# شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مدار آسیاکنی شرکت روی تیران

حسینعلی میرزایی[۱]،اکبر فرزانگان[۲،*] زینب‌سادات میرزایی[۳]

**اطلاعات مقاله**

دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۱۹
پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۹

**واژگان کلیدی:**
شبیه‌سازی،
آسیای گلوله‌ای،
هیدروسیکلون،
بهینه‌سازی،
روش CCD

**چکیده**

امروزه شبیه‌سازی، ابزار بسیار مناسبی جهت بررسی فرآیندهای یک کارخانه است. در این پژوهش مدار آسیاکنی شرکت روی تیران به کمک نرم‌افزار BMCS شبیه‌سازی شد. مدار آسیاکنی این شرکت دارای دو آسیای گلوله‌ای است که آسیای گلوله‌ای اول در مدار باز و دیگری در مدار بسته با هیدروسیکلون است. سرریز هیدروسیکلون به عنوان محصول مدار آسیاکنی شناخته می‌شود. پس از بررسی اولیه‌ی مدار این شرکت مشخص شد که بالا بودن اندازه‌ی $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون یکی از مشکلات اصلی در فرآیند آسیاکنی به شمار می‌رود، زیرا در حال حاضر مقدار این پارامتر در حدود ۱۰۷ میکرون است که تا هدف تعیین شده برای آن یعنی ۷۴ میکرون اختلاف زیادی دارد. همچنین بار ورودی به مدار آسیاکنی این شرکت در بازه‌ی ۳۷۰ تا ۴۳۰ تن در روز تغییر می‌کند که از ظرفیت اسمی تعیین شده برای مدار آسیاکنی یعنی ۵۰۰ تن در روز بسیار کمتر است. پس از شبیه‌سازی مدار، به منظور بهینه‌سازی شرایط از طراحی آزمایش‌ها به روش CCD (Central Composite Design) استفاده گردید. کاهش $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون تا اندازه‌ی موردنظر، افزایش ظرفیت و کاهش درصد بار در گردش اهداف اصلی در انجام این پژوهش بودند. در نهایت مشخص شد که با استفاده از شرایط بهینه‌ی به دست آمده (نسبت به حالت فعلی مدار)، ظرفیت از ۴۲۵,۲۷ تن در روز به ۴۷۶,۷۹ تن در روز افزایش، مقدار $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون از ۱۰۷ میکرون به ۹۳ میکرون کاهش و درصد بار در گردش نیز از ۲۱۹,۷۷ به ۱۸۱,۵۹ کاهش می‌یابد.

## ۱- مقدمه

امروزه مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیندها در صنعت از مهمترین ابزار بهینه‌سازی است. این ابزار در صنایع مختلف توسعه یافته و به دلایل متفاوت از جمله هزینه پایین، دقت مناسب و سرعت بالا کاربرد فراوانی دارد. در فرآوری مواد معدنی نیز می‌توان قسمت‌های مختلف یک کارخانه را شبیه‌سازی کرد و با بررسی عوامل مختلف، عملکرد فرآیندها را بهبود بخشید. با توجه به اینکه عملیات آسیاکنی

*. پست الکترونیک نویسنده مسئول: farzanegan@ut.ac.ir
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ص. پ. ۱۱۱۵۵-۴۵۶۳
۲. دانشیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ص. پ. ۱۱۱۵۵-۴۵۶۳
۳. دانشجوی دکتری فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

بیشترین مصرف انرژی و هزینه یک کارخانه فرآوری را شامل می‌شود، بهینه‌سازی آن کمک شایانی به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری می‌کند[۱].

کارخانه فرآوری روی تیران در نزدیکی شهر تیران و در محور جاده تیران - نجف‌آباد قرار دارد. این کارخانه در سال ۱۳۳۹ با ظرفیت ۲۰۰ تن در روز توسط شرکت آمریکایی دنور طراحی شد و در سال ۱۳۵۱ آغاز به کار نمود. این ظرفیت در سال ۱۳۷۸ با اضافه کردن آسیای گلوله‌ای دیگری به مدار و اعمال تغییرات دیگر به ۵۰۰ تن در روز افزایش یافت. خوراک فعلی کارخانه از کانه‌های سولفوره‌ی سه معدن متعلق به این شرکت تامین می‌شود. این کارخانه همچنین توانایی فرآوری کانسنگ اکسیدی را دارد و حدود ۲ ماه از سال را به فرآوری آن می‌پردازد. خوراک اکسیدی مورد استفاده، از معادن خود شرکت و همچنین از معدن سرب و روی انگوران تامین می‌گردد.

کانسنگ ورودی ابتدا در مدار سنگ‌شکنی موجود در نزدیکی کارخانه‌ی فلوتاسیون، تا اندازه‌ی حدود ۱ سانتی‌متر خرد شده و وارد مدار آسیاکنی می‌شود. مدار آسیاکنی، شامل یک آسیای گلوله‌ای در مدار باز و آسیای گلوله‌ای دیگری در مدار بسته با هیدروسیکلون است. سرریز هیدروسیکلون به عنوان خوراک مرحله‌ی فلوتاسیون به تانک‌های آماده‌ساز منتقل می‌شود و در نهایت کنسانتره روی به عنوان محصول اصلی و در کنار آن کنسانتره سرب به عنوان محصول جانبی بدست می‌آید.

به طور متوسط ۳۷۰ تا ۴۳۰ تن در روز خوراک به کارخانه وارد می‌شود. عیار خوراک ورودی در حدود ۱٫۵ درصد روی و ۰٫۵ درصد سرب است. در نهایت حدود ۲۰ تن در روز روی با عیار ۵۰ درصد و در کنار آن ۵ تن در روز سرب با عیار ۶۰ درصد تولید می‌شود.

پورکریمی و همکاران [۲] به منظور شبیه‌سازی مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی ابتدا مقادیر تابع شکست و تابع انتخاب (در مقیاس آزمایشگاهی) را اندازه-گیری نمودند. در ادامه به کمک نرم‌افزار NGOTC[1] مقدار تابع انتخاب ماده معدنی در مقیاس صنعتی را مورد محاسبه قرار داده و تاثیر استفاده از گلوله با قطرهای مختلف بر روی آن را اندازه‌گیری نمودند. در این پژوهش قطر ۲۵ میلی‌متر با حداکثر مقدار تابع انتخاب، به عنوان قطر بهینه گلوله انتخاب و در نهایت به کمک نرم‌افزار BMCS[2] اقدام به شبیه‌سازی پارامترها و مقایسه نتایج حاصل از آنها شده است.

همچنین میرزایی و فرزانگان [۳] به بهینه‌سازی عملکرد هیدروسیکلون اولیه کارخانه فسفات اسفوردی با روش شبیه‌سازی و جستجوی ژنتیک پرداختند. در این پژوهش شبیه‌سازی عملکرد هیدروسیکلون اولیه مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی با استفاده از نرم افزار شبیه‌ساز BMCS تحت MATLAB انجام گرفته است. در این نرم افزار از مدل تجربی پلیت (Plitt) برای پیش‌بینی عملکرد هیدروسیکلون و از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک ( GA Toolbox) برای بهینه کردن متغیرهای ورودی به این مدل استفاده شده است. این ابزار با شبیه‌سازی مکرر و خودکار توسط نرم‌افزار BMCS به بهینه‌سازی متغیرهای ورودی می‌پردازد.

در پژوهش‌هایی که تا کنون در راستای بررسی عملکرد مدار آسیاکنی انجام شده است یا تنها به شبیه‌سازی تمام یا بخشی از مدار با نرم‌افزار BMCS و یا نرم‌افزارهای دیگر پرداخته شده و یا به کمک ابزار بهینه‌سازی کننده، پاسخ-های بهینه برای افزایش عملکرد فرآیند آسیاکنی به دست آمده است. در پژوهش‌های پیشین تاثیر پارامترهای مختلف (میزان بار ورودی، مقدار درصد جامدهای جریان‌های مختلف، مشخصات هیدروسیکلون و ...) در یک فرآیند آسیاکنی بر پاسخ‌های مورد نظر از یک مدار (افزیش تناژ ورودی، بهبود عملکرد هیدروسیکلون یا اندازه ذرات خروجی از مدار آسیاکنی، بار در گردش و ...) به صورت جدا و یا توامان بررسی نشده و تحلیل‌ها تنها به کمک بررسی پاسخ نهایی به دست آمده از نرم‌افزار بوده است. اما در پژوهش پیش رو، با استفاده از طراحی آزمایش‌ها و با توجه

[1] Numerical Grinding Optimization Tools in C

[2] BMCS-Based Modular Comminution Simulator

به نمودارهای مختلف به دست آمده از نرم‌افزار، این امکان برای پژوهشگران فراهم شده است که به آسانی به تحلیل همه‌جانبه فرآیند آسیاکنی بپردازند و با اتخاذ تصمیمات مناسب، با تغییر شرایط و بررسی موارد مختلف، عملکرد مدار آسیاکنی را بررسی و در نهایت بهینه نمایند.

در این پژوهش، ابتدا مدار آسیاکنی این شرکت به کمک نرم‌افزار BMCS شبیه‌سازی شد[۴]. شبیه‌سازی در این نرم‌افزار به کمک پارامترهای تابع انتخاب، تابع شکست، دبی، درصد جامد و توزیع اندازه‌ی بار ورودی و همچنین مشخصات هندسی هیدروسیکلون انجام می‌شود. بهینه-سازی شرایط نیز به کمک روش طراحی آزمایش CCD انجام شد. بدین منظور ۹۸ آزمایش طراحی و شبیه‌سازی گردید و مقادیر مطلوب متغیرهای ورودی تعیین شدند. در نهایت مشخص شد که اعمال شرایط بهینه به دست آمده در مدار آسیاکنی کارخانه با افزایش ظرفیت بار ورودی، کاهش اندازه محصول و همچنین کاهش درصد بار در گردش به مقدار قابل توجهی منجر به بهبود عملکرد فرآیند آسیاکنی می‌شود.

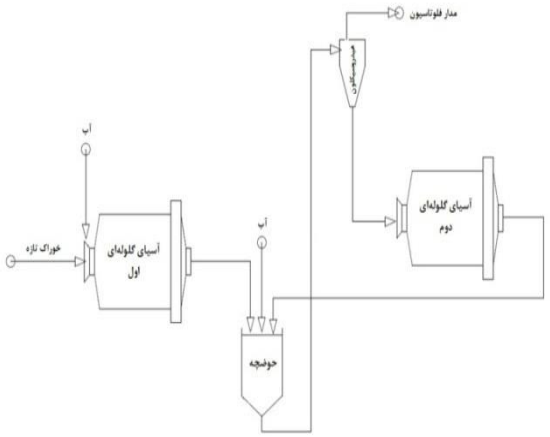
## ۲- نمونه‌برداری از مدار

مدار آسیاکنی شرکت روی تیران در شکل (۱) آورده شده است. از نظر اندازه، آسیای اول با قطر و طول به ترتیب ۲,۵۳ متر و ۳,۵ متر نسبت به آسیای دوم با قطر و طول به ترتیب ۲ متر و ۲,۷۵ متر بزرگتر است. در نتیجه آسیای اول نقش اصلی را در عملیات خردایش برعهده دارد زیرا با توجه به کوچک بودن آسیای دوم و دبی بالای بار ورودی به آن (ناشی از بار برگشتی) نمی‌توان انتظار نسبت خردایش بالا در مورد این آسیا داشت.

به منظور شبیه‌سازی فرآیند و اعتبارسنجی آن، دو سری نمونه از جریانهای بار ورودی، خروجی آسیای گلوله‌ای اول، سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون و خروجی آسیای گلوله‌ای دوم گرفته شد (امکان نمونه‌برداری از خوراک هیدروسیکلون وجود نداشت). نمونه‌ها در طی ۲ ساعت و هر ۱۰ دقیقه از جریان‌های نامبرده تهیه گردید. تناژ بار ورودی (خشک تازه) برای مرحله اول، ۱۶,۵ تن بر ساعت و برای مرحله دوم، ۱۸,۸ تن بر ساعت بود. درصد جامد نمونه‌ها و توزیع اندازه ذرات آنها نیز با ابعاد سرندی ۹۵۲۵ تا ۶۳ میکرون تعیین شدند.

به دلیل خطاهای موجود در قسمت‌های مختلف از جمله نوسانات در حین نمونه‌برداری، خطاهای موجود در نحوه نمونه‌برداری و انجام کارهای آزمایشگاهی نیاز است که داده‌های به دست آمده موازنه شوند. به منظور موازنه از نرم‌افزار NorBal3 استفاده شد. توزیع اندازه‌ی ذرات، دبی و درصد جامدهای به دست آمده داده‌های ورودی نرم‌افزار هستند[۵].

وزن مخصوص کانسنگ ۲,۷۱ و اندیس کار باند نیز ۱۱,۴ است. درصد بار در گردش برای نمونه‌برداری مرحله‌ی اول ۲۳۴,۴۴ و برای نمونه‌برداری مرحله‌ی دوم ۲۱۹,۷۷ به دست آمد.




شکل۱- مدار آسیاکنی شرکت تیران

## ۳- شبیه‌سازی مدار آسیاکنی

بعد از موازنه جرم داده‌های مربوط به نمونه‌برداری‌ها و محاسبه تابع شکست، تابع انتخاب و زمان ماند هر دو آسیا، شبیه‌سازی مدار انجام شد. به منظور شبیه‌سازی از نرم‌افزار BMCS که در زبان C نوشته شده است، استفاده گردید. این نرم‌افزار ابتدا به منظور شبیه‌سازی مدارهای آسیاهای گلوله‌ای و هیدروسیکلون توسعه یافته بود و به مرور زمان بخش‌های دیگر به آن اضافه شدند. در حال حاضر قادر است

آسیاهای میله‌ای، غلتک‌های آسیاکنی فشار بالا، جداکننده-های هوایی، سرندها، نقاط همگرایی و واگرایی جریان‌ها را شبیه‌سازی نماید[۶]. این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی هیدروسیکلون از مدل پلیت استفاده می‌کند.

### ۳-۱- مدل پلیت

یکی از بهترین مدل‌های ارائه شده برای شبیه‌سازی هیدروسیکلون، مدل پلیت است که در سال ۱۹۷۶ میلادی ارائه شد[۷ و ۸]. در این مدل به کمک فرمول‌های تجربی، ۴ پارامتر هیدروسیکلون محاسبه می‌شود. در این فرمولها به کمک ضرایب ثابت، پارامترهای مربوط به کانسنگ، مشخصات هندسی هیدروسیکلون و جریان ورودی به آن، پارامترهای $d_{50c}$، دقت جدایش (m)، فشار (P) و تقسیم جریان (S) تعیین می‌گردد. به منظور شبیه‌سازی عملکرد هیدروسیکلون، بعد از محاسبه پارامترهای ذکر شده و کالیبراسیون آنها بازیابی ذرات جامد انتقال یافته به ته‌ریز ($R_i$) یا به عبارتی توزیع ذرات ته‌ریز از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$R_i = R_f + (1 - R_f)\left[1 - e^{-0.693\left(\frac{x_i}{d_{50c}}\right)^m}\right] \qquad (۱)$$

که در این معادله $x_i$، اندازه ذره در طبقه $i$ و $R_f$ بازیابی آب به ته‌ریز است[۷].

### ۳-۲- تعیین ضرایب کالیبراسیون مدل پلیت

با توجه به اینکه پارامترهای به دست آمده از فرمولهای تجربی در نرم‌افزار شبیه‌ساز با مقادیر واقعی پارامترها متفاوت است، در نتیجه برای هر کدام از این فرمولها یک ضریب کالیبراسیون وجود دارد که با ضرب آنها در پارامترهای شبیه‌سازی شده، مقادیر واقعی پارامترها تعیین می‌گردد. به منظور تعیین این ضرایب کالیبراسیون، لازم است در قدم اول با توجه به نمونه‌گیریهای انجام شده، مقادیر واقعی پارامترها مشخص شوند. در این پژوهش به کمک داده‌های موازنه شده مدار، مقدار بازیابی آب به ته‌ریز و با رسم منحنی جدایش هیدروسیکلون، مقدار $d_{50c}$ محاسبه گردید. همچنین به کمک برازش معادله (۱) بر داده‌ها در محیط اکسل و با استفاده از روش حداقل مربعات، پارامتر m تعیین شد و مقدار تقسیم جریان نیز از فرمول (۲) به دست آمد. به دلیل متغیر بودن و عدم توانایی در اندازه‌گیری فشار هیدروسیکلون، مقداری برای این پارامتر اختصاص داده نشد.

$$S = \frac{Q_{UF}}{Q_{OF}} \qquad (۲)$$

که در آن $Q_{UF}$، دبی حجمی ته‌ریز و$Q_{OF}$ ، دبی حجمی سرریز است[۷].

در ادامه با قرار دادن ضریب کالیبراسیون ۱ برای پارامترها، مقادیر پیش‌بینی شده آنها تعیین شده و با تقسیم مقادیر اندازه‌گیری شده بر مقادیر پیش‌بینی شده، مقدار ضرایب کالیبراسیون مشخص گردید. مقادیر اندازه‌گیری شده، شبیه‌سازی شده پارامترها و ضرایب کالیبراسیون تعیین شده در جدول ۱ آورده شده است، با توجه به عدم توانایی در اندازه‌گیری مقدار واقعی فشار، ضریب کالیبراسیون برای این پارامتر ۱ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده پارامترها و ضرایب کالیبراسیون مدل پلیت

| پارامتر | اندازه‌گیری شده | شبیه‌سازی شده | مقدار ضریب کالیبراسیون |
|---|---|---|---|
| $d_{50c}$ | ۸۲/۰۰ $\mu m$ | ۳۲۸ $\mu m$ | ۰/۲۵ |
| $P$ | – | ۲۵/۱۶ $kPa$ | ۱ |
| $S$ | ۱,۷۰ | ۰/۴۵ | ۳/۸۰ |
| $m$ | ۱/۰۶ | ۰/۸۸ | ۱/۲۱ |
| $R_f$ | ۰/۴۹ | ۰/۵۱ | ۰/۹۷ |

### ۳-۳- اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده، از نمونه‌های گرفته شده در نمونه‌برداری مرحله‌ی دوم استفاده شد. این نمونه برداری مشابه با وضعیت کنونی کارخانه است و در ادامه از همین داده‌ها برای بهینه‌سازی شرایط استفاده شد. مشخصات جریان‌های مختلف در نمونه‌برداری مرحله‌ی دوم به کمک ضرایب کالیبراسیون به دست آمده از داده‌های حاصل از نمونه‌برداری مرحله‌ی اول شبیه‌سازی گردید.

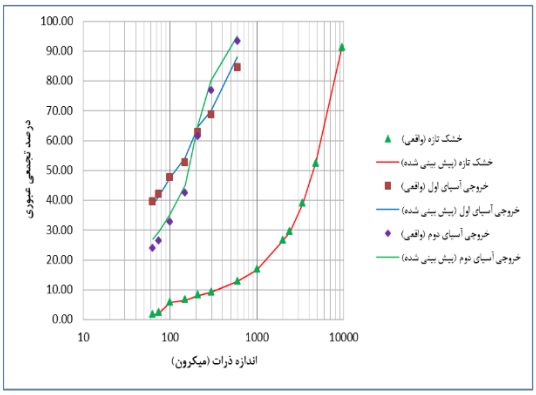
در جدول ۲ مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار

BMCS پس از کالیبراسیون برای جریان‌های مدار در نمونه‌برداری مرحله‌ی دوم آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده توسط BMCS پس از کالیبراسیون برای جریان‌ها در نمونه‌برداری مرحله‌ی دوم

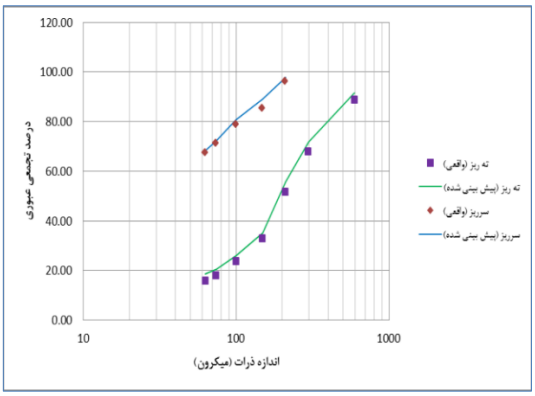
| | | جامد (t/h) | درصد جامد (%) | آب (t/h) |
|---|---|---|---|---|
| خشک تازه | واقعی | ۱۸/۴۹ | ۱۰۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| | پیش‌بینی شده | ۱۸/۴۹ | ۱۰۰/۰۰ | ۰/۰۰ |
| خروجی آسیای اول | واقعی | ۱۸/۴۹ | ۵۸/۳۳ | ۱۳/۲۱ |
| | پیش‌بینی شده | ۱۸/۴۹ | ۵۸/۳۳ | ۱۳/۲۱ |
| خوراک هیدروسیکلون | واقعی | ۸۳/۲۴ | ۶۶/۳۰ | ۴۲/۲۶ |
| | پیش‌بینی شده | ۸۲/۸۰ | ۶۸/۱۴ | ۳۸/۷۲ |
| سرریز هیدروسیکلون | واقعی | ۱۸/۴۹ | ۴۷/۴۰ | ۲۰/۵۱ |
| | پیش‌بینی شده | ۱۸/۴۹ | ۴۷/۴۰ | ۲۰/۵۱ |
| ته‌ریز هیدروسیکلون | واقعی | ۶۴/۷۵ | ۷۴/۹۰ | ۲۱/۷۵ |
| | پیش‌بینی شده | ۶۴/۳۲ | ۷۷/۹۳ | ۱۸/۲۱ |
| خروجی آسیای دوم | واقعی | ۶۴/۷۵ | ۷۴/۹۰ | ۲۱/۷۵ |
| | پیش‌بینی شده | ۶۴/۳۲ | ۷۷/۹۳ | ۱۸/۲۱ |

توزیع اندازه ذرات جریان‌ها نیز در دو حالت واقعی و شبیه‌سازی شده در شکل‌های (۲) و (۳) آورده شده است.




شکل ۲- دانه‌بندی واقعی و پیش‌بینی شده‌ی جریان‌های خروجی دو آسیا پس از کالیبراسیون

با توجه به داده‌های موجود در جدول ۲، نرم‌افزار با تقریب خوبی توانسته است مقادیر مربوط به دبی و درصد جامدها و در نتیجه مقدار آب آنها را شبیه‌سازی و پیش‌بینی نماید. همچنین همانطور که در شکل‌های (۲) و (۳) مشخص است، دانه‌بندی جریان‌ها به خوبی شبیه‌سازی شده و مدل ارائه شده از اعتبار خوبی برخوردار است.




شکل ۳- دانه‌بندی واقعی و پیش‌بینی شده‌ی جریان‌های سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون پس از کالیبراسیون

## ۴- طراحی آزمایش‌ها به روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ (RSM) یکی از روش‌های طراحی آزمایش‌ها است که به منظور تعیین شرایط بهینه فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولا بهتر است قبل از استفاده از این روش، از روش‌های دیگر طراحی آزمایش استفاده شود. به عنوان مثال با استفاده از روش فاکتوریل دو سطحی ناقص، فاکتورهای موثرتر تعیین شود و در ادامه از فاکتوریل کامل برای بررسی عمیق‌تر و تعیین منطقه هدف استفاده گردد. پاسخ‌ها در این روش به صورت خطوط همتراز و نمای سه‌بعدی به دست می‌آیند (همانند نقشه‌های توپوگرافی در زمین‌شناسی). اساس طراحی در این روش، اضافه کردن برخی نقاط مرکزی به سطوح فاکتورها است، در واقع وجود انحنا به کمک همین نقاط مرکزی تعیین می‌شود. چگونگی اضافه شدن نقاط مرکزی، روش‌های مختلف را به وجود می‌آورد[۹،۱۰].

### ۴-۱- روش طراحی مرکب مرکزی

روش طراحی مرکب مرکزی (CCD) یکی از پرکاربردترین روش‌های سطح پاسخ است. در این روش به منظور تعیین هرچه دقیق‌تر انحنا، نقاط جدیدی با عنوان نقاط محوری به سطوح پارامترها افزوده می‌شود. برای افزایش تاثیر نقاط محوری، این نقاط باید با فاصله مشخصی از نقاط اصلی قرار گرفته باشند. این فاصله به جذر تعداد فاکتورها بسیار نزدیک است[۹].

جدول ۳- فاکتورها و سطوح آنها

| فاکتور | نام فاکتور | واحد | نوع فاکتور | سطح پایین | سطح بالا | محوری پایین | محوری بالا |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | بار ورودی | t/h | کمی | ۱۶ | ۲۲ | ۱۳/۹۵ | ۲۴/۰۵ |
| B | آب ورودی به آسیای اول | t/h | کمی | ۷ | ۱۸ | ۳/۲۵ | ۲۱/۷۵ |
| C | آب ورودی به حوضچه هیدروسیکلون | t/h | کمی | ۸ | ۱۸ | ۴/۵۹ | ۲۱/۴۱ |
| D | آب ورودی به آسیای دوم | t/h | کمی | ۵ | ۱۵ | ۱/۵۹ | ۱۸/۴۱ |
| | | | | سطح ۱ | سطح ۲ | سطح ۳ | |
| E | قطر سرریز | cm | کیفی | ۵/۵ | ۶ | ۶/۵ | |
| F | قطر ته‌ریز | cm | کیفی | ۴ | ۴/۵ | | |

جدول ۴: آنالیز واریانس برای پاسخ $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون

| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | P-Value | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Model | 113.22 | 7 | 16.17 | 1588.75 | <0.0001 | Significant |
| A-Fresh Feed | 68.85 | 1 | 68.85 | 6762.82 | <0.0001 | |
| B-BM1W | 38.39 | 1 | 38.39 | 3770.97 | <0.0001 | |
| C-CYCW | 4.02 | 1 | 4.02 | 394.52 | <0.0001 | |
| E-OD | 0.093 | 2 | 0.046 | 4.56 | 0.0130 | |
| F-UD | 0.35 | 1 | 0.35 | 33.96 | <0.0001 | |
| $B^2$ | 1.49 | 1 | 1.49 | 146.83 | <0.0001 | |
| Residual | 0.92 | 90 | 0.010 | | | |
| Cor Total | 114.14 | 97 | | | | |

جدول ۵- آنالیز واریانس برای پاسخ درصد بار در گردش

| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F Value | P-Value | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Model | 0.76 | 6 | 0.13 | 12835.19 | <0.0001 | Significant |
| B-BM1W | 5.541E-003 | 1 | 5.541E-003 | 559.52 | <0.0001 | |
| C-CYCW | 1.618E-003 | 1 | 1.618E-003 | 163.38 | <0.0001 | |
| E-OD | 0.32 | 2 | 0.16 | 16128.66 | <0.0001 | |
| F-UD | 0.43 | 1 | 0.43 | 43816.58 | <0.0001 | |
| $B^2$ | 5.669E-004 | 1 | 5.669E-004 | 57.25 | <0.0001 | |
| Residual | 9.012E-004 | 91 | 9.903E-006 | | | |
| Cor Total | 0.76 | 97 | | | | |

در این پژوهش به دلیل استفاده از محیط مجازی برای انجام آزمایش‌ها و عدم محدودیت در تعداد آزمایش‌ها، روش CCD مستقیما مورد استفاده قرار گرفت. تعداد ۱۰۲ آزمایش به کمک این روش طراحی شد. از بین تمامی آزمایش‌های طراحی شده، تنها ۴ آزمایش به دلیل کمتر از صفر شدن و یا بیشتر از ۱۰۰ شدن درصد وزنی (احتمالا به دلیل افزایش بیش از حد بار در گردش) شبیه‌سازی نشد و در نتیجه از بین آزمایش‌های طراحی شده کنار گذاشته شدند و در واقع تعداد واقعی آزمایش‌های مورد استفاده ۹۸ عدد بود.

### ۴-۲- انتخاب فاکتورها و سطوح آنها

آب به عنوان پرکاربردترین سیال مورد استفاده در فرآیندهای گوناگون در یک کارخانه، نقش بسیار مهمی در عملکرد قسمت‌های مختلف دارد. به عنوان مثال هیدروسیکلون زمانی دارای کارآیی مناسب است که خوراک ورودی به آن دارای درصد جامد ۵۰-۳۰ باشد[۱۱]. در مورد آسیاهای گلوله‌ای این مقدار به ۸۰-۶۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین بیشتر فرآیندهای فلوتاسیون در درصد جامد ۴۰-۲۵ انجام می‌شوند[۱۲].

در این پژوهش، با توجه به پارامترهای ورودی به نرم‌افزار BMCS و محدودیت‌های عملیاتی موجود در کارخانه، ۶ فاکتور برای تعیین شرایط بهینه انتخاب شدند. این فاکتورها عبارتند از تناژ بار ورودی، تناژ آب ورودی به آسیای اول، تناژ آب ورودی به حوضچه هیدروسیکلون، تناژ آب ورودی به آسیای دوم، قطر سرریز و ته‌ریز هیدروسیکلون. سطوح انتخاب شده برای این فاکتورها نیز با توجه به بازه بهینه‌ی درصد جامد پالپ ورودی به تجهیزات، امکانات در دسترس و محدودیت‌های عملیاتی موجود در کارخانه انتخاب شدند. در جدول ۳ فاکتورهای انتخاب شده و سطوح آنها آورده شده است.

همانطور که در جدول ۳ مشخص است فاکتورهای تناژ بار ورودی، تناژ آب ورودی به آسیای اول، تناژ آب ورودی به حوضچه هیدروسیکلون و تناژ آب ورودی به آسیای دوم از نوع فاکتورهای کمی و دو عامل قطر ته‌ریز و سرریز هیدروسیکلون از نوع فاکتورهای کیفی هستند. مقدار آب ورودی به آسیای اول طوری در نظر گرفته شده است که درصد جامد پالپ خروجی ۷۵-۵۵ درصد شود، البته از نظر عملیاتی در حال حاضر امکان افزایش درصد جامد آسیای اول تا ۷۵ درصد به دلیل افزایش ذرات خرد نشده (به نظر می‌رسد بالا بودن درصد پرشوندگی آسیا یکی از دلایل عدم توانایی افزایش درصد جامد باشد) وجود ندارد اما به دلیل اهمیت این فاکتور و در نتیجه بررسی دقیق‌تر آن، این سطوح در نظر گرفته شد. همانطور که در شکل (۱) مشخص است در وضعیت فعلی مدار کارخانه، آبی به پالپ ورودی به آسیای دوم اضافه نمی‌شود و در این پژوهش به منظور بررسی دقیق‌تر عوامل تاثیرگذار در فرآیند، این عامل نیز در بین فاکتورهای مورد مطالعه قرار داده شد و سطوح آن طوری انتخاب گردید که درصد جامد ورودی به آسیای دوم را کاهش دهد (در حدود ۸۰-۶۵ درصد) و همچنین به همراه سطوح انتخاب شده برای آب ورودی به حوضچه هیدروسیکلون، درصد جامد سرریز هیدروسیکلون را از ۴۷ درصد به ۴۰-۲۵ درصد کاهش دهد. با توجه به انجام آزمایشها به صورت مجازی و استفاده از شبیه‌ساز برای به دست آوردن پاسخ‌ها، از یک نقطه مرکزی استفاده گردید.

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱- آنالیز واریانس و ساخت مدلها

اندازه‌ی $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون و درصد بار در گردش به عنوان دو پاسخ برای آزمایش‌های طراحی شده در نظر گرفته شدند. اندازه‌ی $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون به عنوان شاخصی برای قیمت نهایی محصول و همچنین از نظر افزایش کارآیی فلوتاسیون در محدوده اندازه‌ی خاص، از اهمیت بیشتری برخوردار است. از سوی دیگر کارآیی و استهلاک دستگاه‌های مختلف در مسیر بار در گردش باعث شد که درصد بار در گردش به عنوان پاسخ دیگری برای بهینه‌سازی در نظر گرفته شود. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازیها به نرم‌افزار dx7 (Design Expert 7) وارد

شد. جدول آنالیز واریانس در مورد پاسخ $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون در جدول ۴ و در مورد پاسخ درصد بار در گردش در جدول ۵ آورده شده است.

با توجه به مقادیر میانگین مربعات و همچنین مقادیر F موجود در جدول‌ها، مقدار بار ورودی مؤثرترین فاکتور در مورد پاسخ $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون است در حالی که این عامل در بین فاکتورهای تاثیرگذار در مورد پاسخ درصد بار در گردش قرار نگرفته و قطر ته‌ریز هیدروسیکلون مهمترین فاکتور در مورد این پاسخ است. همچنین در مورد هر دو پاسخ با توجه به جدول‌های تحلیل واریانس و نمودارها هیچ تاثیر متقابلی بین فاکتورها به عنوان پارامتر موثر در مدل انتخاب نشد. در نهایت با توجه به مقادیر بسیار پایین P موجود در جدول، مدلها در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار هستند. مدل به دست آمده برای هر دو پاسخ از نوع درجه دوم بود که در روابط (۳) و (۴) آورده شده است.

$$Sqrt(P_{80}\text{-}OF) = +9.55 + 0.92A + 0.71B - 0.22C - 0.037E[1] - 0.002E[2] + 0.060F - 0.15B2 \quad (۳)$$

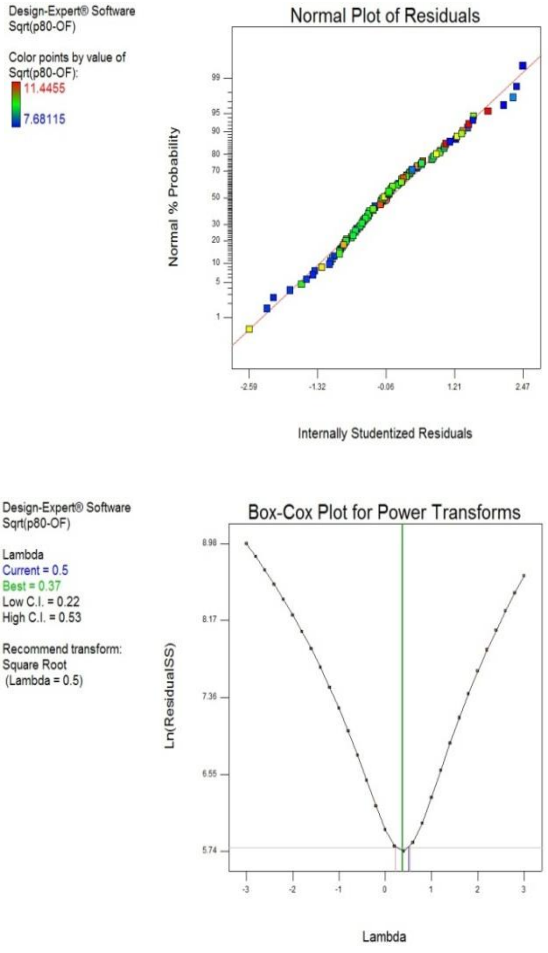
$$Log_{10}(CL) = +2.40 + 0.008B - 0.004C + 0.071E[1] - 0.002E[2] + 0.067F - 0.003B2 \quad (۴)$$

تمامی فاکتورها در دو رابطه بالا از نوع کددار هستند. با توجه به معادلات به دست آمده برای پاسخ‌ها مشخص است که برای پاسخ $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون از تغییر مقیاس جذر و برای پاسخ درصد بار در گردش از تغییر مقیاس لگاریتم استفاده شده و در مورد هر دو پاسخ هیچ تأثیر متقابلی بین فاکتورها وجود نداشته است.

### ۵-۱-۱- اعتبارسنجی مدل‌های بدست آمده

پس از بررسی مقدماتی جدول تحلیل واریانس و معنی‌دار بودن مدل‌ها برای هر دو پاسخ، در گام اول از مقادیر Adj-R Squared، Pre-R Squared و Adequate Precision به منظور اعتبارسنجی مدل‌های به دست آمده استفاده شد. دقت کافی (Adequate Precision) بیانگر نسبت سیگنال به اغتشاش است که محدوده مقادیر پیش بینی شده در نقاط طراحی را با خطای متوسط پیش‌بینی مقایسه می‌کند. مقدار بیشتر از ۴ برای این عامل بیانگر مطلوبیت مدل است.

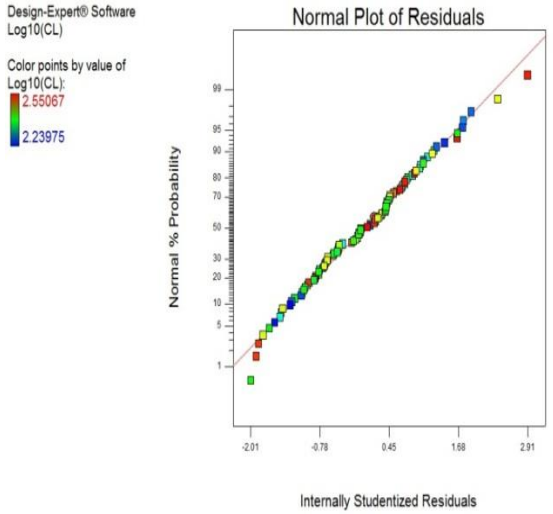
مقدار Pre-R Squared بیانگر مطلوبیت مقادیر پیش بینی شده توسط مدل است و مقدار Adj-R squared بیانگر مقدار واریانس مقادیر بدست آمده توسط مدل در اطراف میانگین، تنظیم شده برای تعدادی از شرایط در مدل می‌باشد. در ادامه بررسی اعتبارسنجی مدل انتخاب شده، باید توجه داشت که مدلی مناسب است که مقادیر Pre-R Squared و Pre-R Squared کمتر از ۰/۲ اختلاف داشته باشند.

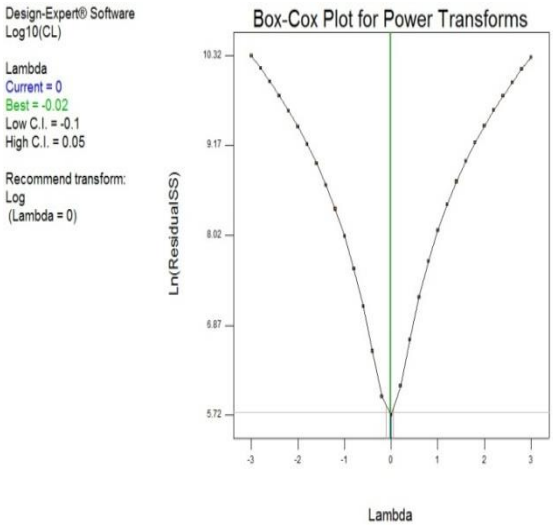



شکل ۴- نمودارهای اعتبارسنجی برای پاسخ $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون

با توجه به مقادیر موجود در جدول ۶ مدل‌های ارائه شده برای هر دو پاسخ از مطلوبیت بسیار خوبی برخوردار. مقادیر

Adequate Precision برای هر دو بیشتر از ۴ و اختلاف دو عدد Pre-R Squared و Pre-R Squared نیز در هر دو مورد کمتر از ۰/۲ است.




شکل ۵- نمودارهای اعتبارسنجی برای پاسخ درصد بار در گردش

جدول ۶- اعتبارسنجی مدل به دست آمده برای پاسخ‌ها

| | $P_{80}-OF$ | CL |
|---|---|---|
| Adequate Precision | 135.375 | 364.627 |
| Pre-R Squared | 0.9904 | 0.9986 |
| Adj-R squared | 0.9913 | 0.9987 |
| F value | 1588.75 | 12835.19 |
| P - value | <0.0001 | <0.0001 |

در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر، اعتبارسنجی مدل‌ها را با نمودار نرمال باقیمانده‌ها (Normal Plot of Residuals) و همچنین نمودار Box-Cox ادامه دادیم.

همانطور که از شکل‌های (۴) و (۵) مشخص است در مورد هر دو پاسخ، مقادیر مانده از توزیع نرمال برخوردارند، به عبارت دیگر پارامترهایی که در بین پارامترهای اصلی مدل قرار نگرفتند و به مانده‌ها منتقل شدند، به درستی انتخاب شده و پارامتری از قلم نیفتاده است. نمودارهای Box-Cox نیز در مورد هر دو پاسخ نشان‌دهنده این مطلب است که تغییر مقیاس انتخاب شده برای هر کدام از پاسخ‌ها باعث شده مقدار لامبدا (ضریب نزدیکی توزیع متغیر پاسخ به توزیع نرمال) در محدوده مشخص شده برای آن قرار گیرد و برای تحلیل بهتر داده‌ها به تغییر مقیاس دیگری نیاز نباشد. همه این اطلاعات نشان‌دهنده این است که مدل‌ها در هر دو مورد از برازش بسیار خوبی برخوردارند.

### ۵-۲- تحلیل نمودارهای مدل

بعد از انتخاب فاکتورهای تاثیرگذار بر مدل و اعتبارسنجی مدل‌های به دست آمده، با رسم نمودارهای مدل، تاثیر فاکتورهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

نمودارهای به دست آمده از نرم‌افزار در شکل (۶) آورده شده است.

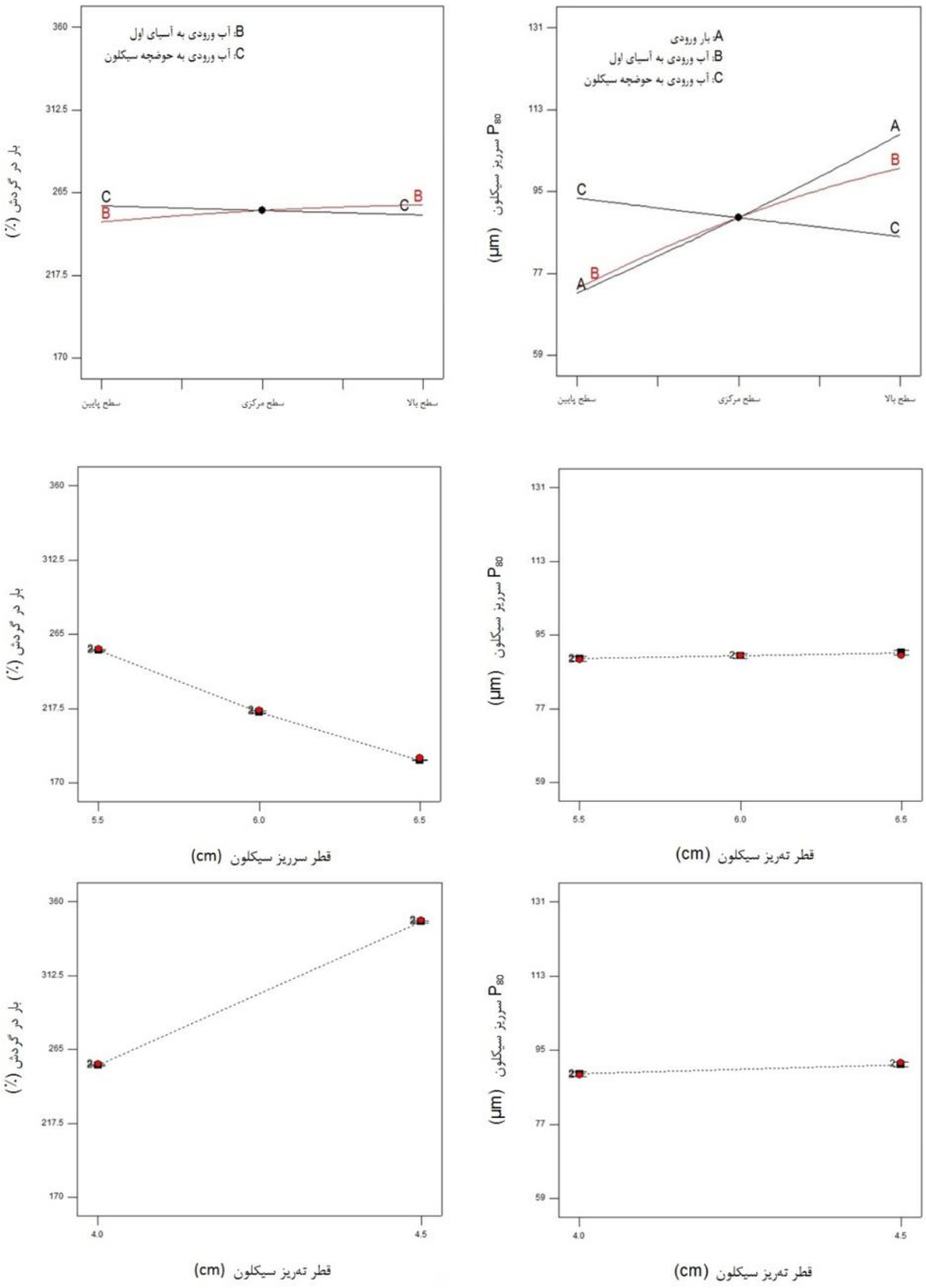
همانطور که در نمودارها مشخص است، بار ورودی تاثیر زیادی بر روی $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون دارد به طوری که با افزایش این فاکتور از ۱۶ تن بر ساعت تا ۲۲ تن بر ساعت، مقدار $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون از ۷۲/۶۳ به ۱۰۷/۵۷ افزایش می‌یابد، به عبارتی می‌توان گفت با افزایش میزان بار ورودی، زمان ماند ذرات داخل آسیای اول کاهش می‌یابد و در نتیجه $d_{80}$ خروجی آسیا افزایش و از طرفی درصد جامد ورودی به هیدروسیکلون افزایش می‌یابد و به همین دلیل $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون افزایش می‌یابد. همچنین این تغییر در میزان بار ورودی باعث افزایش جزئی در میزان بار در گردش نیز می‌گردد ولی با توجه میانگین مربعات پایین آن، در بین فاکتورهای تاثیرگذار در مورد پاسخ بار در گردش انتخاب نشد. در مورد فاکتور آب ورودی به آسیای اول می‌توان گفت که با افزایش میزان آب ورودی، مشابه حالت قبل، زمان ماند ذرات داخل آسیا اول کاهش یافته و

در نتیجه ذرات خروجی آسیا درشت‌تر می‌شوند. در نتیجه بار در گردش افزایش خواهد یافت و همچنین $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون افزایش می‌یابد. البته در حال حاضر به دلیل افزایش ذرات خرد نشده، نمی‌توان درصد جامد پالپ ورودی به آسیا را تا ۷۵ درصد افزایش داد (میزان درصد پرشوندگی آسیا در حدود ۴۵ درصد است و این می‌تواند یکی از عوامل محدودکننده باشد)، ولی به منظور بررسی دقیق و جامع بازه وسیع‌تری برای این پارامتر در نظر گرفته شد. افزایش میزان آب ورودی به حوضچه هیدروسیکلون نیز با کاهش درصد جامد ذرات ورودی به هیدروسیکلون باعث بهبود فرآیند طبقه بندی شده و در نتیجه $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون و بار در گردش کاهش می‌یابد. همانطور که قبلا گفته شد در حال حاضر آب ورودی به آسیای دوم وجود ندارد و در این پژوهش سعی شد اضافه شدن آن امکان‌سنجی شود. همانطور که در قسمت قبل مشخص شد این فاکتور در بین فاکتورهای تاثیرگذار در مورد پاسخ $P_{80}$ قرار نگرفت و در مورد درصد بار در گردش نیز با توجه به شیب کم نمودار آن باعث کاهش مختصری در بار در گردش می‌شود. در مورد فاکتورهای قطر تەریز و سرریز هیدروسیکلون نیز می‌توان گفت افزایش هر دوی آنها تاثیر بسیار کمی در $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون دارد ولی در مورد بار در گردش از عوامل بسیار تاثیرگذار هستند. به طوری که افزایش قطر سرریز هیدروسیکلون باعث کاهش شدید بار در گردش و افزایش قطر تەریز نیز موجب افزایش زیادی در درصد بار در گردش می‌گردد.

### ۵-۳- تعیین نقطه‌ی بهینه

در قسمت قبل، فاکتورهای تاثیرگذار در مورد هر دو پاسخ مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به اینکه اهداف اصلی در این پروژه افزایش ظرفیت و کاهش $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون تا ۷۴ میکرون است این پاسخ‌ها دارای درجه‌ی اهمیت بیشتری نسبت به پاسخ درصد بار در گردش بودند، هرچند کاهش بار در گردش نیز به دلیل کاهش استهلاک تجهیزات مسیر خود، افزایش بهره‌وری فرآیند طبقه‌بندی و همچنین افزایش نسبت خردایش آسیای دوم مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مطالب گفته شده، مقدار بیشینه برای فاکتور تناژ بار ورودی به منظور افزایش ظرفیت، مقدار ۷۴ میکرون به عنوان نقطه هدف در بهینه‌سازی پاسخ $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون و حالت کمینه نیز نقطه‌ی بهینه در مورد پاسخ بار در گردش در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه از نظر عملیاتی در حال حاضر مقدار درصد جامد پالپ ورودی به آسیای اول را تنها می توان تا ۶۵ درصد افزایش داد در نتیجه بازه‌ی ۱۸ تا ۱۱ تن بر ساعت برای فاکتور آب ورودی به آسیای اول انتخاب شد. فاکتورهای دیگر در بازه‌های اصلی خود در نظر گرفته شدند و بهینه‌سازی انجام گردید. نتایج بهینه‌سازی در جدول ۷ آورده شده است.

همانطور که از مقادیر موجود در جدول مشخص است مقدار ۲۰/۷۳ تن بر ساعت یا ۴۷۶/۷۹ تن در روز برای بار ورودی به دست آمده است که نسبت به حالت قبلی افزایش قابل توجهی دارد. مقدار $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون نیز از ۱۰۷ میکرون به ۹۳ میکرون کاهش و درصد بار در گردش نیز از ۲۱۹/۷۷ به ۱۸۱/۵۹ کاهش یافته است که همه نتایج به دست آمده، ضرورت اعمال شرایط بهینه‌ی به دست آمده را نشان می‌دهد. به منظور بررسی دقیق‌تر، بار دیگر مدار با این شرایط شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نرم‌افزار dx7 با توجه به آزمایش‌های طراحی شده به خوبی توانسته پاسخ بهینه را برای این شرایط تخمین بزند، به طوری که در شبیه‌سازی مدار در شرایط بهینه، مقادیر $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون و درصد بار در گردش به ترتیب ۹۰ میکرون و ۱۸۱/۸۶ به دست می-آید. همچنین مقدار درصد جامد سرریز هیدروسیکلون ۳۷/۸۴ به دست آمده که در بازه بهینه برای عملیات فلوتاسیون است و در نهایت می‌توان گفت که اعمال شرایط بهینه در واقعیت می‌تواند عملکرد کلی مدار را بسیار بهبود ببخشد.




شکل ۶- بررسی تاثیر فاکتورهای مدل در مورد هر دو پاسخ

جدول ۷- شرایط بهینه و پاسخ‌های به دست آمده

| بار ورودی (t/h) | آب ورودی به آسیای اول (t/h) | آب ورودی به حوضچه هیدروسیکلون (t/h) | آب ورودی به آسیای دوم (t/h) | قطر سرریز (cm) | قطر ته‌ریز (cm) | $P_{80}$ (µm) | بار در گردش (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۰/۷۳ | ۱۱/۰۰ | ۱۸/۰۰ | ۵/۰۵ | ۶/۵۰ | ۴/۰۰ | ۹۲/۷۳ | ۱۸۱/۵۹ |

## ۶- نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از مدلسازی و شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف در یک کارخانه به عنوان یکی از روش‌های بسیار کارآمد در بررسی عوامل تاثیرگذار در افزایش بهره‌وری یک مجموعه شناخته می‌شود. در این پژوهش مدار آسیاکنی شرکت تیران شامل دو آسیای گلوله‌ای و یک هیدروسیکلون به کمک نرم‌افزار BMCS شبیه‌سازی شد. بعد از اعتبارسنجی مدل به دست آمده برای مدار، به منظور بهینه‌سازی شرایط از یکی از روشهای طراحی آزمایش به نام طراحی مرکب مرکزی (CCD) استفاده گردید. به عبارتی محیط شبیه‌سازی به عنوان یک آزمایشگاه مجازی در نظر گرفته شد. پارامترهای دبی بار ورودی، دبی آب‌های قبل آسیای اول و دوم، دبی آب ورودی به حوضچه هیدروسیکلون، قطر سرریز و ته‌ریز به عنوان متغیرهای ورودی و مقدار $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون و درصد بار در گردش به عنوان پاسخ در نظر گرفته شدند. اهداف اصلی در این پژوهش افزایش ظرفیت، کاهش اندازه $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون تا اندازه‌ی ۷۴ میکرون و همچنین کاهش درصد بار در گردش بودند و تعداد ۹۸ آزمایش طراحی و به کمک نرم‌افزار BMCS شبیه‌سازی شد. با توجه به نتایج به دست آمده، دو مدل درجه دوم برای هر دو پاسخ به دست آمد. در ادامه به کمک جدول تحلیل واریانس و نمودارهای به دست آمده از مدل، فاکتور مقدار بار ورودی و قطر ته‌ریز هیدروسیکلون به ترتیب به عنوان موثرترین عامل در پاسخ-های $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون و درصد بار در گردش شناخته شدند. بعد از انتخاب فاکتورهای تاثیرگذار و بررسی دقیق نمودارهای مدل، با توجه به اهداف کلی پروژه، عملیات بهینه‌سازی انجام شد. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان داد که با انتخاب شرایط به دست آمده (نسبت به حالت فعلی مدار)، ظرفیت از ۴۲۵/۲۷ به ۴۷۶/۷۹ تن در روز افزایش، مقدار $P_{80}$ سرریز هیدروسیکلون از ۱۰۷ به ۹۳ میکرون کاهش و درصد بار در گردش نیز از ۲۱۹/۷۷ به ۱۸۱/۵۹ کاهش می‌یابد. همچنین با انجام یک مرحله شبیه‌سازی در شرایط به دست آمده از طراحی آزمایشها، نتایج به خوبی تایید شد و همچنین مشخص گردید که انتخاب این شرایط برای مدار کارخانه، مقدار درصد جامد سرریز هیدروسیکلون و در واقع خوراک مرحله فلوتاسیون را از ۴۷/۴۰ به ۳۷/۸۴ کاهش خواهد داد که بهره‌وری عملیات فلوتاسیون را افزایش می‌دهد.

## ۷- قدردانی و تشکر

از مدیر عامل، مهندسین و کارکنان محترم شرکت تیران که در انجام این پژوهش همکاری نمودند، قدردانی و تشکر به عمل می‌آید.

## ۷- مراجع

[1] Napier-Munn, T.J., Morrell, S., Morrison, R. D., Kojovic, T. (1999). “Mineral comminution circuits, their operation and optimization”. Julius Kruttschnitt Mineral Research Center (JKMRCK), The University of Queensland.

[۲] پورکریمی، ض.، دهقانی احمدآبادی، ع.، نوع‌پرست، م.، شفایی، س.ض.، سلطانی، م. (۱۳۸۸)، "شبیه‌سازی مدار خردایش کارخانه فسفات اسفوردی توسط نرم‌افزار BMCS". نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۳، شماره ۱۳۸.

[۳] میرزایی، ز.س.، فرزانگان، ا. (۱۳۹۰)، " بهینه‌سازی عملکرد هیدروسیکلون اولیه کارخانه فسفات اسفوردی با روش شبیه‌سازی و جستجوی ژنتیک ". نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، پیش شماره دوم، دانشگاه یزد.

[4] Farzanegan, A. (1998). “Knowledge-Based optimization of mineral grinding circuits”. Ph.D Thesis, McGill University, Canada.

[5] Spring, R. (1992). “NorBal3 software for material balance reconciliation”. Noranda Technology Center.

[۶] فرزانگان، ا. (۱۳۸۹)، راهنمای کاربری نرم‌افزار BMCS (نسخه چهارم). شرکت مهندسین فرآیند کاوان پارس.

[7] Plitt, L.R. (1976). “A Mathematical Model of the Hydrocyclone Classifier”. CIM Bulleting, Vol. 69, No. 776, pp. 114-123.

[8] King, R. P. (2001). “Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems”. Department of Metallurgical Engineering, University of Utha, USA, pp. 121-124.

[9] Montgomery, D. C. (2001). “Design and analysis of experiments”. John Wiley & Sons, New York.

[10] Anderson, M. J., Whitcomb, P. J. (2000). “DOE Simplified: Practical Tools for Effective Experimentation”. USA.

[11] Gupta, A., Yan, D. S. (2006). “Mineral Processing Design and Operations: An Introduction”. Elsevier Science.

[12] Wills, B. A., Napier-Munn, T. J. (2007). “Wills’ Mineral Processing Technology”. Seventh Edition, Elsevier, England.