابی).....	۱۲۶
شکل (۶-۱۱) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (درصد بازیابی).....	۱۲۷
شکل (۶-۱۲) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی بر پاسخ (درصد بازیابی).....	۱۲۸
شکل (۶-۱۳) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی.....	۱۳۰
شکل (۶-۱۴) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز.....	۱۳۱
شکل (۶-۱۵) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز.....	۱۳۲
شکل (۶-۱۶) منحنی توزیع نرمال مانده ها بعد از اعمال تبدیل توان در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول).....	۱۳۳
شکل (۶-۱۷) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد خاکستر محصول) توسط مدل.....	۱۳۶

شرح	صفحه
شکل (۱۸-۶) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشات مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۷
شکل (۱۹-۶) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد خاکستر محصول) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل ... ۱۳۷	۱۳۷
شکل (۲۰-۶) نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۸
شکل (۲۱-۶) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)	۱۳۹
شکل (۲۲-۶) نمودار تأثیر عوامل (a) نرخ آب شستشو، (b) میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (درصد خاکستر محصول)	۱۴۰
شکل (۲۳-۶) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (درصد خاکستر محصول)	۱۴۱
شکل (۲۴-۶) منحنی توزیع نرمال مانده ها بعد از اعمال تبدیل توان در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۴۲
شکل (۲۵-۶) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (بازدهی جدایش) توسط مدل	۱۴۵
شکل (۲۶-۶) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشات مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۴۶
شکل (۲۷-۶) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (بازدهی جدایش) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل	۱۴۷
شکل (۲۸-۶) نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۴۷
شکل (۲۹-۶) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)	۱۴۸
شکل (۳۰-۶) نمودار تأثیر عوامل (a) نرخ آب شستشو، (b) نرخ گازدهی، (c) میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (بازدهی جدایش)	۱۴۹
شکل (۳۱-۶) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز در پاسخ سوم (بازدهی جدایش) ...	۱۵۰
شکل (۳۲-۶) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (بازدهی جدایش)	۱۵۱
شکل (۳۳-۶) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (بازدهی جدایش)	۱۵۲
شکل (۳۴-۶) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی بر پاسخ (بازدهی جدایش)	۱۵۳
شکل (۳۵-۶) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی	۱۵۴
شکل (۳۶-۶) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز	۱۵۵
شکل (۳۷-۶) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز	۱۵۶
شکل (۳۸-۶) نمونه ای از تنظیم شرایط مطلوبیت پاسخ (بازیابی)	۱۵۷
شکل (۳۹-۶) نمودار دوبعدی پاسخهای آزمایشات در نقطه مربوط به محل پیش بینی بهینه در پیشنهاد اول	۱۶۰
شکل (۱-۷) منحنی بازیابی خاکستر برای تمامی آزمایشات انجام شده	۱۶۴

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

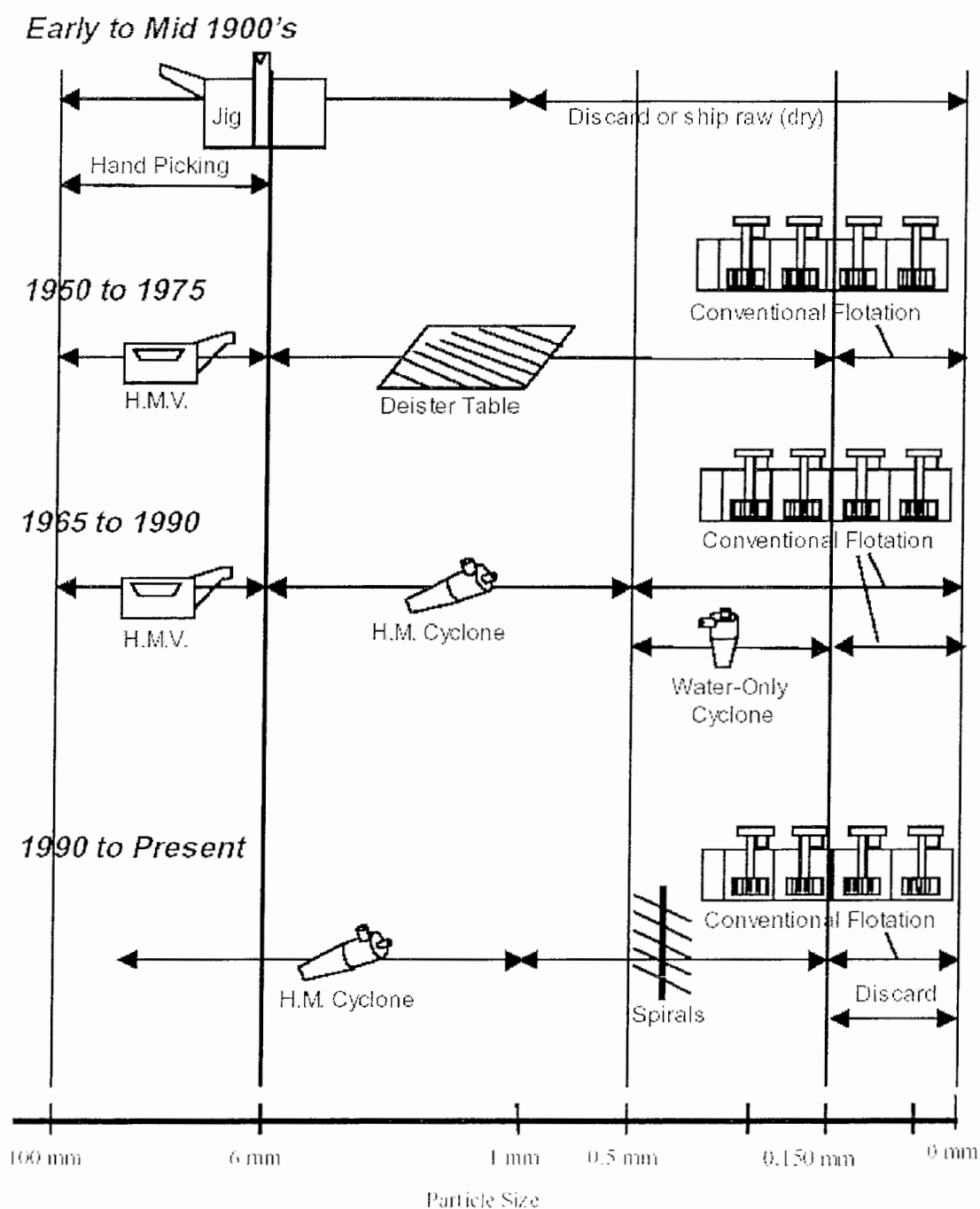
در بیست سال اخیر مطالعات و تحقیقات زیادی در جهت بهبود فرایند شستشوی زغال دانه ریز^۱ یا فراوری مواد ریز دانه که اندازه ابعاد آنها کوچکتر از یک میلی متر می باشند انجام گرفته است. فراوری این محدوده ابعادی از زغالها مشکلات فراوانی در مقایسه با مواد درشت تر، که به روش های ثقلی فراوری می شوند داشته و همواره بازدهی کمتری نیز داشته اند. این در حالی است که نه فقط در صنعت زغالشویی بلکه در فراوری اکثر موادی که ابعاد آنها کمتر از یک میلی متر می باشند، روش های فراوری یکسانی مورد استفاده نبوده و در حقیقت توافق همه جانبه ای بر سر استفاده از تجهیزات، در محدوده دانه بندی های مختلف وجود ندارد. این امر تنوع رفتار کانه های مختلف در محیط های جدایش متفاوت را نشان می دهد. به عنوان یک اصل کلی برای همه تجهیزات مورد استفاده در شستشوی زغال، بازدهی جداسازی با کاهش ابعاد کاهش می یابد. (Firth. B, et al, 1995)

هدف از انجام این تحقیق مطالعه قابلیت شستشوپذیری زغال البرز شرقی توسط روش فلو تاسیون ستونی می باشد و از طریق بررسی و فهم بهتر عوامل موثر، و ارتباط آنها در فلو تاسیون ستونی زغال سعی در بهینه کردن شرایط عملیاتی ستون با توجه به شناخت عوامل موثر، و با استفاده از روشهای طراحی آماری آزمایشات شده است.

۱-۲- تاریخچه فراوری زغال ریز دانه

فراوری زغال ریز دانه در مقیاس صنعتی از دهه ۱۹۴۰ میلادی آغاز شد. بعضی از روشهای متداول فراوری زغال با توجه به ابعاد و سال آنها در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.

^۱ Fine coal



شکل (1-1) روشهای متداول فراوری زغال با توجه به ابعاد و سال آنها (Firth, B, et al, 1995).

این در حالی است که در عمل، اندازه ذراتی که مرز بین روشها را مشخص می کنند به صورت مطلق نبوده و استفاده از روشهای گوناگون در کارخانه های مختلف به صورت یکسان نمی باشد.

در گذشته غالباً زغال درشت^۲ توسط جیگ فراوری می شد ولی امروزه استفاده از ظروف واسطه سنگین^۳ متداول تر است. استفاده از سیکلون واسطه سنگین^۴ نیز به دلیل ساده تر شدن مدار، برای ابعاد درشت تا متوسط، توسعه پیدا کرده است. ابعاد ریز نیز در گذشته اغلب دور ریخته می شدند ولی امروزه توسط میزها و سیکلونهاى آب بازیابی می شوند. از آنجایی که سیکلونهاى واسطه سنگین برای ابعاد متوسط، جایگزین میزها^۵ شده اند، استفاده از مارپیچ ها^۶ برای ابعاد ریز، مطلوبتر شده است زیرا استفاده از سیکلون واسطه سنگین آلودگی مگنتیتی را به همراه دارد. در حالتی که میزها و مارپیچ ها بازدهی مشابهی داشته باشند، با توجه به پایین تر بودن هزینه مارپیچ ها، از آنها بجای میزها استفاده می شود.

(Palowitch E, and Deurbrouck A, 1963)

۳-۱- مشکلات فعلی صنعت زغالشویی

چنانکه متذکر گردید فراوری زغال با ابعاد کوچکتر از یک میلی متر، مشکل تر از فراوری زغال با ابعاد درشت تر است. امروزه روش متداول در مدارهای زغالشویی، فرستادن ابعاد کوچکتر از یک میلی متر به هیدروسیکلونهاى طبقه بندی می باشد که سرریز آنها حاوی ابعاد کوچکتر از ۰/۵ میلی متر به سیستم فلو تاسیون و ته ریز آن نیز به مارپیچ ها ارسال می شود. در این مدارها که امروزه بیشتر متداول می باشند، سه مشکل اساسی به شرح ذیل وجود دارد:

۱. حساس بودن مارپیچ ها به شکل ذرات، بطوریکه در آنها ذرات باریک بهتر جدا می شوند. و همچنین برای ابعاد کوچکتر از ۰/۲۵ میلی متر کارایی خوبی ندارند.
۲. چگالی بالای مورد نیاز برای کارکرد بهتر مارپیچ ها در مقایسه با چگالی زغال، به طوریکه برای کارکرد بهتر مارپیچ ها معمولاً چگالی بیشتر از $1/8 \text{ ton/m}^3$ مطلوب تر است.
۳. مشکل سوم را ابعاد بسیار ریز (نرمه ها) تشکیل می دهند. بدین صورت که بعضی از این ذرات به جای اینکه در سرریز سیکلون طبقه بندی قرار گیرند، در ته ریز آن جایگزین می شوند. راه حلی

^۲ Coarse coal

^۳ Heavy media vessel

^۴ Heavy media cyclone

^۵ Deister tables

^۶ Spiral

که برای رفع این مشکل انجام می شود، قرار دادن سیکلونهاى طبقه بندى اضافى در مدار برای نرمه گیرى است. ولى اغلب نرمه ها به درستی طبقه بندى نشده و باعث بالا رفتن میزان خاکستر در محصول مى شوند چون عمدتاً این ابعاد دارای خاکستر بالای ۴۰٪ هستند. (Phillips, D.I., 1998)

جدول (۱-۱) داده های خاکستر یک نمونه زغال تمیز را در رنج دانه بندى مختلف نشان مى دهد. این نمونه در یک کارخانه زغال شویى نسبتاً جدید مورد آزمایش قرار گرفته است.

مدار این کارخانه حاوی سیکلونهاى واسطه سنگین و ماریچ ها مى باشند که در آن ابعاد زیر ۰/۱۵ میلی متر نیز از مدار خارج مى شوند. بعد از شستشوى نمونه در این کارخانه محصول برای ابعاد بالای ۰/۵ میلی متر تقریباً دارای ۸٪ خاکستر و محصول کلی ماریچ ها، یعنی ابعاد کوچکتر از ۰/۵ میلی متر، تقریباً حاوی ۲۰/۶٪ خاکستر بوده است در حالیکه اگر نرمه ها (ابعاد زیر ۰/۱۵) به داخل ماریچ ها راه پیدا نمى کردند درصد خاکستر آن به ۱۷٪ مى رسید، که این مطلب کارایی ضعیف ماریچ ها در ارتباط با نرمه ها را نشان مى دهد. ابعاد کوچکتر از ۰/۱۵ میلی متر به تنهایی حاوی ۳۰/۲۲٪ خاکستر بوده و حجم آنها فقط ۳/۲٪ از کل نمونه را تشکیل مى دهند که توزیع آنها در کل نمونه باعث بالا رفتن خاکستر از ۸/۸٪ به ۹/۵٪ شده است. این مشکل با افزایش میزان رس زغال و همچنین متغیر بودن درصد آن در خوراک تشدید مى شود (Phillips, D.I., 1992).

جدول (۱-۱) داده های خاکستر یک نمونه زغال تمیز در رنج دانه بندى مختلف (Phillips, D.I., 1992)

Size (mm)	Individual		Cumulative Retained		Cumulative Passing	
	Wt. %	Ash %	Wt. %	Ash %	Wt. %	Ash %
+1	81.3	7.96	81.3	7.96	100.0	9.48
0.5 x 1	6.7	8.12	88.0	7.97	18.7	16.11
0.150 x 0.5	8.8	17.06	96.8	8.80	12.0	20.57
0.045 x 0.150	2.1	26.22	98.9	9.17	3.2	30.22
0 x 0.045	1.1	37.86	100.0	9.48	1.1	37.86

۴-۱- روش های جدید فراوری زغال ریز دانه

در زغالهای ریز دانه با ابعاد کمتر از یک میلی متر بخصوص با ابعاد کمتر از ۰/۵ میلی متر به دلایل کم بودن بازدهی دستگاه های متداول و همچنین نیاز دستگاه هایی که بر پایه آب هستند همانند مارپیچ ها، به چگالی جدایش بالاتر، شستشوی آنها با مشکل مواجه می شود. وجود نرمه ها و نرمه گیری ضعیف نیز بر پیچیدگی مساله می افزاید. دستگاه جدید مورد استفاده که فلوتاسیون ستونی^۷ نام دارد بسیاری از این مشکلات را برطرف می کند. در حال حاضر استفاده از فلوتاسیون ستونی در صنعت زغالشویی گسترده نیست ولی فعالیت های مطالعاتی زیادی برای بررسی امکان پذیری استفاده از این روش صورت گرفته است. در صورتیکه فلوتاسیون ستونی به طور مناسب بکار گرفته شود، به دلیل داشتن آب شستشو می تواند به بهترین صورت عمل نرمه گیری را انجام دهد.

همانطور که قبلاً بحث شد، مدار متداول کنونی برای شستشوی زغال، استفاده از مارپیچ ها برای ابعاد ۱ تا ۰/۱۵ میلی متر، و فلوتاسیون مکانیکی برای ذرات زیر ۰/۱۵ میلی متر است. بنابراین اگر ستون بتواند برای ذراتی با ابعاد درشت تر بکار رود فراوری زغال ریز دانه بهبود خواهد یافت.

در حال حاضر در کمتر کارخانه ای از فلوتاسیون، برای ابعاد بالاتر از ۰/۵ میلی متر استفاده می شود در حالیکه در گذشته و در سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ از فلوتاسیون مکانیکی به عنوان یک روش متداول برای ابعاد بالای ۰/۵ میلی متر استفاده شده است. و از سالهای ۱۹۸۰ به بعد به سختی فلوتاسیون برای ابعاد بالاتر از ۰/۲۵ میلی متر بکار گرفته شده است. این به دلیل افزایش استفاده از ماشینهای پیوسته (روشهای مکانیزه) برای استخراج زغال می باشد که شرایط سیستم فلوتاسیون را تغییر داده است. دو دلیلی که امروزه کمتر از فلوتاسیون برای ذرات درشت تر زغال استفاده می شود به قرار زیر می باشد (Phillips .D.I, 1998).

۱- افزایش میزان حجم ذرات ریز به دلیل استفاده از روشهای استخراج پیوسته زغال. در این حالت با افزایش حجم ذرات ریز دانه میزان سطح مخصوص ذرات افزایش یافته و به تبع آن باعث پر شدن ظرفیت حمل در داخل سلول می شود. در نتیجه حباب توانایی حمل ذرات درشت تر را از دست می دهد.

⁷ Column flotation

۲- افزایش خاکستر ریز دانه در خوراک فلوتاسیون. از طرفی بسیاری از کاربران مشکل اصلی را که در بار ورودی می باشد تشخیص نمی دهند و فکر می کنند که فقط باید مقدار کف ساز را کمتر کنند تا خاکستر کمتری به کف بچسبد، در صورتیکه ممکن است با کم کردن کف ساز، به هدف خود برسند و خاکستر کمتری به حباب بچسبد، ولی این عمل باعث کاهش پایداری کف و همچنین شکننده تر شدن کف می شود که قدرت کف را برای حمل ذرات درشت تر از بین می برد.

به علت همین کاربری اشتباه در سلول فلوتاسیون است که تفکر عدم توانایی سلول در شناور کردن ذرات درشت تر، بیشتر رواج پیدا کرده است. در صورتیکه با طراحی صحیح سیستم و استفاده از آب شستشو که از امکانات فلوتاسیون ستونی می باشد می توان بر این مشکل پیروز شد.

(Phillips .D.I, 1998)

۱-۵- واحد زغالشویی شرکت البرز شرقی

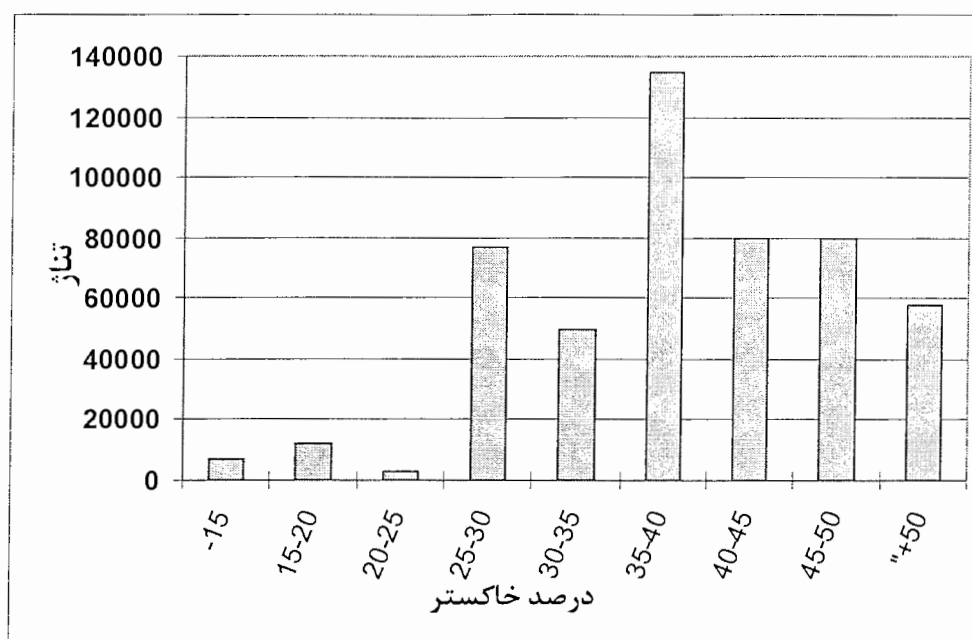
کارخانه زغال شویی شرکت البرز شرقی یکی از واحدهای تولید کنسانتره زغال برای کارخانه ذوب آهن اصفهان است. این کارخانه در شمال شرقی دامغان و در کیلومتر ۵۷ شاهرود بین مناطق مهماندوست و تزره قرار گرفته است. ساختمان این کارخانه از سال ۱۳۵۲ آغاز شد و در سال ۱۳۵۳ به بهره برداری رسید. طبق طرح اولیه، ظرفیت کارخانه ۸۰ تن در ساعت است و در سه شیفت باید به طور متوسط ۱۵۰۰ تن زغالسنگ را شستشو دهد. برق مورد نیاز کارخانه ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلو وات است. میزان مصرف آب ۵ متر مکعب بر تن زغال است و از چاه تامین می شود. زغالسنگ از معادن مختلف با حداقل ۲۵ درصد خاکستر و رطوبت نسبی ۱۲ درصد توسط لودر به داخل بونکر ریخته می شود. قطعات درشت تر از ۱۲ سانتیمتر توسط نرده جدا و مواد به دستگاه تغذیه کننده وارد می شود. ظرفیت هر تغذیه کننده، ۱۰۰ تن در ساعت بوده و با سرعت ۱/۴ متر در ثانیه زغالسنگ را به سرند اولیه هدایت می کند. چشمه سرند یک میلیمتر و سطح آن ده متر مربع است. فرآوری زغال در این کارخانه به روشهای ثقلی (جیگ) و فلوتاسیون مکانیکی انجام می شود. (رضایی، ۱۳۷۸).

۱-۶- 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 اساسی ترین موارد مورد رعایت در طراحی اولیه کارخانه زغالشویی است. جهت رعایت این امر در معادن، بخش کنترل سنگ و در کارخانه های فرآوری، مخازن (بونکر) بزرگ پیش از ورود خوراک به کارخانه، هر کدام بطور جداگانه، وظیفه کنترل عیار خوراک ورودی را بر عهده دارند. دلیل این امر نیز جلوگیری از اختلال در امر تولید و سازگار نمودن خوراک کارخانه با شرایط کاری کارخانه می باشد.

مطابق طراحی اولیه کارخانه، در سال ۱۳۵۳، خوراک ورودی کارخانه باید از دو معدن تزره و ممدویه تامین می شد، حال آنکه در حال حاضر منابع تامین خوراک کارخانه (با احتساب معادن خصوصی) به بیش از ۵۰ معدن می رسد. در طراحی کارخانه، دامنه تغییرات درصد خاکستر خوراک بین ۳۹-۴۱ درصد لحاظ شده است. در سال ۱۳۵۴، سال دوم آغاز فعالیت کارخانه زغالشویی البرز شرقی، درصد خاکستر زغال ورودی به کارخانه بین ۴۰/۶-۳۶/۶ درصد قرار داشته است. این امر در حالی است که این دامنه در شش ماهه دوم سال ۱۳۷۸ به ۵۹/۸-۲۷/۷ درصد گسترش یافته است.

عامل اصلی در تغییرات قابل ملاحظه فوق، تغییر منابع تامین ماده معدنی از دو معدن تزره و ممدویه به بیش از ۵۰ معدن شامل بخش خصوصی و معادن تحت پوشش شرکت می باشد. شکل (۱-۲) توزیع وزنی درصد خاکستر را در خوراک ورودی در ۸ ماهه اول سال ۱۳۸۱ نشان می دهد (غروی، ۱۳۸۲).



شکل (۱-۲) توزیع وزنی درصد خاکستر در خوراک ورودی به کارخانه (غروی، ۱۳۸۲)

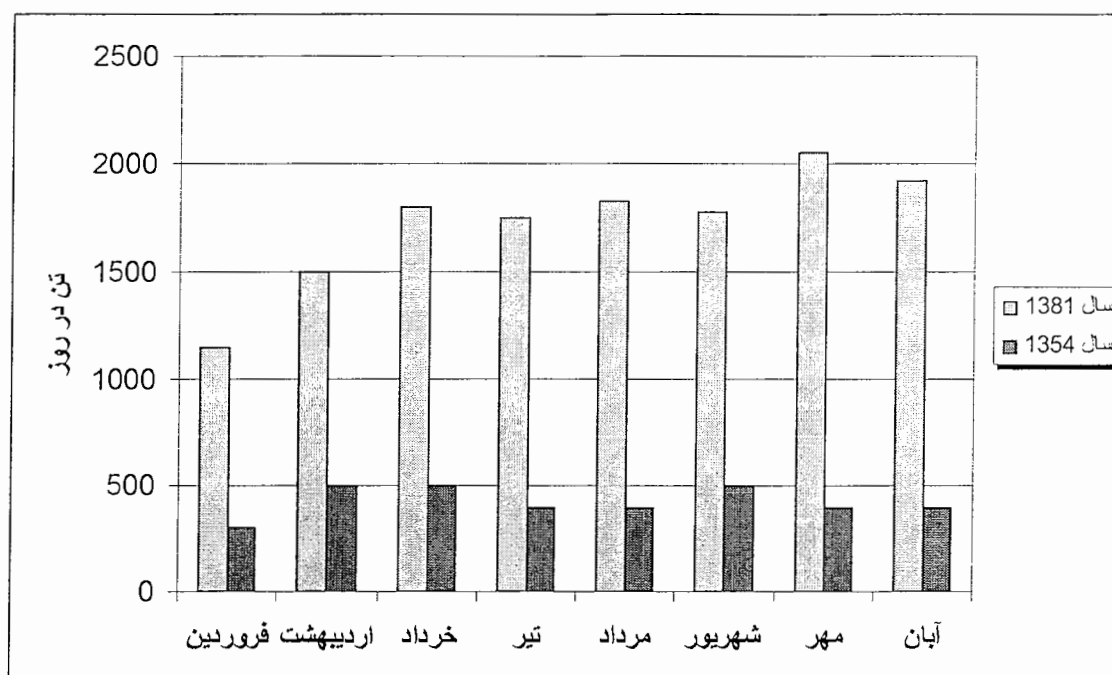
از طرف دیگر یکی از عمده ترین مشکلات کارخانه، نبود یک سیستم مشخص برای مخلوط کردن (Belending) و همگن سازی خوراک کارخانه است. همانطوریکه اشاره شد، منابع تامین خوراک کارخانه در بدو تاسیس دو معدن تزره و ممدویه بوده است، ولی در حال حاضر خوراک کارخانه از مناطق زغال دار زیر که هر کدام مجموعه ای از معادن است، تامین می شود:

معادن تزره (شهرستان شاهرود)

معادن اولنگ و قشلاق (استان گلستان)

معادن طبس (شهرستان طبس)

تغییر ظرفیت یکی دیگر از موارد مهم در عملکرد کارخانه می باشد. شکل (۱-۳) خوراک ورودی به کارخانه را در ۸ ماهه اول سالهای ۱۳۵۴ و ۱۳۸۱ نشان می دهد. همانطوریکه ملاحظه می شود، نرخ خوراک ورودی روزانه، در سال ۱۳۸۱ تا چهار برابر نسبت به سال ۱۳۵۴ افزایش نشان می دهد.



شکل (۳-۱) مقایسه نرخ خوراک ورودی به کارخانه در ۸ ماهه اول سالهای ۱۳۵۴ و ۱۳۸۱ (غروی، ۱۳۸۲)

با نمونه گیری از خوراک، باطله و کنسانتره فلوتاسیون و جیگ در طی ۶ روز (با فرض اینکه در طی ۶ روز، خوراک ورودی به کارخانه معرف خوراک عمده کارخانه باشد) میانگین درصد خاکستر خوراک، باطله و کنسانتره فلوتاسیون و جیگ به شرح جدول (۲-۱) حاصل گردید.

جدول (۲-۱) درصد خاکستر خوراک، کنسانتره و باطله جیگ و فلوتاسیون (غروی، ۱۳۸۲)

درصد خاکستر	نوع زغال
۴۸/۰۷	خوراک جیگ
۱۳/۸۴	کنسانتره جیگ
۷۳/۳۶	باطله جیگ
۳۲/۵۲	خوراک فلوتاسیون
۱۶/۳۵	کنسانتره فلوتاسیون
۶۵/۲۹	باطله فلوتاسیون

با ارقام فوق، مقدار بازیابی متوسط زغال در کنسانتره برای فلوتاسیون برابر ۸۳/۳۹٪ و این مقدار برای جیگ برابر ۷۰/۳۴٪ می باشد. به عبارت دیگر از هر ۱۰۰ تن خوراکی که وارد جیگ و فلوتاسیون

می شود به ترتیب تقریباً ۳۰ و ۱۶ تن وارد بخش باطله می شود که نشان دهنده هدر رفتن بیش از حد زغال در جیگ و فلو تاسیون است.

همچنین با داشتن میانگین درصد خاکستر خوراک و کنسانتره کلی کارخانه و نیز نرخ خوراک و کنسانتره مقدار بازیابی متوسط زغال برای کل کارخانه بدست می آید. جدول (۱-۳) این مقدار را برای ۸ ماهه اول سال ۱۳۵۴ و ۱۳۸۱ نشان می دهد.

جدول (۱-۳) بازیابی وزنی متوسط زغال برای کل کارخانه (٪) (غروی، ۱۳۸۲)

سال ۱۳۸۱	سال ۱۳۵۴	ماه
76.42	82.77	فروردین
76.84	83.4	اردیبهشت
76.85	80.08	خرداد
76.83	82.36	تیر
70.8	82.32	مرداد
76.5	82.28	شهریور
74.5	84.21	مهر
78.4	84.83	آبان

ارقام فوق نشان دهنده کاهش تقریباً ۷ درصدی بازیابی در سال ۱۳۸۱ نسبت به سال ۱۳۵۴ می باشد (غروی، ۱۳۸۲).

فصل دوم

کلیاتی درباره

فلوتاسیون ستونی

۲-۱- مقدمه ای بر فلوتاسیون ستونی

ستون فلوتاسیون برای اولین بار توسط بروث و تروپلی در سال ۱۹۶۰ ساخته و ارائه شد. این وسیله در سال ۱۹۶۴ و ۱۹۶۷ توسط بروث و ارویل تکمیل شده و وارد صنعت شده است. به علت ملیت کانادایی افراد فوق به این وسیله گاهاً ستون کانادایی نیز گفته می شود. بعد از آن طراحی های دیگری نیز توسط افراد دیگر در نقاط مختلف جهان انجام شد که از جمله:

ستون لیدز (دل و جنکیز ۱۹۷۶)، ستون فشرده^۱ (یانگ ۱۹۸۸)، ستون فلوت ایر^۲ (زیپریان و سوانسون ۱۹۸۸)، ستون هیدروکم^۳ (اشنایدر و دان ویرت ۱۹۸۸) و چندین طرح دیگر.

(Finch J.A & Dobby G.S, 1990)

عنوان ستون برای فلوتاسیون ستونی به دلیل شکل هندسی آن می باشد. برخلاف فلوتاسیون مکانیکی که در آنها از تانکهای مستطیلی کم عمق برای فلوتاسیون ذرات استفاده می شود، بدنه ستون بلند می باشد و در حالت صنعتی ارتفاع آن به ۱۰ الی ۱۵ متر می رسد.

مقطع ستون ممکن است بسته به استفاده خاصی که از آن مد نظر است، به شکل دایره، مربع و یا مستطیل باشد. در مقایسه با سلولهای مکانیکی متداول، در حجم برابر با ستون، ستون فلوتاسیون دارای سطح مقطع بسیار کوچکتر از سلولهای مکانیکی است که این کاهش در سطح مقطع ستون، باعث بهبود پایداری کف و همچنین تشکیل بستر عمیق شده است.

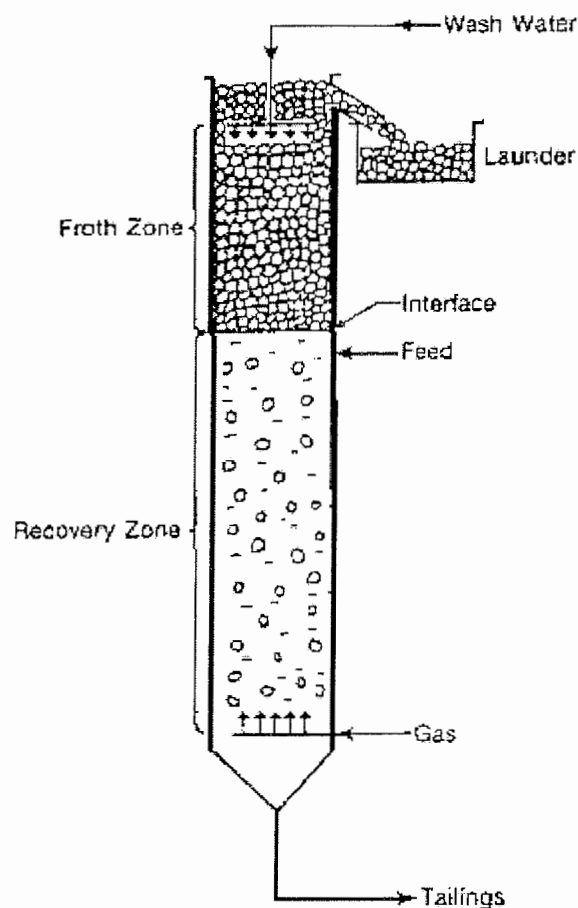
خصیصه مهم ستون فلوتاسیون داشتن سیستم شستشوی کف می باشد. شستشوی کف، باعث حذف ناخالصی های ناخواسته از کف فلوتاسیون می شود. از طرفی در ستون فلوتاسیون بر خلاف سلولهای مکانیکی، از همزن استفاده نمی شود که نبودن همزن مکانیکی باعث افزایش قابلیت فلوتاسیون

¹ Packed column

² Flotair Column

³ Hydrochem Column

انتخابی، بهبود پایداری کف و همچنین افزایش بازیابی ذرات ریز شده است (MPE International INC, 2003).



شکل (۱-۲) نمای شماتیک از ستون فلوتاسیون (Bouchard J, et al, 2004)

در داخل ستون ذراتی که از قبل با اضافه شدن مواد شیمیایی مختلف آبران شده اند بعد از برخورد با حبابهای هوا به آنها چسبیده و به سمت بالا حرکت می کنند و در بالای ستون به صورت محصول فلوتاسیون بازیابی می شوند. ذرات آگیر نیز به سمت پایین ستون حرکت می کنند که در آنجا از طریق مجرای ته ریز به عنوان محصول ته ریز فلوتاسیون (باطله) از ستون خارج می شوند.

در مدتی که ستون به طور معمولی کار عادی خود را انجام می دهد دو بخش قابل تشخیص در داخل ستون ایجاد می شود که عبارتند از : ناحیه جمع آوری^۴ که در آن ذرات آبران توسط حبابهای تزریق شده توسط حباب ساز به داخل پالپ، جمع آوری می شوند و ناحیه شستشو یا ناحیه کف^۵ (که بخش عمده آن یعنی ۶۰٪ الی ۹۰٪ آن توسط هوا یا گاز تشکیل شده است) که ذرات جمع آورری شده را در خود جایی می دهد. جهت عملکرد خوب در بازیافت ذرات در ستون فلو تاسیون نیاز به ساختار عمیق ناحیه کف با ارتفاع و چگالی مناسب می باشد.

خوراک ورودی به صورت پالپ ۵٪ الی ۳۰٪ جامد، در ارتفاع تقریباً یک سوم بالایی ستون از زیر سطح مشترک پالپ-کف، (که در این ارتفاع سرعت حرکتی حبابهای هوا و فشار ناشی از هوای فشرده تولید کننده آنها به حد معتدلی کم شده است) وارد ستون می شود. این حبابها نیز ذراتی را که از قبل آبران شده اند را به سمت خود جذب کرده و به سمت ناحیه کف حرکت می کنند (Carvalho T, Durao F, 2002)

در مباحث مختلف از اصطلاح نرخ ظاهری برای جریانهای مختلف استفاده شده که پارامتر مناسبی است زیرا از طریق آن می توان ستونهایی با قطرهای متفاوت را با هم مقایسه کرد. نرخ ظاهری (Superficial rate) برای جریانهای مختلف سیال بکار رفته است که تعریف کلی آن به صورت زیر است:

$$J_i = \frac{Q_i}{A_c} \quad \text{معادله (۱-۲)}$$

که در معادله (۱-۲) Q_i عبارتست از دبی حجمی سیال و A_c سطح مقطع ستون که در واقع J_i دارای واحد سرعت است. i می تواند معرف آب بایاس^۶ (B)، آب شستشو^۷ (W)، پالپ باطله (T) و غیره باشد (Finch J.A & Dobby G.S, 1990).

⁴ Collectoin Zone

⁵ Froth Zone

⁶ Bias Water

⁷ Wash Water

۲-۲- ماندگی گاز^۸

زمانی که گاز به داخل مایع و پالپ درون ستون وارد می شود جانشین ذرات مایع و یا پالپ می شود که این بخش از حجم پالپ جابجا شده ماندگی گاز (ε_g) نامیده می شود. متمم آن یعنی ($1 - \varepsilon_g$) ماندگی جامد نامیده می شود. ماندگی گاز، میزان گاز موجود در سیستم گاز-مایع و یا گاز پالپ را نشان می دهد که نشانه مناسبی برای شرایط هیدرودینامیکی ناحیه جمع آوری است.

(Finch J.A & Dobby G.S, 1990)

۲-۲-۱- اندازه گیری ماندگی گاز

روشهای مختلفی برای اندازه گیری ماندگی گاز پیشنهاد شده است که می توان از روشهای فشار، چگالی، دما، هدایت الکتریکی و ... نام برد که با توجه به امکانات و سادگی روش فشار، از این روش استفاده شده است.

در اینجا حالتی که کاربرد عملی بیشتری دارد، یعنی سیستم گاز-پالپ مورد بررسی قرار می گیرد. در این حالت مولفه دینامیکی فشار ناچیز فرض شده و بار متصل به حبابها نیز کوچک در نظر گرفته می شود که در نتیجه آن دانسیته مجموع حباب-ذره قابل صرف نظر کردن خواهد بود. با توجه به شکل (۲-۲) فشار در نقاط A و B به صورت زیر بدست می آید.

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

9

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

که در آن ρ_{sl} دانسیته پالپ، ε_{gA} و ε_{gB} به ترتیب ماندگی گاز در بالای نقاط A و B می باشد. بنابراین اختلاف فشار بین نقاط A و B عبارتست از:

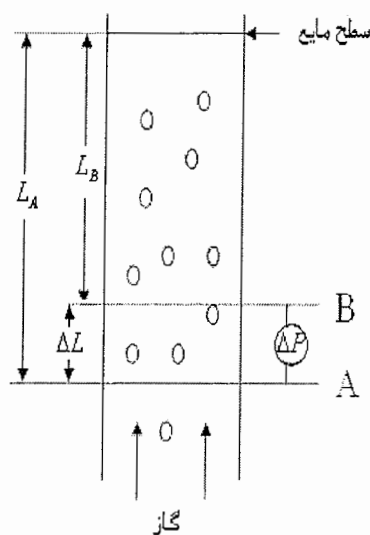
$$\Delta P = \rho_{sl} \Delta L g (1 - \varepsilon_g)$$

⁸ Gas Holdup

و در این رابطه ε_g مقدار ماندگی گاز بین نقاط A و B می باشد. ε_g را از رابطه قبل می توان به این صورت بدست آورد.

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{\Delta P}{\rho_{sl} g \Delta L} \quad \text{معادله (۲-۲)}$$

باید توجه داشت که ε_g بدست آمده تنها برای فاصله ΔL می باشد و ماندگی گاز در قسمتهای دیگر ستون در آن نقشی ندارند (Finch J.A & Dobby G.S, 1990).



شکل (۲-۲) اندازه گیری ماندگی گاز با استفاده از اختلاف فشار (Finch J.A & Dobby G.S, 1990)

۲-۳- جریانهای حاکم بر سیستم فلو تاسیون

بطور کلی دو نوع جریان عمده در ستون وجود دارد که عبارتند از:

جریان حبابی^۹

جریان آشفته^{۱۰}

در مدتی که جریان حاکم بر سیستم از نوع حبابی است پارامترهای مختلف موجود در ستون دارای تأثیرات قابل پیش بینی نسبت به یکدیگر می باشند و بطور کلی می توان گفت که جهت ایجاد

^۹ Bubbly Flow

^{۱۰} Turbulent

پایداری و یا جهت ایجاد کنترل شرط اول، ایجاد جریان حبابی بر سیستم می باشد. (به محض اینکه شدت تأثیر تغییرات ایجاد شده جهت اصلاح متغیری کاهش یابد به معنی نزدیک شدن به جریان آشفته است) در این نوع جریان کنترل ممکن نیست و می بایست از دو متغیر ورودی پالپ و بخصوص نرخ گازدهی برای برگرداندن جریان به نوع حبابی استفاده شود (Finch J.A & Dobby G.S, 1990).

۲-۴- سیستم تولید حباب

روش استفاده شده جهت تولید حباب در ستون های فلو تاسیون نیز یکی دیگر از مشخصه های متمایز کننده و بارز فلو تاسیون ستونی است. روش غالب جهت تولید حباب از طریق بکارگیری یک اسپارژر درونی در قسمت پایین ستون می باشد. روش دومی هم که بدین منظور مورد استفاده قرار می گیرد حباب ساز خارجی است که در آن گاز و مایع (پالپ) در درون یک محفظه با هم برخورد کرده و از طریق یک نازل به درون ستون پاشیده می شوند که این امر منجر به تولید حباب می شود.

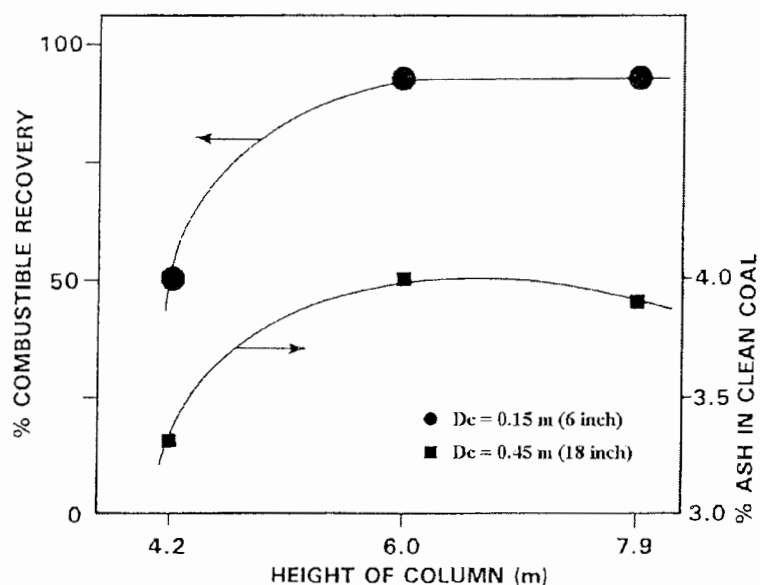
(Finch J.A & Dobby G.S, 1990)

۲-۵- زمان ماند^{۱۱}

زمان ماند ذرات زغال در ستون، یکی از عوامل مهم کنترل کننده بازیابی و عیار می باشد. اغلب زمان ماند مورد نیاز برای فراوری زغال ۲ الی ۳ دقیقه پیشنهاد شده است که در مقایسه با زمان ماند لازم برای فلو تاسیون ذراتی مانند مس که ۱۵ تا ۲۰ دقیقه می باشد، زمان کمی است.

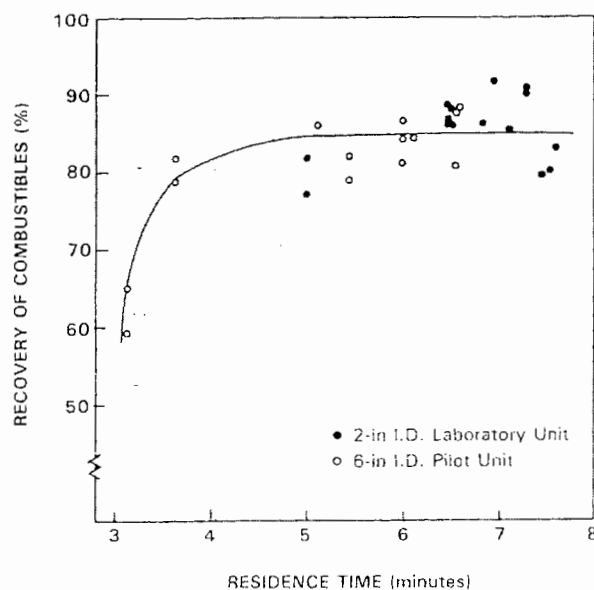
یکی از عواملی که بر روی زمان ماند قابل دسترس تأثیر گذار می باشد ارتفاع ستون است. با افزایش ارتفاع ستون در یک نرخ ثابت خوراک، زمان ماند افزایش خواهد یافت. شکل (۲-۳) تأثیر ارتفاع ستون بر روی بازیابی و درصد خاکستر محصول زغال را نشان می دهد. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش ارتفاع ستون میزان بازیابی افزایش می یابد و در ارتفاع ۶ متری تقریباً به مقدار ثابتی مجانب می شود. که می تواند بیانگر کافی بودن ارتفاع ۶ متر برای فلو تاسیون زغال باشد (Parekh B. et al, 1988).

¹¹ Residence Time



شکل (۳-۲) تأثیر ارتفاع ستون در بازیابی و درصد خاکستر زغال (Parekh B. et al, 1988)

شکل (۴-۲) تأثیر زمان ماند را بر بازیابی زغال نشان می دهد، ابتدا با افزایش زمان ماند، بازیابی به سرعت زیاد می شود ولی برای زغال از زمان ماند ۵ دقیقه به بالا افزایش محسوسی در بازیابی بوجود نمی آید. بنابراین زمان ماند ۵ دقیقه برای فراوری زغال کافی خواهد بود.



شکل (۴-۲) تأثیر زمان ماند ذرات در بازیابی زغال (Parekh B. et al, 1988)

۲-۶- نرخ خوراک دهی

افزایش در میزان خوراک دهی تأثیر مستقیم بر روی زمان ماند ذرات می گذارد و باعث کاهش زمان ماند می شود. بعلاوه افزایش نرخ خوراک دهی که باعث افزایش جریان رو به پایین پالپ می شود سرعت بالا آمدن حباب ها را کاهش می دهد، که به تبع آن میزان ماندگی گاز افزایش می یابد.

(MPE International INC, 2003)

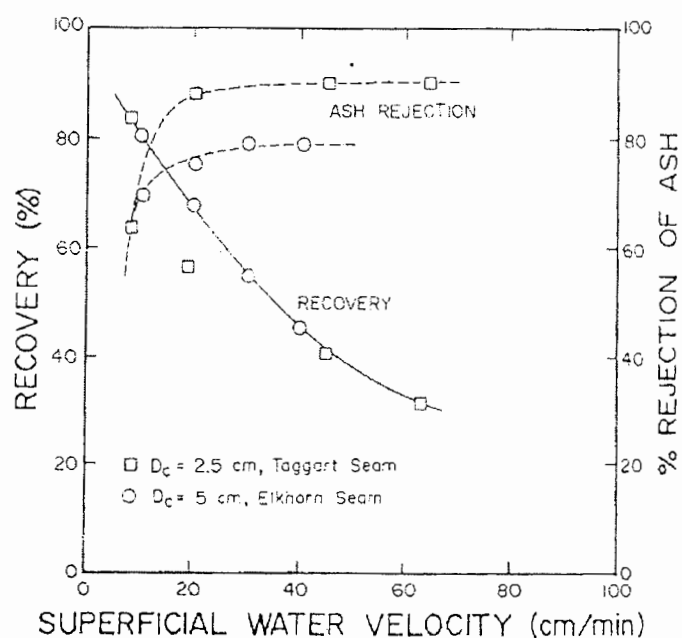
۲-۷- آب شستشو

آب شستشو آبی است که به منظور شستشوی کف و تأمین آب آن، از بالای ستون به کف اضافه می شود. در عمل آب شستشو به دو طریق به کف اضافه می شود در حالت اول توزیع کننده آب شستشو کاملاً در بالای کف قرار گرفته و آب شستشو همانند دوش حمام به حالت باران به کف اضافه می شود. در حالت دوم توزیع کننده درست در زیر لبه سرریز قرار می گیرد و آب شستشو به کف اضافه می شود (MPE International INC, 2003).

۲-۷-۱- تأثیر آب شستشو بر عیار و بازیابی

یکی از مزایای مهم فلوئاسیون ستونی وجود سیستم آب شستشو در آن می باشد که از ورود ذرات ریز باطله به درون کنسانتره جلوگیری می کند. شکل (۲-۵) تأثیر افزودن آب شستشو در بازیابی زغال و بازداشت خاکستر را برای لایه Elkhorn (خاکستر ۹٪) و لایه Taggart (خاکستر ۲۸٪) نشان می دهد. از ستونهایی با قطر ۲/۵ و ۵ سانتی متر برای انجام آزمایشات استفاده شده است. همانطور که در شکل نیز پیداست برای جلوگیری از تأثیر قطر ستون در داده ها، از نرخ ظاهری آب شستشو استفاده شده است (Luttrel G. H, et al, 1988).

بازداشت خاکستر برای هر دو لایه زغال با افزایش میزان نرخ آب شستشو، افزایش پیدا می کند و در نرخ تقریباً ۲۰ cm/min به حد ثابتی می رسد. از طرفی با افزایش میزان نرخ آب شستشو، بازیابی کاهش پیدا می کند (Luttrel G. H, et al, 1988).



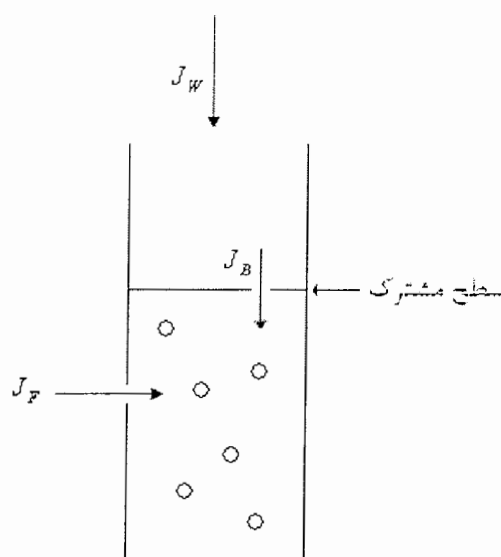
شکل (۵-۲) منحنی تغییرات بازیابی و بازداشت خاکستر با نرخ آب شستشو

در لایه های زغال Taggart و Elkhorn (Luttrel G. H, et al, 1988)

در فلوئاسیون زغال مقدار بهینه آب شستشو زمانی بدست می آید که بیشترین درصد بازداشت خاکستر را در کمترین مقدار افت بازیابی داشته باشیم که با رسم منحنی های خاکستر و بازیابی با آب شستشو، می توان حدود آن را بدست آورد. این مقدار در روی منحنی جایی خواهد بود که در منحنی بازداشت خاکستر خمیدگی ایجاد می شود و پس از آن خمش در ادامه به یک مقدار ثابتی مجانب می شود که برای این سری از آزمایشات این مقدار در حدود ۲۰ cm/min می باشد (Luttrel G, et al, 1988).

۲-۷-۲- آب بایاس

آب شستشو به دو بخش تقسیم می شود، یک قسمت آن به سرریز راه پیدا می کند و ذرات جمع شده را خارج می کند و قسمت دیگر آن نیز به سمت کف و ناحیه جمع آوری پایین رفته و عمل شستشوی کف را انجام می دهد. آبی که به سمت پایین حرکت می کند آب بایاس نامیده می شود. برای موثر بودن عمل شستشو وجود آب بایاس رو به پایین الزامی است که به عملیات بایاس مثبت معروف است. زمانی که بایاس مثبت است، نرخ جریان آب باطله بیش از نرخ جریان آب خوراک می باشد.



شکل (۶-۲) نمای شماتیک از نرخ ظاهری آب بایاس J_B ، نرخ ظاهری خوراک J_F و نرخ ظاهری آب شستشو J_W
(Finch J.A Dobby G.S, 1990)

افزایش میزان نرخ ظاهری آب بایاس J_B ، باعث افزایش عیار کنسانتره می شود ولی این تأثیر با افزایش بیش از حد آب بایاس ادامه نمی یابد. در عمل نرخ ظاهری آب بایاس را در حدود 0 تا ۰/۳ cm/s در نظر می گیرند.

بایاس منفی جریانی است که گاهی به علل مختلف از جمله وجود مقدار بیش از حد نرخ گازدهی در ستون بوجود می آید. که در این حالت آب از ناحیه جمع آوری وارد ناحیه کف شده و به علت داشتن شدت زیاد، به آب بایاس و آب شستشو غلبه کرده و از سرریز خارج می شود. در این صورت شرایط کار ستون از حالت عادی خارج شده و باید به حالت تعادل باز گرد (Finch J.A & Dobby G.S, 1990).

۹-۲- گازدهی (هوادهی)

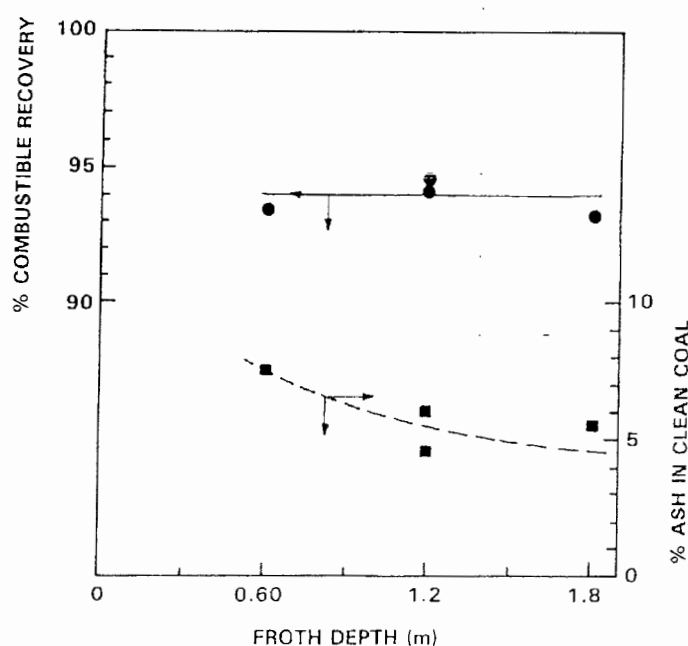
با افزایش میزان گازدهی، بازیابی بیشتر می شود، با این وجود یک مقدار نرخ ظاهری بحرانی برای گازدهی وجود دارد که در نرخ بیشتر از آن مقدار بحرانی، مشخصات حباب تغییر می کند و رژیم جریان عوض می شود، یعنی رژیم جریان از حالت حبابی خارج شده و به رژیم آشفته تبدیل می شود که باعث افت شدید بازیابی و همچنین از بین رفتن سطح مشترک پالپ-کف می شود.

با زیاد شدن نرخ ظاهری گازدهی میزان ماندگی گاز نیز افزایش می یابد و به تبع آن باعث افزایش میزان کنسانتره تولیدی نیز می شود. ولی باید توجه داشت که افزایش نرخ ظاهری گازدهی باعث بوجود آمدن بایاس منفی نشود. نرخ گازدهی بسیار کم نیز ممکن است باعث ریزش کف شود که در این صورت عمق کف به شدت کاهش می یابد (MPE International INC, 2003).

۲-۱۰- عمق کف

با زیاد شدن عمق کف به قیمت کم شدن میزان بازیابی، عیار افزایش پیدا می کند. از طرفی عمق کف زیاد نیز (مثلاً بالای ۱/۵ متر) باعث سنگین شدن کف و به تبع آن باعث ریزش آن می شود که در این شرایط ممکن است بازیابی به شدت کاهش یابد. در آزمایشات معمولاً عمق کف بین ۰/۵ تا ۱/۵ متر در نظر گرفته می شود. کم بودن بیش از اندازه عمق کف نیز احتمال از بین رفتن ناحیه کف را افزایش می دهد که با از بین رفتن ناحیه کف ستون عملاً کارایی خود را از دست می دهد.

(Parekh B. K. et al, 1988)



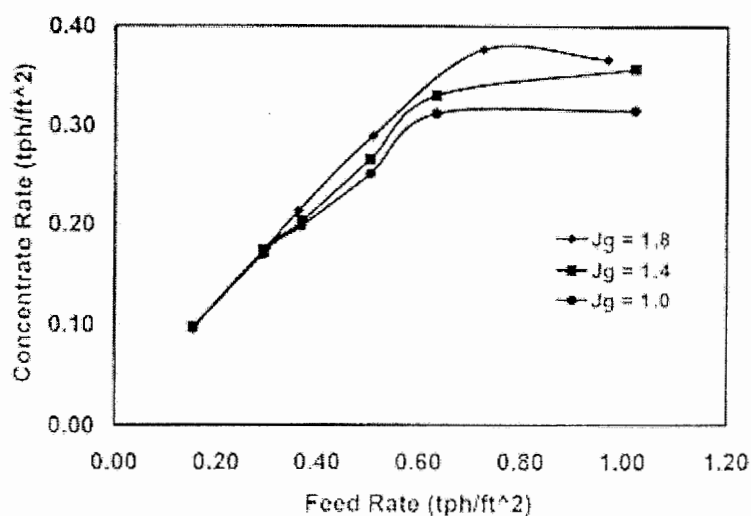
شکل (۲-۷) تأثیر عمق کف در بازیابی و درصد خاکستر زغال (Parekh B. K. et al, 1988)

۲-۱۱- نرخ حمل

در یک نرخ گازدهی ظاهری ثابت، نرخ جامد خاصی قابل حمل می باشد. یک پارامتر مناسب، جرم جامد حمل شده در واحد زمان و در واحد سطح مقطع ستون است که به نرخ حمل معروف است (Patwardhan A., Honaker R.Q. , 1999).

۲-۱۱-۱- ظرفیت حمل

ظرفیت حمل را می توان با تعیین نرخ جامد در کنسانتره به صورت تابعی از نرخ جامد خوراک برای شرایط عملیاتی معینی اندازه گیری کرد. زمانی که نرخ جامد کنسانتره به حداکثر برسد ظرفیت حمل را نتیجه می دهد. در یک زمان ماند ثابت، نرخ جامد در خوراک با تغییر درصد جامد در خوراک قابل تغییر می باشد. رابطه ای که انتظار می رود، عبارتست از افزایش نرخ جامد کنسانتره با افزایش نرخ جامد خوراک تا زمانی که نرخ جامد کنسانتره به حداکثر خود برسد. (با این فرض که متغیرهایی از قبیل نرخ گازدهی، میزان کف ساز و نرخ آب شستشو قبلاً تنظیم شده و سیستم در شرایط پایاس مثبت کار می کند). وضعیت واقعی کمی پیچیده تر است (Patwardhan A., Honaker R.Q. , 1999).



شکل (۸-۲) نمودار تغییرات نرخ کنسانتره با نرخ خوراک دهی برای مقادیر مختلف نرخ هوادهی (Patwardhan A., Honaker R.Q. , 1999)

فصل سوم

مقدمه ای بر طراحی

آماري آزمائشها

۳-۱- مقدمه

طراحی آماری آزمایشها^۱ (DOE) یک روش مناسب است که اولین بار در دهه ۱۹۲۰ توسط رونالد فیشر^۲ به منظور مطالعه اثر همزمان چندین عامل بر روی یک پاسخ معین، ابداع گردید. در نخستین کاربردهای این روش، فیشر قصد داشت تا مشخص کند که برای کشت بهینه یک محصول، چه میزان کود، نور آفتاب و غیره مورد نیاز است. این روشها را می توان برای تمام فرایندهایی که دارای ورودی ها و خروجی های قابل اندازه گیری باشند، بکار برد. در طول جنگ جهانی دوم و بعد از آن استفاده از روشهای طراحی آماری آزمایشها برای بهبود کیفیت فرایندها و تولیدات افزایش یافت، سپس بعد از پیشرفت کامپیوترهای شخصی استفاده از این روشها سرعت بیشتری پیدا کرد و از آن هنگام تا به حال بخش عمده توسعه روشهای مربوط به طراحی آزمایشها در محیط علمی انجام یافته است و کاربردهای بسیار زیادی را در تولید صنعتی به خود اختصاص داده است. مهمترین اهدافی که از استفاده از این روشها انتظار می رود را می توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- فهم چگونگی ارتباط بین متغیرها و پاسخ ها.
- کدام یک از متغیرها تأثیر معنی دار از لحاظ آماری بر روی پاسخ فرایندها دارند و کدام بی تأثیرند.
- بررسی و فهم اثرات متقابل^۳ بین متغیرها، نسبت به پاسخ فرایند.
- تلاش در بهینه سازی فرایند، یعنی مقدار هر یک از متغیرها چگونه انتخاب شود تا میانگین پاسخ فرایند مطلوبتر شود.
- تلاش در استوار سازی^۴ فرایند، یعنی پاسخ فرایند را در مقابل تغییرات غیر قابل کنترل، بی

تفاوت ساخت. (Montgomery, Douglas 1997)

^۱ Design Of Experiment

^۲ Sir R.A. Fisher

^۳ Interaction

^۴ Robust

۳-۲- تعاریف اولیه

در این بخش، تعدادی از اساسی ترین واژه ها و اصطلاحات مورد استفاده در مبحث طراحی آماری آزمایشها، تعریف می گردند. سایر مفاهیم نیز به تدریج و بر حسب نیاز تعریف خواهند شد.

۳-۲-۱- طراحی آماری آزمایشها (DOE)

طراحی آماری آزمایشها یک راهکار علمی است که در طی آن با ایجاد تغییرات هدفمند و سیستماتیک در عوامل موثر در یک فرآیند یا محصول و سپس بررسی تغییرات حاصله در خروجی، اطلاعات و درک وسیعی از فرآیند و محصول راجع به چگونگی اثر این عوامل بر پاسخ بدست می آید.

۳-۲-۲- عامل^۵

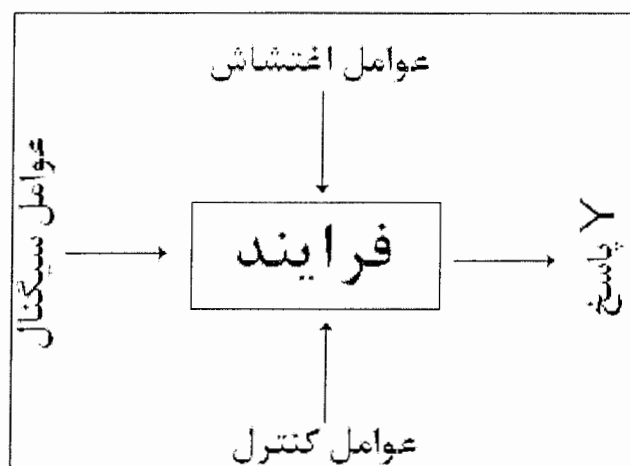
متغیر قابل کنترلی (مستقلی) است که ممکن است باعث ایجاد تغییر در پاسخ (متغیر وابسته) گردد. عوامل را می توان به دو دسته زیر تقسیم بندی نمود:

- عوامل کمی^۶ (پیوسته): عواملی که دارای مقدار هستند (مانند زمان، دما، فشار، pH و ...)
 - عامل کیفی^۷ (ناپیوسته): این عوامل فاقد مقدار هستند بلکه نوع دارند (نوع روش، نوع یک افزودنی، کنترل و یا عدم کنترل یک عامل).
- از نقطه نظر عملیاتی، سه نوع عامل وجود دارند:
- عوامل سیگنال: عواملی هستند که توسط مصرف کننده یا کاربر به منظور دستیابی به مقدار مورد نظر در پاسخ فرآیند تنظیم می شوند.
 - عوامل اغتشاش^۸: برخی پارامترها قابل کنترل توسط طرح نیستند و از این رو عوامل اغتشاش نامیده می شوند. همچنین عواملی که تنظیم و کنترل آنها بسیار دشوار و پرهزینه است نیز به عنوان عوامل اغتشاش در نظر گرفته می شوند.
 - عوامل کنترل: مجموعه عواملی هستند که توسط طراح انتخاب می شوند و در طول آزمایشها ثابت نگه داشته می شوند (Montgomery, Douglas 1997).

^۵ Factor^۶ Numeric Factor^۷ Catagorical Factor^۸ Noise

شکل (۱-۳) نمای شماتیک و کلی از فرایند و عوامل موثر بر آن و همچنین پاسخ فرآیند را

نشان می دهد



شکل (۱-۳) نمای شماتیک از فرایند و عوامل موثر بر آن

۳-۲-۳- سطح:

در طراحی آماری آزمایشها، به منظور بررسی اثر عامل روی پاسخ فرآیند، مجموعه آزمایشهای طراحی می شوند که در آنها هر عامل در دو یا چند مقدار یا نوع خود قرار داده می شود. هر یک از این مقادیر یا انواع، یک سطح برای آن عامل نامیده می شود.

۳-۲-۳- پاسخ:

پاسخ یا متغیر وابسته، خروجی یک محصول یا فرایند است که قابل اندازه گیری است و می تواند در قالب یک یا ترکیبی از چند شاخص فنی و یا اقتصادی، انتخاب شود (Montgomery, Douglas 1997).

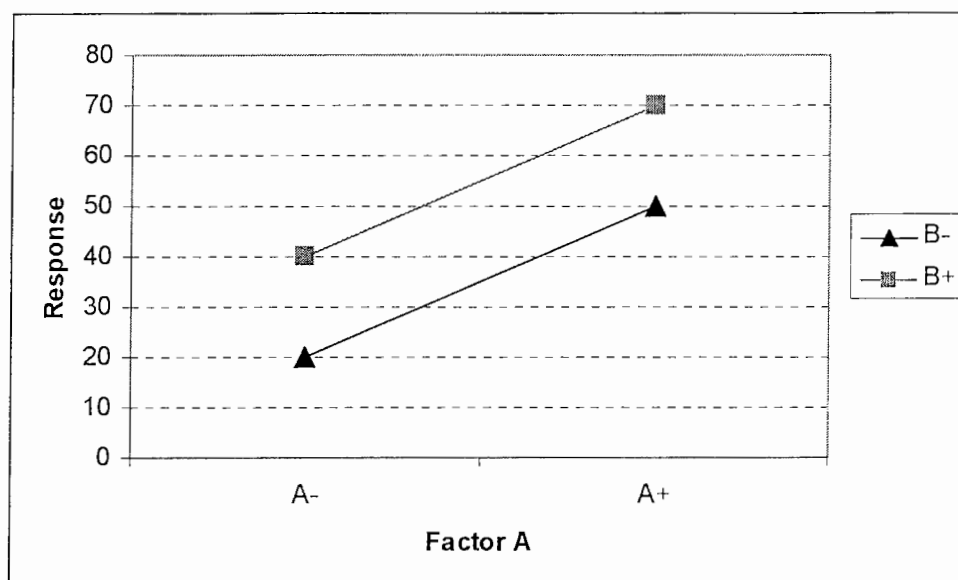
۳-۳- اثرات متقابل بین عوامل

اثر متقابل، اثر همزمان دو یا چند عامل بر روی پاسخ فرآیند می باشد. اگر در سطوح مختلف یک عامل، عامل دیگر اثرات متفاوتی را نشان دهد، در این صورت بین آن دو عامل اثر متقابل وجود دارد. در جدول (۱-۳) اثر دو عامل A و B را در دو سطح - و + نشان می دهد.

جدول (۱-۳) نتایج یک بررسی به منظور تعیین اثر متقابل (Garcia-Diaz A. & Phillips D.T 1995)

Factor	B ₋	B ₊
A ₋	20	40
A ₊	50	70

همانگونه که ملاحظه می شود، در سطح - از عامل B، افزایش سطح عامل A از - به +، منجر به ۲۰ واحد افزایش در پاسخ گردیده است. در سطح + از عامل B نیز افزایش سطح عامل A منجر به همین میزان افزایش در پاسخ گردیده است. بنابراین چون رفتار عامل A در هر دو سطح عامل B یکسان بوده است، لذا نتیجه گرفته می شود که این دو عامل با یکدیگر اثر متقابل ندارند. شکل (۲-۳) نمودار این بررسی را ارائه می نماید.



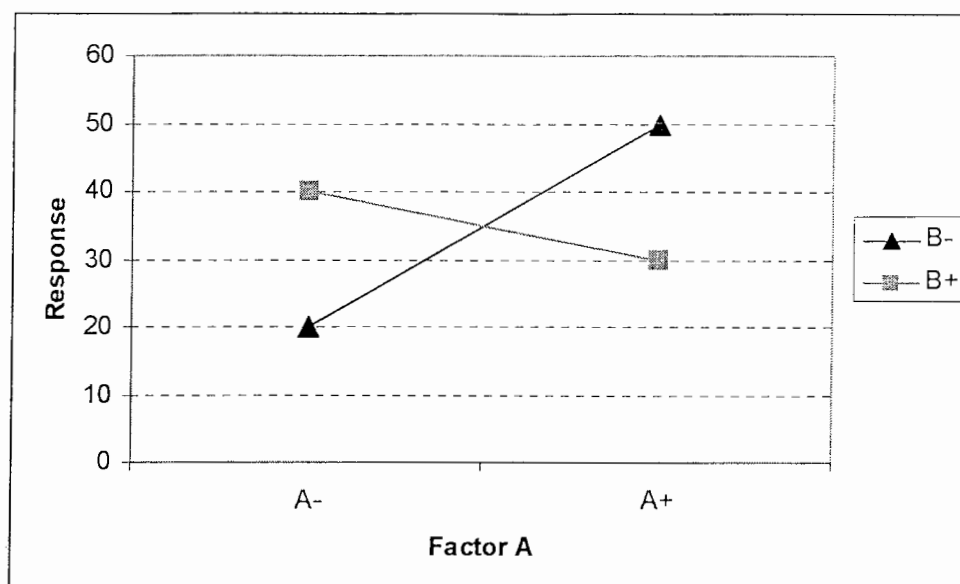
شکل (۲-۳) نمودار بررسی انجام شده، در جدول (۱-۳) (Garcia-Diaz A. & Phillips D.T 1995)

اکنون مثال ارائه شده در جدول (۲-۳) را در نظر بگیریم.

جدول (۲-۳) نتایج یک بررسی به منظور تعیین اثر متقابل (Garcia-Diaz A. & Phillips D.T 1995)

Factor	B ₋	B ₊
A ₋	20	40
A ₊	50	30

در اینجا ملاحظه می گردد که، در سطح - از عامل B، افزایش سطح عامل A از - به +، منجر به ۲۰ واحد افزایش در پاسخ گردیده است. در حالیکه در سطح + از عامل B، افزایش سطح عامل A از - به +، منجر به کاهش ۲۰ واحد در پاسخ شده است. نظیر همین تاثیر برای عامل B، روی اثر تغییر سطح عامل A ملاحظه می شود. از این رو اصطلاحاً گفته می شود، دو عامل A و B با یکدیگر اثر متقابل دارند. شکل (۳-۳) نمودار این بررسی را نشان می دهد (Garcia-Diaz A. & Phillips D.T 1995).



شکل (۳-۳) نمودار بررسی انجام شده، در جدول (۲-۳) (Garcia-Diaz A. & Phillips D.T 1995)

۳-۴- بلوک بندی و تصادفی کردن آزمایشها

گاهی بعضی متغیرهای بی اهمیت روی جواب آزمایشها تاثیر می گذارند، در حالیکه تحت بررسی مستقیم در فرآیند نیستند. بنابراین ممکن است اثرات این متغیرهای بی اهمیت، روی جواب کل، تاثیر فرعی داشته باشند و متغیرهای اصلی را محو یا بسیار نمایان سازند. از جمله این تغییرات می توان به تغییرات ناشی از اختلاف مواد خام، تفاوت آزمایشگر، اختلاف تجهیزات یا محیط اشاره کرد. در صورت وجود چنین مواردی، آزمایشهای طرح باید بلوک بندی شوند تا حساسیت آزمایشها نسبت به آن تغییرات کم شود. به عبارت دیگر با اعمال بلوک بندی در آزمایشها می توان تاثیر خطاهای شناخته شده را در پاسخ آزمایشها کاهش داد.

برای کاستن تاثیر خطاهایی که ذاتاً ناشناخته هستند و همچنین خطاهایی که ناشی از وفق یافتگی فرآیند به شرایط عملیاتی بوجود می آید، از تصادفی کردن ترتیب انجام آزمایشها استفاده می شود. در حالت استاندارد طراحی، ترتیب قرار گرفتن آزمایشها از سطوح پایین عوامل شروع می شود. یعنی در حالت استاندارد همیشه در اولین آزمایش تمام عوامل در پایین ترین سطح خود قرار دارند و به ترتیب سطوح آنها تغییر می کند. حال اگر آزمایشها طبق ترتیب استاندارد انجام شود ممکن است که در فرآیند حالت وفق یافتگی، برای سطوح پایین یک سری از عوامل ایجاد شود که به تبع آن پاسخ

آزمایشها تحت تاثیر آن وفق یافتگی قرار گرفته و خطا در انجام آزمایشها بوجود آید (Montgomery, Douglas 1997).

۳-۴- طراحی آزمایشها به روش فاکتوریل کامل^۹

در این روش تمام ترکیبات ممکن از عوامل، به مورد آزمایش گذاشته می شوند. به عنوان مثال در جدول (۳-۳)، طرح فاکتوریل کامل با سه عامل A، B و C نشان داده شده که این عوامل در دو سطح - و + تغییر داده شده اند و آزمایشها زیر را شامل می شوند (بصیری ع. ۱۳۵۷).

جدول (۳-۳) طرح فاکتوریل کامل دو سطحی (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

Standard Order	Run Order	A	B	C
1	8	-	-	-
2	1	+	-	-
3	2	-	+	-
4	4	+	+	-
5	3	-	-	+
6	5	+	-	+
7	7	-	+	+
8	6	+	+	+

تعداد آزمایشهای لازم در این روش از معادله (۱-۳) بدست می آید :

$$N = L^F$$

معادله (۱-۳) (بصیری ع. ۱۳۵۷)

که در این رابطه :

N : تعداد آزمایشهای لازم

L : تعداد سطوح

F : تعداد عوامل

می باشد. و چنانچه تعداد سطوح همه عوامل مورد بررسی، برابر نباشد از معادله (۲-۳) می توان برای محاسبه تعداد آزمایشها استفاده نمود.

^۹ Full Factorial

$$N = L_1^{F_1} * L_2^{F_2} * \dots$$

معادله (۳-۲) (بصیری ع. ۱۳۵۷)

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. عمده ترین 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 (بصیری ع. ۱۳۵۷).

۳-۵- محاسبه و بررسی اثرات عوامل

اثر اصلی^{۱۰} یک عامل مطابق با تعریف عبارتست از، متوسط تغییر ایجاد شده در پاسخ به علت تغییر در سطح آن عامل.

$$Effect = \frac{\sum Y_+}{n_+} - \frac{\sum Y_-}{n_-}$$

معادله (۳-۳) (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

در معادله (۳-۳)، $\sum Y_+$ 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.

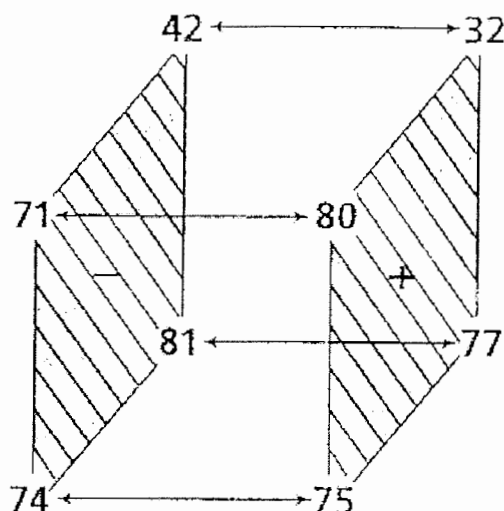
در جدول (۴-۳) آزمایشهای، پاسخهای بدست آمده و اثرات عوامل A، B و C را برای یک طرح فاکتوریل کامل نشان می‌دهد (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

جدول (۴-۳) پاسخها و اثرات عوامل در طرح فاکتوریل کامل (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

Standard Order	Run Order	A	B	C	Y ₁	Y ₂
1	8	-	-	-	74	3.1
2	1	+	-	-	75	3.5
3	2	-	+	-	71	1.6
4	4	+	+	-	80	1.2
5	3	-	-	+	81	0.7
6	5	+	-	+	77	0.7
7	7	-	+	+	42	0.5
8	6	+	+	+	32	0.3
Effect Y ₁		-1	-20.5	-17	66.5	
Effect Y ₂		-0.05	-1.1	-1.8		1.45

¹⁰ Main Effect

حال اگر توجه خود را بر روی سری اول پاسخها Y_1 ، متمرکز کنیم خواهیم دید که می توانیم نتایج را برای این سه عامل بصورت مکعب مربعی نشان دهیم. در شکل (۳-۴) نتایج به صورت مکعب مربع نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) نمای مکعب مربعی پاسخها برای بررسی اثر اصلی عامل A (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

همانطور که در شکل (۳-۴) نشان داده شده است طرف راست مکعب مربع، شامل تمام پاسخهای آزمایشهایی است که در آن عامل A در سطح مثبت (بالای)، خود قرار داشته است و سمت چپ مکعب مربع نیز آزمایشهایی را شامل می شود که در آن عامل A در سطح منفی (پایین) خود قرار داشته است. بنابراین متوسط اختلاف پاسخها در سطوح بالا و پایین عامل A، میزان تاثیر عامل A را در سیستم نشان می دهد.

در محاسبه اثرات متقابل بین عوامل، علامتهای سطوح منفی و مثبت عوامل اصلی تشکیل دهنده آنها را با همدیگر ضرب می کنیم تا علامتهای سطوح مربوط به آن اثر متقابل بدست آید. سپس همانند روش تعیین اثرات اصلی از معادله (۳-۳) استفاده می کنیم. مثلاً برای اثر متقابل AB در آزمایش اول، دو عامل 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 (۳-۵) اثرات اصلی و متقابل، برای هر سه عامل A، B و C برای سری اول پاسخ (Y_1) محاسبه شده است.

جدول (۵-۳) اثرات اصلی و متقابل، سه عامل A، B و C (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

Standard Order	Main Effects			Interaction Effects				Response Y1
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	
1	-	-	-	+	+	+	-	74
2	+	-	-	-	-	+	+	75
3	-	+	-	-	+	-	+	71
4	+	+	-	+	-	-	-	80
5	-	-	+	+	-	-	+	81
6	+	-	+	-	+	-	-	77
7	-	+	+	-	-	+	-	42
8	+	+	+	+	+	+	+	32
Effect	-1	-20.5	-17	0.5	-6	-21.5	-3.5	66.5

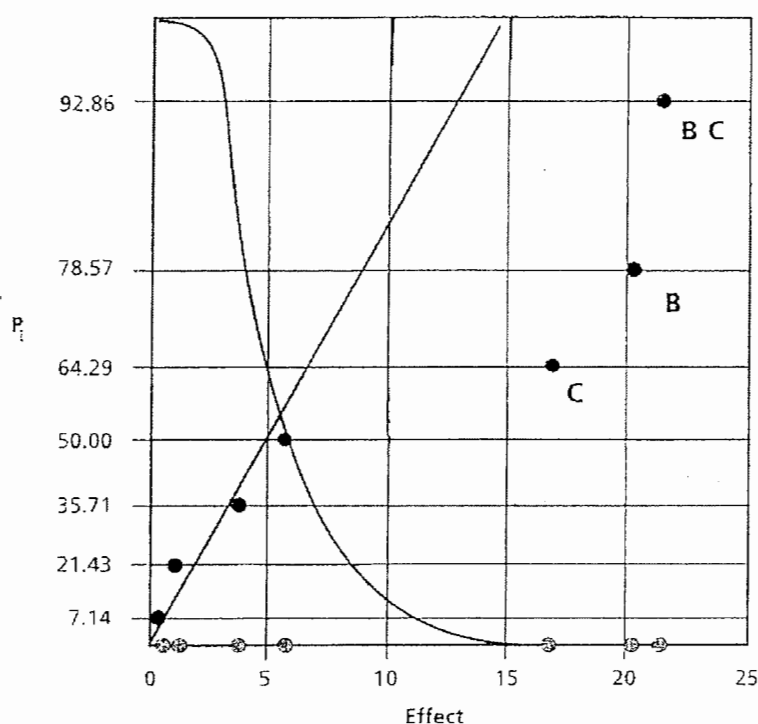
همانطور که در جدول (۵-۳) دیده می شود نکته قابل توجه این است که برای این فرایند اثر متقابل BC به تنهایی بزرگتر از اثرات اصلی تشکیل دهنده آن یعنی B و C می باشد. به عبارت دیگر ترکیب دو عامل B و C تاثیر بیشتری در فرآیند داشته است. حال سوالی که در ذهن بوجود می آید این است که آیا تغییر در اثر عوامل از نظر آماری معنی دار بوده است و یا این تغییرات صرفاً به علت تاثیر اغتشاشات در انجام آزمایشها بوجود آمده است؟ (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

برای پاسخ به این سوال به روش گرافیکی، می بایست اثرات را در نمودار نرمال رسم کرد. که برای این کار قدرمطلق اثرات را در کاغذ احتمال نیمه لگاریتمی رسم می کنیم. جدول (۶-۳) مقادیر مربوط به رسم اثرات عوامل در کاغذ احتمال را نشان می دهد.

جدول (۶-۳) مقادیر مربوط به رسم اثرات عوامل (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

Point	Effect	Absolute Value of Effect	Cumulative Probability
1	AB	0.5	7.14%
2	A	-1	21.43%
3	ABC	-3.5	35.71%
4	AC	-6	50.00%
5	C	-17	64.29%
6	B	-20.5	78.57%
7	BC	-21.5	92.86%

همانطور که در جدول (۳-۶) دیده می شود اثرات عوامل به صورت صعودی مرتب شده اند و میزان احتمال تجمعی نیز بر اساس تعداد اثرات محاسبه شده است، به طوریکه برای هر بخش ۱۴/۲۸٪ ($\frac{100}{7}$) احتمال را شامل می شود که اگر بخواهیم نقاط را در وسط هر بخش قرار دهیم، نقطه اول که دارای کمترین اثر است احتمال ۷/۱۴٪ را شامل می شود. در شکل (۳-۵) اثرات عوامل در کاغذ احتمال رسم شده اس (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).



شکل (۳-۵) نمودار اثرات عوامل (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

همانطور که در شکل (۳-۵) دیده می شود سه اثر، کاملاً از حالت نرمال جدا شده اند. بنابراین به نظر می رسد که از نظر آماری تاثیر این سه عامل (B، C و BC) دارای اهمیت و معنی دار باشند. چهار اثر دیگر که توزیع تغییرات آنها به صورت نرمال بوده است، و اثرات نزدیک به صفر داشته اند از نظر آماری تاثیر معنی دار و با اهمیتی در فرآیند نداشته اند که بعداً از آنها برای تخمین خطا استفاده می شود (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

است. در محاسبه مجموع مربعات مدل، مجموع مربعات اثرات تشکیل دهنده آن را با هم جمع می زنیم که در زیر نشان داده شده است (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

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

بقیه عوامل و اثرات متقابل آنها، که دارای تاثیر کمتری بودند نیز به عنوان تخمین خطا که

مانده^{۱۳} نامیده می شوند استفاده می شوند که در زیر مجموع مربعات مانده ها محاسبه شده است.

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

در جدول (۷-۳) آنالیز واریانس، برای مثالی که بحث شد نشان داده شده است.

جدول (۷-۳) آنالیز واریانس (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

Source	Sum of Squares(SS)	Df	Mean Squares(MS)	F Value	Prob>F
Model	2343	3	781	31.5	<0.01
B	840.5	1	840.5	34	<0.01
C	578	1	578	23.3	<0.01
BC	924.5	1	924.5	37.3	<0.01
Residual	99	4	24.8		
Cor Total	2442	7			

در جدول (۷-۳)، مقادیر مجموع مربعات برای مدل، عوامل و مانده ها در ستون دوم نشان داده شده است. در ستون بعدی که با Df مشخص شده، درجه آزادی^{۱۴} مربوط به آن مقادیر نشان داده شده است. درجه آزادی برای مدل و مانده ها برابر تعداد عواملی است که در محاسبه آنها شرکت داده شده اند. برای مثال برای محاسبه مجموع مربعات مدل، از سه عامل B، C و BC استفاده شد که درجه آزادی مربوط به آن عدد ۳ بدست می آید. در محاسبه درجه آزادی برای عوامل و اثرات متقابل، اگر از تعداد سطوح تغییرات آنها یکی کم کنیم درجه آزادی مربوط به آن حاصل می شود که برای این طرح چون عوامل در دو سطح بالا و پایین تغییر داده شدند، درجه آزادی مربوط به آنها ۱ بدست آمده است.

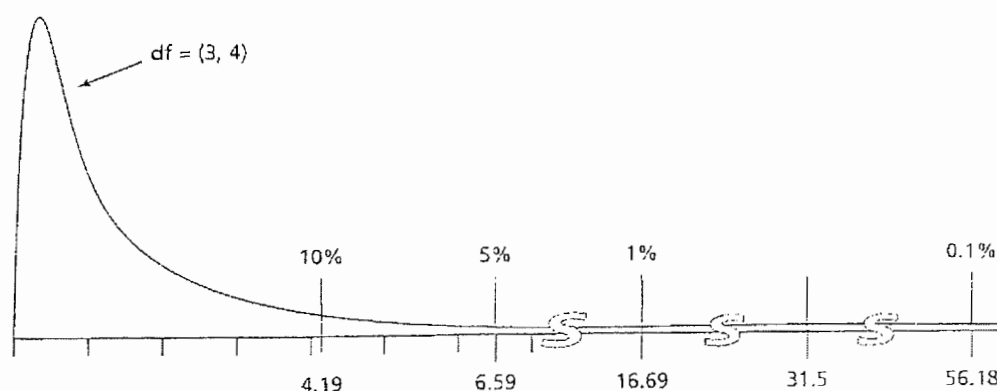
در ستون بعدی میانگین مجموع مربعات محاسبه شده، که از تقسیم مجموع مربعات بر درجه آزادی آنها بدست می آید. از تقسیم میانگین مجموع مربعات بر میانگین مجموع مربعات مانده ها، عدد

¹³ Residual

¹⁴ Degree of Freedom

F بدست می آید. به عنوان مثال برای محاسبه عدد F برای مدل، از تقسیم $MS_{Model} / MS_{Residual}$ ($\frac{781}{24.8}$) عدد 31.5 حاصل می شود.

مقادیر F محاسبه شده می بایست 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 می باشد. شکل (۳-۶) توزیع F را برای درجه آزادی (3,4) نشان می دهد. (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)



شکل (۳-۶) توزیع F را برای درجه آزادی (3,4) (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

همانطور که در شکل (۳-۶) نشان داده شده، مقادیر بحرانی در توزیع F مشخص شده است. عدد F مدلی، یعنی 31.5 در بین دو احتمال کمتر از ۱٪ و بیشتر از 0.1٪ قرار گرفته که ستون $Prob > F$ نیز این مفهوم را می رساند. در واقع این ستون نتیجه مقایسه عدد F محاسبه شده را با توزیع F، نشان می دهد. و این مطلب را بیان می کند که به احتمال کمتر از ۱٪، مقدار عدد F بزرگتری به دلیل تاثیر اغتشاشات بوجود خواهد آمد. به عبارت دیگر در سطح احتمال بیش از ۹۹٪ مدل از لحاظ آماری معنی دار خواهد بود (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

۷-۳- مدل سازی اثرات معنی دار

مدل، در واقع یک معادله ریاضی است که برای پیش بینی پاسخ بکار می رود. ساده ترین مدل، مدل خطی^{۱۵} است نمای کلی این نوع مدل برای یک طرح یک عاملی در معادله (۵-۳) نشان داده شده است.

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 \quad \text{معادله (۵-۳) (Anderson M.J. \& Whitcomb P.J., 2000)}$$

در معادله (۵-۳)، $\hat{Y}$ پاسخ پیش بینی شده، β_0 عرض از مبدا و β_1 ضریب مدل عامل X_1 می باشد. هرگاه تعداد عوامل اضافه شوند، تعداد عباراتی که در تشکیل مدل شرکت می کنند افزایش می یابد. به عنوان مثال معادله (۶-۳)، مدل کلی را برای حالتی که دو عامل و اثر متقابل آن در مدل شرکت دارند را نشان می دهد. (Anderson M.J. \& Whitcomb P.J., 2000)

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad \text{معادله (۶-۳) (Anderson M.J. \& Whitcomb P.J., 2000)}$$

حال اگر بخواهیم مدل را برای مثالی که در مبحث قبل و در جدول (۵-۳) بررسی شد (طرح سه عاملی و دو سطحی فاکتوریل کامل) تشکیل دهیم، معادله (۷-۳) بدست می آید.

$$\hat{Y} = 66.5 - 10.25B - 8.50C - 10.75BC \quad \text{معادله (۷-۳) (Anderson M.J. \& Whitcomb P.J., 2000)}$$

در معادله (۷-۳)، مدل بر اساس سطوح عوامل کد شده (در این آزمایش دو سطحی به صورت +۱ و -۱) بسط داده شده است. که مقدار عرض از مبدا (β_0) 66.5، نمایانگر متوسط پاسخهای واقعی بدست آمده می باشد. ضرایب عوامل نیز در این حالت، بر اساس شدت اثرات عوامل بر آزمایشها قابل مقایسه است. به عبارت دیگر عامل B که در مدل دارای ضریب -10.5 می باشد، نسبت به عامل C که دارای ضریب -8.50 است، اثر بیشتری را در آزمایشها دارد. در جدول (۸-۳) مقادیر واقعی، و پیش بینی شده پاسخها توسط مدل، و همچنین اختلاف آنها که به صورت مانده تعریف می شود، آورده شده است.

¹⁵ Linear Model

جدول (۸-۳) مقادیر واقعی و پیش بینی شده پاسخها توسط مدل، و اختلاف آنها (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

Standard	B	C	BC	Y_1	$\hat{Y}$	Residual
1	-1	-1	+1	74	74.5	-0.5
2	-1	-1	+1	75	74.5	0.5
3	+1	-1	-1	71	75.5	-4.5
4	+1	-1	-1	80	75.5	4.5
5	-1	+1	-1	81	79	2
6	-1	+1	-1	77	79	-2
7	+1	+1	+1	42	37	5
8	+1	+1	+1	32	37	-5

برای آزمایش اول از جدول (۸-۳)، پاسخ پیش بینی شده بر اساس معادله (۷-۳) محاسبه می شود که به صورت زیر می باشد.

$$\hat{Y} = 66.5 - 10.25(-1) - 8.50(-1) - 10.75(+1) = 74.5$$

در واقع چون معادله (۷-۳) بر اساس سطوح عوامل کد شده (-1, +1) بسط داده شده بود، برای پیش بینی پاسخ نیز از مقادیر کد شده سطوح عوامل استفاده شده است.

البته می توان با استفاده از روشهای رگرسیون آماری، معادله (۷-۳) را به معادله (۸-۳) تبدیل کرد که در آن برای پیش بینی پاسخ مورد نظر، می توان مقادیر واقعی عوامل را در معادله جایگذاری کرد.

$$\hat{Y} = -199 + 65B + 3.62C - 0.86BC \quad (\text{Anderson M.J. \& Whitcomb P.J., 2000}) \quad (\text{معادله (۸-۳)})$$

در معادله (۸-۳) مقادیر عرض از مبدا و ضرایب عوامل را نمی توان تفسیر کرد. و بزرگ بودن ضریب یک عامل به معنای بیشتر بودن تاثیر آن عامل، در آزمایشها نمی باشد. چون در معادله (۸-۳) واحد عوامل با یکدیگر متفاوت شده است. مثلاً واحد زمان و دما در حالت واقعی (کد نشده) با هم برابر و قابل قیاس نمی باشند.

در روشهای طراحی آماری آزمایشها به غیر از مدل خطی، که مدلی با درجه اول می باشد، مدل‌هایی با درجات بالاتر نیز وجود دارند. مانند Quadratic و یا Cubic که به ترتیب مدل‌هایی با درجات دوم و سوم می باشند. که بنا به تناسب، می بایست بهترین مدل، برای برآزش بر آزمایشها و پیش بینی آنها انتخاب شود (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

۳-۸- طراحی آزمایشها به روش فاکتوریل ناقص^{۱۶}

همانطور که بحث شد در طراحی فاکتوریل کامل، با افزایش تعداد عوامل، تعداد آزمایشها نیز افزایش می یافت. به همین دلیل انجام این طرح در بعضی موقعیتهای خاص نامطلوب می شد. برای مثال در طرح فاکتوریل کامل با ۸ عامل که هر عامل در دو سطح تغییر داده شده اند، 2^8 آزمایش وجود خواهد داشت که اگر چهار مرتبه تکرار نیز داشته باشیم بیش از ۱۰۰۰ آزمایش باید انجام شود که در آن صورت زمان، سرمایه و دیگر منابع تلف خواهد شد.

در بیشتر موارد آزمایشگر احتیاجی به داشتن اطلاعات حاصل از طرح کامل را ندارد. به عنوان مثال اغلب احتیاجی به داشتن اطلاعات از اثرات متقابل مرتبه بالاتر از دو عامل نیست. به همین دلیل می توان تعداد آزمایشها را کاهش داد، در حالیکه اطلاعات لازم را بدست آورد. این عمل با نام طرح فاکتوریل ناقص شناخته می شود (سرمد ز. و اسفندیاری م. ۱۳۶۹).

اگر آزمایش فاکتوریل کامل که دارای F عامل $(X_1, X_2, \dots, X_F)$ و هر عامل دارای دو سطح باشد را در نظر بگیریم، با استفاده از طرح فاکتوریل کامل برای این تعداد عاملها 2^F آزمایش لازم است و این طرح نه تنها اثرات اصلی و تقابلهای دو عاملی بلکه تقابلهای سه عاملی و مرتبه بالاتر را نیز تخمین می زند که البته این تقابلهای مرتبه بالا ممکن است مفید (با معنی) نباشند و یا به آسانی تفهیم نشوند. به عنوان مثال طرح فاکتوریل کامل که دارای ۷ عامل باشد و هر عامل در دو سطح تغییر داده شود، را در نظر بگیریم، ۷ اثر اصلی، ۲۱ اثر متقابل دو عاملی و ۹۹ اثر متقابل مرتبه بالا تخمین زده می شوند که از بین همه اینها فقط ۲۸ $(7+21)$ تخمین (اثرات اصلی و متقابل دو عاملی) از آنها مطلوب می باشد. بنابراین انجام کل ۱۲۸ آزمایش مدلل نمی باشد و می توان با ۳۲ آزمایش ۲۸ تخمین مطلوب را محاسبه نمود.

با 2^m آزمایش از 2^F $(m < F)$ می توان اثرات اصلی و مرتبه پایین را محاسبه کرد. در طرح 2^m می توان تعداد تخمین را برای $2^m - 1$ اثر محاسبه نمود که در آنها F تعداد اثر اصلی و $2^m - F - 1$ تعداد اثر متقابل می باشد (سرمد ز. و اسفندیاری م. ۱۳۶۹).

^{۱۶} Fractional Factorial

۳-۹- اتحاد^{۱۷} و اختلاط^{۱۸} در اثرات عوامل

به نظر می رسد که بکار بردن روش فاکتوریل ناقص بجای انجام تمامی آزمایشها مفید باشد. ولی باید در نظر داشت که به ازای صرفه جویی در وقت و هزینه، ممکن است برخی چیزهای دیگر را از دست دهیم. که در مورد روش فاکتوریل ناقص، کم شدن تعداد آزمایشها به قیمت ایجاد اختلاط و اتحاد در اثرات عوامل و تقابلهای بین آنها تمام می شود. و همانگونه که انتظار می رود با بیشتر کم کردن تعداد آزمایشها، مشکل اختلاط عوامل نیز بیشتر خواهد شد.

به عنوان مثال همان طرحی که در مبحث قبل و در جدول (۳-۵) بررسی شد (طرح سه عاملی و دو سطحی فاکتوریل کامل) را در نظر بگیریم. تعداد آزمایشها لازم برای انجام آن طرح 2^3 یعنی ۸ آزمایش بود. حال اگر بخواهیم آزمایشها را توسط طرح فاکتوریل ناقص انجام دهیم، تعداد آزمایشها به 2^2 یعنی ۴ آزمایش کاهش پیدا خواهد کرد. و درواقع ۴ آزمایش از ۸ آزمایش حذف خواهد شد. که در جدول (۳-۹) این موضوع با سایه زدن برخی آزمایشها به عنوان آزمایشهایی که در شرایط طرح فاکتوریل ناقص حذف شده اند نشان داده شده اس (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

جدول (۳-۹) اثرات اصلی و متقابل عوامل برای طرحهای فاکتوریل کامل و ناقص (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

Standard Order	Main Effects			Interaction Effects				Response
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Y_1
1	-	-	-	+	+	+	-	74
2	+	-	-	-	-	+	+	75
3	-	+	-	-	+	-	+	71
4	+	+	-	+	-	-	-	80
5	-	-	+	+	-	-	+	81
6	+	-	+	-	+	-	-	77
7	-	+	+	-	-	+	-	42
8	+	+	+	+	+	+	+	32
Effect	-1	-20.5	-17	0.5	-6	-21.5	-3.5	Full
Effect	-22.5	-26.5	-16.5	-16.5	-26.5	-22.5	64.75	Fraction

در جدول (۳-۹) اثرات اصلی و اثرات متقابل عوامل نشان داده شده است و به عنوان پیش فرض، سطوح منفی تقابل سه عاملی ABC حذف شده است (سایه زده شده). حال اگر دقیق تر به جدول نگاه

¹⁷ Allies¹⁸ Confound

کنیم متوجه خواهیم شد که اثرات عامل اصلی A با تقابل دو عاملی BC به صوت مشابه و متحد شده است و اگر ترتیب سطوح را در نظر بگیریم اثرات عوامل به صورت زیر می باشد.

$$[A] = BC (+, -, +)$$

$$[B] = AC (-, +, -)$$

$$[C] = AB (-, -, +)$$

این تساوی ها را در اصطلاح ابهام^{۱۹} و یا همان اتحاد بین اثرات عوامل گفته می شود. که به صورت عبارت $[A] = A + BC$ نیز نشان داده می شود. ابهام در اثرات عوامل هنگامی مشکل ساز می شود که مثلاً عامل A در طرح فوق به عنوان عامل موثر و معنی دار شناخته شود، در این صورت نمی توان به درستی فهمید که آیا معنی دار بودن اثر، مربوط به عامل A در آزمایشها بوده و یا مربوط به اثر متقابل بین عوامل B و C است؟ به همین منظور اطلاع داشتن از ساختار اختلاط و اتحاد اثرات عوامل در روش فاکتوریل ناقص برای تفسیر نهایی دارای اهمیت می باشد (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

همانطور که قبلاً نیز گفته شد چون از لحاظ آماری بررسی اثرات تقابلهای درجات بالاتر از دو عاملی دارای اهمیت نمی باشد. لذا ایجاد اختلاط این اثرات با اثرات عوامل دیگر، چندان صدمه ای به اصل آزمایشها و تفسیر آن وارد نمی سازد. بر این اساس می توان روش طراحی دیگری را با عنوان "طراحی فاکتوریل ناقص نامنظم"^{۲۰} معرفی کرد که در این روش حذف آزمایشها به صورت نامنظم انجام می شود و هدف این است که در حذف آزمایشها کمترین صدمه به اصل آزمایشها و تفسیر آن وارد شود. به طوریکه در طراحی فاکتوریل ناقص نامنظم، هیچکدام از اثرات عوامل اصلی و اثرات متقابل دو عاملی با یکدیگر و همدیگر ایجاد اختلاط ندارند. و تنها در بین اثرات متقابل سه عاملی و درجات بالاتر، با عوامل دیگر اختلاط صورت می پذیرد (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

۳-۱۰- طراحی آزمایشها به روش پاسخ سطح^{۲۱} برای بهینه سازی

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، یکی از اهداف روشهای طراحی آزمایشها، بهینه سازی فرآیند و رسیدن به شرایط مطلوب می باشد. که برای نیل به این هدف از روشهای پاسخ سطح (RSM)، در

¹⁹ Confounding

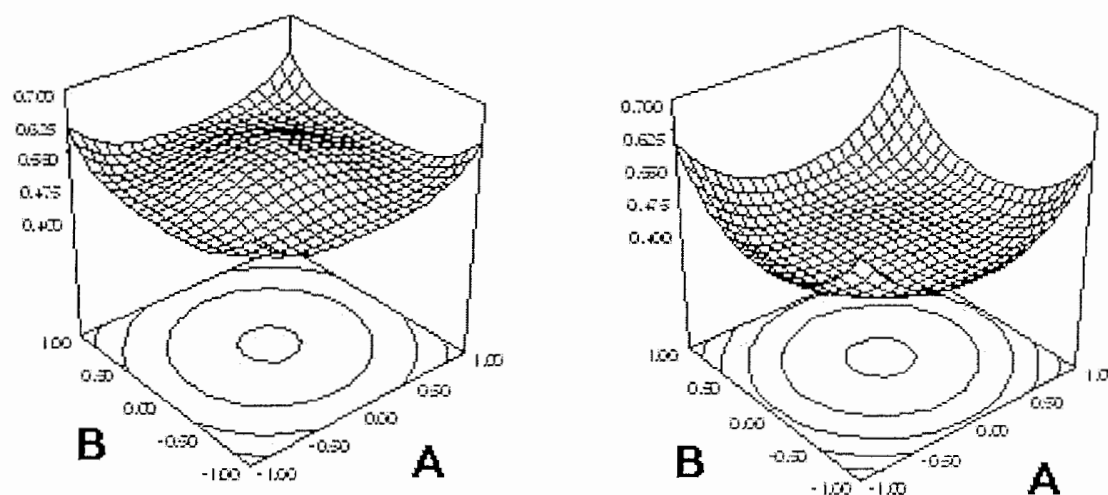
²⁰ Irregular Fractional Factorial

²¹ Response Surface Method

طراحی آماری آزمایشها استفاده می شود. البته قبل از طراحی آزمایشها به روش پاسخ سطح، بهتر است که یک سری از آزمایشها انجام شود که از جمله آنها:

- طراحی فاکتوریل دو سطحی ناقص (تعداد آزمایشهای کمتر) برای پیدا کردن عوامل موثر، نسبت به عوامل کم اهمیت تر در فرآیند.
- انجام آزمایشهای فاکتوریل کامل برای بررسی عمیق تر و تعریف ناحیه مورد علاقه برای مطالعات بیشتر

در روشهای پاسخ سطح نقشه های پاسخی بدست می آیند که به صورت خطوط همتراز (کنتور) یا نمای سه بعدی می باشند، همانند آنچه که زمین شناسان برای توپوگرافی بکار می برند. با این تفاوت که در روشهای پاسخ سطح، خطوط همتراز به جای ارتفاع، نشان دهنده پاسخ آزمایشها می باشند. شکل (۷-۳) نمونه ای از سطوح پاسخ را نشان می دهد.



شکل (۷-۳) نمای سه بعدی از روش پاسخ سطح (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

طراحی هایی که به روش فاکتوریل دو سطحی انجام می شوند، قادر به برازش سطح بر روی پاسخ، همانند شکل (۷-۳) نمی باشند. بلکه برای شناسایی وجود انحنا^{۲۲} و چگونگی آن، احتیاج به اضافه کردن برخی نقاط مرکزی^{۲۳} بر سطوح عوامل می باشد، که اساس طراحی های روشهای پاسخ سطح را تشکیل می دهند. البته بر اساس چگونگی افزودن این نقاط مرکزی بر سطوح عوامل، روشهای پاسخ

^{۲۲} Curvatur

^{۲۳} Center Point

سطح به زیر شاخه هایی تقسیم می شوند که در ادامه به بررسی دو نوع از آنها که دارای بیشترین کاربرد است می پردازیم (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

۳-۱۰-۱- روش Box-Behnken در طراحی پاسخ سطح

در این روش نقاط مرکزی در وسط سطوح عوامل افزوده می شوند. به عبارت دیگر در حالتی که سطوح عوامل به صورت کده شده باشند $(-1, +1)$ ، نقاط مرکزی کد صفر را خواهند داشت. در جدول (۳-۱۰) مثالی از طراحی به روش Box-Behnken نشان داده شده است.

جدول (۳-۱۰) طراحی به روش Box-Behnken برای دو فاکتور با نقاط مرکزی (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

Factor	Name	Units	Low Level (-)	Center (0)	High Level (+)
A	Width	Inches	1	2	3
B	Height	Inches	3	4	5

در جدول (۳-۱۰) آزمایشهای، مربوط به طراحی کاغذهای تبلیغاتی است که می بایست در فضا پخش شوند و هدف تعیین اندازه بهینه طول و عرض کاغذی است که به خوبی و به صورت تصادفی در فضا پخش شود. در جدول (۳-۱۱) نمای کلی از طراحی به همراه پاسخ آزمایشها نشان داده شده است.

جدول (۳-۱۱) نمای کلی از طراحی و پاسخ آزمایشها به روش Box-Behnken (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

Standard Order	A: Width (inches)	B: Length (inches)	Time (seconds)
1	1	3	2.5
2	3	3	1.9
3	1	5	2.8
4	3	5	2
5	2	4	2.8
6	2	4	2.7
7	2	4	2.6
8	2	4	2.7

همانطور که در جدول (۳-۱۱) نشان داده شده، آزمایشها مربوط به نقاط مرکزی ۴ بار تکرار شده اند. که این تکرارها باعث افزایش قدرت تحلیل شده، و می تواند به عنوان ابزار سنجش تغییرپذیری آزمایشها مورد استفاده قرار گیرند. پاسخ محاسبه شده، مربوط به اندازه گیری زمان قرار گرفتن کاغذها

در فضا، هنگامی که از ارتفاع ۵ فوتی رها می شوند، است. در جدول (۳-۱۲) آنالیز واریانس برای آزمایشهای مذکور نشان داده شده است. (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

جدول (۳-۱۲) آنالیز واریانس (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

Source	Sum of Squares(SS)	Df	Mean Squares(MS)	F Value	Prob>F
Model	0.49	1	0.49	35	0.002
A	0.49	1	0.49	35	0.002
Curvature	0.32	1	0.32	22.86	0.005
Residual	0.07	5	0.014		
Lack of Fit	0.05	2	0.025	3.75	0.1527
Pure Error	0.02	3	0.0067		
Cor Total	0.88	7			

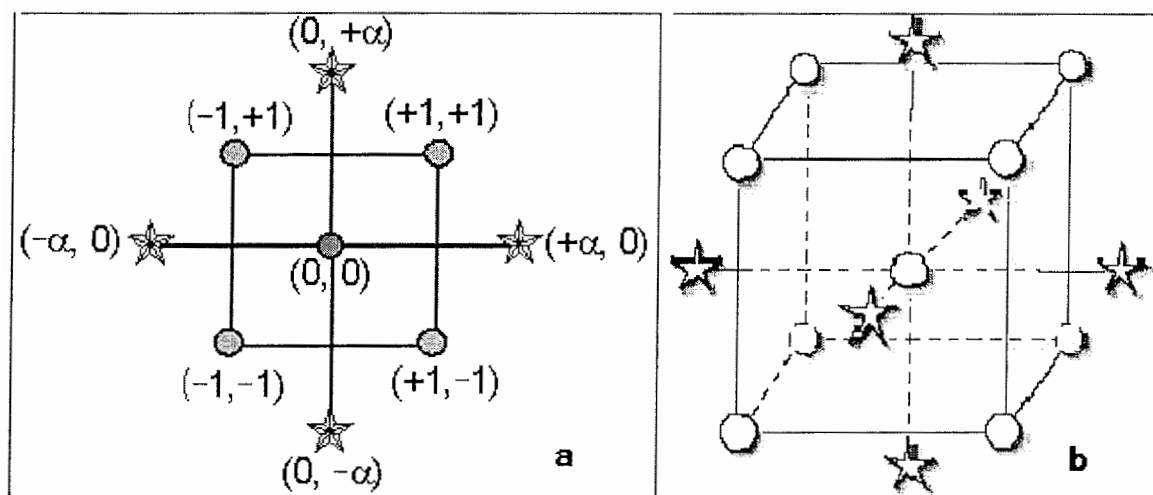
در طراحی آزمایشها مربوط به کاغذها، عوامل اصلی و اثرات متقابل آنها را A، B و AB تشکیل می دهند و همانطور که در جدول آنالیز واریانس مشخص است، از میان عوامل و اثرات متقابل، عامل A دارای اثر معنی دار بوده است. و در تشکیل مدل نیز از آن استفاده شده است.

به دلیل اینکه آزمایشهای مربوط به نقاط مرکزی تکرار شده اند، عبارت جدیدی به نام خطای خالص (Pure Error) به جدول آنالیز واریانس اضافه شده است که میزان تغییرپذیری آزمایشهای تکرار شده را نشان می دهد. عبارت دیگری که به این جدول اضافه شده، نقصان در برازش (Lack of Fit) است که این عبارت، خطاهای پیش بینی پاسخ توسط مدل (مانده ها به غیر از آزمایشهای تکرار شده) را با خطای خالص مقایسه می کند و اگر برازش مدل بر پاسخ آزمایشها مناسب نباشد این عبارت از نظر آماری معنی دار و با اهمیت خواهد شد. بدین ترتیب در این مثال نیز خطاهای پیش بینی دو اثر B و AB، با خطای خالص مقایسه شده است که از نظر آماری دارای اهمیت نمی باشند، بنابراین برازش مدل مناسب بوده است.

با اهمیت بودن عبارت انحنا از نظر آماری مناسب نمی باشد، چون بدین مفهوم است که انحنایی به صورت بالا یا پایین در اطراف نقاط مرکزی وجود دارد و دارای اهمیت است. به همین منظور در بخش بعدی نوع دیگری از طراحی آزمایشها به روش پاسخ سطح، معرفی می شود که نقاط بیشتری در اطراف دارد. (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

۳-۱۰-۲- روش Central Composit در طراحی پاسخ سطح^{۲۴} (CCD)

طریقه حل مشکل هنگامی که وجود انحنا دارای اهمیت باشد، اضافه کردن نقاط بیشتر به سطوح عوامل می باشد. با قرار دادن نقاط جدید در طول محوری فضای بین سطوح عوامل، روش Central Composit حاصل می شود. شکل (۳-۸) طراحی دو عاملی و سه عاملی روش CCD را نشان می دهد (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).



شکل (۳-۸) روش طراحی CCD، برای (a) دو عامل (b) سه عامل (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

برای افزایش تاثیر نقاط محوری، (نقاطی که در شکل با ستاره مشخص شده اند) می بایست در فاصله خاصی از نقاط اصلی قرار گیرند. فاصله ایده آل را می توان توسط تحقیق بدست آورد، اما این فاصله بسیار نزدیک به جذر تعداد عوامل می باشد. به عنوان مثال برای آزمایش دو عاملی که در بحث قبل استفاده شد، محل اضافه شدن نقاط محوری 1.4 ($\sqrt{2}$) واحد از نقاط مرکزی فاصله دارد. در جدول (۳-۱۳) طراحی آزمایش به روش CCD نشان داده شده است و نوع نقاط نیز در آن مشخص شده است. افزایش تعداد نقاط باعث بیشتر شدن قدرت تخمین شده و خصوصیات انحنا را نیز بهتر مشخص می کند (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

²⁴ Central Composit Design

جدول (۳-۱۳) طراحی به روش Central Composit برای آزمایش دو عاملی (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

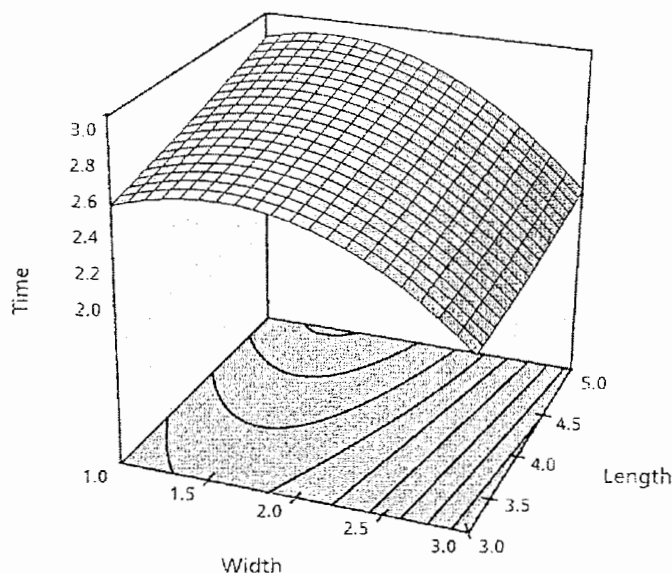
Standard Order	Block	Type	A: Width (inches)	B: Length (inches)	Time (seconds)
1	1	Factorial	1	3	2.5
2	1	Factorial	3	3	1.9
3	1	Factorial	1	5	2.8
4	1	Factorial	3	5	2
5	1	Center	2	4	2.8
6	1	Center	2	4	2.7
7	1	Center	2	4	2.6
8	1	Center	2	4	2.7
9	2	Axial	0	4	2.5
10	2	Axial	3	4	1.8
11	2	Axial	2	2	2.6
12	2	Axial	2	5	3
13	2	Center	2	4	2.5
14	2	Center	2	4	2.6
15	2	Center	2	4	2.6
16	2	Center	2	4	2.6

در روش CCD هر عامل در پنج سطح، محوری پایین، فاکتوریل پایین، مرکزی، فاکتوریل بالا و محوری بالا تغییر داده می شوند. ولی باید مد نظر داشت که روش CCD، با روش پنج سطحی، متفاوت است. چون در روش پنج سطحی برای دو عامل تعداد 5^2 یعنی ۲۵ آزمایش لازم است ولی روش CCD یک روش فاکتوریل دو سطحی است که به آن نقاط مرکزی و محوری اضافه شده است تا رفتار انحنا در مدل به خوبی مشخص شود. جدول (۳-۱۴) آنالیز واریانس را برای آزمایشهای کاغذ که توسط روش CCD طراحی شده بود را نشان می دهد (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

جدول (۳-۱۴) آنالیز واریانس (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

Source	Sum of Squares(SS)	Df	Mean Squares(MS)	F Value	Prob>F
Block	0.016	1	0.016		
Model	1.59	5	0.32	15.5	0.0003
A	0.71	1	0.71	34.72	0.0002
B	0.12	1	0.12	5.67	0.0412
A ²	0.75	1	0.75	36.49	0.0002
B ²	0.003	1	0.003	0.14	0.7201
AB	0.01	1	0.01	0.49	0.5032
Residual	0.19	9	0.021		
Lack of Fit	0.075	3	0.025	1.36	0.3402
Pure Error	0.11	6	0.018		
Cor Total	1.79	15			

همانطور در جدول (۳-۱۴) آنالیز واریانس نشان داده شده عبارات A ، A^2 و B دارای اهمیت می باشند و با اهمیت بودن A^2 وجود انحنای را در این بعد نشان می دهد. عبارات AB و B^2 از نظر آماری دارای اهمیت نمی باشند. و با اهمیت نبودن عبارت نقصان در برازش مدل (Lack of Fit) نیز حکایت از برازش خوب مدل بر آزمایشها است. شکل (۳-۹) نمای سه بعدی پاسخ سطح را برای آزمایشهای کاغذ که توسط روش CCD طراحی شده بود را نشان می دهد.



شکل (۳-۹) پاسخ سطح برای آزمایشهای کاغذ (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

همانطور که در شکل (۳-۹) نیز مشخص است بیشترین زمان ماندگاری کاغذها در فضا، زمانی رخ داده است که کاغذها دارای عرض 1.44 اینچ و طول ۵ اینچ باشند. زمان ماندگاری طولانی تر نیز ممکن است وجود داشته باشد اما برای تعیین آن احتیاج به انجام آزمایشهای بیشتر می باشد (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000).

فصل چهارم

کنترل و اعتبار بخشی

به نتایج در آزمایشها

۴-۱- مقدمه

برای رسیدن به اهداف مورد نظر و استفاده از ستون فلوتاسیون و همچنین اعمال مقادیر مختلف متغیرها به ستون، احتیاج به اندازه گیری و سنجش ابزار مرتبط با ستون فلوتاسیون می باشد. از آنجایی که ستون به کار گرفته شده در این تحقیق، برای اولین بار بود که مورد نصب و استفاده قرار می گرفت، لذا انجام آزمایشات برای حصول اطمینان از شرایط کاری ابزار مرتبط با آن، به منظور کنترل و اعتبارسنجی آنها ضروری به نظر رسید. که در ادامه به شرح برخی از آنها پرداخته شده است.

۴-۲- اندازه گیری میزان دبی آب شستشو

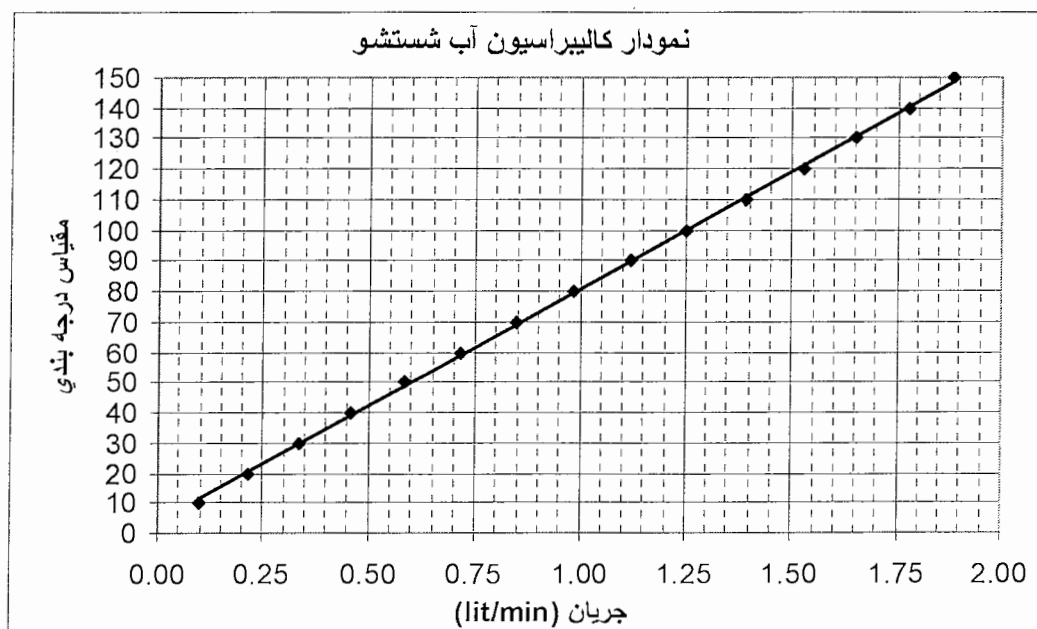
میزان دبی جریان آب شستشویی که در این ستون استفاده می شود توسط جریان سنجی که بر روی واحد کنترل دستگاه نصب شده است اندازه گیری می شود. که مقادیر مربوط به کالیبراسیون جریان سنج توسط کارخانه سازنده داده شده است. مقادیر داده شده مربوط به شرایط STP^1 می باشند که در واقع معرف شرایط موجود در بالاترین نقطه ستون می باشد. در جدول (۴-۱) این مقادیر نشان داده شده است.

¹ Standard Temperature and Pressure

جدول (۱-۴) داده های کالیبراسیون جریان سنج آب شستشو (MPE International INC, 2003)

scale reading	Flow(ml/min)	Flow(cm/s)
10	96	0.01973525
20	212	0.04358202
30	336	0.06907338
40	457	0.09394802
50	586	0.12046727
60	714	0.14678094
70	848	0.17432806
80	981	0.20166961
90	1117	0.22962788
100	1252	0.25738058
110	1392	0.28616116
120	1528	0.31411943
130	1652	0.3396108
140	1778	0.36551332
150	1881	0.3866876

شکل (۱-۴) نمودار کالیبراسیون آب شستشو را نشان می دهد.



شکل (۱-۴) نمودار کالیبراسیون آب شستشو (MPE International INC, 2003)

۳-۴- اندازه گیری میزان جریان گازدهی

همانند حالت مربوط به اندازه گیری جریان آب شستشو، برای اندازه گیری میزان جریان گازدهی نیز از جریان سنجی که بر روی واحد کنترل نصب شده است استفاده می شود. در این مورد نیز مقادیر داده های مربوط به کالیبراسیون، توسط کارخانه سازنده داده شده است. نکته قابل توجه این است که مقادیر داده ها در شرایط STP اندازه گیری شده اند و در صورت لزوم تصحیح فشار بر روی آنها برای فشار موجود در شرایط کاربری می بایست اعمال شود. که می توان برای تصحیح از معادله (۱-۴) استفاده کرد (MPE International INC, 2003).

$$F_{STP} = F_q \sqrt{\frac{101 + P_q}{101}} \quad \text{معادله (۱-۴) (MPE International INC, 2003)}$$

F_{STP} : جریان هوا در شرایط STP

F_q : جریان هوای اندازه گیری شده

P_q : فشار موجود در شرایط کاربری بر حسب Kpa

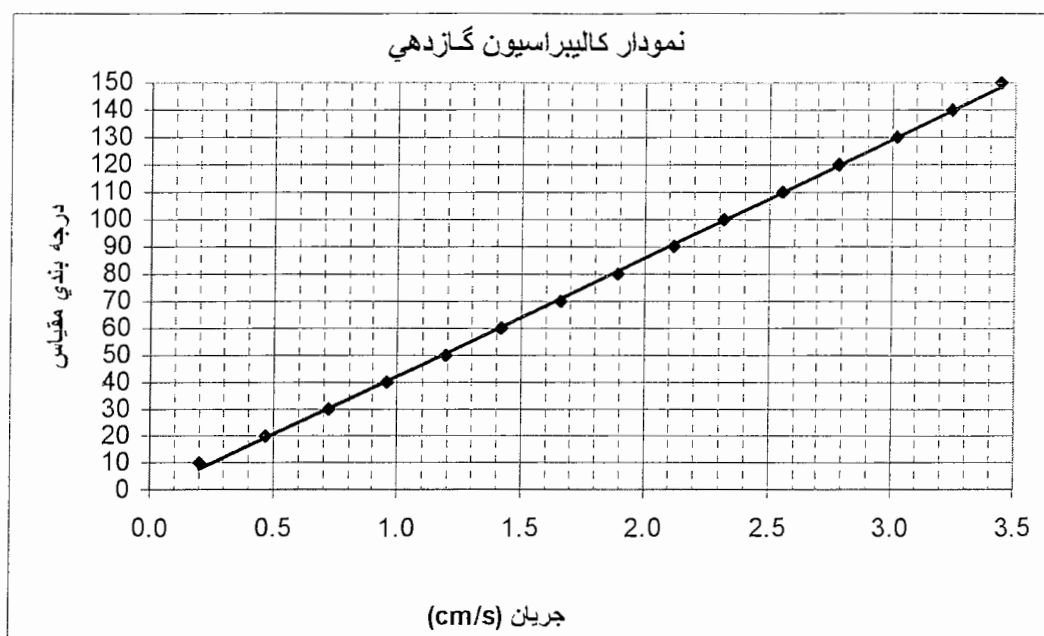
جدول (۲-۴) داده های مربوط به کالیبراسیون جریان سنج هوا، توسط کارخانه سازنده را نشان

می دهد.

جدول (۲-۴) داده های کالیبراسیون جریان سنج هوا (MPE International INC, 2003)

scale readings	Flow(ml/min)	Flow(cm/s)
10	996	0.20475324
20	2296	0.47200145
30	3502	0.71992556
40	4661	0.95818762
50	5804	1.19316047
60	6889	1.41620994
70	8057	1.65632217
80	9205	1.8923229
90	10290	2.11537237
100	11270	2.3168364
110	12436	2.55653749
120	13515	2.7783535
130	14658	3.01332635
140	15761	3.24007618
150	16737	3.44071791

شکل (۲-۴) نمودار کالیبراسیون جریان سنج هوا را نشان می دهد.



شکل (۲-۴) نمودار کالیبراسیون گازدهی (MPE International INC, 2003)

۴-۴- بررسی رفتار پمپ پرستالتیک با استفاده از روش طراحی فاکتوریل آزمایشات

در بسیاری از صنایع، از جمله کارخانه های فرآوری مواد معدنی، احتیاج به جریان ثابتی از سیال، صرفنظر از فشار پالپ ورودی به درون ستون ها می باشد. به طور نمونه در عملیات فلوتاسیون ستونی که ارتفاع ستون زیاد می باشد (۶ الی ۱۲ متر) در فرایند فرآوری بعضی از مواد معدنی، مجبور به خوراک دهی با دبی کم می باشیم. دبی کم پالپ حتی در زمانی که ورودی پالپ به ستون ثابت فرض شود، می بایست تا ارتفاع زیادی در ستون بالا رود. تنظیم این شرایط با استفاده از پمپهای معمولی بسیار دشوار و در بعضی مواقع غیر ممکن می باشد. در پمپهای معمولی با تغییر هد فشاری و یا مکشی، میزان دبی جریان نیز تغییر می کند. بدین منظور در مواردی که با تغییر هد فشاری (ارتفاع های مختلف سیال) دبی ثابت جریان مورد نیاز باشد، نمی توان با پمپهای معمولی به راحتی به این هدف رسید. نکته دیگری که در پمپهای معمولی وجود دارد این است که حتی در هد فشاری ثابت نیز با تغییر نوع سیال، دبی جریان متفاوت می شود. برای رفع این مشکل امروزه از پمپهای پرستالتیک^۲ به جای پمپهای معمولی استفاده می شود (Finch J.A & Dobby G.S, 1990).

^۲ Peristaltic Pump

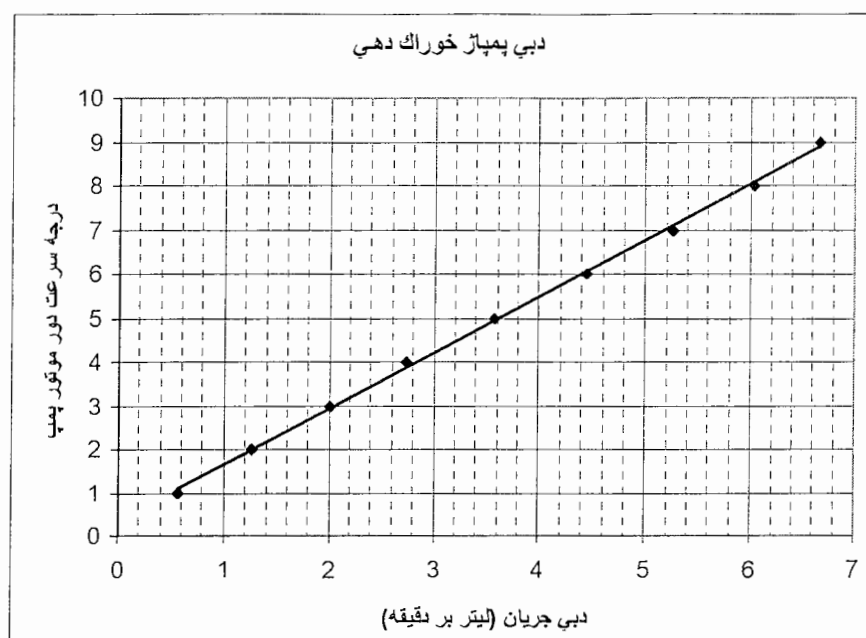
در این بخش نحوه رفتار یک پمپ پرستالتیک در هنگام اعمال تغییرات بر روی هد فشاری و همچنین تغییر در نوع سیال با استفاده از روش فاکتوریل کامل در طراحی آماری آزمایشات مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۴-۱- طراحی و روش انجام آزمایشات

آزمایشات توسط پمپ پرستالتیک با درایور (MASTERFLEX I/P) مدل (NEMA 7591-) 10 انجام شده است. شرایط کاری پمپ از دو قسمت قابل تنظیم است. در قسمت اول، که مشخص کننده میزان هد فشاری و یا مکشی می باشد، توسط پیچی که در روی سر پمپ قرار دارد (Occlusion) تنظیم می شود و از عدد ۱ تا ۵ مدرج است. هنگامی که پیچ بر روی عدد ۳ تنظیم شده باشد نشان دهنده شرایط کاری نرمال بوده و در عدد ۵ نیز پمپ بیشترین میزان فشار و یا مکش را تولید می کند که باعث کم شدن عمر تیوپ می شود. قسمت دوم که در روی درایور پمپ نصب شده به منظور تنظیم سرعت چرخش پمپ می باشد که از عدد ۰ تا ۱۰ نیز مدرج شده است، و از ۲۰ تا ۶۵۰ دور در دقیقه قابل تنظیم است (Cole-Parmer Instrument CO, 2003).

در شکل (۳-۴) رابطه بین اعداد درجه بندی شده (۰ تا ۱۰) بر روی درایور پمپ پرستالتیک، و دبی پمپاژ در شرایط آزمایشگاهی نشان داده شده است. که این شرایط در طول تمام آزمایشات مربوط به سنجش پمپ پرستالتیک و آزمایشات شستشوی زغال توسط ستون فلوتاسیون ثابت نگه داشته شده است.

این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که با توجه به شرایط آزمایشی که در آزمایشگاه وجود دارد از جمله، فاصله بین همزن تا محل خوراک دهی، نوع تیوپ استفاده شده در پمپهای پرستالتیک، و غیره، میزان دبی پمپاژ برای شرایط مختلف، متفاوت خواهد شد.



شکل (۳-۴) رابطه بین اعداد درجه بندی شده بر روی درایور پمپ پرستالتیک، و دبی پمپاژ

در تحقیق حاضر طراحی و تحلیل آزمایشات توسط بسته نرم افزاری Design Expert صورت گرفته است (Stat-Ease, 2005). که تعداد ۳۶ آزمایش در قالب طراحی فاکتوریل کامل انجام شده است. در این آزمایشات سه عامل درجه سرعت چرخش موتور، درجه هد فشاری و نوع سیال انتخاب و دبی جریان سیال بر حسب لیتر در دقیقه به عنوان پاسخ آزمایشات انتخاب گردیده است. جدول (۳-۴) عوامل و سطوح مختلف مربوط به طراحی آزمایشات را نشان می دهد.

جدول (۳-۴) عوامل و سطوح مختلف مربوط به طراحی آزمایشات

نشانه	نام عوامل	واحد	اعداد مربوط به سطوح تغییرات عوامل
A	درجه سرعت چرخش موتور	درجه	3, 4, 5, 6, 7, 8
B	درجه هد فشاری	درجه	3, 3.5, 4
C	نوع سیال	نوع	آب, پالپ ۱۰٪ جامد زغال

همانطور که در جدول (۳-۴) مشاهده می شود درجه سرعت چرخش موتور به عنوان عامل کمی A در ۶ سطح تغییر داده شده است. این درجات مختلف بر اساس درجه بندی است که در روی درایور پمپ قرار دارد. درجه هد فشاری تحت عنوان عامل کمی B و در سه سطح تعریف شده که درجات مختلف پیچ تنظیم هد فشاری را نشان می دهد. و نوع سیال نیز تحت عنوان عامل کیفی C در نظر

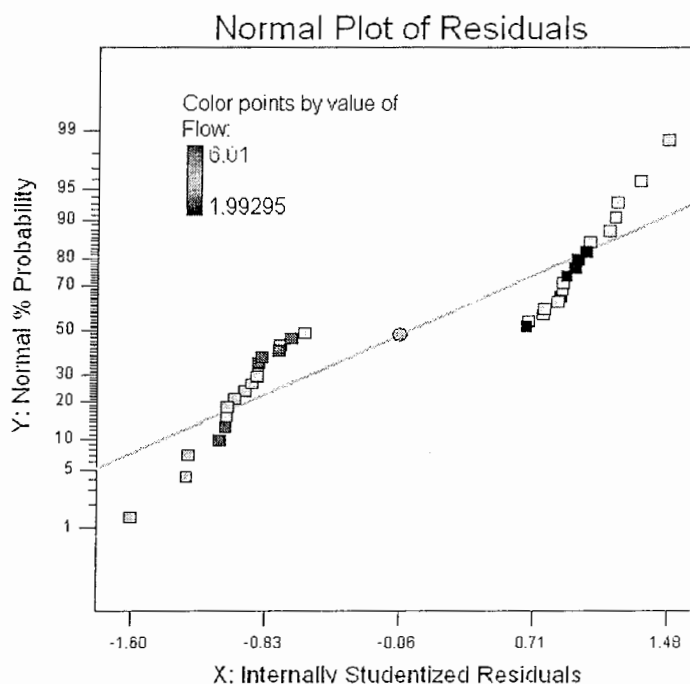
گرفته شده، که از دو نوع سیال مختلف (آب و پالپی شامل ۱۰٪ زغال) در آزمایشات استفاده شده است. مطابق طرح فاکتوریل کامل، بر اساس جدول (۴-۳)، تعداد ۳۶ آزمایش انجام گرفت که جهت حذف خطاهای ناشناخته، ترتیب آزمایشات به طور تصادفی انجام گردیده است. جدول (۴-۴) شرایط آزمایشی و پاسخ سیستم را نشان می دهد.

جدول (۴-۴) شرایط آزمایشی و پاسخ ها

Std	Run	Block	Factor 1 A:Motor Speed Degree	Factor 2 B:Pressure Head Degree	Factor 3 C:Fluid Type	Response 1 Flow Lit/min
32	1	Block 1	8	3	Slurry	6.01
9	2	Block 1	6	3	Slurry	4.4409866
27	3	Block 1	4	4	Slurry	2.7272656
17	4	Block 1	4	3.5	Slurry	2.7499958
35	5	Block 1	8	4	Water	6
34	6	Block 1	8	3.5	Slurry	5.9949
10	7	Block 1	7	3	Slurry	5.2697645
22	8	Block 1	4	4	Water	2.7397506
16	9	Block 1	3	3.5	Slurry	2.01
13	10	Block 1	5	3.5	Water	3.567256
5	11	Block 1	7	3	Water	5.2729926
4	12	Block 1	6	3	Water	4.45772
12	13	Block 1	4	3.5	Water	2.7361361
6	14	Block 1	3	3	Slurry	2.008
20	15	Block 1	7	3.5	Slurry	5.28146
21	16	Block 1	3	4	Water	1.9986611
3	17	Block 1	5	3	Water	3.55506
15	18	Block 1	7	3.5	Water	5.2729919
7	19	Block 1	4	3	Slurry	2.729841
33	20	Block 1	8	3.5	Water	6
14	21	Block 1	6	3.5	Water	4.44091
1	22	Block 1	3	3	Water	2.0058583
25	23	Block 1	7	4	Water	5.25739
26	24	Block 1	3	4	Slurry	2.0028566
18	25	Block 1	5	3.5	Slurry	3.5508016
29	26	Block 1	6	4	Slurry	4.445
36	27	Block 1	8	4	Slurry	5.992905
24	28	Block 1	6	4	Water	4.4433468
11	29	Block 1	3	3.5	Water	1.9929462
23	30	Block 1	5	4	Water	3.5477155
30	31	Block 1	7	4	Slurry	5.28533
28	32	Block 1	5	4	Slurry	3.55766
8	33	Block 1	5	3	Slurry	3.5609
19	34	Block 1	6	3.5	Slurry	4.44408
31	35	Block 1	8	3	Water	6.01
2	36	Block 1	4	3	Water	2.7136743

۴-۴-۲- اعمال تبدیل^۳ بر روی داده های پاسخ (دبی جریان سیال)

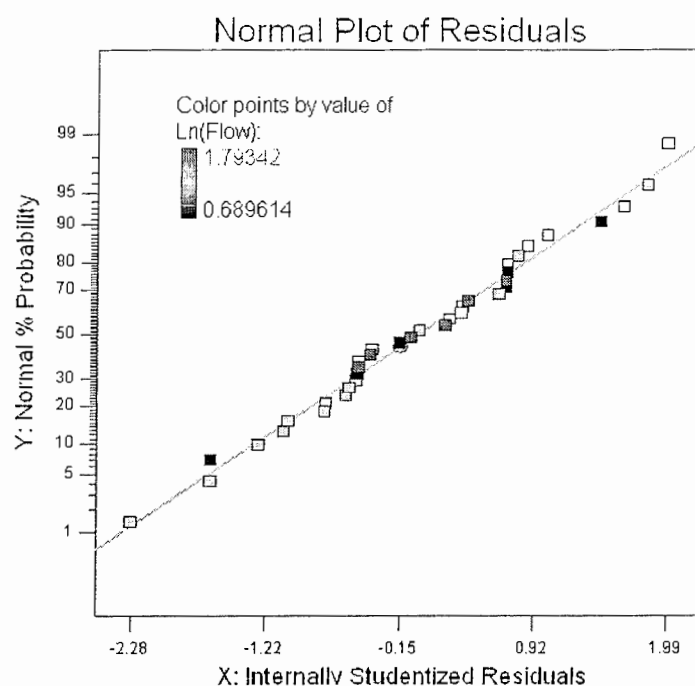
در روشهای طراحی آماری آزمایشات هنگامی که بازه پاسخ مربوط به آزمایشات وسیع باشد، برای برازش بهتر مدل جهت دستیابی به مدل ریاضی قابل قبول که در آن مانده های مدل (residuals) به صورت نرمال توزیع شده باشند، نیاز به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ ها می باشد. بدیهی است که یک مدل ریاضی صحیح به محقق کمک می کند تا بتواند تحلیل سیستم مورد مطالعه را بهبود بخشد. با این هدف و بعد از ارزیابی های به عمل آمده با استفاده از نرم افزار، تبدیل لگاریتم طبیعی^۴، مناسب تشخیص داده شد. شکل های (۴-۴) و (۵-۴) به ترتیب توزیع مانده های مدل برازش شده را قبل و بعد از اعمال تبدیل نشان می دهند.



شکل (۴-۴) منحنی توزیع نرمال خطاها قبل از اعمال تبدیل

^۳ Transformation

^۴ Natural Log



شکل (۴-۵) منحنی توزیع نرمال خطاها بعد از اعمال تبدیل لگاریتم طبیعی

همانطور که شکل (۴-۴) نشان می دهد، قبل از اعمال تبدیل، توزیع خطاها، حالت S شکل (غیر خطی) و غیر نرمال را داشته اند که بعد از اعمال تبدیل لگاریتم طبیعی، توزیع خطاها، خطی و به حالت نرمال نزدیکتر شده است.

۴-۳-۴- برآزش مدل بر روی آزمایشات

برای بررسی رفتار عوامل بر روی پاسخ، احتیاج به برآزش مدل بر پاسخ آزمایشات می باشد. مدل‌های تجربی مختلفی برای برآزش وجود دارد که در زیر به بررسی آنها و همچنین انتخاب بهترین مدل از بین آنها پرداخته شده است. جدول (۴-۵) به بررسی وضعیت برآزش مدل‌های مختلف نسبت به یکدیگر پرداخته است.

جدول (۴-۵) بررسی وضعیت برآزش مدل‌های مختلف نسبت به یکدیگر

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value
Mean vs Total	62.65138131	1	62.65138131		Prob > F
Linear vs Mean	5.057811925	3	1.685937308	461.969	< 0.0001
2FI vs Linear	1.32127E-05	3	4.40424E-06	0.00109	0.9999
Quadratic vs 2FI	0.116548438	2	0.058274219	7115.16	< 0.0001
Cubic vs Quadratic	2.29721E-05	6	3.82868E-06	0.40574	0.8669

در جدول (۵-۴) برای هر کدام از مدل‌های مختلف، عدد F-value و p-value سنجیده شده است که هر چه مقدار p-value کمتر باشد، اهمیت مدل بیشتر شده و به مفهوم برازش مناسب‌تر آن است. بدین ترتیب با توجه به جدول (۵-۴)، دو مدل Linear و Quadratic دارای p-value کوچکتری نسبت به بقیه هستند. که در ادامه و در جدول (۶-۴) به بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف پرداخته شده است.

جدول (۶-۴) بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف

Source Model	Std Deviation	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS
Linear	0.0604108	0.977432	0.975316	0.970746	0.151377
2FI	0.063455	0.977434	0.972765	0.960639	0.203678
Quadratic	0.0028618	0.999957	0.999945	0.999927	0.000375
Cubic	Aliased	Aliased	Aliased	Aliased	Aliased

با توجه به جدول (۶-۴) هر چه مقادیر ضریب همبستگی‌های محاسبه شده (R-Square) به یکدیگر نزدیکتر باشد وضعیت مدل برازش شده بهتر است. از طرفی ضریب همبستگی نزدیک ۱ برای مدل، نشان دهنده برازش خوب آن مدل بر آزمایشات می باشد. ستون $PRESS^5$ نشان دهنده مجموع مربعات خطای تخمین برای هر مدل می باشد. مدلی که برازش خوبی بر آزمایشات داشته باشد مقدار عدد $PRESS$ آن کوچکتر خواهد بود. عبارت Aliased برای مدل Cubic بدین مفهوم است که تعداد آزمایشات کافی برای برازش این مدل انجام نشده است.

بدین ترتیب و با توجه به تحلیل‌های حاصل شده از دو جدول (۵-۴) و (۶-۴) مدل Quadratic به عنوان بهترین مدل از بین بقیه مدل‌های موجود برای برازش بر روی آزمایشات انتخاب گردیده است. معادله تجربی مدل Quadratic که دبی جریان را برای مقادیر واقعی عوامل تخمین می زند. در حالتی که سیالات، آب و پالپ زغال باشند، به صورت زیر می باشد:

[Fluid Water]

$$\ln(\text{Flow}) = -0.55386 + 0.4716 \cdot A + 0.0225 \cdot B - 0.00024 \cdot A \cdot B - 0.02280 \cdot A^2 - 0.00312 \cdot B^2$$

[Fluid Slurry]

$$\ln(\text{Flow}) = -0.549 + 0.4709 \cdot A + 0.022612 \cdot B - 0.00024 \cdot A \cdot B - 0.02280 \cdot A^2 - 0.00312 \cdot B^2$$

⁵ Predicted Residual Sum of Squares

۴-۴-۴- آنالیز واریانس

در تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از آزمایشات، هدف اصلی از آنالیز واریانس این است که مشخص شود آیا تغییرات مشاهده شده در پاسخ، ناشی از تغییر سطوح عامل مورد نظر است، یا این تغییرات صرفاً به دلیل خطاهای تصادفی اندازه گیری ها بوجود آمده اند؟ جدول (۷-۴) آنالیز واریانس مدل نسبت به پارامترهای مورد مطالعه را نشان می دهد.

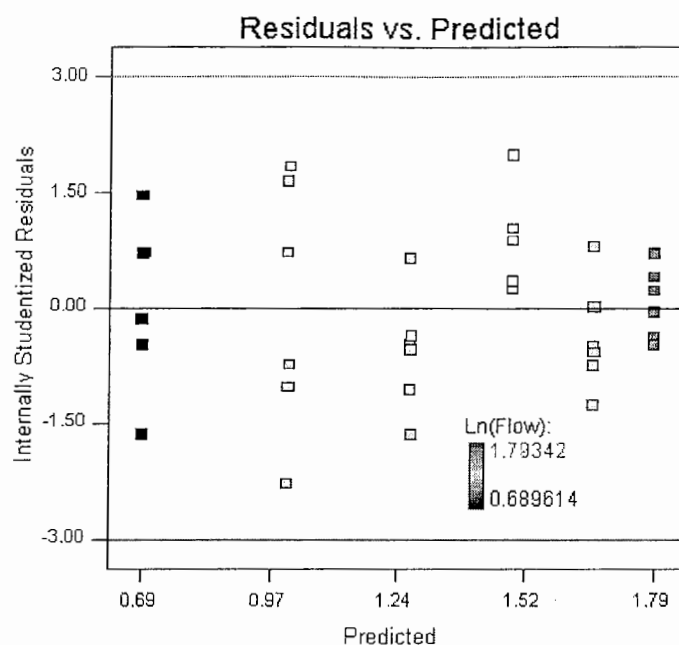
جدول (۷-۴) آنالیز واریانس

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	5.1743736	8	0.646797	78972.5	< 0.0001
A-Motor Speed	25.288995	5	5.057799	617546	< 0.0001
B-Pressure Head	4.525E-06	2	2.26E-06	0.27649	0.6033
C-Fluid	1.057E-05	1	1.06E-05	1.2911	0.2658
AB	1.035E-05	10	1.03E-06	0.12633	0.7250
AC	6.117E-05	5	1.22E-05	1.48542	0.2335
BC	2.467E-08	2	1.23E-08	0.0015	0.9694
A ²	2.9136654	25	0.116544	14229.7	< 0.0001
Residual	0.000221	27	8.19E-06		
Cor Total	5.174595	35			

در سطح احتمال ۹۵٪ (۰.۰۵ ریسک) مقدار p-value کوچکتر از ۰.۰۵ نشان دهنده معنی دار و با اهمیت بودن عامل است و p-value بزرگتر ۰/۱، از نظر آماری بی اهمیت تلقی می شود. ملاحظه می شود فقط عامل A که تنظیم کننده سرعت چرخش پمپ است در تغییرات دبی جریان از اهمیت زیادی برخوردار بوده و از نظر آماری معنی دار تلقی شده است. این در حالی است که عوامل هد فشاری، نوع سیال و اثر متقابل بین عوامل اثر معنی داری در پاسخ سیستم ندارند.

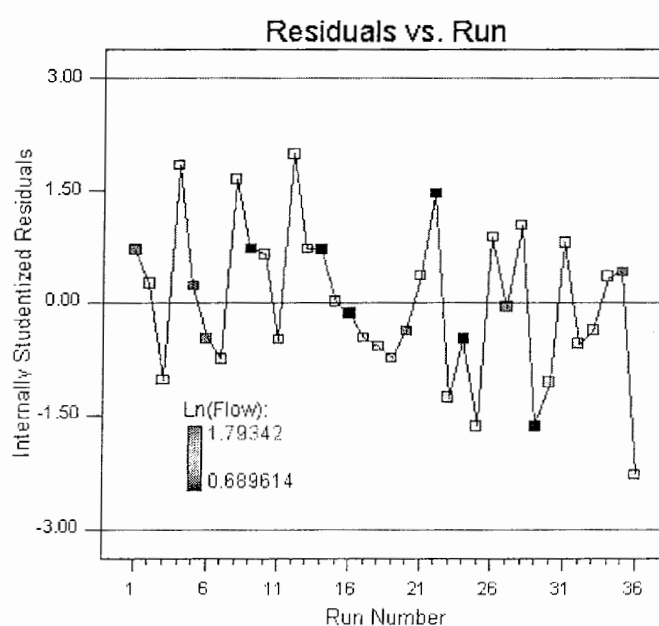
۴-۴-۵- آنالیز خطاها

برای بررسی توانایی مدل برازش شده بر آزمایشات و چگونگی عملکرد مدل، آنالیز خطاها انجام شد که نتایج آن در شکل های (۴-۶) تا (۴-۹) نشان داده شده است.



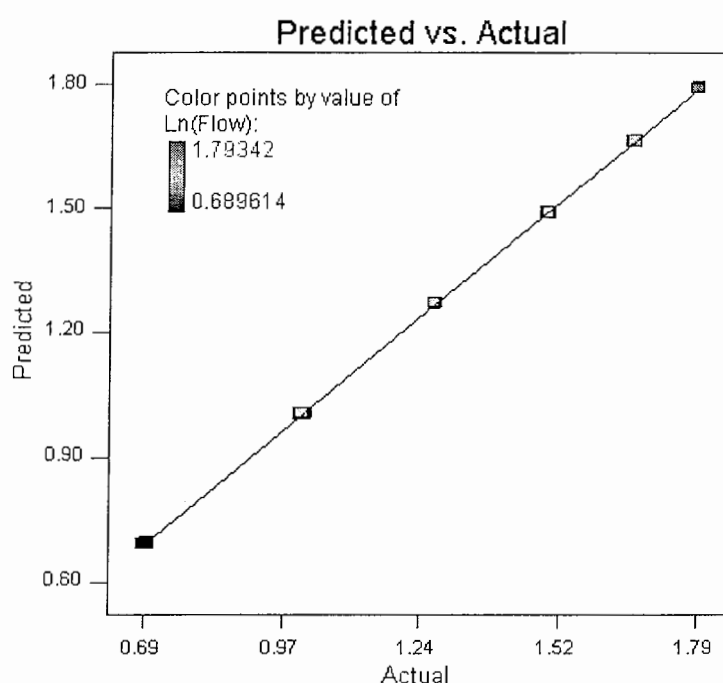
شکل (۴-۶) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل

شکل (۴-۶) وضعیت مانده ها را با توجه به مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل نشان می دهد. آنچه که انتظار می رود این است که مانده ها نسبت به مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل وابسته نباشند و از الگوی خاصی پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده باشند که نمودار شکل (۴-۶) این وضعیت را تایید می کند.



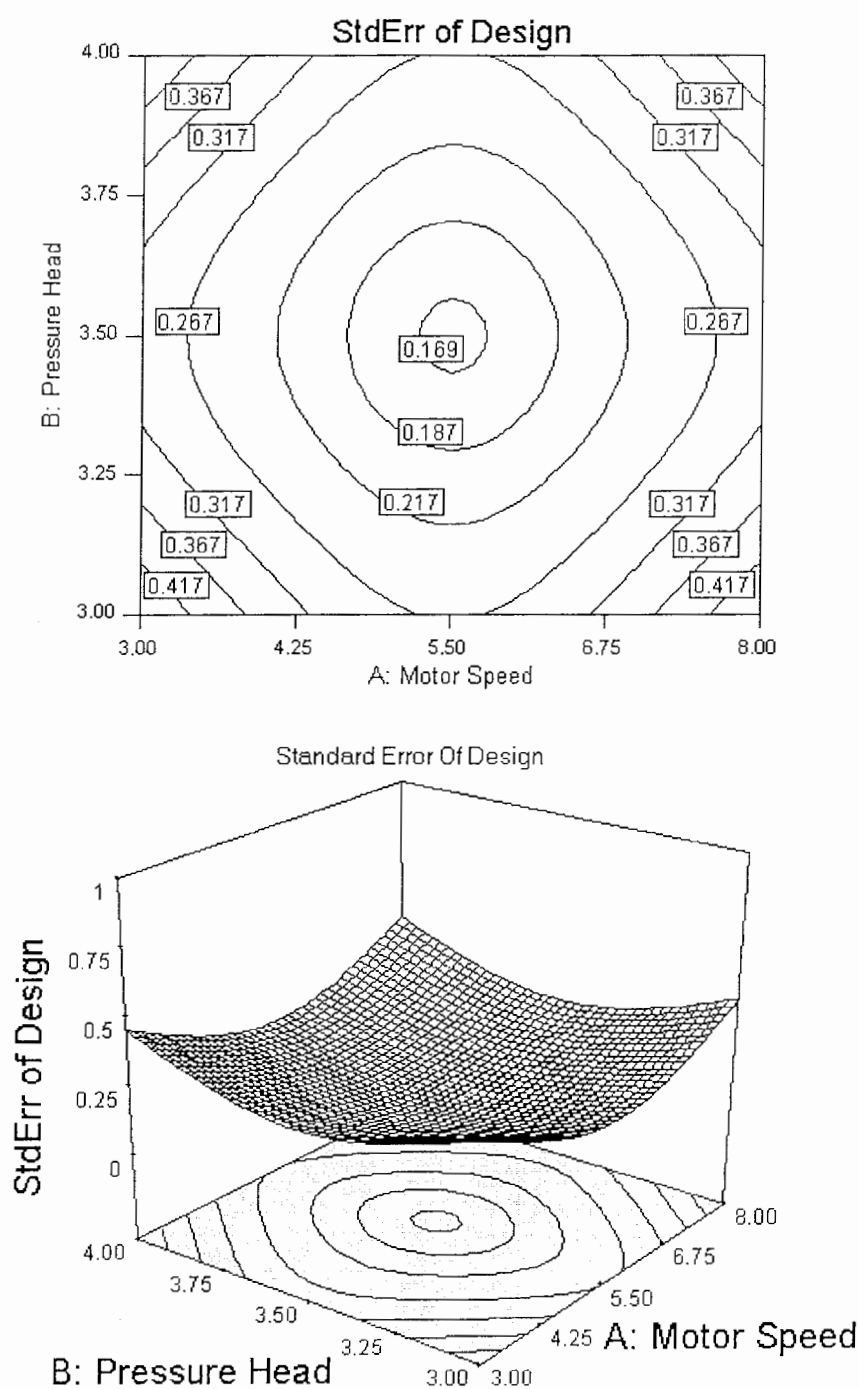
شکل (۴-۷) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشات

در شکل (۷-۴) به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر مانده ها با توجه به توالی انجام آزمایشات پرداخته شده است. به عبارت دیگر پاسخ این سوال مورد جستجو است که آیا مقادیر مانده ها با توالی انجام آزمایشات رابطه ای داشته است و یا خیر؟ همانطور که در نمودار نیز مشاهده می شود مقادیر مانده ها به صورت تصادفی پراکنده شده اند که به مفهوم مستقل بودن مانده ها نسبت به توالی انجام آزمایشات است، که مطلوب می باشد.



شکل (۸-۴) نمودار مقادیر واقعی پاسخ نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل

شکل (۸-۴) برای بررسی توانایی مدل در پیش بینی مقادیر واقعی پاسخ بکار می رود. از آنجایی که مقادیر واقعی، و پیش بینی شده آزمایشات توسط مدل، به هم نزدیک بوده اند، نقاط در شکل، تقریباً در یک خط ۴۵ درجه قرار گرفته اند که اعتماد ما را نسبت به کیفیت مدل برازش شده بیشتر می کند.

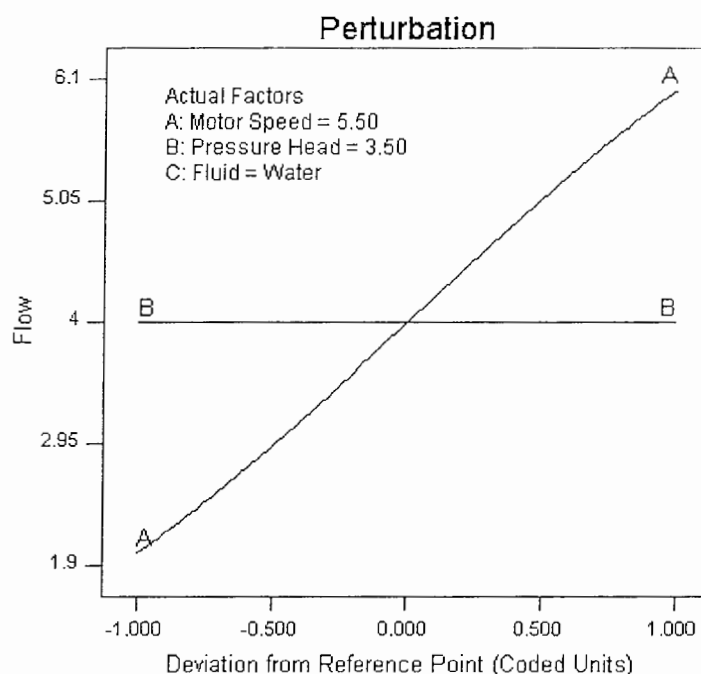


شکل (۹-۴) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی خطای استاندارد آزمایشات

همانطور که در شکل (۹-۴) نشان داده شده خطای استاندارد آزمایشات، با نزدیک شدن به مرکز سطوح عوامل کاهش پیدا کرده است. و در واقع در مرکز سطوح عوامل، شرایط پایداری نسبت به اطراف بوجود آمده است.

۴-۴-۶- بررسی نتایج

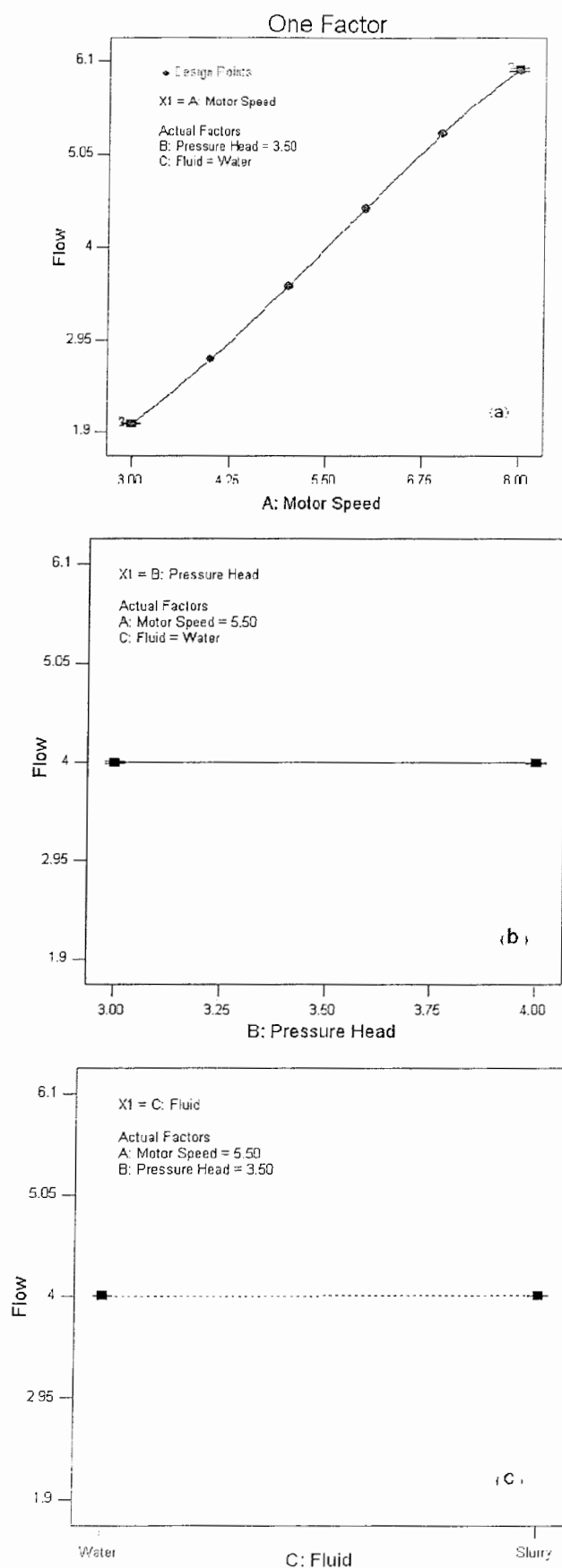
با توجه به حصول اطمینان از برازش مناسب مدل، و همچنین توزیع مناسب خطا، به بررسی نتایج حاصله از آزمایشات پرداخته شده است. در شکل های (۴-۱۰) تا (۴-۱۳) این بررسی ها نشان داده شده است.



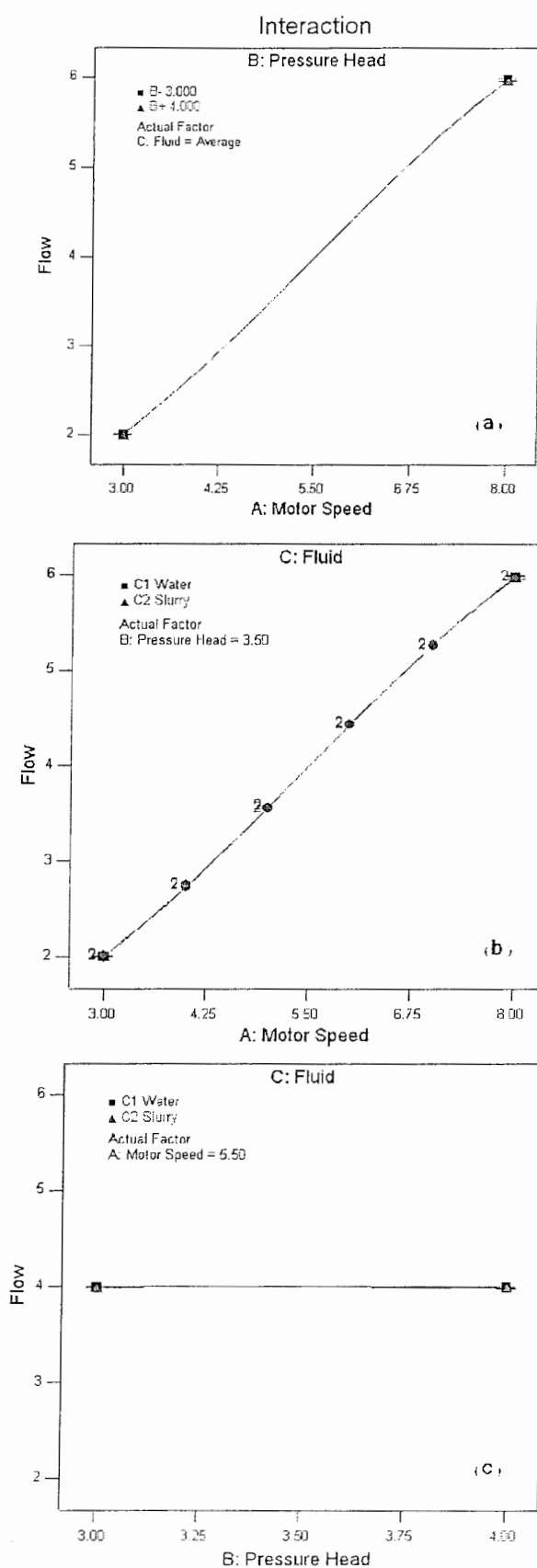
شکل (۴-۱۰) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ

نمودار شکل (۴-۱۰) به فهم چگونگی حساسیت عوامل نسبت به پاسخ آزمایشات کمک می کند. روش محاسبه شده در این نمودار بدین صورت بوده است که در یک زمان فقط یک عامل تغییر داده شده و بقیه ثابت نگه داشته شده بودند. شیب زیاد در نمودار نشان دهنده حساسیت زیاد آن عامل بر پاسخ می باشد، و شیب کم و تقریباً افقی منحنی به معنی کم بودن حساسیت عامل مورد نظر بر پاسخ می باشد (Stat-Ease, Inc, 2005).

ملاحظه می شود که فقط عامل A یعنی درجه سرعت چرخش موتور، عامل حساس بر پاسخ آزمایشات بوده و دو عامل B و C تأثیر کمی بر پاسخ داشته اند.



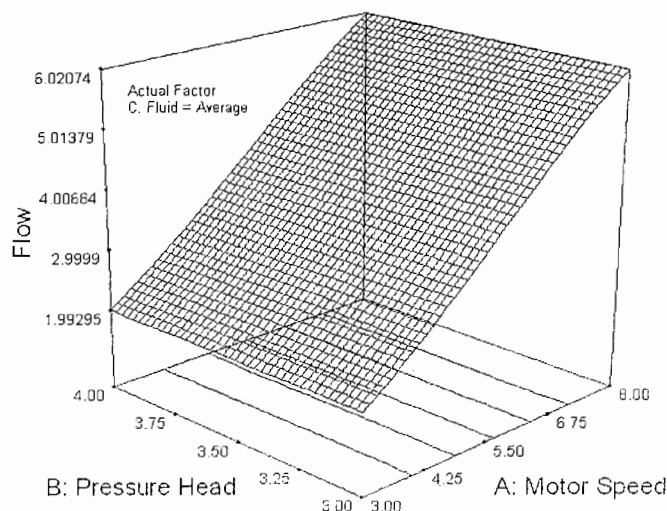
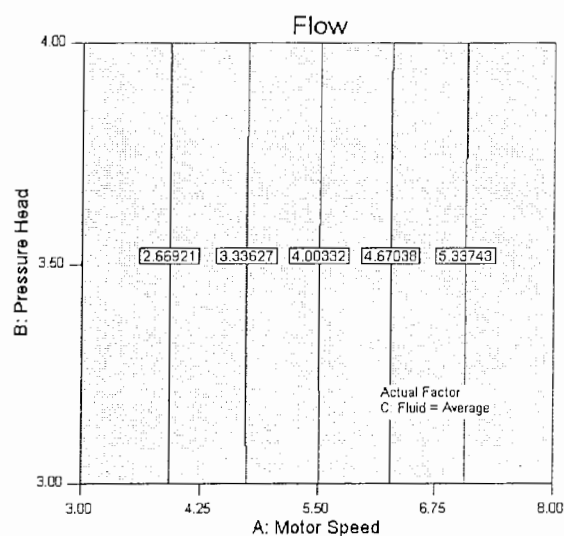
شکل (۴-۱۱) نمودار تأثیر عوامل بر پاسخ، (a) درجه سرعت چرخش موتور (b) درجه هد فشاری (c) نوع سیال



شکل (۴-۱۲) بررسی تأثیر تقابل بین عوامل بر پاسخ

شکل (۴-۱۱) تأثیر هر کدام از عوامل را بر پاسخ، هنگامی که این عوامل از پایین ترین سطحشان (۱-)، تا بالاترین سطحشان (۱+)، تغییر می کنند را نشان می دهد. همانطور که منحنی ها نیز نشان می دهند فقط با تغییر سرعت چرخش موتور، میزان دبی تغییر می یابد و تغییرات دو عامل دیگر تأثیر چندانی بر دبی ندارد.

شکل (۴-۱۲) نیز تأثیر تقابل بین عوامل را بر پاسخ مورد بررسی نشان می دهد. همانطور که در آن شکل مشاهده می شود خطوط مربوط به تأثیر سطوح عوامل بر روی هم منطبق شده است که نشان دهنده عدم وجود تقابل معنی دار در بین عوامل است. در شکل (۴-۱۳) تأثیر دو عامل درجه سرعت چرخش موتور و درجه تنظیم هد فشاری به طور همزمان بر روی پاسخ، به صورت دوبعدی و سه بعدی نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۳) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی تأثیر عوامل بر پاسخ

با توجه به اخذ نتایج مثبت در برازش مدل و تحلیل خطاها، اعتماد بیشتری در صحت طراحی و انجام آزمایشات حاصل شد. و از میان سه عاملی که مورد بررسی قرار گرفت، عامل درجه سرعت چرخش موتور پمپ، بیشترین اهمیت را در تنظیم دبی جریان حاصله از پمپ داشت و تأثیر عوامل درجه تنظیم هد فشاری و یا مکشی و نوع سیال، در پاسخ بی اهمیت بودند.

۴-۵- تنظیم سطح مشترک پالپ - کف (عمق کف)

یکی از عواملی که در میزان عیار و بازیابی های بدست آمده در فلوتاسیون ستونی تأثیر گذار می باشد، اندازه عمق کف است که در خصوص تأثیر آن بر کارایی فلوتاسیون ستونی در فصول قبل مختصراً شرح داده شده بود.

ثابت ماندن عمق کف در ارتفاع مورد نظر در فلوتاسیون ستونی از اهمیت خاصی برخوردار است. از طرفی این عمق نسبت به تغییرات عوامل عملیاتی از جمله نرخ باطله، نرخ خوراک دهی، نرخ هوادهی و غیره، بسیار حساس می باشد. به همین منظور در اکثر ستونهای فلوتاسیون، سیستمهایی به منظور تنظیم و کنترل خودکار سطح مشترک پالپ - کف (عمق کف) تعبیه شده است.

در مورد ستون موجود در دانشگاه صنعتی شاهرود، سیستم کنترل کننده سطح مشترک پالپ - کف توسط یک سنسور فشار که در ستون تعبیه شده و از طرف دیگر به کنترل کننده فازی متصل است انجام می شود. کنترل کننده فازی با توجه به سیگنالی که از سنسور دریافت می کند و مقایسه آن با مقداری که کاربر برای تعیین عمق کف به آن داده بود، به طور خودکار دبی پمپ باطله را تنظیم می کند و بدین ترتیب عمق کف با تغییر فاکتورهای عملیاتی نیز در مقدار تنظیم شده ثابت نگه داشته می شود (Cole-Parmer Instrument CO, 2003).

فصل پنجم

مطالعه عوامل موثر در شناسایی پذیرای زغال

در فلوتاسیون سنترونی

۵-۱- مقدمه

فراوری زغال در ابعاد زیر یک میلی متر، دارای پایین ترین بازدهی از نظر شستشوپذیری هستند. همانطور که در فصل اول بحث شد، مشکل اصلی که در فراوری این محدوده از دانه بندی وجود دارد، رفتن دانه های ریز، به قسمتهایی از مدار بود که آن قسمتها قابلیت فراوری آن محدوده از دانه بندی را نداشتند (Phillips .D.I, 1998).

در تحقیق حاضر قابلیت شستشوپذیری زغال توسط روش فلوئتاسیون ستونی مطالعه شده است. امروزه با افزایش درصد ابعاد ریز دانه در خوراک به علت روش استخراج مکانیزه و همچنین افزایش میزان خاکستر آن، از قابلیت فلوئتاسیون مکانیکی برای فراوری ذرات زغال کاسته شده است، (Phillips .D.I, 1998) و کارخانه زغال شویی البرز شرقی نیز از این قاعده مستثنی نیست به طوری که طبق جدول (۱-۲) از فصل اول، میزان خاکستر محصول (کنسانتره) فلوئتاسیون مکانیکی ۱۶/۳۵ درصد می باشد که در صنعت میزان قابل قبولی به شمار نمی رود.

چنانکه متذکر گردید امروزه بهترین دستگاه برای فراوری زغال با استفاده از روش فلوئتاسیون، بکارگیری ستونهای فلوئتاسیون می باشد. تجربه استفاده از این روش نشان می دهد که اگر فلوئتاسیون ستونی بطور مناسب بکار گرفته شود دارای بازیابی بهتری نسبت به فلوئتاسیون مکانیکی خواهد بود. و همچنین میزان خاکستر در محصول (کنسانتره) نیز پایین تر و در حد قابل قبول در صنعت خواهد شد. (Phillips .D.I, 1998)

۵-۲- اهداف انجام آزمایشها

آزمایشها در آزمایشگاه فراوری دانشگاه صنعتی شاهرود با ستون فلوتاسیون که دارای قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۲۰ فوت می باشد، انجام شد. اهداف انجام آزمایشها به شرح زیر بود:

- مطالعه قابلیت شستشوپذیری زغال البرز شرقی توسط روش فلوتاسیون ستونی
- بررسی و فهم بهتر عوامل موثر، و ارتباط آنها در فلوتاسیون ستونی زغال توسط روشهای طراحی آماری آزمایشها.
- سعی در بهینه کردن شرایط عملیاتی ستون با توجه به شناخت عوامل موثر، و با استفاده از روشهای طراحی آماری آزمایشها.

۵-۳- منبع خوراک ستون

خوراک ستون از محل ورودی کارخانه زغال شویی البرز شرقی گرفته شد، بطوریکه در نمونه های برداشتی سعی شده تا مخلوطی از تمامی زغالهایی باشد که از معادن مختلف به کارخانه آورده می شد. سپس به منظور آماده سازی در داخل آزمایشگاه بر روی تمام نمونه ها عملیات خردایش انجام شد تا از الک ۳۰ مش عبور کنند (زیر ۰/۶ میلی متر). همچنین نمونه ها به خوبی با هم مخلوط شدند تا در حد امکان خوراک همگنی برای ستون فلوتاسیون و انجام آزمایشها فراهم شود. در جدول (۵-۱) درصد وزنی و همچنین درصد خاکستر نمونه آماده سازی شده، نشان داده شده است.

جدول (۵-۱) درصد وزنی و درصد خاکستر نمونه آماده سازی شده

ابعاد ذرات		جداگانه		تجمعی باقیمانده		تجمعی عبور کرده	
میکرون	خاکستر %	وزنی %	خاکستر %	وزنی %	خاکستر %	وزنی %	خاکستر %
425-600	11.2	5.68	11.2	0	34.9	100	
212-425	17.7	14.49	15.87	5.68	36.33	94.32	
150-212	30.5	27.09	24.26	20.17	39.71	79.83	
106-150	37.2	9.58	26.44	47.26	44.44	52.74	
95-106	40.7	12.36	28.98	56.85	46.05	43.15	
-95	48.2	30.8	34.9	69.2	48.2	30.8	

همانطور که در جدول (۵-۱) نیز نشان داده شده ذرات ریز (زیر ۹۵ میکرون) دارای بیشترین درصد خاکستر می باشند. نمونه آماده سازی شده به طور کلی دارای تقریباً ۳۶٪ خاکستر بوده که طبق جدول (۱-۲) در مقایسه با خوراک ورودی فلوتاسیون مکانیکی در البرز شرقی، که ۳۲/۵۲٪ می باشد کمی بیشتر است. که در واقع محک بهتری برای مقایسه ستون فلوتاسیون با سلول مکانیکی خواهد بود.

۵-۴- طراحی و روش انجام آزمایشها

طراحی و تحلیل آزمایشها به دلیل کاستن ریسک کار، در دو مرحله و توسط روشهای آماری آزمایشها و به کمک نرم افزار Design Expert صورت پذیرفت. چون یکی از اهداف اصلی انجام آزمایشها بهینه سازی فرایند توسط روشهای آماری آزمایشها بود، لذا همانطور که در غالب روش های طراحی آزمایشات توصیه می شود، طراحی در دو مرحله انجام شد.

در مرحله اول، که در این فصل مورد بررسی قرار خواهد گرفت، با هدف شناخت عوامل موثر و فهم بیشتر رابطه بین آنها با انجام تعداد آزمایشهای کمتر، از روش فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم (Irregular Fractional Factorial Design) بهره گرفته شد. در این سری از آزمایشات، چهار عامل نرخ خوراک دهی، میزان مصرف گازوئیل، نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو انتخاب و درصد بازیابی، درصد میزان خاکستر محصول و بازدهی جدایش نیز به عنوان پاسخهای آزمایشات در نظر گرفته شدند. که جزئیات بیشتر در بخشهای مربوط به خود توضیح داده خواهند شد.

در مرحله دوم که در فصل بعد (ششم) مورد بررسی قرار خواهد گرفت، با توجه به اطلاعات و شناختی که از مرحله اول حاصل شده بود، هدف بهینه سازی شرایط عملیاتی ستون است. به همین دلیل از روش پاسخ سطح (Response Surface Methods) که از روشهای مربوط به بهینه سازی در طراحی آماری آزمایشها است استفاده شد. در این سری آزمایشات نیز سه عامل نرخ آب شستشو، نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز، انتخاب و درصد بازیابی، درصد میزان خاکستر محصول و بازدهی جدایش به عنوان پاسخهای آزمایشات در نظر گرفته شدند. که جزئیات بیشتر در فصل مربوط به خود توضیح داده خواهد شد.

۵-۴-۱- روش انجام آزمایشها

روش انجام آزمایشها بدین صورت بود که ابتدا محاسبات مربوط به درصد جامد پالپ انجام شده و برای هر آزمایش ۱۰۰ لیتر پالپ ۵٪ جامد زغال به عنوان خوراک ستون به داخل همزن ریخته می شد. سپس گازوئیل به عنوان کلکتور و محلول شیمیایی MIBC به عنوان کف ساز به پالپ اضافه می شد و به مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه برای اثر بخشی کلکتور و کف ساز، زمان صرف می شد. سپس پالپ توسط پمپ پرستالتیک خوراک دهی، از یک سوم بالایی ستون با دبی طراحی شده، پمپاژ می شد. و از طرفی فاکتورهای عملیاتی ستون از جمله نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی و غیره نیز در مقادیر طراحی شده خود تنظیم می شدند. در آزمایشها سعی شده بود که عمق کف در حدود ۶۰ سانتی متر توسط سیستم کنترل فازی ثابت نگه داشته شود.

همانطور که در فصل دوم نیز بررسی شد بالاترین زمان ماند لازم برای شناور شدن زغال در داخل ستون ۵ دقیقه بود. از آنجایی که زمان لازم برای پایدار شدن شرایط ستون دو الی سه برابر زمان ماند می باشد. لذا نمونه گیری از جریان باطله و کنسانتره، بعد از پایدار شدن شرایط ستون، یعنی ۱۰ الی ۱۵ دقیقه بعد از اعمال آخرین تغییرات صورت می پذیرفت.

۵-۵- آزمایشهای مربوط به مطالعه عوامل موثر در شستشوپذیری زغال در ستون

این سری از آزمایشها (مرحله اول) با هدف شناخت هر چه بیشتر عوامل موثر و اثرات متقابل آنها در شستشوپذیری زغال توسط ستون فلوتاسیون انجام شد. بدین منظور تعداد ۱۲ آزمایش در قالب طراحی فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم انجام شد. که 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 ناقص نامنظم

نشانه	نام عوامل	واحد	سطح پایین (۱-)	سطح بالا (۱+)
A	نرخ خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	2.8	4.8
B	میزان مصرف گازوئیل	میلی لیتر بر کیلوگرم	1	3
C	نرخ گازدهی	سانتی متر بر ثانیه	1.5	2
D	نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	0.85	1.25

همانطور که در جدول (۵-۳) نشان داده شده، همه عوامل به صورت عوامل کمی بوده و در دو سطح پایین و بالا تغییر داده شده اند. بدین ترتیب بر اساس طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم تعداد ۱۲ آزمایش طراحی شد که جهت حذف خطاهای ناشناخته، آزمایشات با ترتیب تصادفی انجام شدند. جدول (۵-۳) شرایط آزمایشی و پاسخها را در طراحی انجام شده، نشان می دهد.

شرایط عملیاتی و جزئیات بیشتر این سری از آزمایشها در پیوست الف آورده شده است.

جدول (۵-۳) شرایط آزمایشی و پاسخها در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم

Std	Run	Factor 1 A: Feed Rate Lit/min	Factor 2 B: Diesel Dosage mL/Kg	Factor 3 C: Air Rate cm/s	Factor 4 D: Wash water Rate Lit/min	Response 1 Combustible Recovery %	Response 2 Ash Content %	Response 3 S.E %
7	1	2.80	1.00	1.50	1.25	72.14	12.77	59.15
11	2	4.80	1.00	2.00	1.25	72.68	10.80	61.57
3	3	2.80	1.00	2.00	0.85	82.26	16.00	60.45
10	4	4.80	3.00	1.50	1.25	82.30	11.00	67.33
8	5	4.80	1.00	1.50	1.25	60.16	9.40	53.54
4	6	4.80	1.00	2.00	0.85	71.73	13.30	58.71
5	7	2.80	3.00	2.00	0.85	81.38	12.20	64.76
9	8	2.80	3.00	1.50	1.25	82.53	10.50	69.08
1	9	2.80	1.00	1.50	0.85	66.60	12.80	55.61
12	10	2.80	3.00	2.00	1.25	77.33	12.70	62.85
6	11	4.80	3.00	2.00	0.85	80.84	12.10	65.70
2	12	4.80	3.00	1.50	0.85	75.69	10.80	63.70

۵-۶- ساختار اختلاط و اتحاد اثرات عوامل در آزمایشهای مرحله اول

همانطور که در فصل سوم اشاره شد، هنگامی که آزمایشها توسط فاکتوریل ناقص طراحی می شود، به قیمت ایجاد اختلاط و اتحاد اثرات عوامل، از تعداد آزمایشها کم می شود که به تبع آن در وقت و هزینه صرفه جویی می شود. عمل حذف کردن تعداد آزمایشها در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم به صورت نامنظم صورت پذیرفته، که با هدف ایجاد کمترین صدمه به اصل آزمایشها و تفسیر آن بوده است ولی با این وجود اطلاع داشتن از ساختار اختلاط و اتحاد اثرات عوامل، ضروری به نظر می رسد. در جدول (۵-۴) ساختار اختلاط و اتحاد اثرات عوامل نشان داده شده است.

جدول (۴-۵) ساختار اختلاط و اتحاد اثرات عوامل

No.	[Est. Terms]=Aliased Terms
1	$[A] = A - ACD$
2	$[B] = B - BCD$
3	$[C] = C$
4	$[D] = D$
5	$[AB] = AB$
6	$[AC] = AC - BCD$
7	$[AD] = AD - BCD$
8	$[BC] = BC - ACD$
9	$[BD] = BD - ACD$
10	$[CD] = CD - 0.5 * ABC - 0.5 * ABD$

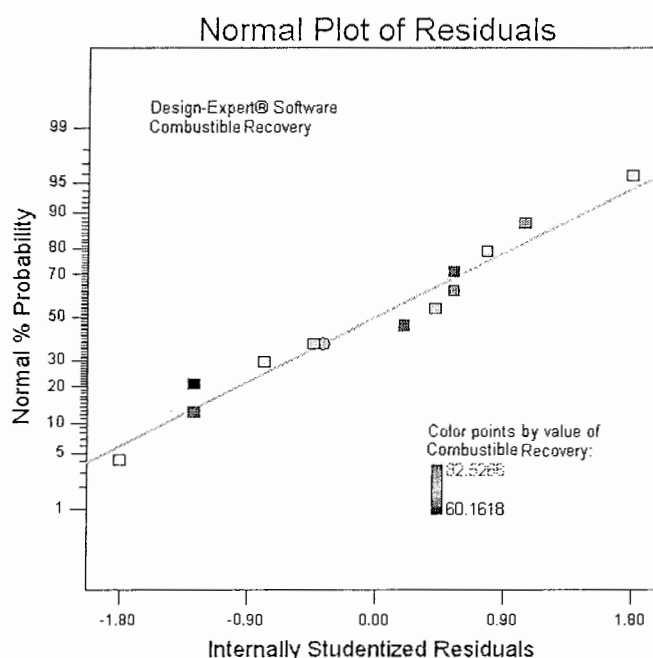
از نظر آماری فقط اثر عوامل اصلی و تقابلهای دو عاملی آنها برای آزمایشگر دارای اهمیت و قابل تفسیر می باشند بدین ترتیب اگر عوامل اصلی و تقابلهای دو عاملی آنها با یکدیگر اختلاط و اتحاد داشته باشند آزمایشگر در تفسیر دچار مشکل خواهد شد و اصطلاحاً حالت ابهام، در تفسیر آزمایشها بوجود خواهد آمد. ولی همانطور که در جدول (۴-۵) نشان داده شده، در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم و در ساختار اختلاط و اتحاد اثرات عوامل آن، هیچ کدام از اثرات عوامل اصلی و تقابلهای دو عاملی آنها با یکدیگر اختلاط نداشته و فقط اختلاط آنها با تقابلهای سه عاملی می باشد. بنابراین می توان با اطمینان بیشتری به تفسیر نتایج پرداخت.

۷-۵- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)

همانطور که قبلاً نیز گفته شد. در این سری از آزمایشات، چهار عامل نرخ خوراک دهی، میزان مصرف گازوئیل، نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو انتخاب و همچنین برای آنها سه پاسخ با عناوین درصد بازیابی، درصد خاکستر محصول و بازدهی جدایش نیز در نظر گرفته شدند. که در این بخش تفسیر داده های پاسخ اول (درصد بازیابی) مد نظر می باشد.

۵-۷-۱- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)

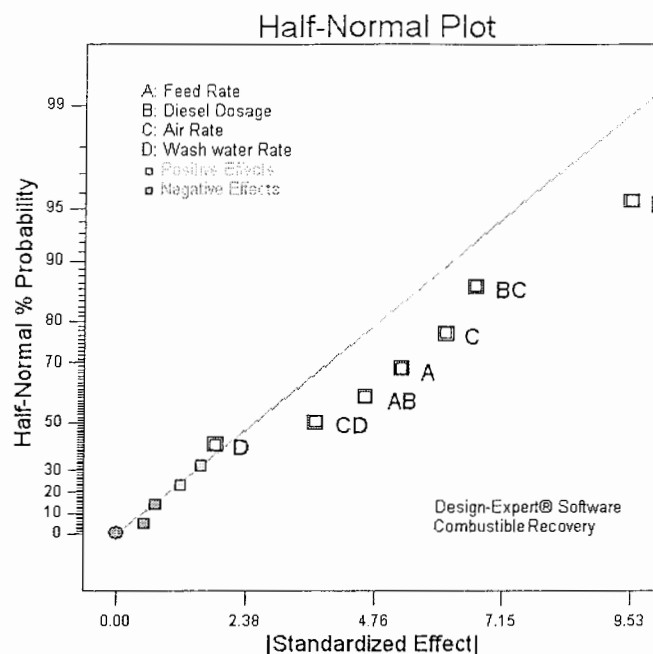
برای برازش مدل جهت دستیابی به مدل ریاضی قابل قبول، اگر مانده های مدل (residuals) به صورت نرمال توزیع نشده باشند نیاز به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ می باشد. که در مورد داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)، مانده های مدل به صورت نرمال توزیع شده اند، و در نتیجه نیازی به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ نمی باشد. شکل (۵-۱) توزیع مانده ها را نشان می دهد.



شکل (۵-۱) منحنی توزیع نرمال مانده ها مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی)

۵-۷-۲- برازش مدل بر روی داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)

برای بررسی رفتار عوامل بر روی پاسخ احتیاج به برازش مدل بر پاسخ آزمایشات می باشد. همانطور که قبلاً نیز گفته شد، مدل در واقع یک معادله ریاضی است که برای پیش بینی پاسخ بکار می رود. در تشکیل مدل اکثراً از عوامل و تقابلهایی استفاده می شود که از نظر آماری دارای اهمیت باشند. بنابراین در شکل (۵-۲) اثرات عوامل در کاغذ احتمال رسم شده اند تا به صورت گرافیکی عواملی که دارای تاثیر بیشتری در آزمایشها دارند تشخیص داده شوند و در تشکیل مدل بکار روند.



شکل (۵-۲) نمودار اثرات عوامل در کاغذ احتمال مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی)

سوالاتی که با مشاهده نمودار شکل (۵-۲) ممکن است در ذهن بوجود آید این است که چرا عامل D با وجود اینکه جدا یافتگی از حالت نرمال ندارد (نزدیک به نرمال است) باز هم در تشکیل مدل بکار رفته است در صورتی که می بایست در محاسبه تخمین خطا استفاده می شد؟ در جواب این سوال باید به این نکته اشاره کرد که در روشهای طراحی آماری آزمایشها و در تشکیل مدل، اگر اثرات متقابل عوامل شرکت داشته باشند بهتر است که عوامل اصلی تشکیل دهنده آن اثر متقابل نیز در تشکیل مدل شرکت داشته باشند. بنابراین در این مورد نیز چون اثر متقابل CD در تشکیل مدل شرکت دارد پس بهتر است که عوامل اصلی C و D نیز در تشکیل مدل شرکت داشته باشند (Stat-Ease, Inc, 2005).

در جدول (۵-۵) لیست اثرات و نوع آنها و مجموع مربعات مربوط به آنها نشان داده شده است.

جدول (۵-۵) لیست اثرات عوامل و تقابلهای آنها مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی)

Type	Term	Std Effect	SumSqr	% Contribution
Require	Intercept			
Model	A:Feed Rate	-5.25074	73.52066	11.4540365
Model	B:Diesel Dosage	9.527092	242.0413	37.7084453
Model	C:Air Rate	6.089048	98.87069	15.4034041
Model	D:Wash water Rate	1.828738	8.918085	1.38937916
Model	AB	4.575495	55.82708	8.69749259
Error	AC	1.559647	3.333796	0.51938352
Error	AD	1.182669	3.729881	0.58109101
Model	BC	-6.64121	117.6152	18.3236732
Error	BD	-0.72343	1.395593	0.2174243
Model	CD	-3.66989	35.91491	5.59530767
Error	ABC	-0.51541	0.708391	0.11036262
Aliased	ABD	Aliased		
Aliased	ACD	Aliased		
Aliased	BCD	Aliased		
Aliased	ABCD	Aliased		

بدین ترتیب با توجه به جدول (۵-۵) و شناسایی عواملی که در مدل شرکت دارند، اصطلاحاً مدل $2FI^1$ برای برازش بر روی آزمایشات انتخاب گردیده است. معادله تجربی مدل $2FI$ که درصد بازیابی زغال را برای مقادیر کد شده و واقعی عوامل تخمین می زند، به صورت زیر می باشد:

[Final Equation in Terms of Coded Factors]:

$$\text{Combustible Recovery} = +74.91 - 2.63A + 4.49B + 3.52C + 1.06D + 2.64AB - 3.32BC - 1.83CD$$

[Final Equation in Terms of Actual Factors]:

$$\begin{aligned} \text{Combustible Recovery} = & -48.10 - 7.91 \times \text{Feed Rate} + 17.70 \times \text{Diesel Dosage} + 79.16 \times \text{Air Rate} \\ & + 69.50 \times \text{Wash water Rate} + 2.64 \times \text{Feed Rate} \times \text{Diesel Dosage} - 13.28 \times \text{Diesel Dosage} \times \text{Air Rate} \\ & - 36.70 \times \text{Air Rate} \times \text{Wash water Rate} \end{aligned}$$

۵-۷-۳- آنالیز واریانس پاسخ اول (درصد بازیابی)

در آنالیز واریانس هدف شناسایی عوامل موثر و همچنین ترتیب آنها از نظر اهمیت در پاسخ آزمایشها با انجام یک سلسله عملیات ریاضی است. جدول (۵-۶) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی) را نشان می دهد.

¹ 2 Factorial Interaction model

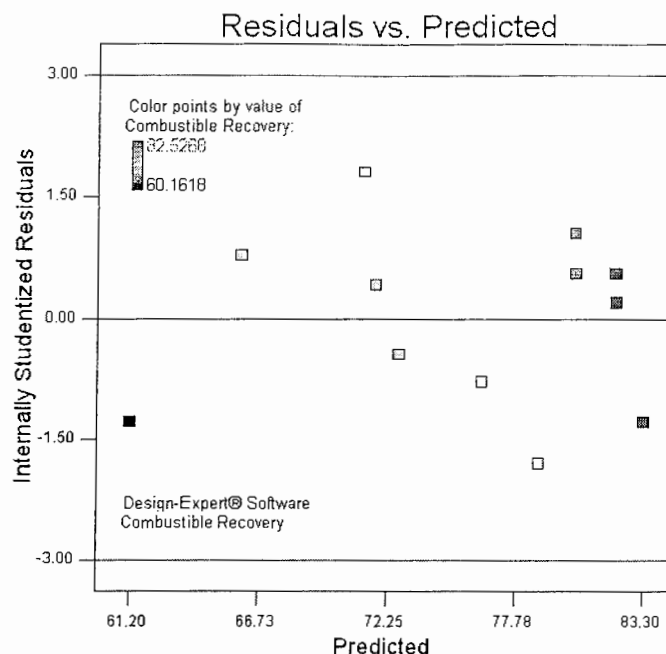
جدول (۵-۶) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	542.364	7	77.481	33.806	0.0021
A:Feed Rate	73.521	1	73.521	32.0783	0.0048
B:Diesel Dosage	242.041	1	242.041	105.607	0.0005
C:Air Rate	98.871	1	98.871	43.1389	0.0028
D:Wash water Rate	8.918	1	8.918	3.89111	0.1198
AB	55.827	1	55.827	24.3583	0.0078
BC	117.615	1	117.615	51.3174	0.0020
CD	35.915	1	35.915	15.6703	0.0167
Residual	9.168	4	2.292		
Cor Total	551.531	11			

ملاحظه می شود که مدل برازش شده از نظر آماری معنی دار می باشد و فقط ۰/۲۱٪ احتمال وجود دارد که F-value بزرگتری بر اساس تاثیر اغتشاشات بوجود آید. و همچنین به ترتیب عوامل و اثرات متقابل B (میزان مصرف گازوئیل)، BC (اثر متقابل میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی)، C (نرخ گازدهی)، A (نرخ خوراک دهی)، AB (اثر متقابل میزان مصرف گازوئیل و نرخ خوراک دهی) و CD (اثر متقابل نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو) از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد بازیابی) معنی دار و با اهمیت می باشند و خود عامل D (نرخ آب شستشو) از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد بازیابی) با اهمیت و معنی دار نمی باشد.

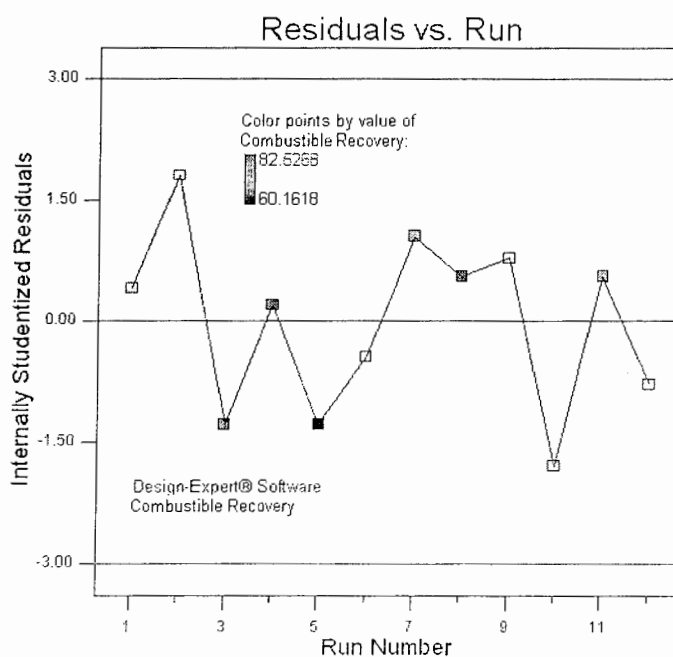
۵-۷-۴- آنالیز خطاهای پاسخ اول (درصد بازیابی)

به منظور بررسی توانایی مدل برازش شده بر آزمایشها و چگونگی عملکرد آن و همچنین نحوه انجام آزمایشها بهتر است که آنالیز خطاها صورت پذیرد که در شکل های (۵-۳) تا (۵-۶) این عمل صورت پذیرفته است.



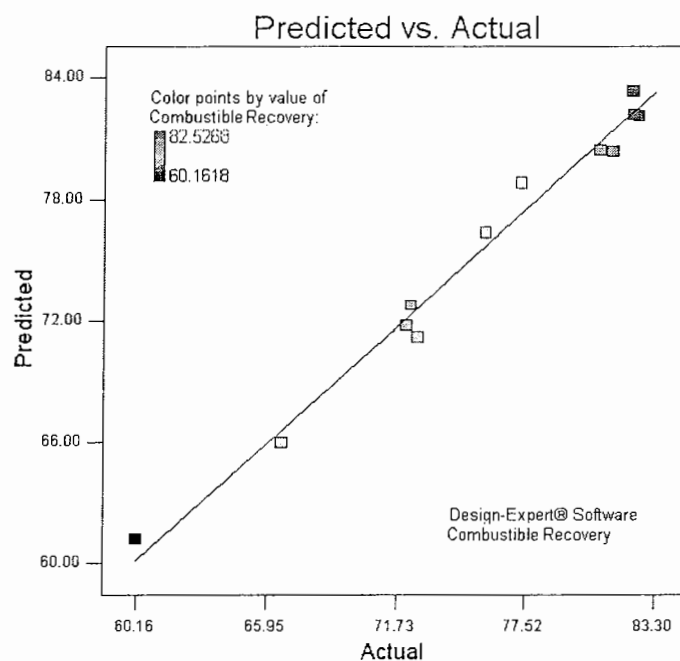
شکل (۳-۵) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل

شکل (۳-۵) وضعیت مانده ها را با توجه به مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل نشان می دهد. آنچه که انتظار می رود این است که مانده ها نسبت به مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل وابسته نباشند و از الگوی خاصی پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده باشند که نمودار شکل (۳-۵) این وضعیت را تایید می کند.



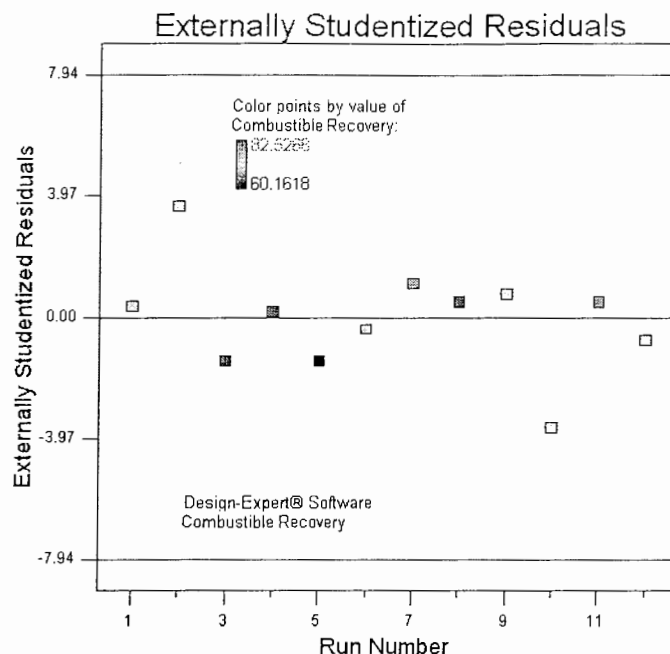
شکل (۴-۵) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی)

در شکل (۴-۵) به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر مانده ها با توجه به توالی انجام آزمایشها پرداخته شده است. همانطور که در نمودار نیز مشاهده می شود مقادیر مانده ها به صورت تصادفی پراکنده شده اند که به مفهوم مستقل بودن مانده ها نسبت به توالی انجام آزمایشها است، که مطلوب می باشد.



شکل (۵-۵) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل

شکل (۵-۵) برای بررسی توانایی مدل در پیش بینی مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) بکار می رود. از آنجایی که مقادیر واقعی، و پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل، به هم نزدیک بوده اند، نقاط در شکل، تقریباً در یک خط ۴۵ درجه قرار گرفته اند که اعتماد ما را نسبت به کیفیت مدل برآزش شده بیشتر می کند.



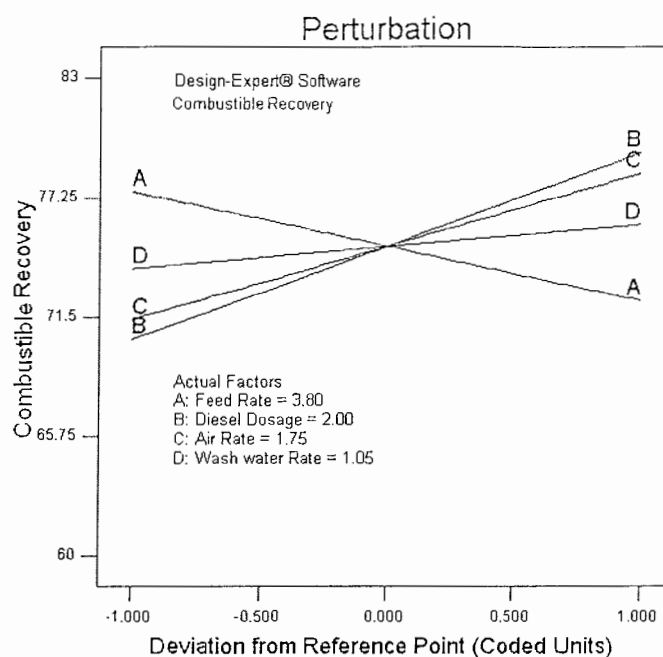
شکل (۵-۶) نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی)

شکل (۵-۶) نمودار Externally Studentized Residuals را نشان می دهد که برای بررسی و شناسایی مقادیر خارج از رده بکار می رود. انجام محاسبات مربوط به این نمودار بدین صورت می باشد که به ترتیب، داده های مربوط به یک آزمایش را بیرون از محاسبات نگه می دارند و سپس توسط بقیه داده ها، پاسخ را توسط مدل محاسبه می کنند. بدین ترتیب پاسخ محاسبه شده توسط مدل و پاسخ واقعی اندازه گیری شده که بیرون از محاسبات نگه داشته شده بود، با یکدیگر مقایسه شده و مانده محاسبه می شود. حال اگر مانده محاسبه شده مربوط به آن آزمایش از خطوط حدی مشخص شده (خطوط قرمز بالا و پایین) که توسط آزمون t مشخص می شود تجاوز کند پاسخ اندازه گیری شده مربوط به آن آزمایش از نظر آماری به عنوان خارج از رده شناخته می شود (Stat-Ease.Inc, 2005).

در نمودار شکل (۵-۶) هیچ کدام از مانده ها از حدود مشخص شده تجاوز نکرده اند بنابراین هیچ یک از پاسخهای (درصد بازیابی) اندازه گیری شده خارج از رده نمی باشند.

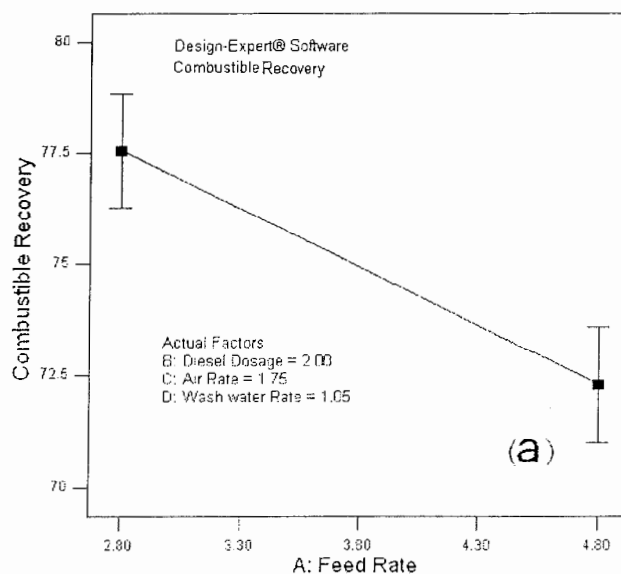
۵-۷-۵- بررسی نتایج پاسخ اول (درصد بازیابی)

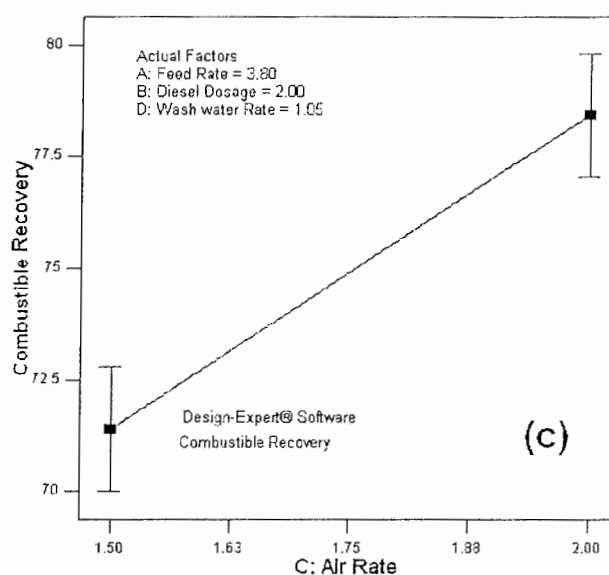
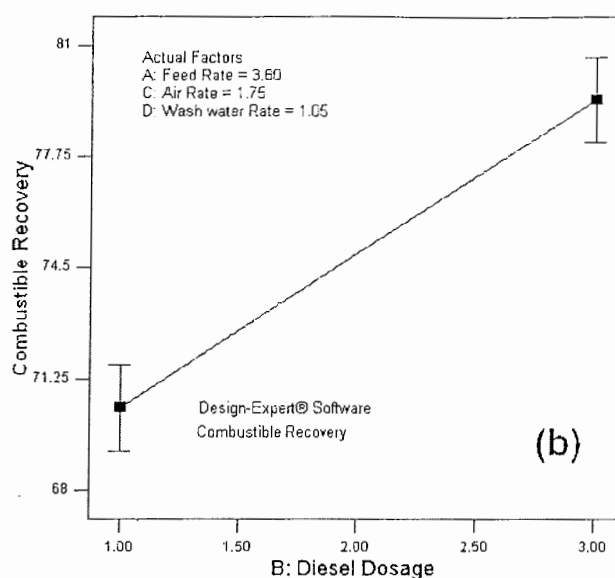
با توجه به حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب مانده ها، به بررسی نتایج حاصله از آزمایشهای مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی) پرداخته شده است. شکل (۵-۷) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ اول (درصد بازیابی) را نشان می دهد.



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

همانطور که ملاحظه می شود عوامل B، C و A به ترتیب عوامل حساس بر پاسخ آزمایشها (درصد بازیابی) بوده و عامل D که به صورت تقریباً خطی افقی است حساسیت خاصی از خود نشان نمی دهد. شکل (۵-۸) تأثیر هر کدام از عوامل را بر پاسخ به صورت خطی هنگامی که از پایین ترین سطحشان (-۱)، تا بالاترین سطحشان (+۱)، تغییر می کند را نشان می دهد.





شکل (۵-۸) نمودار تأثیر عوامل (a) نرخ خوراک دهی، (b) میزان مصرف گازوئیل، (c) نرخ گازدهی بر پاسخ (درصد بازیابی)

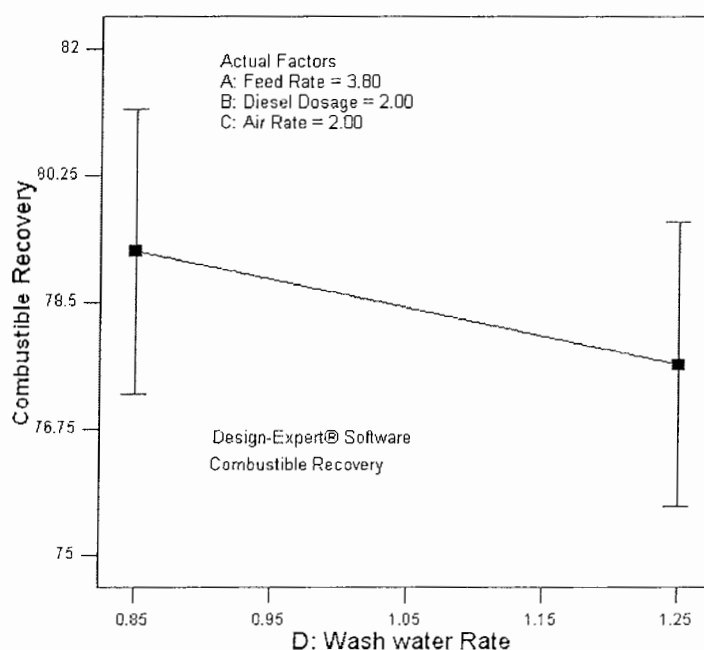
نکته قابل توجه خطوط عمودی است که در ابتدا و انتهای نمودارها به شکل بازه نشان داده شده اند. این خطوط عمودی در سطح احتمال ۹۵٪ کمترین فاصله معنی دار بودن (LSD^2) را نشان می دهند. به عبارت دیگر اگر این بازه ها در ابتدا و انتهای سطوح عامل مورد نظر با هم همپوشانی نداشته باشند، بدین مفهوم است که در سطح احتمال ۹۵٪ تغییر در سطوح بالا و پایین آن عامل، تأثیر معنی داری از نظر آماری در پاسخ داشته است (Stat-Ease.Inc, 2005).

در شکل (۵-۸) ملاحظه می شود که تغییر در سطوح بالا و پایین عامل نرخ خوراک دهی تأثیر معنی داری در پاسخ (درصد بازیابی) داشته است و با افزایش نرخ خوراک دهی درصد بازیابی کاهش

² Least Significant Difference

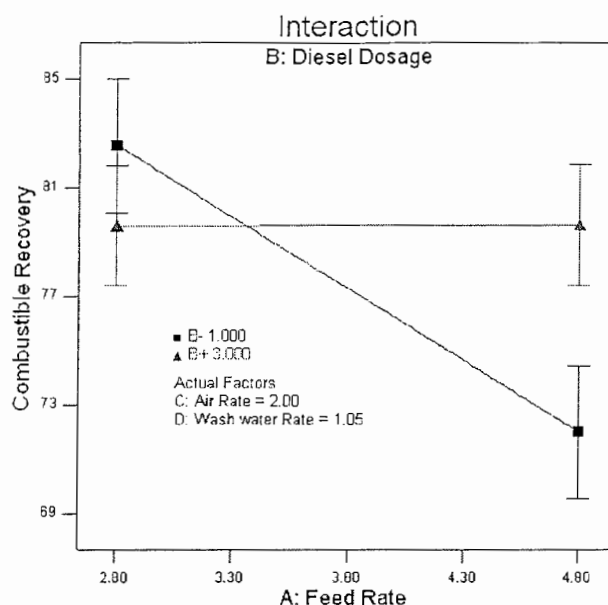
یافته است که منطقی می باشد، چون با افزایش نرخ خوراک دهی تعداد ذرات زغال در واحد حجم ستون در واحد زمان افزایش پیدا کرده و در نتیجه سطح مخصوص حباب ها بیشتر پر شده و ظرفیت حمل حباب شروع به پر شدن می کند، که بازیابی پایین خواهد آمد. میزان مصرف گازوئیل در بازیابی زغال تاثیر مثبت و با اهمیتی داشته است. تاثیر مثبت گازوئیل در بازیابی زغال منطقی است، چون با افزایش میزان گازوئیل (کلکتور) خاصیت آبرانی زغال تقویت شده و بهتر به حباب می چسبند. نرخ گازدهی نیز تاثیر مثبت و با اهمیتی را در بازیابی زغال داشته است. که منطقی می باشد، چون با افزایش میزان گازدهی ماندگی گاز در ستون بیشتر می شود که به تبع آن بازیابی نیز افزایش خواهد یافت. در شکل (۵-۹) نمودار تاثیر عامل نرخ آب شستشو بر بازیابی زغال نشان داده شده است.

همانطور که در نمودار مشخص شده است، خطوط عمودی مربوط به کمترین فاصله معنی دار با هم همپوشانی دارند که به مفهوم معنی دار نبودن تغییر سطوح در عامل نرخ آب شستشو بر بازیابی است.



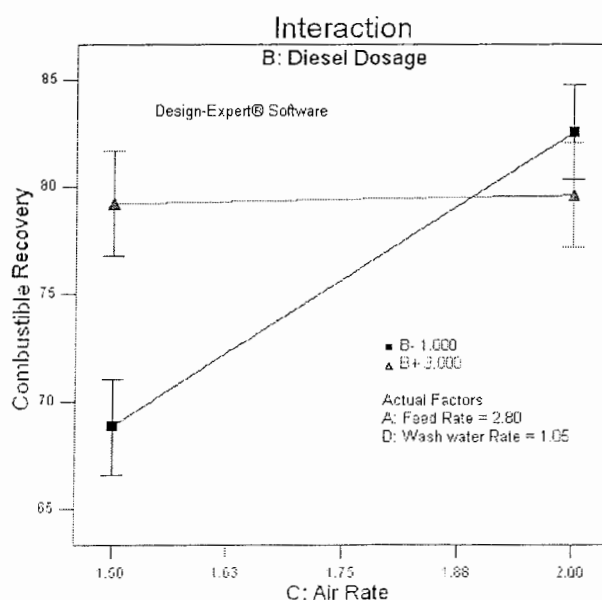
شکل (۵-۹) نمودار تاثیر عامل نرخ آب شستشو بر بازیابی زغال

علاوه بر بررسی اثرات عوامل اصلی، برای درک بهتر از فرآیند و شرایط عملیاتی می بایست اثرات متقابل بین عوامل نیز مورد مطالعه قرار گیرند که بررسی این اثرات از قابلیت های منحصر به فرد روش های طراحی آماری آزمایشها است. شکل (۵-۱۰) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ خوراک دهی و میزان مصرف گازوئیل، (AB) را نشان می دهد.



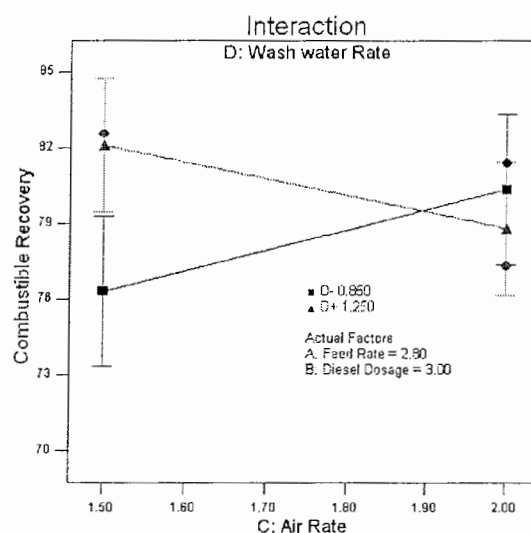
شکل (۵-۱۰) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ خوراک دهی و میزان مصرف گازوئیل در پاسخ اول (درصد بازیابی)

همانطور که در نمودار مشاهده می شود وجود اثر متقابل مشهود است چون در سطح پایین میزان مصرف گازوئیل با افزایش نرخ خوراک دهی درصد بازیابی پایین می آید ولی در سطح بالای میزان مصرف گازوئیل با افزایش نرخ خوراک دهی درصد بازیابی تغییر خاص و معنی داری نمی کند. مطالعه این اثر متقابل پایدارتر شدن شرایط آزمایش در سطح بالای میزان مصرف گازوئیل را در بازیابی زغال نشان می دهد. شکل (۵-۱۱) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ گازدهی و میزان مصرف گازوئیل، (CB) را نشان می دهد.



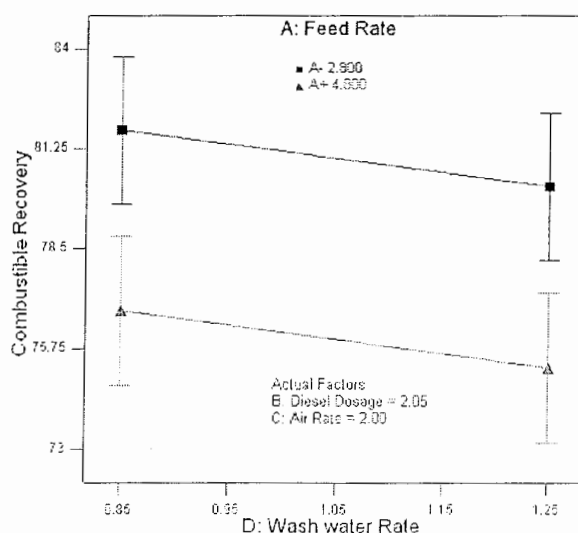
شکل (۵-۱۱) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ گازدهی و میزان مصرف گازوئیل در پاسخ اول (درصد بازیابی)

همانطور که در نمودار مشاهده می شود در سطح پایین میزان مصرف گازوئیل با افزایش نرخ گازدهی درصد بازیابی بالا می رود ولی در سطح بالای میزان مصرف گازوئیل با افزایش نرخ گازدهی درصد بازیابی تغییر خاص و معنی داری نمی کند. شکل (۵-۱۲) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو (CD) را نشان می دهد.



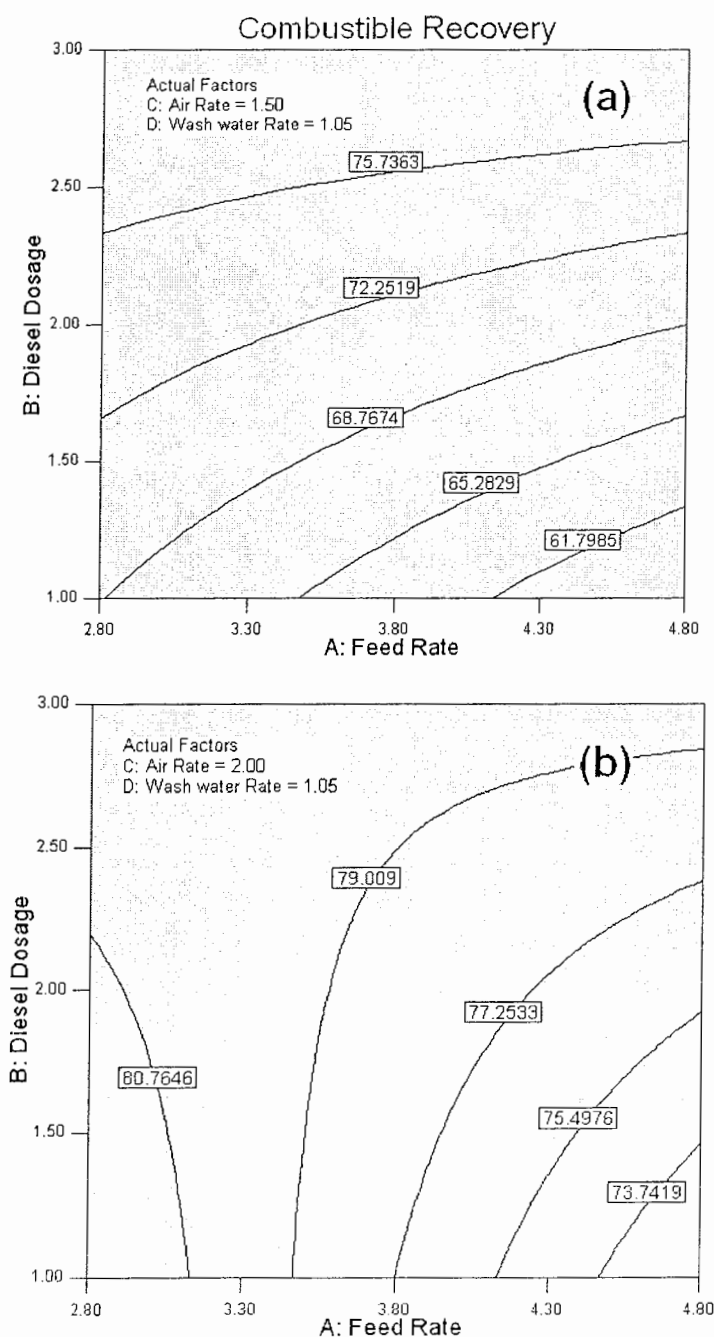
شکل (۵-۱۲) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو در پاسخ اول (درصد بازیابی)

همانطور که در نمودار مشاهده می شود در سطح پایین نرخ آب شستشو با افزایش نرخ گازدهی درصد بازیابی بالا می رود ولی در سطح بالای نرخ آب شستشو با افزایش نرخ گازدهی قضیه برعکس می شود که این رفتار بخوبی وجود اثر متقابل بین این دو عامل را نشان می دهد. حال می توان نمودار را برای حالتی که دو عامل دارای اثر متقابل نباشند نیز تشکیل داد و مورد بررسی قرار داد. شکل (۵-۱۳) نمودار عدم وجود اثر متقابل بین دو عامل نرخ آب شستشو و نرخ خوراک دهی (AD) را نشان می دهد.



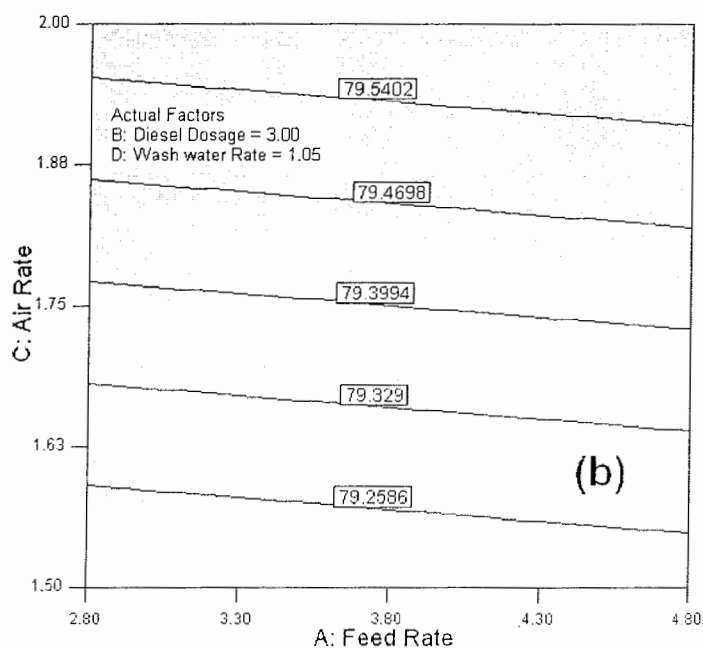
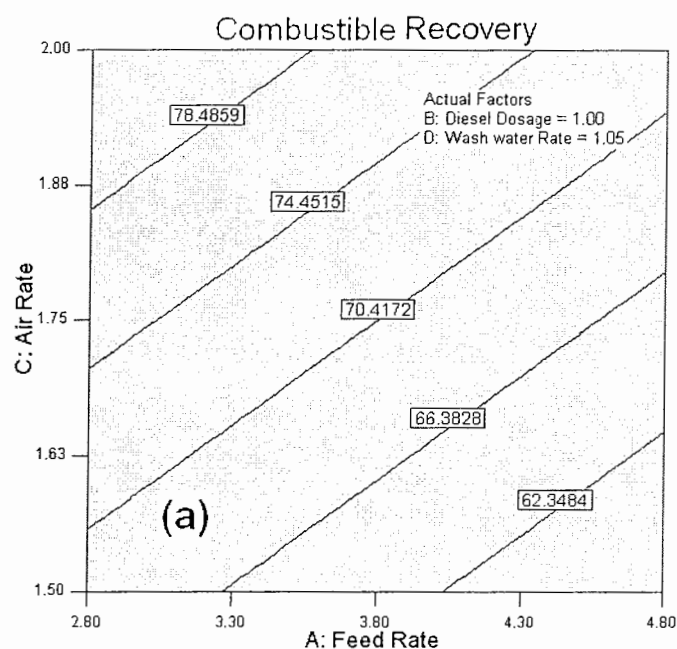
شکل (۵-۱۳) نمودار عدم وجود اثر متقابل بین دو عامل نرخ آب شستشو و نرخ خوراک دهی در پاسخ اول (درصد بازیابی)

همانطور که در نمودار مشاهده می شود به علت عدم وجود اثر متقابل بین دو عامل، رفتار نرخ آب شستشو با تغییر سطح نرخ خوراک دهی تغییری نمی کند. در این مرحله به بررسی دوبعدی عوامل و خطوط همتراز پاسخ پرداخته خواهد شد. در شکل (۵-۱۴) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل بر پاسخ نشان داده شده است.



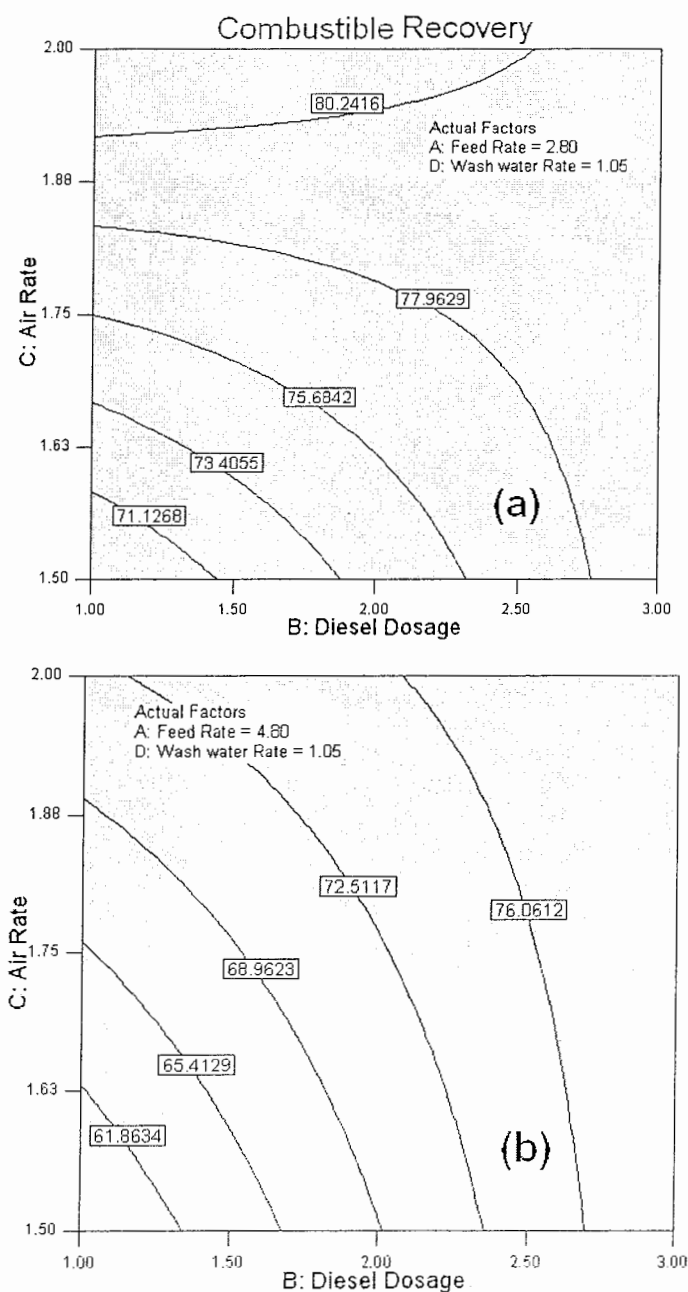
شکل (۵-۱۴) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ خوراک دهی و میزان مصرف گاز وئیل در (a) سطح پایین گاز دهی و (b) سطح بالای گاز دهی بر پاسخ (درصد باز یابی)

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود در هر دو با کاهش نرخ خوراک دهی و افزایش میزان مصرف گازوئیل میزان بازیابی زغال افزایش پیدا می کند. و در مقایسه دو نمودار در سطوح مختلف گازدهی متوجه می شویم که در نرخ بالای گازدهی (2 cm/s) میزان بازیابی زغال بهبود یافته است. در شکل (۵-۱۵) نیز نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ خوراک دهی و نرخ گازدهی بر پاسخ نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۵) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ خوراک دهی و نرخ گازدهی در (a) سطح پایین میزان مصرف گازوئیل و (b) سطح بالای میزان مصرف گازوئیل بر پاسخ (درصد بازیابی)

همانطور که در شکل (۵-۱۵) مشاهده می شود، در سطح پایین میزان مصرف گازوئیل با کاهش نرخ خوراک دهی و افزایش نرخ گازدهی میزان بازیابی زغال افزایش پیدا می کند. ولی در سطح بالای میزان مصرف گازوئیل، تاثیر عامل نرخ خوراک دهی بسیار کم رنگ شده و فقط افزایش در نرخ گازدهی تاثیر مثبت در بازیابی زغال می گذارد. در شکل (۵-۱۶) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی، بر پاسخ نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۶) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی در (a) سطح پایین نرخ خوراک دهی و (b) سطح بالای نرخ خوراک دهی بر پاسخ (درصد بازیابی)

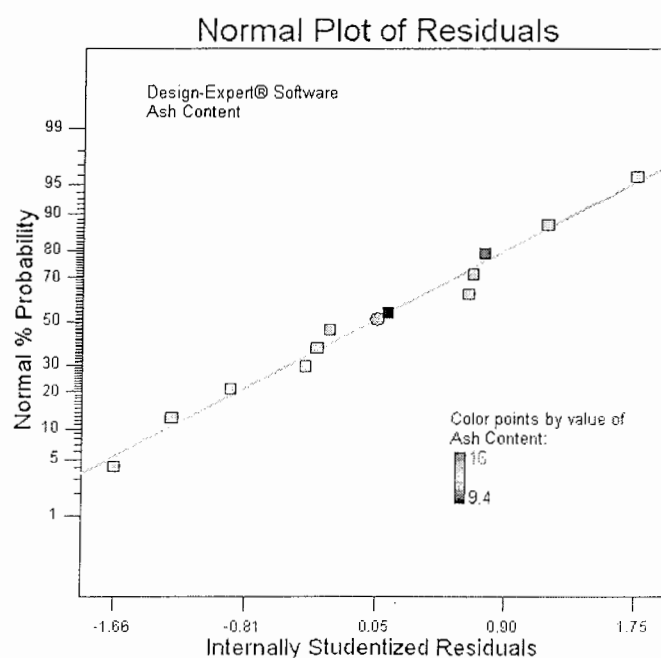
همانطور که در نمودارها مشاهده می شود در هر دو با افزایش میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی میزان بازیابی زغال افزایش پیدا می کند. و در مقایسه دو نمودار در سطوح مختلف نرخ خوراک دهی متوجه می شویم که در نرخ پایین خوراک دهی ($2/8 \text{ Lit/min}$) میزان بازیابی زغال بهبود یافته است.

۵-۸- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

در این بخش تفسیر داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول) مد نظر می باشد.

۵-۸-۱- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

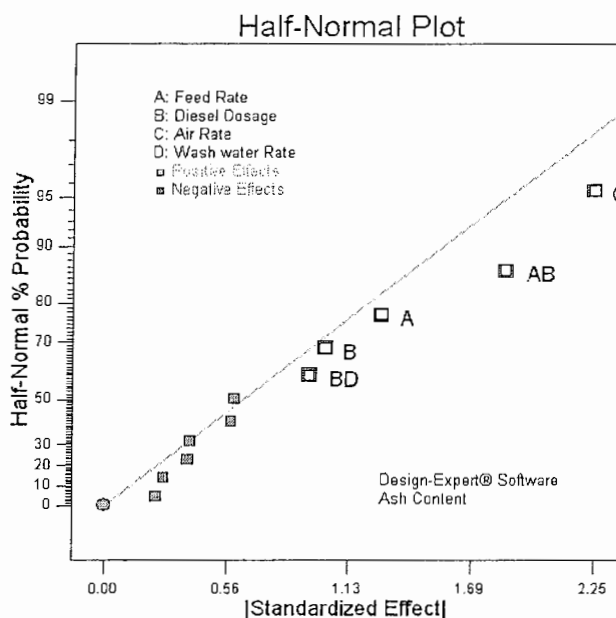
برای برآزش بهتر مدل جهت دستیابی به مدل ریاضی قابل قبول، اگر مانده های مدل (residuals) به صورت نرمال توزیع نشده باشند نیاز به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ می باشد. که در مورد داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)، مانده های مدل به صورت نرمال توزیع شده اند، و در نتیجه نیازی به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ نمی باشد. شکل (۵-۱۷) توزیع مانده ها را نشان می دهد.



شکل (۵-۱۷) منحنی توزیع نرمال مانده ها مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

۵-۸-۲- برآزش مدل بر روی داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

مدل در واقع یک معادله ریاضی است که برای پیش بینی پاسخ بکار می رود. در شکل (۵-۱۸) اثرات عوامل در کاغذ احتمال رسم شده اند تا به صورت گرافیکی عواملی که دارای تاثیر بیشتری در آزمایشها هستند تشخیص داده شوند و در تشکیل مدل بکار روند.



شکل (۵-۱۸) نمودار اثرات عوامل در کاغذ احتمال مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

در جدول (۵-۷) لیست اثرات و نوع آنها و مجموع مربعات مربوط به آنها نشان داده شده است.

جدول (۵-۷) لیست اثرات عوامل و تقابلهای آنها مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

Type	Term	Stded Effect	SumSqr	% Contribution
Require	Intercept			
Model	A-Feed Rate	-1.27917	4.36338	12.6235582
Model	B-Diesel Dosage	-1.01941	2.771204	8.01728341
Model	C-Air Rate	2.254167	13.55005	39.2012183
Error	D-Wash water Rate	-0.39693	0.420139	1.21549078
Model	AB	1.845833	9.085602	26.2852727
Error	AC	-0.58457	0.288935	0.83590941
Error	AD	-0.599	0.956806	2.76810445
Error	BC	-0.23816	0.15125	0.43757668
Model	BD	0.945833	2.385602	6.90171066
Error	CD	-0.38333	0.391852	1.13365443
Error	ABC	-0.27424	0.200556	0.58022105
Aliased	ABD	Aliased		
Aliased	ACD	Aliased		
Aliased	BCD	Aliased		
Aliased	ABCD	Aliased		

بدین ترتیب با توجه به جدول (۵-۷) و شناسایی عواملی که در مدل شرکت دارند، اصطلاحاً مدل 2FI برای برازش بر روی آزمایشات انتخاب گردیده است. معادله تجربی مدل 2FI که درصد خاکستر محصول را برای مقادیر کد شده عوامل تخمین می زند، به صورت زیر می باشد:

[Final Equation in Terms of Coded Factors]:

$$\text{Ash Content} = 12.03 - 0.64A - 0.48B + 1.13C + 0.92AB + 0.47BD$$

۵-۸-۳- آنالیز واریانس پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

در آنالیز واریانس هدف شناسایی عوامل موثر و همچنین ترتیب آنها از نظر اهمیت در پاسخ آزمایشها با انجام یک سلسله عملیات ریاضی است. جدول (۵-۸) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول) را نشان می دهد.

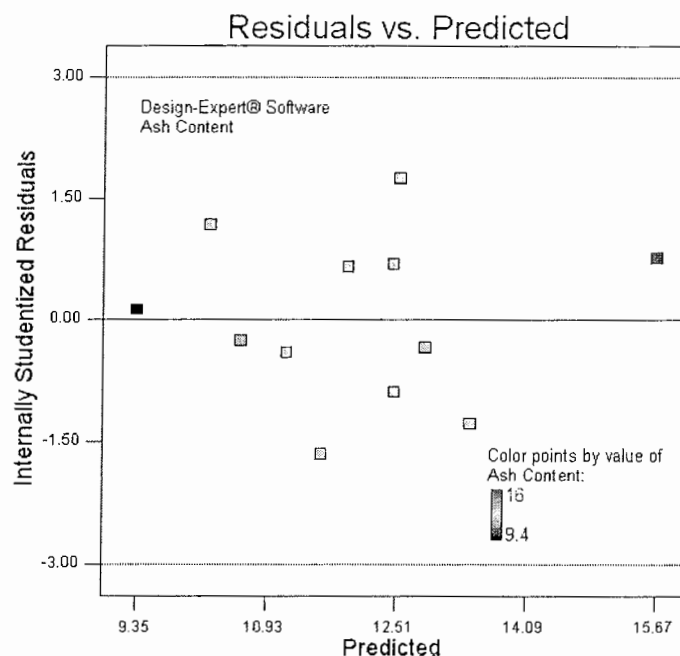
جدول (۵-۸) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	29.927	5	5.985	14.9043	0.0025
A:Feed Rate	4.363	1	4.363	10.8653	0.0165
B:Diesel Dosage	2.771	1	2.771	6.90059	0.0392
C:Air Rate	13.550	1	13.550	33.741	0.0011
AB	9.086	1	9.086	22.6241	0.0031
BD	2.386	1	2.386	5.9404	0.0507
Residual	2.410	6	0.402		
Cor Total	32.337	11			

ملاحظه می شود که مدل برازش شده از نظر آماری معنی دار می باشد و فقط ۰/۲۵٪ احتمال وجود دارد که F-value بزرگتری بر اساس تاثیر اغتشاشات بوجود آید. و همچنین به ترتیب عوامل و اثرات متقابل C (نرخ گازدهی) AB (اثر متقابل میزان مصرف گازوئیل و نرخ خوراک دهی) A (نرخ خوراک دهی)، و B (میزان مصرف گازوئیل)، از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد خاکستر محصول) معنی دار و با اهمیت می باشند و عامل D (نرخ آب شستشو) از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد خاکستر محصول) با اهمیت و معنی دار نمی باشد و در محاسبه خطا بکار رفته است.

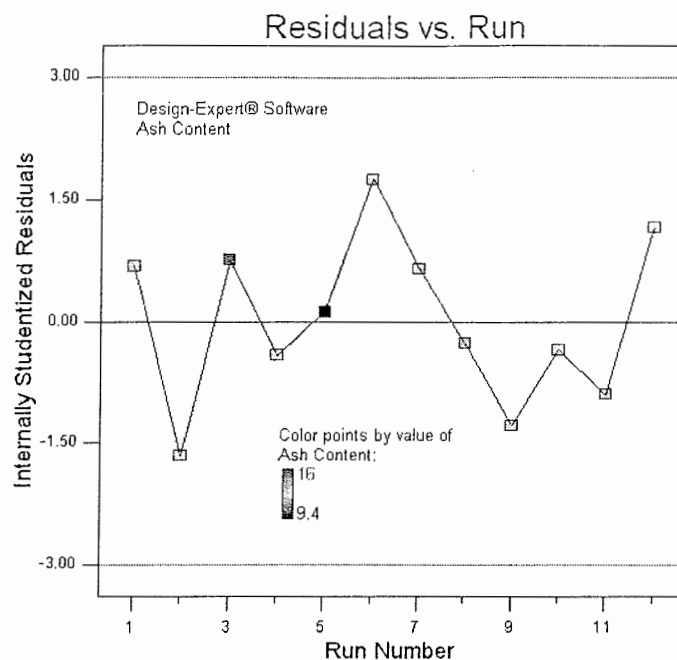
۵-۸-۴- آنالیز خطاهای پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

به منظور بررسی توانایی مدل برازش شده بر آزمایشها و چگونگی عملکرد آن و همچنین نحوه انجام آزمایشها، بهتر است که آنالیز خطاها صورت پذیرد که در شکل های (۵-۱۹) تا (۵-۲۲) این عمل صورت پذیرفته است.



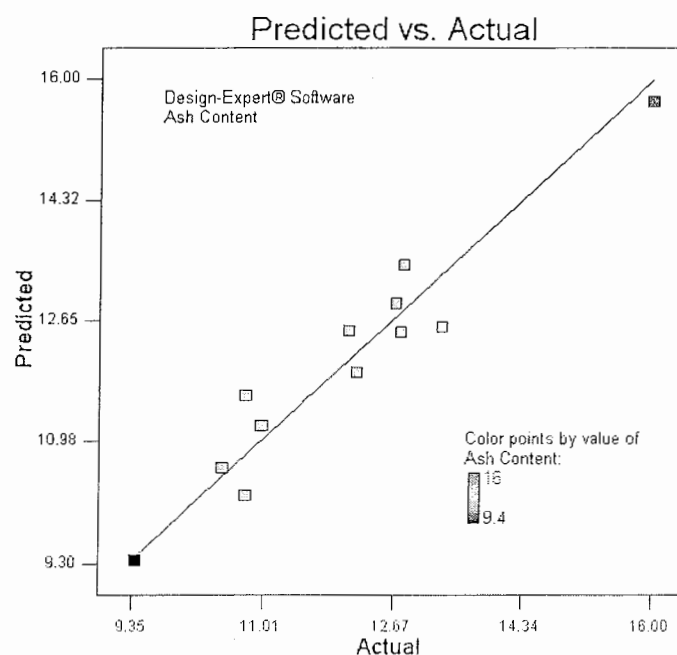
شکل (۵-۱۹) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد خاکستر محصول) توسط مدل

شکل (۵-۱۹) وضعیت مانده ها را با توجه به مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد خاکستر محصول) توسط مدل نشان می دهد. آنچه که انتظار می رود این است که مانده ها نسبت به مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل وابسته نباشند و از الگوی خاصی پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده باشند که نمودار شکل (۵-۱۹) این وضعیت را تایید می کند.



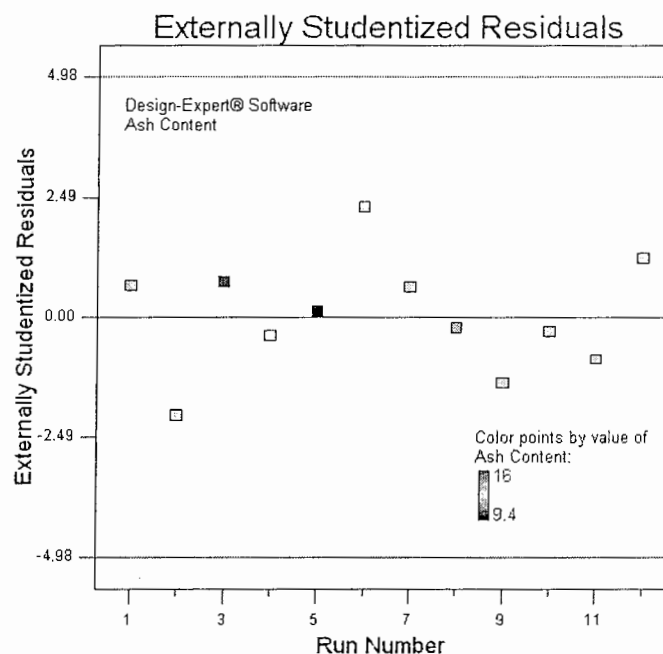
شکل (۵-۲۰) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

در شکل (۵-۲۰) به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر مانده ها با توجه به توالی انجام آزمایشها پرداخته شده است. همانطور که در نمودار نیز مشاهده می شود مقادیر مانده ها به صورت تصادفی پراکنده شده اند که به مفهوم مستقل بودن مانده ها نسبت به توالی انجام آزمایشها است، که مطلوب می باشد.



شکل (۵-۲۱) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد خاکستر محصول) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل

شکل (۵-۲۱) برای بررسی توانایی مدل در پیش بینی مقادیر واقعی پاسخ (درصد خاکستر محصول) بکار می رود. از آنجایی که مقادیر واقعی، و پیش بینی شده پاسخ (درصد خاکستر محصول) توسط مدل، به هم نزدیک بوده اند، نقاط در شکل، تقریباً در یک خط ۴۵ درجه قرار گرفته اند که اعتماد ما را نسبت به کیفیت مدل برازش شده بیشتر می کند.

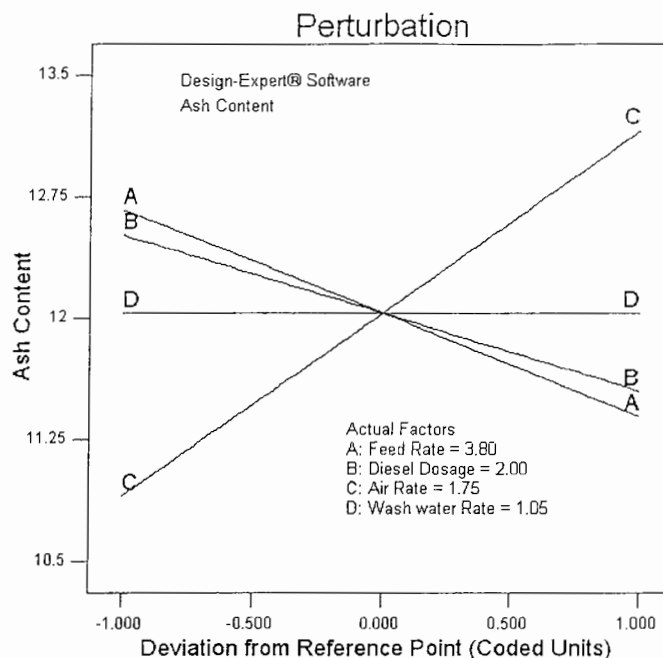


شکل (۵-۲۲) نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

شکل (۵-۲۲) نمودار Externally Studentized Residuals را نشان می دهد که برای بررسی و شناسایی مقادیر خارج از رده بکار می رود. در نمودار شکل (۵-۲۲) هیچ کدام از مانده ها از حدود مشخص شده تجاوز نکرده اند بنابراین هیچ یک از پاسخهای اندازه گیری شده (درصد خاکستر محصول) خارج از رده نمی باشند.

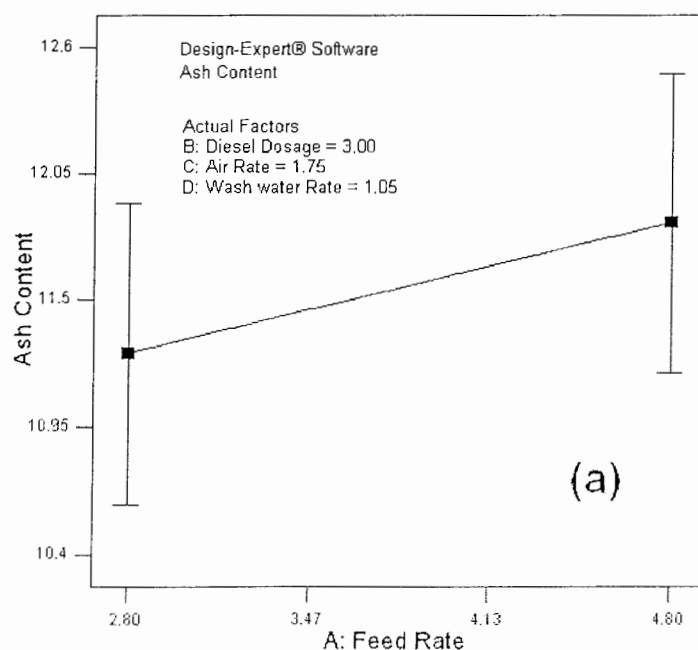
۵-۸-۵- بررسی نتایج پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

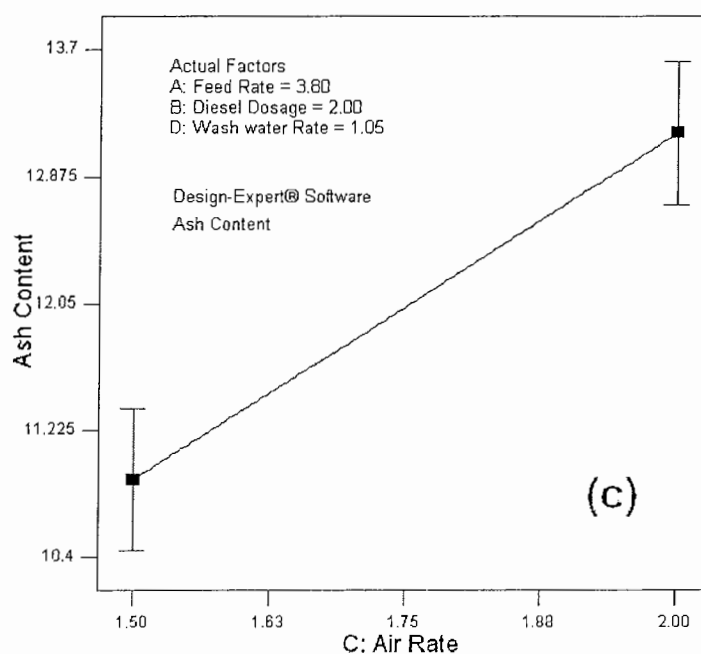
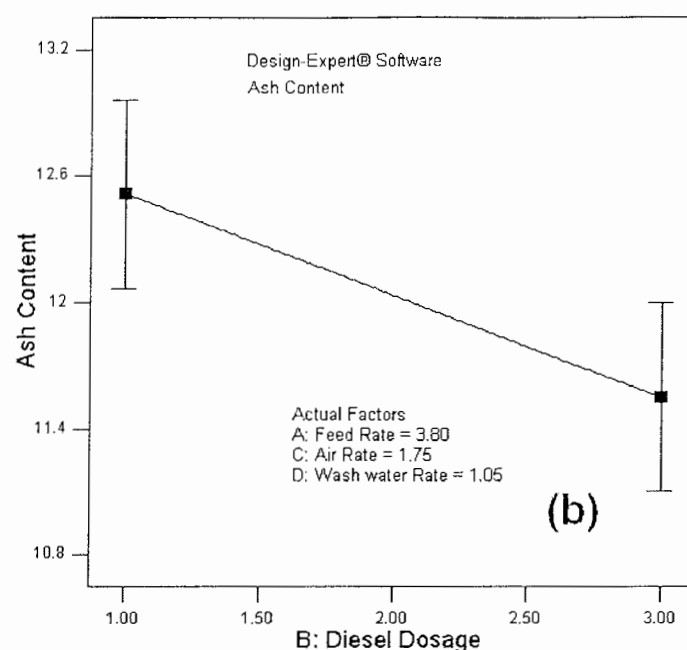
با توجه به حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب مانده ها، به بررسی نتایج حاصله از آزمایشهای مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول) پرداخته شده است. شکل (۵-۲۳) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول) را نشان می دهد.



شکل (۵-۲۳) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

همانطور که ملاحظه می شود عوامل A، C، و B به ترتیب عوامل حساس بر پاسخ آزمایشها (درصد خاکستر محصول) بوده و عامل D که به صورت تقریباً خطی افقی است حساسیت خاصی از خود نشان نمی دهد. شکل (۵-۲۴) تأثیر هر کدام از عوامل را بر پاسخ به صورت خطی هنگامی که از پایین ترین سطحشان (-۱)، تا بالاترین سطحشان (+۱)، تغییر می کند را نشان می دهد.



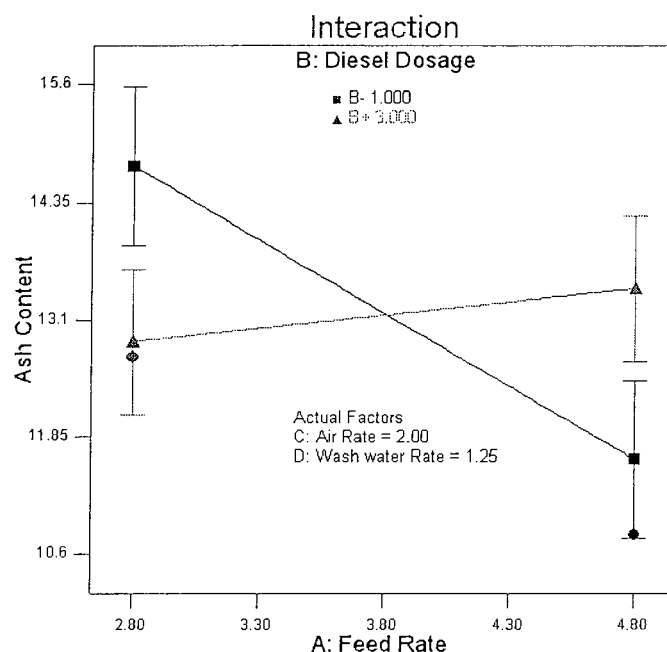


شکل (۵-۲۴) نمودار تأثیر عوامل (a) نرخ خوراک دهی، (b) میزان مصرف گازوئیل، (c) نرخ گاز دهی بر پاسخ (درصد خاکستر محصول)

در شکل (۵-۲۴) ملاحظه می شود که خطوط عمودی کمترین فاصله معنی دار، در دو عامل نرخ خوراک دهی و میزان مصرف گازوئیل، در هر دو با هم همپوشانی دارند. و این می تواند به مفهوم کمتر اهمیت داشتن این عوامل در پاسخ (درصد خاکستر محصول) باشد که منطقی است، چون از نظر آماری هر دوی این عوامل در سطح احتمال ۹۵٪ معنی دار می باشند ولی اگر سطح احتمال را ۹۹٪ در نظر بگیریم هیچ کدام از این دو عوامل معنی دار و با اهمیت نمی شوند. ولی خطوط عمودی کمترین

فاصله معنی دار در نرخ گازدهی، همپوشانی ندارند و در هر دو سطح احتمال نیز این عامل دارای اثر معنی دار و با اهمیتی در پاسخ (درصد خاکستر محصول) است.

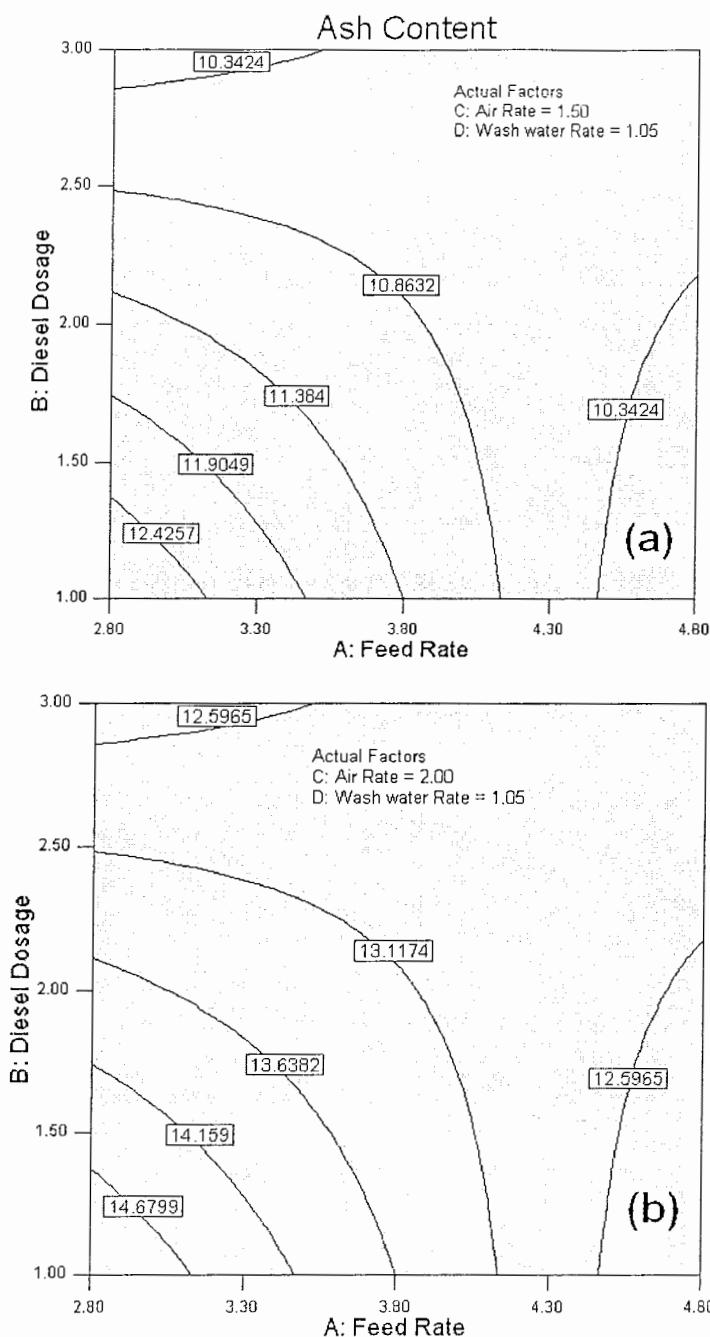
علاوه بر بررسی اثرات عوامل اصلی، برای درک بهتر از فرآیند و شرایط عملیاتی می بایست اثرات متقابل بین عوامل نیز مورد مطالعه قرار گیرند. شکل (۵-۲۵) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ خوراک دهی و میزان مصرف گازوئیل، (AB) را نشان می دهد.



شکل (۵-۲۵) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ خوراک دهی و میزان مصرف گازوئیل در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

همانطور که در نمودار مشاهده می شود وجود اثر متقابل مشهود است چون در سطح پایین میزان مصرف گازوئیل با افزایش نرخ خوراک دهی درصد خاکستر محصول پایین می آید ولی در سطح بالای میزان مصرف گازوئیل با افزایش نرخ خوراک دهی درصد خاکستر محصول تغییر خاص و معنی داری نمی کند (کمی بالا می رود).

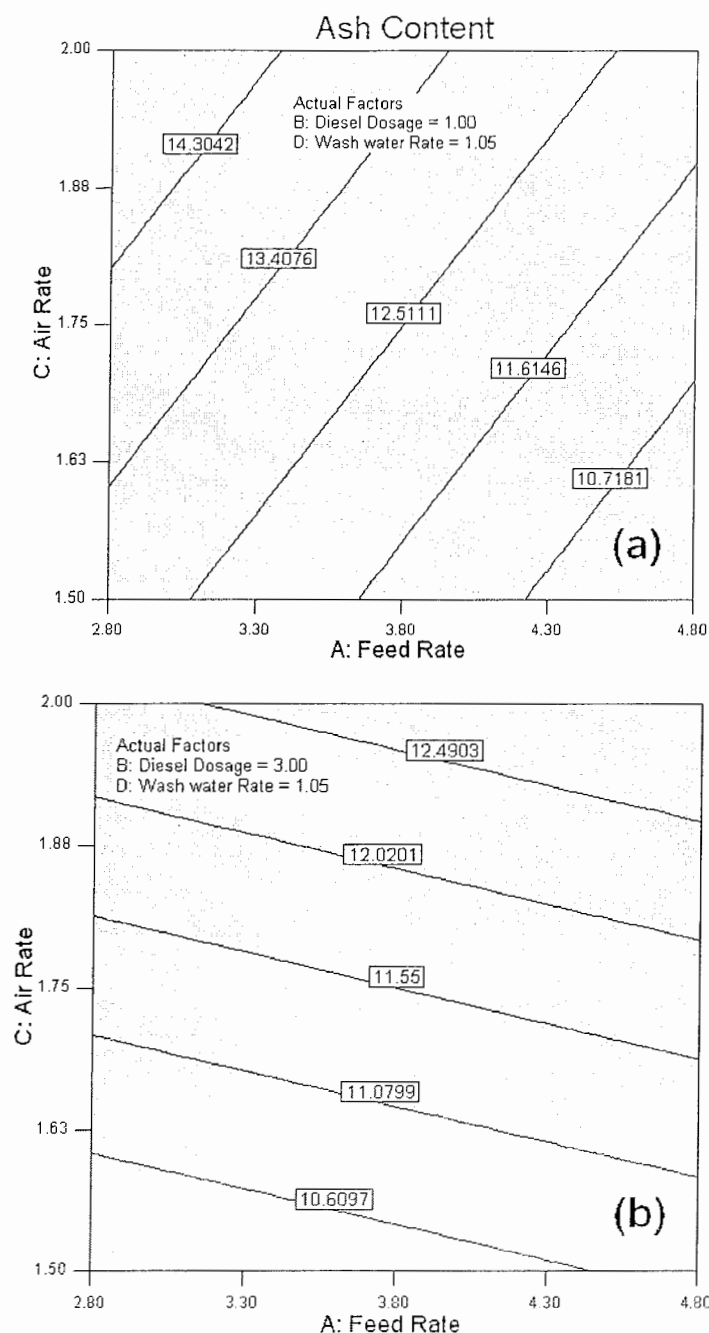
در شکل (۵-۲۶) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل بر پاسخ نشان داده شده است



شکل (۵-۲۶) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ خوراک دهی و میزان مصرف گازوئیل در (a) سطح پایین گازدهی و (b) سطح بالای گازدهی بر پاسخ (درصد خاکستر محصول)

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود در هر دو با کاهش نرخ خوراک دهی و کاهش میزان مصرف گازوئیل، درصد خاکستر محصول افزایش پیدا می کند. و در هر دو در میزان بالای مصرف گازوئیل درصد خاکستر محصول مستقل از نرخ خوراک دهی عمل می کند. و در مقایسه دو نمودار در سطوح مختلف گازدهی متوجه می شویم که در نرخ بالای گازدهی (۲cm/s) میزان درصد خاکستر

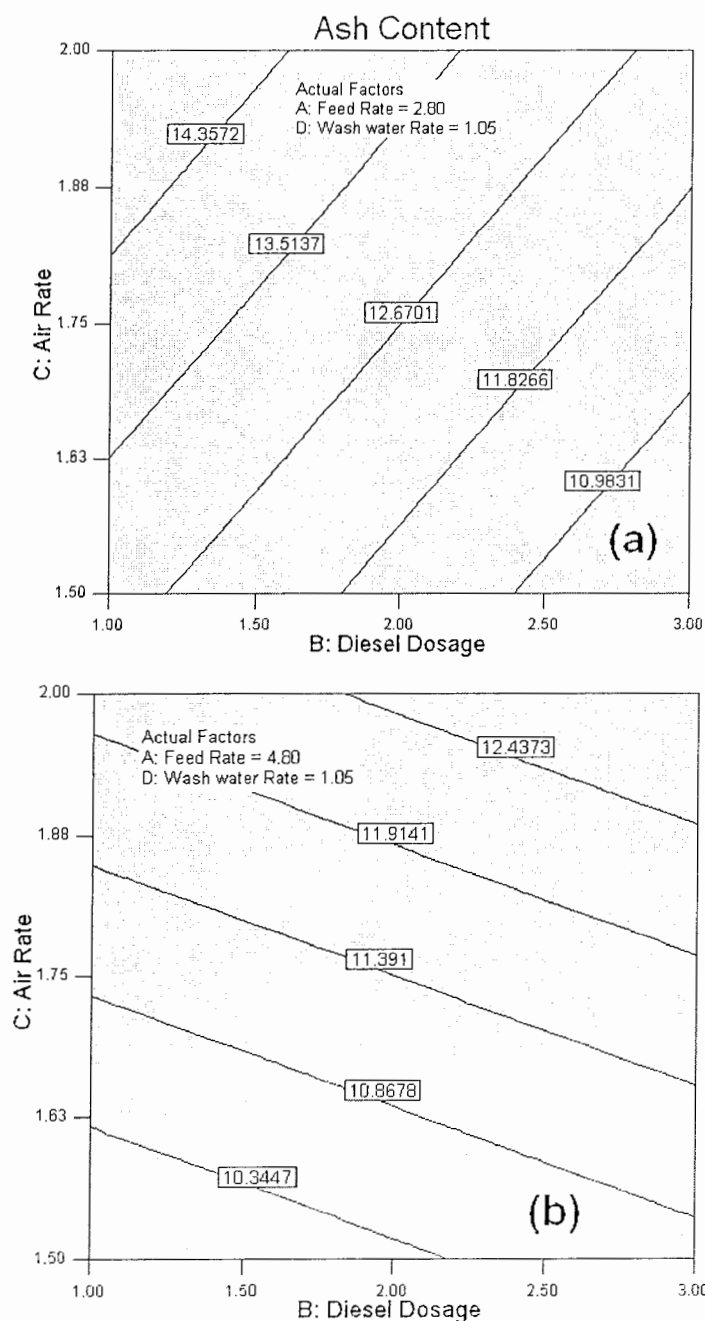
محصول افزایش یافته است. در شکل (۲۷-۵) نیز نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ خوراک دهی و نرخ گازدهی بر پاسخ نشان داده شده است.



شکل (۲۷-۵) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ خوراک دهی و نرخ گازدهی در (a) سطح پایین میزان مصرف گازوئیل و (b) سطح بالای میزان مصرف گازوئیل بر پاسخ (درصد خاکستر محصول)

همانطور که در شکل (۲۷-۵) مشاهده می شود، در سطح پایین میزان مصرف گازوئیل با کاهش نرخ خوراک دهی و افزایش نرخ گازدهی میزان درصد خاکستر محصول زغال افزایش پیدا می کند. ولی در سطح بالای میزان مصرف گازوئیل، تاثیر عامل نرخ خوراک دهی بسیار کم رنگ شده و فقط افزایش

در نرخ گازدهی تاثیر گذار بوده و باعث افزایش در درصد خاکستر محصول زغال می شود. در شکل (۵-۲۸) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تاثیر عوامل میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی، بر پاسخ (درصد خاکستر محصول) نشان داده شده است.



شکل (۵-۲۸) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تاثیر میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی در (a) سطح پایین نرخ خوراک دهی و (b) سطح بالای نرخ خوراک دهی بر پاسخ (درصد خاکستر محصول)

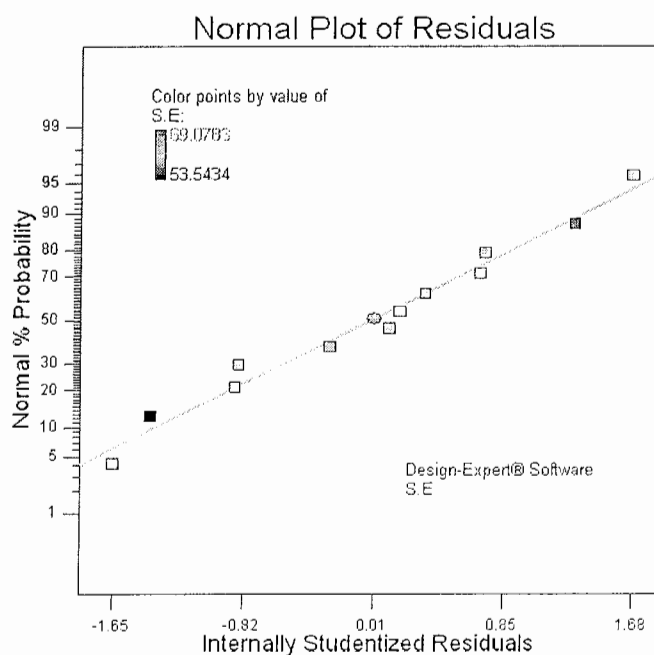
همانطور که در نمودارها مشاهده می شود، رفتار متفاوت منحنی ها در سطوح مختلف نرخ خوراک دهی به دلیل وجود اثر متقابل بین دو عامل میزان مصرف گازوئیل و نرخ خوراک دهی است. به همین دلایل است که مطالعه اثرات متقابل عوامل توسط روشهای آماری آزمایشها ضرورت دارد.

۵-۹-۹-۵- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

در این بخش تفسیر داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش) مد نظر می باشد.

۵-۹-۱-۱-۵- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

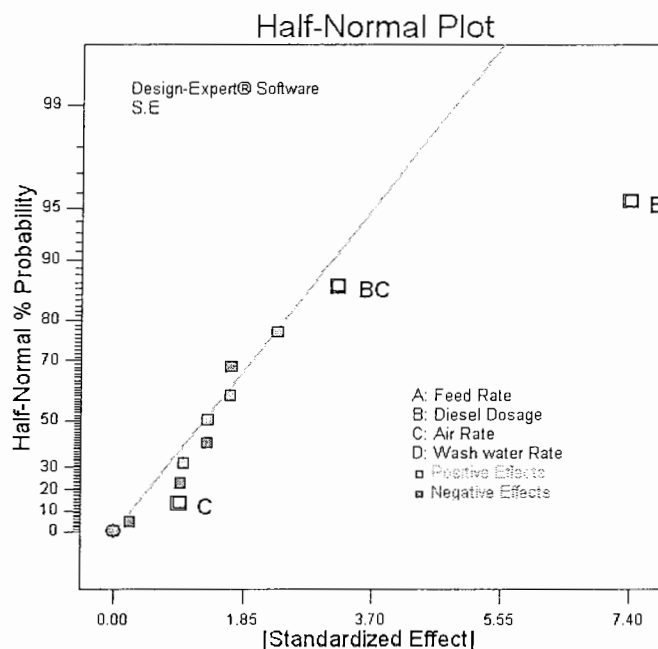
برای برآزش بهتر مدل جهت دستیابی به مدل ریاضی قابل قبول، اگر مانده های مدل (residuals) به صورت نرمال توزیع نشده باشند نیاز به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ می باشد. که در مورد داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)، مانده های مدل به صورت نرمال توزیع شده اند، و در نتیجه نیازی به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ نمی باشد. شکل (۵-۲۹) توزیع مانده ها را نشان می دهد.



شکل (۵-۲۹) منحنی توزیع نرمال مانده ها مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

۵-۹-۲- برآزش مدل بر روی داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

مدل در واقع یک معادله ریاضی است که برای پیش بینی پاسخ بکار می رود. در شکل (۵-۳۰) اثرات عوامل در کاغذ احتمال رسم شده اند تا به صورت گرافیکی عواملی که در تشکیل مدل بکار می روند تشخیص داده شوند.



شکل (۵-۳۰) نمودار اثرات عوامل در کاغذ احتمال مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

در جدول (۵-۹) لیست اثرات و نوع آنها و مجموع مربعات مربوط به آنها نشان داده شده است.

جدول (۵-۹) لیست اثرات عوامل و تقابلهای آنها مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

Type	Term	Effect	SumSqr	% Contribution
Require	Intercept			
Error	A-Feed Rate	-1.66548	5.637735	2.37704238
Model	B-Diesel Dosage	7.399235	164.246	69.2511793
Model	C-Air Rate	0.94096	2.656216	1.11994223
Error	D-Wash water Rate	1.656908	3.91758	1.65177228
Error	AB	1.334528	5.342895	2.25272857
Error	AC	2.329717	13.44225	5.6676657
Error	AD	0.993066	2.95854	1.24741127
Model	BC	-3.20346	30.78647	12.9805209
Error	BD	-0.95656	2.74503	1.15738917
Error	CD	-1.32559	5.271537	2.22264216
Error	ABC	-0.2381	0.170068	0.07170605
Aliased	ABD	Aliased		
Aliased	ACD	Aliased		
Aliased	BCD	Aliased		
Aliased	ABCD	Aliased		

بدین ترتیب با توجه به جدول (۵-۹) و شناسایی عواملی که در مدل شرکت دارند، اصطلاحاً مدل 2FI برای برآزش بر روی آزمایشات انتخاب گردیده است. معادله تجربی مدل 2FI که درصد بازدهی جدایش را برای مقادیر کد شده و واقعی عوامل تخمین می زند، به صورت زیر می باشد:

[Final Equation in Terms of Coded Factors]:

$$S.E = 61.87 + 3.70B + 0.47C - 1.60BC$$

[Final Equation in Terms of Actual Factors]:

$$S.E = 28.75 + 14.92 * \text{Diesel Dosage} + 14.70 * \text{Air Rate} - 6.41 * \text{Diesel Dosage} * \text{Air Rate}$$

۵-۹-۳- آنالیز واریانس پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

در آنالیز واریانس هدف شناسایی عوامل موثر و همچنین ترتیب آنها از نظر اهمیت در پاسخ آزمایشها با انجام یک سلسله عملیات ریاضی است. جدول (۵-۱۰) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش) را نشان می دهد.

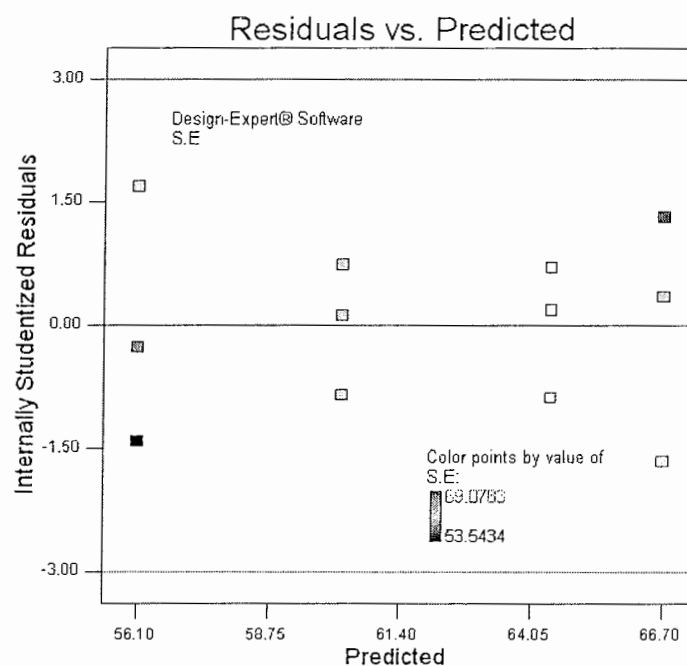
جدول (۵-۱۰) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Model	197.689	3	65.896	13.3509	0.0018
B:Diesel Dosage	164.246	1	164.246	33.2771	0.0004
C:Air Rate	2.656	1	2.656	0.53816	0.4841
BC	30.786	1	30.786	6.2375	0.0371
Residual	39.486	8	4.936		
Cor Total	237.174	11			

ملاحظه می شود که مدل برآزش شده از نظر آماری معنی دار می باشد و فقط ۰/۱۸٪ احتمال وجود دارد که F-value مدل بزرگتری بر اساس تاثیر اغتشاشات بوجود آید. و همچنین به ترتیب عوامل و اثرات متقابل B (میزان مصرف گازوئیل) و CB (اثر متقابل میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی) از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (بازدهی جدایش) معنی دار و با اهمیت می باشند و عوامل A، C و D از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (بازدهی جدایش) با اهمیت و معنی دار نمی باشد

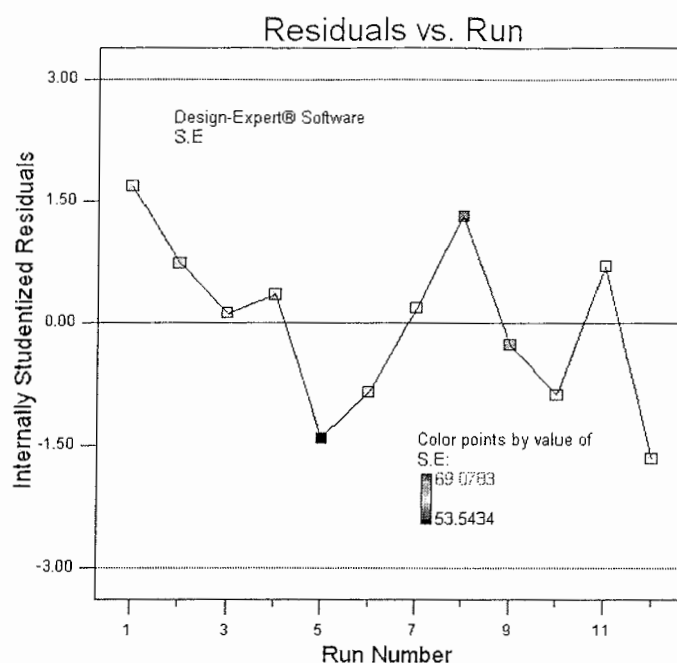
۵-۹-۴- آنالیز خطاهای پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

به منظور بررسی توانایی مدل برازش شده بر آزمایشها و چگونگی عملکرد آن و همچنین مطالعه نحوه انجام آزمایشها بهتر است که آنالیز خطاها صورت پذیرد که در شکل های (۵-۳۱) تا (۵-۳۴) این عمل صورت پذیرفته است.



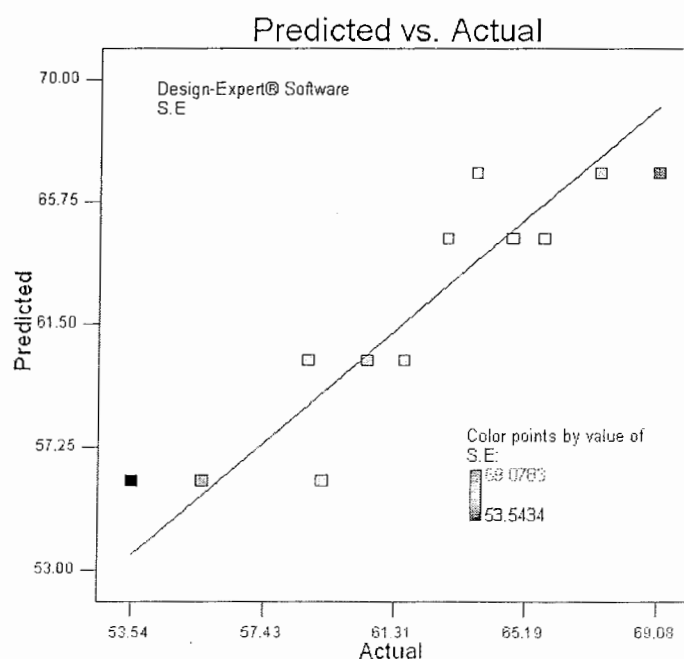
شکل (۵-۳۱) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (بازدهی جدایش) توسط مدل

شکل (۵-۳۱) وضعیت مانده ها را با توجه به مقادیر پیش بینی شده پاسخ (بازدهی جدایش) توسط مدل نشان می دهد. آنچه که انتظار می رود این است که مانده ها نسبت به مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل، وابسته نباشند و از الگوی خاصی پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده باشند که نمودار شکل (۵-۳۱) این وضعیت را تایید می کند.



شکل (۵-۳۲) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

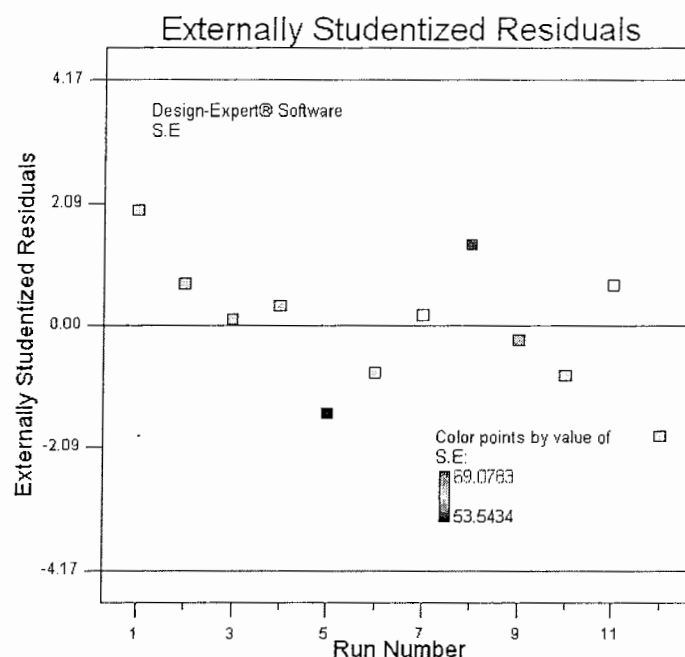
در شکل (۵-۳۲) به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر مانده ها با توجه به توالی انجام آزمایشها پرداخته شده است. همانطور که در نمودار نیز مشاهده می شود مقادیر مانده ها به صورت تصادفی پراکنده شده اند که به مفهوم مستقل بودن مانده ها نسبت به توالی انجام آزمایشها است، که مطلوب می باشد.



شکل (۵-۳۳) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (بازدهی جدایش) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل

شکل (۵-۳۳) برای بررسی توانایی مدل در پیش بینی مقادیر واقعی پاسخ (بازدهی جدایش)

بکار می رود.



شکل (۵-۳۴) نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

شکل (۵-۳۴) نمودار Externally Studentized Residuals را نشان می دهد که برای بررسی و

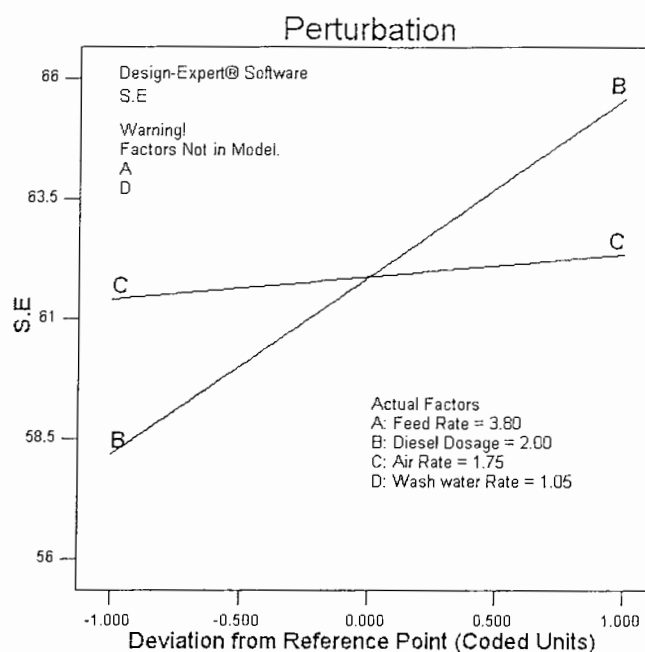
شناسایی مقادیر خارج از رده بکار می رود. در نمودار شکل (۵-۳۴) هیچ کدام از مانده ها از حدود مشخص شده تجاوز نکرده اند بنابراین هیچ یک از پاسخهای اندازه گیری شده (بازدهی جدایش) خارج از رده نمی باشند.

۵-۹-۵- بررسی نتایج پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

با توجه به حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب مانده ها، به بررسی

نتایج حاصله از آزمایشها مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش) پرداخته شده است. شکل (۵-۳۵) نمودار

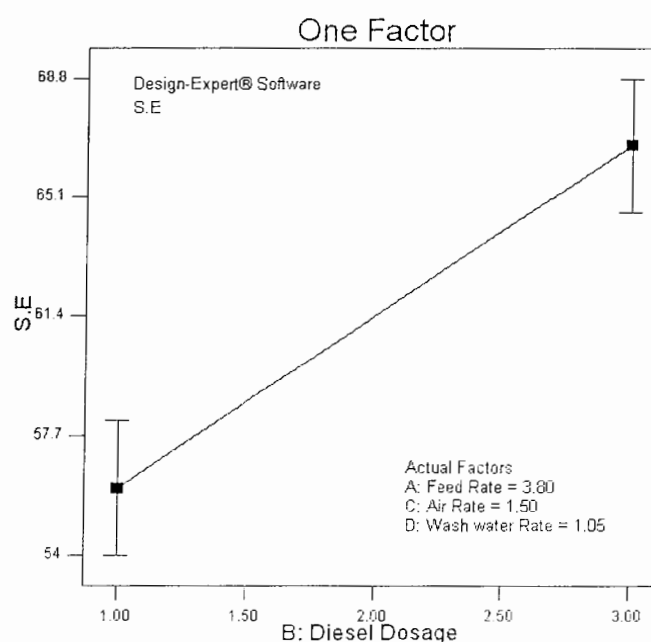
تحلیل حساسیت عوامل تشکیل دهنده مدل نسبت به پاسخ سوم (بازدهی جدایش) را نشان می دهد.



شکل (۳۵-۵) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ سوم (درصد خاکستر محصول)

همانطور که ملاحظه می شود عامل B عامل حساس بر پاسخ آزمایشها (بازدهی جدایش) بوده و عامل C که به صورت تقریباً خطی افقی است حساسیت خاصی از خود نشان نمی دهد. عوامل A و D نیز که در مدل شرکت نداشته اند در تحلیل آورده نشده اند.

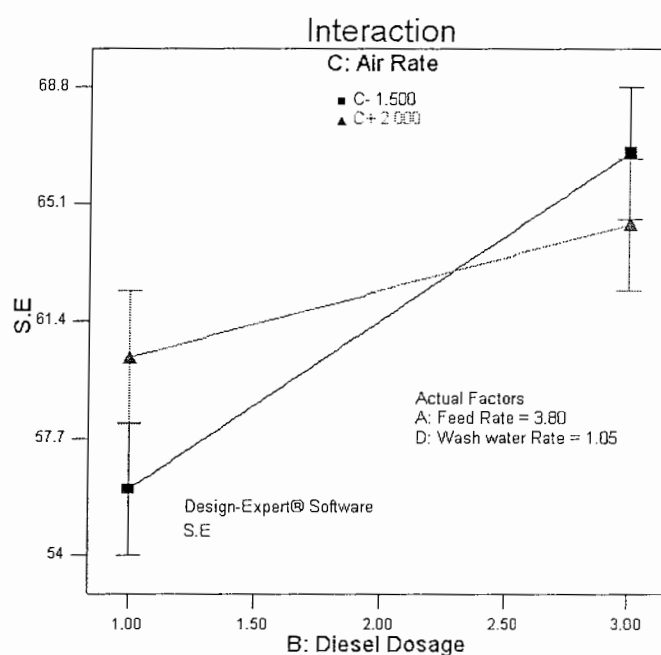
شکل (۳۶-۵) تأثیر عامل B را بر پاسخ (بازدهی جدایش) به صورت خطی هنگامی که از پایین ترین سطحش (۱-)، تا بالاترین سطحش (۱+)، تغییر می کند را نشان می دهد.



شکل (۳۶-۵) نمودار تأثیر عامل میزان مصرف گازوئیل بر پاسخ (بازدهی جدایش)

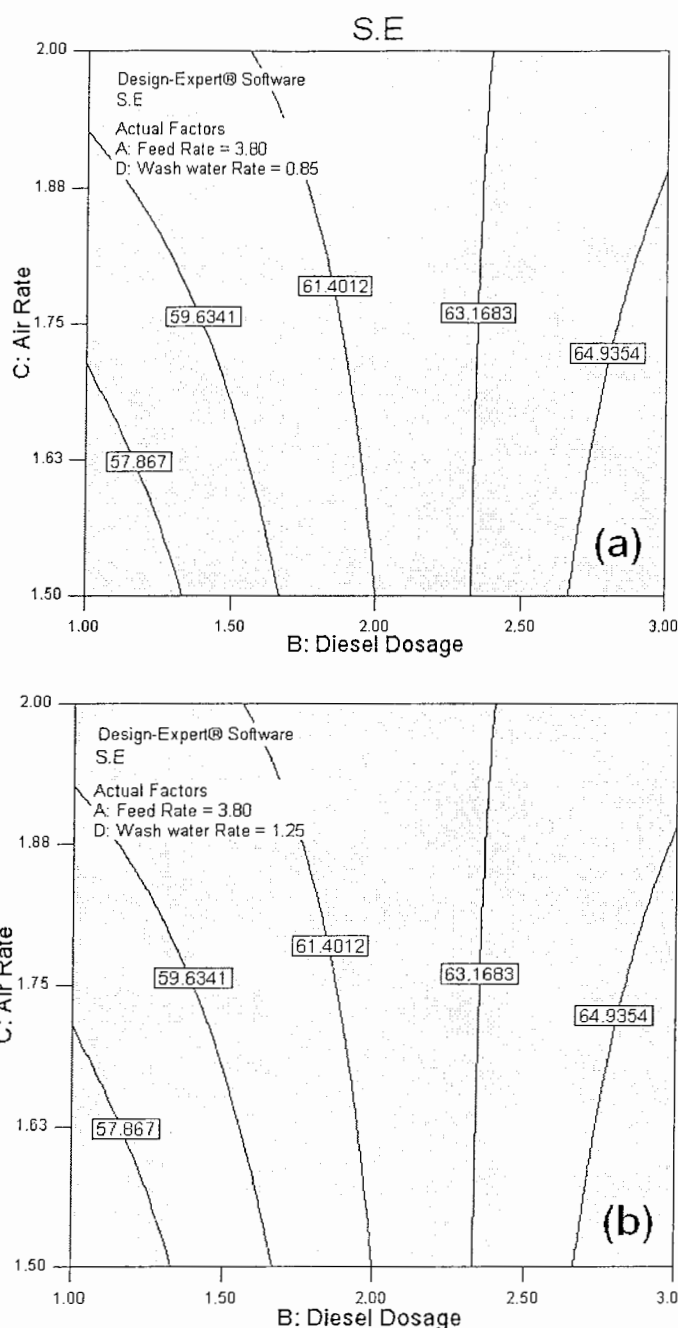
در شکل (۳۶-۵) ملاحظه می شود خطوط عمودی کمترین فاصله معنی دار، در میزان مصرف گازوئیل، همپوشانی ندارند و در هر دو سطح احتمال ۹۵٪ و ۹۹٪ نیز این عامل در پاسخ (بازدهی جدایش) دارای اثر مثبت و با اهمیت است.

علاوه بر بررسی اثرات عوامل اصلی، برای درک بهتر از فرآیند و شرایط عملیاتی می بایست اثرات متقابل بین عوامل نیز مورد مطالعه قرار گیرند شکل (۳۷-۵) نمودار اثر متقابل دو عامل میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی، (BC) را نشان می دهد.



شکل (۳۷-۵) نمودار اثر متقابل دو عامل میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

همانطور که در نمودار مشاهده می شود اثر متقابل وجود دارد چون در سطح پایین نرخ گازدهی با افزایش میزان مصرف گازوئیل بازدهی جدایش بالا می رود ولی در سطح بالای نرخ گازدهی با افزایش میزان مصرف گازوئیل بازدهی جدایش تغییر خاص و معنی داری نمی کند (کمی بالا می رود). در شکل (۳۸-۵) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل بر پاسخ (بازدهی جدایش) نشان داده شده است.



شکل (۵-۳) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف گازوئیل در (a) سطح پایین نرخ آب شستشو و (b) سطح بالای نرخ آب شستشو بر پاسخ (بازدهی جدایش)

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود، رفتار کاملاً مشابه منحنی ها در سطوح مختلف نرخ آب شستشو عدم وجود اثر متقابل بین عوامل میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی را با نرخ آب شستشو نشان می دهد.

با توجه به تحلیل ها و بررسی هایی که در این فصل انجام شد شناخت نسبتاً خوبی نسبت به عوامل موثر و اثرات متقابل آنها در شستشویذیری زغال توسط فلو تاسیون ستونی بدست آمد که مقدمات

لازم را برای مطالعات بیشتر و بهینه سازی عملیات شستشوپذیری زغال در ستون فلو تاسیون توسط روشهای پاسخ سطح را فراهم کرد. بدین ترتیب با توجه به بررسی های انجام شده، عامل میزان مصرف گازوئیل چون در تمام بررسی ها، سطح بالای آن برای آزمایشها مفید بود و باعث پایداریتر شدن هر چه بیشتر شرایط آزمایش می شد، در مرحله بعد (بهینه سازی)، به صورت ثابت در سطح بالای خود (3ml/kg) نگه داشته شد. عامل نرخ خوراک دهی در زمانی که عامل میزان مصرف گازوئیل در سطح بالای خود قرار داده شده بود، تاثیر کمتری در آزمایشها داشت و از طرفی اعمال تغییرات در آن برای رسیدن به هدف در مرحله بعد (بهینه سازی) نیز، از اهمیت چندانی برخوردار نبود، لذا در سطح متوسط خود ($3/6\text{Lit/min}$) به صورت ثابت در نظر گرفته شد. در مورد دو عامل نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو نیز، دوباره در مرحله بعد به عنوان عامل، در سطوح مختلف مورد تغییر قرار گرفتند. در مرحله بعد عامل میزان مصرف کف ساز نیز به صورت عامل جدید به آزمایشها و تحلیل ها اضافه شد.

فصل ششم

بهینه سازی شرایط عملیاتی ستون با استفاده

از روشهای طراحی آماری آزمایشها

۱-۶- مقدمه

همانطور که قبلاً نیز گفته شد یکی از اهداف اصلی انجام تحقیق بهینه سازی شرایط عملیاتی ستون با استفاده از روشهای پاسخ سطح در طراحی آماری آزمایشها بود. که بدین ترتیب با توجه به اطلاعات و شناختی که از انجام آزمایشها در مرحله اول (فصل پنجم) حاصل شد، در این مرحله با هدف بهینه سازی شستشوپذیری زغال با ستون فلوتاسیون توسط روشهای پاسخ سطح در طراحی آماری آزمایشها، تعداد ۱۷ آزمایش در قالب طراحی پاسخ سطح و روش Box-Behnken انجام شد. در این سری از آزمایشات سه عامل نرخ آب شستشو، نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز، انتخاب و درصد بازیابی، درصد خاکستر محصول و بازدهی جدایش به عنوان پاسخهای آزمایشات در نظر گرفته شدند. که در جدول (۱-۶) عوامل مورد مطالعه و تغییرات مربوط به سطوح آنها نشان داده شده است.

جدول (۱-۶) عوامل و سطوح مربوط به طراحی آزمایشات به روش Box-Behnken

نشانه	نام عوامل	واحد	سطح پایین (۱-)	سطح مرکزی (۰)	سطح بالا (۱+)
A	نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1	1.25	1.5
B	نرخ گازدهی	سانتی متر بر ثانیه	1.5	1.75	2
C	میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلوگرم	0.2	0.4	0.6

همه عوامل به صورت عوامل کمی بوده و در سه سطح پایین، متوسط (نقاط مرکزی) و بالا تغییر داده شده اند. بدین ترتیب بر اساس طرح پاسخ سطح و روش Box-Behnken تعداد ۱۷ آزمایش طراحی شد که ۵ تا آنها از نوع نقاط مرکزی هستند که تکرار شده اند و بقیه از نوع نقاط فاکتوریل بلوک ناتمام^۱ می باشند. جهت حذف خطاهای ناشناخته، آزمایشات با ترتیب تصادفی انجام شدند همچنین بلوک بندی نیز انجام شده است. جدول (۲-۶) شرایط آزمایشی و پاسخها را در طراحی انجام شده، نشان می دهد.

^۱ Incomplete Block Factorial

جدول (۲-۶) شرایط آزمایشی و پاسخها در طرح پاسخ سطح (روش Box-Behnken)

Std	Run	Block	Factor 1 A: Wash water Rate Lit/min	Factor 2 B: Air Rate cm/s	Factor 3 C: Frother Dosage mL/Kg	Response 1 Combustible Recovery %	Response 2 Ash Content %	Response 3 S.E %
4	1	Block 2	1.5	2	0.4	73.98	8	65.39
15	2	Block 1	1.25	1.75	0.4	74.88	8.7	65.58
5	3	Block 1	1	1.75	0.2	66.74	7.7	59.89
6	4	Block 2	1.5	1.75	0.2	59.64	6.5	55.05
8	5	Block 1	1.5	1.75	0.6	78.88	8.8	68.11
3	6	Block 1	1	2	0.4	73.18	8.6	64.15
2	7	Block 1	1.5	1.5	0.4	67.00	7.9	60.06
14	8	Block 1	1.25	1.75	0.4	76.71	9.5	66.19
11	9	Block 1	1.25	1.5	0.6	74.62	8.7	65.17
10	10	Block 1	1.25	2	0.2	51.12	6.6	47.70
17	11	Block 1	1.25	1.75	0.4	76.58	8.5	67.19
13	12	Block 1	1.25	1.75	0.4	74.45	7.8	65.76
12	13	Block 1	1.25	2	0.6	75.48	8.3	65.97
7	14	Block 1	1	1.75	0.6	79.88	12.5	63.96
16	15	Block 1	1.25	1.75	0.4	74.80	9	64.74
1	16	Block 1	1	1.5	0.4	75.29	8.7	65.30
9	17	Block 2	1.25	1.5	0.2	66.47	6.9	60.60

شرایط عملیاتی و جزئیات بیشتر این سری از آزمایشها در پیوست ب آورده شده است.

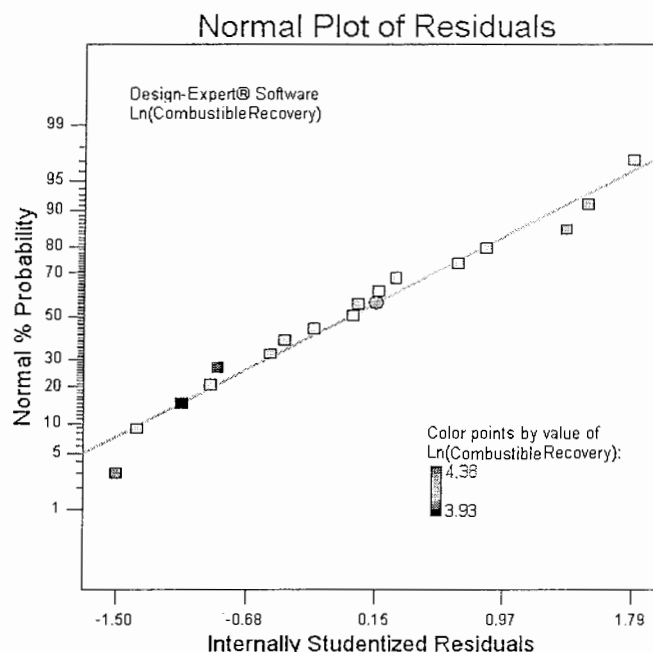
۲-۶- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)

همانطور که قبلاً نیز گفته شد. در این سری از آزمایشات، سه عامل نرخ آب شستشو، نرخ گازدهی، و میزان مصرف کف ساز انتخاب و همچنین برای آنها سه پاسخ با عناوین درصد بازیابی، درصد خاکستر محصول و بازدهی جدایش نیز در نظر گرفته شدند. که در این بخش تفسیر داده های پاسخ اول (درصد بازیابی) مد نظر می باشد.

۲-۶-۱- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)

برای برآزش بهتر مدل جهت دستیابی به مدل ریاضی قابل قبول، اگر مانده های مدل (residuals) به صورت نرمال توزیع نشده باشند نیاز به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ می باشد. که در مورد داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)، بعد از ارزیابی های به عمل آمده با استفاده از نرم افزار،

تبدیل لگاریتم طبیعی مناسب تشخیص داده شد. شکل (۶-۱) توزیع مانده ها را بعد از اعمال تبدیل لگاریتم طبیعی نشان می دهد.



شکل (۶-۱) منحنی توزیع نرمال مانده ها بعد از اعمال تبدیل لگاریتم طبیعی در پاسخ اول (درصد بازیابی)

۶-۲-۲- برآزش مدل بر روی داده های پاسخ اول (درصد بازیابی)

برای بررسی رفتار عوامل بر روی پاسخ احتیاج به برآزش مدل بر پاسخ آزمایشات می باشد. همانطور که قبلاً نیز گفته شد، مدل در واقع یک معادله ریاضی است که برای پیش بینی پاسخ بکار می رود. جدول (۶-۳) به بررسی وضعیت برآزش مدل های مختلف نسبت به یکدیگر پرداخته است.

جدول (۶-۳) بررسی وضعیت برآزش مدل های مختلف نسبت به یکدیگر در پاسخ اول (درصد بازیابی)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	FValue	p-value Prob > F
Mean vs Total	309.5882	1	309.5882		
Block vs Mean	0.018441	1	0.018441		
Linear vs Block	0.113569	3	0.037856	6.126801	0.0091
2FI vs Linear	0.020493	3	0.006831	1.145853	0.3822
Quadratic vs 2FI	0.052534	3	0.017511	93.90005	< 0.0001
Cubic vs Quadratic	0.000314	2	0.000157	Aliased	Aliased

در جدول (۶-۳) برای هر کدام از مدل های مختلف، عدد F-value و p-value نسبت به همدیگر

سنجیده شده است که هر چه مقدار p-value کمتر باشد اهمیت مدل بیشتر شده و به مفهوم برآزش

مناسبتر آن می باشد. در جدول (۴-۶) به بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف پرداخته شده است.

جدول (۴-۶) بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف در پاسخ اول (درصد بازیابی)

Source Model	Std Deviation	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS
Linear	0.0786053	0.605009	0.506261	0.075039	0.17362826
2FI	0.0772102	0.714178	0.523631	-0.53261	0.28769197
Quadratic	0.0136561	0.994039	0.985098	0.926437	0.01380883
Cubic	Aliased	Aliased	Aliased	Aliased	Aliased

با توجه به جدول (۴-۶) هر چه مقادیر ضریب همبستگی های محاسبه شده (R-Square) به یکدیگر نزدیکتر باشد وضعیت مدل برازش شده بهتر است. از طرفی ضریب همبستگی نزدیک ۱ برای مدل، نشان دهنده برازش خوب آن مدل بر آزمایشات می باشد. ستون PRESS نشان دهنده مجموع مربعات خطای تخمین برای هر مدل می باشد. مدلی که برازش خوبی بر آزمایشات داشته باشد مقدار عدد PRESS آن کوچکتر خواهد بود. عبارت Aliased برای مدل Cubic بدین مفهوم است که تعداد آزمایشات کافی برای این مدل انجام نشده است. در جدول (۵-۶) به بررسی نقصان در برازش (Lack of Fit) مدل پرداخته شده است.

جدول (۵-۶) بررسی نقصان در برازش مدل (Lack of Fit) در پاسخ اول (درصد بازیابی)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Linear	0.07334	8	0.009168	45.54384	0.0012
2FI	0.052848	5	0.01057	52.5088	0.0010
Quadratic	0.000314	2	0.000157	0.779394	0.5178
Cubic	0	0	Aliased	Aliased	Aliased

با توجه به جدول (۵-۶) و دقت بر ستون p-value مدلی که نقصان در برازش آن از نظر آماری دارای اهمیت نباشد (p-value بالای ۰/۱)، می بایست انتخاب شود.

بدین ترتیب و با توجه به تحلیل های حاصل از سه جدول (۳-۶)، (۴-۶) و (۵-۶) مدل Quadratic به عنوان بهترین مدل از بین بقیه مدل‌های موجود برای برازش بر روی آزمایشات در پاسخ اول (درصد بازیابی) انتخاب گردیده است.

معادله تجربی مدل Quadratic که درصد بازیابی را برای مقادیر کد شده و واقعی عوامل تخمین

می زند، به صورت زیر می باشد:

[Final Equation in Terms of Coded Factors]:

$$\text{Ln(Combustible Recovery)} = +4.39 - 0.065A - 0.023B + 0.16C + 0.061AC + 0.032BC - 0.074B^2 - 0.095C^2$$

[Final Equation in Terms of Actual Factors]:

$$\text{Ln(Combustible Recovery)} = +1.63 - 0.75 \times \text{Wash water Rate} + 3.79 \times \text{Air Rate} + 0.031 \times \text{Frother Dosage} + 1.23 \times \text{Wash water rate} \times \text{Frother Dosage} + 0.64 \times \text{Air rate} \times \text{Frother Dosage} - 1.18 \times \text{Air Rate}^2 - 2.38 \times \text{Frother Dosage}^2$$

۶-۲-۳- آنالیز واریانس پاسخ اول (درصد بازیابی)

در آنالیز واریانس هدف شناسایی عوامل موثر و همچنین ترتیب آنها از نظر اهمیت در پاسخ

آزمایشها با انجام یک سلسله عملیات ریاضی است. جدول (۶-۶) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ اول

(درصد بازیابی) را نشان می دهد.

جدول (۶-۶) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Block	0.018441	1	0.0184		
Model	0.1862	7	0.0266	145.346	< 0.0001
A-Wash water Rate	0.0211	1	0.0211	115.333	< 0.0001
B-Air Rate	0.0041	1	0.0041	22.289	0.0015
C-Frother Dosage	0.1222	1	0.1222	667.666	< 0.0001
AC	0.0115	1	0.0115	62.956	< 0.0001
BC	0.0032	1	0.0032	17.209	0.0032
B ²	0.0212	1	0.0212	115.548	< 0.0001
C ²	0.0351	1	0.0351	191.653	< 0.0001
Residual	0.0015	8	0.0002		
Lack of Fit	0.0007	4	0.0002	0.819	0.5744
Pure Error	0.0008	4	0.0002		
Cor Total	0.2062	16			

ملاحظه می شود که مدل برازش شده از نظر آماری معنی دار می باشد و کمتر از ۰/۰۱٪

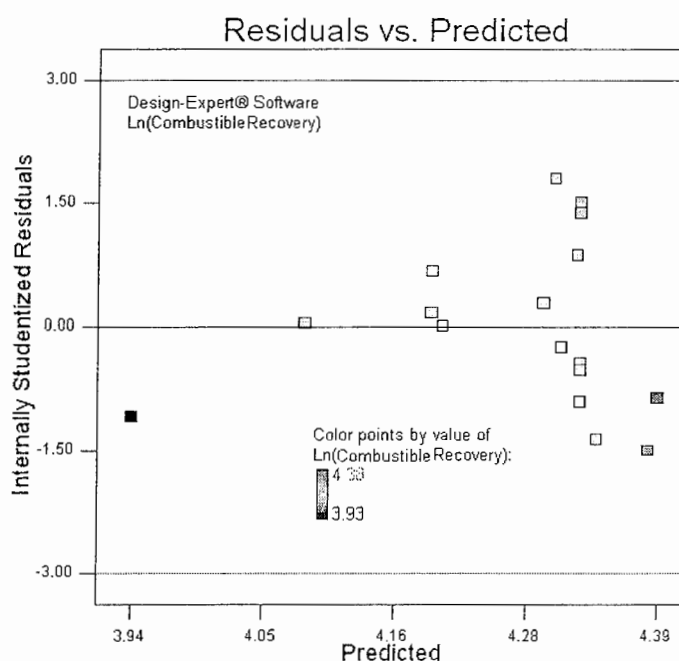
احتمال وجود دارد که F-value بزرگتری بر اساس تاثیر اغتشاشات بوجود آید. و همچنین نقصان در

برازش مدل نیز از نظر آماری دارای اهمیت نمی باشد (p-value بالای ۰/۱) که مطلوب است. به ترتیب

عوامل و اثرات متقابل C (میزان مصرف کف ساز)، B^2 ، C^2 ، A (نرخ آب شستشو)، AC (اثر متقابل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز)، B (نرخ گازدهی)، BC (اثر متقابل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز) از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد بازیابی) معنی دار و با اهمیت می باشند.

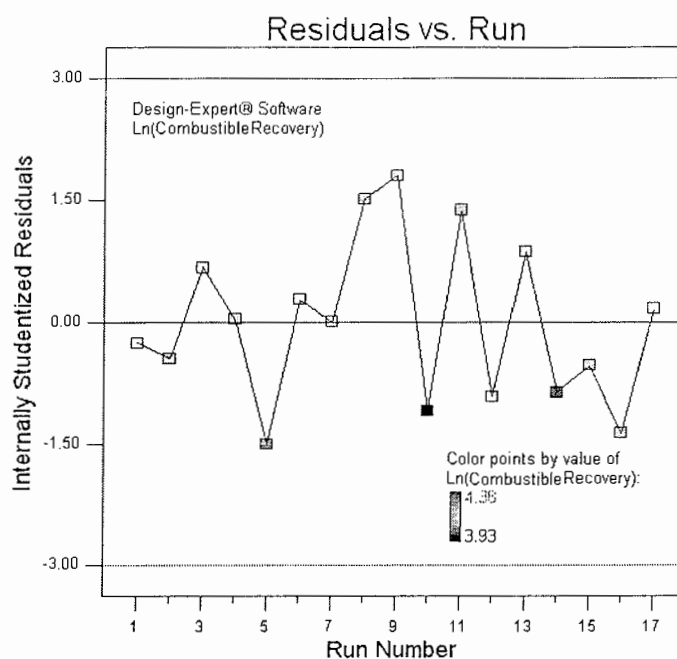
۶-۲-۴- آنالیز خطاهای پاسخ اول (درصد بازیابی)

به منظور بررسی توانایی مدل برازش شده بر آزمایشها و چگونگی عملکرد آن و همچنین نحوه انجام آزمایشها بهتر است که آنالیز خطاها صورت پذیرد که در شکل های (۶-۲) تا (۶-۵) این عمل صورت پذیرفته است.



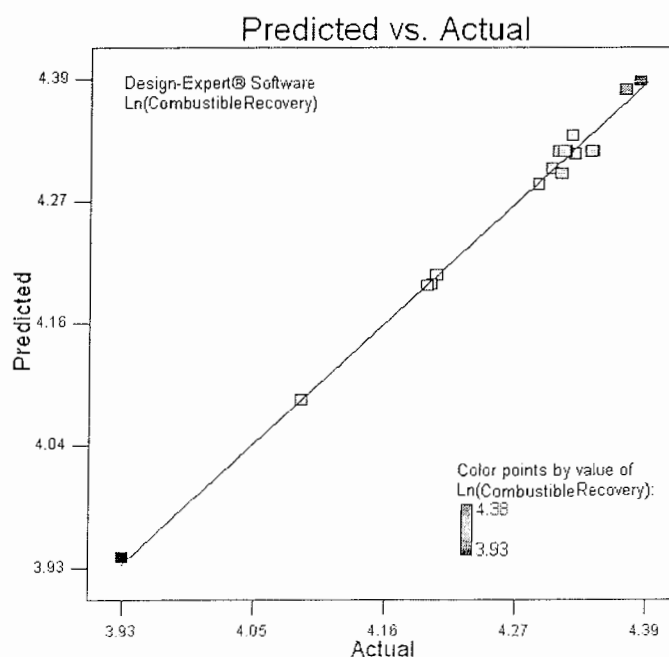
شکل (۶-۲) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل

شکل (۶-۲) وضعیت مانده ها را با توجه به مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل نشان می دهد. آنچه که انتظار می رود این است که مانده ها نسبت به مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل وابسته نباشند و از الگوی خاصی پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده باشند که نمودار این وضعیت را تایید می کند.



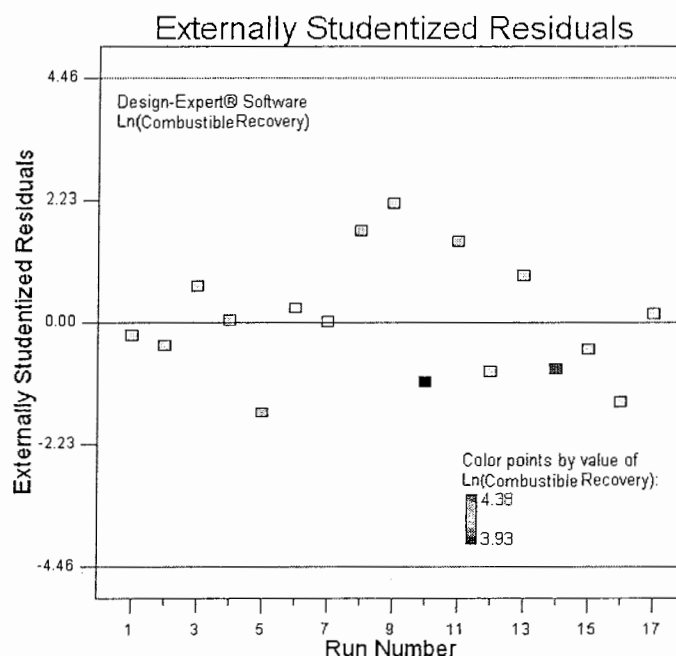
شکل (۳-۶) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی)

در شکل (۳-۶) به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر مانده ها با توجه به توالی انجام آزمایشها پرداخته شده است. همانطور که در نمودار نیز مشاهده می شود مقادیر مانده ها به صورت تصادفی پراکنده شده اند که به مفهوم مستقل بودن مانده ها نسبت به توالی انجام آزمایشها است، که مطلوب می باشد.



شکل (۴-۶) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل

شکل (۴-۶) برای بررسی توانایی مدل در پیش بینی مقادیر واقعی پاسخ (درصد بازیابی) بکار می رود. از آنجایی که مقادیر واقعی، و پیش بینی شده پاسخ (درصد بازیابی) توسط مدل، به هم نزدیک بوده اند، نقاط در شکل، تقریباً در یک خط ۴۵ درجه قرار گرفته اند که اعتماد ما را نسبت به کیفیت مدل برازش شده بیشتر می کند.

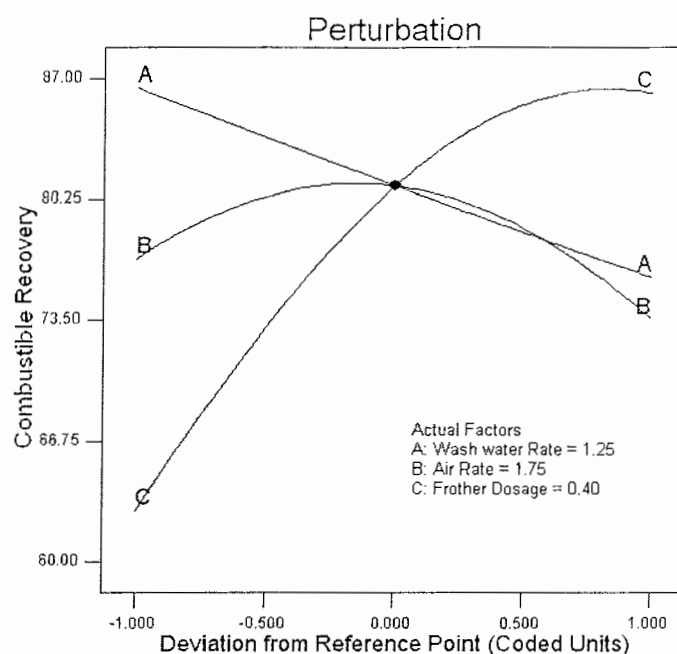


شکل (۴-۵) نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی)

شکل (۴-۵) نمودار Externally Studentized Residuals را نشان می دهد که برای بررسی و شناسایی مقادیر خارج از رده بکار می رود. در نمودار شکل (۴-۵) هیچ کدام از مانده ها از حدود مشخص شده تجاوز نکرده اند بنابراین هیچ کدام از پاسخهای (درصد بازیابی) اندازه گیری شده خارج از رده نمی باشند.

۴-۵-۲-۵- بررسی نتایج پاسخ اول (درصد بازیابی)

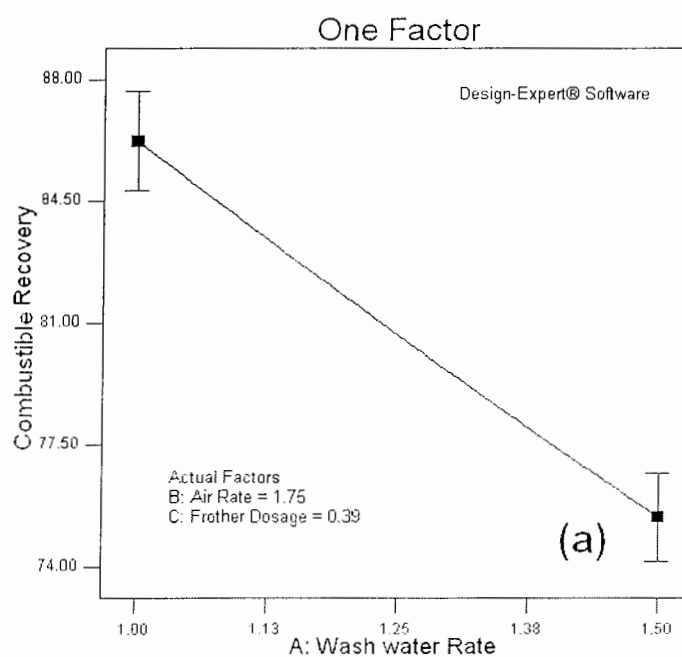
با توجه به حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب مانده ها، به بررسی نتایج حاصله از آزمایشهای مربوط به پاسخ اول (درصد بازیابی) پرداخته شده است. شکل (۴-۶) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ اول (درصد بازیابی) را نشان می دهد.

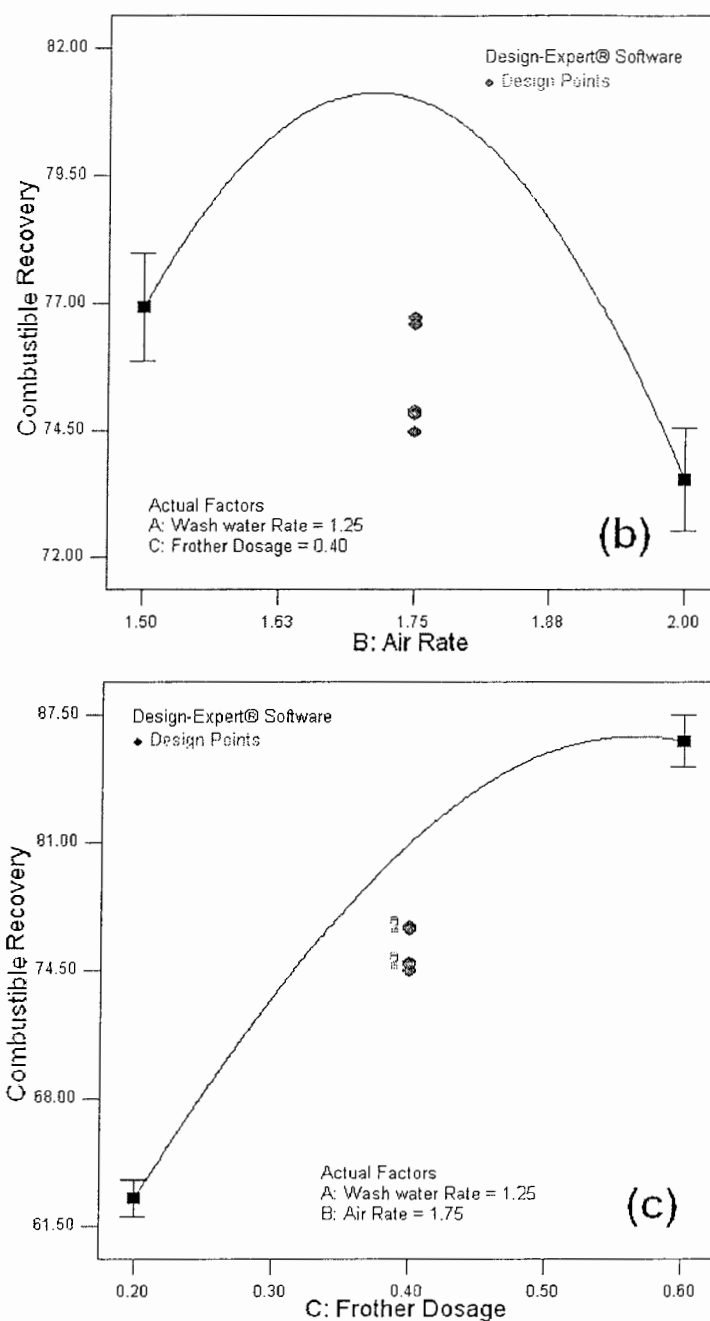


شکل (۶-۶) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ اول (درصد بازیابی)

همانطور که ملاحظه می شود عوامل C، A و B به ترتیب عوامل حساس بر پاسخ آزمایشها (درصد بازیابی) هستند.

شکل (۶-۷) تأثیر هر کدام از عوامل را بر پاسخ هنگامی که از پایین ترین سطحشان (۱-)، تا بالاترین سطحشان (۱+)، تغییر می کند را نشان می دهد.



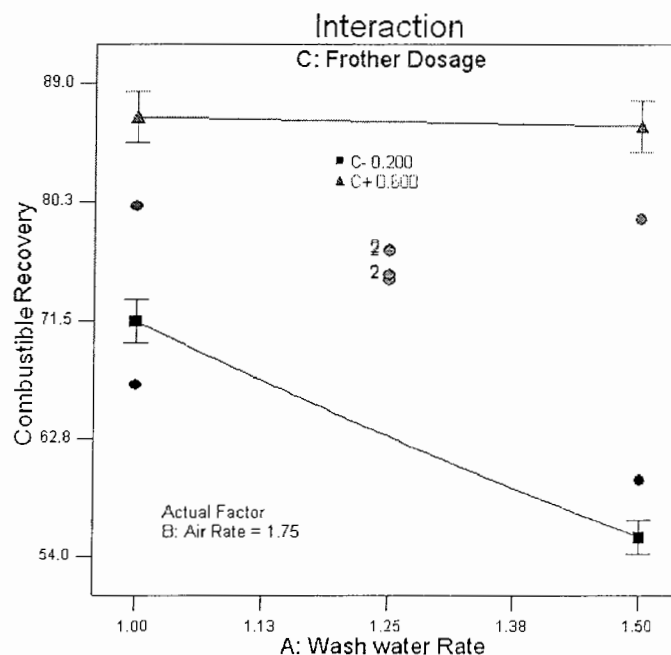


شکل (۷-۶) نمودار تأثیر عوامل (a) نرخ آب شستشو، (b) نرخ گازدهی، (c) میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (درصد بازیابی)

در شکل (۷-۶) ملاحظه می شود که تغییر در سطوح بالا و پایین عامل نرخ آب شستشو تأثیر معنی داری در پاسخ (درصد بازیابی) داشته است و با افزایش نرخ آب شستشو درصد بازیابی کاهش یافته است که منطقی می باشد، چون با افزایش نرخ آب شستشو میزان برگشتی از کف بیشتر می شود که به تبع آن درصد بازیابی کاهش خواهد یافت. تغییر در سطوح نرخ گازدهی در بازیابی زغال تأثیر متفاوتی داشته است، بدین صورت که در سطح مرکزی، تغییر نرخ گازدهی بیشترین تأثیر مثبت را در

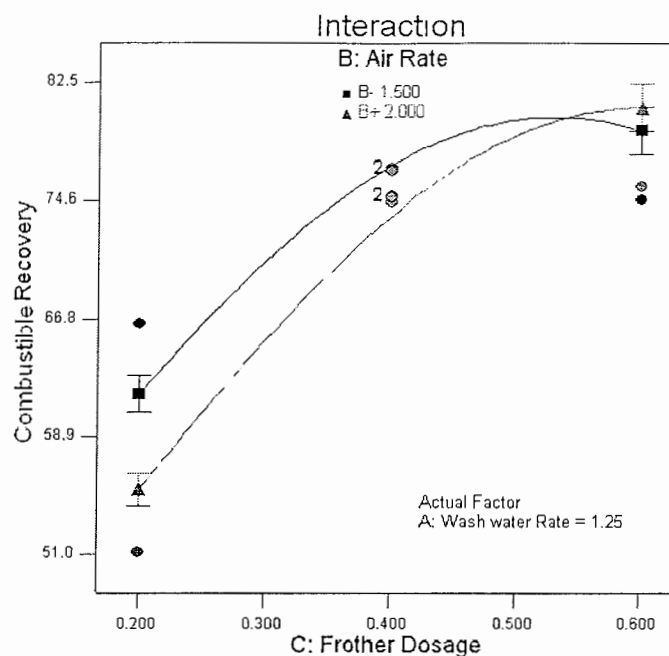
بازیابی زغال داشته است، بدین دلیل است که عامل B^2 در آنالیز واریانس از نظر آماری معنی دار شده است. میزان مصرف کف ساز نیز تاثیر مثبت و با اهمیتی را در بازیابی زغال داشته است. که منطقی می باشد، چون با افزایش میزان مصرف کف ساز پایداری کف بیشتر شده و همچنین قطر حباب های تشکیل شده نیز کمتر می شود که باعث افزایش سطح مخصوص حباب ها می شود و تاثیر بسیار زیادی در افزایش ماندگی گاز در ستون دارد که به تبع آن بازیابی نیز افزایش می یابد.

علاوه بر بررسی اثرات عوامل اصلی، برای درک بهتر از فرآیند و شرایط عملیاتی می بایست اثرات متقابل بین عوامل نیز مورد مطالعه قرار گیرند. شکل (۶-۸) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز، (AC) را نشان می دهد.



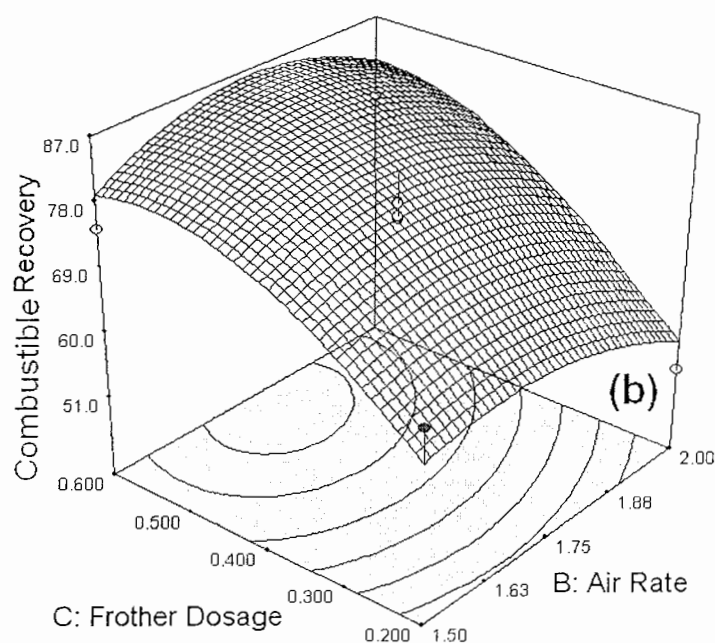
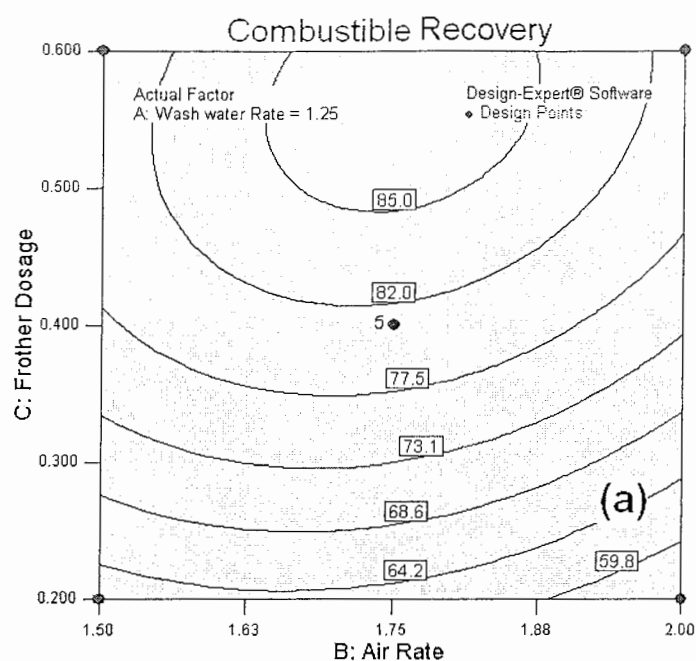
شکل (۶-۸) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز در پاسخ اول (درصد بازیابی)

همانطور که در نمودار مشاهده می شود اثر متقابل وجود دارد چون در سطح پایین میزان مصرف کف ساز با افزایش نرخ آب شستشو درصد بازیابی پایین می آید ولی در سطح بالای میزان مصرف کف ساز شرایط بهتر و پایدارتر شده است و با تغییر سطح نرخ آب شستشو درصد بازیابی تغییر خاص و معنی داری نمی کند. شکل (۶-۹) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز، (BC) را نشان می دهد.



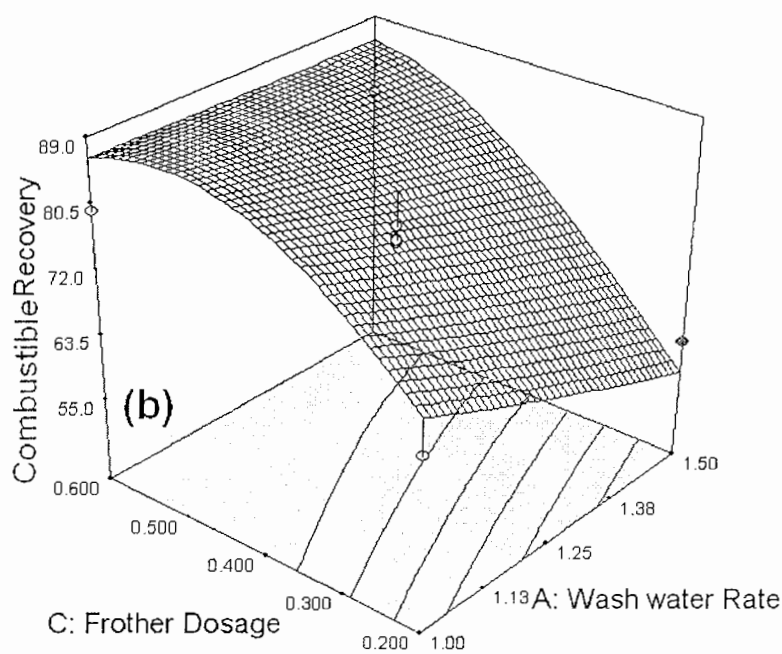
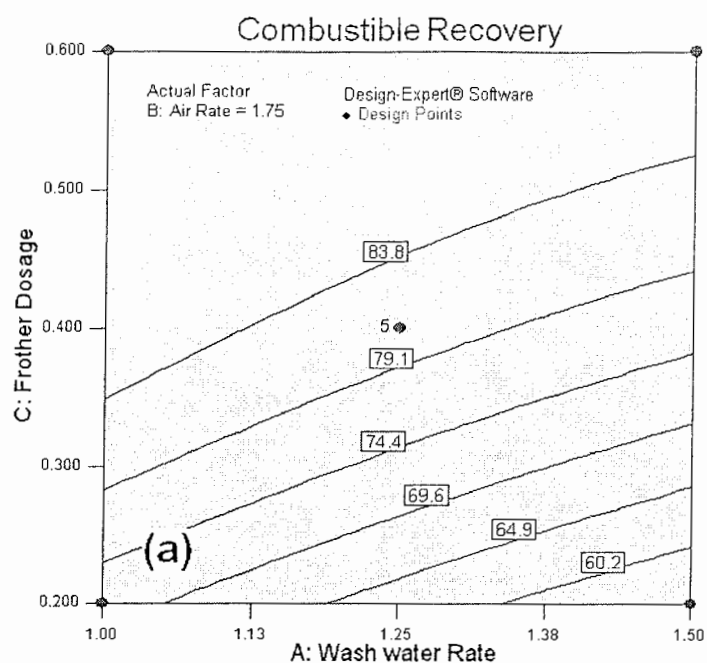
شکل (۹-۶) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز در پاسخ اول (درصد بازیابی)

همانطور که در نمودار مشاهده می شود، تقابل بین دو عامل وجود دارد (اثرات موازی نیستند) ولی چندان دارای اهمیت نمی باشد، چون رفتار منحنی در هر دو سطح نرخ گازدهی تقریباً مشابه است. در این مرحله به بررسی دوبعدی و سه بعدی عوامل و خطوط همتراز پاسخ پرداخته خواهد شد. در شکل (۱۰-۶) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی تأثیر عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (درصد بازیابی) نشان داده شده است.



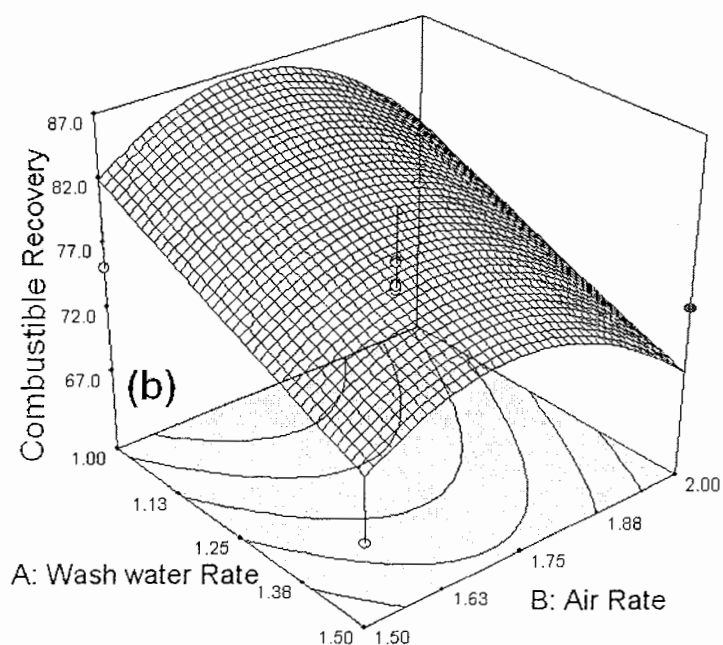
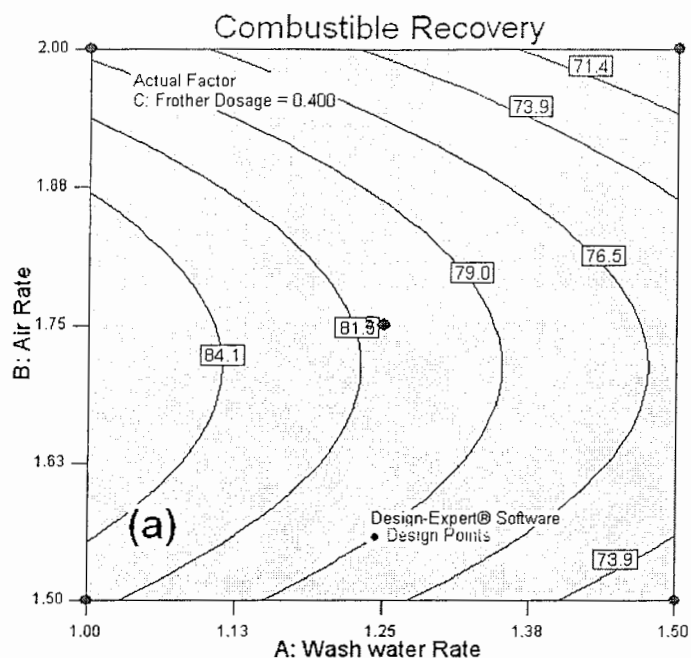
شکل (۶-۱۰) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (درصد بازیابی)

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود در سطح میانی نرخ گازدهی و با افزایش میزان مصرف کف ساز میزان بازیابی زغال افزایش یافته است. در شکل (۶-۱۱) نیز نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ نشان داده شده است.



شکل (۱۱-۶) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (درصد بازیابی)

همانطور که در شکل (۱۱-۶) مشاهده می شود، با کاهش نرخ آب شستشو و افزایش میزان مصرف کف ساز میزان بازیابی زغال افزایش پیدا می کند. در شکل (۱۲-۶) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی، بر پاسخ نشان داده شده است.



شکل (۶-۱۲) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی بر پاسخ (درصد بازیابی)

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود در سطح میانی نرخ گازدهی و با کاهش نرخ آب

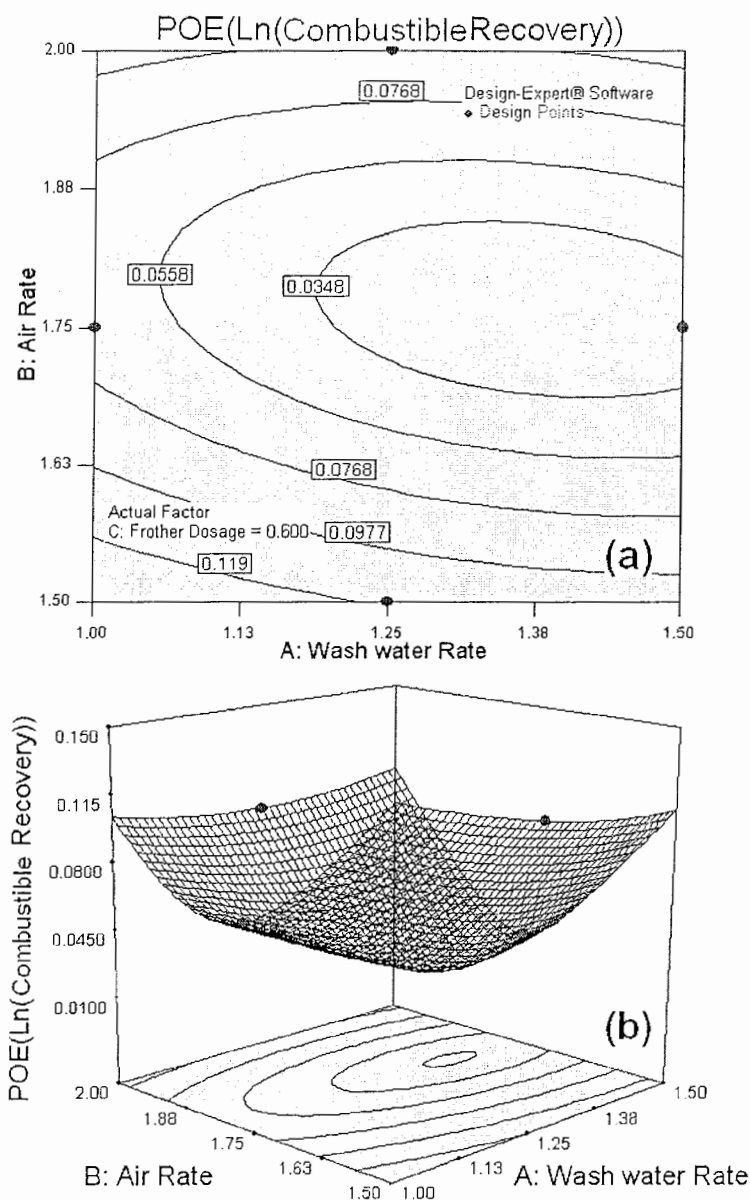
شستشو میزان بازیابی زغال افزایش پیدا می کند.

۶-۲-۶- بررسی و تحلیل گسترش خطا^۲ در آزمایشهای پاسخ اول (درصد بازیابی)

یکی از مزایای بسیار خوب طراحی آماری آزمایشها توسط روشهای پاسخ سطح قابلیت بررسی گسترش خطا (POE) می باشد. گسترش خطا به مفهوم میزان خطایی است که به سبب تغییرات غیر قابل کنترل در تنظیم سطوح عوامل در پاسخ آزمایشها بوجود می آید (برای جزئیات بیشتر می توان به مقاله "Robust Design – Reducing Transmitted Variation" که توسط Anderson و Whitcomb در پنجاهمین کنفرانس سالانه کیفیت که در سال ۱۹۹۶ ارائه شد، رجوع کرد). یکی از اهدافی که امروزه مورد توجه قرار گرفته، توسعه فرآیند در حالت استوار می باشد بدین صورت که تغییر پذیری پاسخ فرآیند در مقابل تغییرات غیر قابل کنترل کمتر شود. بدین منظور شناخت از نحوه گسترش خطا ضروری به نظر می رسد. چون می توان در مرحله بهینه سازی به منظور استوارسازی فرآیند، گسترش خطا را در حالت رسیدن به کمترین مقدار تنظیم کرد (Stat-Ease, Inc, 2005).

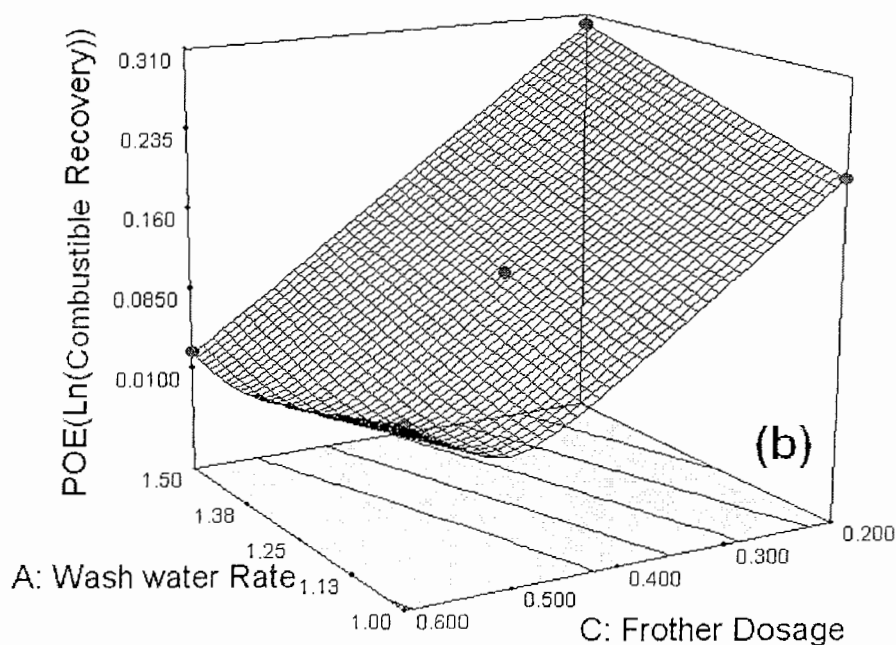
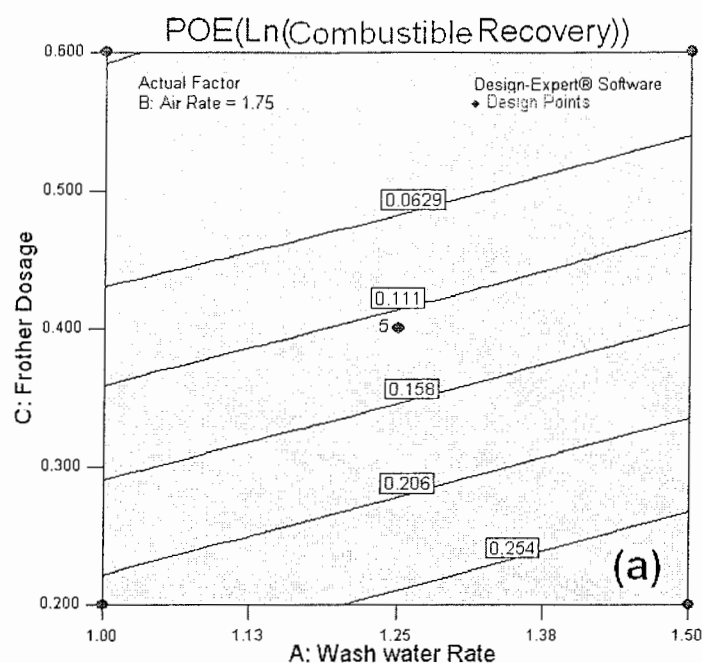
در شکل (۶-۱۳) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی، نشان داده شده است.

² Propagation Of Error



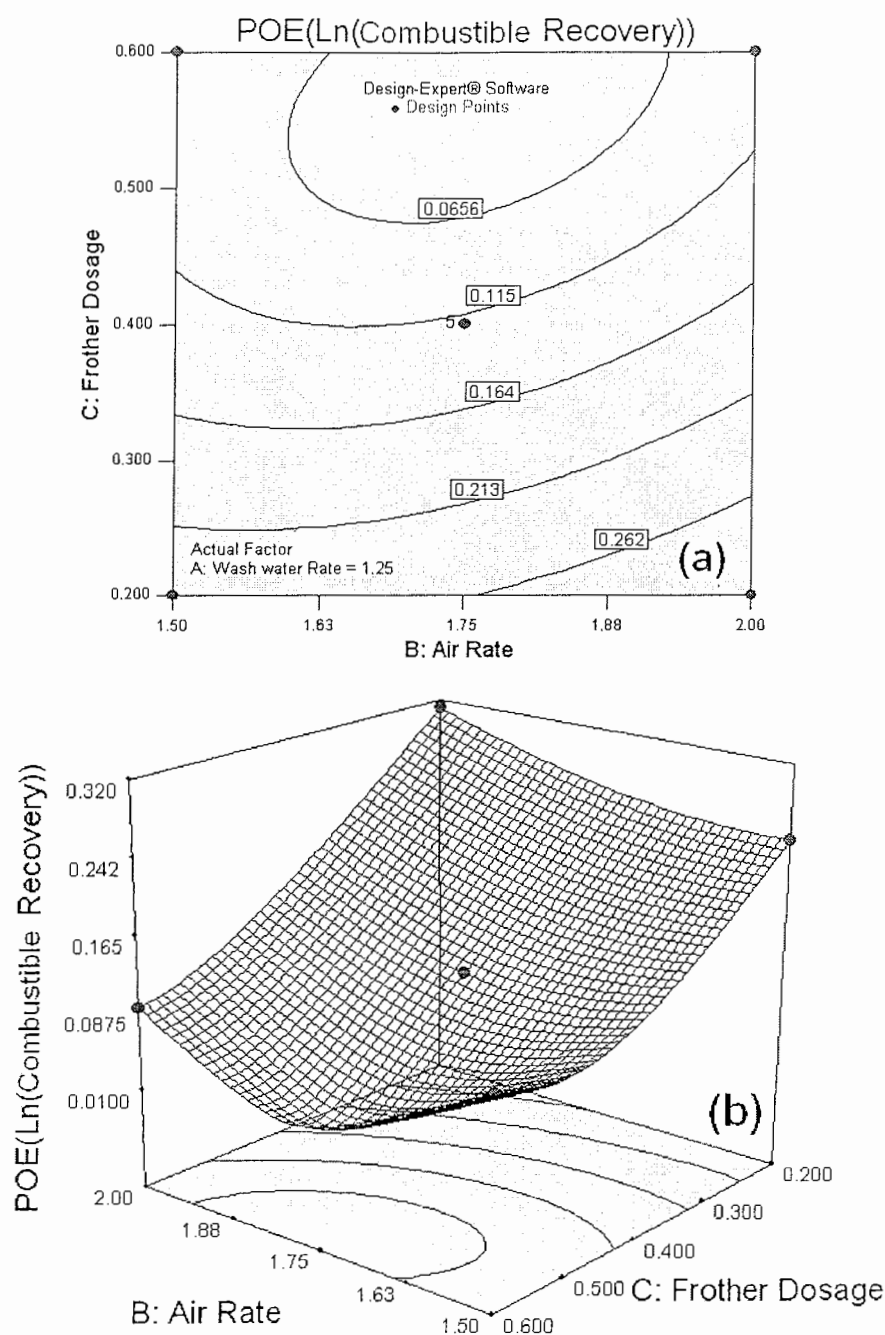
شکل (۶-۱۳) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود در سطح میانی نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو تقریباً (1.38 Lit/min) میزان گسترش خطا کاهش پیدا می کند. در شکل (۶-۱۴) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی گسترش خطا برای عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز، نشان داده شده است.



شکل (۱۴-۶) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود با کاهش نرخ آب شستشو و افزایش میزان مصرف کف ساز میزان گسترش خطا کاهش پیدا کرده است. در شکل (۱۵-۶) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی گسترش خطا برای عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز، نشان داده شده است.



شکل (۶-۱۵) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود در سطح میانی نرخ گازدهی و افزایش میزان مصرف

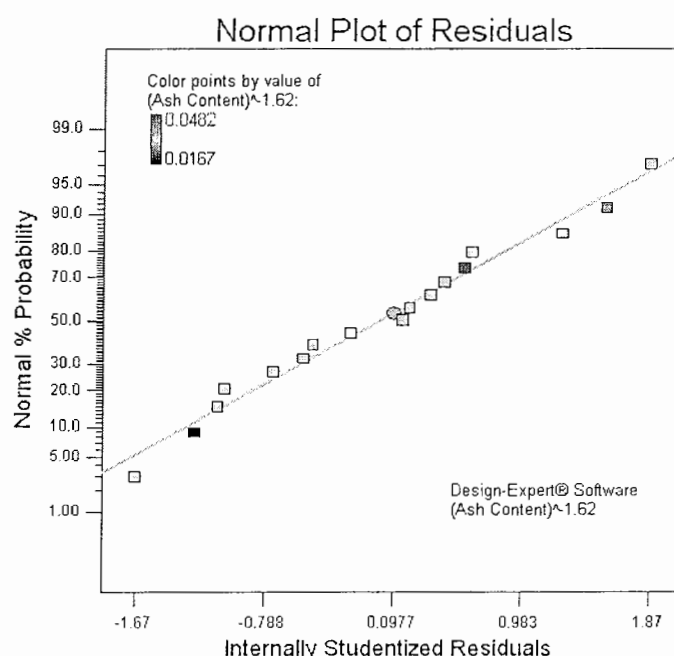
کف ساز میزان گسترش خطا کاهش پیدا کرده است.

۳-۶- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

در این بخش تفسیر داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول) مد نظر می باشد.

۱-۳-۶- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

برای برآزش بهتر مدل جهت دستیابی به مدل ریاضی قابل قبول، اگر مانده های مدل (residuals) به صورت نرمال توزیع نشده باشند نیاز به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ می باشد. که در مورد داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)، بعد از ارزیابی های به عمل آمده با استفاده از نرم افزار، تبدیل توان^۳ با معادله $Y' = (Y + K)^{\delta}$ و با مقادیر $K=0$ و $\delta = -1.62$ مناسب تشخیص داده شد. شکل (۱۶-۶) توزیع مانده ها را بعد از اعمال تبدیل توان نشان می دهد.



شکل (۱۶-۶) منحنی توزیع نرمال مانده ها بعد از اعمال تبدیل توان در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

³ Power

۶-۳-۲- برازش مدل بر روی داده های پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

برای بررسی رفتار عوامل بر روی پاسخ احتیاج به برازش مدل بر پاسخ آزمایشات می باشد. همانطور که قبلاً نیز گفته شد، مدل در واقع یک معادله ریاضی است که برای پیش بینی پاسخ بکار می رود. جدول (۶-۷) به بررسی وضعیت برازش مدل‌های مختلف نسبت به یکدیگر پرداخته است.

جدول (۶-۷) بررسی وضعیت برازش مدل‌های مختلف نسبت به یکدیگر در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	FValue	p-value Prob > F
Mean vs Total	0.018863	1	0.018863		
Block vs Mean	0.000284	1	0.000284		
Linear vs Block	0.000419	3	0.00014	6.750433	0.00642
2FI vs Linear	6.77E-06	3	2.26E-06	0.084006	0.967
Quadratic vs 2FI	0.000145	3	4.84E-05	3.005549	0.117
Cubic vs Quadratic	4.33E-05	2	2.16E-05	Aliased	Aliased

در جدول (۶-۷) برای هر کدام از مدل‌های مختلف، عدد F-value و p-value سنجیده شده است که هر چه مقدار p-value کمتر باشد اهمیت مدل بیشتر شده و به مفهوم برازش مناسب‌تر آن می باشد. در جدول (۶-۸) به بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف پرداخته شده است.

جدول (۶-۸) بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

Source Model	Std Deviation	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS
Linear	0.004551	0.627922	0.534902	0.19924214	0.000535
2FI	0.005183	0.638057	0.396762	-0.9625782	0.001311
Quadratic	0.004012	0.855383	0.638458	-1.7168017	0.001815
Cubic	Aliased	Aliased	Aliased	Aliased	Aliased

با توجه به جدول (۶-۸) هر چه مقادیر ضریب همبستگی‌های محاسبه شده (R-Square) به یکدیگر نزدیکتر باشد وضعیت مدل برازش شده بهتر است. ستون PRESS نشان دهنده مجموع مربعات خطای تخمین برای هر مدل می باشد. مدلی که برازش خوبی بر آزمایشات داشته باشد مقدار عدد PRESS آن کوچکتر خواهد بود. عبارت Aliased برای مدل Cubic بدین مفهوم است که تعداد آزمایشات کافی برای برازش این مدل انجام نشده است. در جدول (۶-۹) به بررسی نقصان در برازش (Lack of Fit) مدل پرداخته شده است.

جدول (۹-۶) بررسی نقصان در برازش مدل (Lack of Fit) در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Linear	0.000195	8	2.44E-05	1.83089565	0.293
2FI	0.000188	5	3.77E-05	2.82784626	0.168
Quadratic	4.33E-05	2	2.16E-05	1.62382478	0.305
Cubic	0	0	Aliased	Aliased	Aliased

با توجه به جدول (۹-۶) و دقت بر ستون p-value، مدلی که نقصان در برازش آن از نظر آماری دارای اهمیت نمی باشد، می بایست انتخاب شود.

بدین ترتیب و با توجه به تحلیل های حاصل از سه جدول (۷-۶)، (۸-۶) و (۹-۶) مدل خطی (Linear) به عنوان بهترین مدل از بین بقیه مدل های موجود برای برازش بر روی آزمایشات در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول) انتخاب گردیده است. معادله تجربی مدل خطی که درصد بازیابی را برای مقادیر کد شده و واقعی عوامل تخمین می زند، به صورت زیر می باشد:

[Final Equation in Terms of Coded Factors]:

$$(\text{Ash Content})^{-1.62} = +0.034 + 0.0039A - 0.0081C$$

[Final Equation in Terms of Actual Factors]:

$$(\text{Ash Content})^{-1.62} = +0.03 - 0.016 * \text{Wash water Rate} - 0.041 * \text{Frother Dosage}$$

۳-۳-۶- آنالیز واریانس پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

در آنالیز واریانس هدف شناسایی عوامل موثر و همچنین ترتیب آنها از نظر اهمیت در پاسخ آزمایشها با انجام یک سلسله عملیات ریاضی است. جدول (۱۰-۶) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول) را نشان می دهد.

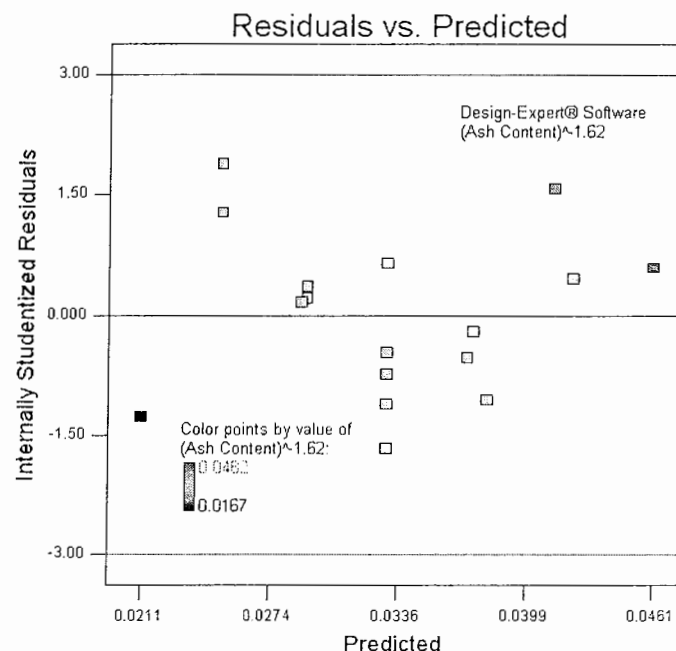
جدول (۱۰-۶) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Block	0.000284	1	0.000284		
Model	0.000416	2	0.000208	10.70686	0.00179
A:Wash water Rate	9.15E-05	1	9.15E-05	4.713987	0.0490
C:Frother Dosage	0.000394	1	0.000394	20.28325	0.000593
Residual	0.000252	13	1.94E-05		
Lack of Fit	0.000199	9	2.21E-05	1.659082	0.330
Pure Error	5.33E-05	4	1.33E-05		
Cor Total	0.000951	16			

ملاحظه می شود که مدل برازش شده از نظر آماری معنی دار می باشد و فقط ۰/۱۸٪ احتمال وجود دارد که F-value بزرگتری بر اساس تاثیر اغتشاشات بوجود آید. و همچنین به ترتیب عوامل C (میزان مصرف کف ساز) و A (نرخ آب شستشو) از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد خاکستر محصول) معنی دار و با اهمیت می باشند و عامل B (نرخ گازدهی) از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد خاکستر محصول) با اهمیت و معنی دار نمی باشد و در محاسبه خطا بکار رفته است.

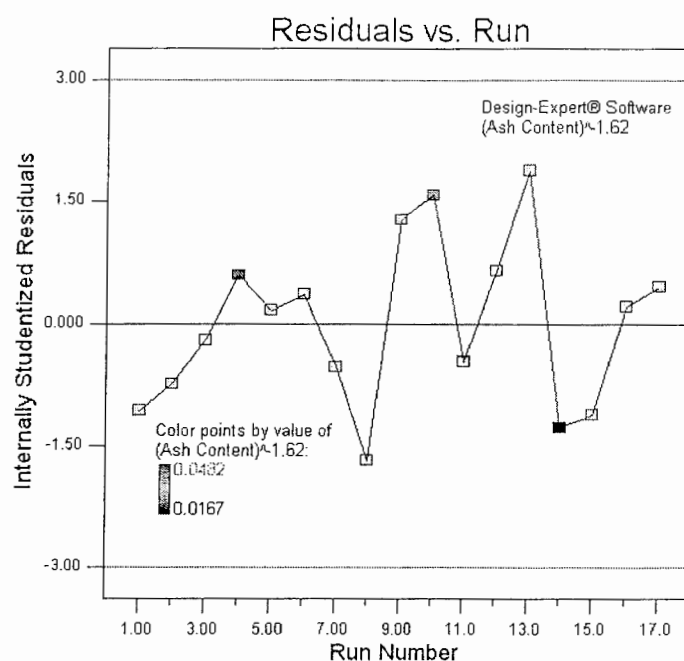
۴-۳-۶- آنالیز خطاهای پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

به منظور بررسی توانایی مدل برازش شده بر آزمایشها و چگونگی عملکرد آن و همچنین نحوه انجام آزمایشها بهتر است که آنالیز خطاها صورت پذیرد که در شکل های (۶-۱۷) تا (۶-۲۰) این عمل صورت پذیرفته است.



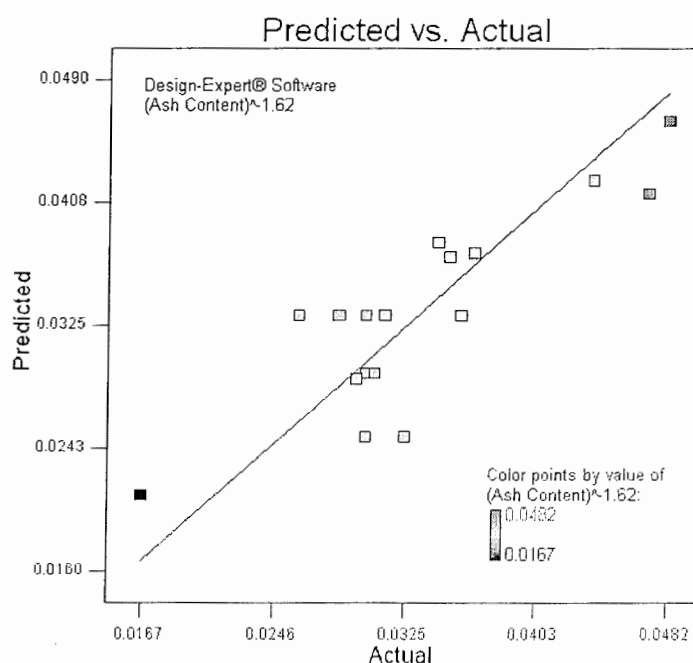
شکل (۶-۱۷) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد خاکستر محصول) توسط مدل

شکل (۶-۱۷) وضعیت مانده ها را با توجه به مقادیر پیش بینی شده پاسخ (درصد خاکستر محصول) توسط مدل نشان می دهد. آنچه که انتظار می رود این است که مانده ها نسبت به مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل، وابسته نباشند و از الگوی خاصی پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده باشند که نمودار این وضعیت را تایید می کند.



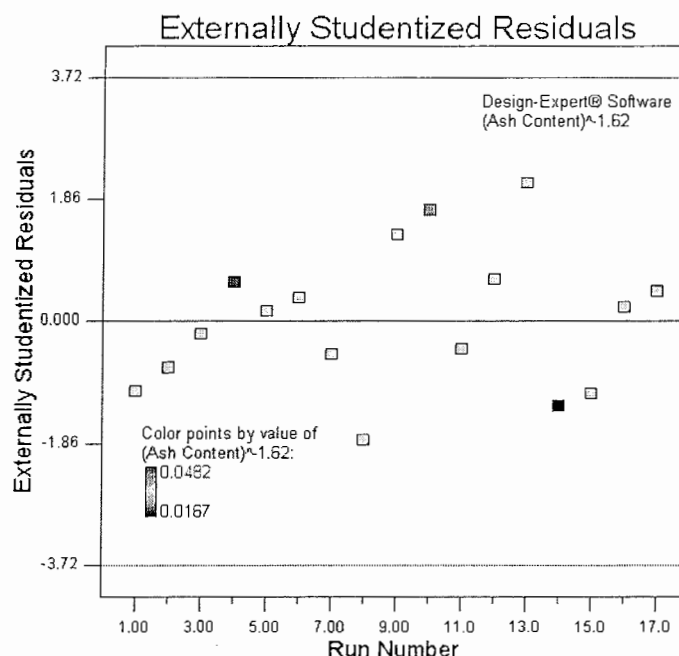
شکل (۶-۱۸) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشهای مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

در شکل (۶-۱۸) به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر مانده ها با توجه به توالی انجام آزمایشها پرداخته شده است. همانطور که در نمودار نیز مشاهده می شود مقادیر مانده ها به صورت تصادفی پراکنده شده اند که به مفهوم مستقل بودن مانده ها نسبت به توالی انجام آزمایشها است، که مطلوب می باشد.



شکل (۶-۱۹) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (درصد خاکستر محصول) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل

شکل (۶-۱۹) برای بررسی توانایی مدل در پیش بینی مقادیر واقعی پاسخ (درصد خاکستر محصول) بکار می رود. نقاط در شکل، تقریباً در یک خط ۴۵ درجه قرار گرفته اند که کمی پراکندگی در توزیع آنها دیده می شود ولی با این وجود با توجه به بررسی های دیگر، از نظر آماری قابل قبول هستند.

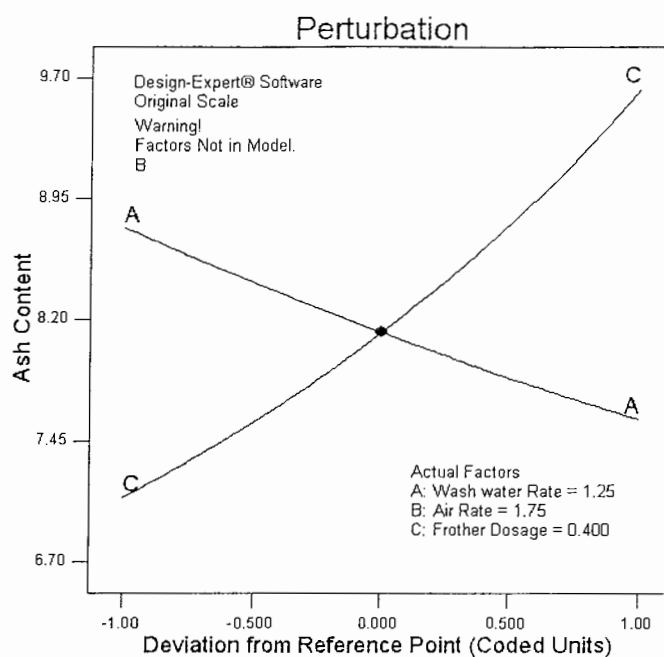


شکل (۶-۲۰) نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده در پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

شکل (۶-۲۰) نمودار Externally Studentized Residuals را نشان می دهد که برای بررسی و شناسایی مقادیر خارج از رده بکار می رود. در نمودار شکل (۶-۲۰) هیچ کدام از مانده ها از حدود مشخص شده تجاوز نکرده اند بنابراین هیچ یک از پاسخهای اندازه گیری شده (درصد خاکستر محصول) خارج از رده نمی باشند.

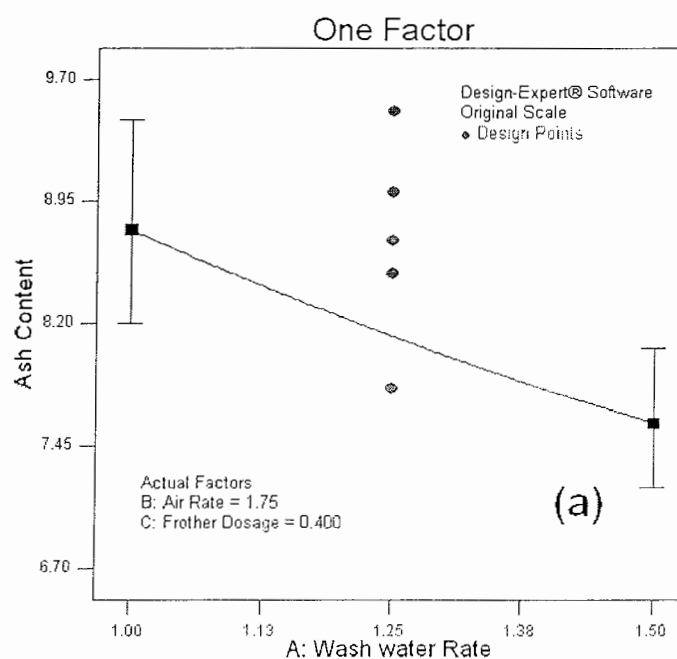
۶-۳-۵- بررسی نتایج پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

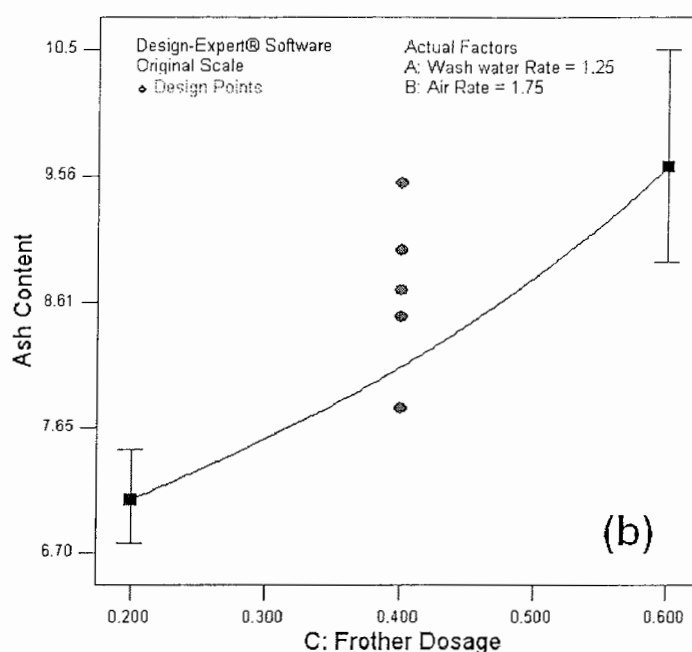
با توجه به حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب مانده ها، به بررسی نتایج حاصله از آزمایشهای مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول) پرداخته شده است. شکل (۶-۲۱) نمودار تحلیل حساسیت عوامل تشکیل دهنده مدل نسبت به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول) را نشان می دهد.



شکل (۶-۲۱) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول)

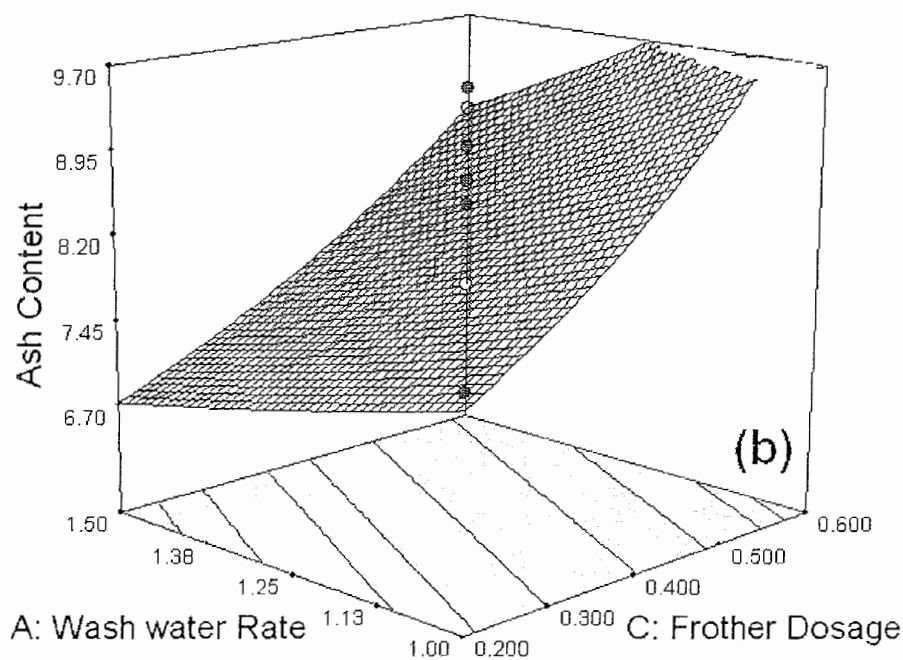
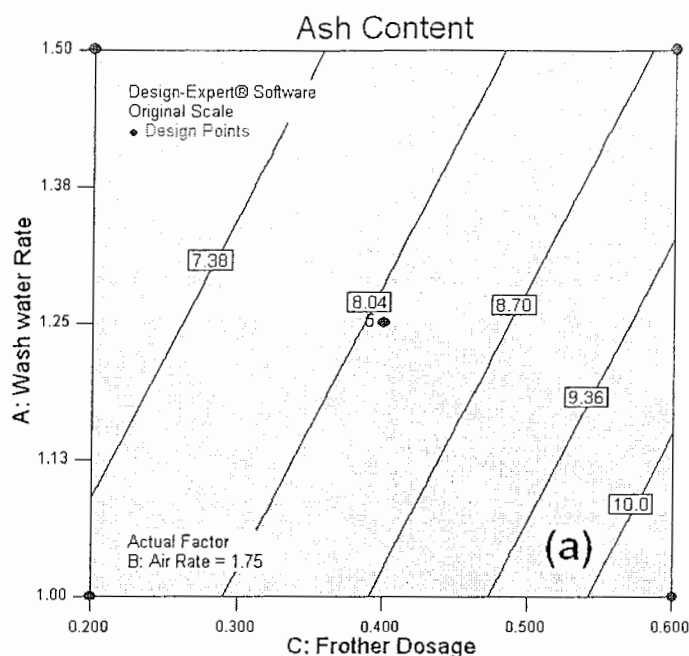
همانطور که ملاحظه می شود عوامل A و C به ترتیب عوامل حساس بر پاسخ آزمایشها (درصد خاکستر محصول) می باشند و عامل B که در مدل شرکت نداشته در تحلیل آورده نشده است. شکل (۶-۲۲) تأثیر هر کدام از عوامل را بر پاسخ هنگامی که از پایین ترین سطحشان (۱-)، تا بالاترین سطحشان (۱+)، تغییر می کند را نشان می دهد.





شکل (۶-۲۲) نمودار تأثیر عوامل (a) نرخ آب شستشو، (b) میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (درصد خاکستر محصول)

در شکل (۶-۲۲) ملاحظه می شود هر دو عامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز اثرات معنی دار و با اهمیت در پاسخ (درصد خاکستر محصول) را داشته اند. رفتار عامل نرخ آب شستشو بدین صورت بوده که با افزایش نرخ آب شستشو میزان درصد خاکستر محصول کاهش پیدا کرده است که منطقی می باشد چون با افزایش نرخ آب شستشو خاکستر بیشتری از کف شسته می شود. با افزایش میزان مصرف کف ساز درصد خاکستر محصول افزایش یافته است که می تواند به دلیل پایدارتر شدن کف باشد. طبق آنالیز واریانس در جدول (۶-۱۰) هیچ گونه اثرات متقابلی در بین عوامل در آزمایشهای مربوط به پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول) وجود ندارد. در شکل (۶-۲۳) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (درصد خاکستر محصول) نشان داده شده است.



شکل (۶-۲۳) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (درصد خاکستر محصول)

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود با افزایش نرخ آب شستشو و کاهش میزان مصرف کف ساز میزان درصد خاکستر محصول کاهش پیدا می کند.

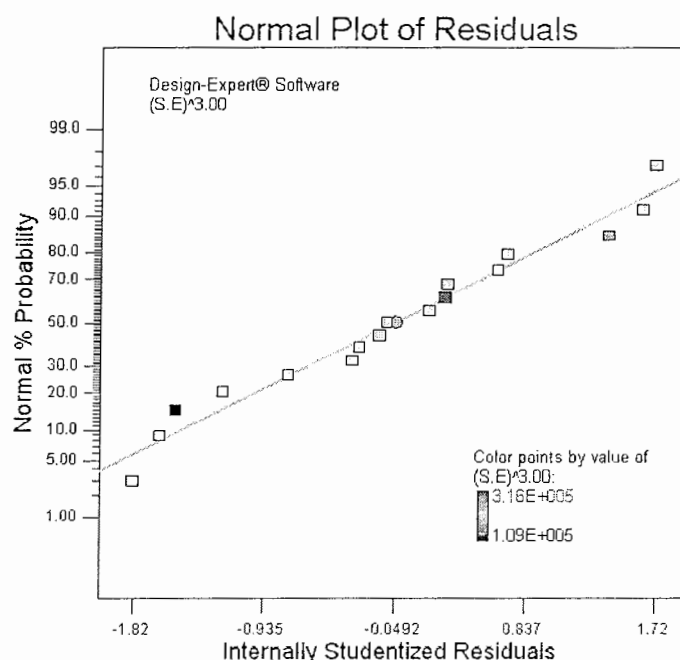
از آنجایی که مدل برازش شده در آزمایشهای پاسخ دوم (درصد خاکستر محصول) از نوع خطی می باشد لذا بررسی و تحلیل گسترش خطا امکان پذیر نمی باشد.

۴-۶- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

در این بخش تفسیر داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش) مد نظر می باشد.

۴-۶-۱- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

برای برآزش بهتر مدل، جهت دستیابی به مدل ریاضی قابل قبول، اگر مانده های مدل (residuals) به صورت نرمال توزیع نشده باشند نیاز به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ می باشد. که در مورد داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)، بعد از ارزیابی های به عمل آمده با استفاده از نرم افزار، تبدیل توان با معادله $Y' = (Y + K)^{\delta}$ و با مقادیر $K=0$ و $\delta=3$ مناسب تشخیص داده شد. شکل (۴-۶) توزیع مانده ها را بعد از اعمال تبدیل توان نشان می دهد.



شکل (۴-۶) منحنی توزیع نرمال مانده ها بعد از اعمال تبدیل توان در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

۴-۶-۲- برآزش مدل بر روی داده های پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

مدل در واقع یک معادله ریاضی است که برای پیش بینی پاسخ بکار می رود. جدول (۴-۱۱) به بررسی وضعیت برآزش مدل های مختلف نسبت به یکدیگر پرداخته است.

جدول (۱۱-۶) بررسی وضعیت برازش مدل‌های مختلف نسبت به یکدیگر در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	FValue	p-value Prob > F
Mean vs Total	1.1E+12	1	1.1E+12		
Block vs Mean	3.58E+09	1	3.58E+09		
Linear vs Block	2.03E+10	3	6.78E+09	3.81066296	0.0396
2FI vs Linear	7.61E+09	3	2.54E+09	1.66292136	0.243
Quadratic vs 2FI	1.27E+10	3	4.22E+09	23.7973805	0.000989
Cubic vs Quadratic	5.16E+08	2	2.58E+08	Aliased	Aliased

در جدول (۱۱-۶) برای هر کدام از مدل‌های مختلف، عدد F-value و p-value نسبت به همدیگر سنجیده شده است که هر چه مقدار p-value کمتر باشد اهمیت مدل بیشتر شده و به مفهوم برازش مناسب‌تر آن می باشد. در جدول (۱۲-۶) به بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف پرداخته شده است.

جدول (۱۲-۶) بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

Source Model	Std Deviation	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS
Linear	42176.5	0.48788	0.359849	-0.20944	5.04E+10
2FI	39063.53	0.670515	0.450859	-0.58588	6.61E+10
Quadratic	13321.23	0.974456	0.93614	0.484463	2.15E+10
Cubic	Aliased	Aliased	Aliased	Aliased	Aliased

با توجه به جدول (۱۲-۶) هر چه مقادیر ضریب همبستگی های محاسبه شده (R-Square) به یکدیگر نزدیکتر باشد وضعیت مدل برازش شده بهتر است. ستون PRESS نشان دهنده مجموع مربعات خطای تخمین برای هر مدل می باشد. مدلی که برازش خوبی بر آزمایشات داشته باشد مقدار عددی PRESS آن کوچکتر خواهد بود. عبارت Aliased برای مدل Cubic بدین مفهوم است که تعداد آزمایشات کافی برای برازش این مدل انجام نشده است. در جدول (۱۳-۶) به بررسی نقصان در برازش (Lack of Fit) مدل پرداخته شده است.

جدول (۱۳-۶) بررسی نقصان در برازش مدل (Lack of Fit) در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Linear	2.08E+10	8	2.6E+09	18.94257	0.00628
2FI	1.32E+10	5	2.64E+09	19.21413	0.00671
Quadratic	5.16E+08	2	2.58E+08	1.879102	0.266
Cubic	0	0	Aliased	Aliased	Aliased

با توجه به جدول (۶-۱۳) و دقت بر ستون p-value، مدلی که نقصان در برازش آن از نظر آماری دارای اهمیت نباشد (p-value بالای ۰/۱)، می بایست انتخاب شود.

بدین ترتیب و با توجه به تحلیل های حاصل شده از سه جدول (۶-۱۱)، (۶-۱۲) و (۶-۱۳) مدل Quadratic به عنوان بهترین مدل از بین بقیه مدل های موجود برای برازش بر روی آزمایشات در پاسخ سوم (بازدهی جدایش) انتخاب گردیده است.

معادله تجربی مدل Quadratic که بازدهی جدایش را برای مقادیر کد شده و واقعی عوامل تخمین می زند، به صورت زیر می باشد:

[Final Equation in Terms of Coded Factors]:

$$(S.E)^3 = + 330452 - 27118A - 6916B + 75705C + 47678AC - 16297A^2 - 32348B^2 - 52216C^2$$

[Final Equation in Terms of Actual Factors]:

$$(S.E)^3 = -1361548 + 161995 * \text{Wash water Rate} + 1783851 * \text{Air Rate} + 230905 * \text{Frother Dosage} + 953568 * \text{Wash water rate} * \text{Frother Dosage} - 260758 * \text{Wash water rate}^2 - 517576 * \text{Air Rate}^2 - 1305423 * \text{Frother Dosage}^2$$

۶-۴-۳- آنالیز واریانس پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

در آنالیز واریانس هدف شناسایی عوامل موثر و همچنین ترتیب آنها از نظر اهمیت در پاسخ آزمایشها با انجام یک سلسله عملیات ریاضی است. جدول (۶-۱۴) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش) را نشان می دهد.

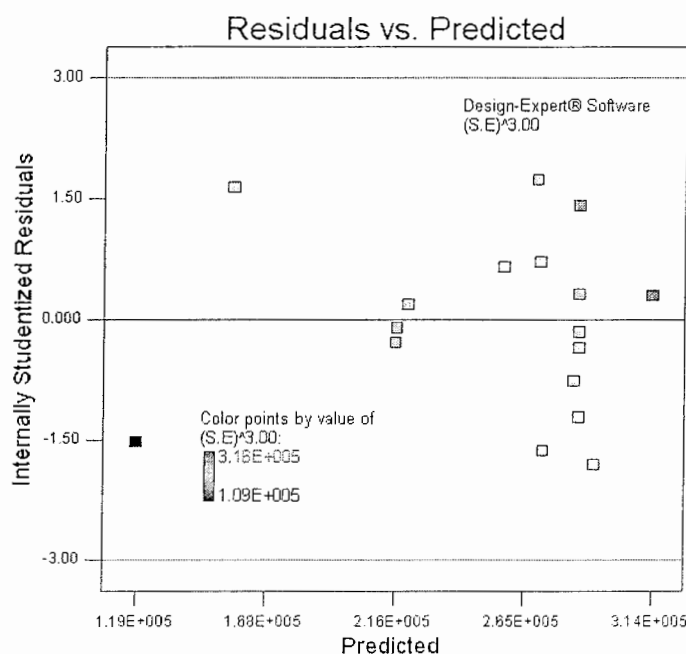
جدول (۶-۱۴) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F
Block	3.58E+09	1	3.58E+09		
Model	4.02E+10	7	5.74E+09	30.78989	< 0.0001
A-Wash water Rate	3.92E+09	1	3.92E+09	21.03322	0.00179
B-Air Rate	3.83E+08	1	3.83E+08	2.052247	0.190
C-Frother Dosage	3.06E+10	1	3.06E+10	163.922	< 0.0001
AC	7.27E+09	1	7.27E+09	39.01018	0.000247
A ²	1.05E+09	1	1.05E+09	5.627114	0.0451
B ²	4.13E+09	1	4.13E+09	22.16959	0.00152
C ²	1.08E+10	1	1.08E+10	57.76592	< 0.0001
Residual	1.49E+09	8	1.86E+08		
Lack of Fit	9.43E+08	4	2.36E+08	1.717485	0.307
Pure Error	5.49E+08	4	1.37E+08		
Cor Total	4.53E+10	16			

ملاحظه می شود که مدل برازش شده از نظر آماری معنی دار می باشد و کمتر از ۰/۰۱٪ احتمال وجود دارد که F-value مدل بزرگتری بر اساس تاثیر اغتشاشات بوجود آید. و همچنین نقصان در برازش مدل نیز از نظر آماری دارای اهمیت نمی باشد که مطلوب است. به ترتیب عوامل و اثرات متقابل C (میزان مصرف کف ساز)، C^2 ، AC (اثر متقابل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز)، B^2 ، A (نرخ آب شستشو) و A^2 از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (بازدهی جدایش) معنی دار و با اهمیت می باشند. و B (نرخ گازدهی)، از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (بازدهی جدایش) دارای اثر معنی داری نمی باشد.

۶-۴-۴- آنالیز خطاهای پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

به منظور بررسی توانایی مدل برازش شده بر آزمایشها و چگونگی عملکرد آن و همچنین مطالعه نحوه انجام آزمایشها بهتر است که آنالیز خطاها صورت پذیرد که در شکل های (۶-۲۵) تا (۶-۲۸) این عمل صورت پذیرفته است.

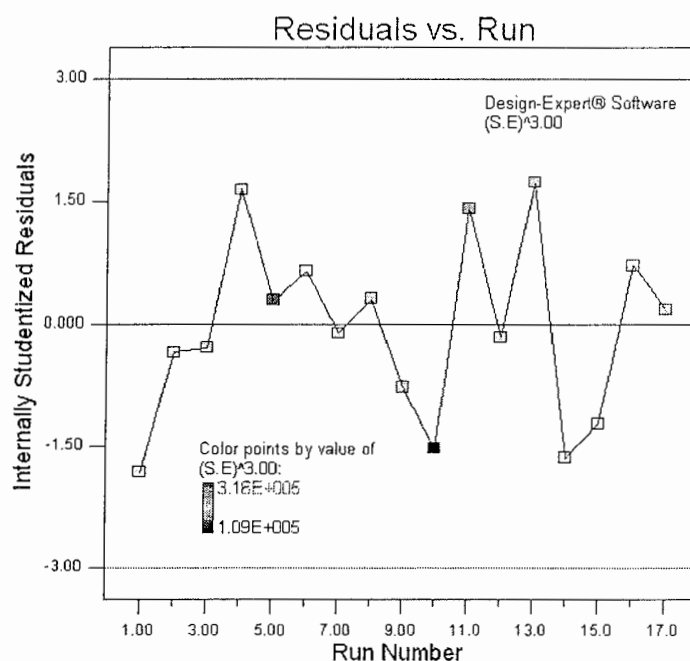


شکل (۶-۲۵) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (بازدهی جدایش) توسط مدل

شکل (۶-۲۵) وضعیت مانده ها را با توجه به مقادیر پیش بینی شده پاسخ (بازدهی جدایش)

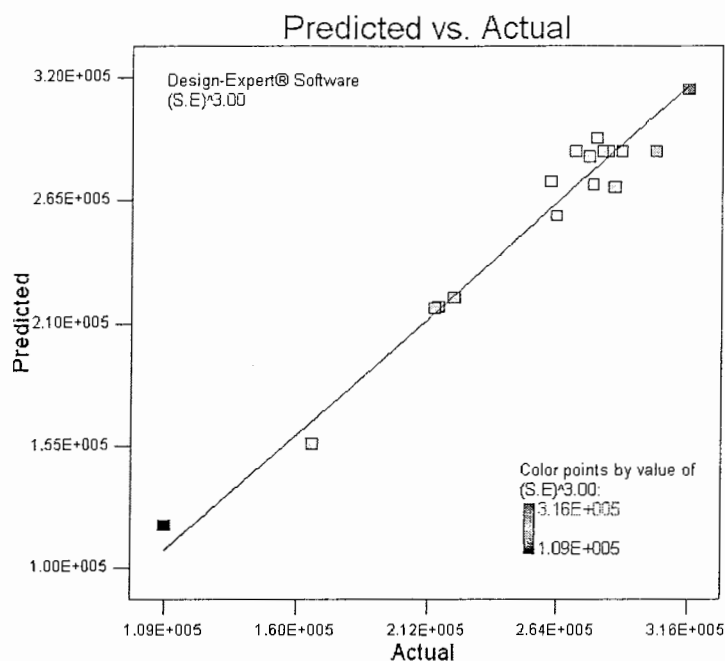
توسط مدل نشان می دهد. آنچه که انتظار می رود این است که مانده ها نسبت به مقادیر پیش بینی

شده پاسخ توسط مدل وابسته نباشند و از الگوی خاصی پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده باشند که نمودار شکل (۶-۲۵) این وضعیت را تایید می کند.



شکل (۶-۲۶) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشهای مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

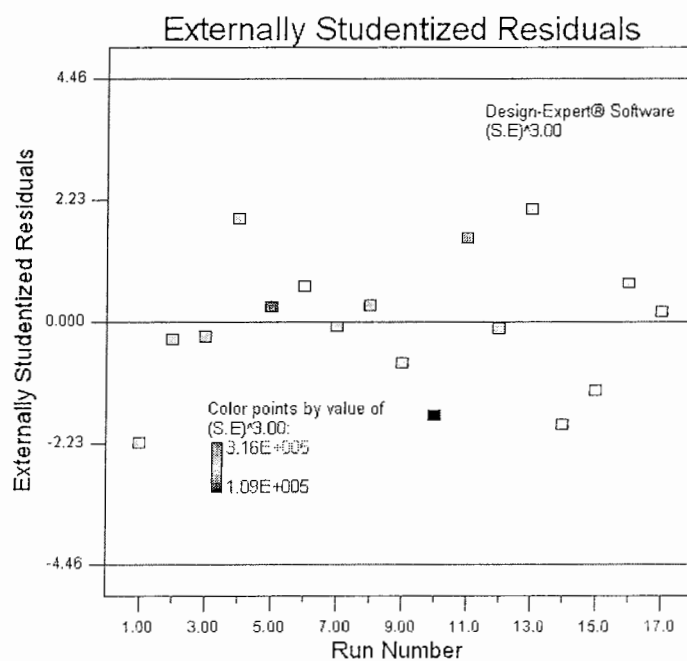
در شکل (۶-۲۶) به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر مانده ها با توجه به توالی انجام آزمایشها پرداخته شده است. همانطور که در نمودار نیز مشاهده می شود مقادیر مانده ها به صورت تصادفی پراکنده شده اند که به مفهوم مستقل بودن مانده ها نسبت به توالی انجام آزمایشها است، که مطلوب می باشد.



شکل (۶-۲۷) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (بازدهی جدایش) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل

شکل (۶-۲۷) برای بررسی توانایی مدل در پیش بینی مقادیر واقعی پاسخ (بازدهی جدایش) بکار

می رود.



شکل (۶-۲۸) نمودار Externally Studentized Residuals برای بررسی مقادیر خارج از رده در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

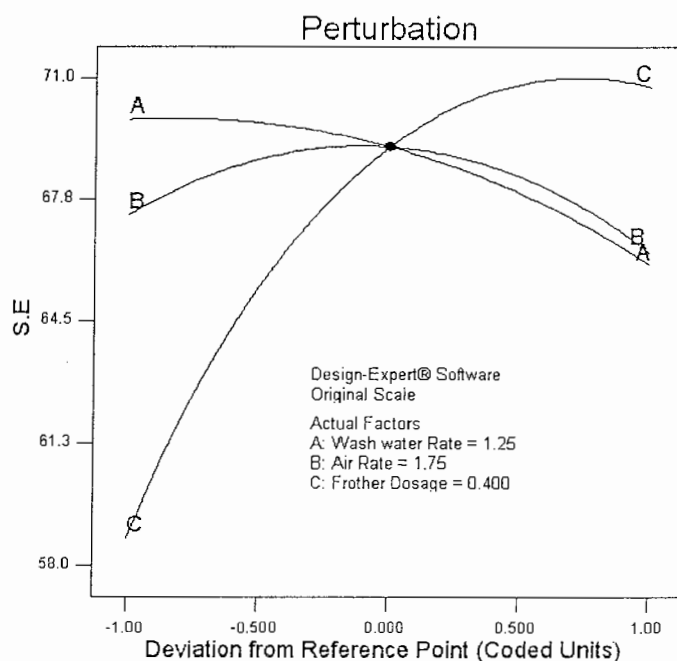
شکل (۶-۲۸) نمودار Externally Studentized Residuals را نشان می دهد که برای بررسی و

شناسایی مقادیر خارج از رده بکار می رود. در نمودار شکل (۶-۲۸) هیچ کدام از مانده ها از حدود

مشخص شده تجاوز نکرده اند بنابراین هیچ یک از پاسخهای اندازه گیری شده (بازدهی جدایش) خارج از رده نمی باشند.

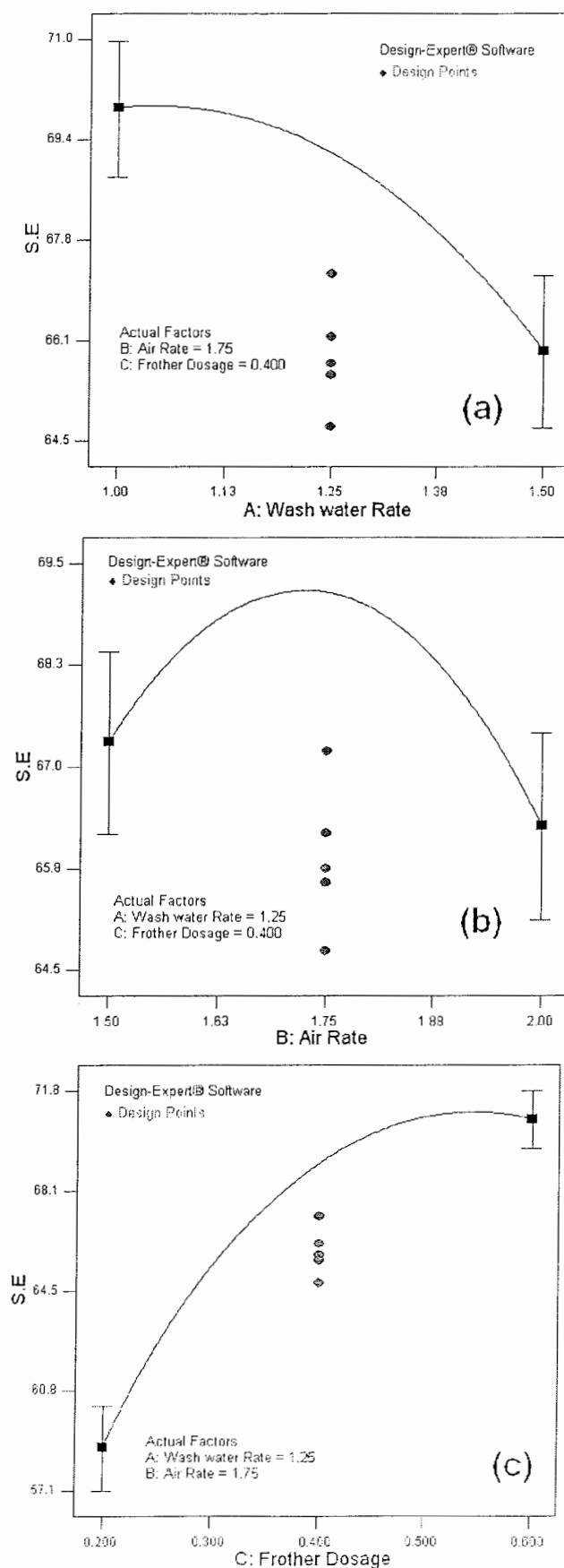
۶-۴-۵- بررسی نتایج پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

با توجه به حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب مانده ها، به بررسی نتایج حاصله از آزمایشهای مربوط به پاسخ سوم (بازدهی جدایش) پرداخته شده است. شکل (۶-۲۹) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ سوم (بازدهی جدایش) را نشان می دهد.



شکل (۶-۲۹) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

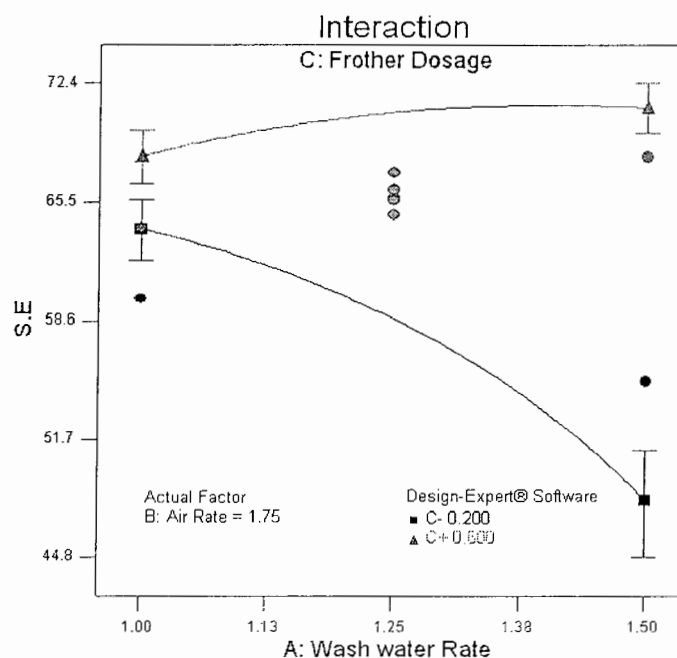
همانطور که ملاحظه می شود عامل C عامل حساس بر پاسخ آزمایشها (بازدهی جدایش) می باشد ولی عوامل A و B حساسیت چندانی بر پاسخ آزمایشها (بازدهی جدایش) ندارند. شکل (۶-۳۰) تأثیر هر کدام از عوامل را بر پاسخ هنگامی که از پایین ترین سطحشان (۱-)، تا بالاترین سطحشان (۱+)، تغییر می کند را نشان می دهد.



شکل (۳-۶) نمودار تأثیر عوامل (a) نرخ آب شستشو، (b) نرخ گازدهی، (c) میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (بازدهی جدایش)

در شکل (۶-۳۰) ملاحظه می شود که تغییر در سطوح بالا و پایین عامل نرخ آب شستشو تاثیر معنی داری در پاسخ (بازدهی جدایش) داشته است و با افزایش نرخ آب شستشو بازدهی جدایش کاهش یافته است. تغییر در سطوح نرخ گازدهی در بازدهی جدایش زغال تاثیر متفاوتی داشته است، بدین صورت که تغییر آن از بالاترین تا پایین ترین سطحش دازای اثر معنی دارای نبوده ولی در سطح مرکزی تغییر نرخ گازدهی بیشترین تاثیر مثبت را در بازدهی جدایش زغال داشته است، و می تواند بدین دلیل باشد که عامل B^2 در آنالیز واریانس از نظر آماری معنی دار شده است. میزان مصرف کف ساز نیز تاثیر مثبت و با اهمیتی را در بازدهی جدایش زغال داشته است.

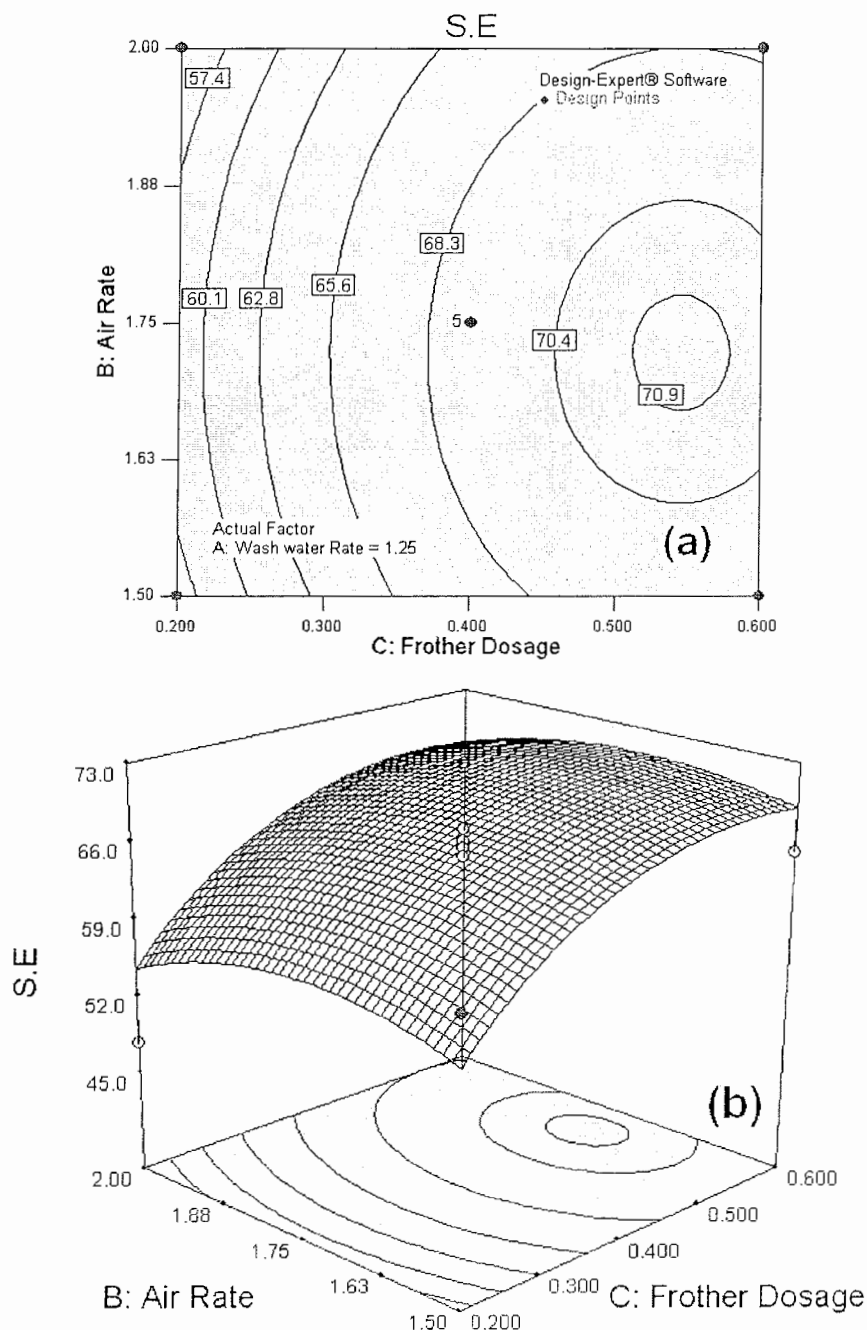
علاوه بر بررسی اثرات عوامل اصلی، برای درک بهتر از فرآیند و شرایط عملیاتی می بایست اثرات متقابل بین عوامل نیز مورد مطالعه قرار گیرند. شکل (۶-۳۱) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز، (AC) را نشان می دهد.



شکل (۶-۳۱) نمودار اثر متقابل دو عامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز در پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

همانطور که در نمودار مشاهده می شود اثر متقابل وجود دارد چون در سطح پایین میزان مصرف کف ساز با افزایش نرخ آب شستشو بازدهی جدایش پایین می آید ولی در سطح بالای میزان مصرف کف ساز شرایط بهتر و پایدارتر شده است و با تغییر سطح نرخ آب شستشو بازدهی جدایش

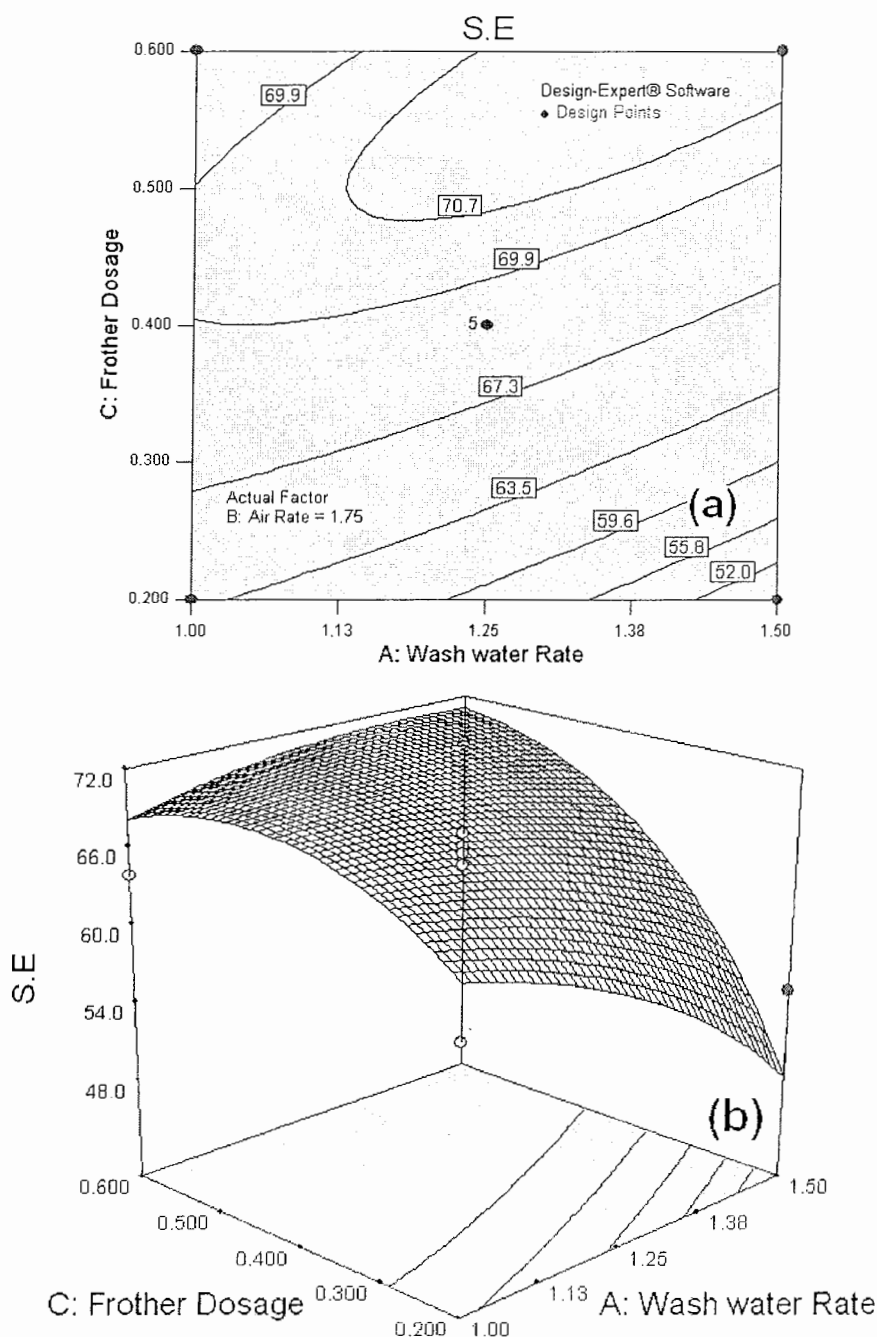
تغییر خاص و معنی داری نمی کند. در شکل (۶-۳۲) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی تأثیر عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (بازدهی جدایش) نشان داده شده است



شکل (۶-۳۲) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی تأثیر عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (بازدهی جدایش)

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود در سطح میانی نرخ گازدهی و با افزایش میزان مصرف کف ساز میزان بازدهی جدایش زغال افزایش یافته است. در شکل (۶-۳۳) نیز نمودار دوبعدی

(خطوط همتراز) و سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ نشان داده شده است.

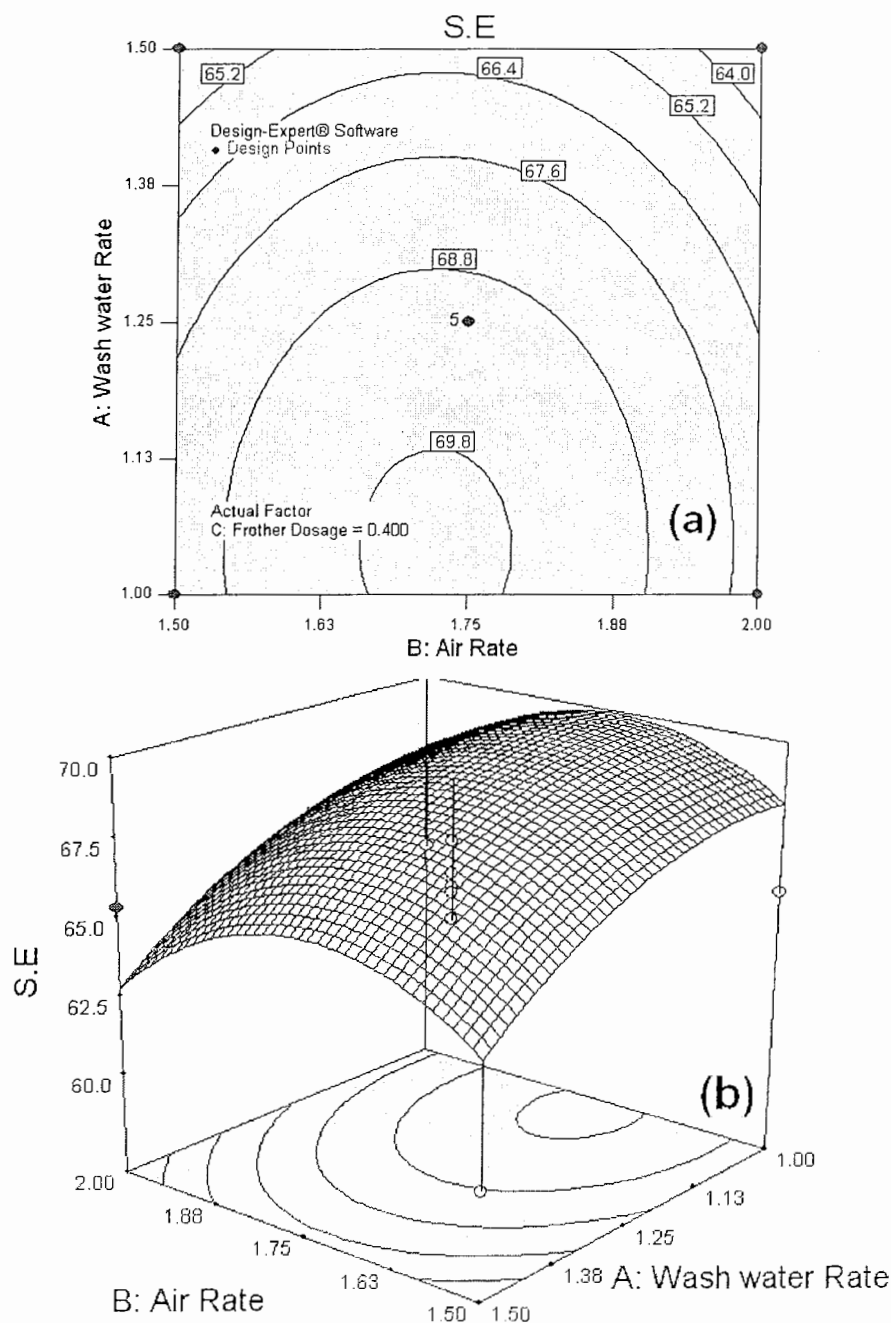


شکل (۳۳-۶) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز بر پاسخ (بازدهی جدایش)

همانطور که در شکل (۳۳-۶) مشاهده می شود، در سطح میانی نرخ آب شستشو و افزایش

میزان مصرف کف ساز میزان بازدهی جدایش زغال افزایش پیدا می کند. در شکل (۳۴-۶) نمودار

دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی، بر پاسخ نشان داده شده است.



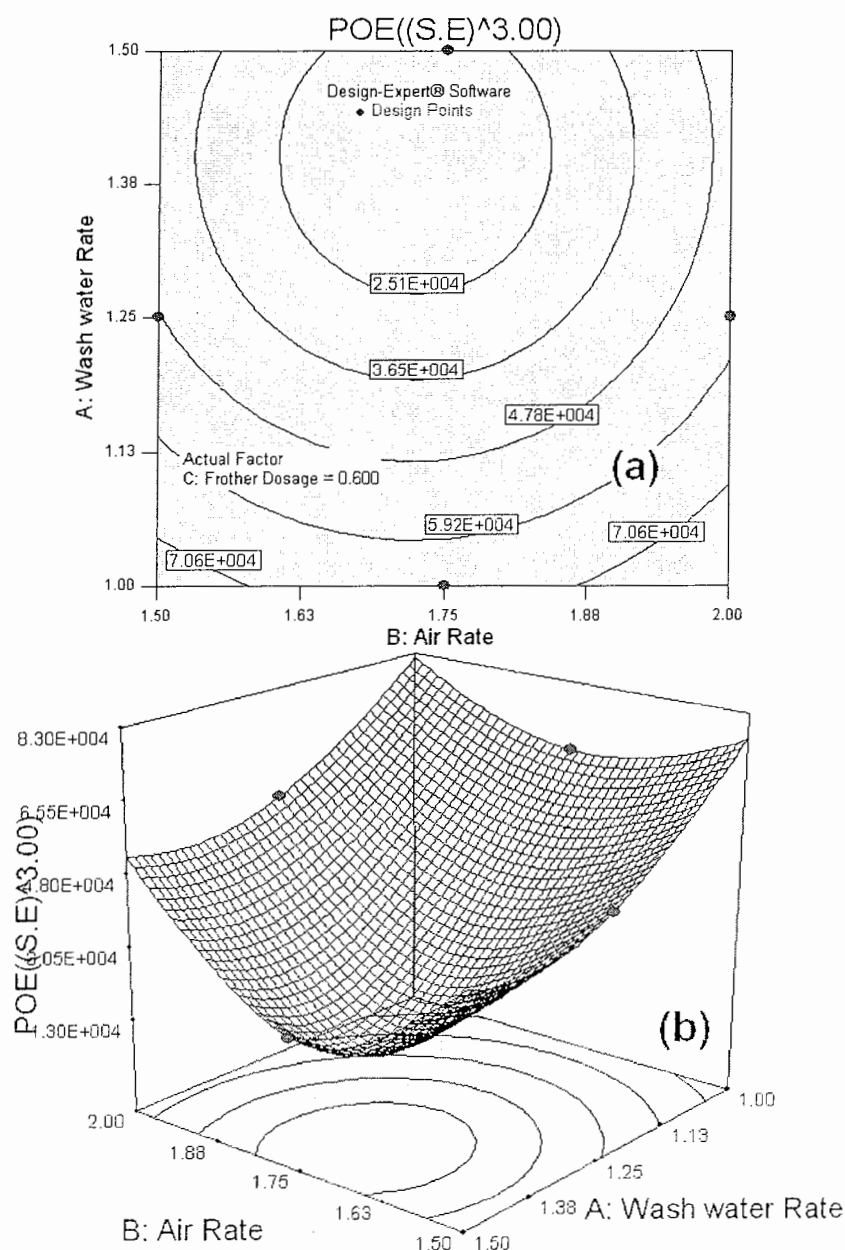
شکل (۳۴-۶) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی بر پاسخ (بازدهی جدایش)

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود در سطح میانی نرخ گازدهی و با کاهش نرخ آب

شستشو میزان بازدهی جدایش زغال افزایش پیدا می کند.

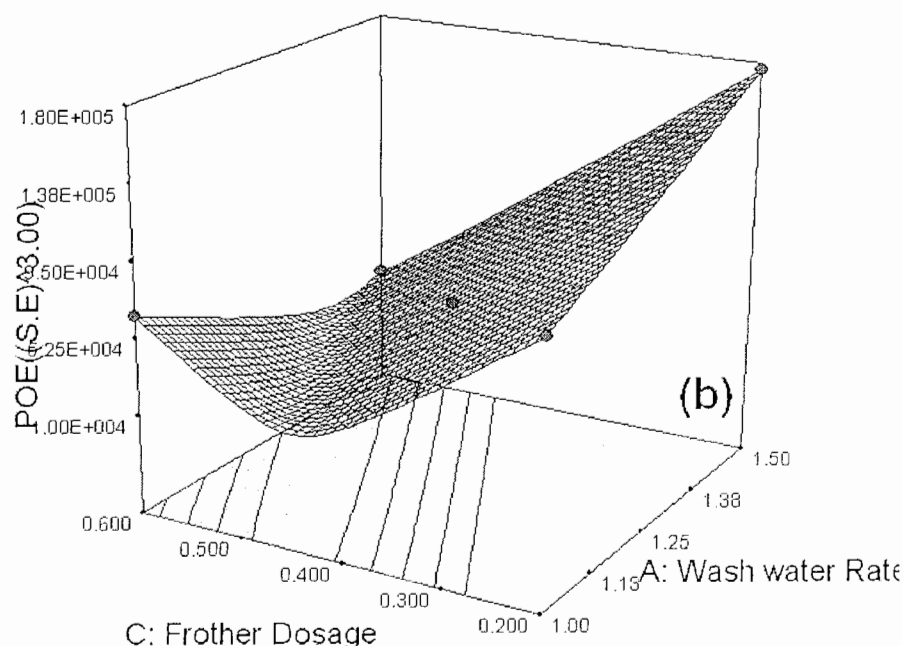
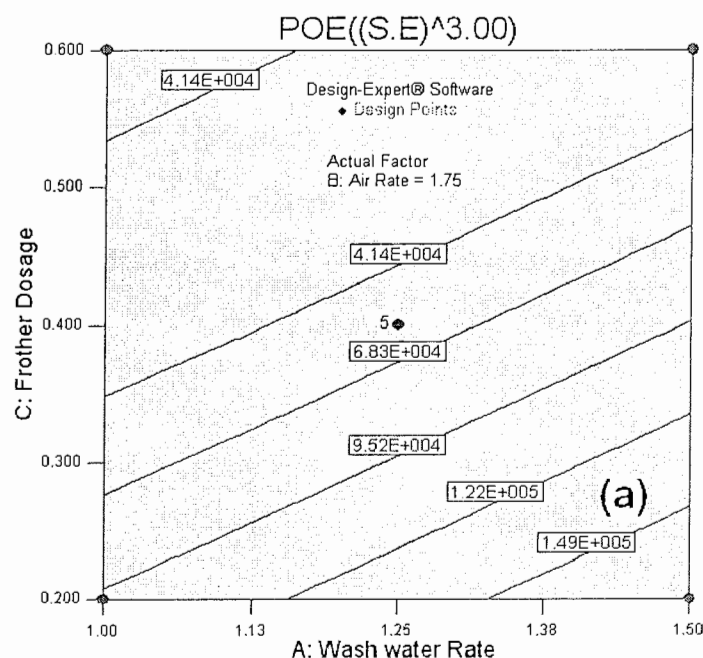
۶-۴-۶- بررسی و تحلیل گسترش خطا در آزمایشهای پاسخ سوم (بازدهی جدایش)

یکی از مزایای بسیار خوب طراحی آماری آزمایشها توسط روشهای پاسخ سطح قابلیت بررسی گسترش خطا (POE) می باشد. گسترش خطا به مفهوم میزان خطایی است که به سبب تغییرات غیر قابل کنترل در تنظیم سطوح عوامل در پاسخ آزمایشها بوجود می آید. در شکل (۶-۳۵) نمودار دویعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی، نشان داده شده است.



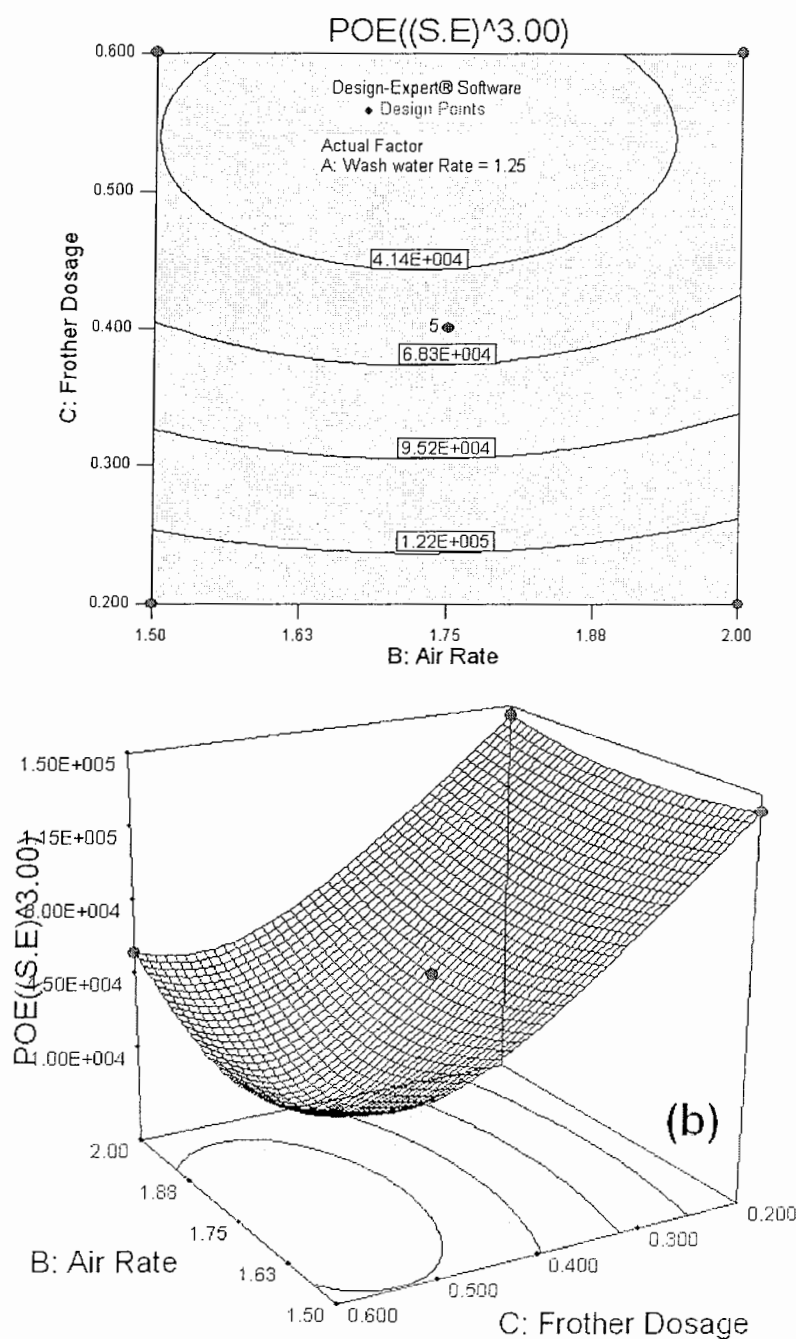
شکل (۶-۳۵) نمودار دویعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ آب شستشو و نرخ گازدهی

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود در سطح میانی نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو تقریباً (1.38 Lit/min) میزان گسترش خطا کاهش پیدا می کند. در شکل (۶-۳۶) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی گسترش خطا برای عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز، نشان داده شده است.



شکل (۶-۳۶) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود با کاهش نرخ آب شستشو و تقریباً در میزان مصرف کف ساز میزان گسترش خطا کاهش پیدا کرده است. در شکل (۶-۳۷) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی گسترش خطا برای عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز، نشان داده شده است.

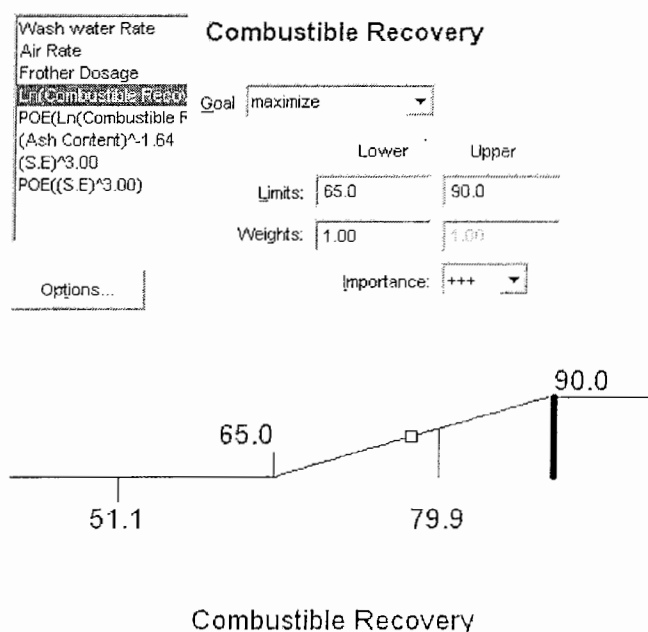


شکل (۶-۳۷) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی گسترش خطا در تغییر سطوح عوامل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز

همانطور که در نمودارها مشاهده می شود در سطح میانی نرخ گازدهی و افزایش میزان مصرف کف ساز میزان گسترش خطا کاهش پیدا کرده است.

۵-۶- بهینه سازی شرایط عملیاتی ستون

یکی از اهداف مهم ما در انجام آزمایشها سعی در بهینه سازی شرایط عملیاتی ستون فلو تاسیون بوده است که این مهم در روشهای طراحی آماری آزمایشها، تنها توسط روشهای پاسخ سطح امکان پذیر می باشد به همین دلیل بوده که این سری از آزمایشها توسط روش پاسخ سطح طراحی و اجرا شده بود. بهینه سازی بدین مفهوم می باشد که بازه سطوح عوامل در چه مقادیری تنظیم شود تا پاسخ آزمایشها مطلوبتر شود. مطلوبیت پاسخها در این تحقیق بیشینه کردن بازیابی و بازدهی جدایش و کمینه کردن درصد خاکستر محصول می باشد. و همچنین به منظور پایدار سازی نیز می بایست گسترش خطا در بازیابی و بازدهی جدایش که قبلاً مورد بررسی قرار گرفت، کمینه شوند. در شکل (۶-۳۸) نمونه ای از تنظیم شرایط مطلوبیت پاسخ (بازیابی) نشان داده شده است.



شکل (۶-۳۸) نمونه ای از تنظیم شرایط مطلوبیت پاسخ (بازیابی)

همانطور که در شکل مشاهده می شود، هدف بیشینه کردن بازیابی زغال تعریف شده است. و از نظر عملیاتی محدوده کمترین و بیشترین مقادیر بازیابی حاصل شده از انجام آزمایشها ۵۱/۱٪ تا ۷۹/۹٪ بوده است ولی به منظور نیل به هدف، کمترین و بیشترین محدوده درصد بازیابی برای نرم افزار ۶۵٪ تا ۹۰٪ تعریف شده است تا نرم افزار بتواند توسط مدلی که قبلاً بر آزمایشها برازش شده بود به سمت بیشینه کردن بازیابی حرکت کند. عبارت وزن^۴ که به صورت پیش فرض بر روی عدد ۱ تنظیم شده است، میزان تاکید بر سطوح بالایی و پایینی محدوده عوامل را نشان می دهد بدین صورت که در عدد ۱ میزان تاکید بر سطوح بالایی و پایینی عوامل یکسان فرض شده است. توسط عبارت اهمیت^۵ نیز می توان در صورت لزوم میزان اهمیت عوامل و پاسخ در عملیات بهینه سازی را بیشتر یا کمتر در نظر گرفت، که از یک تا پنج قابل تنظیم می باشد که به صورت پیش فرض بر روی ۳ تنظیم شده است. (Stat-Ease, Inc, 2005)

همانند شکل (۶-۳۸) برای بقیه پاسخها و گسترش خطاها نیز محدودیت ها و شرایط مربوط به مطلوبیت تعریف شده است. که در جدول (۶-۱۵) این محدودیت ها و تنظیم شرایط مربوط به مطلوبیت برای تمام عوامل و پاسخها نشان داده شده است.

جدول (۶-۱۵) محدودیت ها و تنظیم شرایط مربوط به مطلوبیت

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Wash water Rate	is in range	1	1.5	1	1	3
Air Rate	is in range	1.5	2	1	1	3
Frother Dosage	is in range	0.2	0.6	1	1	3
Combustible Recovery	maximize	65	90	1	1	3
POE(Ln(Combustible Recovery))	minimize	0.024831	0.311542	1	1	3
Ash Content	is in range	6.5	12.5	1	1	3
S.E	maximize	60	80	1	1	3
POE((S.E)^3.00)	minimize	21249.07	175991.1	1	1	3

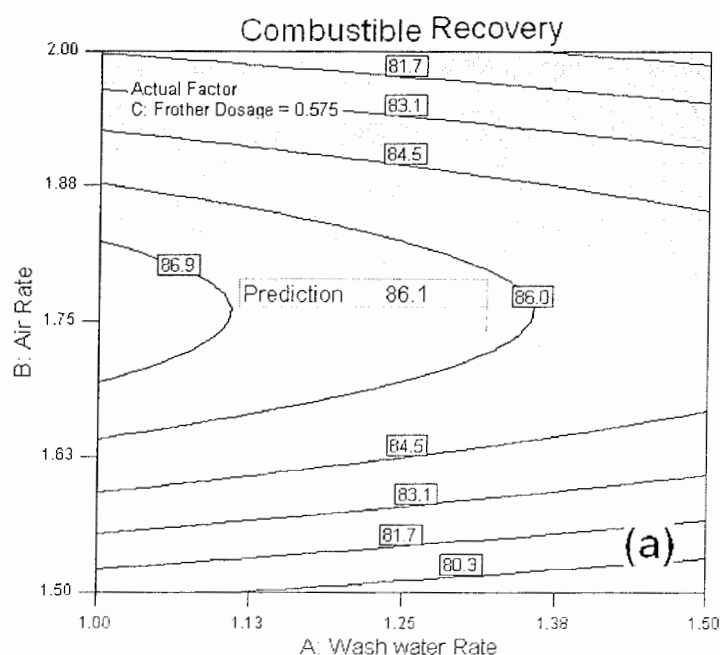
حال که محدودیتها و شرایط مربوط به مطلوبیت برای تمام عوامل و پاسخها مشخص شد به حل مساله یعنی بهینه سازی عددی توسط نرم افزار پرداخته شده است. در جدول (۶-۱۶) راه حلهای پیشنهادی در بهینه سازی فرآیند توسط نرم افزار نشان داده شده است.

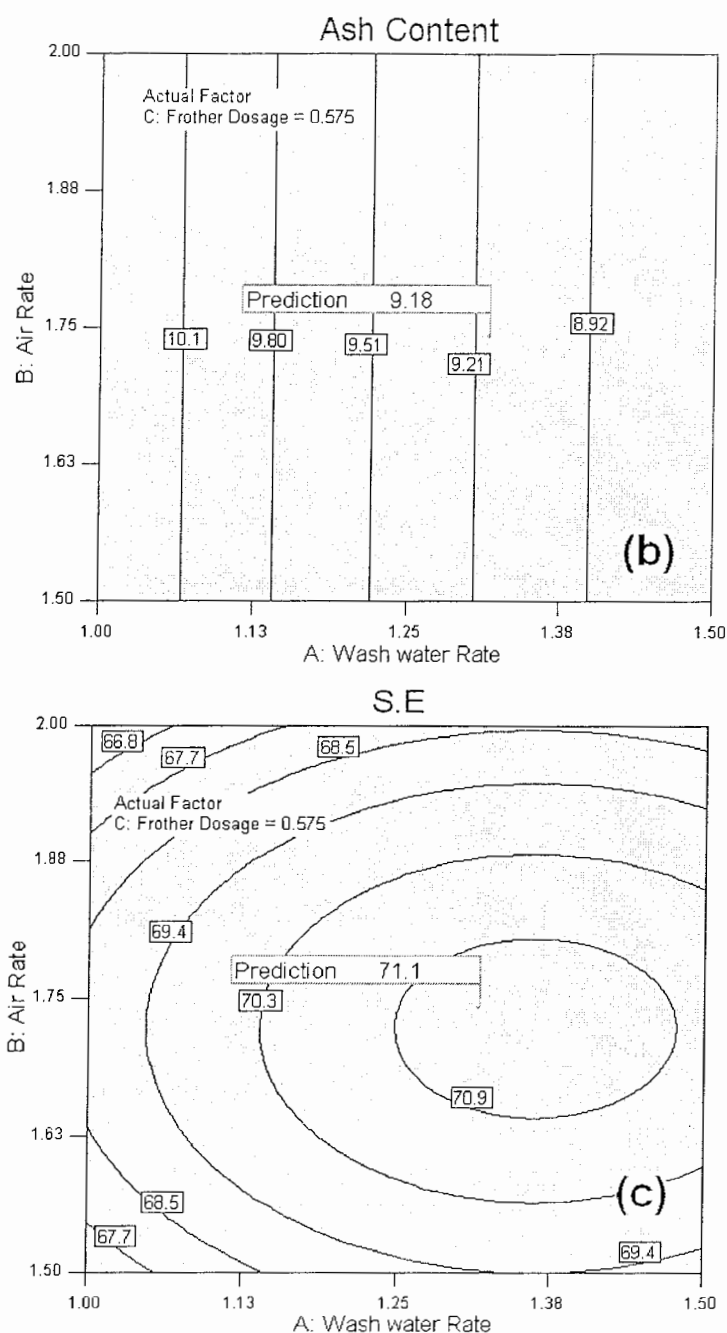
⁴ Weights⁵ Importance

جدول (۶-۱۶) راه حلهای پیشنهادی در بهینه سازی فرآیند

Solutions.No	1	2	3	4	5	6	7
Factors&Responses							
Wash water Rate	1.32	1.32	1.33	1.33	1.31	1.31	1.36
Air Rate	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74
Frother Dosage	0.575	0.576	0.577	0.579	0.574	0.572	0.588
Combustible Recovery	86.08	86.07	86.05	86.04	86.10	86.10	85.98
POE(Ln(Combustible Recovery))	0.0175	0.0174	0.0174	0.0171	0.0174	0.0181	0.0164
Ash Content	9.18	9.17	9.17	9.17	9.18	9.17	9.15
S.E	71.11	71.12	71.12	71.13	71.11	71.11	71.15
POE((S.E)^3.00)	14768.8	14737.1	14628.4	14658.7	14927.0	14728.1	14415.9
Desirability	0.8045	0.8045	0.8045	0.8045	0.8045	0.8045	0.8044

همانطور که در جدول (۶-۱۶) مشاهده می شود، طبق پیشنهاد اول توسط نرم افزار اگر عامل نرخ آب شستشو در سطح 1.32Lit/min، و نرخ گازدهی در 1.74cm/s، (تقریباً در سطح متوسط در آزمایشها) و میزان مصرف کف ساز در 0.575ml/kg (تقریباً در سطح بالا در آزمایشها) تنظیم شود پاسخ آزمایشها به صورت، ۸۶/۰۸ درصد بازیابی و ۹/۱۸ درصد خاکستر محصول و ۷۱/۱۱ درصد بازدهی جدایش پیش بینی می شود. در شکل (۶-۳۹) نمودار دوبعدی پاسخهای آزمایشها در نقطه مربوط به محل پیش بینی بهینه در پیشنهاد اول نشان داده شده است.





شکل (۶-۳۹) نمودار دوبعدی پاسخهای آزمایشها در نقطه مربوط به محل پیش بینی بهینه در پیشنهاد اول

همانطور که قبلاً نیز بحث شد نقاط پیشنهادی نرم افزار برای بهینه سازی، در واقع بهینه واقعی نمی باشند و بسته به تعداد آزمایشها، تعداد عوامل، تعداد سطوح، فاصله آنها، روش طراحی و غیره، شرایط آزمایشها متفاوت شده و پاسخ (نقاط بهینه) نیز متفاوت خواهد شد.

در ادامه بهتر این بود که ما می توانستیم شرایط پیشنهاد شده توسط نرم افزار را در آزمایشگاه بر روی نمونه های زغال توسط ستون فلوتاسیون بکار بندیم و جواب ها را با هم مقایسه کنیم اما

متأسفانه به دلیل وجود مشکلات عملیاتی از جمله پاره شدن شیلنگ مربوط به پمپهای پرستالتیک خوراک دهی و باطله، و از کار افتادن موقت جریان سنج آب شستشو، و همچنین فاصله زمانی که (به دلیل قطع شدن آب در آزمایشگاه و غیره) بوجود آمد و باعث تغییر خصوصیات نمونه (اکسیده شدن و غیره) در آزمایشگاه شد، از ادامه کار باز ماندیم.

فصل هفتم

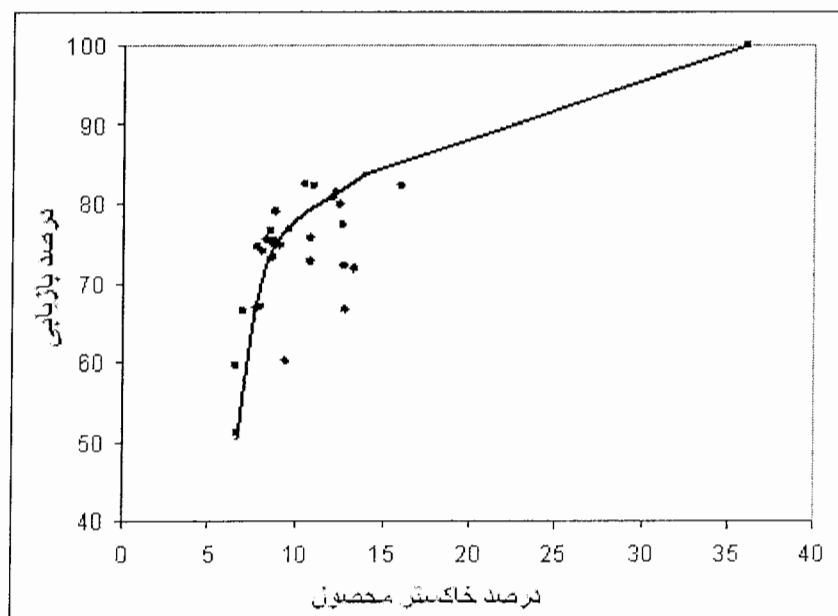
نتیجه گیری و پیشنهاد

در این تحقیق سعی شد تا قابلیت شستشوپذیری زغال البرز شرقی توسط فلوئاسیون ستونی مطالعه شود. از آنجایی که هدف از مطالعه، شناخت بهتر فرآیند و عوامل موثر بر آن و همچنین امکان بهینه سازی فرآیند بود، لذا برای رسیدن به این اهداف طراحی آزمایشها، توسط روشهای طراحی آماری آزمایشها صورت گرفت که در ادامه به برخی از نتایجی که از انجام تحقیق حاصل شد پرداخته شده است.

۷-۱- نتایج

۱) در بسیاری از صنایع، از جمله فلوئاسیون ستونی، احتیاج به جریان ثابتی از سیال، صرفنظر از فشار پالپ ورودی به درون ستون می باشد. درحالیکه در پمپهای معمولی با تغییر هد فشاری و یا مکشی و نوع سیال، میزان دبی جریان نیز تغییر می کند که مطلوب نمی باشد. به همین دلیل برای رفع این مشکل امروزه از پمپهای پرستالتیک به جای پمپهای معمولی استفاده می شود. بدین ترتیب به منظور بررسی این ادعا، نحوه رفتار یک پمپ پرستالتیک در هنگام اعمال تغییرات بر روی هد فشاری و همچنین تغییر در نوع سیال با استفاده از روش فاکتوریل کامل در طراحی آماری آزمایشات مورد بررسی قرار گرفت. که بعد از حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و توزیع مناسب خطا، نتایج حاصل نشان داد که عملکرد پمپ پرستالتیک صحیح بوده است، و از میان سه عاملی که مورد بررسی قرار گرفت، عامل درجه سرعت چرخش موتور پمپ، بیشترین اهمیت را در تنظیم دبی جریان داشت، و تأثیر عوامل درجه تنظیم هد فشاری و یا مکشی و نوع سیال، در پاسخ (دبی جریان) بی اهمیت بودند.

۲) بطور کلی همانطور که انتظار می رفت فلوئاسیون ستونی در مقایسه با فلوئاسیون مکانیکی از قابلیت بهتری، در فلوئاسیون زغالسنگ برخوردار بود به طوری که طبق جدول (۲-۱) از فصل اول، در کارخانه البرز شرقی، در بازیابی ۸۳/۳۹ درصد، میزان خاکستر محصول (کنسانتره) فلوئاسیون مکانیکی ۱۶/۳۵ درصد بوده است که این میزان خاکستر محصول در صنعت زغالشویی مقدار قابل قبولی به شمار نمی رود. در صورتیکه در آزمایشهای انجام شده برای شناخت عوامل توسط ستون فلوئاسیون در شرایط نسبتاً مطلوب، طبق جدول (۳-۵) در بازیابی حدود ۸۲ درصد، میزان خاکستر محصول (کنسانتره) حدود ۱۱ درصد بوده است که مقدار نسبتاً قابل قبولی می باشد. در شکل (۱-۷) منحنی بازیابی-خاکستر برای تمامی آزمایشهای انجام شده در دو مرحله، نشان داده شده است.



شکل (۱-۷) منحنی بازیابی-خاکستر برای تمامی آزمایشهای انجام شده

۳) طراحی و تحلیل آزمایشها به دلیل کاستن ریسک کار، در دو مرحله و توسط روشهای آماری آزمایشها و به کمک نرم افزار Design Expert صورت پذیرفت. در مرحله اول، با هدف شناخت

عوامل موثر و فهم بیشتر رابطه بین آنها با انجام تعداد آزمایشهای کمتر، از روش فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم بهره گرفته شد. در این سری از آزمایشات، چهار عامل نرخ خوراک دهی، میزان مصرف گازوئیل، نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو انتخاب و درصد بازیابی، درصد خاکستر محصول و بازدهی جدایش نیز به عنوان پاسخهای آزمایشات در نظر گرفته شدند. در بررسی نتایج حاصل از آزمایشها، در پاسخ اول (درصد بازیابی) مدل 2FI بر آزمایشها برازش شد. و همچنین عملیات تحلیل خطاها نیز صورت پذیرفت. و به ترتیب اثرات زیر، از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد بازیابی) معنی دار و با اهمیت بودند.

ابتدا اثر اصلی میزان مصرف گازوئیل بود که در بازیابی زغال تاثیر مثبت داشت. سپس اثر متقابل میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی بود، تاثیر آن بدین صورت بود که در سطح پایین میزان مصرف گازوئیل با افزایش نرخ گازدهی درصد بازیابی بالا رفت ولی در سطح بالای میزان مصرف گازوئیل با افزایش نرخ گازدهی درصد بازیابی تغییر خاص و معنی داری نکرد. بعد از آن اثر اصلی نرخ گازدهی بود که تاثیر مثبتی را در بازیابی زغال داشت، سپس اثر اصلی نرخ خوراک دهی بود که با افزایش آن درصد بازیابی کاهش یافت. سپس اثر متقابل میزان مصرف گازوئیل و نرخ خوراک دهی بود که در سطح پایین میزان مصرف گازوئیل با افزایش نرخ خوراک دهی درصد بازیابی پایین آمد ولی در سطح بالای میزان مصرف گازوئیل با افزایش نرخ خوراک دهی درصد بازیابی تغییر خاص و معنی داری نکرد. بعد از آن اثر متقابل نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو بود که در سطح پایین نرخ آب شستشو، با افزایش نرخ گازدهی درصد بازیابی بالا رفت، ولی در سطح بالای نرخ آب شستشو، با افزایش نرخ گازدهی قضیه برعکس شد. خود عامل نرخ آب شستشو نیز از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد بازیابی) با اهمیت و معنی دار نبود.

۴) در مرحله اول کار، برای پاسخ دوم آزمایشها (درصد خاکستر محصول)، مدل 2FI بر آزمایشها برازش شد. و همچنین عملیات تحلیل خطاها نیز صورت پذیرفت. در بررسی نتایج حاصل از آزمایشها، (درصد خاکستر محصول) به ترتیب اثرات زیر از نظر آماری معنی دار و با اهمیت

بودند. ابتدا اثر اصلی نرخ گازدهی بود که با افزایش آن درصد خاکستر محصول افزایش یافت. سپس اثر متقابل میزان مصرف گازوئیل و نرخ خوراک دهی بود که در سطح پایین میزان مصرف گازوئیل با افزایش نرخ خوراک دهی درصد خاکستر محصول پایین آمد، ولی در سطح بالای میزان مصرف گازوئیل با افزایش نرخ خوراک دهی درصد خاکستر محصول تغییر خاصی و معنی داری نکرد. بعد از آن اثر اصلی نرخ خوراک دهی بود که با افزایش آن درصد محصول کمی افزایش یافت. سپس اثر اصلی میزان مصرف گازوئیل بود که با افزایش آن درصد خاکستر محصول کمی کاهش یافت. و عامل نرخ آب شستشو نیز از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد خاکستر محصول) با اهمیت و معنی دار نبود.

۵) در مرحله اول کار، برای پاسخ سوم (بازدهی جدایش)، مدل 2FI بر آزمایشها برازش شد. و همچنین عملیات تحلیل خطاها نیز صورت پذیرفت. در بررسی نتایج حاصل برای آزمایشها (بازدهی جدایش)، به ترتیب اثرات زیر از نظر آماری معنی دار و با اهمیت بودند. در ابتدا اثر اصلی میزان مصرف گازوئیل بود که در بازدهی جدایش زغال تاثیر مثبت داشت. سپس اثر متقابل میزان مصرف گازوئیل و نرخ گازدهی بود که در سطح پایین نرخ گازدهی با افزایش میزان مصرف گازوئیل بازدهی جدایش بالا رفت، ولی در سطح بالای نرخ گازدهی با افزایش میزان مصرف گازوئیل بازدهی جدایش تغییر خاصی و معنی داری نکرد (کمی بالا رفت). و بقیه عوامل و اثرات متقابل نیز از نظر آماری معنی دار و با اهمیت نبودند.

۶) با توجه به تحلیل ها و بررسی هایی که در مرحله اول آزمایشها انجام شد، شناخت نسبتاً خوبی نسبت به عوامل موثر و اثرات متقابل آنها در شستشوپذیری زغال توسط فلو تاسیون ستونی بدست آمد که مقدمات لازم را برای مطالعات بیشتر و بهینه سازی عملیات شستشوپذیری زغال در ستون فلو تاسیون توسط روشهای پاسخ سطح را فراهم کرد. بدین ترتیب به صورت کلی، عامل میزان مصرف گازوئیل چون در تمام بررسی ها، سطح بالای آن برای آزمایشها مفید بود و باعث پایدارتر شدن هر چه بیشتر شرایط آزمایش می شد، در مرحله بعد (بهینه سازی)، به صورت ثابت در سطح بالای خود (3ml/kg) نگه داشته شد. عامل نرخ خوراک دهی در زمانی

که عامل میزان مصرف گازوئیل در سطح بالای خود قرار داده شده بود، تاثیر کمتری در آزمایشها داشت و از طرفی اعمال تغییرات در آن برای رسیدن به هدف در مرحله بعد نیز (بهینه سازی)، از اهمیت چندانی برخوردار نبود، لذا در سطح متوسط خود ($3/6 \text{ Lit/min}$) به صورت ثابت در نظر گرفته شد. و دو عامل نرخ گازدهی و نرخ آب شستشو، دوباره در مرحله بعد نیز به عنوان عامل، در سطوح مختلف مورد تغییر قرار گرفتند.

۷) یکی از اهداف اصلی انجام تحقیق بهینه سازی شرایط عملیاتی ستون با استفاده از روشهای پاسخ سطح، در طراحی آماری آزمایشها بود. بدین ترتیب با توجه به اطلاعات و شناختی که از انجام آزمایشها در مرحله اول حاصل شد، در این مرحله با هدف بهینه سازی شستشوپذیری زغال با ستون فلوتاسیون توسط روشهای پاسخ سطح در طراحی آماری آزمایشها، تعداد ۱۷ آزمایش در قالب طراحی پاسخ سطح و روش Box-Behnken انجام شد. در این سری از آزمایشات سه عامل نرخ آب شستشو، نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز، انتخاب و درصد بازیابی، درصد خاکستر محصول و بازدهی جدایش به عنوان پاسخهای آزمایشات در نظر گرفته شدند. برای آزمایشهای پاسخ اول (درصد بازیابی)، مدل Quadratic بر آزمایشها برازش شد. و همچنین عملیات تحلیل خطاها نیز صورت پذیرفت. در بررسی نتایج حاصل به ترتیب اثرات زیر از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد بازیابی) معنی دار و با اهمیت بودند. در ابتدا اثر اصلی میزان مصرف کف ساز بود که تاثیر مثبت و با اهمیتی را در بازیابی زغال داشت. سپس اثر اصلی نرخ آب شستشو بود که با افزایش آن درصد بازیابی کاهش یافت. بعد از آن اثر متقابل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز بود که در سطح پایین میزان مصرف کف ساز با افزایش نرخ آب شستشو درصد بازیابی پایین آمد، ولی در سطح بالای میزان مصرف کف ساز شرایط بهتر و پایدارتر شد. سپس اثر متقابل نرخ گازدهی و میزان مصرف کف ساز بود که، تقابل بین دو عامل وجود داشت ولی چندان دارای اهمیت نبود.

۸) در مرحله دوم کار (بهینه سازی) برای پاسخ دوم آزمایشها (درصد خاکستر محصول)، مدل خطی بر آزمایشها برازش شد. و همچنین عملیات تحلیل خطاها نیز صورت پذیرفت. در بررسی

نتایج حاصل برای آزمایشها (درصد خاکستر محصول)، به ترتیب اثرات زیر از نظر آماری معنی دار و با اهمیت بودند. در ابتدا اثر اصلی میزان مصرف کف ساز بود که با افزایش آن درصد خاکستر محصول افزایش یافت. سپس اثر اصلی نرخ آب شستشو بود که با افزایش آن میزان درصد خاکستر محصول کاهش پیدا کرد. عامل نرخ گازدهی و اثرات متقابل نیز از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (درصد خاکستر محصول) با اهمیت و معنی دار نبودند.

۹) در مرحله دوم کار (بهینه سازی) برای پاسخ سوم (بازدهی جدایش)، بعد از حصول اطمینان از برازش مناسب مدل Quadratic و همچنین توزیع مناسب خطا، در بررسی نتایج حاصل برای آزمایشها (بازدهی جدایش)، به ترتیب اثرات زیر از نظر آماری معنی دار و با اهمیت بودند. در ابتدا اثر اصلی میزان مصرف کف ساز بود که تاثیر مثبت و با اهمیتی را در بازدهی جدایش زغال داشت. سپس اثر متقابل نرخ آب شستشو و میزان مصرف کف ساز بود که در سطح پایین میزان مصرف کف ساز با افزایش نرخ آب شستشو بازدهی جدایش پایین آمد، ولی در سطح بالای میزان مصرف کف ساز شرایط بهتر و پایدارتر شد. بعد از آن اثر اصلی نرخ آب شستشو بود که با افزایش آن بازدهی جدایش کاهش یافت.

۱۰) بهینه سازی بدین مفهوم بود که بازه سطوح عوامل در چه مقادیری تنظیم شوند تا پاسخ آزمایشها مطلوبتر شود. مطلوبیت پاسخها در این تحقیق بیشینه کردن درصد بازیابی و بازدهی جدایش و کمینه کردن درصد خاکستر محصول بود. و همچنین به منظور پایدار سازی فرایند نیز می بایست گسترش خطا برای بازیابی و بازدهی جدایش، کمینه می شد. که بعد از حل مساله یعنی بهینه سازی عددی توسط نرم افزار راه حلهای پیشنهادی در بهینه سازی فرآیند توسط نرم افزار نشان داده شد که بر اساس پیشنهاد اول اگر بازه سطوح عوامل طبق جدول (۷-۱) تنظیم شود پاسخ آزمایشها به صورت، ۸۶/۰۸ درصد بازیابی و ۹/۱۸ درصد خاکستر محصول و ۷۱/۱۱ درصد بازدهی جدایش پیش بینی می شود.

جدول (۷-۱) بازه سطوح عوامل طبق پیشنهاد اول توسط نرم افزار

عنوان	واحد	مقدار
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.32
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.74
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.575
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3

۷-۲- پیشنهادات

۱) انتخاب عوامل و تعداد سطوح تغییر آنها همیشه یکی از مراحل مهم و مشکل در طراحی آماری آزمایشها بوده است. در تحقیق حاضر عوامل بر اساس دخیل بودن آنها در شرایط کاری ستون و فلوتاسیون زغال انتخاب شد، ولی عمق کف به عنوان عامل، مورد بررسی قرار نگرفت (ثابت فرض شد). در تحقیقاتی که قبلاً توسط افراد دیگر نیز صورت گرفته است عامل عمق کف به دلیل مشکلات مربوط به تنظیم آن چندان مورد مطالعه قرار نگرفته است. ستون فلوتاسیونی که توسط دانشگاه صنعتی شاهرود خریداری شده دارای سیستم کنترل فازی عمق کف می باشد که به نظر می رسد شرایط تنظیم عمق کف را دقیق تر و ساده تر نموده است. لذا توصیه می شود که عامل عمق کف، که به نظر محقق عامل مهمی نیز در فلوتاسیون ستونی زغال به شمار می رود در تحقیقات بعدی مورد توجه قرار گیرد.

۲) در این تحقیق به دلیل وجود آمدن مشکلات عملیاتی که قبلاً بیان شد، امکان کامل کردن مرحله دوم کار (بهینه سازی) به صورت مناسب فراهم نشد. لذا در تحقیقات آتی بهتر است که مشکلات عملیاتی تا حد امکان پیش بینی و پیشگیری شود و اگر هدف بهینه سازی

فرآیند باشد در انتها بعد از حل مساله توسط نرم افزار، آزمایشهای پیشنهاد شده انجام شود تا مقایسه بهتری بین شرایط عملیاتی و مدل سازی شده توسط نرم افزار بدست آید.

(۳) این تحقیق فقط از نظر فنی امکان شستشویپذیری زغال البرز شرقی را توسط فلو تاسیون ستونی مورد بحث قرار داده است. و به نظر می رسد که به منظور کاربردی شدن هر چه بیشتر تحقیق بهتر است بررسی اقتصادی نیز در مقایسه شرایط فعلی کارخانه با شرایطی که ستونهای فلو تاسیون در مدار قرار گیرند نیز انجام شود.

فهرست منابع

- بصیری ع.، ۱۳۵۷، طراحی آماری در علوم کشاورزی، انتشارات دانشگاه شیراز
- رضایی ب.، ۱۳۷۸، فرآوری کانیها به روش ثقلی، انتشارات دانشگاه هرمزگان
- سرمد ز. و اسفندیاری م.، ۱۳۶۹ و ۱۳۷۱، اصول آماری در طرح آزمایشها، جلد ۱ و ۲ مرکز نشر دانشگاهی تهران
- غروی م.، ۱۳۸۲، مطالعه امکان سنجی شستشوی باطله جیگ و فلو تاسیون کارخانه زغالشویی البرز شرقی، پایان نامه کارشناسی ارشد
- Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000, **DOE Simplified: Practical Tools For Effective Experimentation**, Productivity Press.
- Bouchard J., Desbiens A. & del Villar R., 2004, **Recent advances in bias and froth depth control in flotation columns**, ELSEVIER.
- Carvalho T.M. & Durao F., 2002, **Control Of Column Flotation Using Fuzzy Logic Inference**, ELSEVIER.
- Cole-Parmer Instrument CO, 2003, Operating Manual For All Models Of MASTER FLEX I/P
- Deurbrouck A.W. & Palowitch E.R., 1963, **Performance Characteristics of Coal-Washing Equipment**, Concentrating Tables, U.S. Bureau of Mines RI 6239.
- Finch J.A & Dobby G.S, 1990, **Column Flotation**, PERGAMON Press.
- Firth B., Edward D., Clarkson C. & 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.
- Garcia-Diaz A. & Phillips D.T., 1995, **Principles of Experimental Design and Analysis**, Chapman & Hall
- Luttrel G.H., Weber A.T., Adel G.T. & Yoon R.H, 1988, **Microbubble Flotation of Fine Coal**, Department of Mining and Minerals Engineering Virginia Polytechnic Institus and state university

MPE International INC, 2003, **4" DIA. Column Flotation Cell Operating And Maintenance Instructions.**

Montgomery D., 1997, **Design and Analysis of Experiments**, 4th ed New York: John Wiley and Sons

Parekh B.K., Groppo J.G., Stotts W.F. & Bland A.E., 1988, **Recovery of Fine Coal From Preparation Plant Refuse Using Column Flotation**, Kentucky Energy Cabinet Laboratory

Patwardhan A. & Honaker R.Q., 1999, **Development of a carrying-capacity model for column froth flotation**, ELSEVIER.

Phillips D.I., 1992, **From efficiency test, S-Rock Coal Beech Plant Sample.**

Phillips D.I., 1998, **OPTIMUM PROCESSING OF 1 MM BY ZERO COAL**, Virginia Polytechnic Institute and State University, Doctor of Philosophy in Mining and Minerals Engineering

Stat-Ease.Inc, 2005, **Design Expert Manual.**

پیوست الف

شرایط و نتایج آزمایشها در طرح

فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم آزمایش شماره الف-۱

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	1.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.67
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	2.8
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	3.17
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.20
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.5
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	55
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.0947
خاکستر خوراک	درصد	36.95
خاکستر سر ریز	درصد	12.77
خاکستر ته ریز	درصد	63.3
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	72.14
بازدهی جدایش	درصد	59.15

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم آزمایش شماره الف-۲

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	1.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.67
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	4.8
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	5.07
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.24
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	2
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	50
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.084
خاکستر خوراک	درصد	36.54
خاکستر سر ریز	درصد	10.80
خاکستر ته ریز	درصد	64.1
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	72.68
بازدهی جدایش	درصد	61.57

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم آزمایش شماره الف-۳

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	1.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.67
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	2.8
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	3.72
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.29
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	2
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	0.85
عمق کف	سانتی متر	67
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.206
خاکستر خوراک	درصد	37.15
خاکستر سر ریز	درصد	16.00
خاکستر ته ریز	درصد	71
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	82.26
بازدهی جدایش	درصد	60.45

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم آزمایش شماره الف-۴

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.67
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	4.8
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	6.70
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.27
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.5
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	80
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.419
خاکستر خوراک	درصد	35.86
خاکستر سر ریز	درصد	11.00
خاکستر ته ریز	درصد	72.1
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	82.30
بازدهی جدایش	درصد	67.33

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم آزمایش شماره الف-۵

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	1.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.67
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	4.8
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	6.40
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.23
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.5
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	60
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.356
خاکستر خوراک	درصد	36.2
خاکستر سر ریز	درصد	9.40
خاکستر ته ریز	درصد	55.9
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	60.16
بازدهی جدایش	درصد	53.54

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم آزمایش شماره الف-۶

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	1.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.67
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	4.8
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.61
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.44
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	2
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	0.85
عمق کف	سانتی متر	62
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	-0.011
خاکستر خوراک	درصد	37.74
خاکستر سر ریز	درصد	13.30
خاکستر ته ریز	درصد	63.7
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	71.73
بازدهی جدایش	درصد	58.71

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم آزمایش شماره الف-۷

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.67
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	2.8
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	3.23
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.13
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	2
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	0.85
عمق کف	سانتی متر	70
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.105
خاکستر خوراک	درصد	35.64
خاکستر سر ریز	درصد	12.20
خاکستر ته ریز	درصد	70.3
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	81.38
بازدهی جدایش	درصد	64.76

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم آزمایش شماره الف-۸

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.67
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	2.8
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	3.79
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.08
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.5
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	65
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.220
خاکستر خوراک	درصد	37.27
خاکستر سر ریز	درصد	10.50
خاکستر ته ریز	درصد	74
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	82.53
بازدهی جدایش	درصد	69.08

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم آزمایش شماره الف-۹

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	1.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.67
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	2.8
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	3.29
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.22
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.5
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	0.85
عمق کف	سانتی متر	60
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.117
خاکستر خوراک	درصد	37.21
خاکستر سر ریز	درصد	12.80
خاکستر ته ریز	درصد	59.7
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	66.60
بازدهی جدایش	درصد	55.61

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم آزمایش شماره الف-۱۰

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.67
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	2.8
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	3.74
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.11
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	2
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	55
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.209
خاکستر خوراک	درصد	37.54
خاکستر سر ریز	درصد	12.70
خاکستر ته ریز	درصد	68.3
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	77.33
بازدهی جدایش	درصد	62.85

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم آزمایش شماره الف-۱۱

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.67
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	4.8
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.35
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.26
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	2
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	0.85
عمق کف	سانتی متر	68
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	-0.063
خاکستر خوراک	درصد	37.28
خاکستر سر ریز	درصد	12.10
خاکستر ته ریز	درصد	71.6
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	80.84
بازدهی جدایش	درصد	65.70

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح فاکتوریل دو سطحی ناقص نامنظم آزمایش شماره الف-۱۲

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	1.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.67
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	2.8
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.51
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.37
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.5
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	35
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.367
خاکستر خوراک	درصد	36.65
خاکستر سر ریز	درصد	10.80
خاکستر ته ریز	درصد	66.7
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	75.69
بازدهی جدایش	درصد	63.70

پیوست ب

شرایط و نتایج آزمایشها در طرح

پاسخ سطح (Box-Behnken)

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۱

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.40
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.16
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.42
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	2
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.5
عمق کف	سانتی متر	65
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.136
خاکستر خوراک	درصد	35.65
خاکستر سر ریز	درصد	8.00
خاکستر ته ریز	درصد	65.3
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	73.98
بازدهی جدایش	درصد	65.39

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۲

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.20
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.50
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.24
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.75
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	67
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.206
خاکستر خوراک	درصد	36.49
خاکستر سر ریز	درصد	8.70
خاکستر ته ریز	درصد	66.7
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	74.88
بازدهی جدایش	درصد	65.58

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۳

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.20
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.23
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.28
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.75
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1
عمق کف	سانتی متر	68
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.150
خاکستر خوراک	درصد	35.16
خاکستر سر ریز	درصد	7.70
خاکستر ته ریز	درصد	59.4
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	66.74
بازدهی جدایش	درصد	59.89

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۴

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.20
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	5.01
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.24
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.75
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.5
عمق کف	سانتی متر	69
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.309
خاکستر خوراک	درصد	35.01
خاکستر سر ریز	درصد	6.50
خاکستر ته ریز	درصد	55.2
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	59.64
بازدهی جدایش	درصد	55.05

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۵

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.60
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.76
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.20
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.75
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.5
عمق کف	سانتی متر	67
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.259
خاکستر خوراک	درصد	35.79
خاکستر سر ریز	درصد	8.80
خاکستر ته ریز	درصد	69.5
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	78.88
بازدهی جدایش	درصد	68.11

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۶

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.40
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	3.92
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.42
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	2
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1
عمق کف	سانتی متر	67
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.087
خاکستر خوراک	درصد	35.83
خاکستر سر ریز	درصد	8.60
خاکستر ته ریز	درصد	64.6
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	73.18
بازدهی جدایش	درصد	64.15

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۷

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.40
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.51
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.13
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.5
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.5
عمق کف	سانتی متر	65
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.208
خاکستر خوراک	درصد	35.67
خاکستر سر ریز	درصد	7.90
خاکستر ته ریز	درصد	60.1
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	67.00
بازدهی جدایش	درصد	60.06

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۸

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.40
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.56
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.17
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.75
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	70
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.220
خاکستر خوراک	درصد	36.99
خاکستر سر ریز	درصد	9.50
خاکستر ته ریز	درصد	68.5
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	76.71
بازدهی جدایش	درصد	66.19

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۹

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.60
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.23
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.27
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.5
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	65
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.152
خاکستر خوراک	درصد	35.96
خاکستر سر ریز	درصد	8.70
خاکستر ته ریز	درصد	65.9
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	74.62
بازدهی جدایش	درصد	65.17

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۱۰

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.20
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	3.55
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.19
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	2
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	68
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.011
خاکستر خوراک	درصد	35.1
خاکستر سر ریز	درصد	6.60
خاکستر ته ریز	درصد	50.8
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	51.12
بازدهی جدایش	درصد	47.70

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۱۱

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.40
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.52
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.28
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.75
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	62
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.211
خاکستر خوراک	درصد	36.73
خاکستر سر ریز	درصد	8.50
خاکستر ته ریز	درصد	68.5
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	76.58
بازدهی جدایش	درصد	67.19

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۱۲

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.40
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.51
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.37
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.75
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	69
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.208
خاکستر خوراک	درصد	35.05
خاکستر سر ریز	درصد	7.80
خاکستر ته ریز	درصد	65.1
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	74.45
بازدهی جدایش	درصد	65.76

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۱۳

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.60
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.41
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.22
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	2
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	69
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.189
خاکستر خوراک	درصد	35.16
خاکستر سر ریز	درصد	8.30
خاکستر ته ریز	درصد	65.9
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	75.48
بازدهی جدایش	درصد	65.97

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۱۴

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.60
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.02
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.33
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.75
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1
عمق کف	سانتی متر	68
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.108
خاکستر خوراک	درصد	36.41
خاکستر سر ریز	درصد	12.50
خاکستر ته ریز	درصد	69.5
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	79.88
بازدهی جدایش	درصد	63.96

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۱۵

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.40
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.41
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.25
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.75
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	67
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.187
خاکستر خوراک	درصد	35.5
خاکستر سر ریز	درصد	9.00
خاکستر ته ریز	درصد	65.4
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	74.80
بازدهی جدایش	درصد	64.74

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۱۶

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.40
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	3.83
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.31
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.5
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1
عمق کف	سانتی متر	67
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.070
خاکستر خوراک	درصد	35.1
خاکستر سر ریز	درصد	8.70
خاکستر ته ریز	درصد	65.5
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	75.29
بازدهی جدایش	درصد	65.30

شرایط و نتایج آزمایشات در طرح پاسخ سطح (Box-Behnken) آزمایش شماره ب-۱۷

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف کلکتور	میلی لیتر بر کیلو گرم	3.00
میزان مصرف کف ساز	میلی لیتر بر کیلو گرم	0.20
دبی خوراک دهی	لیتر بر دقیقه	3.6
دبی ته ریز	لیتر بر دقیقه	4.27
دبی سر ریز	لیتر بر دقیقه	0.23
نرخ هوادهی	سانتی متر بر ثانیه	1.5
نرخ آب شستشو	لیتر بر دقیقه	1.25
عمق کف	سانتی متر	70
نرخ آب بایاس	سانتی متر بر ثانیه	0.158
خاکستر خوراک	درصد	35.84
خاکستر سر ریز	درصد	6.90
خاکستر ته ریز	درصد	60.3
بازیابی مواد قابل احتراق	درصد	66.47
بازدهی جدایش	درصد	60.60

Abstract

The processing of fine coals, -1 mm, in comparison with the coarser coal encountered many problems in most coal washery plants .

Due to the new mechanized excavation method that applied in coal mines, this problem increased and the recovery in flotation circuit decreased.

East Alborz coal washery is not exception and suffers from such problems. It seems that application of new methods of flotation, e.i, column flotation can improve the recovery of low ash coal concentrate such that it could be regarded as new method for processing of fine coal.

In this research the washability of East Alborz coal in column flotation by using experimental design methods was investigated. The experiments were designed and the results were analyzed with Design Expert software.

Experiments were carried out by using an MPE made pilot plant 4" diameter column flotation, in Shahrood University of Technology, Mineral Processing Laboratory.

At the first stage the function and performance of peristaltic pump was checked by changing the head pressure, motor speed and type of pulp in the full factorial experiments.

The main purpose of the experiments was the optimization of flotation by determination of the factors affecting the process to reach the most feasible recovery. In practice and at the first step the Irregular Fractional Factorial Design was applied for determination of the levels of four factors namely feed rate, fuel oil dosage, aeration rate and wash water rate. The results of the first step were used in the response surface methodology in which three factors namely wash water rate, aeration rate and frother dosage were optimized. The above three factors were controllable factors affecting the process and ash content, combustible recovery and separation efficiency were regarded as the response of the design.

It has been shown that if the wash water rate, aeration rate and frother dosage were respectively set at 1.32 Lit/min, 1.74 cm/s and 0.575 ml/kg the best response could be achieved. In the optimum condition the combustible recovery was 86.1% , the ash content was 9.18% and the separation efficiency was 71.11% . The figures show an acceptable response in such processing.

Keywords: Column flotation, Design of experiments, Response surface methodology, Box-Behnken Design, Alborz Sharghi Company.