



پایان نامه کارشناسی ارشد

دانشکده معدن و ژئوفیزیک

عنوان:

بررسی کانه آرائی و فلوتاسیون سنگ معدن باریت درین
کاشان

استاد راهنما :

دکتر سید ضیاء الدین شفاءئی

استاد مشاور:

دکتر آرزو عابدی

تهیه کننده:

ارشاد شهروئی

شهریور ۸۶

تقدیر و تشکر:

خدا را سپاس که بدون لطف و عنایت او قدم از قدم برداشته نشود. بر خود لازم می دانم از استاد ارجمند جناب آقای دکتر شفایی که در تمام مراحل پایان نامه مرا یاری نموده و وقت گرانبهای خود را صرف راهنمایی های اینجانب نمودند و همچنین خانم دکتر عابدی که همواره از راهنمایی های ایشان در طول مدت انجام پایان نامه بهره بردم تشکر و قدر دانی بنمایم.

همچنین از مدیریت آزمایشگاه کانه آرای و فلوتاسیون وقت جناب آقای مهندس کبیریان به خاطر همکاری های بی دریغشان صمیمانه تشکر می نمایم.

در نهایت نیز از جناب مهندس کر به خاطر کمکهای فراوان و صمیمانه ایشان در جهت انجام پایان نامه که همواره مرا یاری نمودند بسیار متشکرم.

چکیده

پیشرفت جوامع بشری و به موازات آن افزایش حجم تقاضا برای محصولات صنعتی، متخصصین را به استفاده بهینه از منابع و ثروتهای خدادادی ترغیب می کند. مروری بر زمینه بهره وری صحیح از منابع معدنی نشان می دهد که امروزه استفاده از منابع با عیارهای پایین و منابعی که از

نظر تکنولوژیکی امکان بهره برداری از آنها مشکل تر می باشد در دستور کار متخصصین قرار گرفته است.

در این راستا مدیریت محترم شرکت درین کاشان مصمم گردید نسبت به فلوتاسیون کانسنگهای با عیار پایین (وزن مخصوص متوسط ۳/۷) اقدام نماید. لذا در این تحقیق سعی شده تا قابلیت فلوتاسیون مکانیکی باریت 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. 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 فرآیند فلوتاسیون باریت با انجام تعداد آزمایشها کمتر بود، از روش فاکتوریل کامل بهره گرفته شد. در این سری از آزمایشات، چهار عامل درصد جامد پالپ، میزان مصرف کلکتور، زمان آماده سازی و نرمه گیری انتخاب و مقدار وزن مخصوص نیز به عنوان پاسخ آزمایشها مورد تحلیل قرار گرفته شد.

در مرحله دوم با توجه به اطلاعات و شناختی که از مرحله اول حاصل شده بود، بهینه سازی شرایط عملیاتی سلول مد نظر قرار گرفت. در این حالت

از روشهای پاسخ سطح^۱ که از روشهای مربوط به بهینه سازی، در طراحی آماری آزمایشها استفاده گردید. در این سری آزمایشها نیز سه عامل دورروتور، زمان فلوتاسیون و میزان مصرف سیلیکات سدیم، به عنوان متغیرهای قابل کنترل فرایند انتخاب و مقدار وزن مخصوص به عنوان پاسخ آزمایشات در نظر گرفته شد. بعد از انجام تحلیل توسط نرم افزار طبق پیشنهاد آن اگر عامل دور روتور در سطح ۱۰۰۰ rpm ، و زمان فلوتاسیون در ۲۴۰ ثانیه، و میزان مصرف سیلیکات سدیم در ۲۵۰۰ گرم بر تن (تقریباً در سطح بالای آزمایشها) تنظیم شود، پاسخ آزمایشها به صورت، ۴/۲۸ مقدار وزن مخصوص پیش بینی می گردد.

واژه های کلیدی: فلوتاسیون مکانیکی، شرکت درین کاشان، طراحی آماری

آزمایشها، روشهای پاسخ سطح، Box-Behnken، Design Expert

فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه..... ۱
- ۲-۱- تاریخچه..... ۱
- ۳-۱- مشخصات باریت..... ۳
- ۱-۲-۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی..... ۳
- ۲-۲-۱- مشخصات شیمیایی..... ۴
- ۳-۲-۱- بلورشناسی..... ۷
- ۴-۱- زمین شناسی کانه..... ۸
- ۱-۳-۱- زمین شناسی و پراکندگی کانه در ایران..... ۸
- ۲-۳-۱- شرایط تشکیل و ژنز انواع کانسارهای باریت..... ۹
- ۱-۴-۱- الف) ذخایر رگه ای پرکننده فضاهای خالی..... ۱۰

^۱ Response Surface Methods

- ۱-۴-۲-ب) تجمع ثانوی یا پسماندی ۱۰
- ۱-۴-۳-ج) ذخایر لایه ای ۱۱
- ۵-۱-موقعیت جغرافیایی معدن و کارخانه درین کاشان ۱۲
- ۱-۶-۶-مشخصات ماده معدنی ۱۲
- ۱-۶-۱-شناسایی نمونه ۱۲
- ۱-۶-۲-جرم مخصوص ۱۳
- ۱-۶-۳-بررسیهای میکروسکوپی ۱۳
- ۱-۶-۴-مقاومت در برابر خردایش و درجه آزادی نمونه ۱۴

فصل دوم: مطالعات انجام شده در مورد فلوتاسیون باریت

- ۱-۲-۱-مقدمه ۱۵
- ۲-۲-تحقیقات و مطالعات داخلی (انجام شده توسط شرکت درین کاشان) ۱۵
- ۲-۳-تحقیقات و مطالعات خارجی ۱۷
- ۲-۴-نتیجه حاصل از مطالعات فلوتاسیون ۱۹

فصل سوم: مقدمه ای بر طراحی آماری آزمایشها

- ۱-۳-۱-مقدمه ۲۱
- ۲-۳-۱-تعاریف اولیه ۲۲
- ۳-۲-۱-طراحی آماری آزمایشها (DOE) ۲۲
- ۳-۲-۲-عامل ۲۲
- ۳-۲-۳-سطح: ۲۳
- ۳-۲-۳-پاسخ: ۲۳
- ۳-۳-۱-اثرات متقابل بین عوامل ۲۳
- ۳-۴-۱-بلوک بندی و تصادفی کردن آزمایشها ۲۵
- ۳-۴-۲-طراحی آزمایشها به روش فاکتوریل کامل ۲۶
- ۳-۵-۱-محاسبه و بررسی اثرات عوامل ۲۷
- ۳-۶-۱-شناسایی اثرات معنی دار به کمک آنالیز واریانس (ANOVA) ۳۱
- ۳-۷-۱-مدلسازی اثرات معنی دار ۳۴
- ۳-۸-۱-طراحی آزمایشها به روش فاکتوریل ناقص ۳۶
- ۲-۹-۱-اتحاد و اختلاط در اثرات عوامل ۳۷
- ۳-۱۰-۱-طراحی آزمایشها به روش پاسخ سطح برای بهینه سازی ۳۹
- ۳-۱۰-۱-۱-روش Box-Behnken در طراحی پاسخ سطح ۴۰
- ۳-۱۰-۲-روش Central Composit در طراحی پاسخ سطح (CCD) ۴۲

فصل چهارم: مطالعه عوامل موثر در فلوتاسیون مکانیکی باریت

۴۵	۱-۴- مقدمه
۴۵	۲-۴- اهداف انجام آزمایشها
۴۵	۳-۴- بار ورودی سلول
۴۶	۴-۴- طراحی و روش انجام آزمایشها
۴۶	۵-۴- آزمایشهای مربوط به مطالعه عوامل موثر درفلوتاسیون مکانیکی باریت
۴۸	۶-۴- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ (مقدار وزن مخصوص)
۴۸	۶-۴-۱- برازش مدل بر روی داده های پاسخ (مقدار وزن مخصوص)
۵۰	۶-۴-۲- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ
۵۰	۶-۴-۳- آنالیز واریانس پاسخ (مقدار وزن مخصوص)
۵۱	۶-۴-۴- آنالیز خطاهای پاسخ (مقدار وزن مخصوص)
۵۴	۶-۴-۵- بررسی نتایج پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

فصل پنجم: بهینه سازی شرایط عملیاتی سلول با استفاده از روشهای طراحی آزمایشها

۶۶	۱-۵- مقدمه
۶۷	۲-۵- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ (مقدار وزن مخصوص)
۶۷	۵-۲-۱- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ (مقدار وزن مخصوص)
۶۸	۵-۲-۲- برازش مدل بر روی داده های پاسخ (مقدار وزن مخصوص)
۷۱	۵-۲-۳- آنالیز واریانس پاسخ (مقدار وزن مخصوص)
۷۲	۵-۲-۴- آنالیز خطاهای پاسخ (مقدار وزن مخصوص)
۷۴	۵-۲-۵- بررسی نتایج پاسخ (مقدار وزن مخصوص)
۸۲	۵-۳- بهینه سازی شرایط عملیاتی سلول

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهاد

۸۵	۶-۱- نتایج
۸۷	۶-۲- پیشنهادات
۸۸	فهرست منابع

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

کشور ایران از جمله کشورهای غنی از ذخایر معدنی است. با توجه به این که ذخایر پر عیار در حال اتمام می باشند، بنابراین باید در بهره‌برداری و استفاده از ذخایر باقیمانده دقت کافی مبذول شود. باریت از جمله مواد معدنی با ارزش است که در امر فرآوری مطلوب آن مشکلاتی وجود دارد که اکثراً ناشی از طراحی نادرست بخش کارخانه فرآوری می‌باشد. به همین دلیل نیاز به بررسی و بهینه سازی این بخش بیش از پیش احساس می‌شود.

در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از روشهای طراحی آماری آزمایشها ابتدا شناخت مطلوب و دقیقتری از شرایط فلوتاسیون باریت و عوامل موثر بر آن بدست

آید و سپس در مرحله بعد با استفاده از نتایج مراحل قبل بهینه سازی فلوتاسیون باریت صورت پذیرد.

۱-۲- تاریخچه

نام باریت از کلمه یونانی باروس^۲ به معنی سنگین گرفته شده و برای اولین بار در سال ۱۷۷۱ توسط هامیلتون^۳ و به عقیده برخی از مؤلفین، توسط شیل^۴ به کار رفته است. نامهای محلی دیگری برای این کانی نظیر هوی اسپار^۵، تیف^۶، کوک^۷، باریتس^۸ و باریتین به کار رفته است (الهی، ۱۳۷۲).

این ماده معدنی به دلیل وزن مخصوص زیاد از سالهای ۱۹۳۰ در حفاریهای اکتشافی مورد استفاده قرار گرفته است. وزن مخصوص بالا و خنثی بودن آن از نظر شیمیایی موجب بکارگیری گسترده این کانی به عنوان یک عامل وزنی در مایعات یا گلهای حفاری می شود. بیشتر مصرف باریت در صنایع حفاری چاههای عمیق نفت و گاز است، به طوری که تقریباً ۸۵٪ تقاضا برای این ماده معدنی را در بر می گیرد که بالغ بر ۶ میلیون تن در سال است. گل حفاری در روش دورانی و در مناطقی که فشار گاز یا مایع در اعماق زیاد است، برای محافظت و جلوگیری از فوران چاه یا ریزش دیواره ها استفاده می شود (الهی، ۱۳۷۲).

^۲ Barus

^۳ Hamilton

^۴ Scheele

^۵ Heavy spar

^۶ Tiff

^۷ Cawk

^۸ Barytes

خصوصیاتی نظیر وزن مخصوص زیاد، خنثی بودن آن از نظر شیمیایی، فراوانی ذخایر، سهولت استفاده و ارزانی آن سبب شده تا در اکثر نقاط دنیا و در بسیاری از صنایع در ساختن مواد شیمیایی باریمدار، پرکننده‌های ویژه، سرامیک، لاستیک، شیشه‌های شفاف، کاغذ، لوازم آرایش، پلاستیک، لباسهای عایق، کابل، جوهر سفید، آلیاژها، رنگ، چینی، چاشنی فشنگ، گرانول، لنت ترمز، چراغهای راهنمایی با نور سبز، لیتوپون مورد استفاده قرار گیرد ولی میزان مصرف آن در این صنایع کمتر از یک میلیون تن در سال برآورد شده است.

این کانی در سالهای قبل به عنوان باطله سایر مواد معدنی محسوب می شد، با آغاز فعالیت حفاری اکتشاف چاههای نفت در ایران، باریت به عنوان یک ماده معدنی اقتصادی به شمار آمد. در ایران تا سال ۱۳۳۸ هجری شمسی، باریت مورد نیاز برای شرکتهای نفتی از خارج تأمین می شد ولی از این تاریخ به بعد، اولین استخراج و بهره برداری از معادن توسط دو شرکت عمده باریت ایران و ماگوبار آغاز گردید و در سالهای ۱۳۵۵ و ۱۳۵۶ به اوج تولید خود یعنی ۲۲۰ هزارتن در سال رسید. در سال ۱۳۴۰، اولین کارخانه تهیه پودر باریت تأسیس و به مرحله بهره برداری رسید و دو کارخانه دیگر تولید پودر باریت، در سال ۱۳۵۳ در پرندک ساوه و سلفچگان شروع به کار نمودند. در سال ۱۳۵۳ تعداد ۳۰ معدن باریت فعال بوده که اکثریت آنها در استان مرکزی واقع شده اند. میزان استخراج این کانی در سال ۱۳۵۳ بالغ بر ۸۰۰۰۰ تن و در سال ۱۳۵۸ بالغ بر ۱۸۰۰۰۰ تن بوده است (الهی، ۱۳۷۲).

عامل مهم تعیین کننده تقاضا برای باریت، میزان فعالیت صنایع حفاری در جهان است. بنابراین تولید باریت به میزان تقاضا برای نفت بستگی دارد. میزان تولید

باریت نوسانات وسیعی را طی دو دهه گذشته نشان می‌دهد. تولید باریت به حداکثر میزان، در سال ۱۹۸۱ رسید که بالغ بر ۵/۸ میلیون تن بود. در اواسط دهه نود، به دلیل کاهش بازدهی، میزان تولید باریت به ۸/۴ میلیون تن رسید (در سالهای ۱۹۸۶ و ۱۹۸۷).

از سال ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۷ یک افزایش پایدار در تولید باریت مشاهده می‌شود، به طوری که در سال ۱۹۹۷ به ۵/۶ میلیون تن می‌رسد و پس از آن میزان تولید کاهش می‌یابد. باید توجه داشت که اکتشاف حوزه‌های نفتی جدید، اکتشاف مواد معدنی در اعماق بیشتر، رعایت مسائل زیست محیطی در صنایع شیمیایی مصرف‌کننده باریت نیز بر رشد تولید این کانه تأثیر دارند (الهی، ۱۳۷۲).

۱-۳- مشخصات باریت

باریت یکی از سنگین‌ترین کانیهای سولفات است و تنها کانی که در این رده، دارای وزن مخصوص بالاتری نسبت به آن می‌باشد، انگلزیت ($PbSO_4$) است. فرم بلورین آن اکثراً به صورت بلورهای تیغه‌ای، ورقه ورقه مانند، لایه‌ای یا رشته‌ای است. در بیشتر ذخایر تجاری به صورت نودولها، کنکرسیون‌ها، تجمعات گلسرخ مانند، ورقه‌های نازک تا لایه‌ای مشاهده می‌شود.

۱-۲-۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی

باریت یک کانی صنعتی سنگین وزن با وزن مخصوص 5.4 g/cm^3 است ولی این کانی عموماً حاوی ناخالصیهایی است که باعث کاهش وزن مخصوص آن می‌شود.

گردد. علاوه بر آن وجود اذخالها در باریت طبیعی نیز می تواند وزن مخصوص آن را به نحو چشمگیری کاهش دهد.

سختی آن بین ۳ تا ۵/۳ است. از لحاظ اقتصادی با توجه به میزان سهولت در آسیا پذیری باریت، اصطلاحات (سخت) و (نرم) به آن نسبت داده می شود. رنگ خاکه آن اکثراً سفید می باشد و گاهی در اثر مالش یا خراشیده شدن، بودار می شود که برخی بورا مربوط به حضور مواد کربناته می دانند.

اگر باریت کاملاً خالص باشد به صورت بی رنگ و شفاف است، ولی باریت خالص بندرت یافت می شود و در اغلب موارد، وجود اذخالها و ناخالصیها در باریت باعث ایجاد رنگهای متنوع در آن می شود. به عنوان مثال در اثر وجود اذخالهای گاز یا مایع به رنگ سفید، در حضور اذخالهای آهن به رنگ قرمز و وجود اذخالها هیدروکسید آهن باعث ایجاد رنگ زرد یا قهوه ای در این کانی می شود، علاوه بر آن وجود مواد آلی (مواد هیدروکربن یا بیتومینه) آنها به رنگ تیره تا سیاه در می آورد.

در صورت وجود اذخال یا ناخالصی این کانی در مقابل نور کدر بوده و در صورت داشتن رنگ سفید با مرمر سفید و خاکی شباهت پیدا می کند. جلای این کانی شیشه ای تا چرب و گاهی مرواریدی است. این کانی دارای سه سیستم رخ (کلیواژ) می باشد که کاملترین آنها به موازات سطح (۰۰۱) است. باریت در بیشتر موارد شکننده و دارای سطح شکست ناصاف است. این کانی اغلب همراه با کانیهای کالکوپیریت، کلسیت، آراگونیت، پیریت، کوارتز، وانادینیت، سروسیت و فلوئورین یافت می شود. در جدول (۱-۱) برخی از خواص فیزیکی و بلورشناسی کانیهای باریم دار ذکر شده است.

این کانی از دسته سولفات‌ها بوده و دارای فرمول شیمیایی BaSO_4 است. باریت منبع اصلی تهیه عنصر باریم محسوب می شود. باریم دارای عدد اتمی ۵۶، عدد جرمی ۱۳۷/۳۴، الکترون گاتیویته ۰/۸۵، شعاع یونی ۱۳/۶ آنگستروم و پتانسیل یونی ۵/۱ می باشد و جزء گروه عناصر قلیایی خاکی است. فراوانی این عنصر به صورت BaSO_4 در آب دریا ۲۰ میکروگرم در لیتر است. میانگین عنصر باریم در پوسته ۴۲۵ گرم در تن یا قسمت در میلیون (ppm) است. میانگین آن در گرانیت ۱۲۲۰ ppm و در دیاباز ۱۶۰ ppm می باشد. در فلدسپات پتاسیم ۳٪، در پلاژیو کلازها ۳/۷٪، در مسکویت ۹/۹٪ و در بیوتیت ۸-۶٪ BaO می تواند وجود داشته باشد.

۷/۶۵ درصد BaO و ۳/۳۴ درصد SO_3 در ساختمان باریت خالص وجود دارد. حلالیت این کانی در آب و اسید، در درجه حرارتهای عادی، بسیار کم است، بنابراین می توان از آن به عنوان یک ماده شیمیایی خنثی استفاده کرد. از هر گرم باریت در درجه حرارت عادی در حدود ۲ میلی گرم در هر لیتر آب حل می شود. با افزایش حرارت میزان حلالیت باریت زیادتر شده، به طوری که از هر گرم باریت در درجه حرارت ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بخار آب، ۴۰ میلی گرم آن در هر لیتر آب حل می شود. حلالیت باریت با حضور دکلرید در آب افزایش می یابد. در اثر هوازدگی شیمیایی باریت، ویتريت (BaCO_3) که کربنات باریم طبیعی است، حاصل می شود. این کانی به سختی گداخته می گردد و ساختمان بلورین آن در اثر گرما (شعله فوتک) شکسته می شود. این کانی دارای خاصیت لومینسانس بوده و حرارت

دادن شدید آن سبب تظاهر رنگ سبز متمایل به زرد می گردد. اگرپودر این کانی به داخل شعله دمیده شود، رنگ سبز متمایل به زرد به شعله می دهد(الهی، ۱۳۷۲).

جدول : (1-1) برخی از خواص فیزیکی و بلورشناسی کانیهای باریم دار

نام کانی	باریت	ویتریت ⁹	سانبورنیت ¹⁰
فرمول شیمیایی	BaSO ₄	BaCO ₃	BaSiO ₃
سیستم تبلور	ارترومبیک-دی پیرامیدال	ارترومبیک-دی پیرامیدال	ارترومبیک-دی پیرامیدال
وزن مخصوص	4/48	3/4	3/74
سختی (موس)	5/3-3	5/3-3	5
کلیواژ(رخ)	کامل خوب ناقص	تأحدی کامل یا واضح	کامل
ضریب انکسار(n)	648/1-634/1	677/1-529/1	634/1-597/1
محور نوری	دو محوره مثبت	دو محوره منفی	دو محوره منفی
رنگ	بیرنگ، سفید، آبی، قرمز، زرد، خاکستری، قهوه ای، سبز، سیاه	بی رنگ، سفید شیری، سفید متمایل به خاکستری، سفید متمایل به زرد، سفید متمایل به قهوه ای	بی رنگ یا سفید
رنگ خاکه	سفید	سفید	سفید
جلا	شیشه ای-چری خاکی	شیشه ای	شیشه ای

⁹ Witherite

¹⁰ Sanbornite

جدول (۲-۱) تعدادی از ترکیبات باریم همراه با فرمول شیمیایی مربوطه نشان می دهد. با بالا رفتن ناخالصیها در باریت ایزومورفهای گوناگونی می تواند تشکیل شود.

جدول (۲-۱): برخی از ترکیبات باریم دار (علی الهی، ۱۳۷۲ با تغییرات)

فرمول	نام
BaSO_4	سولفات باریم (باریت)
BaCO_3	کربنات باریم (ویتریت)
$(\text{Ba}, \text{Ca}) (\text{CO})_2$	باریتو کلسیت
$(\text{Ba}, \text{Sr}) (\text{SO})_2$	باریتو سلسنیت
$(\text{Pb}, \text{Ba}) (\text{SO})_2$	باریتو انگلزی
$(\text{Ca}) (\text{CO})_2 \text{Ba} (\text{CO})_2$	الستونیت
BaSiO_3	باریم سیلیکات (سان برنیت)
$\text{CaMgBa} (\text{CO})_2$	بنستونیت
$\text{Ba}(\text{OH})_2$	هیدروکسید باریم
BaS	سولفید باریم
BaCl_2	کلرید باریم

در جدولهای (۳-۱) و (۴-۱) به ترتیب ویژگیهای عمومی باریم و برخی از مشخصات شیمیایی باریت، نشان داده شده است.

جدول (۳-۱): ویژگیهای عمومی باریم (علی الهی، ۱۳۷۲ با تغییرات)

Ba	نشانه شیمیایی
56	عدد اتمی
34/137	A° وزن اتمی
34/1	$(A)M^+$ شعاع یونی
32/2	A° شعاع اتمی
710	C° نقطه ذوب

1638	C° نقطه جوش
3/54	(gr/cm ³) جرم حجمي جامد
8	عدد كوردیناسیون
85/0	الکترون گاتیویته
8/4	(فراواني در جهان کیهان) عدد کلارک-PPM
425	عدد کلارک(فراواني در پوسته زمین PPM)
[¹ xe]6s ²	آرایش الکتروني
120	انرژی نخستین یونیزاسیون (کیلوکالري برمول)

230	انرژی دومین یونیزاسیون (کیلوکالري برمول)
828	انرژی سومین یونیزاسیون (کیلوکالري برمول)
³⁻ 10× 5	نیدروکسید فلز KSP
90/2-	پتانسیل احیاء(ولت)

جدول (۴-۱): برخی از مشخصات شیمیایی باریت (علی الهی، ۱۳۷۲ با تغییرات)

□BaSO	نام
4/233	جرم ملکولي
1580	نقطه ذوب °C
1149	نقطه جوش °C
(خنثی 7)	PH

۱-۲-۳- بلورشناسی

این کانی از نظر بلورشناسی در سیستم ارتورمبیک و رده دی پیرامیدال متبلور می شود. این کانی دو محوره مثبت بوده و زاویه بین محوره های نوری در آن ۳۶ تا ۵/۳۷ درجه است. غالباً بلورهای آن به صورت صفحه ای مسطح در جهت (۰۰۱)

دیده می شود. علاوه بر آن در اشکال منشوری، هم بعد، تیغه ای، توده ای، ستونی، رشته ای، صفحات خمیده، دانه ای، نهان بلور، ورقه های درشت پرماند و کروی همچنین به صورت رز صحرایی دیده می شوند. در این کانی معمولاً ماکل های پلی سنتتیک تشکیل می شود که به صورت نوارهایی در روی سطح آن دیده می شود. وضعیت محورهای بلوری در آن به صورت زیر می باشد:

$$a:b:c = 0/8152: 1: 1/3736$$

محورهای a, c در بلورهای باریت شاخص و برجسته است و محور b در تمامی بلورهای تیغه ای و در گروه های واگرا مشترک است.

از لحاظ مشخصات میکروسکوپی، این کانی دارای بیرفرنژانس نسبتاً ضعیف است به طوری که

$$n\gamma - n\alpha = 12\%$$

بوده که کمی بالاتر از کوارتز است و به ندرت از رنگهای نارنجی و زرد درجه اول بالاتر می رود. در اکثر مواقع رنگ بیرفرنژانس آن لکه لکه به نظر می آید. این کانی دارای دیسپرسیون ضعیف می باشد. در دیسپرسیون زاویه محورها، مقدار زاویه V^2 برای نورهای مختلف ثابت نیست. در مورد کانی باریت دیسپرسیون زاویه محورها برای نور قرمز (γ) کمتر از نوربنفش (α) است ($\gamma < \alpha$).

۱-۴- زمین شناسی کانه

باریت در بسیاری از محیطهای زمین شناسی، در سنگهای رسوبی، آذرین و دگرگونی به صورت انفرادی و یا همراه با کانیهای دیگر یافت می شود. این کانی معمولاً به صورت کانی باطله (گانگ) در رگه های گرمابی و همراه با سنگ معدنهای نقره، سرب، مس، کبالت، منگنز و آنتیموان یافت می شود. گاهی این کانی فضاهای

خالی بین بلوری را پرمی کند و تشکیل ذخایر نسبتاً خالصی از باریت می دهد که در بسیاری از مناطق ارزش معدنکاری دارد. باریت غالباً به صورت رگه ای و پرشدگی شکافها تظاهر پیدا می کند. این کانی به ندرت به صورت رسوبات حاصل از فعالیت چشمه های آب گرم دیده می شود. گاهی باریت به صورت سیمان در ماسه سنگها گزارش شده است.

کانی باریت از دیدگاه پاراژنتیک گستره بسیار وسیعی داشته اما در برخی از مناطق ارزش معدنکاری دارد، به طوری که انواع قابل ذکر آن باید حجم و میزان ذخیره بالایی داشته باشند و همچنین نوع کانه باید مرغوب بوده و وزن مخصوص بالایی داشته باشد. این کانی در تمام دورانهای گوناگون زمین شناسی دیده می شود و حتی در سپرهای دگرگونی پرکامبرین (مربوط به زمان آرکئن) در قاره های آمریکای شمالی و اروپا و آسیا دیده شده است (آذری، ۱۳۷۶).

۱-۳-۱- زمین شناسی و پراکندگی کانه در ایران

معادن و کانسارهای گوناگونی از باریت در ایران وجود دارد که از لحاظ حجم و کیفیت در سطح جهانی قابل توجه هستند. کانی سازی باریت در ایران از پرکامبرین تا کواترنر دیده شده است و معادن باریت ایران در اکثر سازندهای زمین شناسی یافت می شوند. بیشتر معادن و ذخایر باریت در ایران از نوع رگه ای و پرشدگی در شکافها می باشند و انواع دیگر در صورتی که وجود داشته باشند بسیار نادرند.

سنگ درونگیر بیشتر ذخایر رگه ای در ایران کربناتی و از نوع آهک دولومیتی است و در برخی از موارد توفهای آهکی و توفهای آندزیتی نیز به عنوان سنگ میزبان مشاهده می شوند. عیار این نهشته ها در سنگ میزبان اغلب پایین تر از ۵۰٪ است.

پراکندگی کانه در ایران: از دیدگاه زمین ساختی، پراکندگی ذخایر باریت ایران به ترتیب در زونهای ایران مرکزی و البرز بسیار بیشتر از سایر زونها بوده و از دیدگاه زمین شناختی نیز عمدتاً سنگهای دوران سنوزوئیک در برگیرنده این ذخایر می باشند، هرچند این پراکندگی در سایر دورانهای زمین شناختی نیز دیده می شود (امیرخوش جو، ۱۳۷۸)

ذخایر معدنی باریت در بسیاری از نقاط ایران یافت می شود ولی بزرگترین و مهمترین آنها در این نواحی قرار دارند: حاجی آباد خور و دره کاشان در استان اصفهان، الیت در استان مازندران، جوشالو و آغجه مزار در استان قزوین، باریت الماس در آذربایجان شرقی، باریتین لار در استان تهران، اردکان و هفتهرعقدا و دشت ده در استان یزد.

علاوه براینها عدسیهها، لایه ها و رگه های بسیاری در نقاط مختلف از جمله اطراف فریدون شهر، ساوه، دورود، آباد، سمنان، تربت جام، کرج، آشتیان، ورامین و غیره کشف شده است، ولی وسعت و حجم این ذخایر محدود است.

۱-۳-۲- شرایط تشکیل و ژنز انواع کانسارهای باریت

همان طوری که قبلاً نیز گفته شد از نظر زمین شناسی باریت در انواع سنگها، شامل سنگهای آذرین، رسوبی و دگرگونی یافت می شود. ذخایر این کانی در طبیعت به سه صورت مشاهده می شود.

الف) ذخایر رگه ای پرکننده فضاهای خالی

ب) تجمع ثانوی یا پسماندی

ج) ذخایر لایه ای

۱-۴-۱ الف) ذخایر رگه ای پرکننده فضاهای خالی

در این نوع نهشته، باریت توسط سیالات گرمابی و یا شورابه های متعلق به نواحی عمیق حمل می گردد. محلولهای حاصل از توده آذرین نفوذی در طول گسلها، شکافها، ترکها، سطوح لایه بندی، کانالهای انحلالی و دیگر فضاهای باز، بالا آمده و خود همین فضاهای باز، محل تشکیل ذخایر کانیها گردیده اند.

در این نوع کانسار، ذخایر باریت معمولاً توسط سولفیدهای سرب، روی، مس، پیریت و همچنین فلوتورین همراهی می شوند و در مناطق عمیقتر اغلب کانی باطله آنرا، کلسیت، سیدریت و کوارتز عقیق تشکیل می دهد. یکی از عواملی که در تشکیل این نوع کانسار در فضاهای خالی مؤثر است کاهش تدریجی حرارت و فشار در هنگام بالا آمدن سیالات گرمابی و دور شدن این سیالات از محل خود می باشد. عامل دیگر در تشکیل این نوع کانسارها، واکنش بین محلولهای گرمابی و سنگ میزبان است. در برخی موارد واکنش بین محلول و سنگ میزبان بسیار شدید است به طوری که ترکیب تمام حجم سنگ میزبان را تغییر می دهد این عمل بوسیله جانشینی یا خارج شدن یک کانی و جایگزینی همزمان توسط کانی دیگر انجام می گیرد. سنگهای کربناته بیشترین ظرفیت جایگزینی را در میان سنگهای گوناگون دارند، بنابراین ذخایر بزرگی از باریت در دولومیت ها و شیلهای آهک دار یافت می شود. بیشتر باریتهای موجود در رگه ها و پرشدگی حفرات، متراکم و به رنگ خاکستری تا سفید است. استخراج کانسارهای رگه ای، به دلیل هندسه پیچیده آنها بسیار مشکل و پرهزینه است. در اکثر موارد، رگه باریت مانند یک محصول فرعی^{۱۱} یا محصول هم تراز^{۱۲} در معادن سرب و

^{۱۱} by-product

^{۱۲} Co-product

روی استخراج می شود. همان طوری که قبلاً ذکر شد بیشتر معادن و ذخایر باریت در ایران از این نوع می باشند مانند معدن باریت الیت، معدن باریت دشت ده، معدن باریت نیوک و غیره.

۱-۴-۲ ب) تجمع ثانوی یا پسماندی

این ذخایر حاصل فرسایش یک ذخیره باریت و حمل و ته نشست آن در منطقه دیگری می باشد. باریتهای موجود در این نوع ذخایر سفید رنگ بوده و با وزن مخصوص زیاد از سایر کانیهای اطراف، مشخص می شوند. این نوع ذخایر باریت، براساس پایداری شیمیایی مولکولهای آن، در مقابل هوازدگی، تشکیل می شوند. اندازه و شکل این ذخایر متفاوت بوده و در بسیاری از موارد شکل توده اصلی که از آن منشأ گرفته است را منعکس می کند به طوری که ذخایر تجمع یافته از رگه ها به صورت طولی و ذخایر تجمع یافته از توده های گرد تقریباً دایره ای مشاهده می شوند.

۱-۴-۳ ج) ذخایر لایه ای

این نوع ذخایر، طبقاتی رسوبی هستند که در آنها باریت به صورت کانی اصلی یا سیمان در بین قطعات دیگر قرار گرفته باشد. علاوه بر آن، این کانسارها می توانند همراه با کانسارهای ماسیوسولفید چینه سان (استراتیفرم)، ظاهر شود. کانسارهای باریت لایه ای از لحاظ اقتصادی بسیار با اهمیت هستند، برخی از این ذخایر محتوی میلیونها تن باریت هستند. ذخایر عمده دارای ارزش اقتصادی از این نوع، تمرکزهای لایه ای باریتی بدبو، عموماً خاکستری تیره تا سیاه رنگ و ریزدانه می باشند. لایه های باریت سیاه حاوی چندین درصد ماده آلی می باشند و وقتی با چکش به آنها ضربه

زده می شود، بطور مشخصی بوی سولفید هیدروژن (H_2S) را می دهند. عقیده براین است که سولفید هیدروژن محصول فساد مواد آلی واحیای سولفات توسط باکتریهای بی هوازی است. دانشمندان برای ژنز لایه های باریت سیاه و بدبو آرکانزاس، مدلی را ارائه داده اند که بر مبنای آن شورابها از رسوبهای سکوی قاره ای تراوش کرده و در گودیه های کف حوزه رسوبی با آب دریا مخلوط شده و سبب ته نشین شدن باریت می گردند. یونهای باریم جذب ذرات رس شده، با سولفاتهای موجود در آب دریا ترکیب و سولفات باریم را تشکیل می دهند. منشاء باریم در آب دریا می تواند در رابطه با فعالیتهای زیستی و یا بازیافت از سنگهای از پیش تشکیل شده باشد (آذری، ۱۳۷۶).

۱-۵- موقعیت جغرافیایی معدن و کارخانه درین کاشان

معدن درین در ۱۳ کیلومتری جنوب غربی کاشان در رشته کوه‌های مجاور روستای دره قرار دارد که از غرب به هفت‌کتل و از شرق به سیاه کوه منتهی می‌شود. اختلاف ارتفاع معدن و کارخانه تغلیظ و خردایش حدود ۸۰۰ متر و فاصله آنها حدود ۸ کیلومتر است که نیمی از آن جاده خاکی کوهستانی و بسیار پرپیچ و خم با شیبهای تند و غیراستاندارد و بقیه آن نیز آسفالت و کم شیب است. فاصله کارخانه نیز از باغ فین کاشان ۵ کیلومتر و راه آسفالت است.

منطقه دارای آب و هوای کویری و گرم و خشک است و رودخانه‌های فصلی نیز دارد. نیروی انسانی برای کار در معدن درین عمدتاً از روستاهای اطراف معدن از جمله دره، خنب، جزه و نیروی انسانی کارخانه تغلیظ عمدتاً از کاشان تأمین می‌شود. به دلیل عدم اکتشاف کامل بر روی این معدن، ذخیره به طور قطعی مشخص نیست اما این معدن بین ۷۰۰/۰۰۰ تا ۱/۵۰۰/۰۰۰ تن باریت با وزن مخصوص $4/2 \text{ gr/cm}^3$ دارد (مدنی، ۱۳۷۲).

۱-۶- مشخصات ماده معدنی

۱-۶-۱- شناسایی نمونه

ترکیب شیمیایی نمونه باریت درین کاشان به صورت جدول (۱-۵) تعیین شده است:

جدول (۱-۵)- ترکیب شیمیایی نمونه باریت

ترکیب	درصد	ترکیب	درصد
BaSO ₄	79/5	MnO	0.03
SiO ₂	14/4	Sr	0.07

0.1	K ₂ O	2/63	Al ₂ O ₃
0.05	Na ₂ O	1/12	Pb
		0.34	Zn
		0.25	Cu
		0.93	Fe ₂ O ₃
100	جمع	0.03	TiO ₂

۱-۶-۲-جرم مخصوص

در حال حاضر از دو مسیر مختلف سنگ‌شکنی، بار به کارخانه داده می‌شود. از مسیر اول بارهای با وزن مخصوص کم داده می‌شود که بیشتر مواد استخراجی نیز از این نوع‌اند. این بار به بارجیگی معروف است و وزن مخصوصی بین ۳/۷-۳/۹ gr/cm³ دارد. از مسیر دوم بارهایی که وزن مخصوص زیاد حدود ۴/۲ gr/cm³- دارند، عبور می‌کنند که این مسیر فقط سنگ را خرد و بسته بندی می‌کند. عمده بررسیهای انجام شده بر روی مسیر اول انجام گرفته است.

۱-۶-۳-بررسیهای میکروسکوپی

بر اساس مطالعات میکروسکوپی مشاور معدنکاو بر روی ۷ مقطع نازک و ۱۲ مقطع صیقلی نتایجی به شرح زیر بدست آمده است:

کانی اصلی باریت است که اندازه دانه‌های آن بین ۵۰ میکرون تا ۲/۵ میلیمتر تغییر می‌کند. دومین کانی فراوان کوارتز است. این کانی دانه‌بندی بین ۲۰ تا ۳۰ میکرون و بافت موزائیکی دارد. کانیهای سولفیدی شامل گالن، کالکوپیریت، بلند، کولین، و پیریت به صورت مجموعه‌های پراکنده‌ای هستند که ابعادشان به شرح زیر است:

مجموعه سولفیدی حداکثر ۴۰۰ میکرون

دانه‌های گالن از ۱۰ تا ۴۰۰ میکرون

کالکوپیریت ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرون

کوولین حدود ۲ میکرون

بلند حدود ۲۰ تا ۳۰ میکرون

پیریت حدود ۸ میکرون

کانیهای اکسید آهن تا ۲ میکرون

مقدار جزئی سروزیت

۱-۶-۴-مقاومت در برابر خردایش و درجه آزادی نمونه

بر اساس نتایج حاصله از خردایش، مشخص شده که مقاومت باریت در برابر خردایش کمتر از کوارتز است، و ماده معدنی از نظر مقاومت در برابر خردایش بین سنگهای نرم تا متوسط نرم طبقه بندی میشود. همچنین ملاحظه شده که در خردایش تا ۱ mm-، درجه آزادی نسبی و در خردایش تا ۶۰۰- میکرون درجه آزادی کاملاً مناسب حاصل شده است (شرکت مشاور معدنکاو).

فصل دوم

مطالعات انجام شده در مورد

فلوتاسیون باریت

۲-۱- مقدمه

مطالعات زیادی در مورد فلوتاسیون باریت توسط مهندسين داخلی و خارجی انجام شده است. توسط شرکت درین کاشان، دانشگاهها و شرکتهای خارجی نیز مطالعاتی انجام شده است که در ذیل به چند مورد از آنها اشاره می شود.

۲-۲- تحقیقات و مطالعات داخلی (انجام شده توسط شرکت درین کاشان)

الف) پرستار (۱۳۷۳) فلوتاسیون مواد باطله شرکت درین کاشان با بهینه سازی فاکتورها بصورت زیر بیان نموده است (پرستار، ۱۳۷۳) :

خوراک فلوتاسیون، باطله کارخانه درین کاشان با وزن مخصوص ۳/۴ و عیار ۵۴٪ $BaSO_4$ بوده است و فلوتاسیون تحت شرایط ذیل انجام شده است (جدول ۲-۱):

جدول (۲-۱) شرایط فلوتاسیون برگرفته از منبع (پرستار، ۱۳۷۳)

درصد جامد:	۲۳٪	
ابعاد:	۱۰۰٪ زیر ۱۰۰ میکرون	

کلکتور:	AERO825+845	۱۰۰۰ گرم بر تن
PH:	توسط کربنات سدیم	۹
دور روتور:		۱۰۰۰ دور در دقیقه
متفرق کننده و بازداشت کننده:	سیلیکات سدیم	۱۵۰۰ گرم در تن

با دو مرحله شستشو کنستانتره نهایی با مشخصات زیر حاصل شده است:

وزن مخصوص کنستانتره $4/3 \text{ gr/cm}^3$ و عیار $93/5\% \text{ BaSO}_4$ و بازیابی $95/7\%$ و مسیر فلوتاسیون را به صورت ذیل طراحی نموده است:

مرحله رافر با ۸ سلول با حجم $0/34$ مترمکعب و مرحله شستشوی اول با ۶ سلول با حجم $0/34$ مترمکعب و شستشوی دوم با ۵ سلول با حجم $0/34$ مترمکعب.

جرجانی (۱۳۷۴) با مطالعه و بررسی سینتیک فلوتاسیون سنگ باطله معدن درین کاشان شرایط ذیل را بیان نموده است (جدول ۲-۲):

جدول (۲-۲) شرایط فلوتاسیون باریت برگرفته از منبع (جرجانی، ۱۳۷۴)

درصد جامد		۲۳%
کلکتور	AERO825+845	۱۰۰۰ گرم در تن
PH	کربنات سدیم	۹
دور		۱۰۰۰ دور در دقیقه
بازداشت کننده	سیلیکات سدیم	۱۷۵۰ گرم در تن
زمان توقف میانگین		۹۰ ثانیه

در این منبع برای خوراک ۳۰۰ تن در روز، ۴ سلول با حجم $0/34$ مترمکعبی در نظر گرفته شده است.

جلالی (۱۳۷۷) در مطالعه و بررسی پارامترهای سینتیکی و انتخاب مواد شیمیایی (باریت مهدی آباد یزد) شرایط ذیل را بیان نموده است (جدول ۲-۳):

جدول (۲-۳) شرایط فلوتاسیون باریت برگرفته از منبع (جلالی، ۱۳۷۷)

درصد جامد		۱۴٪
کلکتور	AERO825+845	۱۰۰ گرم در تن
PH		۱۰
دور روتور		۱۲۰۰ دور در دقیقه
بازداشت کننده	سیلیکات سدیم	۱۰۰ گرم در تن
زمان توقف در سلول		۶۰ ثانیه

برای خوراک ۳۰۰ تن در روز، ۲ عدد سلول ۷۱/۰، مترمکعبی در نظر گرفته شده است.

البته تحقیقات و مطالعات دیگری انجام شده است که از میان آنها ۳ مورد بالا انتخاب شده است (راستی الحسینی، ۱۳۷۹).

۲-۳- تحقیقات و مطالعات خارجی

مطالعات و تحقیقات زیادی در زمینه فلوتاسیون باریت بیان شده است که از میان آنها ۳ مورد ذیل انتخاب شد.

الف) M.Gunduz & Girgin (1994) کانسار باریت با عیار ۲۸/۹۲٪

را در شرایط ذیل (جدول ۲-۴) فلوته نموده است:

جدول (۲-۴) شرایط فلوتاسیون برگرفته از منبع (M.gunduz&Girgin;1994)

درصد جامد		۲۵٪
ابعاد		۱۰۰٪ زیر ۱۰۴ میکرون
کلکتور	سولفات آلکیل سدیم	۴۵۰ گرم در تن

بازداشت کننده و تنظیم کننده	سیلیکات سدیم	۱۶۰۰ گرم در تن
بازداشت کننده	کبراکر	۳۰۰ گرم در تن
PH		۱۰
دور		۱۱۰۰ دور در دقیقه
شستشو		۶ مرحله

محصول نهایی جهت صنعت حفاری با عیار ۹۳٪ BaSO_4 بوده و بازیابی ۸۲٪ حاصل شده است.

(ب) IMCO باریت در شرایط ذیل تغلیظ و فلوته شده است:

روشهای فراوری (۳ روش) شامل جیگ، میز و فلو تاسیون می باشد. جیگها از نوع BENDLARI و شامل واحدهای رافر و شستشو می باشد. محصول اصلی این مرحله جهت تهیه پودر و محصول میانی توسط آسیای میله ای آسیا شده و به جیگهای نرمه فرستاده می شود و محصول اصلی جیگ نرمه جهت تولید پودر و باطله را به میزها می فرستد. محصول اصلی میز جهت تولید پودر و محصول میانی و باطله به آسیای گلوله ای فرستاده شده و سپس توسط میز نرمه تغلیظ می شود، باطله میز و محصول میانی جهت خوراک فلو تاسیون فرستاده شده و تحت شرایط زیر فلوته می شود:

بازداشت کننده گانگ سیلیکاته استارچ

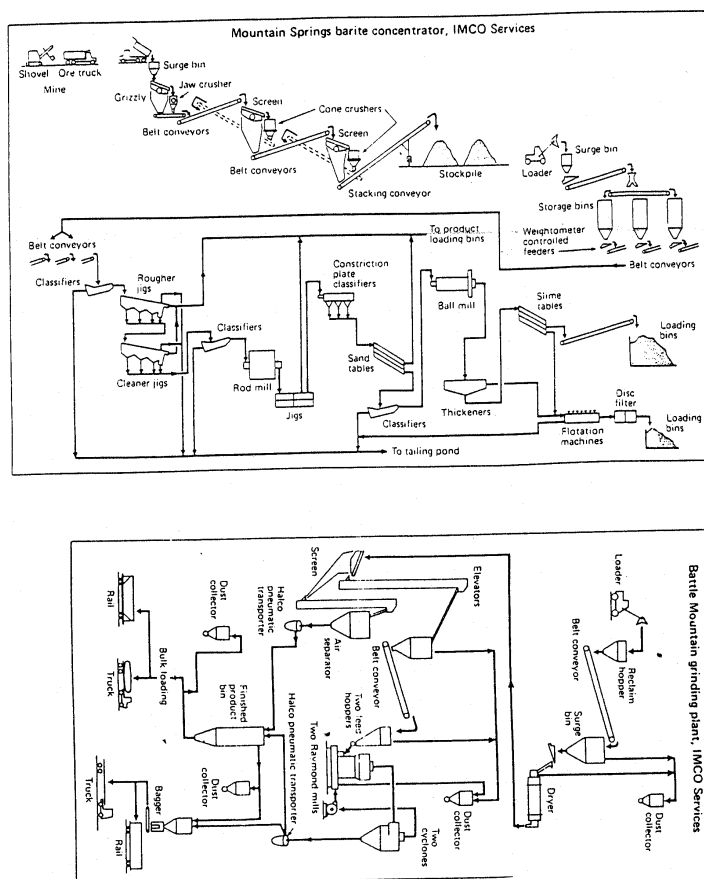
کلکتور AERO825

رافر ۸ سلول

و سپس مرحله شستشو انجام می شود.

فلوشیت مسیر فلوتاسیون در ذیل آمده است (شکل ۲-۱):

شکل (۲-۱): فلوشیت مسیر فلوتاسیون بر گرفته از منبع (IMCO)



ج) **Gurreli** باریت در شرایط زیر فلوته شده است:

کلکتور باریت آلکیل سولفات سدیم و محیط پالپ قلیایی تنظیم کننده

سیلیکات سدیم بوده است.

محصول دارای عیار ۹۷٪ یا بیشتر $BaSO_4$ می باشد.

برای کانسار باریت که دارای گالن، فلوریت و گانگ سیلیکاته با درصد کم می باشد، ابتدا سولفیدها با کلکتور گزنتات فلوته شده و در مرحله بعد باریت فلوته شده است (تولید باریت برای صنایع نفت و شیمیایی).

شرایط در ذیل آمده است (جدول ۲-۵):

جدول (۲-۵) شرایط فلوتاسیون برگرفته از منبع (L.gurreli;1994)

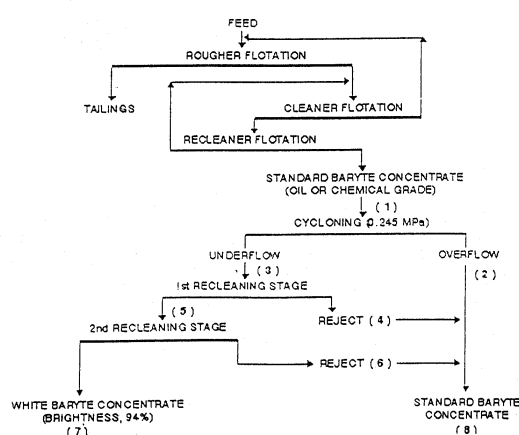
تنظیم کننده	سیلیکات سدیم	۰/۶۷۶ کیلوگرم در تن
	سود	۰/۸۵۷ کیلوگرم بر تن
کلکتور	ستیل سولفات سدیم	۰/۹۰۴ کیلوگرم در تن
PH	۱۰	

باریت با عیار ۹۶/۳٪ حاصل شده است.

فلوشیت مسیر فلوتاسیون در ذیل آمده است (شکل ۲-۲):

شکل (۲-۲): فلوشیت مسیر فلوتاسیون برگرفته از

منبع (L.gurreli;1994)



Flowsheet for producing standard and white baryte concentrates

۲-۴- نتیجه حاصل از مطالعات فلوتاسیون

نتایج مطالعات انجام شده شرایط عمده جهت انجام فلوتاسیون باریت

را بصورت ذیل نشان داد (جدول ۲-۶):

جدول (۲-۶) شرایط عمده فلوتاسیون باریت بدست آمده از مطالعات

PH در محیط قلیایی	اغلب توسط کربنات سدیم
بازداشت کننده و تنظیم کننده	سیلیکات سدیم
درصد جامد	اغلب بیش از ۲۰٪
کلکتور	AERO825, 845 و یا سولفات آلکیل سدیم
دور	بیش از ۱۰۰۰ دور در دقیقه
ابعاد	اغلب ۱۰۰٪ زیر ۱۰۴ میکرون

فصل سوم

مقدمه ای بر طراحی

آماري آزمایشها

۳-۱- مقدمه

طراحی آماری آزمایشها^{۱۳} (DOE) یک روش مناسب است که اولین بار در دهه ۱۹۲۰ توسط رونالد فیش^{۱۴} به منظور مطالعه اثر همزمان چندین عامل

^{۱۳} Design Of Experiment

^{۱۴} Sir R.A. Fisher

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 فرآوردها 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 فرآوردها دارند و کدام بی تأثیرند.
- بررسی و فهم اثرات متقابل^{۱۵} بین متغیرها، نسبت به پاسخ فرآیند.
- تلاش در بهینه سازی فرآیند، یعنی مقدار هر یک از متغیرها چگونه انتخاب شود تا میانگین پاسخ فرآیند مطلوبتر شود.

^{۱۵} Interaction

- تلاش در استوار سازی^{۱۶} فرآیند، یعنی پاسخ فرآیند را در مقابل تغییرات غیر قابل کنترل، بی تفاوت ساخت (Montgomery, 1997)

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^{۱۷}

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 (Montgomery, 1997):

^{۱۶} Robust

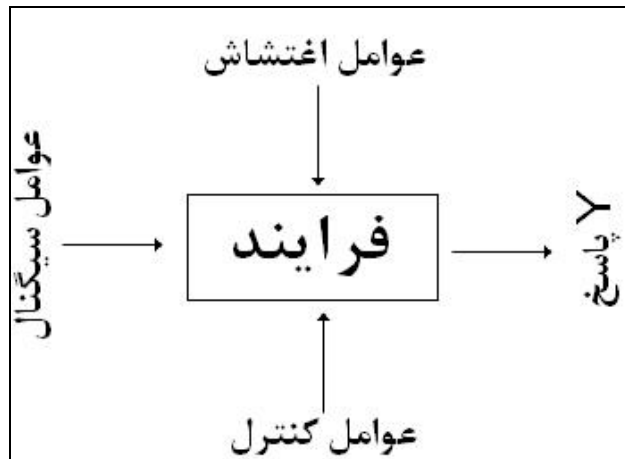
^{۱۷} Factor

- عوامل کمی^{۱۸} (پیوسته): عواملی که دارای مقدار هستند (مانند زمان، دما، فشار، pH و ...)
 - عامل کیفی^{۱۹} (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 (Montgomery, 1997):
 - 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^{۲۰}: 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.
- شکل (۱-۳) نمای شماتیک و کلی از فرایند و عوامل موثر بر آن و همچنین پاسخ فرآیند را نشان می دهد

^{۱۸} Numeric Factor

^{۱۹} Catagorical Factor

^{۲۰} Noise



شکل (۱-۳) نمای شماتیک از فرایند و عوامل موثر بر آن (Montgomery, 1997)

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, 1997)

۳-۳- اثرات متقابل بین عوامل

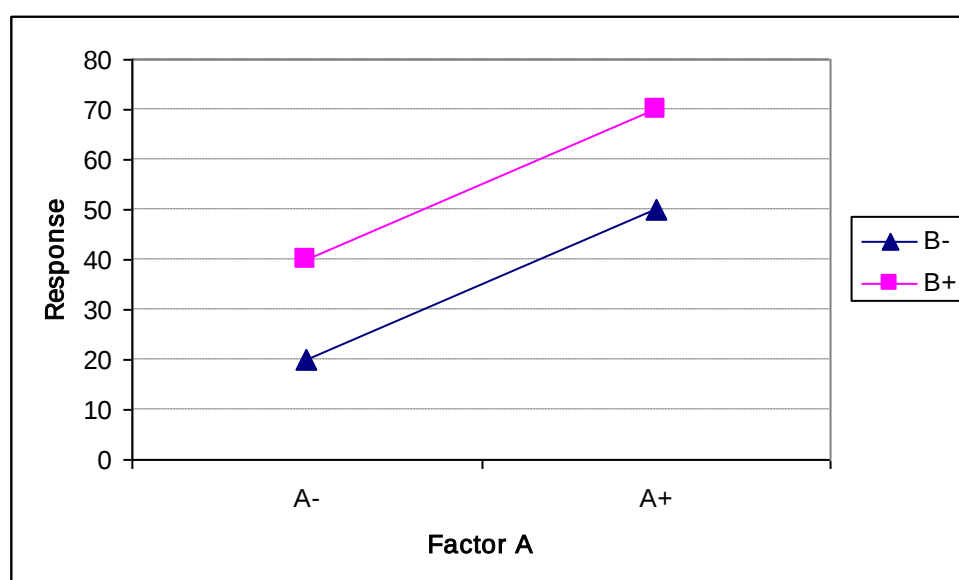
اثر متقابل، اثر همزمان دو یا چند عامل بر روی پاسخ فرآیند می باشد. اگر در سطوح مختلف یک عامل، عامل دیگر اثرات متفاوتی را نشان دهد، در

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 & Phillips 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.



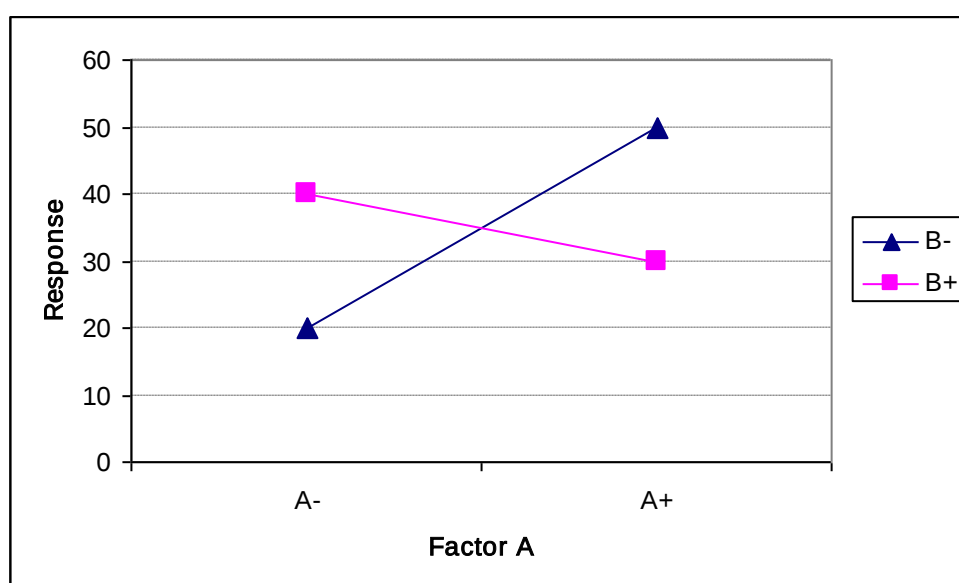
شکل (۲-۳) نمودار بررسی انجام شده، در جدول (۱-۳) (Garcia-Diaz & Phillips 1995)

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 & Phillips 1995)

<i>Factor</i>	<i>B₋</i>	<i>B₊</i>
<i>A₋</i>	20	40
<i>A₊</i>	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 & Phillips 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, 1997)

۳-۴- طراحی آزمایشها به روش فاکتوریل کامل^{۲۱}

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، ۱۳۵۷).

جدول (۳-۳) طرح فاکتوریل کامل دو سطحی (Anderson & Whitcomb, 2000)

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

^{۲۱} Full Factorial

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

ع. ۱۳۵۷):

$$N = L^F \quad \text{معادله (۳-۱)}$$

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 (۳-۲) می توان برای محاسبه تعداد آزمایشها استفاده نمود (بصیری

ع. ۱۳۵۷).

$$N = L^{F_1} * L^{F_2} * ... \quad \text{معادله (۳-۲)}$$

مزیت عمده این روش در این است که تمامی حالت‌های ممکن (از جمله

کلیه اثرات متقابل) را پوشش می دهد 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 می شود. روش فاکتوریل کامل، هنگامی بکار می رود که تعداد محدودی

عامل و سطح وجود داشته باشد (بصیری ع. ۱۳۵۷).

۳-۵- محاسبه و بررسی اثرات عوامل

اثر اصلی^{۲۲} یک عامل مطابق با تعریف عبارتست از، متوسط تغییر ایجاد

شده در پاسخ به علت تغییر در سطح آن عامل (Anderson & Whitcomb, 2000).

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

در معادله (۳-۳)، $\sum Y_+$ و $\sum Y_-$ به ترتیب مجموع پاسخ ها را در سطوح

مثبت و منفی عامل مورد نظر نشان می دهد و n تعداد این پاسخها در آن سطوح می باشند.

در جدول (۳-۴) آزمایشهای، پاسخهای بدست آمده و اثرات عوامل A،

B و C را برای یک طرح فاکتوریل کامل نشان می دهد (Anderson & Whitcomb, 2000).

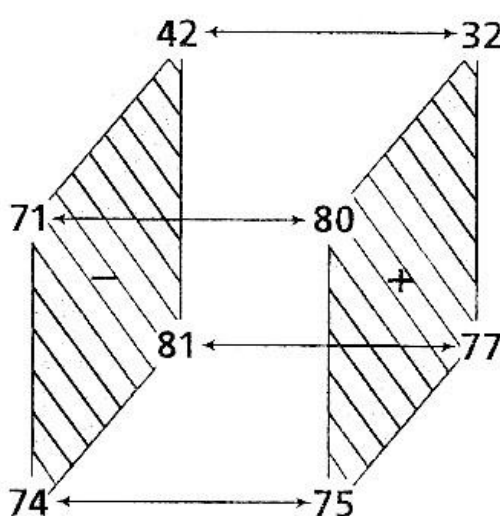
جدول (۳-۴) پاسخها و اثرات عوامل در طرح فاکتوریل کامل (Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

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	

^{۲۲} Main Effect

Effect Y_2		-0.05	-1.1	-1.8		1.45
--------------	--	-------	------	------	--	------

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 & Whitcomb, 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 (۳-۵) اثرات اصلی و متقابل، سه عامل A، B و C (Anderson & Whitcomb, 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 (۳-۵) 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؟

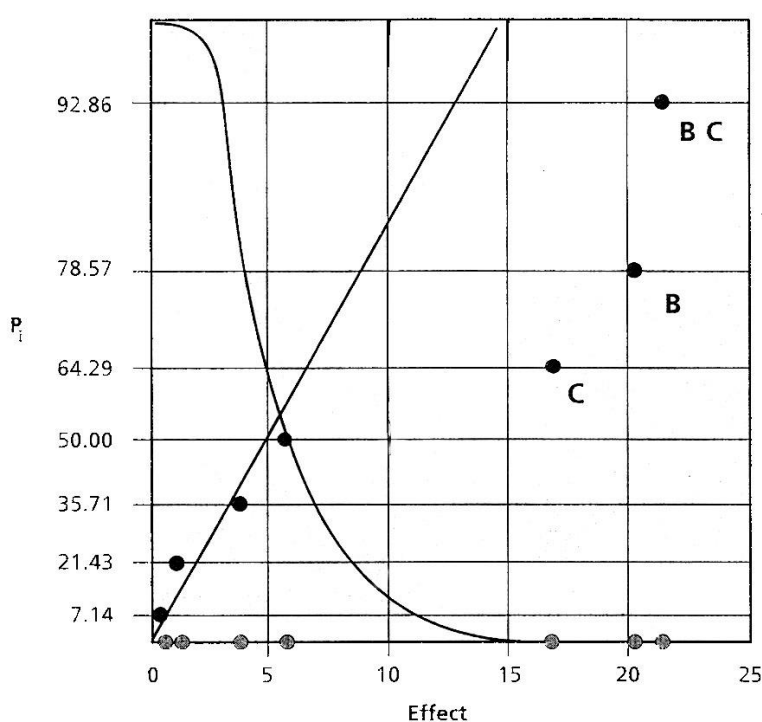
(Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000)

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 (۳-۶) مقادیر مربوط به رسم اثرات عوامل در کاغذ احتمال را نشان می دهد.

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

<i>Point</i>	<i>Effect</i>	<i>Absolute Value of Effect</i>	<i>Cumulative Probability</i>
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 $14/28\%$ ($\frac{100}{7}$) احتمال را شامل می شود که اگر بخواهیم نقاط را در وسط هر بخش قرار دهیم، نقطه اول که دارای کمترین اثر است احتمال $7/14\%$ را شامل می شود. در شکل (۳-۵) اثرات عوامل در کاغذ احتمال رسم شده اس (Anderson & Whitcomb, 2000).



شکل (۳-۵) نمودار اثرات عوامل (Anderson & Whitcomb, 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

(BC, B و C) 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 & Whitcomb, 2000).

۳-۶- شناسایی اثرات معنی دار به کمک آنالیز واریانس^{۲۳} (ANOVA)

اصول کلی آنالیز واریانس توسط رنالد فیشر بنیانگذاری شد. سپس ریاضیدانان و آمارشناسان دیگر جزئیات آن را تکمیل نمودند. آنالیز واریانس بنا به تعریف، انجام یک سلسله عملیات ریاضی است که توسط آن می توان مقدار کل تغییرات یا اختلافات موجود در یک آزمایش را به قسمت‌ها و اجزای مختلف آن تقسیم نمود.

بعضی از تغییرات به علت تاثیر عواملی است که آزمایشگر تعمداً آنها را در آزمایش قرار داده است تا اثر آنها را بررسی کند (تغییر در سطوح عوامل) و بعضی دیگر از تغییرات زائیده عوامل غیر قابل کنترل می باشند. که برای تمیز این دو نوع، می توان از روش آنالیز واریانس نیز بهره برد. در این روش می بایست مجموع مربعات^{۲۴} اثرات عوامل و تقابلهای آنها مورد

^{۲۳} Analysis Of Variance

^{۲۴} Sum of Squares

محاسبه قرار گیرد. معادله (۳-۴) روش محاسبه مجموع مربعات اثرات عوامل

و تقابلهای آنها را نشان می دهد (Anderson & Whitcomb, 2000).

$$SS = \sum_{i=1}^k \left(\frac{F_i^2}{n_{F_i}} \right) - \frac{(\sum Y)^2}{N} \quad \text{معادله (۳-۴)}$$

در معادله (۳-۴) داریم :

SS : مجموع مربعات مربوط به اثرات عوامل و یا تقابلهای بین آنها.

K : تعداد سطوح عوامل و یا تقابلهای عوامل مورد بررسی.

F_i : مجموع کلیه پاسخهایی که در آنها عامل و یا اثر متقابل F در سطح

i قرار داشته باشد.

n_{F_i} : تعداد پاسخهایی که در آنها عامل و یا اثر متقابل F در سطح i قرار

داشته باشد.

$\sum Y$: مجموع کلیه پاسخهای آزمایشها.

N : تعداد کل آزمایشها.

اگر بخواهیم جدول آنالیز واریانس را برای مثالی که در مبحث قبل و در

جدول (۳-۵) بررسی شد (طرح سه عاملی و دو سطحی فاکتوریل کامل)

تشکیل دهیم، می بایست مقادیر مجموع مربعات را برای عوامل و اثرات

متقابل آنها محاسبه کنیم. در آن آزمایشها اثرات عوامل B ، C و BC دارای

بیشترین تاثیر بودند که قبلاً توسط روش گرافیکی و کاغذ احتمال مشخص

شده بود. حال در محاسبه مقادیر مجموع مربعات نیز دارای مقادیر بزرگتری

می باشند، که از این اثرات برای تشکیل مدل استفاده شده 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 & Whitcomb, 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^{۲۵} 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 & Whitcomb, 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			

^{۲۵} Residual

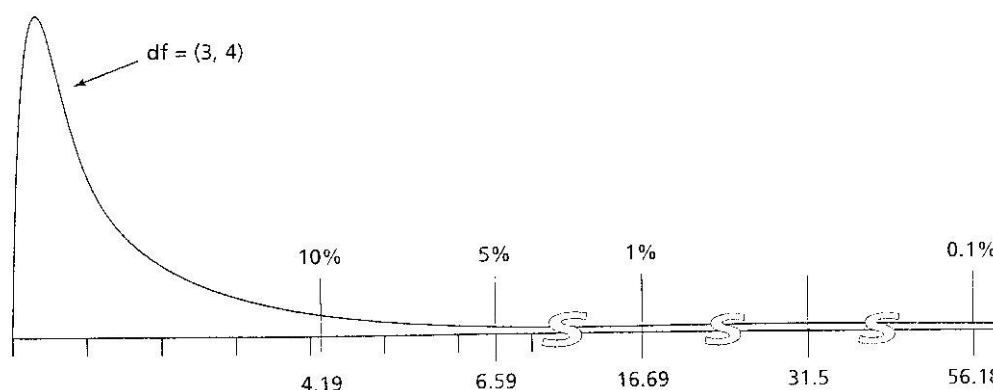
در جدول (۳-۷)، مقادیر مجموع مربعات برای مدل، عوامل و مانده ها در ستون دوم نشان داده شده است. در ستون بعدی که با Df مشخص شده، درجه آزادی^{۲۶} مربوط به آن مقادیر نشان داده شده است. درجه آزادی برای مدل و مانده ها برابر تعداد عواملی است که در محاسبه آنها شرکت داده شده اند. برای مثال برای محاسبه مجموع مربعات 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 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

^{۲۶} Degree of Freedom

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 (۳,۴) نشان می دهد. (Anderson & Whitcomb, 2000)



شکل (۳-۶) توزیع F را برای درجه آزادی (۳,۴) (Anderson & Whitcomb, 2000)

همانطور که در شکل (۳-۶) نشان داده شده، مقادیر بحرانی در توزیع F مشخص شده است. عدد F مدل، 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 & Whitcomb, 2000).

۳-۷- 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^{۲۷} است نمای کلی این نوع مدل برای یک طرح یک عاملی در معادله (۳-۵) نشان داده شده است (Anderson & Whitcomb, 200).

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 \quad \text{معادله (۳-۵)}$$

در معادله (۳-۵)، $\hat{Y}$ 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 (۳-۶)، مدل کلی را برای حالتی که دو عامل و اثر متقابل آن در مدل شرکت دارند را نشان می دهد. (Anderson & Whitcomb, 2000)

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad \text{معادله (۳-۶)}$$

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

^{۲۷} Linear Model

$$= 66.5 - 10.25B - 8.50C - \text{معادله (۷-۳) (Anderson \& Whitcomb, 2000)}$$

$$10.75BC \hat{Y}$$

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.

جدول (۸-۳) مقادیر واقعی و پیش بینی شده پاسخها توسط مدل، و اختلاف آنها (Anderson & Whitcomb, 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 (۳-۸)، پاسخ پیش بینی شده بر اساس معادله (۳-۷) محاسبه می شود که به صورت زیر می باشد.

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

در واقع چون معادله (۳-۷) بر اساس سطوح عوامل کد شده (۱،-۱) 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 (۳-۷) را به معادله (۳-۸) تبدیل کرد که در آن برای پیش بینی پاسخ مورد نظر، می توان مقادیر واقعی عوامل را در معادله جایگذاری کرد (Anderson & Whitcomb, 200).

$$= -199 + 65B + 3.62C - 0.86BC \quad \text{معادله (۳-۸)}$$

$\hat{Y}$

در معادله (۳-۸) 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 (۲-۸) 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 برازش بر آزمایشها و پیش بینی آنها انتخاب شود (Anderson & Whitcomb, 2000).

۳-۸- طراحی آزمایشها به روش فاکتوریل ناقص^{۲۸}

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 و اسفندیاری، ۱۳۶۹).

^{۲۸} Fractional Factorial

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 و اسفندیاری، ۱۳۶۹).

۲-۹- اتحاد^{۲۹} و اختلاط^{۳۰} در اثرات عوامل

به نظر می‌رسد 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 می‌شود. و همانگونه که انتظار می‌رود 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 دراقع 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 است (Anderson & Whitcomb, 2000).

^{۲۹} Allies

^{۳۰} Confound

جدول (۹-۳) اثرات اصلی و متقابل عوامل برای طرحهای فاکتوریل کامل و ناقص (Anderson & Whitcomb, 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 (۹-۳) 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 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^{۳۱} 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 & Whitcomb, 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"^{۳۲} 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

^{۳۱} Confounding

^{۳۲} Irregular Fractional Factorial

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 & Whitcomb, 2000).

۳-۱۰- طراحی آزمایشها به روش پاسخ سطح^{۳۳} برای بهینه سازی

همانطور که قبلا 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 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.

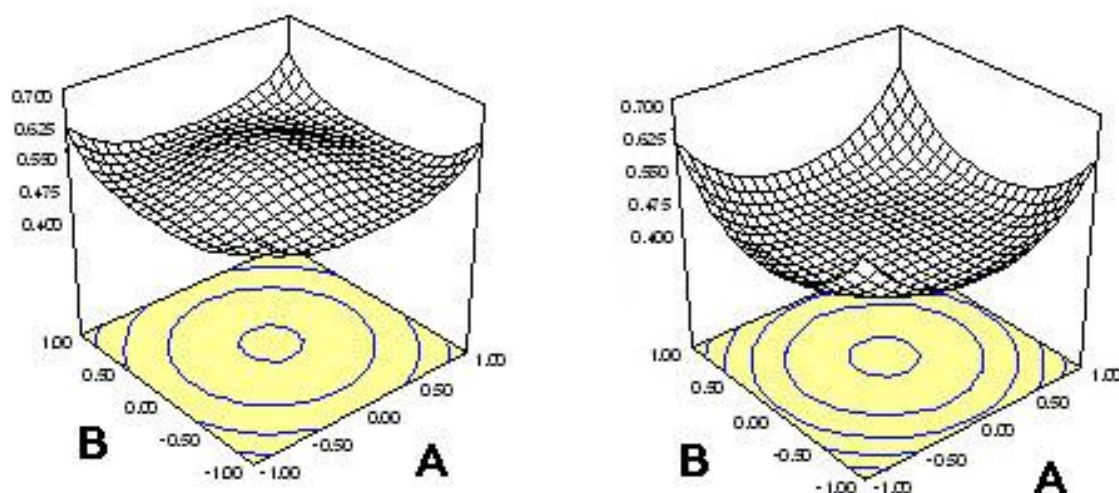
- انجام آزمایشهای فاکتوریل کامل برای بررسی عمیق تر و تعریف ناحیه

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

^{۳۳} Response Surface Method

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 & Whitcomb, 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 انحنای^{۳۴} و چگونگی آن، احتیاج به اضافه کردن برخی نقاط مرکزی^{۳۵} 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 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 & Whitcomb, 2000).

^{۳۴} Curvatur

^{۳۵} Center Point

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 & Whitcomb, 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 & Whitcomb, 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 & Whitcomb, 2000)

جدول (۳-۱۲) آنالیز واریانس (Anderson & Whitcomb, 2000)

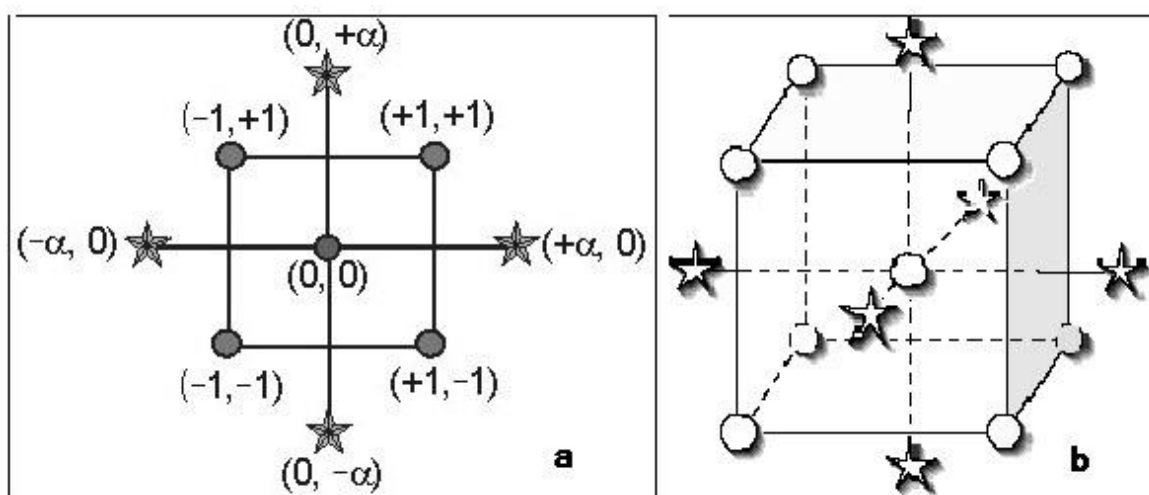
Source	Sum of Squares(SS)	Df	Mean Squares(MS)	F Value	Prob>F
Model	0.49	1	0.49	35	0.002
A	0.49	1	0.49	35	0.002
Curvature	0.32	1	0.32	22.86	0.005
Residual	0.07	5	0.014		
Lack of Fit	0.05	2	0.025	3.75	0.1527
Pure Error	0.02	3	0.0067		
Cor Total	0.88	7			

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 & Whitcomb, 2000)

طریقه حل مشکل هنگامی که وجود انحنای 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 & Whitcomb, 2000).



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

^{۳۶} Central Composit Design

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 & Whitcomb, 2000).

جدول (۳-۱۳) طراحی به روش Central Composit برای آزمایش دو عاملی (Anderson & Whitcomb, 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

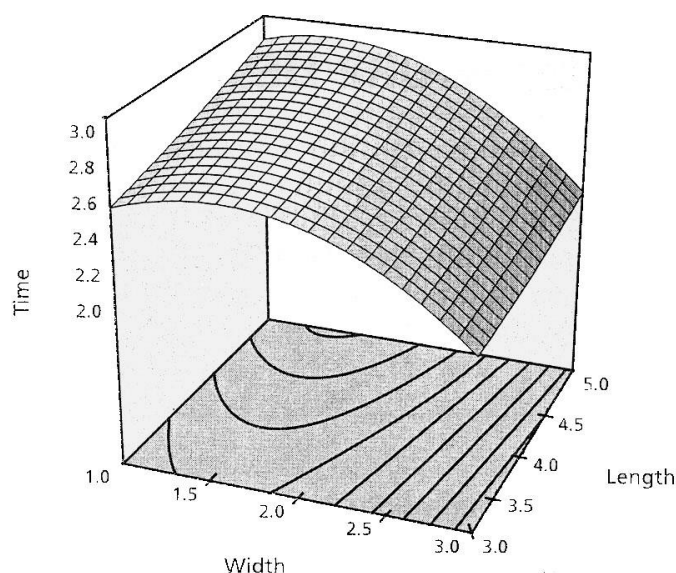
16	2	Center	2	4	2.6
----	---	--------	---	---	-----

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 & Whitcomb, 2000).

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

فصل چهارم

مطالعه عوامل موثر در

فلوتاسیون مکانیکی باریت

۴-۱- مقدمه

امروزه با پایین آمدن عیار (وزن مخصوص) باریت در معادن به کارگیری روشهای فرآوری با بازده بیشتر برای پر عیار ساختن باریت بیش از پیش ضروری به نظر می رسد. که در این میان فلوتاسیون از اهمیت خاصی برخوردار است و با توجه به اینکه کمتر به این مقوله پرداخته شده است در این تحقیق سعی بر این است که فلوتاسیون باریت مورد بررسی قرار گیرد.

۴-۲- اهداف انجام آزمایشها

آزمایشها در آزمایشگاه فراوری دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. اهداف انجام آزمایشها به شرح زیر بود:

- مطالعه قابلیت فلوتاسیون باریت توسط روش فلوتاسیون مکانیکی
- بررسی و فهم بهتر عوامل موثر، و ارتباط آنها در فلوتاسیون مکانیکی باریت توسط روشهای طراحی آماری آزمایشها.
- سعی در بهینه کردن شرایط عملیاتی سلول با توجه به شناخت عوامل موثر، و با استفاده از روشهای طراحی آماری آزمایشها.

۴-۳- بار ورودی سلول

خوراک سلول از محل بار ورودی سیستم فلوتاسیون کارخانه درین کاشان گرفته شده است. یعنی بار ورودی به جریان فلوته شدن که توسط آسیا آماده شده در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

۴-۴- 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 کامل بهره گرفته شد. در این سری از آزمایشات، چهار عامل زمان آماده سازی، میزان مصرف کلکتور، درصد جامد و نرمه گیری انتخاب و مقدار وزن مخصوص نیز به عنوان پاسخ آزمایشات در نظر گرفته شد. که جزئیات بیشتر در بخشهای مربوط به خود توضیح داده خواهند شد.

در مرحله دوم که در فصل بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت، با توجه به اطلاعات و شناختی که از مرحله اول حاصل شده بود، هدف بهینه سازی شرایط عملیاتی سلول 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 دور روتور، زمان کف گیری (فلوتاسیون) و میزان مصرف بازداشت کننده، انتخاب و مقدار وزن مخصوص به عنوان پاسخ آزمایشات در نظر گرفته شدند. که جزئیات بیشتر در فصل مربوط به خود توضیح داده خواهد شد.

۴-۵- آزمایشهای مربوط به مطالعه عوامل موثر در فلوتاسیون مکانیکی باریت

این سری از آزمایشها (مرحله اول) با هدف شناخت هر چه بیشتر عوامل موثر و اثرات متقابل آنها در فلوتاسیون مکانیکی باریت انجام شد. بدین منظور تعداد ۱۶ آزمایش در قالب طراحی فاکتوریل کامل انجام شد. در جدول (۴-۲) عوامل مورد مطالعه و تغییرات مربوط به سطوح آنها نشان داده شده است.

جدول (۴-۲) عوامل و سطوح مربوط به طراحی آزمایشات به روش فاکتوریل کامل

نشانه	نام عوامل	واحد	سطح پایین (1-)	سطح بالا (1+)
A	درصد جامد	%	20	30
B	میزان مصرف کلکتور	گرم بر تن	1500	2500

C	زمان آماده سازی	دقیقه	5	10
D	نرمه گیری	-	خیر	بله

همانطور که در جدول (۴-۲) نشان داده شده، همه عوامل به صورت عوامل کمی بوده و در دو سطح پایین و بالا تغییر داده شده اند سطوح انتخاب شده در جدول (۴-۲) با بررسی های انجام شده در فاز تحقیقاتی و مطالعاتی و انجام ۲۴ آزمایش اولیه فلوتاسیون انتخاب شده اند. (کلکتور مصرفی AERO825 و جهت حذف نرمه از الک ۲۰۰ مش استفاده شده است) بدین ترتیب بر اساس طرح فاکتوریل دو سطحی کامل تعداد ۱۶ آزمایش طراحی شد که جهت حذف خطاهای ناشناخته، آزمایشات با ترتیب تصادفی انجام شدند. جدول (۵-۳) شرایط آزمایشی و پاسخ را در طراحی انجام شده، نشان می دهد.

جدول (۴-۳) شرایط آزمایشی و پاسخ در طرح فاکتوریل دو سطحی کامل

<i>Std</i>	<i>Run</i>	<i>Factor 1</i> <i>A:Collector</i> <i>gr/ton</i>	<i>Factor 2</i> <i>B:Solid</i> <i>percent</i> <i>%</i>	<i>Factor 3</i> <i>C:Conditioning</i> <i>Time</i> <i>minute</i>	<i>Factor 4</i> <i>D:Disliming</i> <i>Type</i>	<i>Response</i> <i>1</i> <i>S.G</i> <i>gr/cm3</i>
6	1	2500	20	10	Yes	4.12
14	2	2500	20	10	No	3.97
2	3	2500	20	5	No	4.08
11	4	1500	30	5	No	4.02
9	5	1500	20	5	No	3.91
8	6	2500	30	10	Yes	4.23
12	7	2500	30	5	No	4.17
5	8	1500	20	10	Yes	4
4	9	2500	30	5	Yes	4.2

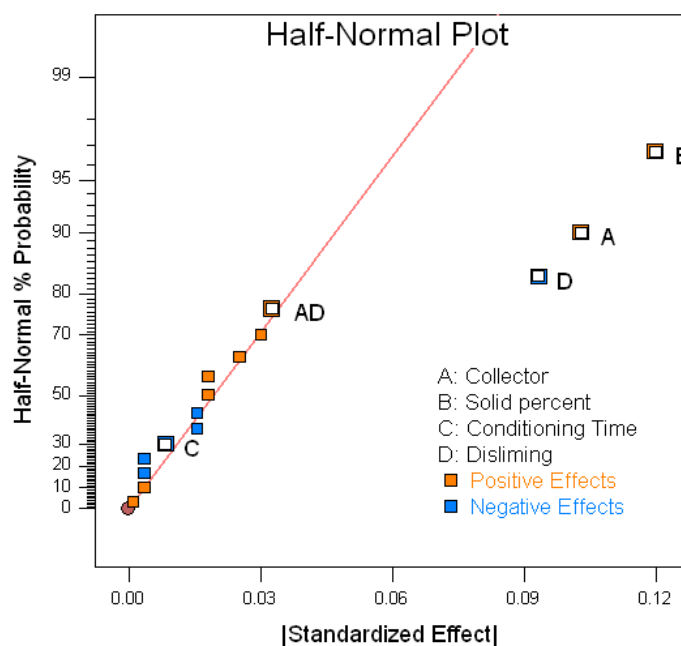
15	10	1500	30	10	No	3.99
16	11	2500	30	10	No	4.19
1	12	1500	20	5	Yes	4.03
10	13	2500	20	5	Yes	4.11
7	14	1500	30	10	Yes	4.18
3	15	1500	30	5	Yes	4.16
13	16	1500	20	10	No	3.93

۴-۷- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

همانطور که قبلاً نیز گفته شد. در این سری از آزمایشات، چهار عامل میزان مصرف کلکتور، درصد جامد، زمان آماده سازی و نرمه گیری انتخاب و همچنین برای آنها پاسخ با عنوان مقدار وزن مخصوص نیز در نظر گرفته شده است. که در این بخش تفسیر داده های پاسخ در نظر گرفته شده مد نظر می باشد.

۴-۷-۱- برازش مدل بر روی داده های پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

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 (۴-۱) 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 (۴-۱) نمودار اثرات عوامل در کاغذ احتمال مربوط به پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

در جدول (۴-۵) لیست اثرات و نوع آنها و مجموع مربعات مربوط به آنها

نشان داده شده است.

جدول (۴-۵) لیست اثرات عوامل و تقابلهای آنها مربوط به پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

Type	Term	Std Effect	SumSqr	% Contribution
Require	Intercept			
Model	A:collector	-5.25074	73.52066	11.4540365
Model	solid percent:B	9.527092	242.0413	37.7084453

Model	conditioning :C time	6.089048	98.87069	15.4034041
Model	disliming:D	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 (۴-۵) و شناسایی عواملی که در مدل شرکت دارند، اصطلاحاً مدل $2FI^{۳۷}$ برای برازش بر روی آزمایشات انتخاب گردیده است. معادله تجربی مدل $2FI$ که مقدار وزن مخصوص را برای مقادیر کد شده و واقعی عوامل تخمین می زند، به صورت زیر می باشد:

[Final Equation in Terms of Coded Factors]:

$$S.G = 4.08 + 0.053A + 0.062B - 4.375E-003 * C - 0.048D + 0.017AD$$

[Final Equation in Terms of Actual Factors]:

$$\begin{aligned}
 \text{Yes} \quad \text{Disliming} \\
 S.G = & \\
 & +3.68750 \\
 & +7.25000E-005 * \text{Collector} \\
 & +0.012375 * \text{Solid percent} \\
 & -1.75000E-003 * \text{Conditioning Time}
 \end{aligned}$$

^{۳۷} 2 Factorial Interaction model

No

Disliming

S.G =

+3.45625

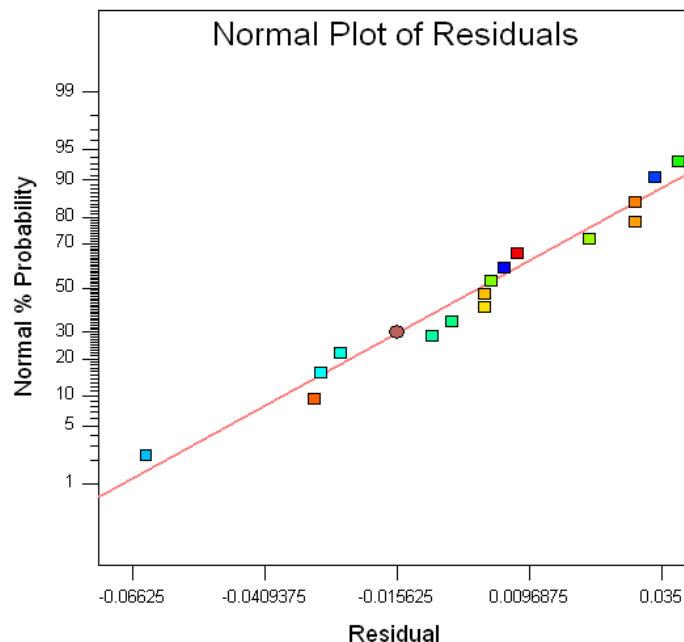
+1.40000E-004 * Collector

+0.012375 * Solid percent

-1.75000E-003 * Conditioning Time

اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ

برای برازش 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، مانده های مدل به صورت نرمال توزیع شده اند، و در نتیجه نیازی به اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ نمی باشد. شکل (۲-۴) توزیع مانده ها را نشان می دهد.



شکل (۲-۴) منحنی توزیع نرمال مانده ها مربوط به پاسخ آزمایشها

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 (۴-۶) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ (مقدار وزن مخصوص) را نشان می دهد.

جدول (۴-۶) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

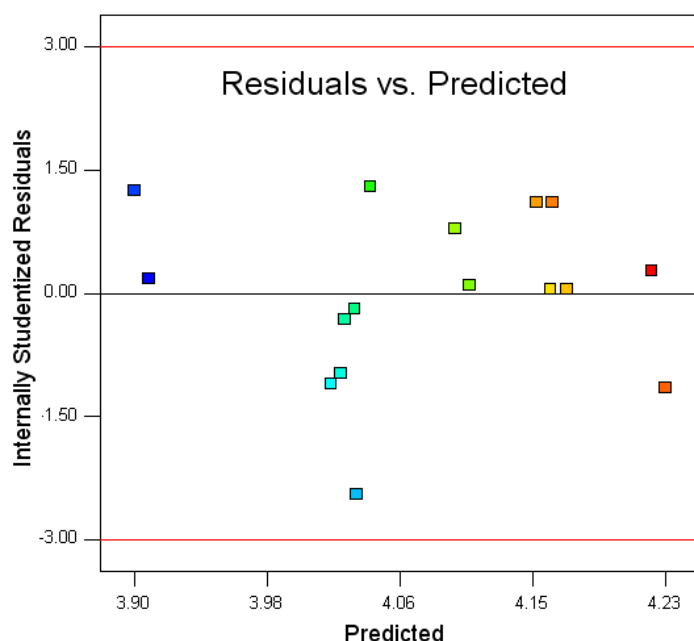
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F
Model	0.148331	5	0.029666	25.22104	< 0.0001
A-Collector	0.045156	1	0.045156	38.39001	0.0001
B-Solid percent	0.061256	1	0.061256	52.07758	< 0.0001
C-Conditioning Time	0.000306	1	0.000306	0.260361	0.6209
D-Disliming	0.037056	1	0.037056	31.50372	0.0002
AD	0.004556	1	0.004556	3.873539	0.0774
Residual	0.011763	10	0.001176		
Cor Total	0.160094	15			

ملاحظه می شود که مدل برازش شده از نظر آماری معنی دار می باشد و فقط ۰/۰۱٪ احتمال وجود دارد که F-value بزرگتری بر اساس تاثیر اغتشاشات بوجود آید. و همچنین به ترتیب عوامل و اثرات متقابل B (درصد جامد)، A (میزان مصرف کلکتور)، D (نرمه گیری)، AD (اثر متقابل میزان مصرف کلکتور و نرمه گیری)، از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (مقدار وزن

مخصوص) معنی دار و با اهمیت می باشند و خود عامل C (زمان آماده سازی) از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (مقدار وزن مخصوص) با اهمیت و معنی دار نمی باشد.

۴-۷-۴- آنالیز خطاهای پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

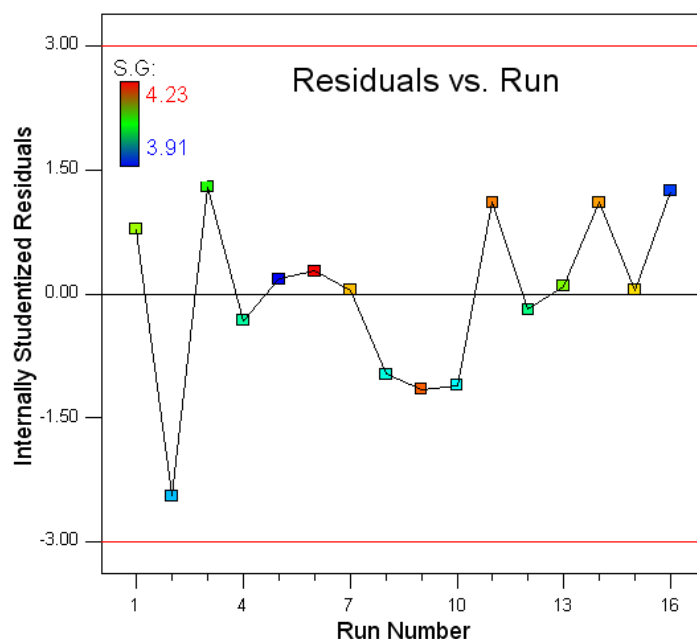
به منظور بررسی توانایی مدل برازش شده بر آزمایشها و چگونگی عملکرد آن و همچنین نحوه انجام آزمایشها بهتر است که آنالیز خطاها صورت پذیرد که در شکل های (۳-۴) تا (۶-۴) این عمل صورت پذیرفته است.



شکل (۳-۴) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (مقدار وزن مخصوص) توسط مدل

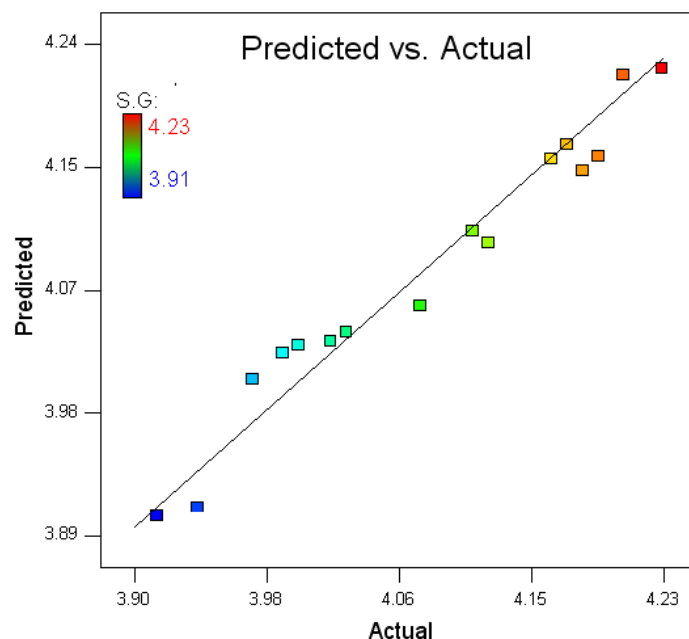
شکل (۳-۴) وضعیت مانده ها را با توجه به مقادیر پیش بینی شده پاسخ (مقدار وزن مخصوص) توسط مدل نشان می دهد. آنچه که انتظار می رود این است که مانده ها نسبت به مقادیر پیش بینی شده پاسخ توسط مدل وابسته

نباشند و از الگوی خاصی پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع شده باشند که نمودار شکل (۴-۳) این وضعیت را تایید می کند.



شکل (۴-۴) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

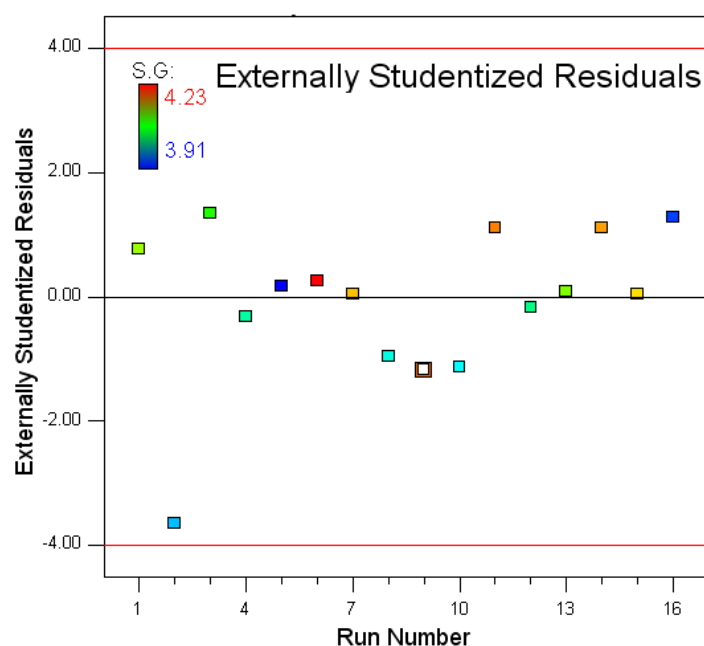
در شکل (۴-۴) به بررسی وجود الگوی احتمالی مقادیر مانده ها با توجه به توالی انجام آزمایشها پرداخته شده است. همانطور که در نمودار نیز مشاهده می شود مقادیر مانده ها به صورت تصادفی پراکنده شده اند که به مفهوم مستقل بودن مانده ها نسبت به توالی انجام آزمایشها است، که مطلوب می باشد.



شکل (۴-۵) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (مقدار وزن مخصوص) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل

شکل (۴-۵) برای بررسی توانایی مدل در پیش بینی مقادیر واقعی

پاسخ (مقدار وزن مخصوص) بکار می رود. از آنجایی که مقادیر واقعی، و پیش بینی شده پاسخ (مقدار وزن مخصوص) 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 (۴-۶) نمودار *Externally Studentized Residuals* برای بررسی مقادیر خارج از رده مربوط به پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

شکل (۴-۶) نمودار *Externally Studentized Residuals* را نشان

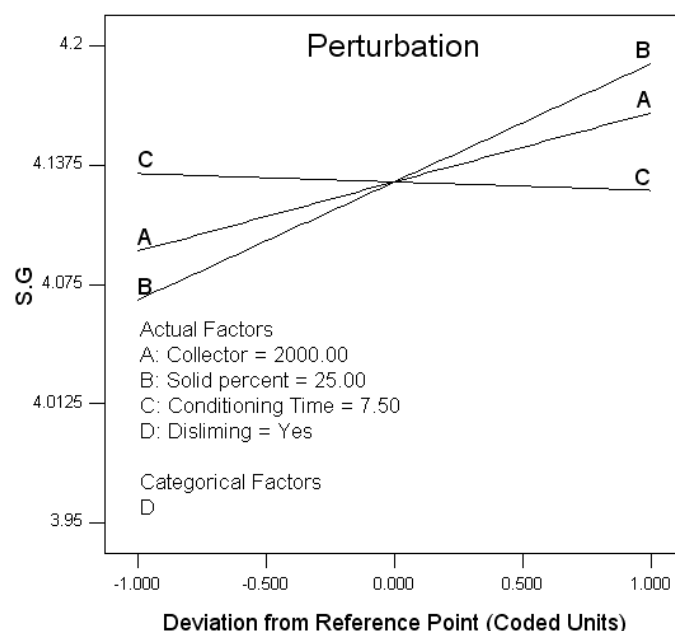
می دهد که برای بررسی و شناسایی مقادیر خارج از رده بکار می رود. انجام محاسبات مربوط به این نمودار بدین صورت می باشد که به ترتیب، داده های مربوط به یک آزمایش را بیرون از محاسبات نگه می دارند و سپس توسط بقیه داده ها، پاسخ را توسط مدل محاسبه می کنند. بدین ترتیب پاسخ محاسبه شده توسط مدل و پاسخ واقعی اندازه 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 (۴-۶) هیچ کدام از مانده ها از حدود مشخص شده تجاوز نکرده اند بنابراین هیچ یک از پاسخهای (مقدار وزن مخصوص) اندازه گیری شده خارج از رده نمی باشند.

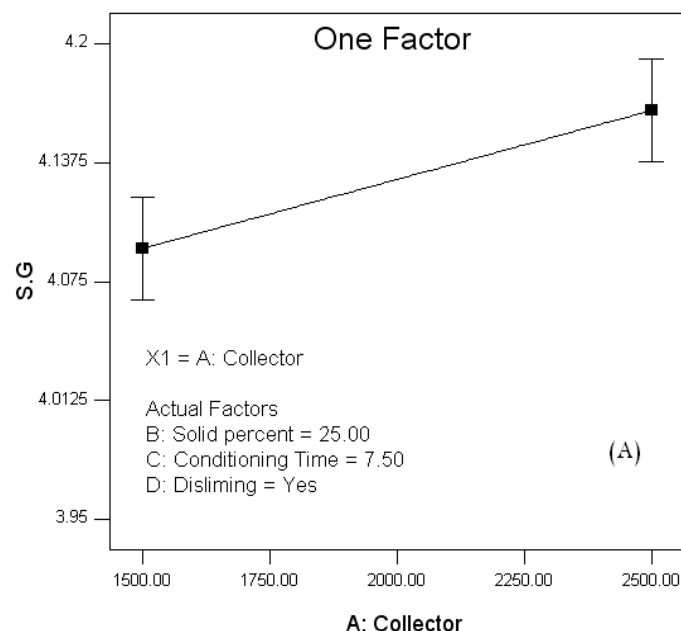
۴-۷-۵- بررسی نتایج پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

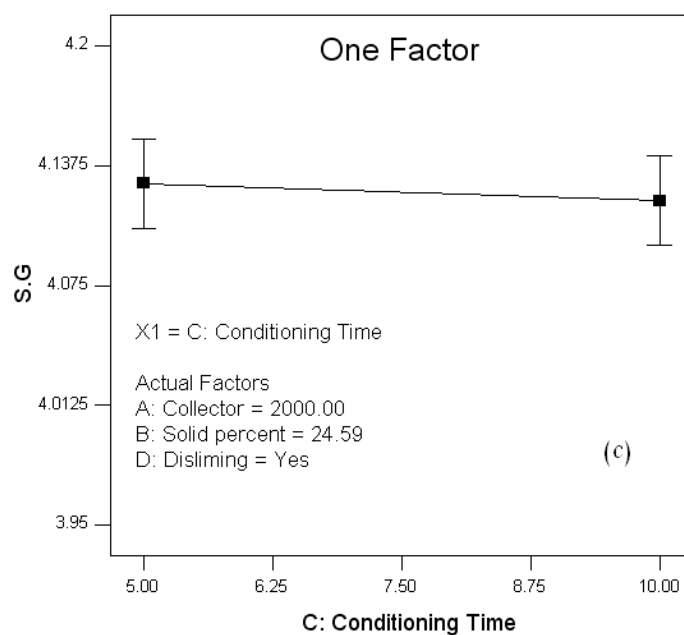
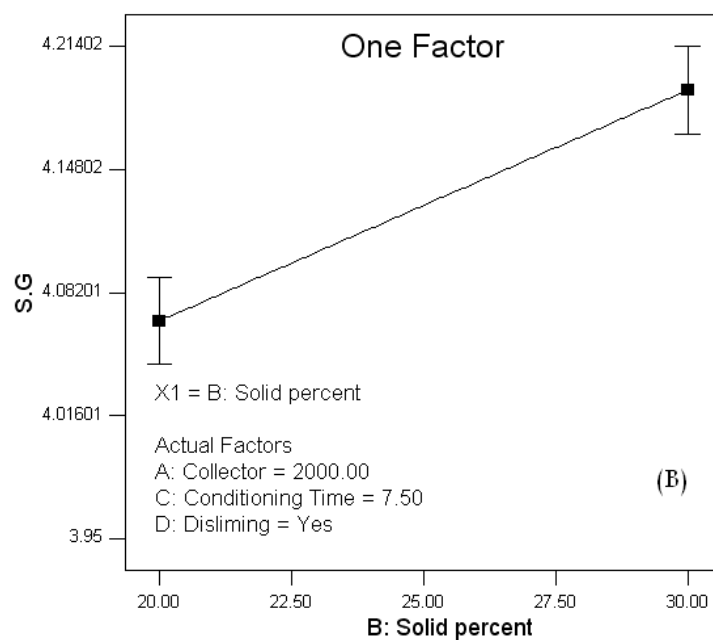
با توجه به حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب مانده ها، به بررسی نتایج حاصله از آزمایشهای مربوط به پاسخ (مقدار وزن مخصوص) پرداخته شده است. شکل (۵-۷) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ (مقدار وزن مخصوص) را نشان می دهد.



شکل (۴-۷) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

همانطور که ملاحظه می شود عوامل C، A و B به ترتیب عوامل حساس بر پاسخ آزمایشها (مقدار وزن مخصوص) بوده و عامل C که به صورت تقریباً خطی افقی است حساسیت خاصی از خود نشان نمی دهد. شکل (۴-۸) 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 (۴-۸) نمودار تأثیر عوامل (a) میزان مصرف کلکتور، (b) درصد جامد، (c) زمان آماده سازی بر پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

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٪

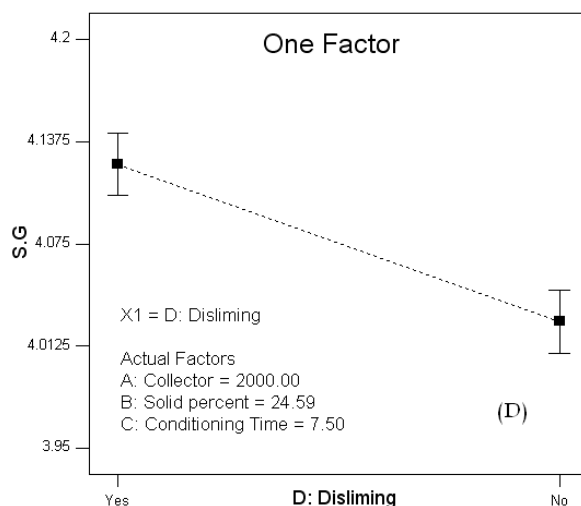
کمترین فاصله معنی دار بودن ($LSD^{۳۸}$) را نشان می دهند. به عبارت دیگر اگر این بازه ها در ابتدا و انتهای سطوح عامل مورد نظر با هم همپوشانی نداشته باشند، بدین مفهوم است که در سطح احتمال ۹۵٪ تغییر در سطوح بالا و پایین آن عامل، تاثیر معنی داری از نظر آماری در پاسخ داشته است (Stat-Ease.Inc, 2005).

در شکل (۴-۸) ملاحظه می شود که تغییر در سطوح بالا و پایین عامل میزان مصرف کلکتور تاثیر معنی داری در پاسخ (مقدار وزن مخصوص) داشته است و با افزایش میزان مصرف کلکتور مقدار وزن مخصوص افزایش یافته است که منطقی می باشد. چون با افزایش میزان کلکتور خاصیت آبرانی باریت تقویت شده و بهتر به حباب می چسبند. درصد جامد در مقدار وزن مخصوص باریت تاثیر مثبت و با اهمیتی داشته است. نرمه گیری نیز تاثیر مثبت و با اهمیتی را در مقدار وزن مخصوص باریت داشته است. که منطقی می باشد، چون وجود نرمه زیاد در بار ورودی به سیستم فلو تاسیون باعث ایجاد خلل در کار و پایین آمدن راندمان فلو تاسیون می شود زیرا در هنگام تماس یک حباب هوا با یک دانه جامد هیدروفوب، لایه چسبیده به سطح دانه، ناپایدار است و پس از نازک شدن متلاشی می شود. دانه های کوچکتر دارای اینرسی کافی برای چیره شدن بر مقاومت لایه آب در تماس با حبابهای هوا نیستند و

^{۳۸} Least Significant Difference

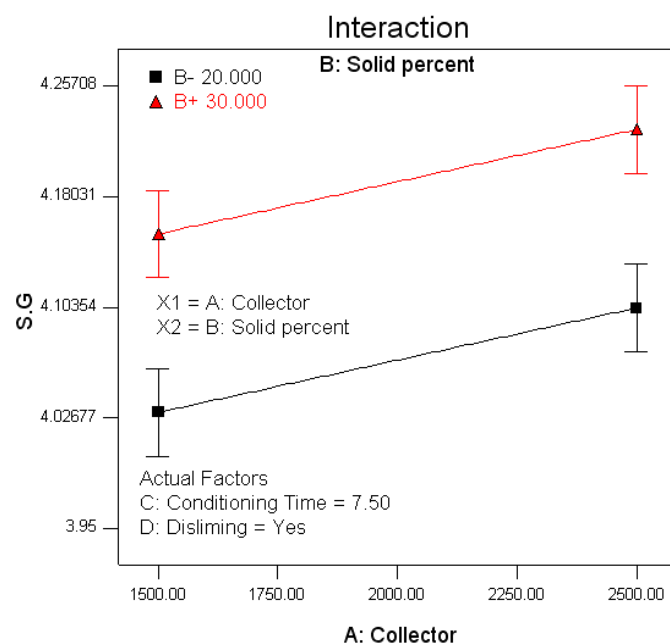
به علاوه، احتمال برخورد حبابهای هوا با دانه های کوچکتر نیز کم است (نعمت الهی، ۱۳۷۱).

در شکل (۹-۴) نمودار تاثیر عامل نرمه گیری بر مقدار وزن مخصوص باریت نشان داده شده است. همانطور که از 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 زمان آماده سازی بر مقدار وزن مخصوص است.



شکل (۹-۴) نمودار تاثیر عامل نرمه گیری بر مقدار وزن مخصوص باریت

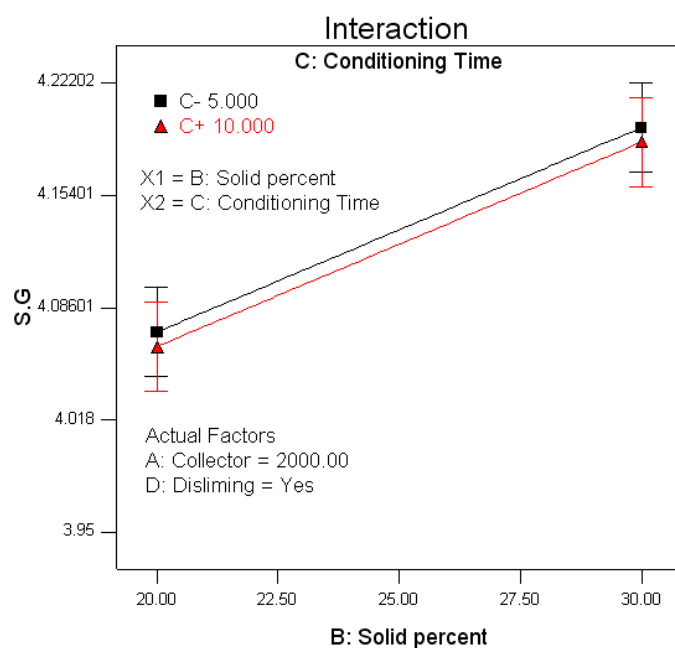
علاوه بر بررسی اثرات عوامل اصلی، برای درک بهتر از فرآیند و شرایط عملیاتی می بایست اثرات متقابل بین عوامل نیز مورد مطالعه قرار گیرند که بررسی این اثرات از قابلیت های منحصر به فرد روش های طراحی آماری آزمایشها است. شکل (۱۰-۴) نمودار اثر متقابل دو عامل میزان مصرف کلکتور و درصد جامد، (AB) را نشان می دهد.



شکل (۴-۱۰) نمودار اثر متقابل دو عامل میزان مصرف کلکتور و درصد جامد در پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

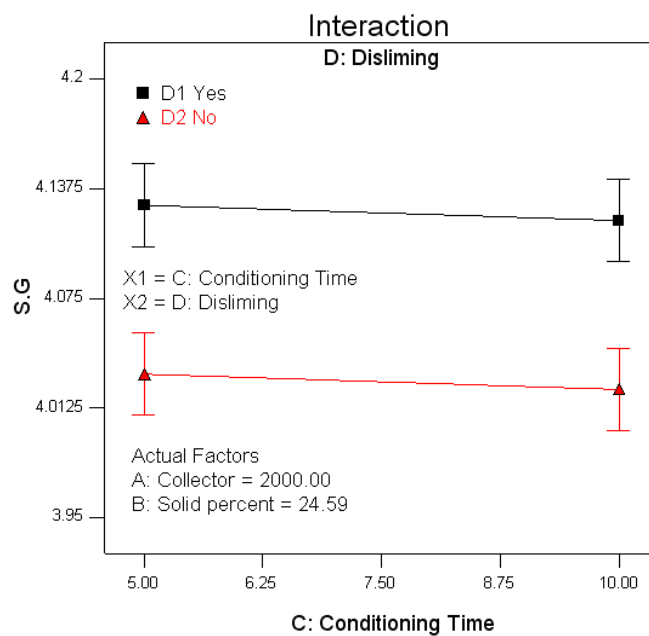
همانطور که از نمودار مشاهده می شود وجود اثر متقابل مشهود نیست.

شکل (۴-۱۱) نمودار اثر متقابل دو عامل زمان آماده سازی و درصد جامد، (CB) را نشان می دهد.

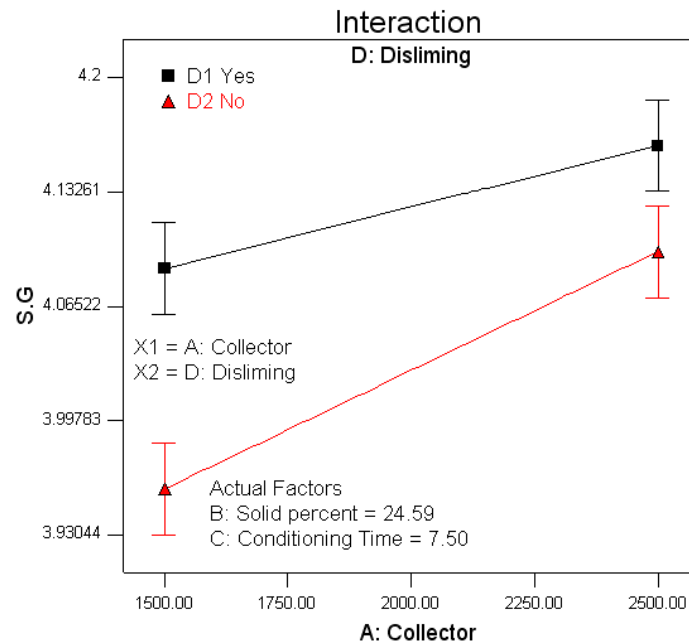


شکل (۴-۱۱) نمودار اثر متقابل دو عامل زمان آماده سازی و درصد جامد در پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

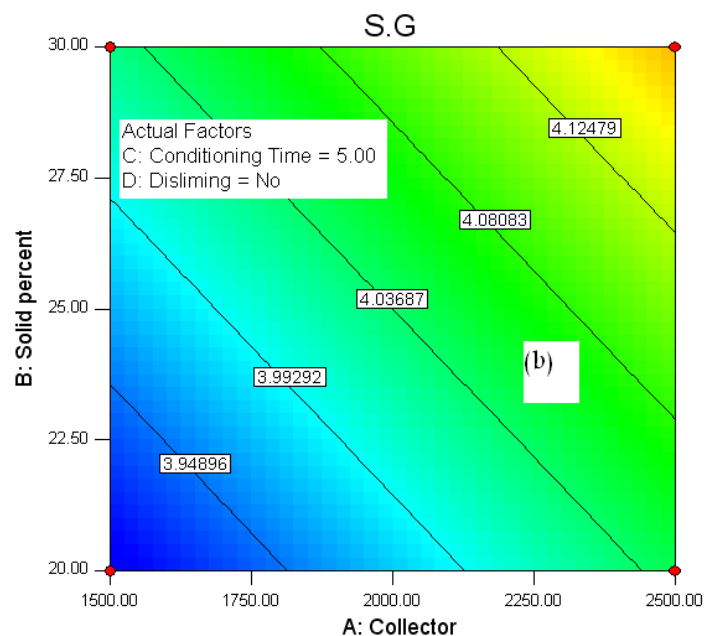
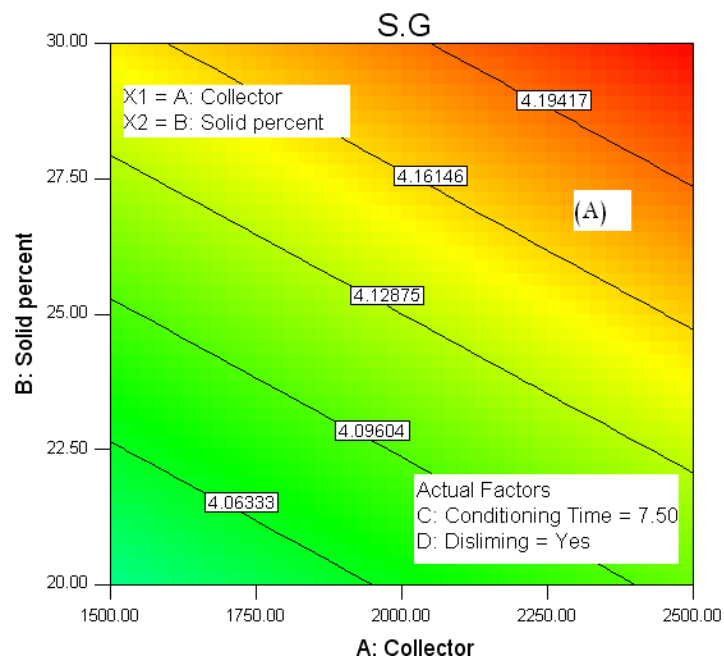
همانطور که از نمودار مشاهده می شود در اینجا هم وجود اثر متقابل مشهود نیست. شکل (۴-۱۲) نمودار اثر متقابل دو عامل زمان آماده سازی و نرمه گیری (CD) را نشان می دهد.



شکل (۴-۱۲) نمودار اثر متقابل دو عامل زمان آماده سازی و نرمه گیری در پاسخ (مقدار وزن مخصوص) همانطور که از نمودار مشاهده می شود در این نمودار هم وجود اثر متقابلی دیده نمی شود. شکل (۴-۱۳) نمودار وجود اثر متقابل بین دو عامل میزان مصرف کلکتور و نرمه گیری (AD) را نشان می دهد.



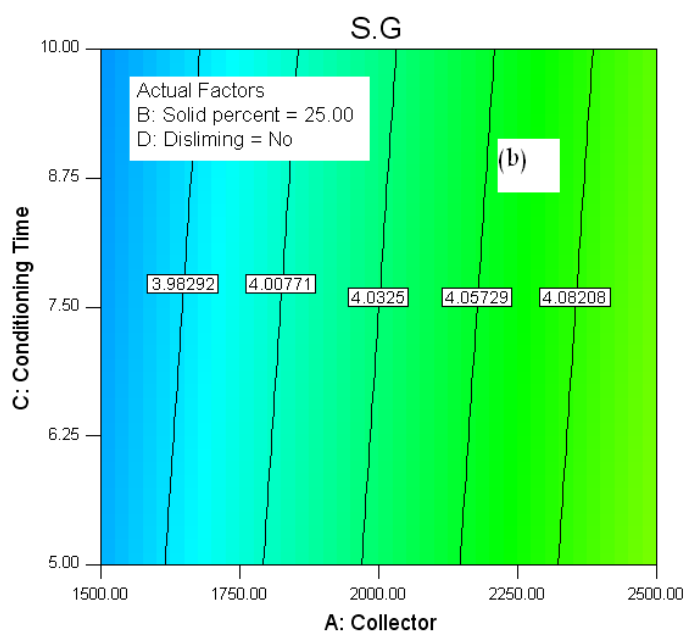
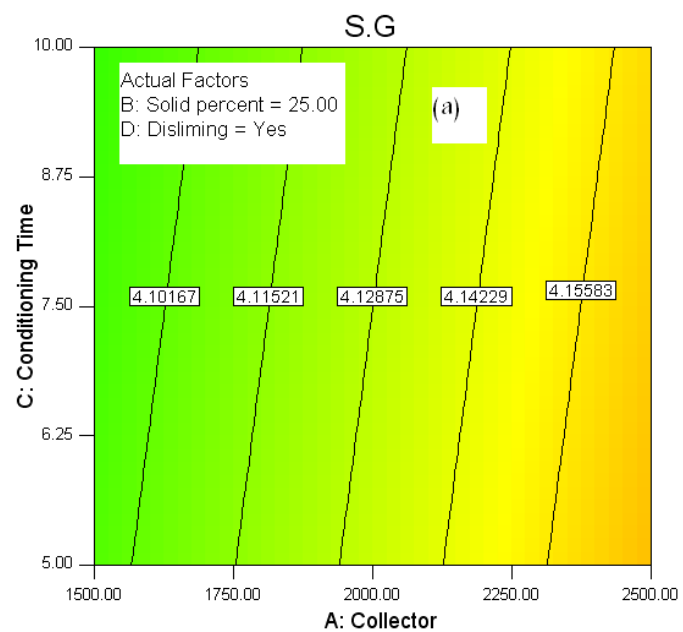
شکل (۴-۱۳) نمودار اثر متقابل بین دو عامل میزان مصرف کلکتور و نرمه گیری در پاسخ (مقدار وزن مخصوص) همانطور که از نمودار مشاهده می شود به علت عدم وجود اثر متقابل بین دو عامل، رفتار میزان مصرف کلکتور با تغییر سطح نرمه گیری تغییر چندانی نمی کند. در این مرحله به بررسی دوبعدی عوامل و خطوط همتراز پاسخ پرداخته خواهد شد. در شکل (۴-۱۴) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل بر پاسخ نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۴) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل میزان مصرف کلکتور و درصد جامد (a) بوسیله نرمه گیری و (b) بوسیله عدم نرمه گیری بر پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

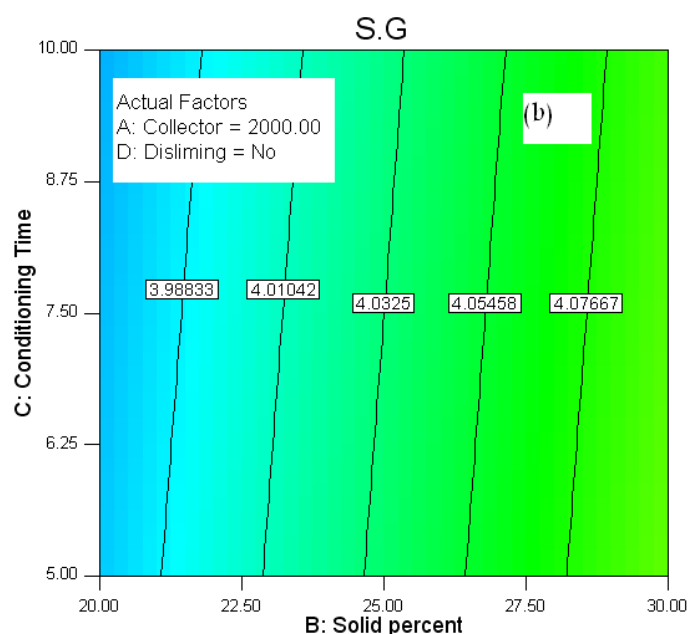
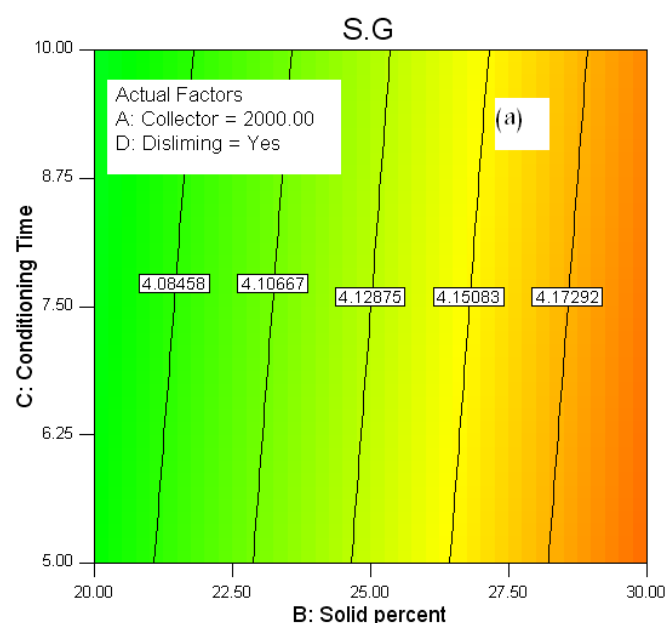
همانطور که از نمودارها مشاهده می شود در هر دو با افزایش میزان مصرف کلکتور و افزایش درصد جامد میزان وزن مخصوص باریت افزایش پیدا می کند. نکته قابل تأمل اینکه افزایش مقدار کلکتور تا حدی میتواند موجب

بهبود بازیابی و شناور سازی باریتین شود اما افزایش عیار کنسانتره که موجب افزایش چگالی محصول میشود منطقی با افزایش درصد جامد باید کاهش یابد. البته این امر در محدوده رشد افزایشی پاسخ نسبت به درصد جامد قابل توجیه میباشد و به نظر میرسد با افزایش چگالی جامد و در خارج این محدوده افزایشی، مقدار عیار محصول و در نتیجه چگالی کاهش خواهد یافت. علی ایحال میتوان اینگونه تلقی نمود که نتایج حاصل در محدوده تغییرات پارامتر ها میتواند منطقی باشد. در مقایسه دو نمودار در سطوح مختلف نرمه گیری متوجه می شویم که در شرایطی که نرمه گیری صورت می گیرد میزان وزن مخصوص باریت بهبود یافته است. در شکل (۴-۱۵) نیز نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل میزان مصرف کلکتور و زمان آماده سازی بر پاسخ نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۵) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل میزان مصرف کلکتور و زمان آماده سازی (a) بوسیله نرمه گیری و (b) بوسیله عدم نرمه گیری بر پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

همانطور که از شکل (۴-۱۵) مشاهده می شود، در واقع دو شکل بالا تفاوت چندانی با هم ندارند. در شکل (۴-۱۶) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر عوامل درصد جامد و زمان آماده سازی، بر پاسخ نشان داده شده است.



شکل (۴-۱۶) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) تأثیر درصد جامد و زمان آماده سازی (a) بوسیله نرمه گیری و (b) بوسیله عدم نرمه گیری بر پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

همانطور که از نمودارها مشاهده می شود هر دو نمودار روند مشابه دارند و در مقایسه دو نمودار در سطوح مختلف نرمه گیری متوجه می شویم که در شرایطی که نرمه گیری صورت می گیرد مقدار وزن مخصوص افزایش پیدا می کند.

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 فلوتاسیون مکانیکی باریت بدست آمد که مقدمات لازم را برای مطالعات بیشتر و بهینه سازی عملیات فلوتاسیون باریت توسط روشهای پاسخ سطح را فراهم نمود. بدین ترتیب با توجه به بررسی های انجام شده، عامل میزان مصرف کلکتور 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 نگه داشته شد. عامل زمان آماده سازی در زمانی که عامل میزان مصرف کلکتور 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 به صورت ثابت در نظر گرفته شد. در مورد دو عامل درصد جامد و نرمه گیری نیز باید گفت که درصد جامد در سطح بالا

ثابت فرض شد و در انجام آزمایشات بعدی نرمه گیری باید صورت بگیرد چون هر دو عامل نقش قابل توجه ای بر پاسخ داشتند.

فصل پنجم

بهینه سازی شرایط عملیاتی سلول

با استفاده از روشهای طراحی آزمایشها

۵-۱- مقدمه

همانطور که قبلاً نیز گفته شد یکی از اهداف اصلی انجام تحقیق بهینه سازی شرایط عملیاتی سلول 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 چهارم) حاصل شد، در این مرحله با هدف بهینه سازی فلوتاسیون مکانیکی باریت 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 میزان مصرف سیلیکات سدیم، دور روتور و زمان کف گیری (فلوتاسیون)، انتخاب و مقدار وزن مخصوص، به عنوان پاسخ آزمایشات در نظر گرفته شدند. که در جدول (۵-۱) عوامل مورد مطالعه و تغییرات مربوط به سطوح آنها نشان داده شده است.

جدول (۵-۱) عوامل و سطوح مربوط به طراحی آزمایشات به روش *Box-Behnken*

نشانه	نام عوامل	واحد	سطح پایین (-1)	سطح مرکزی (0)	سطح بالا (+1)
A	میزان مصرف سیلیکات سدیم	گرم بر تن	1500	2000	2500
B	دور روتور	rpm	800	900	1000
C	زمان فلوتاسیون	دقیقه	3	3/5	4

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^{۳۹} می باشند. جهت حذف خطاهای ناشناخته، آزمایشات با ترتیب تصادفی انجام شدند همچنین بلوک بندی نیز انجام شده است. جدول (۵-۲) شرایط آزمایشی و پاسخها را در طراحی انجام شده، نشان می دهد.

جدول (۵-۲) شرایط آزمایشی و پاسخها در طرح پاسخ سطح (روش Box-Behnken)

Std	Run	Block	Factor 1 A:sodium silicate Gr/ton	Factor 2 B:rotor speed rpm	Factor 3 C:floations time min	Response 1 Combustible Recovery %
10	3	Block 1	2000	240	800	4.04
3	4	Block 1	1500	240	900	4
17	5	Block 1	2000	210	900	4.09
14	6	Block 1	2000	210	900	4.1
11	7	Block 1	2000	180	1000	4.17
6	8	Block 1	2500	210	800	4.13
13	9	Block 1	2000	210	900	4.09
7	10	Block 1	1500	210	1000	4.06
4	11	Block 1	2500	240	900	4.18
9	12	Block 1	2000	180	800	4.12
1	13	Block 1	1500	180	900	4.06
15	14	Block 1	2000	210	900	4.08
8	15	Block 1	2500	210	1000	4.24
12	16	Block 1	2000	240	1000	4.19
16	17	Block 1	2000	210	900	4.09

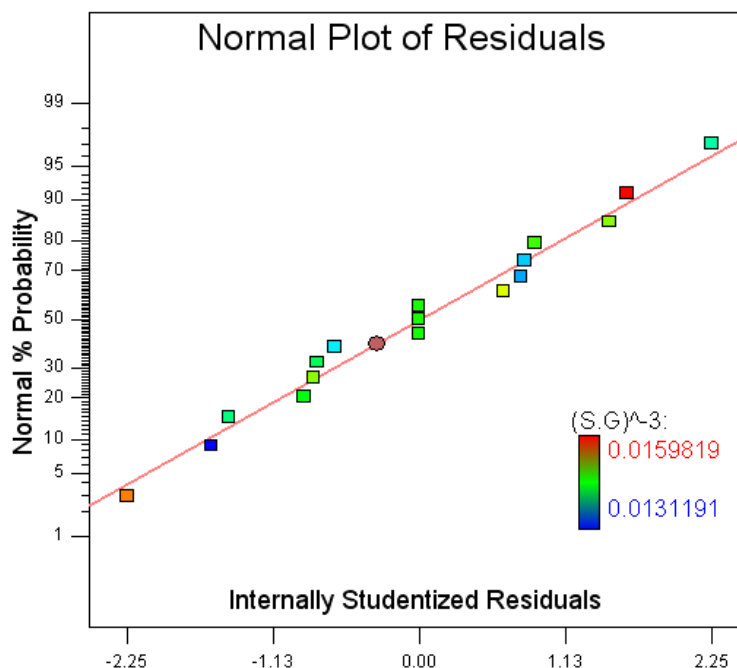
^{۳۹} Incomplete Block Factorial

۵-۲- مطالعه و تفسیر داده های پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

همانطور که قبلاً نیز گفته شد. در این سری از آزمایشات، سه میزان مصرف سیلیکات سدیم، دور روتور و زمان فلوتاسیون انتخاب و همچنین برای آنها پاسخی با عنوان مقدار وزن مخصوص نیز در نظر گرفته شده است. که در این بخش تفسیر داده های پاسخ (مقدار وزن مخصوص) مد نظر می باشد.

۵-۲-۱- اعمال تبدیل بر روی داده های پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

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 (مقدار وزن مخصوص)، بعد از ارزیابی های به عمل آمده با استفاده از نرم افزار، تبدیل لگاریتم طبیعی مناسب تشخیص داده شد. شکل (۵-۱) توزیع مانده ها را بعد از اعمال تبدیل لگاریتم طبیعی نشان می دهد.



شکل (۵-۱) منحنی توزیع نرمال مانده ها بعد از اعمال تبدیل لگاریتم طبیعی در پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

۵-۲-۲- برآزش مدل بر روی داده های پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

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 (۵-۳) به بررسی وضعیت برآزش مدل‌های مختلف نسبت به یکدیگر پرداخته است.

جدول (۵-۳) بررسی وضعیت برآزش مدل‌های مختلف نسبت به یکدیگر در پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Mean vs Total	0.003575	1	0.003575			
Linear vs Mean	7.42E-06	3	2.47E-06	28.02768	< 0.0001	

<i>2FI vs Linear</i>	5.76E-07	3	1.92E-07	3.362437	0.0632	
<i>Quadratic vs 2FI</i>	4.44E-07	3	1.48E-07	8.116091	0.0111	<i>Suggested</i>
<i>Cubic vs Quadratic</i>	1.05E-07	3	3.49E-08	6.064113	0.0571	<i>Aliased</i>
<i>Residual</i>	2.3E-08	4	5.75E-09			
<i>Total</i>	0.003583	17	0.000211			

در جدول (۳-۵) 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 (۴-۵) به بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف پرداخته شده است.

جدول (۴-۵) بررسی آماری کیفیت برازش مدل‌های مختلف در پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

	<i>Std.</i>		<i>Adjusted</i>	<i>Predicted</i>		
<i>Source</i>	<i>Dev.</i>	<i>R-Squared</i>	<i>R-Squared</i>	<i>R-Squared</i>	<i>PRESS</i>	
<i>Linear</i>	0.000297	0.866094	0.835193	0.729723	2.32E-06	
<i>2FI</i>	0.000239	0.933338	0.893341	0.69917	2.58E-06	
<i>Quadratic</i>	0.000135	0.985115	0.965976	0.800568	1.71E-06	<i>Suggested</i>
<i>Cubic</i>	7.58E-05	0.997317	0.989268		+	<i>Aliased</i>

با توجه به جدول (۴-۵) 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** 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 (۵-۵) به بررسی نقصان در برازش (Lack of Fit) مدل پرداخته شده است.

جدول (۵-۵) بررسی نقصان در برازش مدل (Lack of Fit) در پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Linear	1.12E-06	9	1.25E-07	21.73742	0.0047	
2FI	5.48E-07	6	9.14E-08	15.89742	0.0092	
Quadratic	1.05E-07	3	3.49E-08	6.064113	0.0571	Suggested
Cubic	0	0				Aliased
Pure Error	2.3E-08	4	5.75E-09			

با توجه به جدول (۵-۵) 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 (۵-۳)، (۵-۴) و (۵-۵) مدل Quadratic به عنوان بهترین مدل از بین بقیه مدل های موجود برای برازش بر روی آزمایشات در پاسخ (مقدار وزن مخصوص) انتخاب گردیده است.

معادله تجربی مدل Quadratic که مقدار وزن مخصوص را برای

مقادیر کد شده و واقعی عوامل تخمین می زند، به صورت زیر می باشد:

Final Equation in Terms of Coded Factors:

$$(S.G)^{-3} =$$

$$+0.015$$

* A	-7.990E-004
* B	+1.190E-004
* C	-5.244E-004
* A * B	-2.708E-004
* A * C	-9.243E-006
* B * C	-2.657E-004
* A ²	+1.596E-004
* B ²	-1.877E-004
* C ²	-2.161E-004

Final Equation in Terms of Actual Factors:

$$(S.G)^{-3} =$$

$$-0.027107$$

* Sodium ciliate	-1.93280E-007
* Flotation time	+2.07394E-004
* Rotor speed	+5.26258E-005
* Sodium ciliate * Flotation time	-1.80545E-008
* Sodium ciliate * Rotor speed	-1.84857E-010
* Flotation time * Rotor speed	-8.85770E-008
* Sodium ciliate ²	+6.38253E-010
* Flotation time ²	-2.08571E-007
* Rotor speed ²	-2.16105E-008

۵-۲-۳- آنالیز واریانس پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

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 (مقدار وزن مخصوص) را نشان می دهد.

جدول (۵-۶) آنالیز واریانس مربوط به پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

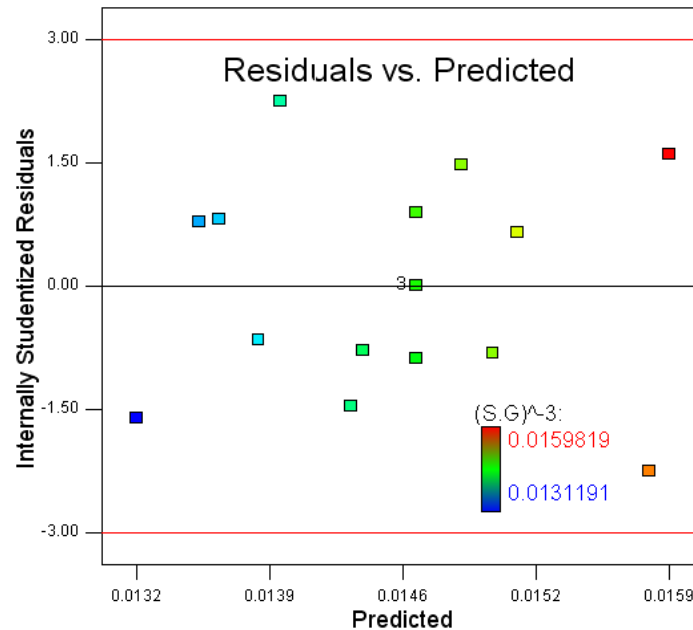
	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	8.44E-06	9	9.38E-07	51.47302	< 0.0001	significant
A-Sodium ciliate	5.11E-06	1	5.11E-06	280.3297	< 0.0001	
B-Flotation time	1.13E-07	1	1.13E-07	6.213353	0.0414	
C-Rotor speed	2.2E-06	1	2.2E-06	120.7438	< 0.0001	
AB	2.93E-07	1	2.93E-07	16.10114	0.0051	
AC	3.42E-10	1	3.42E-10	0.018755	0.8949	
BC	2.82E-07	1	2.82E-07	15.50208	0.0056	
A^2	1.07E-07	1	1.07E-07	5.883662	0.0457	
B^2	1.48E-07	1	1.48E-07	8.142852	0.0246	
C^2	1.97E-07	1	1.97E-07	10.79224	0.0134	
Residual	1.28E-07	7	1.82E-08			
Lack of Fit	1.05E-07	3	3.49E-08	6.064113	0.0571	not significant

<i>Pure Error</i>	2.3E-08	4	5.75E-09			
<i>Cor Total</i>	8.57E-06	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 (دور روتور)، A (میزان مصرف سیلیکات سدیم)، از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (مقدار وزن مخصوص) معنی دار و با اهمیت می باشند.

۵-۲-۴- آنالیز خطاهای پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

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 (۵-۲) تا (۵-۵) این عمل صورت پذیرفته است.



شکل (۲-۵) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده پاسخ (مقدار وزن مخصوص) توسط مدل

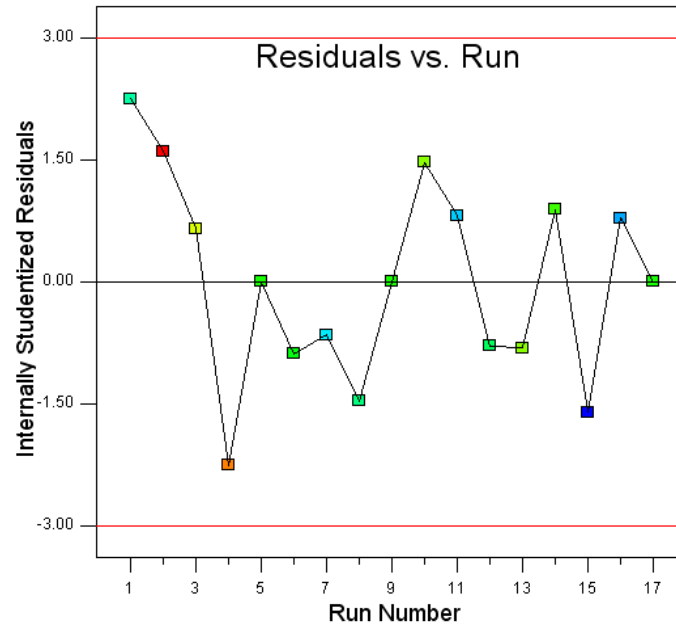
شکل (۲-۵) وضعیت مانده ها را با توجه به مقادیر پیش بینی شده پاسخ

(مقدار وزن مخصوص) 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

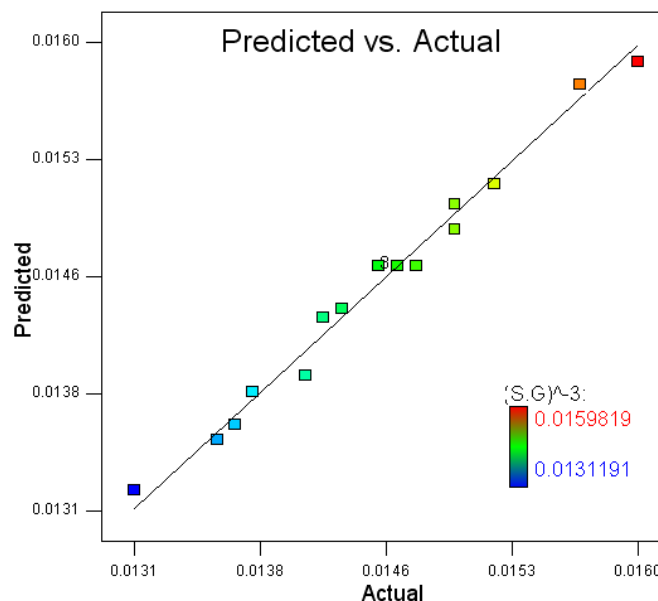
نباشند و از الگوی خاصی پیروی نکنند و به صورت پراکنده و تصادفی توزیع

شده باشند که نمودار این وضعیت را تایید می کند.



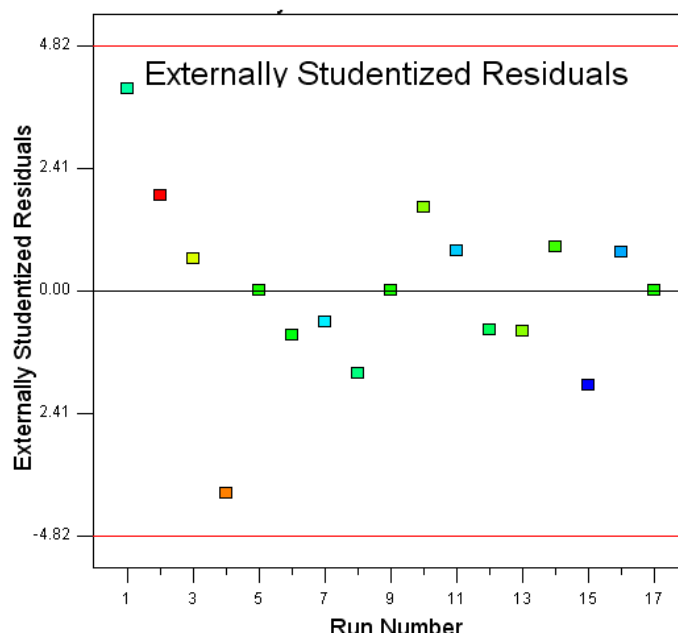
شکل (۳-۵) نمودار تغییرات مانده ها در مقابل توالی انجام آزمایشها مربوط به پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

در شکل (۳-۵) 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 (۴-۵) نمودار مقادیر واقعی پاسخ (مقدار وزن مخصوص) نسبت به مقادیر پیش بینی شده آن توسط مدل

شکل (۴-۵) برای بررسی توانایی مدل در پیش بینی مقادیر واقعی پاسخ (مقدار وزن مخصوص) بکار می رود. از آنجایی که مقادیر واقعی، و پیش بینی شده پاسخ (مقدار وزن مخصوص) 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 (۵-۵) نمودار *Externally Studentized Residuals* برای بررسی مقادیر خارج از رده مربوط به پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

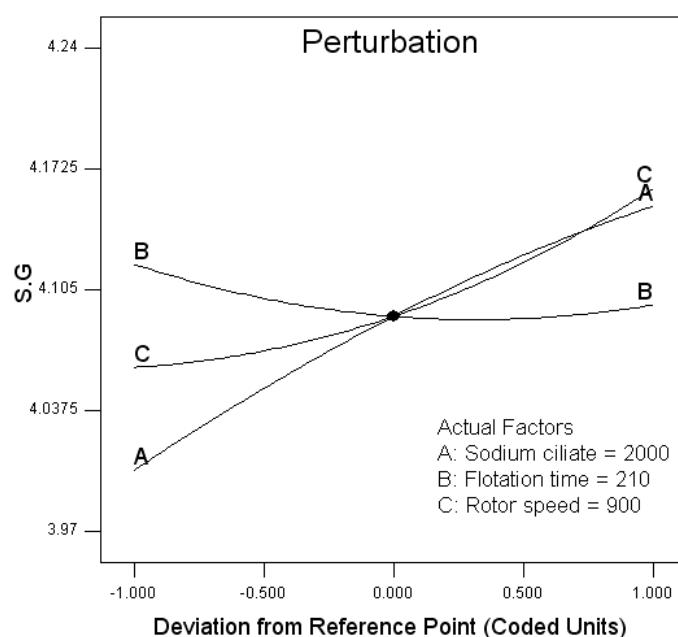
شکل (۵-۵) نمودار *Externally Studentized Residuals* را

نشان می دهد که برای بررسی و شناسایی مقادیر خارج از رده بکار می رود. در نمودار شکل (۵-۵) هیچ کدام از مانده ها از حدود مشخص شده تجاوز

نکرده اند بنابراین هیچ کدام از پاسخهای (مقدار وزن مخصوص) اندازه گیری شده خارج از رده نمی باشند.

۵-۲-۵- بررسی نتایج پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

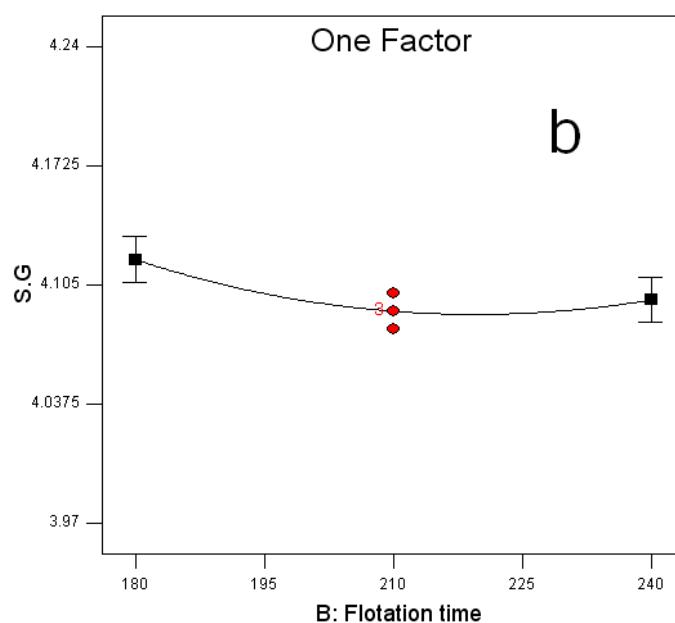
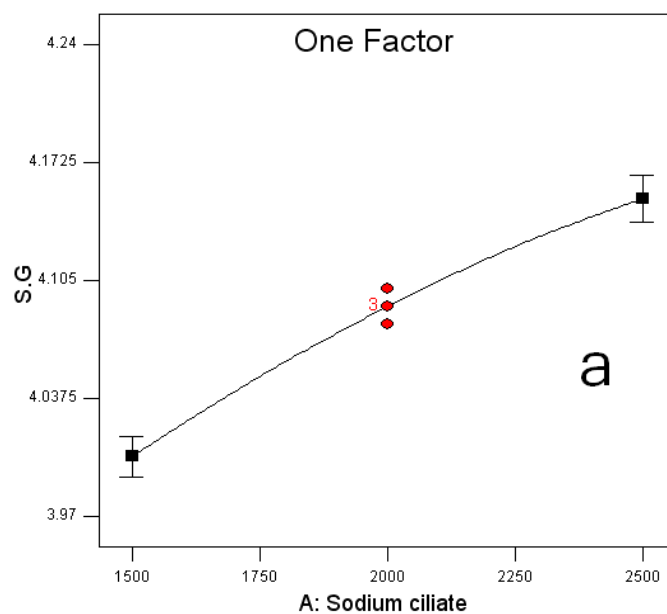
با توجه به حصول اطمینان از برازش مناسب مدل و همچنین توزیع مناسب مانده ها، به بررسی نتایج حاصله از آزمایشهای مربوط به پاسخ (مقدار وزن مخصوص) پرداخته شده است. شکل (۶-۶) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ (مقدار وزن مخصوص) را نشان می دهد.

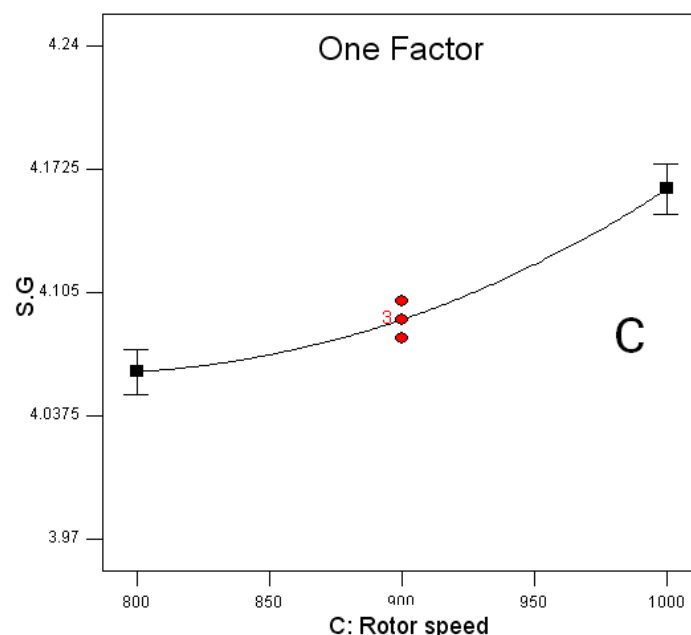


شکل (۶-۵) نمودار تحلیل حساسیت عوامل نسبت به پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

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

شکل (۵-۷) 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.



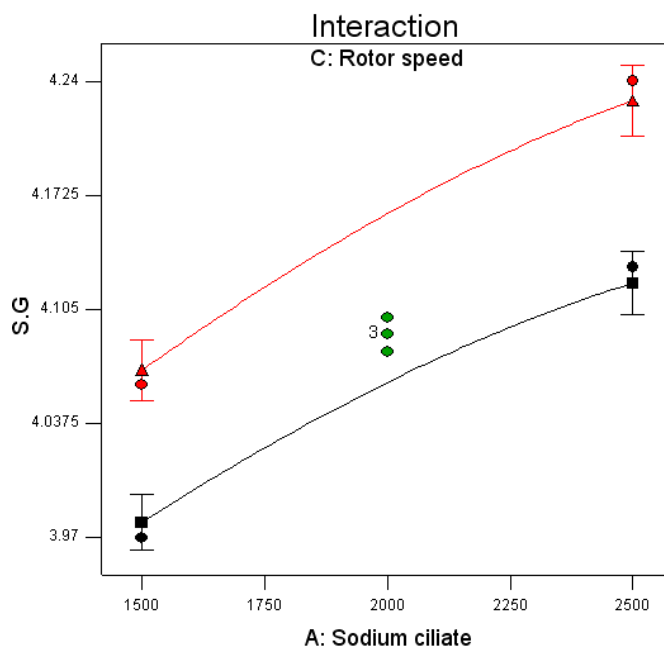


شکل (۷-۵) نمودار تأثیر عوامل (a) میزان مصرف سیلیکات سدیم، (b) دور روتور، (c) زمان فلوتاسیون بر پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

در شکل (۷-۵) ملاحظه می شود که تغییر در سطوح بالا و پایین عامل میزان مصرف سیلیکات سدیم تأثیر معنی داری در پاسخ (مقدار وزن مخصوص) داشته است و با افزایش میزان مصرف سیلیکات سدیم درصد بازیابی افزایش یافته است چرا که سیلیکات سدیم در اینجا هم به عنوان عامل بازداشت کننده کوارتز و کانی های مزاحم دیگر عمل می کند و هم به عنوان عامل متفرق کننده باعث تفرق نرمه از سطح باریت شده و در نتیجه کلکتور بهتر می تواند بر روی باریت تأثیر گذاشته و آنرا فلوته کند. تغییر در سطوح زمان فلوتاسیون در مقدار وزن مخصوص باریت تأثیر چندانی نداشته است. دور روتور نیز تأثیر مثبتی را در مقدار وزن مخصوص باریت داشته است که میتوان گفت این عامل بر روی سینتیک آزمایش تأثیر گذار بوده که با

افزایش آن وزن مخصوص هم افزایش یافته است چرا که سینتیک انتقال کف در نقطه سر ریز و سینتیک باز گشت دانه های گانگ به داخل پالپ نکته بسیار مهمی است و این پدیده بسیار پیچیده است (نعمت الهی، ۱۳۷۱).

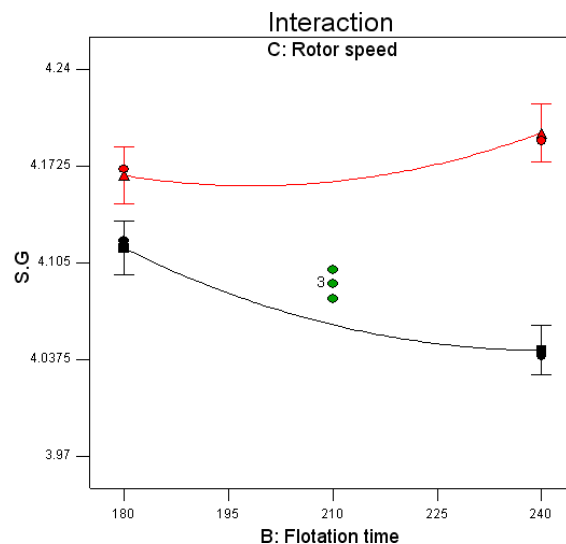
علاوه بر بررسی اثرات عوامل اصلی، برای درک بهتر از فرآیند و شرایط عملیاتی می بایست اثرات متقابل بین عوامل نیز مورد مطالعه قرار گیرند. شکل (۵-۸) نمودار اثر متقابل دو عامل میزان مصرف سیلیکات سدیم و دور روتور، (AC) را نشان می دهد.



شکل (۵-۸) نمودار اثر متقابل دو عامل دور روتور و میزان مصرف سیلیکات سدیم در پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

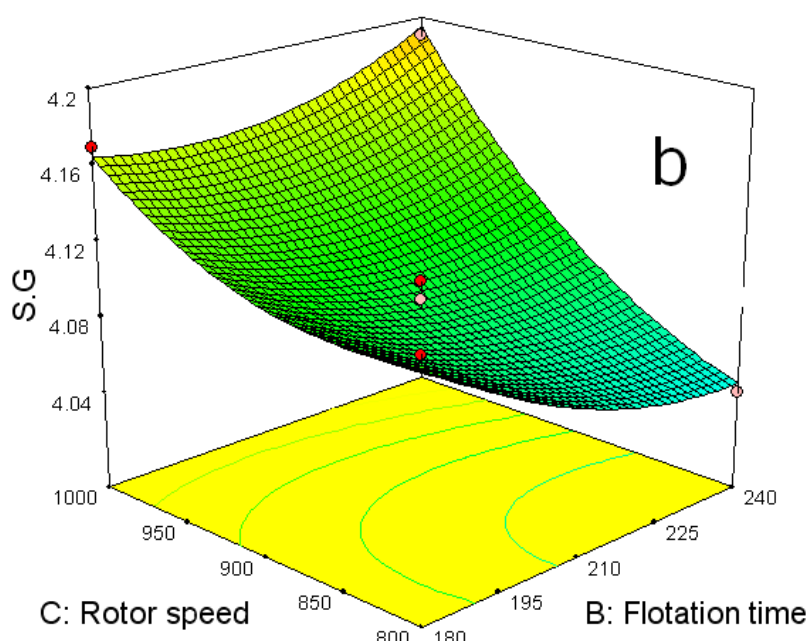
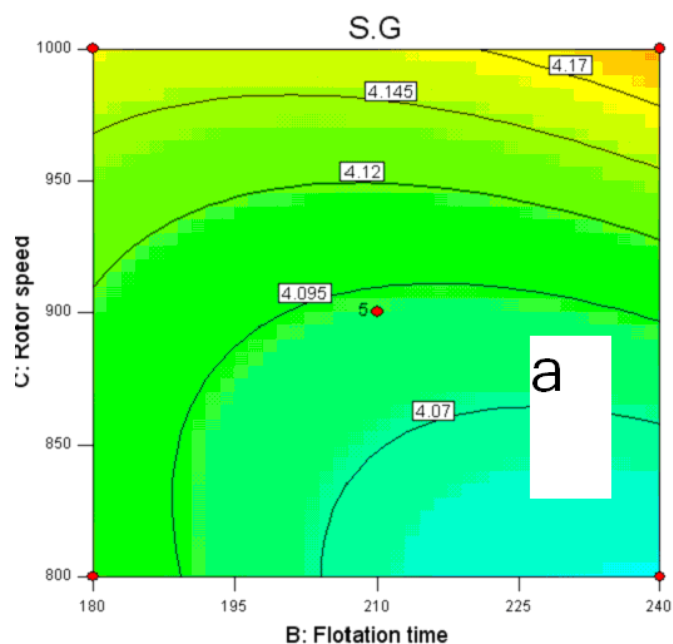
همانطور که از نمودار مشاهده می شود اثر متقابل وجود ندارد.

شکل (۶-۹) نمودار اثر متقابل دو عامل زمان فلوتاسیون و دور روتور، (BC) را نشان می دهد.



شکل (۵-۹) نمودار اثر متقابل دو عامل زمان فلو تاسیون و دور روتور در پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

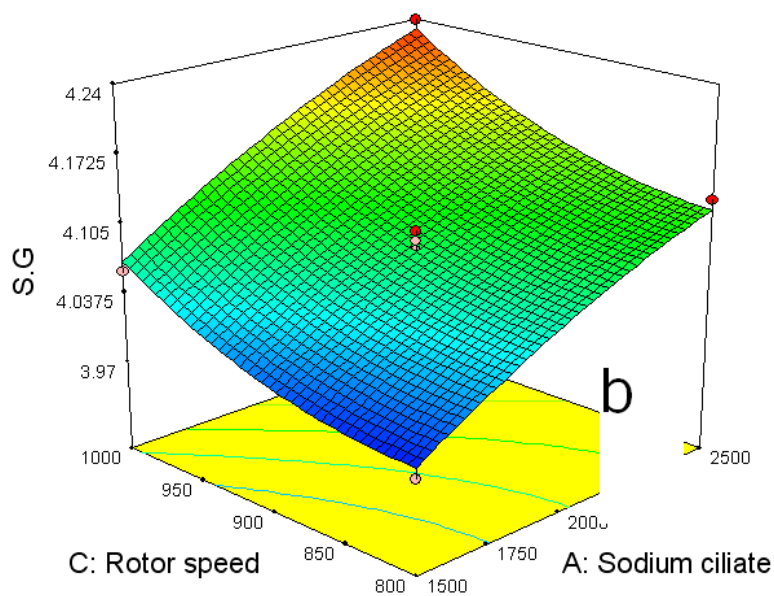
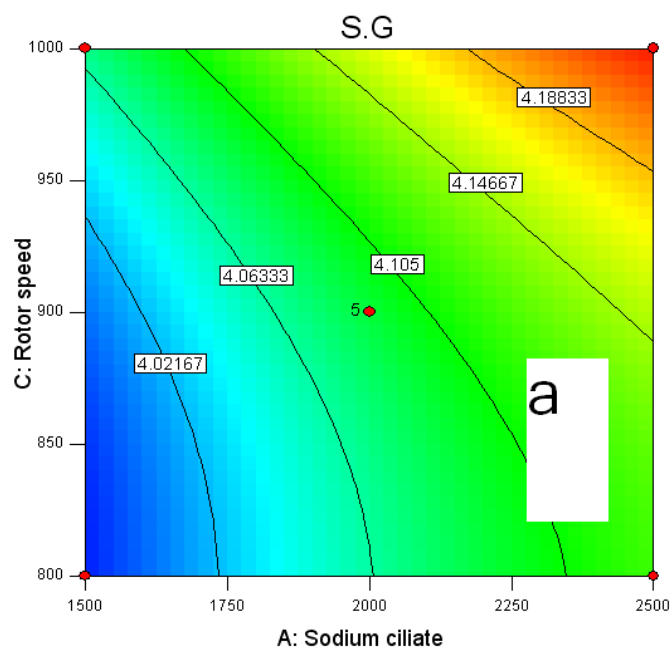
همانطور که از نمودار مشاهده می شود، تقابل بین دو عامل وجود دارد (اثرات موازی نیستند) ولی چندان دارای اهمیت نمی باشد، چون رفتار منحنی در هر دو سطح تقریباً مشابه است. در این مرحله به بررسی دوبعدی و سه بعدی عوامل و خطوط همتراز پاسخ پرداخته خواهد شد. در شکل (۵-۱۰) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی تأثیر عوامل زمان آماده سازی و دور روتور بر پاسخ (مقدار وزن مخصوص) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۰) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل زمان فلوتاسیون و دور روتور بر پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

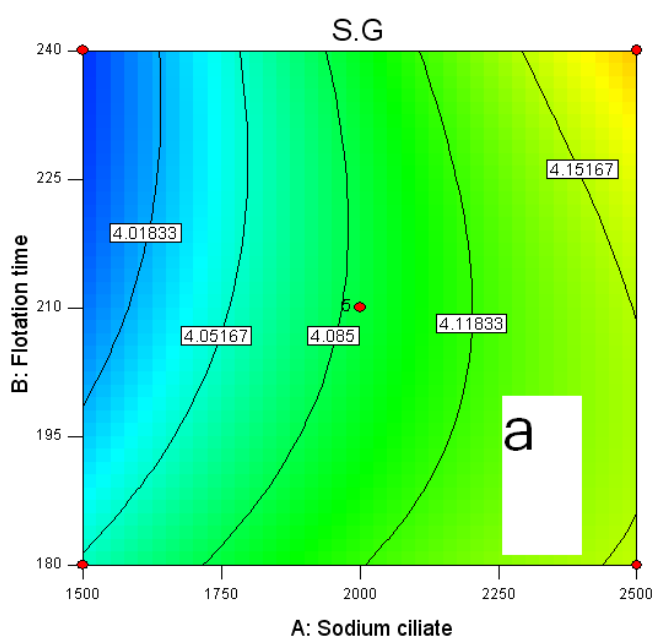
همانطور که از نمودارها مشاهده می شود در سطح بالایی زمان فلوتاسیون و با افزایش میزان دور روتور میزان وزن مخصوص باریت افزایش یافته است. در شکل (۵-۱۱) نیز نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی

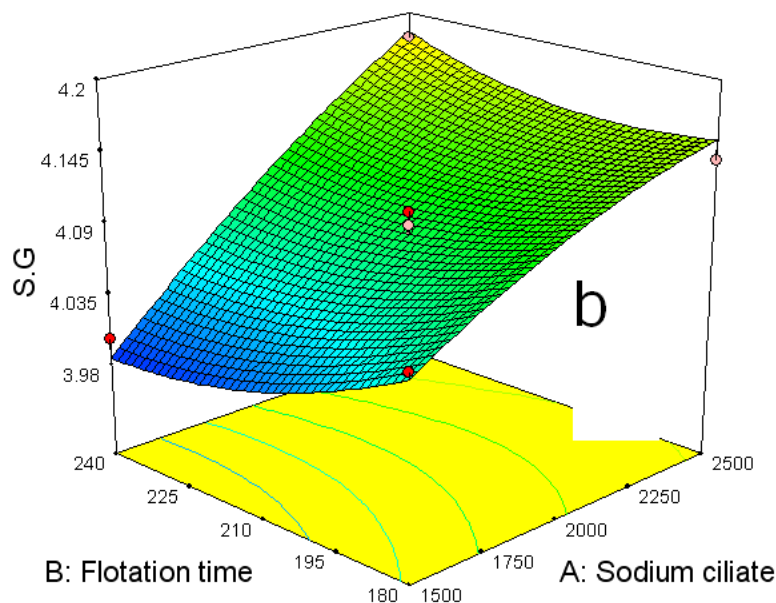
تأثیر عوامل میزان مصرف سیلیکات سدیم و دور روتور بر پاسخ نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۱) نمودار (a) دوبعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل میزان مصرف سیلیکات سدیم و دور روتور بر پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

همانطور که از شکل (۵-۱۱) مشاهده می شود، با افزایش سیلیکات سدیم و افزایش دور روتور میزان وزن مخصوص باریت افزایش پیدا می کند. در شکل (۵-۱۲) نمودار دوبعدی (خطوط همتراز) و سه بعدی تأثیر عوامل میزان مصرف سیلیکات سدیم و زمان فلو تاسیون، بر پاسخ نشان داده شده است.





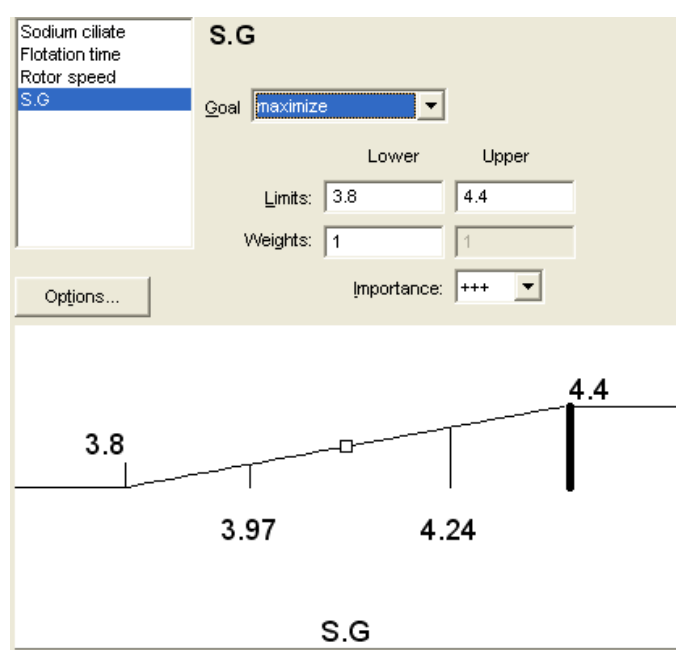
شکل (۵-۱۲) نمودار دو بعدی (خطوط همتراز) و (b) سه بعدی تأثیر عوامل میزان مصرف سیلیکات سدیم و زمان فلوتاسیون بر پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

همانطور که از نمودارها مشاهده می شود در سطح بالایی زمان فلوتاسیون (البته در این نمودار تغییرات زمان فلوتاسیون خیلی محسوس نیست) و با افزایش سیلیکات سدیم میزان وزن مخصوص باریت افزایش پیدا می کند.

۵-۳- بهینه سازی شرایط عملیاتی سلول

یکی از اهداف مهم ما در انجام آزمایشها سعی در بهینه سازی شرایط عملیاتی سلول فلوتاسیون 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 مقدار وزن مخصوص محصول می باشد. و همچنین به منظور پایدار سازی نیز می بایست گسترش خطا در این مراحل که قبلاً مورد بررسی قرار گرفت، کمینه شوند. در شکل (۵-۱۳) نمونه ای از تنظیم شرایط مطلوبیت پاسخ (مقدار وزن مخصوص) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۳) نمونه ای از تنظیم شرایط مطلوبیت پاسخ (مقدار وزن مخصوص)

همانطور که از شکل مشاهده می شود، هدف بیشینه کردن وزن مخصوص تعریف شده است. و از نظر عملیاتی محدوده کمترین و بیشترین مقادیر وزن مخصوص حاصل شده از انجام آزمایشها ۳/۹۷ تا ۴/۲۴ بوده است ولی به منظور نیل به هدف، کمترین و بیشترین محدوده درصد بازیابی برای نرم افزار ۳/۸ تا ۴/۴ تعریف شده است تا نرم افزار بتواند توسط مدلی که قبلاً بر آزمایشها برازش شده بود به سمت بیشینه کردن وزن مخصوص حرکت

کند. عبارت وزن^{۴۰} 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^{۴۱} 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)

در جدول (۵-۱۵) این محدودیت ها و تنظیم شرایط مربوط به مطلوبیت برای تمام عوامل و پاسخها نشان داده شده است.

جدول (۵-۱۵) محدودیت ها و تنظیم شرایط مربوط به مطلوبیت

		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
Sodium ciliate	is in range	1500	2500	1	1	3
Flotation time	is in range	180	240	1	1	3
Rotor speed	is in range	800	1000	1	1	3
S.G	maximize	3.8	4.4	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

^{۴۰} Weights

^{۴۱} Importance

پرداخته شده است. در جدول (۵-۱۶) راه حل‌های پیشنهادی در بهینه سازی فرآیند توسط نرم افزار نشان داده شده است.

جدول (۵-۱۶) راه حل‌های پیشنهادی در بهینه سازی فرآیند

<i>Solutions</i>						
<i>Number</i>	<i>Sodium ciliate</i>	<i>Flotation time</i>	<i>Rotor speed</i>	<i>S.G</i>	<i>Desirability</i>	
1	2500	240	999.989	4.287486211	0.812477	Selected
2	2495.7	240	1000	4.286810552	0.811351	
3	2500	239.556	1000	4.286394324	0.810657	
4	2486.98	240	999.999	4.285407673	0.809013	
5	2488.4	239.772	1000	4.285070771	0.808451	
6	2454.26	240	1000	4.280076381	0.800127	
7	2500	239.867	993.574	4.279236436	0.798727	
8	2443.95	240	1000	4.27837473	0.797291	
9	2428.76	240	1000	4.275847139	0.793079	
10	2401.67	240	999.999	4.271282179	0.78547	
11	2500	232.245	1000	4.269280266	0.782134	
12	2500	220.931	999.999	4.246897624	0.744829	
13	2499.81	240	964.903	4.246369601	0.743949	
14	2500	200.029	1000	4.218637966	0.69773	
15	2500	187.886	1000	4.210023009	0.683372	
16	2500	183.537	999.998	4.208331381	0.680552	
17	2500	180.558	1000	4.207599047	0.679332	
18	2500	180.227	1000	4.20753853	0.679231	
19	2234.35	180.001	1000	4.188032634	0.646721	
20	2499.83	180	800	4.147493076	0.579155	
21	2500	180	810.342	4.146189313	0.576982	
22	2499.99	182.225	800	4.144258633	0.573764	

همانطور که از جدول (۵-۱۶) مشاهده می شود، طبق پیشنهاد اول توسط نرم افزار اگر عامل میزان مصرف در سطح ۲۵۰۰ گرم بر تن، و زمان کف

گیری (فلوتاسیون) در 240s، (تقریباً در سطح بالا در آزمایشها) و میزان دور روتور 1000 rpm (تقریباً در سطح بالا در آزمایشها) تنظیم شود پاسخ آزمایش به صورت، 4/28 اندازه وزن مخصوص حاصله می شود.

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 جدول (5-17) نتایج آزمایشهایی که با توجه به شرایط پیشنهادی نرم افزار در آزمایشگاه به انجام رسید آورده شده است.

جدول (5-17) تکرار شرایط پیشنهادی نرم افزار در بهینه سازی فرآیند

شماره آزمایش	سیلیکات سدیم	زمان فلوتاسیون	دور روتور	وزن مخصوص
1	2500 گرم بر تن	240 ثانیه	rpm1000	4/25
2	2500 گرم بر تن	240 ثانیه	rpm1000	4/24
3	2500 گرم بر تن	240 ثانیه	rpm1000	4/25

شرایط پیشنهادی نرم افزار در آزمایشگاه به طور عملی انجام شد و به وزن مخصوص 4/25 رسیدیم که تقریباً به جواب نرم افزار نزدیک است که نشان دهنده قابل اتکا بودن مدل سازی ما بوده است.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهاد

در این تحقیق سعی شد تا قابلیت فلوتاسیون مکانیکی باریت مورد مطالعه قرار گیرد. 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.

۶-۱- نتایج

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، از روش فاکتوریل کامل بهره گرفته شد. در این سری از آزمایشات، چهار عامل درصد جامد، میزان مصرف کلکتور، زمان آماده سازی و نرمه گیری انتخاب و مقدار وزن مخصوص نیز به عنوان پاسخ آزمایشات در نظر گرفته شد. در بررسی نتایج حاصل از آزمایشها، در پاسخ (مقدار وزن مخصوص) مدل 2FI بر آزمایشها برازش شد و به ترتیب اثرات زیر، از نظر آماری در پاسخ مورد نظر (مقدار وزن مخصوص) معنی دار و با اهمیت بودند. ابتدا اثر اصلی درصد جامد پالپ بود که در بالا بردن وزن مخصوص باریت تاثیر مثبت داشت. سپس اثر اصلی میزان مصرف کلکتور بود، تاثیر آن بدین صورت بود که در سطح بالای میزان مصرف کلکتور مقدار وزن مخصوص باریت بالا رفت. بعد از آن اثر اصلی نرمه گیری بود که تاثیر مثبتی در بالا

بردن مقدار وزن مخصوص باریت داشت. عامل زمان آماده سازی نیز از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (مقدار وزن مخصوص) با اهمیت و معنی دار نبود. 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 فلوتاسیون مکانیکی باریت بدست آمد که مقدمات لازم برای مطالعات بیشتر و بهینه سازی عملیات فلوتاسیون باریت توسط روشهای پاسخ سطح را فراهم کرد. بدین ترتیب به صورت کلی، عوامل میزان مصرف کلکتور و درصد جامد پالپ 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 نگه داشته شدند. عامل نرمه گیری نیز که از اهمیت بالایی برخوردار بود باید در انجام آزمایشهای مرحله بعد اعمال شود اما عامل زمان آماده سازی چون 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 به صورت ثابت در نظر گرفته شد.

یکی از اهداف اصلی انجام تحقیق بهینه سازی شرایط عملیاتی سلول 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 فلوتاسیون مکانیکی باریت

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 میزان مصرف سیلیکات سدیم، زمان فلوتاسیون و دور روتور، انتخاب و مقدار وزن مخصوص، به عنوان پاسخ آزمایشات در نظر گرفته شد. برای آزمایشهای پاسخ مورد نظر (مقدار وزن مخصوص)، مدل **Quadratic** بر آزمایشها برازش شد. در بررسی نتایج حاصل به ترتیب اثرات زیر از نظر آماری در پاسخ آزمایشها (مقدار وزن مخصوص) معنی دار و با اهمیت بودند. در ابتدا اثر اصلی میزان مصرف سیلیکات سدیم بود که تاثیر مثبت و با اهمیتی را در مقدار وزن مخصوص باریت داشت. سپس اثر اصلی دور روتور بود که با افزایش آن مقدار وزن مخصوص افزایش یافت.

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 مقدار وزن مخصوص باریت بود. 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 (۶-۱) تنظیم شود پاسخ آزمایشها به صورت، ۴/۲۸ مقدار وزن مخصوص پیش بینی می شود.

جدول (۶-۱) بازه سطوح عوامل طبق پیشنهاد اول توسط نرم افزار

عنوان	واحد	مقدار
میزان مصرف سیلیکات سدیم	گرم بر تن	2500
دور روتور	rpm	1000
زمان فلوتاسیون	ثانیه	240

۶-۲- پی‌شنهادات

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 سلول و فلوتاسیون باریت انتخاب شد، ولی PH محیط به عنوان عامل، مورد بررسی قرار نگرفت (ثابت فرض شد). لذا توصیه می شود که عامل PH محیط، که به نظر محقق عامل مهمی نیز در فلوتاسیون مکانیکی باریت به شمار می رود در تحقیقات بعدی مورد توجه قرار گیرد.

این تحقیق فقط از نظر فنی امکان فلوتاسیون باریت درین کاشان را 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 سلولهای فلوتاسیون در مدار قرار گیرند نیز انجام شود.

فهرست منابع

- آذری، فرح، □□□□، *پایان نامه بررسی زمین شناسی اقتصادی معدن باریت*، دانشگاه آزاد (تهران جنوب) - دانشکده علوم پایه.
- شفایی، سید ضیاءالدین، *هیدرومتالورژی*، انتشارات دانشگاه شاهرود، 1377
- راستی الحسینی، سید امیر *فلوتاسیون باریت شرکت درین کاشان از باطله جیگ ماشین*، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، 1379
- نعمت اللهی، حسین، *کانه آرائی*، انتشارات دانشگاه تهران، 1371
- شرکت مشاور معدنکاو، *بررسی ژنز و کانی شناسی باریت درین کاشان*، 1376
- الهی، علی، □□□□، *پایان نامه بررسی زمین شناسی اقتصادی کاربرد باریت*، دانشگاه تهران - دانشکده فنی.
- بصیری، علی، 1357، *طراحی آماری در علوم کشاورزی*، انتشارات دانشگاه شیراز
- پرستار، محمد، *مطالعات مقدماتی امکان سنجی بازیافت باریت از مواد باطله کارخانه درین کاشان*، پروژه کارشناسی ارشد، 1373.
- جرجانی، اسماعیل، *مطالعه و بررسی سینتیک فلوتاسیون بر روی سنگ باطله معدن درین کاشان*، پایان نامه کارشناسی، 1374.
- جلالی، علی، *مطالعه و بررسی پارامترهای سینتیکی و انتخاب مواد شیمیایی (فلوتاسیون باریت مهدی آباد یزد)*، پایان نامه کارشناسی، 1377.
- خوش جو، امیر، □□□□، *کانسارهای باریت ایران*، نشریه سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- سرمد، زهرا، و اسفندیاری، مهدی، 1369 و 1371، *اصول آماری در طرح آزمایشها*، جلد 1 و 2 مرکز نشر دانشگاهی تهران
- مدنی، حسن، *تیرماه 1372 گزارش بهینه سازی وضعیت کارخانه کانه آرائی درین کاشان*،
- Anderson M.J. & Whitcomb P.J., 2000, *DOE Simplified: Practical Tools For Effective Experimentation*, Productivity Press.
- Garcia-Diaz A. & Phillips D.T., 1995, *Principles of Experimental Design and Analysis*, Chapman & Hall
- Gunduzi.M.&Grin.I.,1994 "separation of barite and fluorite from kizilcaoren(eskisehir)bastnaesite ore by flotation" progress in mineral processing technology, Demiral&Ersayin,
- Gurreli L. , Ghiani M.,1994 Pereti R. & Zucca A., "production of baryte concentrates for special uses";PROGRES IN MINERAL PROCESSING TECHNOLOGY
- IMCO SERVICES E & MJ ,july 1997
- Montgomery D., 1997, *Design and Analysis of Experiments*, 4th ed New York: John Wiley and Sons

