





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی

بررسی و بهینه‌سازی راندمان انحلال بوکسیت‌های مختلف خوراک
کارخانه آلومینای جاجرم

نگارنده: محمدرضا خانی

استاد راهنما
دکتر محمد کارآموزیان

خرداد ۱۳۹۸

تقدیم به

روح پاک پدرم که چشمانش همیشه نگران درس و آینده من بود

و به مادرم، دریای بی کران فداکاری بود و زحمات بی شمارش فراموش نشدنی است

و به همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است و مشکلات مسیر را برایم

هموار نمود

و به دختران گلم که وجودشان به من آرامش و دلگرمی می داد

تقدیر و تشکر

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمون‌مان شد و به هم‌نشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزی‌مان ساخت. خداوند مهربان را شاکرم که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان‌نامه را به پایان برسانم. از استاد فرزانه جناب آقای دکتر کارآموزیان که به‌عنوان استاد راهنما در مراحل مختلف این پایان‌نامه همواره با سعه‌صدر و گشاده‌رویی در کنار من بودند و در طول مدت تحصیل از راهنمایی‌های اخلاقی و علمی ایشان بهره‌جسته‌ام تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از ریاست محترم دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود جناب استاد دکتر عطایی و مدیر محترم گروه استخراج جناب دکتر سرشکی به خاطر زحماتشان کمال تشکر را دارم.

از داوران گرامی جناب دکتر عزیزی و دکتر بهرامیان که زحمت داوری و تصحیح این پایان‌نامه را به عهده داشتند کمال سپاس را دارم.

از همکاران عزیز و گرامی، بخش تحقیق و توسعه شرکت آلومینای ایران آقای مهندس جانفدا مدیر محترم تحقیق و توسعه و کارشناسان آقایان مهندس سلطانی، نجاری و یآوری و بخش کنترل کیفیت و آزمایشگاه آقایان مهندس یکتانیا، صدقی و اسحاقی که با زحماتشان در دوران پژوهش یاریم نمودند، کمال تشکر را دارم.

همچنین از جناب آقای مهندس بصیری فرد از جهاد دانشگاهی تربیت مدرس که کمک زیادی در این پژوهش نمودند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

در پایان از تمام کسانی که در انجام این پژوهش مرا یاری نموده و از هیچ عملی دریغ ننموده‌اند، ولی در اینجا نامی از آن‌ها برده نشده‌است، ضمن عرض پوزش فراوان صمیمانه تقدیر و تشکر می‌نمایم و توفیق روزافزون را برایشان خواستارم.

تعهد نامه

اینجانب محمدرضا خانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فرآوری مواد معدنی دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه: بررسی و بهینه‌سازی راندمان انحلال بوکسیت‌های مختلف خوراک کارخانه آلومینای جاجرم تحت راهنمایی دکتر محمد کارآموزیان متعهد می‌شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده

در این تحقیق بهینه‌سازی راندمان انحلال بوکسیت خوراک کارخانه آلومینای جاجرم، A/S و (Al_2O_3/SiO_2) و N/S (Na_2O/SiO_2) گل قرمز بررسی شده است. بوکسیت خوراک، مخلوطی از بوکسیت‌های جاجرم (۳۵٪)، بوکسیت تاش (۵۰٪)، بوکسیت یزد (۱۰٪) و بوکسیت شیرین‌چشمه (۵٪) است. برای دستیابی به شرایط بهینه فرآیند، پارامترهای مؤثر بر انحلال مانند غلظت Na_2O محلول، دما، مقدار آهک مصرفی و زمان ماند بررسی شد. قبل از انجام آزمایش‌های انحلال روی بوکسیت اختلاط، شرایط انحلال هر کدام از بوکسیت‌ها مطابق با شرایط فعلی فرآیند به صورت جداگانه مطالعه شد. نتایج نشان داد که مقدار آهک بهینه برای بوکسیت‌های جاجرم، تاش، یزد و شیرین‌چشمه به ترتیب ۱۰، ۶، ۶ و ۱۲ درصد، همچنین دمای لازم برای انحلال بوکسیت یزد برابر ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد است که نسبت به سایر بوکسیت‌ها ۵ درجه سانتی‌گراد بیش‌تر می‌باشد. روش سطح پاسخ با ۴ فاکتور و ۳ سطح برای انجام آزمایش‌ها و بهینه کردن فاکتورهای مؤثر بر انحلال به کار برده شد. برای پیش‌بینی پاسخ‌های راندمان انحلال، A/S و N/S دو مدل درجه ۲ و یک مدل خطی به دست آمد. نتایج نشان داد که مقادیر بهینه غلظت Na_2O محلول، دما، مقدار آهک اضافه‌شده و زمان به ترتیب ۱۸۰ گرم‌برلیتر، ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد، ۷/۷۳٪ و ۵۰ دقیقه است که تحت این شرایط راندمان انحلال، A/S و N/S به ترتیب به ۷۲/۰۵٪، ۱/۱۶۹ و ۰/۲۷ رسید. آزمایش اعتبارسنجی نشان داد که مقادیر راندمان انحلال، A/S و N/S به ترتیب برابر ۷۲/۴۵٪، ۰/۱۶۲ و ۰/۲۸ بوده که در مقایسه با شرایط فعلی عملیاتی، راندمان انحلال بیش از ۲٪ افزایش و مقادیر A/S و N/S به ترتیب ۰/۰۹ و ۰/۰۲ کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: بوکسیت، فرآیند بایر، راندمان انحلال، بهینه‌سازی، مدل‌سازی، روش سطح پاسخ

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱	فصل ۱
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- ذخایر و ظرفیت تولید بوکسیت در جهان و ایران
۴	۳-۱- فرآیند تولید آلومینا
۸	۴-۱- پارامترهای مؤثر بر راندمان انحلال
۸	۱-۴-۱- غلظت Na_2O محلول
۸	۲-۴-۱- دمای انحلال
۹	۳-۴-۱- مقدار آهک
۹	۴-۴-۱- زمان انحلال
۱۰	۵-۱- شرکت آلومینای ایران
۱۰	۱-۵-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه
۱۱	۲-۵-۱- معادن شرکت آلومینای ایران
۱۴	۳-۵-۱- مجتمع آلومینای جاجرم
۱۸	۶-۱- ضرورت و اهداف انجام تحقیق
۱۹	۷-۱- روش تحقیق
۱۹	۸-۱- ساختار پایان نامه
۲۱	فصل ۲
۲۲	۱-۲- مروری بر منابع
۳۱	۲-۲- جمع بندی
۳۳	فصل ۳
۳۴	۱-۳- مقدمه
۳۴	۲-۳- مواد و تجهیزات
۳۴	۱-۲-۳- مواد اولیه
۳۴	۲-۲-۳- مواد شیمیایی
۳۵	۳-۲-۳- تجهیزات و وسایل آزمایشگاهی
۳۶	۳-۳- آماده سازی نمونه ها و تهیه نمونه همگن
۳۶	۴-۳- شناسایی ترکیب شیمیایی
۳۹	۵-۳- شناسایی کانی شناسی نمونه ها
۴۴	۶-۳- مطالعات آزمایشگاهی
۴۴	۱-۶-۳- محاسبات وزن مواد
۴۵	۲-۶-۳- نحوه انجام آزمایش

۴۶	..... ۳-۶-۳- آزمایش‌های انحلال
۵۰	..... ۳-۶-۴- آزمایش‌های انحلال بر روی بوکسیت اختلاط
۵۵	..... فصل ۴
۵۶	..... ۴-۱- مقدمه
۵۶	..... ۴-۲- بررسی انحلال بوکسیت‌های جاجرم، تاش، یزد و شیرین چشمه
۵۶	..... ۴-۲-۱- بوکسیت جاجرم
۵۹	..... ۴-۲-۲- بوکسیت تاش
۶۱	..... ۴-۲-۳- بوکسیت یزد
۶۴	..... ۴-۲-۴- بوکسیت شیرین چشمه
۶۶	..... ۴-۳- بوکسیت اختلاط
۶۸	..... ۴-۳-۱- تجزیه و تحلیل داده‌های بوکسیت اختلاط
۶۸	..... ۴-۳-۲- برازش مدل
۷۲	..... ۴-۳-۳- بررسی کفایت مدل
۷۳	..... ۴-۳-۴- بررسی تأثیر فاکتورها بر انحلال
۷۸	..... ۴-۳-۵- بررسی تأثیر اندرکنش فاکتورها بر پاسخ‌ها
۸۹	..... ۴-۳-۶- تعیین شرایط بهینه و اعتبارسنجی مدل
۹۰	..... ۴-۳-۷- دستاورد اقتصادی پروژه:
۹۱	..... فصل ۵
۹۲	..... ۵-۱- نتیجه‌گیری:
۹۳	..... ۵-۲- پیشنهادها
۹۹	..... پیوست‌ها
۱۰۰	..... پیوست ۱: مشخصات شیمیایی بوکسیت‌های جاجرم، تاش، یزد و شیرین چشمه و بوکسیت اختلاط
۱۰۱	..... پیوست ۲: مشخصات شیمیایی گل بوکسیت‌های جاجرم، تاش، یزد و شیرین چشمه با شرایط مختلف
۱۰۲	..... پیوست ۳: مشخصات شیمیایی گل آزمایش‌های انحلال بوکسیت اختلاط
۱۰۳	..... پیوست ۴: آزمایش انحلال بوکسیت خوراک کارخانه (اختلاط) در شرایط فعلی کارخانه
۱۰۴	..... پیوست ۵: آزمایش انحلال بوکسیت خوراک کارخانه (اختلاط) در شرایط حداکثر راندمان انحلال
۱۰۵	..... پیوست ۶: آزمایش انحلال بوکسیت خوراک کارخانه (اختلاط) بر اساس مدل بهینه پیشنهادی

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱: مشخصات معادن مختلف بوکسیت شرکت آلومینای ایران.....	۱۳
جدول ۱-۳: تجهیزات آزمایشگاهی موردنیاز در این پروژه.....	۳۵
جدول ۲-۳: وسایل آزمایشگاهی موردنیاز در این پروژه.....	۳۵
جدول ۳-۳: مشخصات شیمیایی بوکسیت‌های جاجرم، تاش، یزد و شیرین چشمه.....	۳۷
جدول ۴-۳: نسبت اختلاط بوکسیت‌ها در ترکیب بوکسیت خوراک.....	۳۷
جدول ۵-۳: مشخصات شیمیایی بوکسیت اختلاط.....	۳۸
جدول ۶-۳: مشخصات شیمیایی نمونه آهک.....	۳۸
جدول ۷-۳: مشخصات محلول‌های قبل از انحلال با غلظت‌های مختلف.....	۳۸
جدول ۸-۳: مشخصات کمی کانی‌شناسی بوکسیت جاجرم.....	۴۰
جدول ۹-۳: مشخصات کمی کانی‌شناسی بوکسیت جاجرم.....	۴۱
جدول ۱۰-۳: مشخصات کمی کانی‌شناسی بوکسیت یزد.....	۴۲
جدول ۱۱-۳: مشخصات کمی کانی‌شناسی بوکسیت شیرین چشمه.....	۴۳
جدول ۱۲-۳: مقادیر عملیاتی پارامترهای مؤثر بر راندمان انحلال.....	۴۷
جدول ۱۳-۳: شرایط انحلال بوکسیت جاجرم.....	۴۸
جدول ۱۴-۳: شرایط و نتایج انحلال بوکسیت تاش.....	۴۸
جدول ۱۵-۳: شرایط انحلال بوکسیت یزد.....	۴۹
جدول ۱۶-۳: شرایط و نتایج انحلال بوکسیت شیرین چشمه.....	۵۰
جدول ۱۷-۳: سطوح فاکتورهای تأثیرگذار بر راندمان انحلال بوکسیت.....	۵۲
جدول ۱۸-۳: ماتریس CCD و مقادیر واقعی به‌دست‌آمده پاسخ‌ها با سطوح مختلف عامل‌ها.....	۵۳
جدول ۱-۴: نتایج راندمان، A/S و N/S بوکسیت جاجرم در شرایط آهک متفاوت.....	۵۶
جدول ۲-۴: نتایج گل قرمز و محلول بعد از انحلال.....	۵۷
جدول ۳-۴: نتایج آزمایش‌های انحلال بوکسیت تاش.....	۵۹
جدول ۴-۴: نتایج گل قرمز و محلول بعد از انحلال.....	۵۹
جدول ۵-۴: شرایط و نتایج انحلال بوکسیت یزد.....	۶۱
جدول ۶-۴: نتایج گل قرمز و محلول بعد از انحلال.....	۶۲
جدول ۷-۴: نتایج آزمایش‌های انحلال بوکسیت شیرین چشمه.....	۶۴
جدول ۸-۴: نتایج گل قرمز و محلول بعد از انحلال.....	۶۴
جدول ۹-۴: شرایط آزمایش‌ها و آنالیز محلول بعد از انحلال.....	۶۷
جدول ۱۰-۴: نتایج محلول بعد از انحلال در شرایط مدل بهینه پیشنهادی.....	۶۸
جدول ۱۱-۴: محدوده C.I نمودار BOX COX.....	۶۹

- جدول ۴-۱۲: آنالیز واریانس مدل توان دوم سطح پاسخ برای پیشبینی راندمان انحلال ۷۰
- جدول ۴-۱۳: آنالیز واریانس مدل توان دوم سطح پاسخ برای پیشبینی مقدار A/S ۷۱
- جدول ۴-۱۴: آنالیز واریانس مدل خطی سطح پاسخ برای پیشبینی مقدار N/S ۷۲

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۴	شکل ۱-۱: توزیع منابع بوکسیت در جهان
۴	شکل ۲-۱: ظرفیت تولید بوکسیت در جهان
۶	شکل ۳-۱: فرآیند تولید آلومینا از بوکسیت به روش بایر
۱۱	شکل ۴-۱: موقعیت جغرافیایی شهرستان جاجرم
۱۳	شکل ۵-۱: موقعیت معادن بوکسیت شرکت آلومینای ایران
۱۴	شکل ۶-۱: نمایی از فرآیند تولید آلومینا در مجتمع جاجرم
۴۰	شکل ۱-۳: مشخصات کیفی کانی‌شناسی بوکسیت جاجرم
۴۱	شکل ۲-۳: مشخصات کیفی کانی‌شناسی بوکسیت تاش
۴۲	شکل ۳-۳: مشخصات کیفی کانی‌شناسی بوکسیت یزد
۴۳	شکل ۴-۳: مشخصات کیفی کانی‌شناسی بوکسیت تاش
۴۶	شکل ۵-۳: تصویر دستگاه اتوکلاو واحد تحقیق توسعه-شرکت آلومینای ایران
۵۷	نمودار ۱-۴: تأثیر مقدار آهک بر راندمان انحلال با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی
۵۸	نمودار ۲-۴: تأثیر مقدار آهک بر مقادیر A/S و N/S با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی
۶۰	نمودار ۳-۴: تأثیر مقدار آهک بر راندمان انحلال با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی
۶۰	نمودار ۴-۴: تأثیر مقدار آهک بر مقادیر A/S و N/S با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی
۶۲	نمودار ۵-۴: تأثیر مقدار آهک بر راندمان انحلال با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی
۶۳	نمودار ۶-۴: تأثیر مقدار آهک بر مقادیر A/S و N/S با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی
۶۵	نمودار ۷-۴: تأثیر مقدار آهک بر راندمان انحلال با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی
۶۵	نمودار ۸-۴: تأثیر مقدار آهک بر مقادیر A/S و N/S با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی
۷۳	شکل ۹-۴: نمودار مقدار پیش‌بینی شده و مقدار واقعی راندمان انحلال
۷۴	شکل ۱۰-۴: تأثیر غلظت بر الف (A/S) ب (N/S) ج) راندمان انحلال در دما، مقدار آهک و زمان ثابت
۷۵	شکل ۱۱-۴: تأثیر دما بر الف (A/S) ب (N/S) ج) راندمان انحلال در غلظت Na_2O ، مقدار آهک و زمان ثابت
۷۶	شکل ۱۲-۴: تأثیر مقدار آهک بر الف (A/S) ب (N/S) ج) راندمان انحلال در دما، غلظت Na_2O و زمان ثابت
۷۷	شکل ۱۳-۴: تأثیر زمان بر (a) A/S (b) N/S (c) راندمان انحلال در دما، غلظت Na_2O و مقدار آهک ثابت
۷۸	شکل ۱۴-۴: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای غلظت Na_2O محلول -دما
۷۹	شکل ۱۵-۴: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای مقدار درصد آهک-زمان
۷۹	شکل ۱۶-۴: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای مقدار دما-زمان
۸۰	شکل ۱۷-۴: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای غلظت Na_2O محلول -زمان
۸۰	شکل ۱۸-۴: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای مقدار درصد آهک-دما

- شکل ۴-۱۹: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای مقدار آهک - غلظت Na_2O محلول. ۸۱
- شکل ۴-۲۰: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای دما-مقدار آهک. ۸۲
- شکل ۴-۲۱: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای زمان-مقدار آهک. ۸۲
- شکل ۴-۲۲: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای غلظت Na_2O محلول-مقدار آهک. ۸۳
- شکل ۴-۲۳: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای غلظت Na_2O محلول-زمان. ۸۳
- شکل ۴-۲۴: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای غلظت Na_2O محلول-دما. ۸۴
- شکل ۴-۲۵: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای غلظت Na_2O محلول-دما. ۸۴
- شکل ۴-۲۶: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای مقدار آهک-دما. ۸۵
- شکل ۴-۲۷: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای مقدار آهک- غلظت Na_2O محلول. ۸۶
- شکل ۴-۲۸: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای مقدار آهک-زمان. ۸۶
- شکل ۴-۲۹: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای مقدار دما-زمان. ۸۷
- شکل ۴-۳۰: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای مقدار دما-غلظت Na_2O محلول. ۸۷
- شکل ۴-۳۱: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی بر اساس فاکتورهای مقدار زمان-غلظت Na_2O محلول. ۸۸
- شکل ۴-۳۲: نمودار اثر متقابل فاکتورها بر A/S. ۸۸
-

فصل ۱

مقدمه

نام بوکسیت از اسم روستایی در جنوب فرانسه به نام له بو (به فرانسوی Les Baux) اقتباس شده است که اولین بار بشر در آنجا متوجه وجود آلومینیوم در این سنگ معدن شده است. بوکسیت معمولاً شامل یکی از کانی‌های گیبسیت، بوهمیت و دیاسپور هست اگرچه در بعضی از مواقع شامل هر سه کانی می‌باشد. رنگ بوکسیت بسته به مقدار آهن موجود از کرم تا قهوه‌ای تیره تغییر می‌کند [۱].

بوکسیت عمده‌ترین منبع تولید آلومینیوم است. به طوری که بیش از ۹۸ درصد تولید اکسید آلومینیوم در جهان از بوکسیت و بقیه از نفلین سینیت و آلونیت به دست می‌آید.

بوکسیت یکی از کانسارهایی است که به روش غنی‌شدگی طی فرآیندهای هوازگی به وجود آمده است. بوکسیت در آب‌وهوای گرمسیری بارانی همراه با لاتریت تشکیل می‌شود. وقتی سنگ منشأ غنی از آلومینیوم در معرض هوازگی شدید و طولانی قرار بگیرد بیش‌تر عناصر اصلی آن نظیر کلسیم، سدیم و سیلیس در نتیجه شستشو از محیط خارج می‌شود و بر میزان آلومینیوم آن افزوده می‌شود و با گذشت زمان، سنگ غنی از آلومینیوم به نام بوکسیت حاصل می‌شود. بوکسیت متشکل از کانی‌های دیاسپور، بوهمیت، گیبسیت و کانی‌های آهن، تیتان و سیلیس است. ترکیب کانی‌شناسی بوکسیت تا حدودی متغیر بوده و تابع سنگ مادر اولیه آن است [۳].

کانسارهای بوکسیت در دوران مختلف زمین‌شناسی تشکیل شده است. در ایران نیز بوکسیت در دوران پرمین، تریاس و کرتاسه کشف شده است. کانسارهای بوکسیت بسته به نوع سنگ‌بستر آن‌ها به انواع کارستی و لاتریتی تقسیم‌بندی می‌شوند و کانسارهای ایران از نوع کارستی هستند. این گروه (بوکسیت کارستی) سطوح آهک و دولومیت‌هایی را می‌پوشاند که به طور فوق‌العاده نامنظمی کارستی شده است [۳].

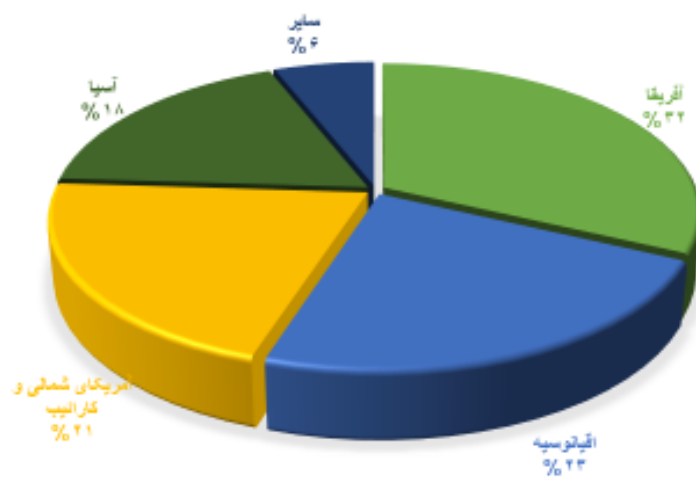
آلومینیوم یکی از اجزاء مهم تشکیل‌دهنده پوسته جامد زمین است و بعد از اکسیژن و سیلیس فراوان‌ترین عنصر است و با توجه به پتانسیل غنی چه از نظر توزیع کمی آن در قشر جامد زمین (حدود ۰.۸٪) و چه به لحاظ امکان کاربرد وسیع آن در زندگی بشر در بین فلزات از اهمیت ویژه‌ای

برخوردار است و امروزه تولید آن با رقمی بیش از ۳۰ میلیون تن در سال بعد از فولاد بالاترین رقم را به خود اختصاص داده است [۴]. مشخصاتی چون وزن کم، مقاومت مکانیکی زیاد، مقاومت در برابر اکسیداسیون و هدایت الکتریکی خوب باعث شده که این فلز موارد استفاده زیادی در صنعت پیدا کند که مهم‌ترین آن در صنایع راه و ساختمان، حمل‌ونقل، برق، بسته‌بندی وسایل خانگی و شیمیایی و هواپیماسازی است. به همین دلیل تولید آن هر ساله نسبت به سال‌های قبل افزایش چشمگیری داشته است. اکسید آلومینیوم یا آلومینا ماده اصلی تولید آلومینیوم است. آلومینیوم از الکترولیز پودر آلومینا به دست می‌آید که برای تولید هر تن آلومینیوم به حدود ۲ تن آلومینا نیاز است [۵].

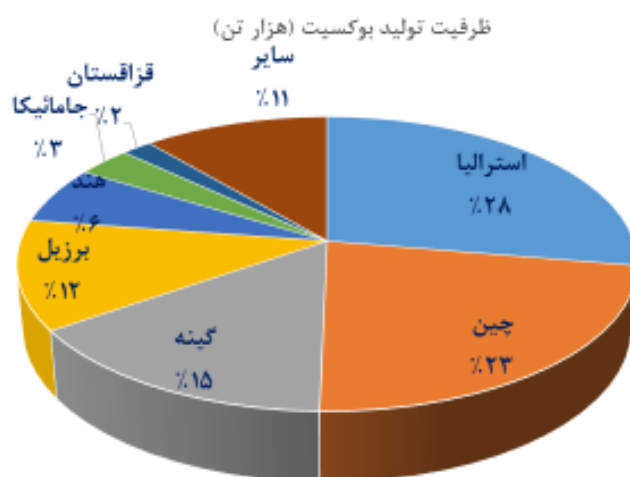
۲-۱- ذخایر و ظرفیت تولید بوکسیت در جهان و ایران

بوکسیت در مناطق مختلفی از دنیا یافت می‌شود اما مقدار آن در پانزده کشور مختلف شامل آمریکا، گینه، استرالیا، ویتنام، هند، جامائیکا، برزیل، غنا، چین، یونان، سورینام، سریلانکا، قزاقستان، ونزوئلا، روسیه قابل توجه‌تر است. توزیع منابع بوکسیت جهان در سال ۲۰۱۷ در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. بزرگ‌ترین تولیدکنندگان بوکسیت در جهان در سال ۲۰۱۷ عبارت‌اند از استرالیا، چین و گینه (شکل ۱-۲).

در ایران ذخایر متعددی از بوکسیت با مشخصات مختلف و متغیر وجود دارد که به‌طور تقریبی بیش‌تر آن‌ها از نوع کانسار کارستی است. این ذخایر از نوع مدیترانه‌ای با ترکیب کانی‌شناسی دیاسپور - بوهمیت است که در مناطق ایران مرکزی، البرز و زاگرس جای گرفته‌اند.



شکل ۱-۱: توزیع منابع بوکسیت در جهان



شکل ۲-۱: ظرفیت تولید بوکسیت در جهان

۳-۱- فرآیند تولید آلومینا

برای فرآوری بوکسیت و تولید آلومینا از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که می‌توان به روش ۲

عمده و رایج زیر اشاره کرد:

الف) فرآیند بایر^۱

ب) فرآیند تفجوشی (سینترینگ)^۲

^۱ Bayer process

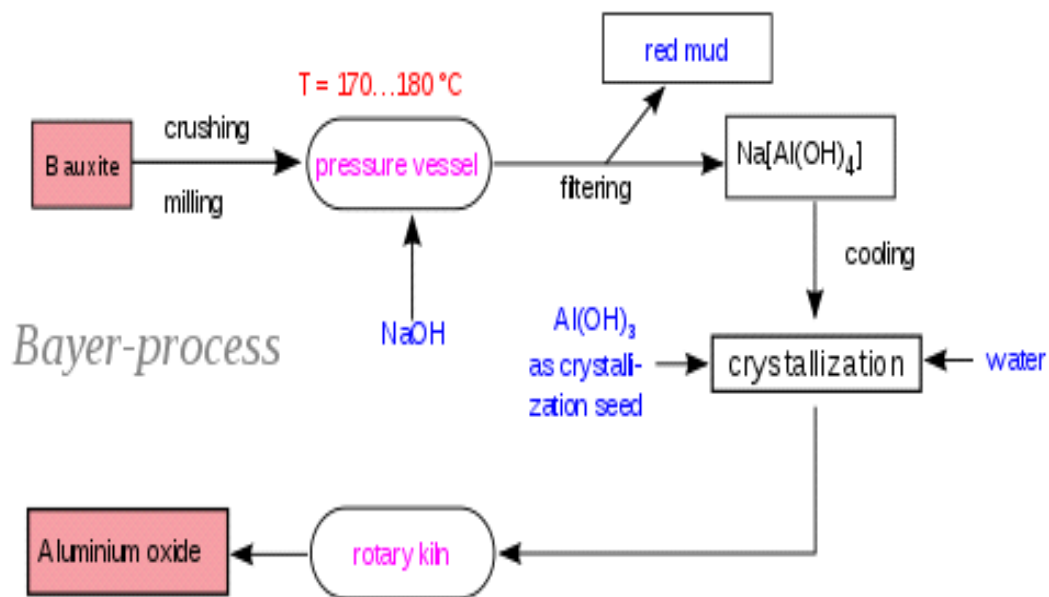
^۲ Sintering

امروزه فرآیند بایر اصلی‌ترین و اقتصادی‌ترین روش صنعتی تولید آلومینا از بوکسیت مخصوصاً بوکسیت‌های پرعیار است [۵]. استفاده از بوکسیت‌های کم‌عیار در فرآیند بایر به‌خاطر بالا بودن سیلیس فعال غیراقتصادی هستند زیرا تلفات سود آن‌ها در گل قرمز بالا، و راندمان انحلال Al_2O_3 پایین است [۵]. بوکسیت‌های کم‌عیار در صورت نیاز، با انجام عملیات پیش‌فرآوری ساده و ارزان به‌منظور حذف یا کاهش کانی‌های آلوموسیلیکاته، در فرآیند بایر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵، ۶]. مطالعات پری‌عیارسازی روی بوکسیت‌های کم‌عیار و شیلی جاجرم با استفاده از روش واسطه سنگین^۱ در مقیاس نیمه‌صنعتی [۷] و روش گرمایشیمی [۸] در مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. یکی از مزایای استفاده از بوکسیت پری‌عیار شده در فرآیند بایر، پایین بودن تلفات سود است، زیرا سیلیس فعال بوکسیت به حداقل رسیده است. معمولاً جهت تولید آلومینا از بوکسیت‌های کم‌عیار از روش‌های پیرومتالورژی یا سینترینگ استفاده می‌شود [۹]. دو روش دیگر مخصوص تولید آلومینا از بوکسیت‌های کم‌عیار و یا سایر مواد معدنی آلومینیوم‌دار هستند. فرآیند تولید آلومینای کارخانه جاجرم بر اساس فرآیند بایر است. تئوری‌های اصلی بایر که امروزه فرآیند اصلی تولید آلومینا از بوکسیت است اولین بار توسط بایر اتریشی در سال‌های ۱۸۸۷ و ۱۸۹۲ میلادی به ثبت رسید. اولین تحقیق در مورد تجزیه محلول آلومینات سدیم در حضور جوانه‌های بلور هیدروکسید آلومینیوم بوده است. کار دوم تحقیقاتی این موضوع را ثابت می‌کند که آلومینای موجود در بوکسیت در سود سوزآور حل می‌شود و آلومینات سدیم تشکیل می‌شود. در شکل ۱-۳ روند نمای فرآیند بایر نشان داده شده است.

بوکسیت شامل ۳۰ تا ۵۵ درصد آلومینا و مابقی شامل سیلیس، اکسیدهای آهن و تیتانیم دی‌اکسید است. در فرآیند بایر آلومینای موجود در بوکسیت توسط محلول هیدروکسید سدیم داغ توسط راکتور فشار بالا حل می‌شود. این عمل بر اساس معادله شیمیایی مطابق رابطه (۱-۱) آلومینا را به آلومینیوم هیدروکسید تبدیل می‌کند که در هیدروکسید سدیم محلول است:



^۱ HMS



شکل ۱-۳: فرآیند تولید آلومینا از بوکسیت به روش بایر

دیگر ترکیبات بوکسیت مانند سیلیس، آهن، تیتان، کلسیم و منیزیم در این محلول حل نمی‌شود. در نتیجه می‌توان آن‌ها را جدا کرد. در مرحله بعد محلول، سرد شده تا آلومینیوم هیدروکسید به صورت پودری نرم رسوب کند. سپس آلومینیوم هیدروکسید تا دمای ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌بیند و آب مولکولی خود را از دست می‌دهد تا براساس معادله شیمیایی زیر (رابطه ۱-۲) آلومینا یا اکسید آلومینیوم با خلوص حدود ۹۹٪ تولید می‌شود.



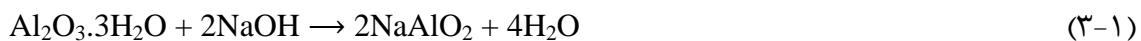
آلومینای تولیدی در فرآیندی به نام فرآیند هال به فلز آلومینیوم تبدیل می‌شود.

انحلال اکسید آلومینیوم موجود در بوکسیت، یکی از مهم‌ترین مراحل تولید آلومینا در فرآیند بایر است و نقش اساسی در میزان تولید و هزینه‌های عملیاتی دارد، بنابراین این فرآیند نیازمند راندمان انحلال بالا است [۱۰]. با توجه به تنوع بوکسیت‌های خوراک کارخانه آلومینای جاجرم و ماهیت کانی‌شناسی متفاوت آن‌ها، شرایط انحلال برای همه یکسان نبوده و بایستی مطالعه و بررسی شود. شناسایی پارامترهای مؤثر در فرآیند انحلال و مطالعه و بررسی آن‌ها در میزان راندمان و تعیین نقاط بهینه هرکدام از این پارامترها برای بوکسیت‌های خوراک کارخانه آلومینای جاجرم جهت دستیابی به

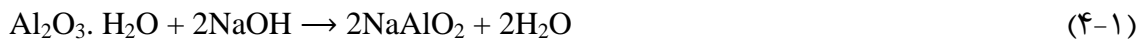
حداکثر راندمان انحلال با حداقل تلفات از اهداف اصلی این تحقیق است تا در نهایت مصارف ویژه سود سوزآور و بوکسیت کاهش یابد.

شرایط انحلال بستگی به نوع کانی بوکسیت نیز دارد. کانی‌های اصلی بوکسیت شامل گیبسیت، بوهمیت و دیاسپور می‌باشند. به‌طور کلی انحلال بوکسیت‌های گیبسیتی در دمای یعنی ۹۵-۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، بوکسیت‌های بوهمیتی در دمای بین ۲۰۵-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و بوکسیت‌های دیاسپوری در دمای ۲۵۰ - ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود، همچنین سایر شرایط انحلال از قبیل زمان‌ماند، میزان مصرف آهک نیز متفاوت است.

واکنش انحلال بوکسیت‌های گیبسیتی مطابق با واکنش (۳-۱) است:



انحلال بوکسیت‌های بوهمیتی (واکنش ۴-۱):



انحلال بوکسیت‌های دیاسپوری (واکنش ۵-۱):



بوکسیت جاجرم و اکثر بوکسیت‌های ایران دیاسپوری و مقدار کمی هم بوهمیتی می‌باشند و خوراک مجتمع آلومینای جاجرم نیز از معادن جاجرم و بوکسیت‌های سایر منابع نظیر تاش (شاهرود)، گانو (دامغان)، یزد و شیرین‌چشمه (شاهرود) تأمین می‌شود. آماده‌سازی خوراک با اختلاط ۳ الی ۴ بوکسیت با نسبت‌های مختلف طوری انجام می‌شود که ترکیب نهایی از نظر عیار و مدول مطابق خوراک استاندارد کارخانه باشد. ملاک ارزیابی کیفیت بوکسیت در کارخانه‌های تولید آلومینا مدول است.

مدول مطابق با رابطه (۶-۱) عبارت است از نسبت آلومینای بوکسیت به سیلیس.

$$\text{مدول} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \quad (۶-۱)$$

۴-۱- پارامترهای مؤثر بر راندمان انحلال

پارامترهای مختلفی از قبیل دما، زمان، غلظت Na_2O محلول و مقدار آهک بر راندمان انحلال بوکسیت تأثیرگذار هستند که در ادامه به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود.

۴-۱-۱- غلظت Na_2O محلول

با افزایش غلظت Na_2O محلول، سینتیک انحلال افزایش یافته و مصرف انرژی نیز کم‌تر می‌شود [۱۱]. همچنین افزایش غلظت تأثیر بسزایی در بالا بردن راندمان تولید، کاهش هزینه‌های انرژی و عملیاتی دارد [۱۲]. هرچه غلظت NaOH بیش‌تر باشد سرعت انحلال بیش‌تر است [۱]. اما قلیایی بودن بیش‌ازحد محلول نیز دارای مشکلاتی از قبیل افزایش خوردگی تجهیزات، افزایش بار ورودی به ابتدای خط و در نتیجه افزایش مقدار گل ورودی به ته‌نشین‌ساز (تیکنر)^۱ها و کاهش سرعت ته‌نشینی گل و مصرف آب شستشوی گل می‌باشد. بهترین درجه قلیایی بودن محلول‌های در گردش در هر مورد مشخص، جداگانه معین می‌شود. غلظت Na_2O محلول برای فرآیند انحلال در آلومینای جاجرم حدود ۱۷۰ گرم بر لیتر است.

۴-۱-۲- دمای انحلال

حرارت مهم‌ترین عامل تسریع واکنش بین اکسید آلومینیوم و سود (NaOH) است. با افزایش دما، گر انرژی محلول‌های آلومینات سدیم کم و سرعت حل شدن Al_2O_3 زیاد می‌شود، در نتیجه سرعت واکنش افزایش یافته و زمان انحلال کاهش می‌یابد [۱۱ و ۱۲]. دمای انحلال بوکسیت‌های دیاسپوری بین ۲۵۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد است. در حال حاضر دمای انحلال در کارخانه آلومینای جاجرم ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد است و در این دما بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده، نتایج قابل قبولی به دست آمده است. مسلماً با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد راندمان انحلال بهتر خواهد بود، اما با توجه به شرایط موجود در کارخانه، امکان افزایش دما تا این مقدار در کارخانه مقدور نیست.

^۱ Thickenner

۱-۴-۳- مقدار آهک

اثر مقدار مناسب آهک در فرآوری بوکسیت‌های دیاسپوری خیلی مهم است. با تغییر در مقدار آهک افزوده می‌توان راندمان انحلال را بهبود و میزان N/S گل یا تلفات سود را تعدیل نمود [۱۳]. زیرا با تشکیل هیدروآلومینوسیلیکات کلسیم بجای هیدروآلومینوسیلیکات سدیم تشکیل شده از قبل، باعث بازیابی مقداری از سود سوزآور می‌شود. در فرآیند بایر تیتان موجود در سنگ‌های دیاسپوری در دمای حدود ۱۸۰ درج سانتی‌گراد با سود غشایی تشکیل می‌دهد که مانع حل شدن آلومینا می‌شود و با افزودن آهک، غشاء تیتانات سدیم به تیتانات کلسیم رسوب تبدیل شده و جدا می‌شود و آلومینای آزاد شده در سود حل می‌شود و باعث انحلال کامل دیاسپور می‌شود [۱۴]. در حال حاضر مقدار آهک مصرفی در شرایط فعلی کارخانه جاجرم حدود ۹ درصد است که می‌توان با تغییر آن در رنج ۶ تا ۱۰ درصد در انحلال بوکسیت‌های اختلاط به نتیجه مطلوب دست‌یافت.

۱-۴-۴- زمان انحلال

زمان نیز یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر میزان انحلال اکسید آلومینیوم است زیرا افزایش زمان ماند باعث کامل شدن واکنش شده در نتیجه میزان انحلال Al_2O_3 در محلول هیدروکسید سدیم بیش‌تر می‌شود [۱۲]. در انحلال بوکسیت‌های دیاسپوری در دمای بالا راندمان انحلال با افزایش زمان تا مقدار مشخصی بالا خواهد رفت و از آن زمان بیش‌تر نیز راندمان تقریباً ثابت و افزایش زمان تأثیر بر انحلال چندانی ندارد. در شرایط فعلی کارخانه جاجرم زمان انحلال تقریباً ۴۵ دقیقه است. به نظر می‌رسد بیش‌ترین مقدار انحلال تا زمان ۳۰ دقیقه اول صورت می‌گیرد و با انجام آزمایش‌های انحلال بر روی بوکسیت‌های مصرفی کارخانه و بررسی زمان‌های مختلف از ۳۰ تا ۶۰ دقیقه می‌توان زمان بهینه انحلال را تعیین کرد. در این پروژه وضعیت انحلال آلومینا در فرآیند کارخانه جاجرم مطالعه و بررسی شد و پس از بررسی آنالیزهای شیمیایی و کانی‌شناسی بوکسیت‌های خوراک آزمون‌های آزمایشگاهی با شرایط مختلف دما، زمان، میزان آهک و غلظت محلول انجام و در نهایت بهترین شرایط انحلال تعیین شد.

۱-۵- شرکت آلومینای ایران

شرکت آلومینای ایران تنها تولیدکننده آلومینا در کشور است. در حال حاضر برای تأمین بوکسیت کارخانه آلومینای جاجرم بیش تر از ذخایر بوکسیت معادن جاجرم، تاش، یزد و شیرین چشمه استفاده می‌شود. ظرفیت اسمی کارخانه، تولید ۲۸۰ هزار تن آلومینا در سال بوده ولی در شرایط فعلی مقدار تولید ۲۴۰ هزار تن در سال است که نیاز به ۸۰۰ هزار تن بوکسیت دارد. طرح افزایش ظرفیت به ۲۸۰ هزار تن در سال در دست بررسی است که در صورت تحقق مقدار بوکسیت مورد نیاز به ۱ میلیون تن در سال خواهد رسید.

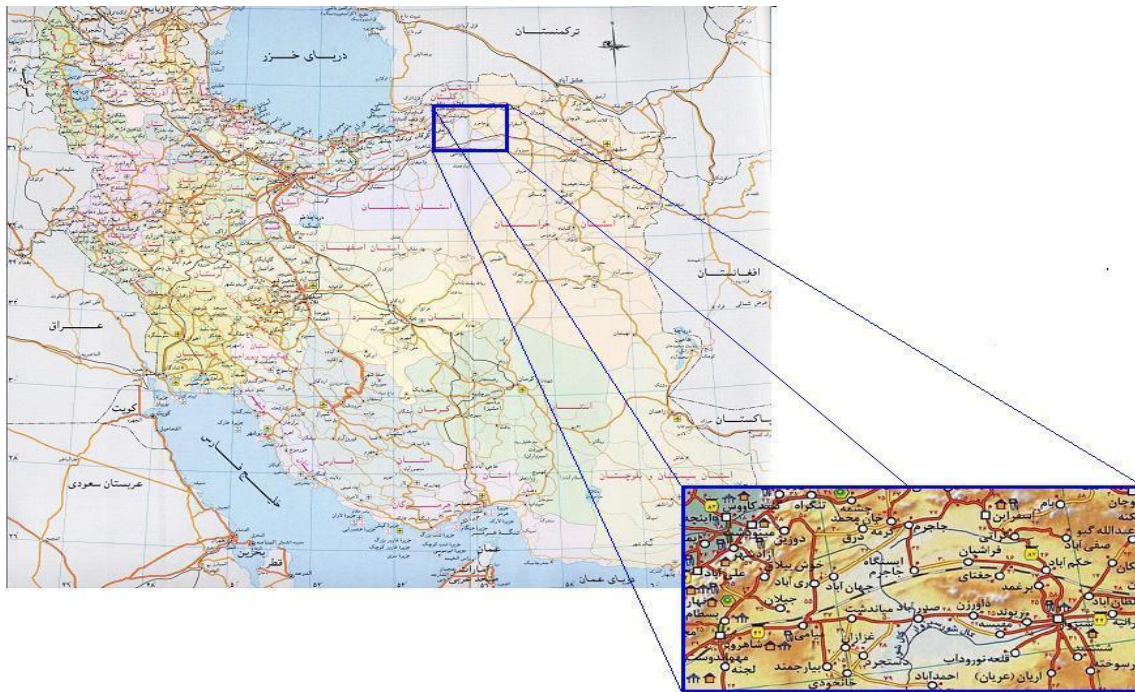
۱-۵-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه

مجتمع آلومینای جاجرم در استان خراسان شمالی و در ۷ کیلومتری شمال شرق شهرستان جاجرم و معادن بوکسیت نیز در فاصله ۱۰ کیلومتری شمال کارخانه قرار دارند. جاجرم، یکی از شهرستان‌های جنوب غربی استان خراسان شمالی است. این شهر در ۳۶ درجه و ۵۷ دقیقه عرض جغرافیایی و ۵۶ درجه و ۲۳ دقیقه طول جغرافیایی واقع شده است و ارتفاع آن از سطح دریا ۹۲۰ متر است. شهرستان جاجرم با حدود ۷۶۵۰ کیلومترمربع وسعت از شمال به شهرستان بجنورد، از شمال غربی به استان گلستان و از جنوب و غرب به شهرستان شاهرود در استان سمنان و از شرق به شهرستان اسفراین و از جنوب غربی به شهرستان سبزوار محدود می‌شود. این شهرستان در واقع محل تلاقی سه استان خراسان، سمنان و گلستان است. شهرستان جاجرم از طریق جاده آسفالتی به شهرستان بجنورد، در فاصله ۱۷۵ کیلومتری شمال شرق متصل می‌شود. راه آهن تهران-مشهد از ۳۵ کیلومتری جنوب جاجرم و از دشت جویین عبور می‌کند و کارخانه تولید آلومینا از طریق یک خط آهن فرعی به این راه آهن متصل می‌شود (شکل ۱-۴).

جمعیت شهرستان جاجرم حدود ۴۰ هزار نفر است. آب و هوای دشت جاجرم کویری بوده به طوری که در زمستان هوای منطقه سرد و خشک و در تابستان گرم است. حداقل دمای هوا ۶/۵- و حداکثر آن ۳۶/۵ درجه سانتی‌گراد است. میزان بارندگی سالیانه منطقه ۱۷۹/۷ میلی‌متر بوده و میزان رطوبت

نسبی منطقه حداکثر ۸۴ و حداقل ۴ در صد است. جهت وزش بادهای منطقه عمدتاً از سمت غرب، شمال غرب و شمال شرق است.

منطقه معدنی به صورت رشته کوهی است با امتداد شرقی-غربی در شمال کویر جاجرم که ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۱۰۰۰ متر است. به طور کلی چینه شناسی و خصوصیات فیزیکی سازندهای موجود در منطقه و همچنین تنش های ساختاری وارده، نقش اساسی در تعیین وضعیت زمین ناسی منطقه به عهده داشته که از بارزترین ساختارهای حاصل از آن می توان طاقدیس زو، با ارتفاع ۱۸۰۰ متر از سطح دریا را ذکر کرد.



شکل ۱-۴: موقعیت جغرافیایی شهرستان جاجرم

۱-۵-۲- معادن شرکت آلومینای ایران

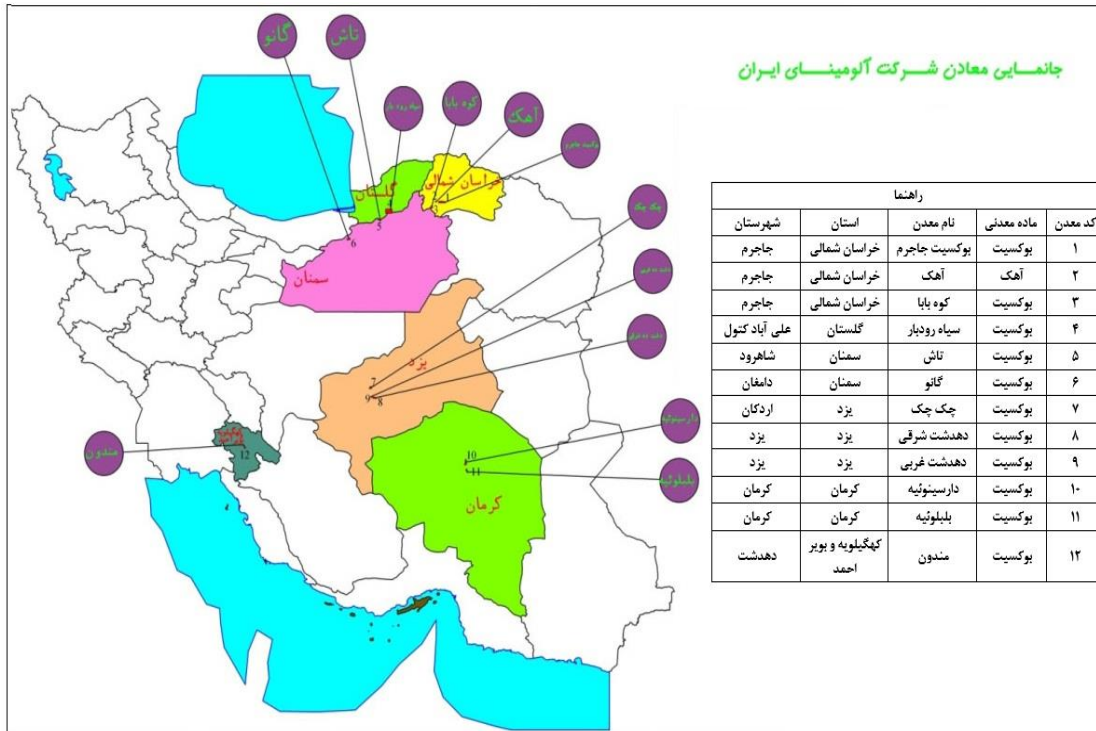
مطابق شکل ۱-۵ معادن بوکسیت شرکت آلومینای ایران در سراسر کشور پراکنده شده اند که عمده ترین ذخیره بوکسیت شرکت آلومینای ایران مربوط به معادن بوکسیت جاجرم است. شرکت آلومینای ایران در شهرستان جاجرم دارای ۱۹ معدن روباز اصلی است. گسترش طولی معدن که از غرب به شرق به نام های، گل بینی یک تا هشت، زو یک تا چهار، تاگوئی یک تا شش و سنگ تراش

نام‌گذاری شده است، حدود ۱۶ کیلومتر است. گسترش طولی معادن گل بینی ۴/۷ کیلومتر، معادن زو ۳/۳ کیلومتر، تاگوئی حدود ۵ کیلومتر و سنگ‌تراش حدود ۳ کیلومتر است.

مشخصات زون بوکسیتی جاجرم در گزارش تهیه‌شده توسط بخش معدن طرح تولید آلومینا در سال ۱۳۷۵ با عنوان "بررسی وضعیت کنسار جاجرم از نظر شیمیایی، کانی‌شناسی و معدنی" آمده است که بر اساس این گزارش، بوکسیت جاجرم در رده بوکسیت‌های لایه‌ای-عدسی قرار دارد. گسترش بوکسیت عموماً به‌صورت لایه‌ای است. ماده معدنی بر روی سطح کارستی دولومیت‌های سازند الیکا و در زیر شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌های سازند شمشک قرار گرفته است. لایه بوکسیتی دارای ضخامت و کیفیت یکسانی نیست و به‌طور کلی ضخامت بوکسیت بین کمتر از یک متر تا حدود ۴۰ متر و بیشتر متغیر است. لایه‌های تشکیل‌دهنده این واحد از بالا به پایین به شرح زیر مشخص شده است:

- بوکسیت کائولنی بالایی به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای
 - بوکسیت سخت به رنگ قهوه‌ای، قهوه‌ای روشن، خاکستری، سبز زیتونی
 - بوکسیت نرم یا شیلی به رنگ قهوه‌ای متمایل به قرمز
 - بوکسیت کائولنی زیرین رنگ خاکستری تا قهوه‌ای روشن
- بوکسیت جاجرم دارای بافتی دانه‌ریز، پیزولیتیک و اوولیتیک است. سطح شکستگی بوکسیت تقریباً صاف و لمس آن زبر تا صابونی است. به دلیل وجود دیاسپور در بوکسیت جاجرم و سختی بالای دیاسپور (بین ۶ تا ۷ موس) بوکسیت جاجرم از انواع بوکسیت سخت است. رنگ بوکسیت قهوه‌ای تیره تا کرم روشن است. رنگ سبز در بوکسیت‌های جاجرم زمانی مشاهده می‌شود که کانی شاموزیت در سنگ فراوان باشد.

به استناد از بخش اکتشاف معادن شرکت آلومینای ایران، مشخصات معدن فعال بوکسیت متعلق به شرکت آلومینای ایران در جدول (۱-۱) نشان داده شده است.



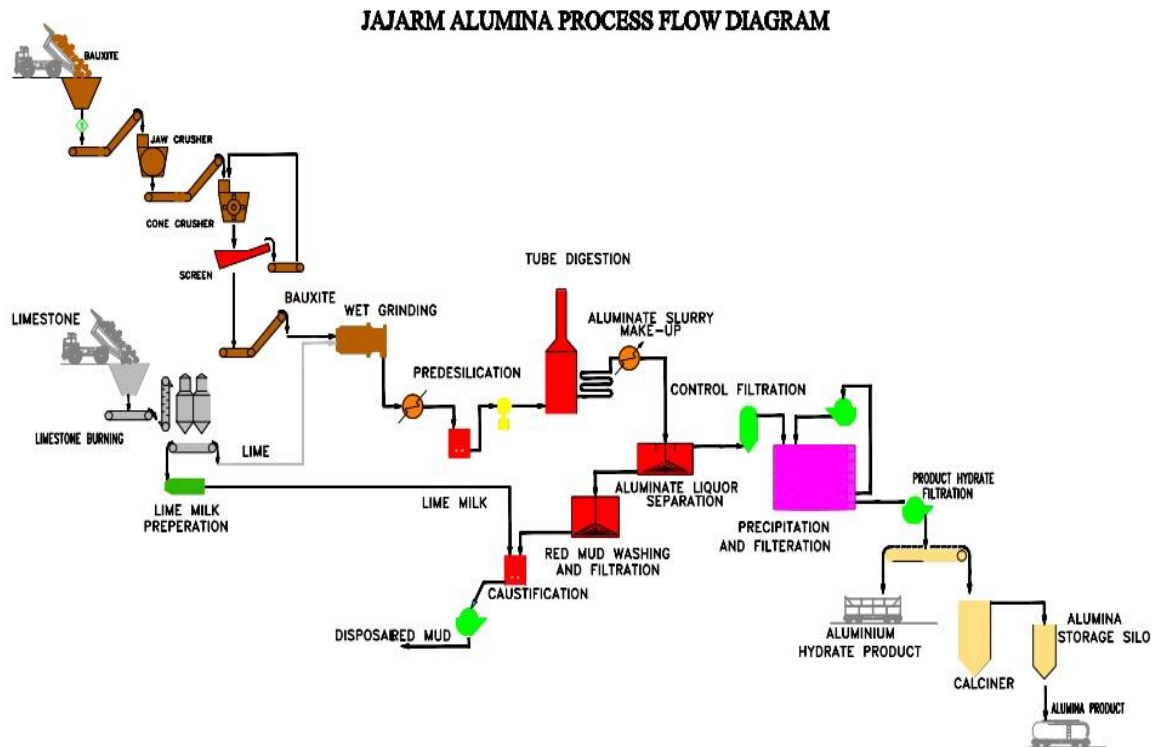
شکل ۱-۵: موقعیت معادن بوکسیت شرکت آلومینای ایران

جدول ۱-۱: مشخصات معادن مختلف بوکسیت شرکت آلومینای ایران

مدول	میانگین SiO ₂ %	میانگین Al ₂ O ₃ %	ذخیره قطعی با عیار حد ۲/۶۶ (میلیون تن)	موقعیت	نام معدن
۳/۵۰	۱۲/۹۰	۴۵/۱۰	۱۸	جاجرم	جاجرم
۳/۶۷	۱۲/۹۵	۴۷/۵۷	۰/۲۶۶	جاجرم	کوه بابا
۵/۴۹	۸/۵۰	۴۶/۷۰	۸/۴۵۰	شاهرود	تاش
۴/۰۸	۱۱/۳۰	۴۶/۱۰	۲/۵۴۰	دامغان	گانو
۴/۴۲	۱۰/۵۰	۴۶/۴۰	۲/۲۰۰	یزد	چک چک
۴/۳۱	۱۰/۹۰	۴۷/۰۰	۱/۱۱۹	یزد	ده دشت شرقی
۴/۱۹	۱۰/۹۰	۴۵/۷۰	۱/۹۳۰	یزد	ده دشت غربی
۳/۲۱	۱۴/۱۸	۴۵/۵۱	۰/۲۲۰	کرمان	دارسینوئیه
۲/۶۱	۱۵/۵۶	۴۰/۶۳	۲/۳۹۴	کرمان	بلبلوئیه
۶/۹۵	۸/۰۰	۵۵/۶	۰/۷۲۲	دهدشت کبکلیویه و بویر احمد	مندون

۱-۵-۳- مجتمع آلومینای جاجرم

فرآیند تولید آلومینا در مجتمع جاجرم مطابق با شکل ۱-۶ شامل واحدهای مختلف بوکسیت و آهک، واحد انحلال، واحد گل قرمز، واحد ترسیب و واحد تکلیس است که در ادامه مختصری از آن شرح داده شده است [۱۵].



شکل ۱-۶: نمایی از فرآیند تولید آلومینا در مجتمع جاجرم

۱-۵-۳-۱- واحد آهک و بوکسیت

الف) واحد آهک

این واحد شامل دو کوره عمودی است که وظیفه پخت سنگ آهک را بر عهده دارد. هر چه کیفیت آهک پخته شده بهتر باشد در راندمان انحلال و نیز کاهش مصرف سود سوزآور مؤثر خواهد بود. در این واحد عملیات تولید شیر آهک نیز انجام می شود. آهک پخته شده به دو صورت در فرآیند بایر مصرف می شود:

الف) به صورت آهک پخته در اختلاط با بوکسیت و انجام انحلال بوکسیت

ب) به صورت شیر آهک و مصرف در واحد گل قرمز جهت انجام سودیابی از گل قرمز

ت) واحد بوکسیت

در این واحد عملیات ذخیره‌سازی و آسیای بوکسیت انجام می‌شود. آسیاها دارای سه محفظه و از نوع آسیاهای تر گلوله‌ای است. خوراک ورودی به آسیا عبارت‌اند از سنگ بوکسیت زیر ۲۰ میلی‌متر و آهک پخته و محلول قلیای ضعیف که از واحد ترسیب به این واحد انتقال می‌یابد. مخلوط موردنظر در طی عملیات آسیا کردن، تولید دوغابی می‌نماید که در حدود ۹۰ درصد سایز ذرات زیر ۹۰ میکرون است و ظرفیت هر آسیا حدود ۵۰ تن بوکسیت در ساعت است که به این مقدار در حدود ۵ تن در ساعت آهک افزوده شده و سپس دوغابی با ذرات جامد ۳۵۰ گرم در لیتر تولید می‌نماید که به واحد سیلیس‌زدایی مقدماتی توسط پمپ انتقال می‌یابد.

۱-۵-۳-۲- واحد انحلال

در این واحد عملیات سیلیس‌زدایی مقدماتی و انحلال Al_2O_3 بوکسیت صورت می‌گیرد.

الف) سیلیس‌زدایی

دوغاب ارسالی از واحد آسیاها پس از عملیات گرم کردن در مبدل^۱های پوسته-لوله^۲ که دمای دوغاب را تا دمای ۱۰۰ درجه بالا می‌برد به مخازن سیلیس‌زدایی انتقال می‌یابد. در مخازن فوق علاوه بر ایجاد زمان اقامت ۶ الی ۸ ساعت به دوغاب فوق محلول غلیظ ارسالی از واحد سود و تبخیر افزوده می‌شود تا غلظت Na_2O در دوغاب به حدود ۱۷۰ گرم بر لیتر برسد. زمان اقامت ایجاد شده همراه دما و غلظت سبب می‌شود سیلیس‌های فعال موجود در بوکسیت به صورت غیرفعال تبدیل و از ایجاد رسوب در واحد انحلال و در جداره لوله‌ها جلوگیری نماید. سیلیس فعال واکنش داده شده رسوب کرده و تبدیل به ترکیباتی غیرفعال سودالیت می‌شود (واکنش ۱-۷).

(۷-۱)



¹ Exchanger

² Shell & Tube

ب) انحلال

واحد انحلال، تشکیل شده از چهار خط با تجهیزات مشابه که وظیفه انحلال بوکسیت و انتقال اکسید آلومینیوم از فاز جامد به مایع را دارد. در این واحد در ابتدا دوغاب بوکسیت از طریق پمپ‌های فشارقوی با دمای ۱۰۰ درجه به درون یک سری پیش‌گرم‌کن^۱ انتقال می‌یابد و دمای دوغاب توسط بخار در مجاورت پوسته تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شود. سپس دوغاب به داخل کوره انتقال یافته و دمای آن تا ۲۷۰ درجه توسط مشعل‌های داخل کوره گرم می‌شود. پس از رسیدن دما به مرحله نهایی دوغاب جهت ایجاد زمان اقامت در دمای ۲۷۰ درجه و زمان ۴۵ دقیقه و انجام انحلال کامل اکسید آلومینیوم در راکتور^۲ لوله‌ای و انحلال‌دهنده^۳ تحت فشار نگهداری شده سپس دوغاب انحلال یافته جهت عملیات سرد شدن به صورت سری درون ۱۱ عدد آب‌شویه (فلاش‌تانک)^۴ انتقال می‌یابد. در هر مرحله از فلاش‌تانک با کاهش فشار دوغاب از طریق سوراخ‌های داخل فلاش‌تانک و گرفتن بخار، عملیات سرد کردن دوغاب تا دمای ۱۰۰ درجه انجام می‌پذیرد. بخارهای متصاعدشده از هر فلاش‌تانک برای گرم کردن اولیه دوغاب در پیش‌گرم‌کن استفاده می‌شود. دوغاب سرد شده در نهایت از آخرین فلاش‌تانک به مخزن‌های ذخیره انتقال یافته و به واحدهای بعدی پمپ می‌شود.

۱-۵-۳-۳- واحد گل قرمز

در این واحد عملیات رقیق‌سازی دوغاب، ته‌نشینی گل، سودیابی و انتقال گل به سد باطله انجام می‌شود. دوغاب غلیظ ارسالی از واحد انحلال توسط محلول سرریز ناشی از شستشوی گل قرمز رقیق می‌شود و سپس سیلیس‌زدایی ثانویه با زمان اقامت ۴ ساعت انجام می‌شود. دوغاب سیلیس‌زدایی شده پس از اضافه شدن محلول لخته‌ساز^۵ به تیکنرهای ته‌نشینی انتقال می‌یابد و با توجه به عملکرد تیکنر،

^۱ Preheater

^۲ Reactor

^۳ Digester

^۴ Flash Tank

^۵ Flocculant

فاز گل قرمز (باطله) به سمت ته مخزن و محلول فوق اشباع از اکسید آلومینیوم در سرریز تیکنر قرار می‌گیرد که قسمت سرریز توسط پمپ به پالایه^۱ (فیلتر) های فشاری جهت جداسازی ذرات ناخالص انتقال یافته و محلول شفاف که از اکسید آلومینیوم فوق اشباع است در مخازن مربوطه ذخیره می‌شود و سپس به واحد ترسیب ارسال می‌شود. ته‌ریز تیکنرها که گل قرمز است پس از ۴ مرحله عملیات شستشو توسط تیکنرهای شستشو (به صورت جریان متقابل) به مخازن سودیابی انتقال می‌یابد و پس از افزودن شیر آهک و گرم کردن، عملیات سودیابی انجام می‌پذیرد و در نهایت توسط فیلترهای استوانه‌ای^۲ گردان فاز جامد از مایع جدا و سود بازیافتی به فرآیند بازگردانده شده و گل قرمز سپس توسط دو عدد پمپ پیستون دیافراگمی به سد باطله که در بیرون مجتمع قرار دارد، به عنوان باطله انتقال می‌یابد.

۱-۵-۳-۴- واحد ترسیب

در این واحد عملیات خنک‌سازی محلول آلومینات فوق اشباع و ترسیب هیدروکسید آلومینیوم انجام می‌شود. ابتدا محلول آلومینات فوق اشباع با دمای ۱۰۰ درجه توسط مبدل حرارتی تا دمای تا ۷۸ درجه سانتی‌گراد سرد می‌شود. محلول آلومینات پس از سرد شدن مجدد در مبدل‌های صفحه‌ای تا دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد با جوانه هیدروکسید آلومینیوم مخلوط شده و سپس به مخازن ترسیب انتقال می‌یابد و فرآیند ترسیب در مخازن طی مدت زمان حدود ۷۲ ساعت تکمیل می‌شود. دوغاب هیدروکسید آلومینیوم آخرین مخزن برای جامد از مایع (فیلتراسیون)^۳ به فیلترهای صفحه‌ای^۴ جهت تولید جوانه هیدروکسید آلومینیوم و فیلترهای گردان جهت تولید محصول هیدروکسید آلومینیوم ارسال می‌شود. هیدروکسید آلومینیوم حاصل از فیلترهای گردان توسط نوارنقاله به واحد تکلیس^۵ انتقال می‌یابد.

^۱ Filter

^۲ Drum Filter

^۳ Filtration

^۴ Disk Filter

^۵ Calcination

۱-۵-۳-۵- واحد تکلیس

در این واحد ذخیره‌سازی هیدروکسید آلومینیوم، تکلیس هیدروکسید آلومینیوم، ذخیره‌سازی و بارگیری اکسید آلومینیوم انجام می‌شود. در بخش ذخیره‌سازی هیدروکسید آلومینیوم که از یک سوله به همراه نوار نقاله‌ها و برداشت کننده^۱ تشکیل شده است، از هیدروکسید آلومینیوم ذخیره‌شده برای ارسال به کوره و یا برای فروش مستقیم استفاده می‌شود. در بخش تکلیس که شامل کوره تکلیس است که در آن هیدروکسید آلومینیوم تولیدشده که حاوی رطوبت ۱۰ درصد و سه آب مولکولی است، توسط جریان هوا به داخل کوره عمودی انتقال یافته و پس از گرم نمودن ذرات هیدروکسید تا دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، آب‌های موجود تبخیر و اکسید آلومینیوم قابل‌مصرف در صنعت شمش آلومینیوم تولیدشده و به مخازن مربوطه انتقال و سپس به‌منظور ارسال برای مشتریان توسط کامیون و قطار بارگیری می‌شود.

۱-۶- ضرورت و اهداف انجام تحقیق

با توجه به کاهش ذخایر بوکسیت جاجرم و افزایش نسبت باطله برداری به ماده معدنی، میزان استخراج بوکسیت از معادن جاجرم کاهش یافته و برای تأمین خوراک کارخانه علاوه از بوکسیت جاجرم از بوکسیت‌های سایر منابع به‌صورت اختلاط استفاده می‌شود. از آنجایی که ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی آن‌ها باهم یکسان نبوده شرایط انحلال یکسانی ندارند لذا با توجه به مصرف قابل‌توجه سالانه بوکسیت در مجتمع آلومینای جاجرم، مصرف بوکسیت‌های سایر منابع جهت تأمین خوراک کارخانه بالا خواهد رفت که به خاطر هزینه حمل‌ونقل، قیمت تمام‌شده بوکسیت نیز افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به مقادیر نسبتاً بالای Al_2O_3 و Na_2O در گل قرمز، بهینه‌سازی انحلال ضرورت دارد تا بدین طریق تلفات این دو ماده بارزش در گل قرمز کاهش یافته و علاوه بر کاهش مصرف سود سوزآور در فرآیند (به خاطر مصرف قابل‌توجه و قیمت بالای آن)، میزان تلفات آلومینا نیز کاهش و

^۱ Scrubber

راندمان انحلال یا میزان تولید افزایش یابد. در نتیجه هدف از انجام این تحقیق بهینه‌سازی راندمان انحلال با استفاده از پارامترهای مؤثر از قبیل دما، زمان، غلظت Na_2O محلول و مقدار آهک است.

۱-۷- روش تحقیق

روش و مراحل انجام پروژه عبارت است از:

- ۱- مطالعه و جمع‌آوری اطلاعات اولیه و انتخاب یک روش مناسب برای انحلال بوکسیت
- ۲- نمونه‌گیری، آماده‌سازی و آنالیز نمونه‌ها
- ۳- طراحی آزمایش‌ها و انجام آزمایش‌های انحلال
- ۴- تجزیه و تحلیل نتایج اولیه و نگارش مقاله
- ۵- شناخت پارامترهای مؤثر و انجام آزمایش‌های تکمیلی برای بهینه‌سازی پارامترها
- ۶- تجزیه و تحلیل نتایج، نگارش و تدوین گزارش نهایی

۱-۸- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه مشتمل بر ۵ فصل است که در فصل اول، ابتدا مقدمه‌ای از تحقیق، ضرورت انجام آن، هدف پایان‌نامه و معرفی مختصری از ماده معدنی مورد مطالعه و شرح فرآیند تولید آلومینا از بوکسیت بیان شده است. به منظور دستیابی به اهداف تحقیق، در فصل دوم به مروری بر تحقیقات قبلی در مورد انحلال بوکسیت و تأثیر پارامترهای مختلف بر راندمان انحلال و بهبود آن پرداخته شده است. مواد مورد نیاز و روش انجام آزمایش‌های اولیه در فصل سوم و نتایج و تجزیه و تحلیل آن در فصل چهارم ارائه شده است. در نهایت جمع‌بندی و نتیجه‌گیری به همراه پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده در فصل پنجم ارائه می‌شود.

فصل ۲

پیشینه تحقیق

۱-۲- مروری بر منابع

با توجه به اهداف تحقیق که بهینه کردن انحلال بوکسیت‌های خوراک کارخانه آلومینای جاجرم با استفاده از پارامترهای مؤثر بر عملکرد فرآیند انحلال شامل غلظت Na_2O محلول، دما، آهک و زمان است. برخی از مهم‌ترین تحقیقات مرتبط در سال‌های اخیر در ادامه معرفی می‌شوند.

فتیح حبشی^۱ (۱۹۹۵) مطالعاتی را برای تولید آلومینا از منظر تاریخی انجام داد. در این تحقیق سوابق تولید آلومینا از بوکسیت با روش‌های مختلف ارائه شد. در سال ۱۸۸۸ اختراعی تحت عنوان فرآیند تولید هیدروکسید آلومینیوم توسط شیمیدان اتریشی بنام کارل جوزف بایر^۲ ثبت شد که از آن‌پس به فرآیند بایر معروف شد. فرآیند بایر برای تولید آلومینا شامل ۲ مرحله اصلی است: مرحله اول شامل انحلال تحت فشار بوکسیت با استفاده از محلول هیدروکسید سدیم داغ است که در نتیجه آن محلول آلومینات سدیم تولید می‌شود. مرحله دوم شامل ترسیب هیدروکسید آلومینیوم از محلول آلومینات سدیم اشباع با افزودن جوانه بلورهای هیدروکسید آلومینیوم است. علاوه بر این، قبل از ارائه فرآیند بایر، در سال ۱۸۸۵ تولید آلومینا از بوکسیت به روش پخت بوکسیت همراه کربنات سدیم توسط کاتلیر^۳ انجام شد [۱۶].

سازمان توسعه صنعتی ملل متحد^۴ (۱۹۹۰) آزمایش‌های انحلال مختلفی بر روی نمونه بوکسیت جاجرم با مدول حدود ۴/۵، در مقیاس نیمه‌صنعتی انجام داد. در این گزارش پارامترهای دما و مقدار آهک در زمان و غلظت محلول ثابت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار بهینه دما و آهک برای بوکسیت جاجرم به ترتیب ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد و ۱۰ درصد است و مقادیر راندمان انحلال، A/S و N/S در شرایط بهینه به ترتیب ۰/۷۳/۳، ۱/۲۶ و ۰/۳۴ است [۱۷].

¹ Fathi Habashi

² Carl Josef Bayer

³ Chatelier

⁴ United Nations Industrial Development Organization

شاتریا^۱ و همکاران (۲۰۰۶) پارامترهای مختلفی را به منظور بهبود انحلال بوکسیت بررسی نمودند. بر این اساس، آزمایش‌های مختلفی را برای بررسی تأثیر پارامترهایی مثل دمای سیلیس‌زدایی و انحلال، میزان آهک، غلظت محلول در گردش و مدول قلیایی محلول و کانی‌شناسی بوکسیت برای رسیدن به بهترین شرایط انحلال انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که بهترین راندمان انحلال با حداقل تلفات سود و مصرف بوکسیت در دمای سیلیس‌زدایی و انحلال ۸۸ درجه سانتی‌گراد، میزان آهک ۰/۷۵ درصد وزن بوکسیت، مدول قلیایی^۲ محلول در گردش برابر ۳/۲۴ و مدول قلیایی محلول بعد از انحلال برابر ۱/۴۵ به دست آمد [۱۰].

گرایلو و همکاران (۲۰۱۱) جهت استفاده از بوکسیت‌های معادن شاه بلاغی و سرخ چشمه در فرآیند تولید مجتمع آلومینای جاجرم مطالعاتی انجام دادند. در این پژوهش بوکسیت‌ها از نظر مسائل فرایندی تولید آلومینا مانند انحلال و ته‌نشینی گل قرمز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده نشان داد که استفاده از این ذخایر به دلیل پایین بودن راندمان انحلال و سرعت ته‌نشینی گل قرمز به‌تنهایی امکان‌پذیر نیست. از این‌رو متغیرهای دیگری نیز مانند دمای انحلال، درصد آهک افزوده و غلظت Na_2O_c تحت کنترل و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد بهترین ترکیب از نظر راندمان انحلال و کاهش تلفات سود و آلومینا، اختلاط بوکسیت شاه بلاغی و جاجرم با نسبت ۵۰-۵۰ است [۱۸].

لی^۳ و همکاران (۲۰۱۰) با افزودن کلسیم فریت در بهتر کردن انحلال بوکسیت‌های سیلیس بالا مطالعاتی انجام دادند. واکنش‌ها در انحلال بوکسیت دیاسپوری با A/S برابر ۵/۹ بررسی شد. با افزودن کلسیم فریت میزان A/S و N/S در گل قرمز کاهش یافت. آزمایش‌ها در مقیاس صنعتی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان یک ساعت با افزودن کلسیم فریت انجام شد که در نتیجه A/S و N/S در گل قرمز به ترتیب به ۰/۶۹ و ۰/۲۱ کاهش یافت. نتایج تجزیه (آنالیز)^۴ XRD نشان داد که

^۱ N.K.Kshatriya

^۲ MR

^۳ Li

^۴ Analysis

کانی‌های سیلیکاته به هیدروگارت فریت تبدیل شدند و در نتیجه با تغییر ساختار کانی‌های سیلیکاته، مقادیر A/S و N/S در گل قرمز تا حد زیادی کاهش یافت [۱۹].

راقاوان^۱ و همکاران (۲۰۱۱) مطالعاتی روی انحلال بوکسیت مرکزی هند انجام دادند. ذخایر بوکسیت هند به پنج دسته تقسیم می‌شوند: غلات شرقی، هند مرکزی، ساحل غربی، گجرات و جامو و کشمیر. هر یک از بوکسیت‌ها به دلیل ماهیت کانی‌شناسی مختلف، شرایط انحلال و ته‌نشینی خاص خود را دارند. انحلال بوکسیت به میزان زیادی به درجه حرارت، مقدار فشار، غلظت محلول در گردش، کانی‌شناسی بوکسیت و مقدار وزن بوکسیت مصرفی بستگی دارد. کارایی فرآیند بایر به مقدار زیادی به انحلال بستگی دارد. یک سری آزمایش‌ها برای بهینه‌سازی شرایط انحلال بوکسیت مرکزی هند برای دستیابی به کاهش مصرف سود سوزآور همراه با مصرف حداقل بوکسیت انجام شد. آزمایش‌ها برای تعیین بهترین پارامترهای انحلال در یک مقیاس آزمایشگاهی انجام شد. در این تحقیق، تأثیر دمای انحلال، وزن بوکسیت، مقدار آهک و غلظت محلول انحلال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که راندمان انحلال، با کم در نظر گرفتن مدول قلیایی محلول بعد از انحلال کاهش و با زیاد شدن دما افزایش یافت [۲۰].

پهلوان^۲ و همکاران (۲۰۱۲) استخراج آلومینا از بوکسیت‌های کم‌عیار را با استفاده از فرآیند پیروهیدرومتالورژی انجام دادند. آن‌ها بوکسیت را به همراه آهک و کربنات سدیم در دمای حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت دادند. سپس برای استخراج آلومینا، آزمایش‌های انحلال در دماهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه انجام شد. حداکثر میزان استخراج آلومینا در زمان ۶۰ دقیقه و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به ۸۰٪ رسید؛ که این نتایج شرایط بهینه استخراج آلومینا از بوکسیت دیاسپوری کم‌عیار با آهن بالا است [۹].

¹ Raghavan

² Pehlivan

پن^۱ و همکاران (۲۰۱۲) تأثیر آهک در محلول آلومینات سدیم را بر سیلیس زدایی مقدماتی و انحلال بوکسیت گیبسیتی بررسی کردند. تأثیر آهک بر میزان سیلیس زدایی مقدماتی و انحلال بوکسیت گیبسیتی در محلول سنتزی آلومینات سدیم در دمای مختلف بررسی شد. بوکسیت از گیبسیت، گوتیت، هماتیت، کائولینیت، کوارتز و مقدار کمی بوهمیت تشکیل شده است. با افزایش آهک و تبدیل سودالیت و کانکرینیت به هیدروگارت، راندمان سیلیس زدایی در مرحله سیلیس زدایی مقدماتی افزایش یافت. راندمان انحلال آلومینای بوکسیت گیبسیتی در دمای ۱۴۵ و ۲۴۵ درجه سانتی‌گراد با مقدار آهک بالا کاهش یافت. راندمان انحلال در دمای ۲۴۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد بیش‌تر است چون که تبدیل آلومینوگوتیت به هماتیت در دمای بالا اتفاق می‌افتد. با افزایش آهک، مصرف سود به‌خصوص در دمای بالا در طی فرآیند انحلال کاهش یافت [۱۴].

سونکینگ^۲ (۲۰۱۳) مطالعاتی به‌منظور بهبود فرآیند بایر داشت. راندمان بالای فرآیند، تأثیر زیادی بر عملکرد تولید، مصرف انرژی، سرمایه‌گذاری و هزینه عملیات در فرآیند بایر دارد. عوامل مؤثر بر راندمان فرآیند بایر به‌طور خاص در این تحقیق مورد بحث قرار گرفت. کاهش نسبت مولی محلول اشباع و افزایش نسبت مولی محلول در گردش و غلظت محلول در گردش موجب افزایش راندمان فرآیند بایر شد [۱۲].

لی و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر یون فرو را بر انحلال بوکسیت دیاسپوری در فرآیند بایر بررسی کردند. در شرایط مناسب انحلال، سولفات آهن هپتاهیدرات می‌تواند میزان انحلال بوکسیت دیاسپوری را به‌مقدار قابل قبولی بهبود دهد. آنتاز با محلول آلومینات سدیم واکنش داده و تیتانات سدیم تشکیل شد و سپس تیتانات سدیم در محلول حل شد و با یون فرو واکنش داده و Fe_2TiO_4 تشکیل یافت. در نهایت Fe_2TiO_4 به مقدار خیلی کم‌تر از آنتاز یا تیتانات سدیم حل می‌شود. غلظت تیتانات‌های حل‌شده در محلول آلومینات به‌خاطر تشکیل Fe_2TiO_4 کاهش یافت. بنابراین غشای تیتانات سدیم

¹ Xiao-lin Pan

² Songqing

پوشش داده شده روی سطح بوهمیت یا دیاسپور به عنوان عامل مزاحم انحلال آلومینا حذف شد، دیاسپور و بوهمیت، آزاد شده و آلومینای آن در محلول هیدروکسید سدیم انحلال یافت. نتایج نشان داده است که نرخ انحلال بوکسیت دیاسپوری با افزایش مقدار یون فرو، دما، زمان ماند و غلظت Na_2O افزایش یافت [۲۱].

لو^۱ و همکاران (۲۰۱۵) رفتار انحلال سولفور در بوکسیت با سولفور بالا را بررسی کردند. اثرات دما، زمان، مقدار آهک و غلظت Na_2O محلول بر رفتار انحلال سولفور بررسی شد. نتایج نشان داد که سولفور موجود در بوکسیت به شکل S^{2-} وارد محلول می شود. در آزمایش های انجام شده میزان انحلال سولفور ابتدا افزایش یافت و سپس با افزایش مقدار آهک کاهش یافت. میزان انحلال سولفور با افزایش دما، غلظت Na_2O محلول ورودی و زمان انحلال افزایش یافت. شرایط فرآیندی برای دستیابی به بالاترین میزان انحلال آلومینا و کمترین میزان انحلال سولفور دمای ۲۶۰ درجه سانتی گراد، زمان ۶۰ دقیقه و مقدار آهک ۱۳٪ بوده و تحت این شرایط مقدار انحلال آلومینا و سولفور به ترتیب به ۸۴/۱۶٪ و ۴۰/۰۴٪ رسید. [۲۲].

راچ^۲ و همکاران (۲۰۱۶) سینتیک انحلال کائولینیت در محلول Na_2O محلول را بررسی کردند. کائولن معمولاً به عنوان کانی دارای سیلیس فعال در بوکسیت رایج است. برای درک بهتر رفتار کائولینیت در فرایند بایر، سینتیک انحلال آن در محلول قلیا مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه های کائولن شامل دو نوع یکی کائولن خالص، دیگری نمونه های رسوبی از معادن بوکسیت دارای سیلیس فعال در بوکسیت بود. سینتیک انحلال هر دو در محلول قلیا در دماهای ۶۵ تا ۱۵۰ درجه سانتی گراد بررسی شد. اندازه ذرات روی سرعت انحلال تا حدودی تأثیر داشت. کائولنی که حاوی هالوسیت است، سریع تر تجزیه شد. انرژی فعال سازی برای کائولن های خالص ۹۳ کیلوژول بر مول و مشابه سیلیس های فعال در بوکسیت است. راندمان انحلال متناسب با غلظت Na_2O محلول افزایش یافت اما در غلظت های بالای

¹ liu

² Roach

آلومینا و سیلیس، راندمان کاهش یافت. رسوب حاصل از سیلیس‌زدایی در محلول بر مقدار انحلال کائولن تأثیر نداشت. پایین بودن سرعت انحلال کائولن در بوکسیت‌های با دمای انحلال پایین بر افزایش راندمان سیلیس‌زدایی مؤثر است [۲۳].

عبدل^۱ و همکاران (۲۰۱۶) سینتیک انحلال بوکسیت گیبسیتی با هیدروکسید سدیم را بررسی کردند. در این تحقیق تأثیر اندازه ذرات، غلظت هیدروکسید سدیم و دمای واکنش بر نرخ استخراج Al_2O_3 مشخص شد. نتایج نشان داد که ۹۹٪ آلومینا از کانی با اندازه ذرات ۲۰۰- تا ۲۷۰+ مش طی واکنش در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و غلظت NaOH برابر ۲۵۰ گرم بر لیتر استخراج شد [۱۱].

جیانگ^۲ و همکاران (۲۰۱۶) مطالعاتی بر تأثیر میزان اضافه کردن آهک در انحلال بوکسیت و محلول بعد از انحلال انجام دادند. آزمایش‌هایی روی بوکسیت دیاسپوری توسط یک دستگاه راکتور فشار بالا (اتوکلاو)^۳ در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ماند یک ساعت با میزان آهک‌های مختلف انجام شد و تأثیر میزان آهک را بر مدول قلیایی، مقدار سیلیس محلول بعد از انحلال و همچنین راندمان استخراج آلومینا و میزان نسبت Na_2O به SiO_2 در گل قرمز بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان آهک تا ۱۵٪ وزنی بوکسیت، پایداری مدول قلیایی محلول افزایش و سپس کاهش یافت و همچنین با افزایش میزان آهک راندمان انحلال کاهش اما نسبت Na_2O به SiO_2 نیز کاهش یافت [۱۳].

لی و همکاران (۲۰۱۶) انحلال آلومینای بوکسیت دیاسپوری با آهن کم (جداسازی آهن به روش مغناطیسی) را با استفاده از نمک سدیم بررسی کردند بازایی آهن از سنگ بوکسیت دیاسپوری غنی از آهن از طریق فرآیند تشویه^۴ کاهش یافته و سپس جداسازی مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. واکنش‌های نمک سدیم با فازهای حاوی کمپلکس آلومینیوم و سیلیس، ترکیب $NaAl_{11}O_7$ ^۵ و

^۱ Abdel

^۲ Jiang

^۳ Autoclave

^۴ Roasting

^۵ Diaoyudaoite

آلومینوسیلیکات سدیم را تولید می‌کند. جداسازی آهن به روش مذکور، راندمان انحلال آلومینا را در فرآیند بایر بهبود داد. هنگامی که مقدار آهن در بوکسیت کاهش یافت، دمای انحلال آن به طور قابل توجهی از ۲۸۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد کاهش و راندمان انحلال آلومینا نزدیک به ۹۹٪ رسید [۲۴].

لو^۱ و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر کانی‌های مختلف سیلیکاته را بر انحلال بوکسیت در فرآیند بایر بررسی کردند. کانی‌های سیلیکاته بوکسیت شامل کائولینیت، ایلیت و شاموزیت هست. آزمایش‌های انحلال روی بوکسیت دیاسپوری چین با سیلیس بالا انجام شد. تأثیر دما و زمان بر راندمان انحلال مشخص شد. نتایج نشان داد که سیلیس بالا باعث هدررفت سود همراه با گل قرمز و کاهش نرخ انحلال شد و همچنین بر اساس نتایج به دست آمده بوکسیت‌های دارای شاموزیت دارای تلفات سود کم‌تر و راندمان انحلال بالاتر هستند [۲۵].

اکو^۲ و همکاران (۲۰۱۶) میزان انحلال و سیلیس‌زدایی کوارتز را در محلول بایر بررسی کردند. میزان انحلال کوارتز که در انحلال بوکسیت یک‌آبه (دیاسپوری) استرالیا در دمای ۱۸۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. همچنین میزان انحلال بوکسیت سه‌آبه (گیبسیتی) جنوب شرقی آسیا نیز در محدوده دمایی از ۱۰۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد در محلول آلومینات سدیم بررسی شد. با توجه به نتایج به دست آمده، روابطی برای سیلیس‌زدایی و انحلال کوارتز ارائه نمودند [۲۶].

لی^۳ و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از فرآیندی جدید، مطالعاتی به منظور بازیابی آلومینا از بوکسیت دیاسپوری انجام دادند. این فرآیند جدید، تشویه دوغاب مخلوط بوکسیت دیاسپوری، هیدروکسید کلسیم و محلول قلیا، توسط میکروویو^۴ برای استخراج آلومینا از بوکسیت دیاسپوری کم‌عیار است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد زمانی که نسبت‌های مولی $\text{NaOH}/(\text{Al}+\text{Fe})$ و Ca/Si در دوغاب به ترتیب برابر ۱ و ۲ باشد پس از عملیات تشویه توسط میکروویو با توان ۱ کیلووات در دمای ۸۰۰ درجه

¹ Luo

² Oku

³ Le

⁴ Microwave

سانتی‌گراد و مدت‌زمان ۲۰ دقیقه، آلومینا و سیلیس موجود در بوکسیت به‌طور کامل آزاد و وارد محلول NaAlO_2 شد و CaSiO_4 به‌صورت نامحلول باقی‌ماند. فرآیند تشویه کارایی بالایی داشته به‌طوری‌که در مرحله انحلال با محلول قلیای رقیق در فشار اتمسفری، دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۲۰ دقیقه میزان استخراج آلومینا به ۹۷٪ رسید [۲۷].

دیکسون^۱ و همکاران (۲۰۱۷) تولید هیدروکسید آلومینیوم از بوکسیت با سیلیس بالا را با هیدروکسید سدیم بررسی کردند. ناخالصی‌های موجود در محلول سود بر راندمان انحلال و خلوص محصولات نهایی بسیار تأثیرگذار است. سنگ بوکسیت تهیه‌شده از معدن خشتاب پنجاب با استفاده از روش‌های XRF و XRD آنالیز شد. تأثیر مدول قلیای محلول، دما و آهک بر راندمان و خلوص محصول موردبررسی قرار گرفت. مشخصات نمونه‌های محصول با روش XRF مشخص شد. نتایج نشان داد که بالاترین راندمان انحلال در دمای ۲۴۵ درجه سانتی‌گراد، مدول قلیای ۱/۹۵ و ۱۰٪ آهک برابر ۸۶٪ و مقدار سیلیس محصول در این شرایط کم‌تر از ۰/۴٪ است. همچنین تأثیر آهک در کنترل حلالیت ناخالصی‌ها بسیار است [۲۸].

لی و همکاران (۲۰۱۷) بر روی بوکسیت دیاسپوری کم‌عیار به‌منظور استخراج آلومینیوم، آهن و تیتان مطالعاتی به روش بایر انجام دادند. آزمایش‌های سیلیس‌زدایی در شرایط مختلف بررسی شد. نتایج سیلیس‌زدایی نشان داد که در بهترین شرایط یعنی با غلظت هیدروکسید سدیم ۵۰٪، دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد، زمان ۳۰ دقیقه و نسبت مایع به جامد ۵ میلی‌لیتر بر گرم راندمان سیلیس‌زدایی به مقدار ۷۳/۹۲٪ رسید و نسبت آلومینا به سیلیس بوکسیت (مدول) از ۲/۹۲ به ۹/۲۵ رسید. آزمایش‌های انحلال آلومینا بر روی بوکسیت سیلیس‌زدایی شده در شرایط غلظت Na_2O محلولی برابر ۲۴۰ گرم‌برلیتر، مدول قلیای ۳، دمای ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۹۵ دقیقه و مقدار آهک ۶ در صد انجام و راندمان انحلال به ۹۶/۳٪ رسید. بازیابی آهن و تیتان بر روی گل به‌دست‌آمده به روش بایر با استفاده از ۲ مرحله جداسازی مغناطیسی (شدت ۰/۸ و ۰/۲ تسلا) انجام شد. مقدار عیار آهن و تیتان

¹ Dickson

در کنسانتره به ترتیب به ۵۶/۳۹٪ و ۸/۶۶٪ و مقدار بازیابی آهن و تیتان به ترتیب به ۵۵/۷۹ و ۱۷/۳۷ رسید. مقدار عیار تیتان در قسمت غیر مغناطیس به ۲۱/۲۲٪ رسید [۲۹].

لی و همکاران (۲۰۱۸) سینتیک واکنش‌های بین بوکسیت دیاسپوری و محلول قلیا را با استفاده از میکروویو بررسی کردند. دوغاب مخلوط بوکسیت دیاسپوری و محلول قلیا توسط میکروویو به روش حرارت‌دهی مرسوم^۱ تشویه شد. آنالیز XRD نشان داد که تأثیر روش میکروویو بر افزایش سرعت واکنش بین NaOH با کانی‌های آلومینیوم‌دار برای به‌دست آمدن محلول NaAlO_2 (آلومینات سدیم) بیش‌تر است. در مقایسه با روش حرارت‌دهی مرسوم، میکروویو به‌میزان قابل‌توجهی دمای تشویه را تقریباً ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش داد و زمان واکنش را ۳ برابر کوتاه‌تر کرد تا کانی آلومینیوم‌دار از بوکسیت به NaAlO_2 تبدیل‌شود. مقدار انرژی فعال ظاهری برای واکنش بین مواد معدنی آلومینیوم‌دار و NaOH به روش میکروویو برابر ۳۱/۳۱ کیلوژول بر مول است که ۲۳/۲۳٪ کم‌تر از روش حرارت‌دهی مرسوم است. میزان استخراج اکسید آلومینیوم با استفاده از میکروویو در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت‌زمان ۲۰ دقیقه بسیار بالا بود (۹۶/۶۸٪)، درحالی‌که میزان استخراج اکسید آلومینیوم به روش حرارت‌دهی مرسوم در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت‌زمان ۶۰ دقیقه ۹۵/۰۹٪ و در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۲۰ دقیقه به ۹۵/۴۴٪ رسید [۳۰].

دنگ^۲ و همکاران (۲۰۱۸) مطالعاتی بر رفتار انحلال قلیایی استخراج آلومینا از آلوموسیلیکات سدیم تولیدشده در فرآیند پیرومتالورژی داشتند. در فرآیند پیرومتالورژی مواد معدنی آلوموسیلیکات دارای کانی‌های آهن و آلومینیوم در حضور Na_2O به‌آسانی تبدیل به آلوموسیلیکات سدیم شده که رفتار انحلال اکسید آلومینیوم و سیلیس را تغییر می‌دهد. آلوموسیلیکات سدیم به‌دست‌آمده در شرایط مختلف تشویه بوکسیت به مقدار زیاد در فرآیند انحلال حل‌شده است. در شرایط بهینه دمای ۱۰۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، نسبت مایع به جامد برابر ۲:۱۰ میلی‌لیتر بر گرم، مدول قلیایی برابر ۴ و

¹ Conventional Heating

² Deng

غلظت قلیای ۲۴۰ گرم بر لیتر میزان راندمان انحلال واقعی و نسبی آلومینا از آلوموسیلیکات سدیم تولیدشده به حداکثر مقدار خود به ترتیب ۶۵ و ۹۵ درصد رسید. در حالی که سیلیس به سختی حل شد. اعتبار سنجی انحلال آلوموسیلیکات سدیم تولیدشده، بر روی $\text{Na}_{1.75}\text{Al}_{1.75}\text{SiO}_{2.5}\text{O}_4$ به دست آمده از بوکسیت تشویه شده انجام شد و راندمان انحلال نسبی Al_2O_3 در دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد به ۹۰٪ رسید [۳۱].

۲-۲- جمع بندی

مروری بر این تحقیقات نشان می دهد که تاکنون پژوهش های فراوانی در زمینه ی فرآیند انحلال Al_2O_3 بوکسیت های مختلف با ترکیب شیمیایی و کانی شناسی متفاوت به روش بایر و سایر روش ها و همچنین بهینه کردن راندمان انحلال با کمک پارامترهای مؤثر بر آن از قبیل دما، زمان، غلظت Na_2O محلول در گردش و یا مدول قلیایی، مقدار آهک و ... انجام شده است که در مجموع نتایج نشان می دهد که پارامترهای مذکور برای بالابردن راندمان انحلال و بهینه کردن فرآیند نقش مؤثر دارند. از آنجائی که شرایط انحلال بوکسیت ها باهم متفاوت بوده و خوراک کارخانه آلومینای جاجرم از اختلاط چند نوع بوکسیت است، از این رو این پایان نامه بررسی و بهینه سازی راندمان انحلال بوکسیت های مختلف خوراک کارخانه آلومینای جاجرم متمرکز شده است.

فصل ۳

مواد و روش تحقیق

۳-۱- مقدمه:

از آنجاکه هدف، بهینه‌سازی راندمان انحلال بوکسیت اختلاط (خوراک) بوده این تحقیق در دو فاز کاری انجام شده است. در مرحله اول مطالعات انحلال روی بوکسیت‌های جاجرم، تاش، یزد و شیرین‌چشمه با تغییر یک پارامتر در چند محدوده و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها به‌صورت جداگانه انجام شد. و سپس در مرحله دوم با استفاده از روش طراحی آماری آزمایش‌ها و مدل سطح پاسخ (RSM)^۱ به بررسی شرایط بهینه پارامترهای مؤثر بر انحلال بوکسیت اختلاط پرداخته شد.

۳-۲- مواد و تجهیزات

۳-۲-۱- مواد اولیه

مواد اولیه برای انجام آزمایش‌ها انحلال:

- ۱- بوکسیت (بوکسیت جاجرم، بوکسیت تاش، بوکسیت یزد و بوکسیت شیرین‌چشمه)،
- ۲- آهک (آهک پخته‌شده در کوره‌های آهک کارخانه آلومینای جاجرم)،
- ۳- محلول قلیا (قلیای با غلظت ضعیف و قوی) و آب مقطر

۳-۲-۲- مواد شیمیایی

اتیلن دی آمین تترا استیک اسید^۲، هیدروکلریک اسید، سود سوزآور، استات روی، سولفوریک اسید، آمونیاک، هیدروفلوریک اسید، کلرید باریم، اسید استیک، کربنات سدیم، گلوکونات سدیم، متیل اورانژ، فنول فتالین، آمونیوم مولیبدات، تارتاریک اسید، اسید کلریدریک، آسکوربیک اسید، زایلن اورانژ. (تمامی مواد شیمیایی مذکور ساخت شرکت مرک^۳ آلمان می‌باشد)

¹ Response Surface Methodology

² Ethylene Di-amine Tetra Acetic-acid

³ Merck

۳-۲-۳- تجهیزات و وسایل آزمایشگاهی

جدول ۱-۳: تجهیزات آزمایشگاهی موردنیاز در این پروژه

شماره	تجهیزات	مشخصات
۱	اتوکلاو چرخشی فشار بالا	ELECTROTECHNIKA-USS600616-CZECH REPUBLIC
۲	سانتریفیوژ	UNIVERSAL 30-F
۳	خشک کن ^۱	VENTICELL 111L- CZECH REPUBLIC
۴	ترازوی آنالیتیکال	METTLER PM2000
۵	کوره الکتریکی	AZAR FURNACE F11L-1500
۶	حمام آب گرم	شرکت تک آزما- ۱۴ لیتر
۷	همزن مغناطیسی	LABINCO L-71
۸	صفحه داغ و همزن مغناطیسی	DRAGON LAB MS7-H550-pro
۹	دستگاه UV	UNICAM uv/vis spectrometer

جدول ۲-۳: وسایل آزمایشگاهی موردنیاز در این پروژه

شماره	وسایل	مشخصات
۱	پیکنومتر	SIMAX
۲	قیف بوختر	SIMAX
۳	بالن در حجم‌های مختلف	SIMAX
۴	ارلن در حجم‌های مختلف	SIMAX
۵	بشر در حجم‌های مختلف	SIMAX
۶	پیپت (ساده و حبابدار در حجم‌های مختلف)	SIMAX
۷	بورت (ساده و اتومات)	SIMAX
۸	استوانه مدرج	SIMAX
۹	کاغذ صافی	Schleicher & Schuell
۱۰	دسیکاتور	SIMAX

^۱ Dryer

۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها و تهیه نمونه همگن

- بوکسیت: در این تحقیق، نمونه‌ها که شامل بوکسیت معادن جاجرم، تاش، شیرین‌چشمه هست، توسط واحد کنترل کیفیت مجتمع جاجرم، پس از نمونه‌گیری، سنگ‌شکنی و آسیاکردن برای آزمایش‌های انحلال آماده شد. بوکسیت موردنیاز، برای آزمایش ابتدا باید خردایش و به‌اندازه ۹۰ میکرون آسیا شود تا تأثیر سود سوزآور بر بوکسیت به بیش‌ترین حد برسد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها ابتدا در دو مرحله با سنگ‌شکن فکی آزمایشگاهی خردایش شده سپس با ریفل (تقسیم‌کننده نمونه)، نمونه معرف تهیه و مجدداً با آسیا خردایش شد تا بالای ۸۰ درصد ذرات کوچک‌تر از ۹۰ میکرون گردند. سپس نمونه‌ها مخلوط و مورد همگن‌سازی قرارگرفت. پس از همگن‌سازی نمونه معرف تهیه‌شده برای آنالیز شیمیایی ارسال گردید.

- آهک: نمونه آهک نیز از کوره‌های مجتمع جاجرم تهیه و آنالیز شد که مشخصات آن در جدول (۳-۶) نشان داده است.

- محلول قلیا: برای تهیه نمونه محلول آزمایش‌ها انحلال از محلول درگردش و محلول تغلیظ شده فرآیند استفاده شد. مطابق سطح غلظت Na_2O موردنظر، مشخصات نمونه‌های تهیه‌شده در جدول (۳-۷) نشان داده‌شده که در بخش بعدی موردبحث قرار می‌گیرد.

۳-۴- شناسایی ترکیب شیمیایی

تجزیه کمی ترکیب شیمیایی نمونه‌های بوکسیت معرف توسط دستگاه فلورسانس اشعه ایکس (XRF) انجام و نتایج در جدول ۳-۲ نشان داده‌شده است. آنالیز XRF با استفاده از دستگاه فلورسانس اشعه-ایکس زیمنس مدل SRS 3000 انجام شد. در جدول ۳-۲، نمونه‌ها با روش نیمه کمی آنالیز شده‌اند. ترکیب شیمیایی بوکسیت جاجرم، تاش، یزد و شیرین‌چشمه با روش XRF آنالیز و در جدول ۳-۲ نشان داده‌شده است.

جدول ۳-۳: مشخصات شیمیایی بوکسیت‌های جاجرم، تاش، یزد و شیرین چشمه

نام نمونه	Al ₂ O ₃ (درصد)	SiO ₂ (درصد)	Fe ₂ O ₃ (درصد)	TiO ₂ (درصد)	CaO (درصد)	MgO (درصد)	مدول
جاجرم	۴۵/۸۱	۱۲/۴۳	۲۲/۴۹	۵/۲۹	۰/۶۳	۰/۳۴	۳/۶۹
تاش	۴۶/۹۶	۱۰/۵۸	۲۲/۶۰	۳/۳۸	۲/۱۵	۰/۴۲	۴/۴۴
یزد	۴۵/۸۶	۹/۷۱	۲۴/۴۵	۵/۱۱	۰/۳۴	۰/۳۷	۴/۷۲
شیرین چشمه	۵۲/۷	۹/۸۲	۱۶/۸۴	۵/۶۹	۰/۴	۰/۲۱	۵/۳۷

بوکسیت اختلاط یا همان خوراک کارخانه از نسبت‌های مختلف بوکسیت‌های تاش، جاجرم، یزد و شیرین چشمه آماده شد. نسبت اختلاط هر کدام بایستی متناسب ظرفیت تولید و همچنین ترکیب شیمیایی آن‌ها باشد به طوری که مدول بوکسیت به دست آمده اختلاط برابر مدول مورد نظر فرآیند یعنی ۴/۲ (در شرایط فعلی) باشد. نسبت‌های هر کدام در ترکیب بوکسیت اختلاط در جدول (۲-۴) نشان داده شده است.

جدول ۳-۴: نسبت اختلاط بوکسیت‌ها در ترکیب بوکسیت خوراک

بوکسیت	اختلاط (درصد)	Al ₂ O ₃ (درصد)	SiO ₂ (درصد)	مدول
جاجرم	۳۵	۴۵/۸۱	۱۲/۴۳	۳/۶۹
تاش	۵۰	۴۶/۹۶	۱۰/۵۸	۴/۴۴
یزد	۱۰	۴۵/۸۶	۹/۷۰	۴/۷۲
شیرین چشمه	۵	۵۲/۷۰	۹/۸۲	۵/۳۷
بوکسیت اختلاط	۱۰۰	۴۶/۷۳	۱۱/۱۰	۴/۲۱

جدول ۳-۵: مشخصات شیمیایی بوکسیت اختلاط

نام نمونه	Al ₂ O ₃ (درصد)	SiO ₂ (درصد)	Fe ₂ O ₃ (درصد)	TiO ₂ (درصد)	CaO (درصد)	MgO (درصد)	مدول
بوکسیت اختلاط	۴۶/۳۶	۱۱/۰۸	۲۲/۱۳	۴/۱۱	۱/۵	۰/۴۱	۴/۱۸

جدول ۳-۶: مشخصات شیمیایی نمونه آهک

نمونه	Al ₂ O ₃ (درصد)	SiO ₂ (درصد)	Fe ₂ O ₃ (درصد)	TiO ₂ (درصد)	MgO (درصد)	CaO (درصد)	L.O.I (درصد)
آهک	۰/۸۱	۰/۴۳	۰/۴۹	۵/۲۹	۰/۶۳	۸۶/۱۰	۳/۶۹

جدول ۳-۷: مشخصات محلول‌های قبل از انحلال با غلظت‌های مختلف

نمونه	Na ₂ O _c ³ (گرم بر لیتر)	Al ₂ O ₃ (گرم بر لیتر)	Na ₂ O _t ² (گرم بر لیتر)	α ¹
L1 (۱۷۰)	۱۶۹/۸۸	۹۱/۸۰	۱۹۴/۰۶	۳/۰۴
L2 (۱۷۵)	۱۷۴/۸۴	۹۴/۳۵	۱۹۸/۷۱	۳/۰۵
L3 (۱۸۰)	۱۸۰/۴۲	۹۶/۳۹	۲۰۴/۹۱	۳/۰۸

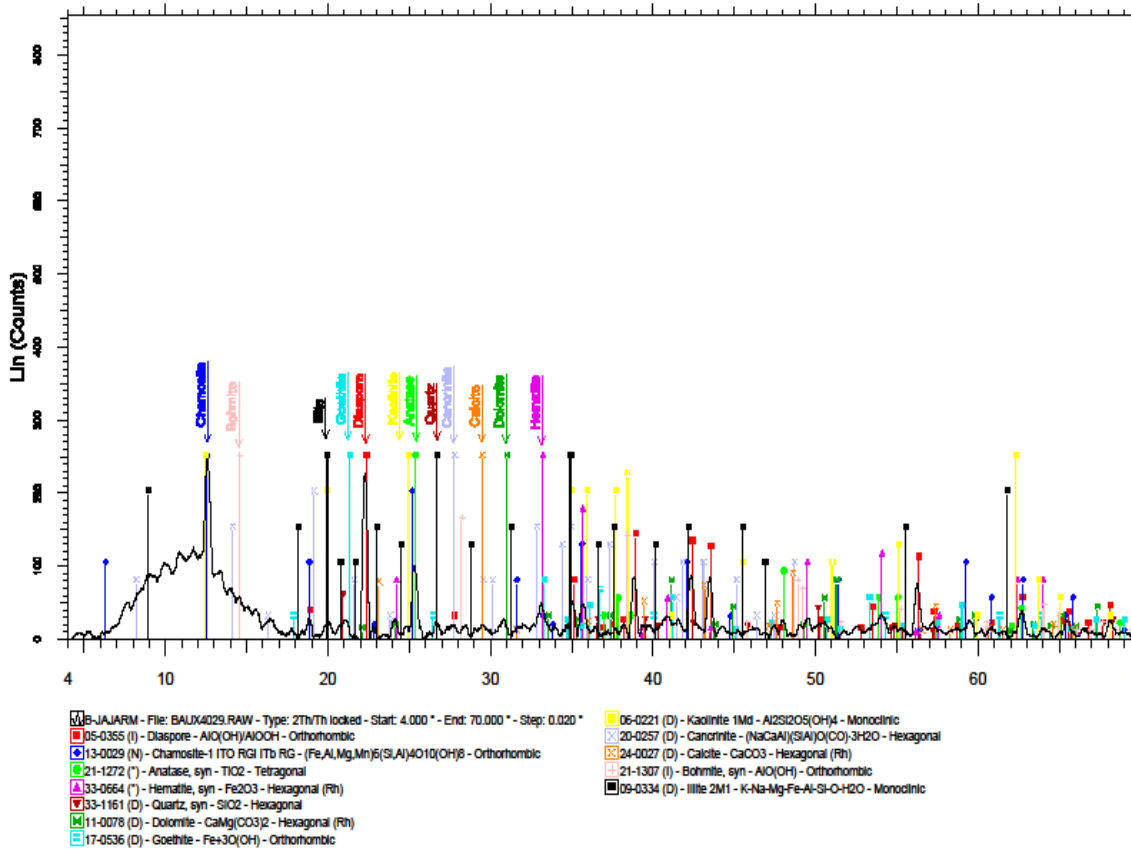
¹ مدول قلیایی

² Na₂O_t: (Total Na) = NaOH + Na₂CO₃ + Na₂SO₄

³ منظور Na₂O موجود در محلول به صورت NaOH است که بر انحلال بوکسیت موثر است.

۳-۵- شناسایی کانی‌شناسی نمونه‌ها

از آنجاکه تعیین عیار، به‌تنهایی در عملیات فرآوری کافی نبوده و باید نوع ترکیب کانی‌شناسی ماده معدنی موردنظر و باطله‌ی همراه آن مشخص شود، از این‌رو مطالعه‌های کانی‌شناسی، نقش اساسی و پایه‌ای را ایفا می‌کند. برای شناخت کانی‌های موجود و تخمین مقدار آن‌ها در نمونه تهیه‌شده، از آنالیز طیف پراش اشعه‌ایکس (XRD) استفاده شد. این آنالیز کمک می‌کند تا چگونگی رفتار کانی‌ها و تغییرات و نتایج به‌دست‌آمده در مراحل مختلف آزمایش‌ها قابل‌مشاهده باشند. آنالیز کانی‌شناسی نمونه با استفاده از دستگاه پراش‌سنج اشعه ایکس زیمنس مدل D-5000 انجام شد. در شکل‌های (۳-۱) تا (۳-۴) آنالیز XRD کیفی و در جداول (۳-۸) تا (۳-۱۱) آنالیز XRD کمی نمونه‌های تهیه‌شده از بوکسیت‌های جاجرم، تاش، یزد و شیرین‌چشمه مشاهده می‌شود. دیاسپور، کائولینیت، شاموزیت، هماتیت و آناتاز مهم‌ترین کانی‌های تشکیل‌دهنده ۴ نمونه بوکسیت مورد مطالعه است.

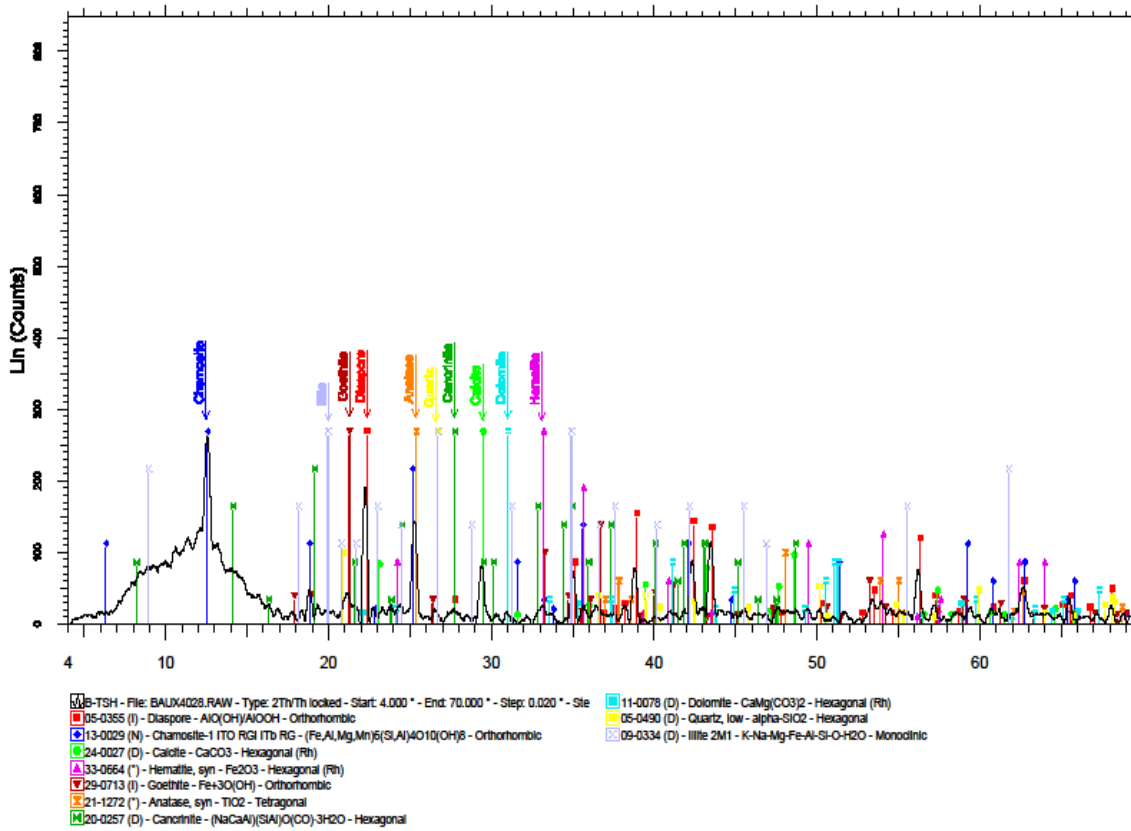


شکل ۳-۱: مشخصات کیفی کانی شناسی بوکسیت جاجرم

جدول ۳-۸: مشخصات کمی کانی شناسی بوکسیت جاجرم

	Components	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	L.O.I
Minerals	Analysis %	45.81	22.49	12.43	5.29	0.63	0.34	0.05	11.4
Diaspore	42.19	35.86							6.33
Hematite	22.49		22.49						
Anatase	5.29				5.29				
Dolomite	1.55					0.47	0.34		0.73
Cancrinite	0.2	0.07		0.08				0.05	0.00
Quartz	0.7			0.70					
Kaolinite	25.02	9.88		11.63					3.50
Total XRD	97.44	45.81	22.49	12.41	5.29	0.47	0.34	0.05	10.57

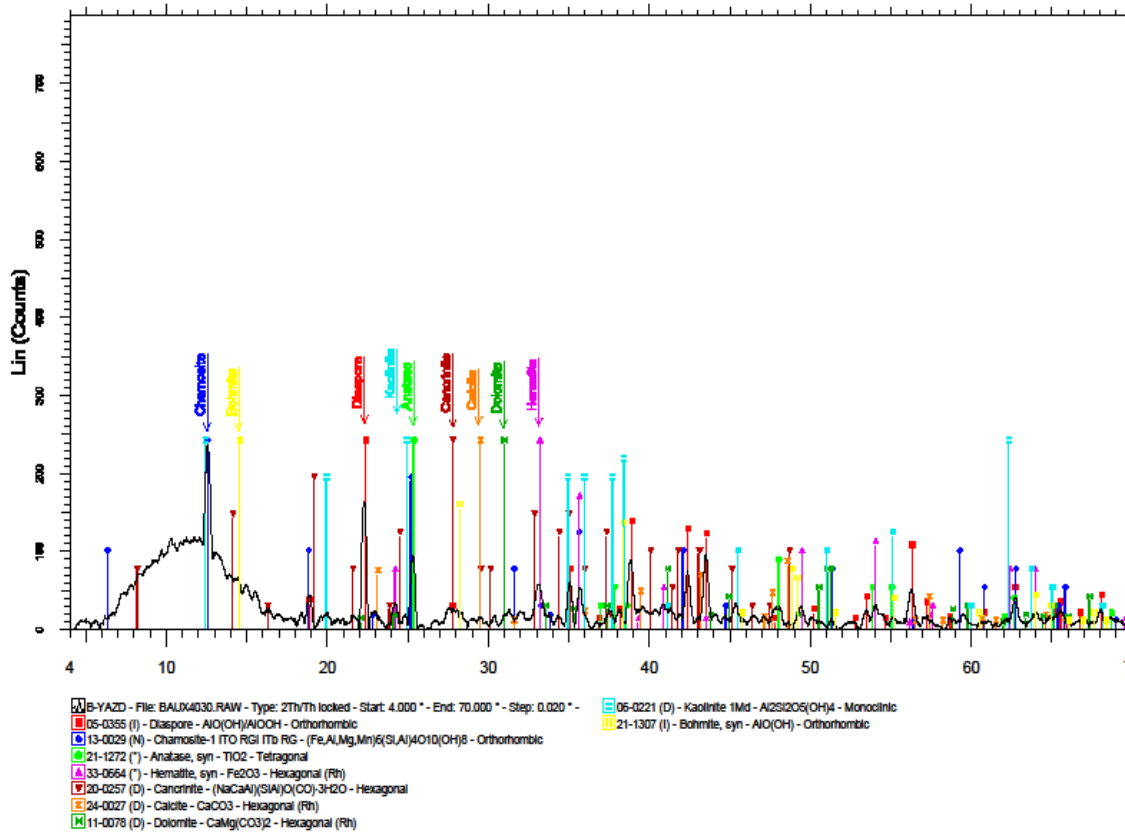
B-TSH



شکل ۳-۲: مشخصات کیفی کانی‌شناسی بوکسیت تاش

جدول ۳-۹: مشخصات کمی کانی‌شناسی بوکسیت تاش

	Components	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	L.O.I
Minerals	Analysis %	46.96	22.6	10.58	3.38	2.15	0.42	0.11	0.15	13.5
Diaspore	49.62	42.18								7.44
Hematite	5.25		5.25							
Goethite	6.16		5.37							0.79
Anatase	3.38				3.38					
Calcite	3.50					1.96				1.54
Dolomite	0.63					0.19	0.14			0.30
Cancrinite	0.56	0.18		0.22					0.15	0.01
Illite	1.27	0.34		0.79				0.11		0.03
Quartz	2.06			2.06						
Chamosite	27.61	4.25	11.98	7.51			0.84			3.01
Total XRD	100.04	46.95	22.60	10.58	3.38	2.15	0.97	0.11	0.15	13.12

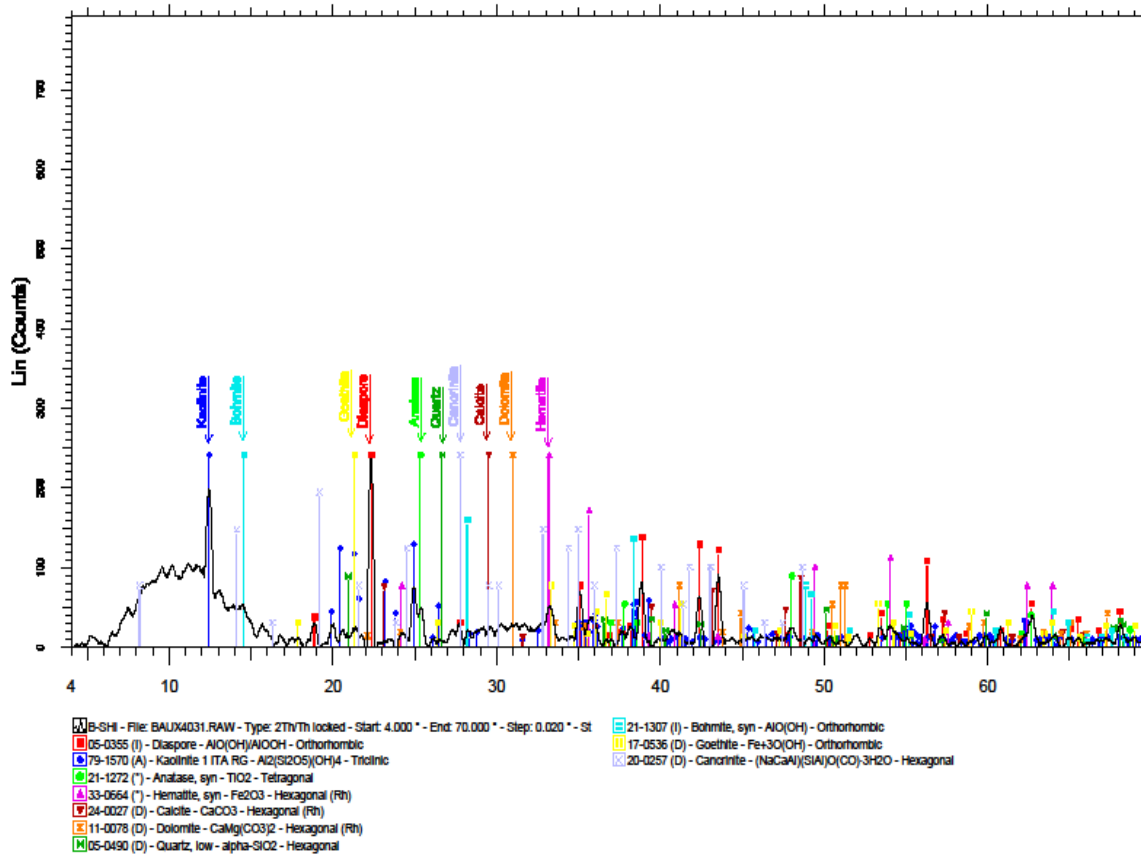


شکل ۳-۳: مشخصات کیفی کانی شناسی بوکسیت یزد

جدول ۳-۱۰: مشخصات کمی کانی شناسی بوکسیت یزد

	Components	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	L.O.I
Minerals	Analysis %	45.86	24.45	9.71	5.11	0.34	0.37	0.13	11.9
Diaspore	45.08	38.32							6.76
Boehmite	1.25	1.06							0.19
Hematite	20.89		20.89						
Anatase	5.11				5.11				
Calcite	0.40					0.22			0.18
Dolomite	0.39					0.12	0.09		0.18
Cancrinite	0.49	0.16		0.19				0.13	0.01
Chamosite	9.24	1.42	4.01	2.51			0.28		1.01
Kaolinite	15.08	5.96		7.01					2.11
Total XRD	97.93	46.92	24.90	9.72	5.11	0.34	0.37	0.13	10.44

B-SH1



شکل ۳-۴: مشخصات کیفی کانی شناسی بوکسیت تاش

جدول ۳-۱۱: مشخصات کمی کانی شناسی بوکسیت شیرین چشمه

	Components	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I
Minerals	Analysis %	46.96	22.6	10.58	3.38	2.15	0.42	0.11	0.15	13.5
Diaspore	49.62	42.18								7.44
Hematite	5.25		5.25							
Goethite	6.16		5.37							0.79
Anatase	3.38				3.38					
Calcite	3.50					1.96				1.54
Dolomite	0.63					0.19	0.14			0.30
Cancrinite	0.56	0.18		0.22					0.15	0.01
Illite	1.27	0.34		0.79				0.11		0.03
Quartz	2.06			2.06						
Chamosite	27.61	4.25	11.98	7.51			0.84			3.01
Total XRD	100.04	46.95	22.60	10.58	3.38	2.15	0.97	0.11	0.15	13.12

۳-۶- مطالعات آزمایشگاهی

برای انجام این تحقیق ابتدا فاز مطالعاتی روی انحلال بوکسیت با استفاده از فرآیند بایر انجام شد و سپس اطلاعات لازم از وضعیت خوراک و شرایط انحلال بوکسیت خوراک کارخانه آلومینای جاجرم جمع‌آوری شد. نمونه‌های لازم برای مطالعات آزمایشگاهی تهیه و آنالیز شد. آزمایش‌های انحلال لازم مطابق با شرایط فعلی فرآیند آلومینای جاجرم تعریف و پس از محاسبات وزن بوکسیت، آزمایش‌ها توسط دستگاه اتوکلاو در آزمایشگاه تحقیقات جاجرم انجام شد. پس از آنالیز فازهای جامد و مایع بعد از انحلال محاسبات راندمان، A/S و N/S انجام و تجزیه و تحلیل آزمایش‌ها و سپس بهینه‌سازی انحلال انجام شد.

۳-۶-۱- محاسبات وزن مواد

پس از آماده‌سازی نمونه‌های بوکسیت، وزن موردنیاز بوکسیت برای انجام آزمایش انحلال با استفاده از فرمول تجربی که از اول راه‌اندازی کارخانه جاجرم تا به حال برای محاسبه بوکسیت کاربرد داشته از آن استفاده شد. این فرمول تجربی توسط شرکت تکنواکسپورت چک، طراح کارخانه آلومینای جاجرم که از نتایج تعداد زیادی آزمایش‌های انحلال روی بوکسیت جاجرم به دست آمده ارائه شد. فرمول محاسبات وزن بوکسیت مطابق رابطه (۳-۱) انجام شد:

(۳-۱):

$$G = C_{Na_2O_c} (\alpha_o - \alpha_c) / [0.608 (\alpha_o) (\alpha_c) (A_{Baux} - S_{Baux}) + 0.608 (\alpha_o) (S_{Baux})] \times V$$

G: وزن بوکسیت بر حسب گرم

$C_{Na_2O_c}$: غلظت Na_2O محلول ورودی

α_o : نسبت مولی غلظت محلول قلیای ورودی

α_c : نسبت مولی غلظت محلول قلیای بعد از انحلال

نسبت مولی غلظت محلول قلیای بعد از انحلال (مدول قلیایی) همانی است که باید بعد از عملیات انحلال به آن رسید که معمولاً حدود ۱/۴-۱/۵ در نظر گرفته می‌شود. این یکی از مهم‌ترین پارامترها برای تعیین مطلوب بودن شرایط آزمایش انحلال هست.

$$\alpha = (\text{CNa}_2\text{O}_C / \text{CAI}_2\text{O}_3) \times 1/645 \quad (2-3)$$

A_{baux} : مقدار بوکسیت بر حسب درصد Al_2O_3

S_{baux} : مقدار بوکسیت بر حسب درصد SiO_2

V: حجم محلول بر حسب میلی لیتر

مدول قلیایی محلول قبل از انحلال (α_0) معمولاً بین ۳ تا ۳/۳ است که مقدار آن بستگی به شرایط فرآیند دارد که مطابق فرمول (۳-۴) در مقدار وزن بوکسیت مؤثر است.

مدول قلیایی محلول بعد از انحلال (α_c) یکی از مهم‌ترین پارامترها برای تعیین مطلوب بودن شرایط فرآیند انحلال می‌باشد و به‌عنوان نقطه هدف قبل از آزمایش تعریف می‌شود که مطابق فرمول (۳-۴) در مقدار وزن بوکسیت نیز مؤثر است. معمولاً مقدار آن بین ۱/۴۵ تا ۱/۴۸ در نظر گرفته می‌شود که در صورت دستیابی به آن در بعد از انحلال نشان می‌دهد که طراحی آزمایش صحیح و کیفیت بوکسیت برای استفاده در فرآیند بایر مناسب است.

وزن آهک موردنیاز بر اساس وزن بوکسیت به‌دست‌آمده که برای هر آزمایش بستگی به مقدار آهک مصرفی (۶، ۸، ۱۰ درصد) داشته محاسبه شد.

حجم محلول برای تمام آزمایش‌ها ۱۰۰ میلی لیتر بوده که با توجه به وزن مخصوص آن محاسبه شد.

۳-۶-۲- نحوه انجام آزمایش

آزمایش‌های انحلال توسط دستگاه اتوکلاو چرخشی القایی در آزمایشگاه تحقیق و توسعه شرکت آلومینای ایران انجام شد (شکل ۵-۳). برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا مواد ورودی که شامل محلول قلیا، بوکسیت و آهک هست به اندازه‌هایی که از قبل محاسبه شده، توسط ترازوی آنالیتیکال (با دقت ۰/۰۱ گرم) وزن شد. مواد توزین شده را درون محفظه‌های اتوکلاو (۲ محفظه) ریخته و سپس محفظه‌ها را

محکم می‌بندیم. محفظه‌ها هرکدام در جای مشخص درون دستگاه اتوکلاو بسته می‌شود. پس از انجام تنظیمات دما، زمان و شیب دمایی دستگاه اتوکلاو را روشن کرده و آزمایش شروع می‌شود بعد از اتمام زمان آزمایش دستگاه خاموش می‌شود، محفظه‌های دستگاه را باز کرده، فاز جامد و مایع را با کاغذ صافی توسط فیلتر خلأ از یکدیگر جدا نموده و هریک به‌طور جداگانه آنالیز شد. البته فاز جامد را قبل از خشک کردن، کاملاً با آب داغ چندین بار شسته و سپس فیلتر شد. در محلول انحلال (آلومینات سدیم) اندازه‌گیری مقادیر Al_2O_3 ، Na_2O_c ، Na_2O_t مدنظر می‌باشد.



شکل ۳-۵: تصویر دستگاه اتوکلاو واحد تحقیق توسعه-شرکت آلومینای ایران

۳-۶-۳- آزمایش‌های انحلال

قبل از آزمایش‌های انحلال روی بوکسیت اختلاط، ابتدا روی هرکدام از نمونه‌ها آزمایش‌های مختلف، مشابه شرایط فعلی فرآیند تولید آلومینای جاجرم، انجام و با تغییر مقدار آهک سعی شد تا برای هرکدام شرایط مناسب فرآیندی و نتایج انحلال آن‌ها مشخص شود. آهک یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر انحلال است و مقدار مصرف آن در فرآیند بستگی به نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده و ترکیب شیمیایی بوکسیت دارد و نقش بقیه پارامترهای دیگر از قبیل دما، غلظت Na_2O محلول و زمان برای

تمام بوکسیت‌های دیاسپوری تقریباً مشابه هم بوده به همین علت در این مرحله از کار مطالعاتی برای هر چهار نمونه از بوکسیت‌های خوراک آزمایش‌های انحلال برای تعیین مقدار بهینه آهک انجام شد. سپس بررسی بیش‌تر پارامترها و تأثیر آن‌ها بر انحلال روی بوکسیت اختلاط یا خوراک کارخانه انجام شد تا شرایط بهینه به‌دست آید که هدف اصلی این تحقیق نیز تعیین مدل بهینه انحلال بوکسیت خوراک کارخانه است.

مقادیر پارامترهای مؤثر بر انحلال بوکسیت در کارخانه آلومینای جاجرم در جدول ۳-۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۳-۱۲: مقادیر عملیاتی پارامترهای مؤثر بر راندمان انحلال

غلظت Na ₂ O محلول (گرم بر لیتر)	دما (سانتی‌گراد)	مقدار آهک اضافه شده (درصد)	زمان ماند (دقیقه)
۱۷۰	۲۷۰	۸-۹	۴۵

در انتهای هر آزمایش پس از تعیین آنالیز شیمیایی گل، راندمان انحلال تئوری و عملی، A/S و N/S مطابق با روابط (۳-۶) و (۳-۷) محاسبه شد.
(۳-۳):

$$\% \eta_{\text{theo}}^1 = [(\text{بوکسیت } \% \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{بوکسیت } \% \text{SiO}_2 - \text{بوکسیت } \% \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{بوکسیت } \% \text{Al}_2\text{O}_3)] \times 100$$

(۳-۴):

$$\% \eta_{\text{act}}^2 = [1 - ((\text{گل } \% \text{SiO}_2 / \text{گل } \% \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{بوکسیت } \% \text{SiO}_2 / \text{بوکسیت } \% \text{Al}_2\text{O}_3))] \times 100$$

هرچقدر اختلاف راندمان تئوری و عملی کمتر باشد نشان‌دهنده مطلوب بودن شرایط انحلال است.

۳-۶-۳-۱- بوکسیت جاجرم

آزمایش‌های انحلال روی بوکسیت جاجرم با مقادیر آهک مختلف انجام شد. شرایط فرآیندی انحلال بوکسیت جاجرم در جدول (۳-۱۳) آمده است.

^۱ راندمان تئوری انحلال - (Efficiency)

^۲ راندمان عملی انحلال - (Efficiency)

جدول ۳-۱۳: شرایط انحلال بوکسیت جاجرم

شماره آزمایش	شرایط انحلال			
	غلظت Na_2O_c محلول	دما	مقدار آهک	زمان
	(گرم بر لیتر)	(درجه سانتی‌گراد)	(درصد)	(دقیقه)
۱	۱۷۰	۲۷۰	۶	۴۵
۲	۱۷۰	۲۷۰	۸	۴۵
۳	۱۷۰	۲۷۰	۱۰	۴۵

۳-۶-۳-۲- بوکسیت تاش

آزمایش‌های انحلال روی بوکسیت تاش با شرایط مختلف انجام شد که شرایط فرآیندی و نتایج انحلال در جدول (۳-۱۴) آمده است.

جدول ۳-۱۴: شرایط و نتایج انحلال بوکسیت تاش

شماره آزمایش	شرایط انحلال			
	غلظت Na_2O_c محلول	دما	مقدار آهک	زمان
	(گرم بر لیتر)	(درجه سانتی‌گراد)	(درصد)	(دقیقه)
۱	۱۷۰	۲۷۰	۶	۴۵
۲	۱۷۰	۲۷۰	۸	۴۵
۳	۱۷۰	۲۷۰	۱۰	۴۵

۳-۳-۶-۳- بوکسیت یزد

آزمایش‌های انحلال روی بوکسیت یزد با شرایط مختلف انجام شد که شرایط نتایج انحلال در جدول (۳-۱۵) آمده است.

جدول ۳-۱۵ شرایط انحلال بوکسیت یزد

شماره آزمایش	شرایط انحلال			
	غلظت Na_2O_c محلول	دما	مقدار آهک	زمان
	(گرم بر لیتر)	(درجه سانتی‌گراد)	(درصد)	(دقیقه)
۱	۱۷۰	۲۷۰	۶	۴۵
۲	۱۷۰	۲۷۰	۸	۴۵
۳	۱۷۰	۲۷۰	۱۰	۴۵
۴	۱۷۰	۲۷۵	۶	۴۵
۵	۱۷۰	۲۷۵	۸	۴۵
۶	۱۷۰	۲۷۵	۱۰	۴۵

۳-۳-۶-۴- بوکسیت شیرین چشمه

آزمایش‌های انحلال روی بوکسیت شیرین چشمه با شرایط مختلف انجام شد که شرایط نتایج انحلال در جدول (۳-۱۶) آمده است.

جدول ۱۶-۳ شرایط و نتایج انحلال بوکسیت شیرین چشمه

شماره آزمایش	شرایط انحلال			
	غلظت Na_2O_c محلول	دما	مقدار آهک	زمان
	(گرم بر لیتر)	(درجه سانتی گراد)	(درصد)	(دقیقه)
۱	۱۷۰	۲۷۰	۶	۴۵
۲	۱۷۰	۲۷۰	۸	۴۵
۳	۱۷۰	۲۷۰	۱۰	۴۵

۳-۶-۴- آزمایش‌های انحلال بر روی بوکسیت اختلاط

آزمایش‌های انحلال روی بوکسیت اختلاط مطابق مراحل زیر طراحی و انجام شد.

۳-۶-۴-۱- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش^۱، مجموعه اقداماتی است که توسط مدل‌سازی و بهینه‌سازی متغیرهای واکنش از طریق روش‌های آماری انجام شده که به منظور افزایش بازدهی محصول بدون افزایش در قیمت آن می‌باشد.

۳-۶-۴-۲- روش سطح پاسخ

روش‌شناسی سطح پاسخ یا به اختصار RSM^2 ، مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی است که رابطه بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل (مورد مطالعه) تعیین می‌کند [۳۲]. این روش در سال

¹ Design Experiment

² Response Surface Methodology

۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون^۱ معرفی شد، تا به امروز نیز از آن به عنوان یکی از ابزارهای طراحی آزمایش استفاده می‌شود. هرچند بسیاری این روش را به عنوان یک شبه‌مدل^۲ می‌دانند.

در روش‌های طراحی آزمایش سنتی، فقط یک عامل به عنوان متغیر در نظر گرفته شده و دیگر عوامل در یک سطح ثابت قرار می‌گرفت که این روش "یک متغیر در یک زمان"^۳ نامیده می‌شود. در این روش اثرات متقابل بین متغیرها مطالعه نمی‌شود و اثرات کامل عوامل در روند بهبود، قابل نمایش نبود. همچنین برای انجام پژوهش، تعداد زیادی آزمایش موردنیاز بود که منجر به افزایش زمان، هزینه و همچنین افزایش مصرف مواد می‌شود.

برای غلبه بر این مشکل، روش سطح پاسخ برای مطالعات بهینه‌سازی توسط باکس و ویلسون ارائه شد و توسط مهندسان، دانشمندان توسعه یافت.

می‌توان مطالعه بهینه‌سازی با استفاده از RSM را به شش مرحله به شرح زیر تقسیم کرد:

- انتخاب متغیرهای مستقل از اثرات عمده بر سیستم از طریق مطالعات غربالگری و تعیین حدود منطقه آزمایش، با توجه به هدف مطالعه و تجربه محقق (طوفان فکری)
- انتخاب طرح آزمایش و انجام آزمایش‌ها با توجه به زمینه آزمایشی انتخاب شده (باکس بنکن، سنترال کامپوزیت، فاکتوریل، تاگوچی، دی اپتیمال و...)
- تحلیل آماری ریاضی از داده‌های تجربی به دست آمده از طریق تابع چندجمله‌ای مناسب (توسط خود نرم‌افزار انجام می‌شود)
- ارزیابی تناسب مدل (r -squared, p -value) نمودارها و ...)
- تأیید لزوم و امکان انجام یک جابجایی در جهت منطقه مطلوب (در صورت بهینه‌شدن یک سمت از بازه)

¹ Box and Wilson

² Metamodel

³ one-variable-at-a-time technique

- به دست آوردن مقادیر بهینه برای هر متغیر مورد مطالعه

دو مدل بسیار مهم عموماً در مدل سازی به کمک RSM مورد استفاده قرار می گیرند که عبارتند از:

(۱) اگر پاسخ به خوبی توسط یک تابع خطی از متغیرهای مستقل مدل شود، آنگاه تابع تقریب مدل مرتبه اول است و تابع می تواند به این صورت نوشته شود:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i + \varepsilon \quad (4-8)$$

(۲) اگر در فرآیند انحنا وجود داشت، آنگاه یک چندجمله ای درجه بالاتر باید استفاده شود، مانند مدل مرتبه دوم:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4-9)$$

که در آن k ، β_0 ، β_i ، x_i و β_{ij} ، β_{ii} و ε به ترتیب نشان دهنده تعداد متغیرها، یک حالت ثابت، ضرایب پارامترهای خطی، متغیر، ضرایب پارامتر درجه دوم، ضرایب پارامترهای اثر متقابل و باقی مانده در ارتباط با آزمایش ها است.

۳-۶-۴-۳- بهینه سازی فاکتورهای مؤثر بر انحلال

در این تحقیق از ۴ فاکتور زمان، دما، غلظت Na_2O محلول و مقدار آهک در سه سطح برای بررسی رابطه آن ها با توابع پاسخ راندمان، A/S^1 و N/S^2 با استفاده از روش RMS در نرم افزار DX7 استفاده شد. جدول (۳-۱۷) سطوح فاکتورها را نشان می دهد. نتایج A/S ، N/S و راندمان انحلال آزمایش های RSM در جدول (۳-۱۸) نشان داده شده است.

جدول ۳-۱۷: سطوح فاکتورهای تأثیرگذار بر راندمان انحلال بوکسیت

فاکتور	دما (سانتی گراد)	غلظت Na_2O (گرم بر لیتر)	زمان انحلال (دقیقه)	مقدار آهک (٪ از تناژ بوکسیت)
سطح فوقانی	۲۷۵	۱۸۰	۶۰	۱۰
سطح میانی	۲۷۰	۱۷۵	۴۵	۸
سطح تحتانی	۲۶۵	۱۷۰	۳۰	۶

¹ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ in red mud

² $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ in red mud

جدول ۳-۱۸: ماتریس CCD و مقادیر واقعی به دست آمده پاسخ‌ها با سطوح مختلف عامل‌ها^۱

شماره آزمایش	عامل‌ها				پاسخ‌ها		
	A: Na ₂ O (گرم بر لیتر)	B: دما (سانتی‌گراد)	C: آهک (درصد)	D: زمان (دقیقه)	R1: A/S	R2: N/S	R3: راندمان (درصد)
۱	۱۷۰	۲۶۵	۶	۳۰	۱/۲۷	۰/۳۴	۶۹/۷۰
۲	۱۸۰	۲۶۵	۶	۳۰	۱/۲۳	۰/۳۳	۷۰/۶۰
۳	۱۷۰	۲۷۵	۶	۳۰	۱/۲۲	۰/۳۴	۷۰/۹۰
۴	۱۸۰	۲۷۵	۶	۳۰	۱/۱۷	۰/۳۱	۷۲/۰۰
۵	۱۷۰	۲۶۵	۱۰	۳۰	۱/۳۵	۰/۲۵	۶۷/۷۰
۶	۱۸۰	۲۶۵	۱۰	۳۰	۱/۳۲	۰/۲۴	۶۸/۴۰
۷	۱۷۰	۲۷۵	۱۰	۳۰	۱/۲۹	۰/۲۳	۶۹/۱۳
۸	۱۸۰	۲۷۵	۱۰	۳۰	۱/۲۵	۰/۲۳	۷۰/۱۱
۹	۱۷۰	۲۶۵	۶	۶۰	۱/۲۵	۰/۳۴	۷۰/۱۷
۱۰	۱۸۰	۲۶۵	۶	۶۰	۱/۲۱	۰/۳۳	۷۱/۱۹
۱۱	۱۷۰	۲۷۵	۶	۶۰	۱/۱۶	۰/۳۲	۷۲/۳۶
۱۲	۱۸۰	۲۷۵	۶	۶۰	۱/۱۲	۰/۳۱	۷۳/۱۵
۱۳	۱۷۰	۲۶۵	۱۰	۶۰	۱/۲۹	۰/۲۴	۶۹/۱۵
۱۴	۱۸۰	۲۶۵	۱۰	۶۰	۱/۲۶	۰/۲۳	۶۹/۸۹
۱۵	۱۷۰	۲۷۵	۱۰	۶۰	۱/۲۵	۰/۲۳	۷۰/۲۰
۱۶	۱۸۰	۲۷۵	۱۰	۶۰	۱/۲۲	۰/۲۳	۷۰/۹۵
۱۷	۱۷۰	۲۷۰	۸	۴۵	۱/۲۵	۰/۳۰	۷۰/۱۱
۱۸	۱۸۰	۲۷۰	۸	۴۵	۱/۲۱	۰/۲۷	۷۱/۱۰
۱۹	۱۷۵	۲۶۵	۸	۴۵	۱/۲۴	۰/۲۸	۷۰/۲۸
۲۰	۱۷۵	۲۷۵	۸	۴۵	۱/۲۰	۰/۲۷	۷۱/۲۱
۲۱	۱۷۵	۲۷۰	۶	۴۵	۱/۱۹	۰/۳۱	۷۱/۴۵
۲۲	۱۷۵	۲۷۰	۱۰	۴۵	۱/۲۶	۰/۲۳	۶۹/۹۰
۲۳	۱۷۵	۲۷۰	۸	۳۰	۱/۲۶	۰/۲۹	۶۹/۸۶
۲۴	۱۷۵	۲۷۰	۸	۶۰	۱/۲۰	۰/۲۶	۷۱/۳۰
۲۵	۱۷۵	۲۷۰	۸	۴۵	۱/۲۱	۰/۲۷	۷۱/۰۶
۲۶	۱۷۵	۲۷۰	۸	۴۵	۱/۲۱	۰/۲۷	۷۱/۰۵
۲۷	۱۷۵	۲۷۰	۸	۴۵	۱/۲۱	۰/۲۷	۷۱/۰۵
۲۸	۱۷۵	۲۷۰	۸	۴۵	۱/۲۲	۰/۲۸	۷۰/۸۲
۲۹	۱۷۵	۲۷۰	۸	۴۵	۱/۲۲	۰/۲۸	۷۰/۸۱
۳۰	۱۷۵	۲۷۰	۸	۴۵	۱/۲۲	۰/۲۸	۷۰/۸۰

^۱ Factors

۳-۶-۴-۴- ملاک انتخاب سطوح فاکتورهای مؤثر بر انحلال

مطالعات نشان داده است که محدوده بهینه دما، زمان، غلظت Na_2O محلول و مقدار آهک برای انحلال بوکسیت‌های دیاسپوری به ترتیب $250-310$ درجه سانتی‌گراد، $5-120$ دقیقه، $140-200$ گرم بر لیتر و $30-40$ درصد وزنی بوکسیت است. سطوح فاکتورهای مؤثر بر راندمان انحلال بوکسیت با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی فرآیند و مطالعات پیشین تعیین شد. حداکثر مقدار سطح هر 4 فاکتور با توجه به طراحی کارخانه و مشخصات بوکسیت و ظرفیت تجهیزات موجود و برنامه تولید انتخاب شد. محدودیت‌های عملیاتی برای پارامترهای مؤثر بر انحلال به شرح ذیل می‌باشد:

الف) غلظت Na_2O محلول: رنج غلظت Na_2O محلول بین 170 تا 180 گرم بر لیتر در نظر گرفته شد. غلظت بالاتر از این باعث افزایش میزان مواد جامد شده که باعث بالآمدن سطح گل قرمز در تیکنرها و کاهش سرعت ته‌نشینی شده و همچنین به دلیل بالا بودن دما در واحد انحلال افزایش غلظت سبب افزایش میزان خوردگی لوله‌ها و تجهیزات می‌شود.

ب) دما: رنج دمای انحلال بین 265 تا 275 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. دمای بالاتر سبب بالا رفتن دمای داخل کوره‌های انحلال شده که باعث سوراخ شدگی لوله‌ها می‌شود و همچنین دمای بالا باعث افزایش حجم دوغاب شده که در این صورت به‌ناچار بایستی دبی دوغاب را کاهش داده که این باعث کاهش تولید خواهد شد.

ج) آهک: رنج میزان آهک مصرفی بین 6 تا 10 درصد وزنی بوکسیت در نظر گرفته شد. آهک بالاتر باعث افزایش میزان جامد شده که کنترل ته‌نشینی و فیلتر کردن گل را سخت خواهد کرد و همچنین آهک کمتر از این مقدار نیز باعث افزایش تلفات سود در گل خواهد شد که بازیابی همه مقادیر آن امکان‌پذیر نیست و هزینه سود مصرفی را زیاد خواهد کرد.

د) زمان: رنج میزان زمان ماند بین 30 تا 60 دقیقه در نظر گرفته شد. با توجه به حجم راکتورها و مخازن موجود در قسمت انحلال در شرایط فعلی امکان افزایش زمان ماند نیست.

فصل ۴

نتایج و بحث

۴-۱- مقدمه

در فرآیند انحلال بوکسیت به روش بایر عوامل متعددی می‌توانند در بهبود انحلال نقش داشته باشند که شناخت و میزان تأثیر آن‌ها می‌تواند اطلاعات باارزشی در این مورد حاصل کند. به همین منظور، تأثیر پارامترهای مهم از قبیل غلظت Na_2O محلول، دما، مقدار آهک و زمان در فرآیند انحلال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۲- بررسی انحلال بوکسیت‌های جاجرم، تاش، یزد و شیرین چشمه

به منظور بهینه‌کردن پارامترهای عملیاتی انحلال بوکسیت خوراک کارخانه آلومینای جاجرم ابتدا یک سری آزمایش‌ها تحت شرایط مختلف روی بوکسیت‌های جاجرم، تاش، یزد و شیرین چشمه به‌طور جداگانه انجام شد تا شرایط بهینه فرآیندی هر کدام به دست آید. نتایج آزمایش‌ها در جداول (۴-۱) تا (۴-۸) نشان داده شده است. در ضمن نتایج کامل آنالیز گل در پیوست ۲ آمده است.

۴-۲-۱- بوکسیت جاجرم

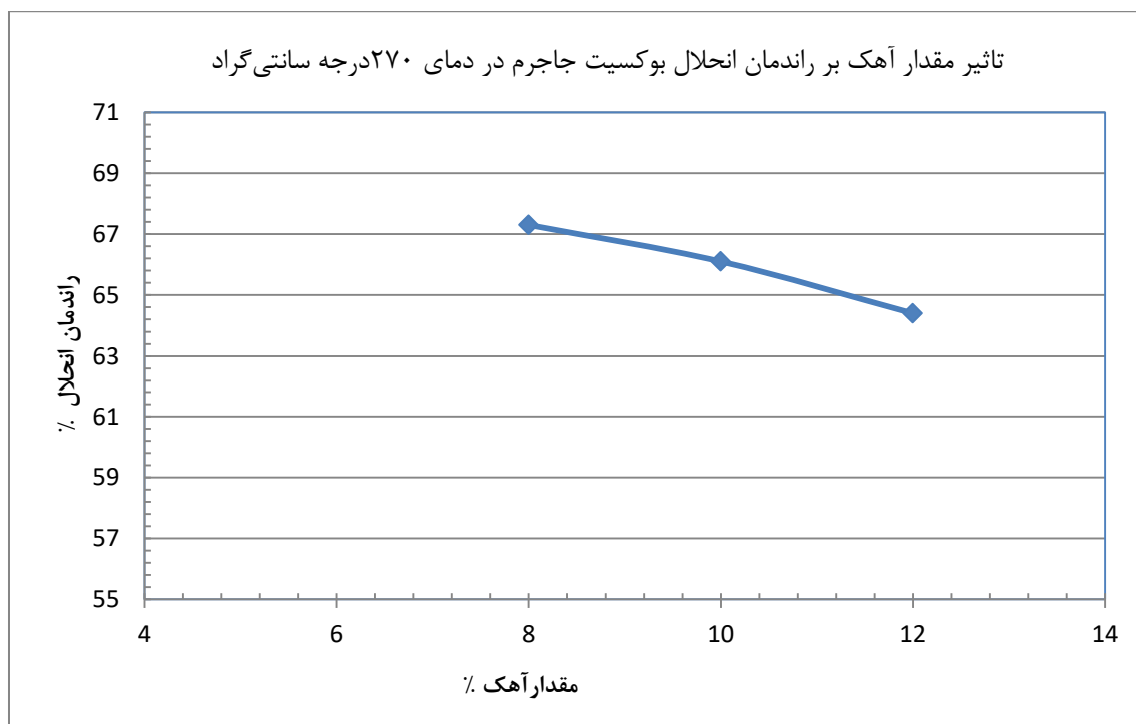
نتایج آزمایش‌های انحلال بوکسیت جاجرم، بررسی و تجزیه و تحلیل آن به شرح ذیل می‌باشد:

جدول ۴-۱: نتایج راندمان، A/S و N/S بوکسیت جاجرم در شرایط آهک متفاوت

شماره آزمایش	شرایط انحلال				نتایج انحلال			
	غلظت Na_2O_c	دما	آهک	زمان	A/S	N/S	R_{theo}	R_{act}
	(گرم بر لیتر)	(درجه سانتی‌گراد)	(درصد)	(دقیقه)	-	-	(درصد)	(درصد)
۱	۱۷۰	۲۷۰	۸	۴۵	۱/۲۰	۰/۴۲	۷۲/۸۷	۶۷/۳
۲	۱۷۰	۲۷۰	۱۰	۴۵	۱/۲۵	۰/۳۵	۷۲/۸۷	۶۶/۱
۳	۱۷۰	۲۷۰	۱۲	۴۵	۱/۳۱	۰/۳۳	۷۲/۸۷	۶۴/۴

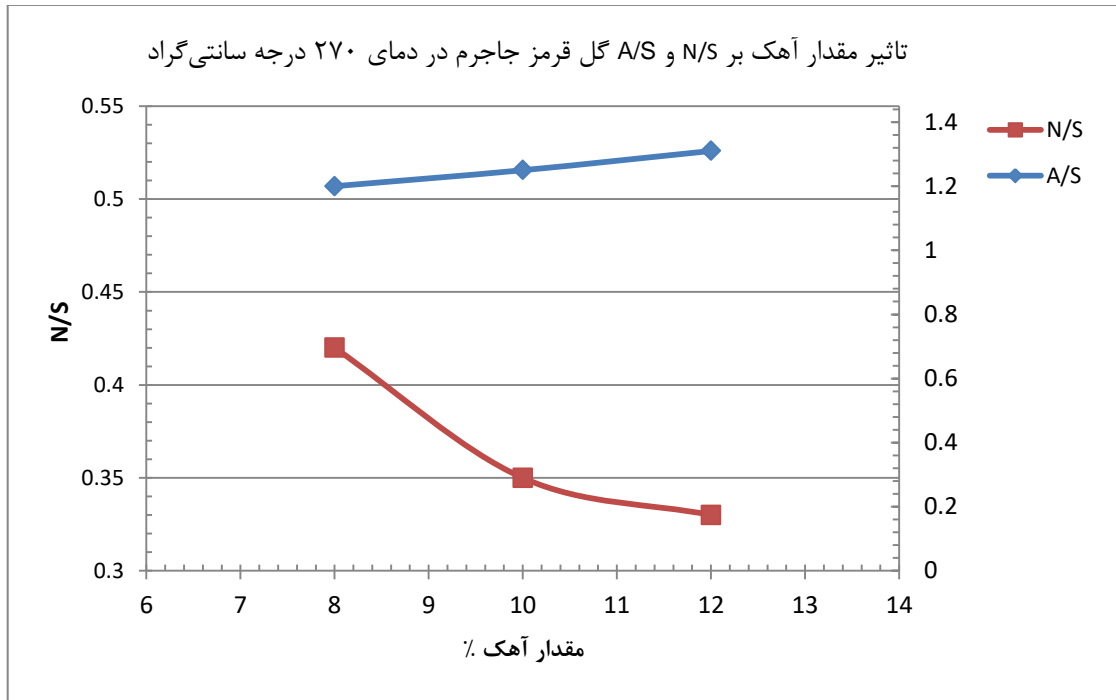
جدول ۴-۲: نتایج گل قرمز و محلول بعد از انحلال

شماره آزمایش	آنالیز گل			آنالیز محلول بعد از انحلال		
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	Na ₂ O _c	Al ₂ O ₃	Na ₂ O _t
	(درصد)	(درصد)	(درصد)	(گرم بر لیتر)	(گرم بر لیتر)	(گرم بر لیتر)
۱	۱۷/۹۸	۱۴/۹۳	۶/۲۵	۱۵۰/۷	۱۶۷/۸	۱۷۵/۸
۲	۱۸/۱۷	۱۴/۵۳	۵/۰۹	۱۵۱/۹	۱۶۸/۳	۱۷۶/۷
۳	۱۸/۳۵	۱۳/۹۸	۴/۶۰	۱۵۲/۵	۱۶۷/۵	۱۷۷/۲



نمودار ۴-۱: تاثیر مقدار آهک بر راندمان انحلال با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی

همان‌طور که از نمودار (۱-۴) مشخص است راندمان انحلال بوکسیت جاجرم در مقدار آهک ۸٪ دارای بیش‌ترین مقدار یعنی ۶۷/۳٪ است و با افزایش آهک از ۸ درصد میزان راندمان کاهش یافته است.



نمودار ۲-۴: تأثیر مقدار آهک بر مقادیر A/S و N/S با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی

همان‌طور که از نمودار (۲-۴) مشخص است کم‌ترین مقدار A/S گل جاجرم با مقدار آهک ۸ درصد برابر ۱/۲۰ است و با افزایش آهک از ۸ درصد مقدار A/S افزایش یافته است. همچنین کم‌ترین مقدار N/S گل جاجرم با مقدار آهک ۱۲ درصد برابر ۰/۳۳ است و با کاهش آهک از ۸ درصد مقدار N/S افزایش یافته است.

با توجه به این که مطلوب‌ترین شرایط انحلال، بیش‌ترین مقدار راندمان و کم‌ترین مقادیر A/S و N/S است، بنابراین مقدار بهینه آهک برای دستیابی به شرایط بهینه انحلال بوکسیت جاجرم در دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد، غلظت Na_2O برابر ۱۷۰ گرم بر لیتر و زمان ۴۵ دقیقه، مقدار آهک ۱۰ درصد است.

۲-۲-۴- بوکسیت تاش

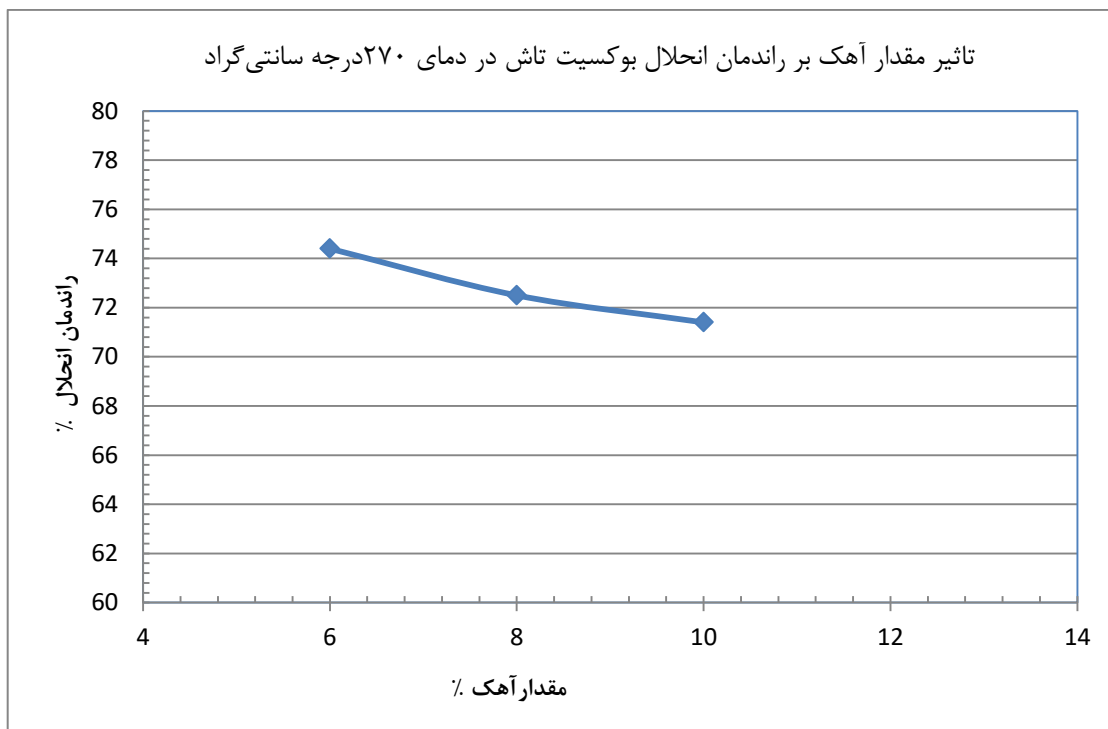
نتایج آزمایش‌های انحلال بوکسیت تاش، بررسی و تجزیه و تحلیل آن به شرح ذیل می‌باشد:

جدول ۳-۴: نتایج آزمایش‌های انحلال بوکسیت تاش

شماره آزمایش	شرایط انحلال				نتایج انحلال			
	غلظت Na ₂ O _c	دما	آهک	زمان	A/S	N/S	R _{theo}	R _{act}
	(گرم بر لیتر)	(درجه سانتی‌گراد)	(درصد)	(دقیقه)	-	-	(درصد)	(درصد)
۱	۱۷۰	۲۷۰	۶	۴۵	۱/۱۴	۰/۲۷	۷۷/۴۷	۷۴/۴
۲	۱۷۰	۲۷۰	۸	۴۵	۱/۲۲	۰/۲۶	۷۷/۴۷	۷۲/۵
۳	۱۷۰	۲۷۰	۱۰	۴۵	۱/۲۷	۰/۲۴	۷۷/۴۷	۷۱/۴

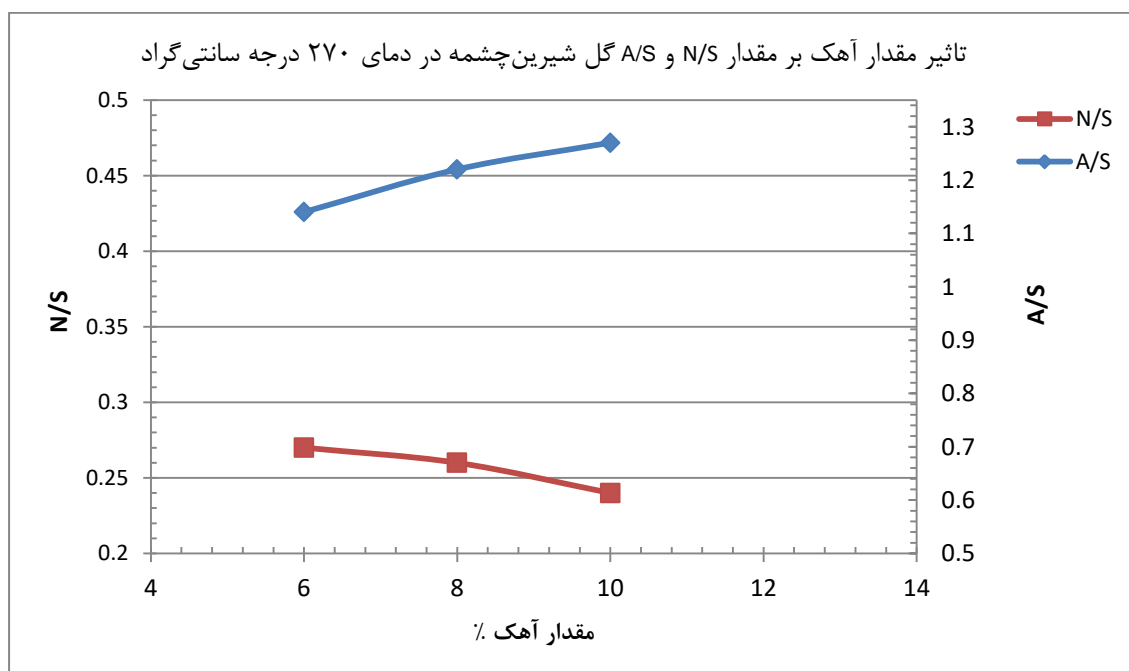
جدول ۴-۴: نتایج گل قرمز و محلول بعد از انحلال

شماره آزمایش	آنالیز گل			آنالیز محلول بعد از انحلال		
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	Na ₂ O _c	Al ₂ O ₃	Na ₂ O _t
	(درصد)	(درصد)	(درصد)	(گرم بر لیتر)	(گرم بر لیتر)	(گرم بر لیتر)
۱	۱۷/۲۲	۱۵/۱۳	۴/۱۱	۱۵۲/۵	۱۷۰/۳	۱۷۷/۹
۲	۱۷/۲۵	۱۴/۱۲	۳/۶۸	۱۵۳/۱	۱۷۰/۱	۱۷۸/۱
۳	۱۶/۳۱	۱۲/۸۴	۳/۰۲	۱۵۳/۱	۱۶۹/۱	۱۷۸/۱



نمودار ۳-۴: تأثیر مقدار آهک بر راندمان انحلال با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی

همان‌طور که از نمودار (۳-۴) مشخص است راندمان انحلال بوکسیت تاش با مقدار آهک ۶٪ دارای بیش‌ترین مقدار یعنی ۷۴/۴٪ است و با افزایش آهک از ۶ درصد میزان راندمان کاهش یافته است.



نمودار ۴-۴: تأثیر مقدار آهک بر مقادیر A/S و N/S با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی

همان طور که از نمودار (۴-۴) مشخص است کمترین مقدار A/S گل تاش با مقدار آهک ۶ درصد برابر ۱/۱۴ است و با افزایش آهک از ۶ درصد مقدار A/S افزایش یافته است. همچنین کمترین مقدار N/S گل تاش با مقدار آهک ۱۰ درصد برابر ۰/۲۴ است و با کاهش آهک از ۱۰ درصد مقدار N/S افزایش یافته است.

با توجه به این که مطلوبترین شرایط انحلال، بیشترین مقدار راندمان و کمترین مقادیر A/S و N/S است، بنابراین مقدار بهینه آهک برای دستیابی به شرایط بهینه انحلال بوکسیت تاش در دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد، غلظت Na₂O برابر ۱۷۰ گرم بر لیتر و زمان ۴۵ دقیقه، مقدار آهک ۶ درصد است.

۴-۲-۳- بوکسیت یزد

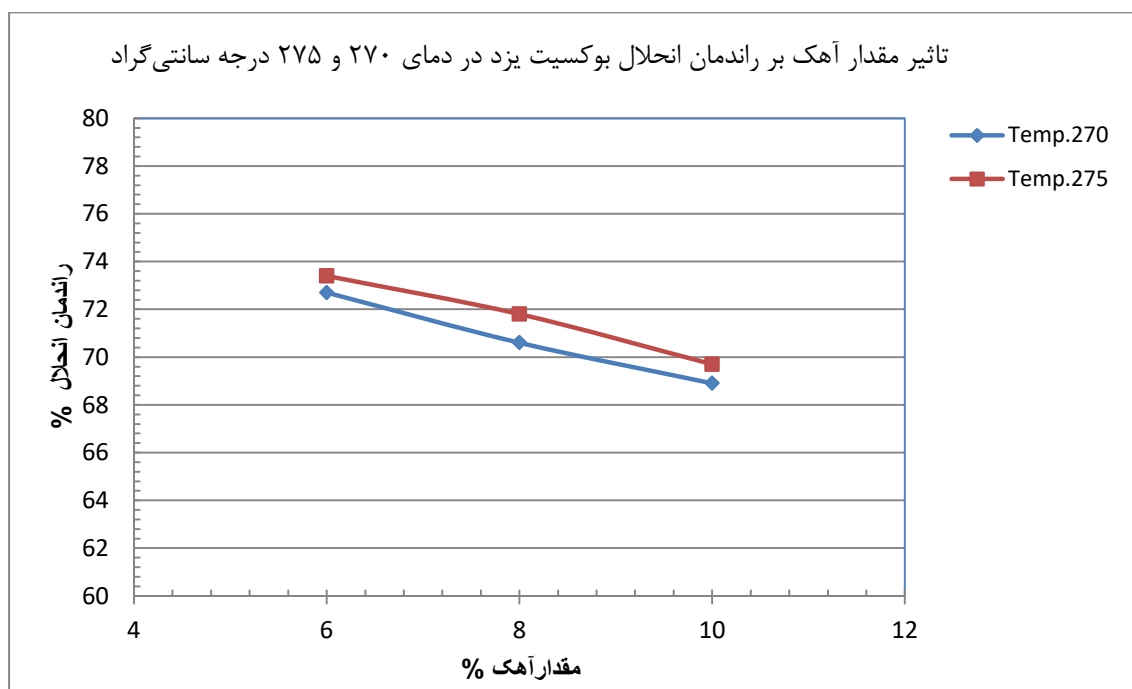
نتایج آزمایش‌های انحلال بوکسیت یزد، بررسی و تجزیه و تحلیل آن به شرح ذیل می‌باشد:

جدول ۴-۵: شرایط و نتایج انحلال بوکسیت یزد

شماره آزمایش	شرایط انحلال				نتایج انحلال			
	غلظت Na ₂ O _e	دما	آهک	زمان	A/S	N/S	R _{theo}	R _{act}
	(گرم بر لیتر)	(درجه سانتی‌گراد)	(درصد)	(دقیقه)	-	-	(درصد)	(درصد)
۱	۱۷۰	۲۷۰	۶	۴۵	۱/۲۹	۰/۲۵	۷۸/۸۳	۷۲/۷
۲	۱۷۰	۲۷۰	۸	۴۵	۱/۳۹	۰/۲۲	۷۸/۸۳	۷۰/۰۶
۳	۱۷۰	۲۷۰	۱۰	۴۵	۱/۴۷	۰/۲۱	۷۸/۸۳	۶۸/۹
۴	۱۷۰	۲۷۵	۶	۴۵	۱/۲۶	۰/۲۵	۷۸/۸۳	۷۳/۷
۵	۱۷۰	۲۷۵	۸	۴۵	۱/۳۳	۰/۲۲	۷۸/۸۳	۷۱/۸
۶	۱۷۰	۲۷۵	۱۰	۴۵	۱/۴۳	۰/۲۰	۷۸/۸۳	۶۹/۷

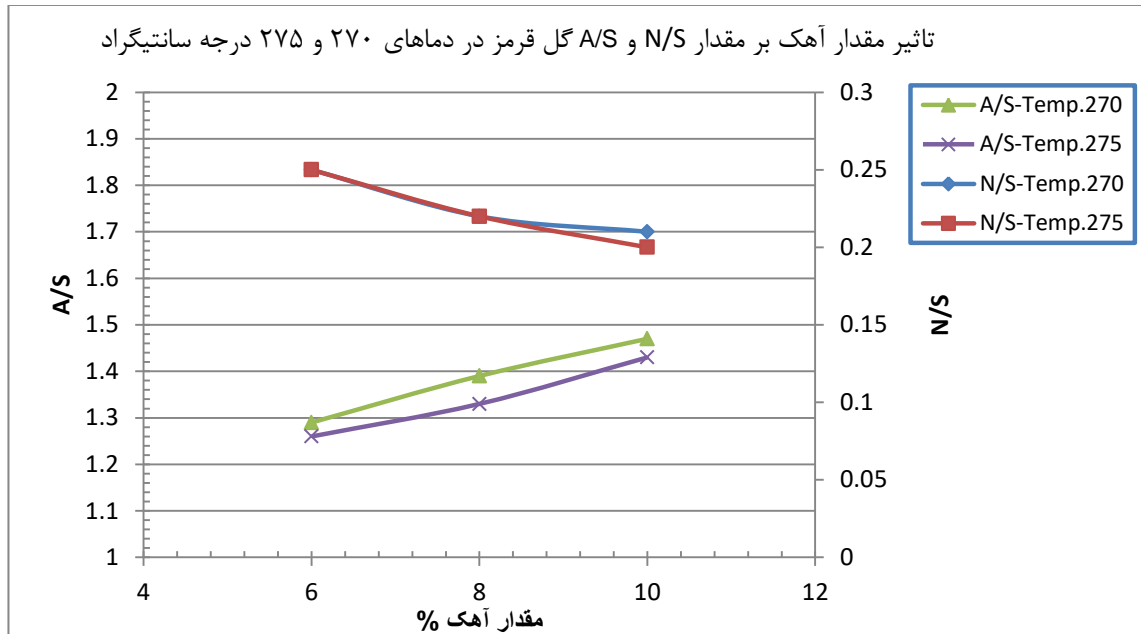
جدول ۴-۶: نتایج گل قرمز و محلول بعد از انحلال

شماره آزمایش	آنالیز گل			آنالیز محلول بعد از انحلال		
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	Na ₂ O _c	Al ₂ O ₃	Na ₂ O _t
	(درصد)	(درصد)	(درصد)	(گرم بر لیتر)	(گرم بر لیتر)	(گرم بر لیتر)
۱	۱۴/۱۴	۱۰/۹۶	۲/۷۶	۱۵۲/۵	۱۶۸/۳	۱۷۷/۹
۲	۱۵/۸۵	۱۱/۴۲	۲/۴۷	۱۵۱/۳	۱۶۶/۰	۱۷۶/۴
۳	۱۶/۸۵	۱۱/۴۶	۲/۴۲	۱۵۱/۳	۱۶۵/۸	۱۷۶/۴
۴	۱۳/۹۴	۱۱/۱۰	۲/۸۲	۱۵۱/۳	۱۶۸/۸	۱۷۶/۴
۵	۱۵/۹۶	۱۱/۹۷	۲/۶۹	۱۵۱/۹	۱۶۷/۳	۱۷۶/۷
۶	۱۶/۲۴	۱۱/۳۴	۲/۲۴	۱۵۲/۵	۱۶۷/۰	۱۷۷/۵



نمودار ۴-۵: تأثیر مقدار آهک بر راندمان انحلال با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی

همان طور که از نمودار (۴-۵) مشخص است راندمان انحلال بوکسیت یزد در دمای ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد و مقدار آهک ۶٪ دارای بیش‌ترین مقدار یعنی ۷/۷۳٪ است و با افزایش آهک از ۶ درصد میزان راندمان کاهش یافته است.



نمودار ۴-۶: تأثیر مقدار آهک بر مقادیر A/S و N/S با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی

همان طور که از نمودار (۴-۶) مشخص است کم‌ترین مقدار A/S گل یزد در دمای ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد و مقدار آهک ۶ درصد برابر ۱/۲۶ است و با افزایش آهک از ۶ درصد مقدار A/S افزایش یافته است. همچنین کم‌ترین مقدار N/S گل یزد در مقدار آهک ۱۰ درصد برابر ۰/۲۰ است و با کاهش آهک از ۱۰ درصد مقدار N/S افزایش یافته است.

با توجه به این که مطلوب‌ترین شرایط انحلال، بیش‌ترین مقدار راندمان و کم‌ترین مقادیر A/S و N/S است، بنابراین مقدار بهینه آهک برای دستیابی به شرایط بهینه انحلال بوکسیت یزد در غلظت Na_2O برابر ۱۷۰ گرم بر لیتر و زمان ۴۵ دقیقه، دمای ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد و مقدار آهک ۶ درصد است.

۴-۲-۴- بوکسیت شیرین چشمه

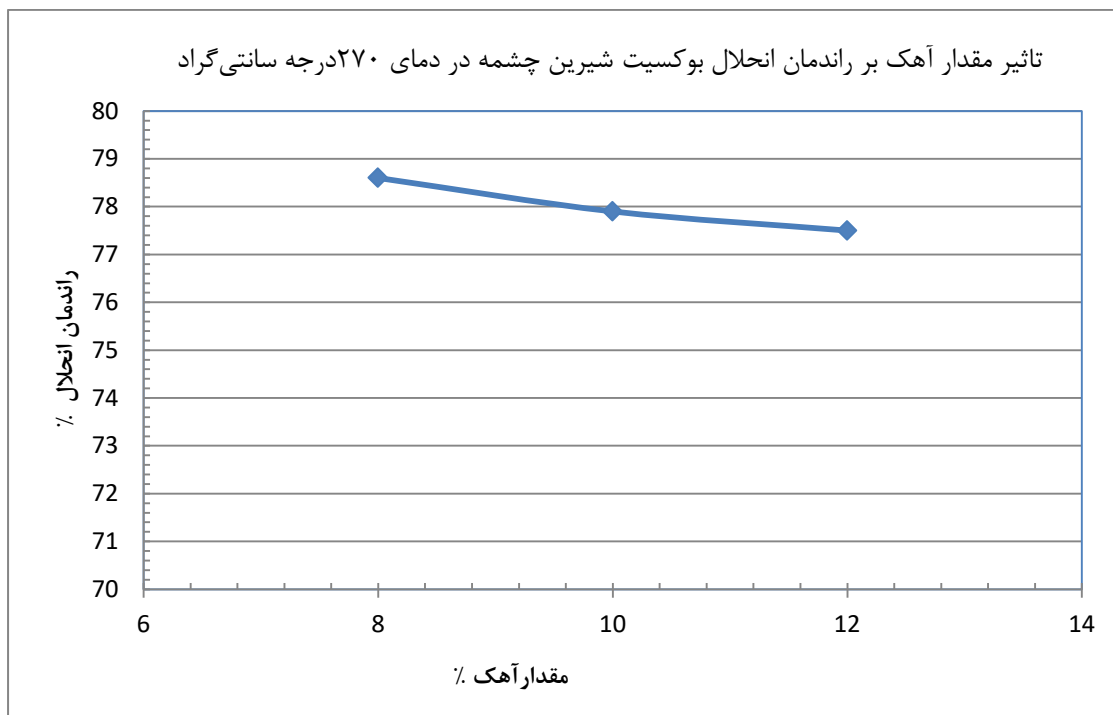
نتایج آزمایش‌های انحلال بوکسیت شیرین چشمه، بررسی و تجزیه و تحلیل آن به شرح ذیل می‌باشد.

جدول ۴-۷: نتایج آزمایش‌های انحلال بوکسیت شیرین چشمه

شماره آزمایش	شرایط انحلال				نتایج انحلال			
	غلظت Na_2O_c	دما	آهک	زمان	A/S	N/S	R_{theo}	R_{act}
	(گرم بر لیتر) ()	(درجه) سانتی‌گراد ()	(درصد)	(دقیقه)	-	-	(درصد)	(درصد)
۱	۱۷۰	۲۷۰	۸	۴۵	۱/۱۵	۰/۴۴	۸۱/۳۷	۷۸/۶
۲	۱۷۰	۲۷۰	۱۰	۴۵	۱/۱۹	۰/۳۹	۸۱/۳۷	۷۷/۹
۳	۱۷۰	۲۷۰	۱۲	۴۵	۱/۲۱	۰/۳۶	۸۱/۳۷	۷۷/۵

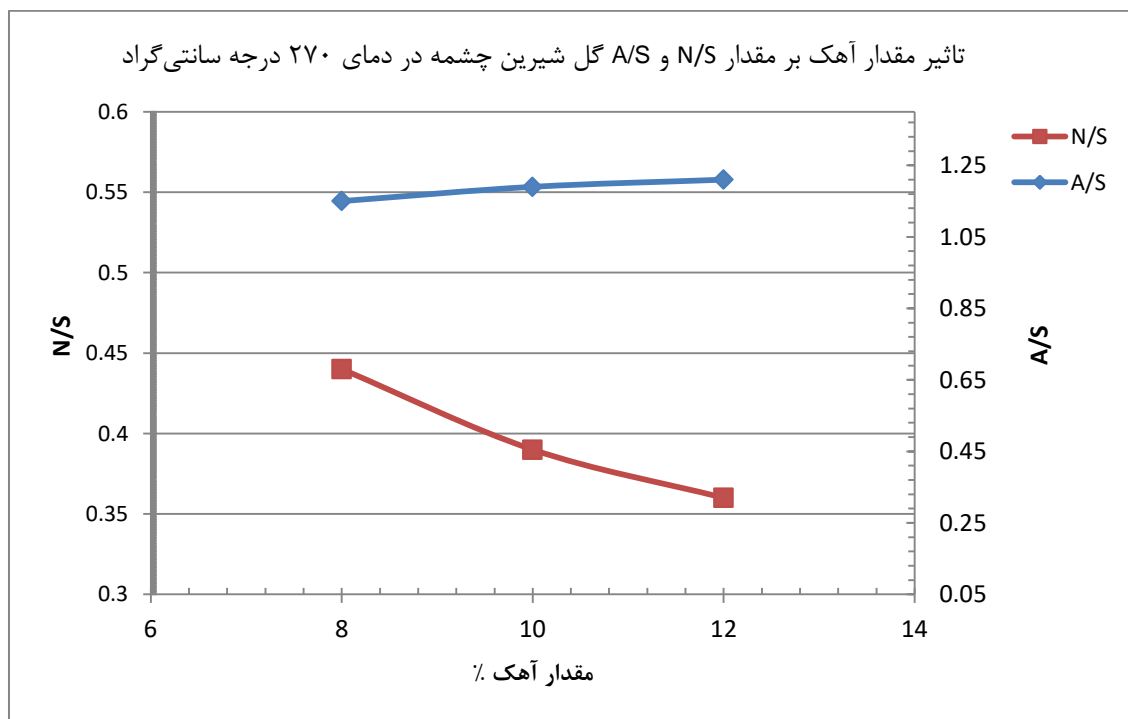
جدول ۴-۸: نتایج گل قرمز و محلول بعد از انحلال

شماره آزمایش	آنالیز گل			آنالیز محلول بعد از انحلال		
	Al_2O_3	SiO_2	Na_2O	Na_2O_c	Al_2O_3	Na_2O_t
	(درصد)	(درصد)	(درصد)	(گرم بر لیتر)	(گرم بر لیتر)	(گرم بر لیتر)
۱	۱۷/۹۳	۱۵/۶۴	۶/۸۶	۱۵۱/۹	۱۷۰/۱	۱۷۶/۹
۲	۱۸/۲۳	۱۵/۳۶	۵/۹۳	۱۵۲/۵	۱۶۹/۶	۱۷۷/۲
۳	۱۸/۰۷	۱۴/۹۶	۵/۳۳	۱۵۳/۱	۱۶۹/۱	۱۷۷/۵



نمودار ۴-۷: تأثیر مقدار آهک بر راندمان انحلال با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی

همان‌طور که از نمودار (۴-۷) مشخص است راندمان انحلال بوکسیت شیرین چشمه با مقدار آهک ۸٪ دارای بیشترین مقدار یعنی ۷۸/۶٪ است و با افزایش آهک از ۸ درصد میزان راندمان کاهش یافته است.



نمودار ۴-۸: تأثیر مقدار آهک بر مقادیر A/S و N/S با ثابت بودن بقیه پارامترهای عملیاتی

همان‌طور که از نمودار (۴-۸) مشخص است در مقدار آهک ۸ درصد، مقدار A/S گل شیرین‌چشمه دارای کم‌ترین مقدار یعنی ۱/۱۵ است و با افزایش آهک از ۸ درصد مقدار A/S افزایش یافته است. همچنین در مقدار آهک ۱۲ درصد، مقدار N/S گل شیرین‌چشمه دارای کم‌ترین مقدار یعنی ۰/۳۶ است و با کاهش آهک از ۱۲ درصد مقدار N/S افزایش یافته است.

مقدار بهینه آهک برای دستیابی به شرایط بهینه انحلال بوکسیت شیرین‌چشمه در غلظت Na_2O برابر ۱۷۰ گرم بر لیتر، زمان ۴۵ دقیقه و دمای ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد، برابر ۱۲ درصد است.

۴-۳- بوکسیت اختلاط

بعد از بررسی شرایط انحلال هر کدام از ۴ بوکسیت جاجرم، تاش، یزد و شیرین‌چشمه در این مبحث نتایج آزمایش‌ها و شرایط انحلال بوکسیت اختلاط مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج آنالیزهای گل بوکسیت اختلاط در پیوست شماره ۲ آمده است. نتایج محلول بعد از انحلال آزمایش‌های انجام شده بر روی بوکسیت اختلاط در شرایط مختلف در جدول (۴-۹) نشان داده شده است.

جدول ۴-۹: شرایط آزمایش‌ها و آنالیز محلول بعد از انحلال

شماره آزمایش	عامل‌ها				مشخصات محلول			
	A: Na ₂ O _c	B: دما	C: آهک	D: زمان	Na ₂ O _c	Al ₂ O ₃	Na ₂ O _t	α
	(گرم بر لیتر)	(درجه سانتی‌گراد)	(%)	(دقیقه)	(گرم بر لیتر)	(گرم بر لیتر)	(گرم بر لیتر)	
۱	۱۷۰	۲۶۵	۶	۳۰	۱۵۱/۹	۱۶۶/۳	۱۷۷/۳	۱/۵۰
۲	۱۸۰	۲۶۵	۶	۳۰	۱۶۰/۶	۱۷۵/۷	۱۸۶/۵	۱/۵۰
۳	۱۷۰	۲۷۵	۶	۳۰	۱۵۱/۹	۱۶۷/۵	۱۷۷/۲	۱/۴۹
۴	۱۸۰	۲۷۵	۶	۳۰	۱۵۹/۳	۱۷۶/۷	۱۸۵/۹	۱/۴۸
۵	۱۷۰	۲۶۵	۱۰	۳۰	۱۵۲/۵	۱۶۶/۸	۱۷۸/۳	۱/۵۰
۶	۱۸۰	۲۶۵	۱۰	۳۰	۱۶۱/۲	۱۷۶/۲	۱۸۷/۴	۱/۵۰
۷	۱۷۰	۲۷۵	۱۰	۳۰	۱۵۳/۱	۱۶۷/۸	۱۷۸/۹	۱/۵۰
۸	۱۸۰	۲۷۵	۱۰	۳۰	۱۶۱/۲	۱۷۷/۵	۱۸۷/۲	۱/۴۹
۹	۱۷۰	۲۶۵	۶	۶۰	۱۵۱/۹	۱۶۷/۸	۱۷۷/۶	۱/۴۹
۱۰	۱۸۰	۲۶۵	۶	۶۰	۱۵۹/۳	۱۷۵/۷	۱۸۵/۲	۱/۴۹
۱۱	۱۷۰	۲۷۵	۶	۶۰	۱۵۱/۹	۱۶۹/۱	۱۷۷/۵	۱/۴۸
۱۲	۱۸۰	۲۷۵	۶	۶۰	۱۵۸/۱	۱۷۶/۷	۱۸۴/۰	۱/۴۷
۱۳	۱۷۰	۲۶۵	۱۰	۶۰	۱۵۲/۵	۱۶۷/۰	۱۷۷/۵	۱/۵۰
۱۴	۱۸۰	۲۶۵	۱۰	۶۰	۱۶۰/۶	۱۷۵/۷	۱۸۶/۵	۱/۵۰
۱۵	۱۷۰	۲۷۵	۱۰	۶۰	۱۵۱/۹	۱۶۷/۵	۱۷۷/۸	۱/۴۹
۱۶	۱۸۰	۲۷۵	۱۰	۶۰	۱۶۰/۶	۱۷۷/۰	۱۸۶/۳	۱/۴۹
۱۷	۱۷۰	۲۷۰	۸	۴۵	۱۵۳/۱	۱۶۸/۸	۱۷۸/۳	۱/۴۹
۱۸	۱۸۰	۲۷۰	۸	۴۵	۱۶۰/۰	۱۷۶/۷	۱۸۵/۲	۱/۴۹
۱۹	۱۷۵	۲۶۵	۸	۴۵	۱۵۶/۹	۱۷۳/۴	۱۸۲/۳	۱/۴۹
۲۰	۱۷۵	۲۷۵	۸	۴۵	۱۵۶/۲	۱۷۲/۶	۱۸۵/۵	۱/۴۹
۲۱	۱۷۵	۲۷۰	۶	۴۵	۱۵۳/۱	۱۶۹/۸	۱۷۸/۹	۱/۴۸
۲۲	۱۷۵	۲۷۰	۱۰	۴۵	۱۵۶/۹	۱۷۳/۷	۱۸۲/۷	۱/۴۹
۲۳	۱۷۵	۲۷۰	۸	۳۰	۱۵۶/۲	۱۷۲/۱	۱۸۱/۸	۱/۴۹
۲۴	۱۷۵	۲۷۰	۸	۶۰	۱۵۶/۲	۱۷۳/۹	۱۸۲/۰	۱/۴۸
۲۵	۱۷۵	۲۷۰	۸	۴۵	۱۵۵/۶	۱۷۲/۶	۱۸۱/۵	۱/۴۸
۲۶	۱۷۵	۲۷۰	۸	۴۵	۱۵۴/۴	۱۷۱/۱	۱۷۹/۳	۱/۴۸
۲۷	۱۷۵	۲۷۰	۸	۴۵	۱۵۵/۶	۱۷۲/۶	۱۸۰/۹	۱/۴۸
۲۸	۱۷۵	۲۷۰	۸	۴۵	۱۵۵/۰	۱۷۱/۹	۱۸۰/۱	۱/۴۸
۲۹	۱۷۵	۲۷۰	۸	۴۵	۱۵۵/۰	۱۷۱/۹	۱۸۰/۷	۱/۴۸
۳۰	۱۷۵	۲۷۰	۸	۴۵	۱۵۴/۴	۱۷۱/۶	۱۷۹/۶	۱/۴۸

همان‌طور که در جدول (۴-۹) مشخص است، مدول قلیایی محلول تمام آزمایش‌ها بین ۱/۴۷ تا ۱/۵۰ است که در آزمایش‌های با راندمان بالا مقدار آن کم‌تر از آزمایش‌های با راندمان پایین بوده که این نتیجه نشان‌دهنده صحت آنالیزها و تأیید آزمایش‌ها است. در جدول شماره (۴-۱۰) نتیجه آنالیز محلول بعد از انحلال آزمایش مدل بهینه آمده است:

جدول ۴-۱۰ نتایج محلول بعد از انحلال در شرایط مدل بهینه پیشنهادی

نمونه	Na ₂ O _c (گرم بر لیتر)	Al ₂ O ₃ (گرم بر لیتر)	Na ₂ O _t (گرم بر لیتر)	α
محلول بهینه	۱۵۸/۷	۱۷۶/۵	۱۸۴/۱	۱/۴۸

۴-۳-۱- تجزیه و تحلیل داده‌های بوکسیت اختلاط

داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های انحلال بوکسیت به روش بایر برای تعیین اثرات اصلی و متقابل معنی‌دار توسط تحلیل واریانس^۱ ANOVA در سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب اثرات معنی‌دار و غیرمعنی‌دار به منظور دستیابی به بهترین مدل رگرسیون توصیف‌کننده راندمان انحلال، A/S و N/S مورد بررسی قرار گرفت.

۴-۳-۲- برازش مدل

ملاحظه شد که مدل کاهش یافته درجه دوم بیش‌ترین برازش را بر نتایج آزمایشگاهی راندمان انحلال و A/S دارد در حالی که مدل خطی بهترین توصیف برای N/S است. با توجه به سطح اطمینان ۹۵ درصدی مورد نظر ضرایب با مقادیر P^۲ بزرگ‌تر از ۰/۰۵ از مدل حذف شدند. محدوده C.I نمودار Box Cox برای سه پاسخ راندمان انحلال، N/S و A/S در جدول (۴-۱۱) نشان داده شده است. تبدیل مدل‌ها به نحوی انتخاب شد تا Lambda در محدوده مورد پذیرش نمودار Box Cox قرار گیرد.

^۱ Analysis of Variance

^۲ P-Values

بدین ترتیب تنها برای N/S از تبدیل جذر معکوس با لامبدا برابر با ۰/۵- استفاده شد. روابط (۱-۴) تا (۳-۴) از ۳۰ آزمایش انحلال با استفاده از نرم افزار DX7 به دست آمد.

جدول ۱۱-۴: محدوده C.I نمودار Box Cox

پاسخ	حد پایین	حد بالا
راندمان	-۶/۷۵	۵/۱۷
N/S	-۱/۵۵	۰/۸۸
A/S	-۲/۰۲	۴/۰۵

(۱-۴):

$$\text{Efficiency} = +70.84 + 0.44 \times A + 0.72 \times B - 0.89 \times C + 0.55 \times D - 0.23 \times A^2 - 0.26 \times D^2$$

(۲-۴):

$$A/S = +1.22 - 0.019 \times A - 0.030 \times B + 0.037 \times C - 0.022 \times D + 5 \times 10^{-3} \times B \times C + 0.012 \times A^2 + 0.012 \times D^2$$

(۳-۴):

$$1.0/\text{Sqrt}(N/S) = +1.91 + 0.019 \times A + 0.021 \times B + 0.16 \times C + 0.013 \times D$$

همان طور که از رابطه (۱-۴) مشخص است مقدار آهک و دما بیشترین تأثیر را بر راندمان انحلال داشته است. همچنین مدل تجربی نشان می دهد که فاکتورها تأثیر متقابلی بر راندمان انحلال ندارند. تأثیر منفی غلظت آهک بر راندمان انحلال مشهود است.

نتایج آنالیز واریانس مدل های به دست آمده برای راندمان انحلال در جدول (۱۲-۴) نشان داده شده است. P-Value مدل ها نشان می دهد که آنها در سطح کمتر از ۰/۰۵ درصد معنی دار هستند. البته P-Value مربوط به A^2 برابر ۰/۰۶۹۵ است و احتمالاً به دلیل این که مقدار آن نزدیک به ۰/۰۵ بوده توسط نرم افزار حذف نشده و همچنین به خاطر این که در مدل A/S نیز وجود دارد و این دو پاسخ

باهم رابطه دارند بهتراست حذف نشود. علاوه بر این عدم برازش^۱ مدل‌ها بزرگ‌تر از ۰/۰۵ و غیر معنی‌دار بود که نشان‌دهنده تناسب برازش است. همان‌طور که در جدول (۴-۱۲) ملاحظه می‌شود عدم برازش داده‌ها و خلاصه تجزیه تحلیل آماری برای راندمان انحلال نشان می‌دهد که یک مدل درجه دوم^۲، بهترین مدل برای مدل‌سازی راندمان انحلال با مقادیر ضریب تعیین^۳ برابر ۰/۹۶۶۳، ضریب تعیین تعدیل‌شده^۴ برابر ۰/۹۵۷۵ و ضریب پیش‌بینی‌شده^۵ برابر ۰/۹۴۰۵ است.

جدول ۴-۱۲: آنالیز واریانس مدل توان دوم سطح پاسخ با حذف پارامترهای غیر مهم برای پیش‌بینی راندمان انحلال

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربع	مقدار F	قابلیت احتمال $P > F$	
مدل	۳۴/۲۱۶۸	۶	۵/۷۰	۱۰۹/۷۷	<۰/۰۰۰۱	معنادار
A	۳/۵۲۸۹	۱	۳/۵۳	۶۷/۹۳	<۰/۰۰۰۱	
B	۹/۲۸۸۰	۱	۹/۲۹	۱۷۸/۷۹	<۰/۰۰۰۱	
C	۱۴/۳۸۲۷	۱	۱۴/۳۸	۲۷۶/۸۶	<۰/۰۰۰۱	
D	۵/۵۱۱۲	۱	۵/۵۱	۱۰۶/۰۹	<۰/۰۰۰۱	
A ^۲	۰/۱۸۸۴	۱	۰/۱۹	۳/۶۳	۰/۰۶۹۵	
D ^۲	۰/۲۳۰۸	۱	۰/۲۳	۴/۴۴	۰/۰۴۶۱	
باقیمانده	۱/۱۹۴۹	۲۳	۰/۰۵۲			
عدم برازش	۱/۱۰۵۸	۱۸	۰/۰۶۱	۳/۴۵	۰/۰۸۷۷	بی‌معنا
خطای خالص	۰/۰۸۹۱	۵	۰/۰۱۸	۲۰/۹۱		
جمع کل	۳۵/۴۱۱۷	۲۹				
انحراف استاندارد	میانگین	C.V. ^۶ %	R ^۲	Adj.R ^۲	Pred. R ^۲	دقت کافی
	۷۰/۵۵	۰/۳۲	۰/۹۶۶۳	۰/۹۵۷۵	۰/۹۴۰۵	۴۷/۳۸

نتایج آنالیز واریانس مدل‌های به‌دست‌آمده برای A/S در جدول (۴-۱۳) نشان‌داده شده است. P-Value مدل‌ها نشان می‌دهد که آن‌ها در سطح کم‌تر از ۰/۰۵ درصد معنی‌دار است. علاوه‌براین عدم برازش مدل‌ها بزرگ‌تر از ۰/۰۵ و غیرمعنی‌دار بود که نشان‌دهنده تناسب برازش است. همان‌طور که

^۱ -Lack of Fit

^۲ - Quadratic

^۳ - R-square

^۴ - Adjusted R-square

^۵ - Predict R-square

^۶ ضریب تغییرپذیری است که از تقسیم انحراف استاندارد بر میانگین بدست می‌آید.

در جدول (۴-۱۳) ملاحظه می‌شود عدم برازش داده‌ها و خلاصه تجزیه و تحلیل آماری برای A/S نشان می‌دهد که یک مدل درجه دوم، بهترین مدل برای مدل‌سازی A/S با مقادیر ضریب تعیین برابر ۰/۹۶۹۶، ضریب تعیین تعدیل شده برابر ۰/۹۶۰۰ و ضریب پیش‌بینی شده برابر ۰/۹۳۸۰ است.

جدول ۴-۱۳: آنالیز واریانس مدل توان دوم سطح پاسخ با حذف پارامترهای غیر مهم برای پیش‌بینی مقدار A/S

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربع	مقدار F	قابلیت احتمال $P > F$	
مدل	۰/۰۶۰	۷	۰/۰۰۸۶	۱۰۰/۳۳۶	<۰/۰۰۰۱	معنادار
A	۰/۰۰۶۴	۱	۰/۰۰۶۴۲	۷۴/۹۳۵	<۰/۰۰۰۱	
B	۰/۰۱۶۲	۱	۰/۰۱۶۰	۱۸۹/۰۲۳	<۰/۰۰۰۱	
C	۰/۰۲۴۹	۱	۰/۰۲۵۰	۲۹۰/۹۸۹	<۰/۰۰۰۱	
D	۰/۰۰۸۹	۱	۰/۰۰۸۸۹	۱۰۳/۷۱۶	<۰/۰۰۰۱	
BC	۰/۰۰۰۴	۱	۰/۰۰۰۴	۴/۶۶۷	۰/۰۴۱۹	
A ²	۰/۰۰۰۵	۱	۰/۰۰۰۴۶	۵/۴۲۰	۰/۰۲۹۵	
D ²	۰/۰۰۰۵	۱	۰/۰۰۰۴۶	۵/۴۲۰		
باقیمانده	۰/۰۰۱۹	۲۲	۰/۰۰۰۰۸			
عدم برازش	۰/۰۰۱۷	۱۷	۰/۰۰۰۱۰	۳/۴۰۳	۰/۰۹۰۳	بی‌معنا
خطای خالص	۰/۰۰۰۲	۵	۰/۰۰۰۰۳			
جمع کل	۰/۰۶۲۱	۲۹				
انحراف استاندارد	میانگین	C.V. %	R ²	Adj.R ²	Pred. R ²	دقت کافی
۰/۰۰۹۲۶	۱/۲۳	۰/۷۵	۰/۹۶۹۶	۰/۹۶۰۰	۰/۹۳۸۰	۴۵/۳۲

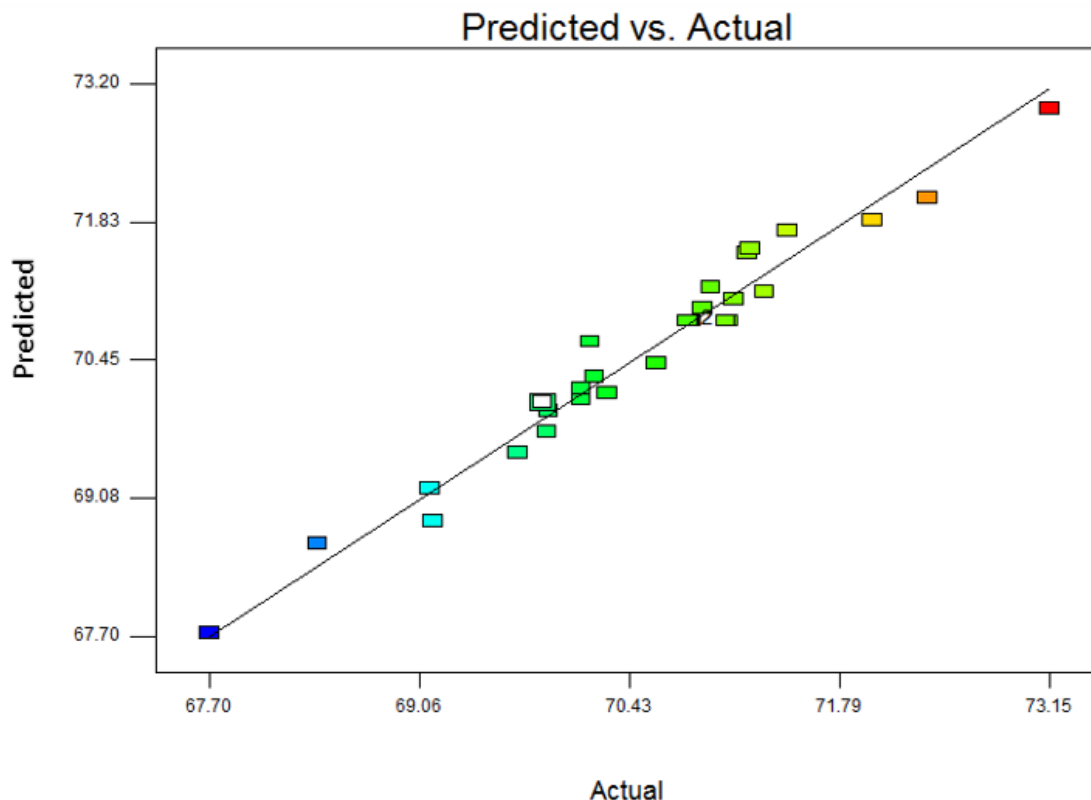
نتایج آنالیز واریانس مدل‌های به دست آمده برای N/S در جدول (۴-۱۴) نشان داده شده است. P-Value مدل‌ها نشان می‌دهد که آن‌ها در سطح کم‌تر از ۰/۰۵ درصد معنی‌دار است. علاوه بر این عدم برازش مدل‌ها بزرگ‌تر از ۰/۰۵ و غیر معنی‌دار بود که نشان‌دهنده تناسب برازش است. همان‌طور که در جدول (۴-۱۴) ملاحظه می‌شود عدم برازش داده‌ها و خلاصه تجزیه و تحلیل آماری برای راندمان انحلال نشان می‌دهد که یک مدل خطی به شکل ریشه مربع معکوس، بهترین مدل برای مدل‌سازی N/S با مقادیر ضریب تعیین برابر ۰/۹۶۷۰، ضریب تعیین تعدیل شده برابر ۰/۹۶۱۷ و ضریب پیش‌بینی شده برابر ۰/۹۵۵۲ است.

جدول ۴-۱۴: آنالیز واریانس مدل خطی سطح پاسخ با حذف پارامترهای غیر مهم برای پیش‌بینی مقدار N/S

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربع	مقدار F	قابلیت احتمال $P > F$	
مدل	۰/۴۶	۴	۰/۱۱	۱۸۳/۲۳	۰/۰۰۰۱	معنادار
A	۰/۰۰۶۶	۱	۰/۰۰۶۶	۱۰/۶۱	۰/۰۰۳۲	
B	۰/۰۰۷۶	۱	۰/۰۰۷۶	۱۲/۲۸	۰/۰۰۱۷	
C	۰/۴۴	۱	۰/۴۴	۷۰۴/۸۲	<۰/۰۰۰۱	
D	۰/۰۰۳۳	۱	۰/۰۰۳۳	۵/۲۳	۰/۰۳۰۹	
باقیمانده	۰/۰۱۶	۲۵	۰/۰۰۰۶۲			
عدم برازش	۰/۰۱۴	۲۰	۰/۰۰۰۶۹	۱/۹۱	۰/۲۴۴۸	بی‌معنا
خطای خالص	۰/۰۰۱۸	۵	۰/۰۰۰۳۶			
جمع کل	۰/۰۴۷	۲۹				
انحراف استاندارد	میانگین	C.V. %	R^2	Adj. R^2	Pred. R^2	دقت کافی
۰/۰۲۵	۱/۹۱	۱/۳۱	۰/۹۶۷۰	۰/۹۶۱۷	۰/۹۵۵۲	۴۱/۱۰۳

۴-۳-۳- بررسی کفایت مدل

مدل‌های چندجمله‌ای تخمین قابل‌قبولی در محدوده نسبتاً کوچکی از فضای متغیرهای مستقل ارائه می‌دهد. شکل (۴-۹) مقادیر تخمینی و اندازه‌گیری شده راندمان انحلال را نشان می‌دهد. موقعیت قرارگیری نقاط در نیمساز نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی است. این مسئله نشانگر مناسب بودن مدل در محدوده مورد آزمایش است.

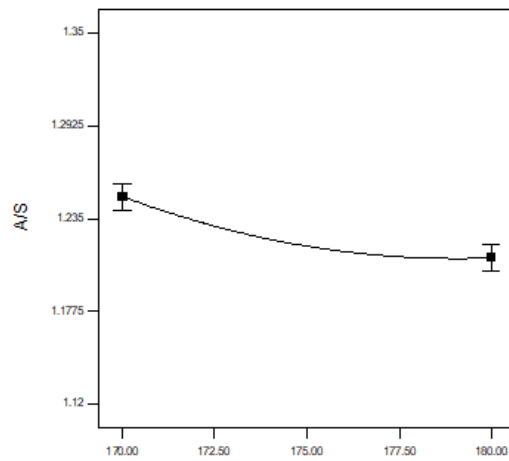


شکل ۴-۹: نمودار مقدار پیش‌بینی شده و مقدار واقعی راندمان انحلال

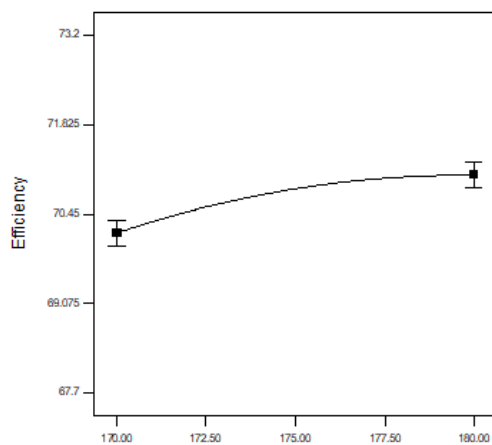
۴-۳-۴- بررسی تأثیر فاکتورها بر انحلال

۴-۳-۴-۱- تأثیر غلظت

تأثیر غلظت Na_2O محلول در سه سطح ۱۷۰، ۱۷۵ و ۱۸۰ گرم برلیتر بر انحلال Al_2O_3 بوکسیت در مقادیر ثابت دما، زمان و آهک مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۴-۱۰) تأثیر غلظت Na_2O بر A/S، N/S و راندمان انحلال را نشان می‌دهد. با افزایش غلظت Na_2O از ۱۷۰ به ۱۸۰ گرم برلیتر، مقادیر A/S و N/S گل کاهش و مقدار راندمان انحلال افزایش یافته است. زیرا همان‌طور که در قبل اشاره شد با افزایش غلظت قلیا سرعت عمل انحلال بیش‌تر شده و میزان Al_2O_3 حل‌شده در محلول بیش‌تر و در گل کم‌تر می‌شود. در غلظت بین ۱۷۸ تا ۱۸۰ گرم برلیتر روند کاهش A/S و N/S و همچنین افزایش راندمان کم‌تر شده است و غلظت بالاتر در بهبود شرایط انحلال تأثیر چندانی ندارد.

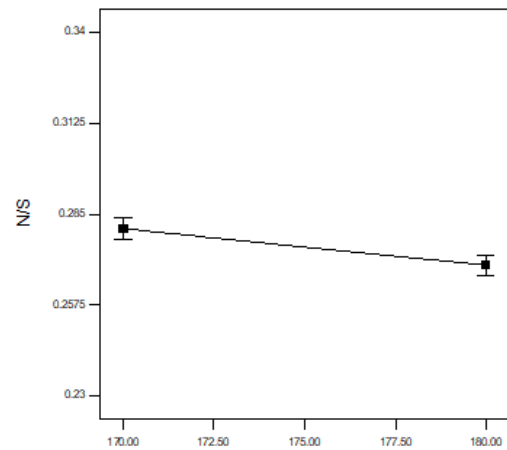


A: Na2O
(الف)



A: Na2O

(ج)



A: Na2O

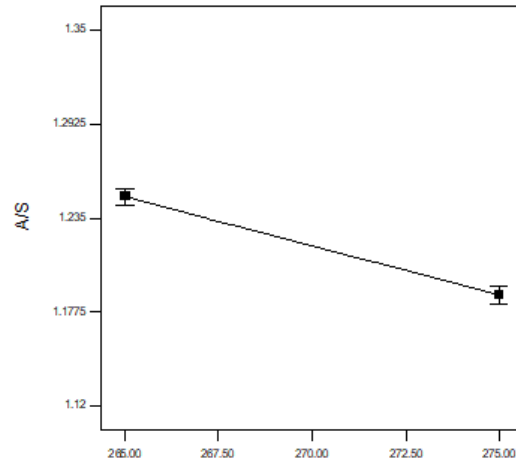
(ب)

شکل ۴-۱۰: تأثیر غلظت بر الف) A/S، ب) N/S، ج) راندمان انحلال در دما، مقدار آهک و زمان ثابت

۴-۳-۲- تأثیر دما

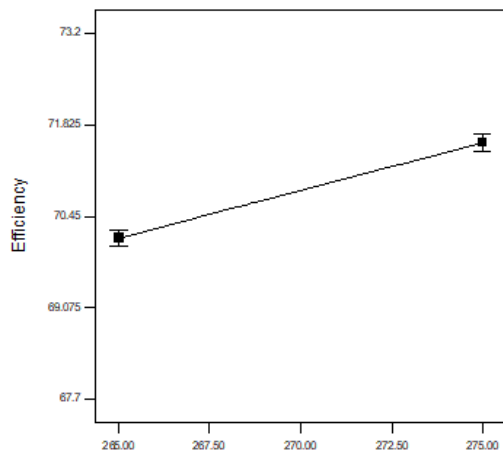
تأثیر دمای انحلال در سه سطح ۲۶۵، ۲۷۰ و ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد بر انحلال Al_2O_3 بوکسیت در مقادیر ثابت غلظت Na_2O محلول، زمان و آهک مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۴-۱۱) تأثیر دما بر A/S، N/S و راندمان انحلال را نشان می‌دهد. با افزایش دما از ۲۶۵ به ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد، مقادیر A/S و N/S گل کاهش و مقدار راندمان انحلال افزایش یافته است. حرارت یکی از مهم‌ترین عوامل تسریع واکنش است در نتیجه سرعت واکنش و انحلال Al_2O_3 افزایش یافته و به همین دلیل در افزایش

راندمان انحلال و کاهش A/S گل قرمز کاهش نقش بسزایی دارد. همچنین حرارت نقش مهمی در تسریع واکنش بین آهک و هیدروآلوموسیلیکات سدیم تشکیل شده داشته و در بازیافت سود یا کاهش مقدار N/S در گل قرمز در طی فرآیند انحلال نیز مؤثر است.



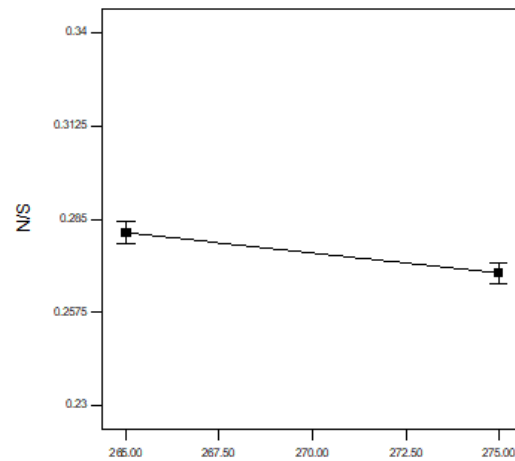
B: Temp.

(الف)



B: Temp.

(ج)



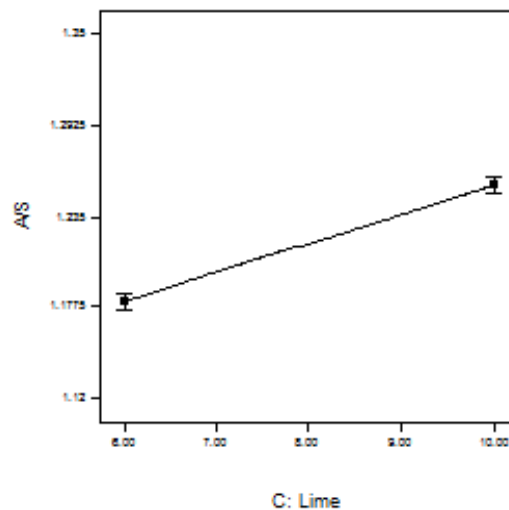
B: Temp.

(ب)

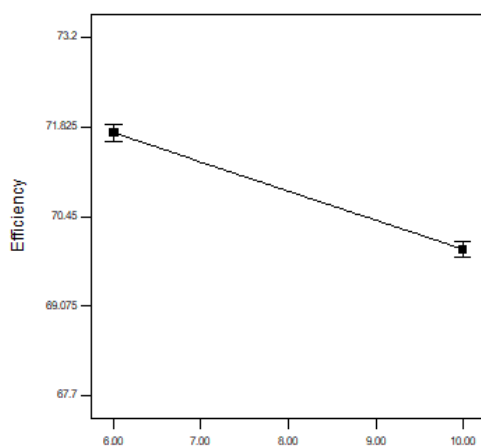
شکل ۴-۱۱: تأثیر دما بر الف (A/S) ب (N/S) ج) راندمان انحلال در غلظت Na_2O ، مقدار آهک و زمان ثابت

۴-۳-۳-۳- تأثیر آهک

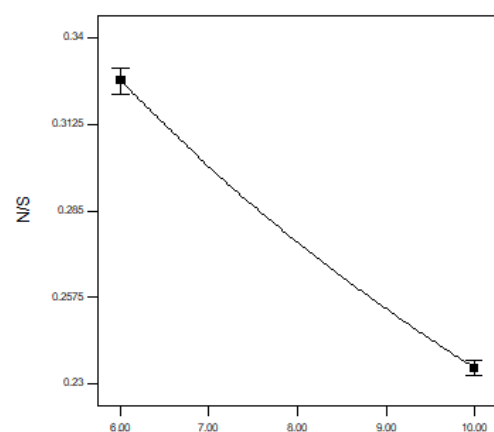
تأثیر مقدار آهک در سه سطح ۶، ۸ و ۱۰ درصد بر انحلال Al_2O_3 بوکسیت در مقادیر ثابت غلظت Na_2O محلول، دما و زمان مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۴-۱۲) تأثیر مقدار آهک بر A/S، N/S و راندمان انحلال را نشان می‌دهد. با افزایش آهک از ۶ تا ۱۰ درصد، مقادیر N/S کاهش و A/S گل افزایش و همچنین راندمان انحلال کاهش یافته است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد آهک در فرآیند انحلال نقش مهمی در بهبود راندمان انحلال و بازیابی سود هدررفته دارد ولی مقدار بیش از حد آن نیز باعث کاهش راندمان می‌شود که بنابراین باید به اندازه مناسب در فرآیند استفاده شود.



(الف)



(ج)

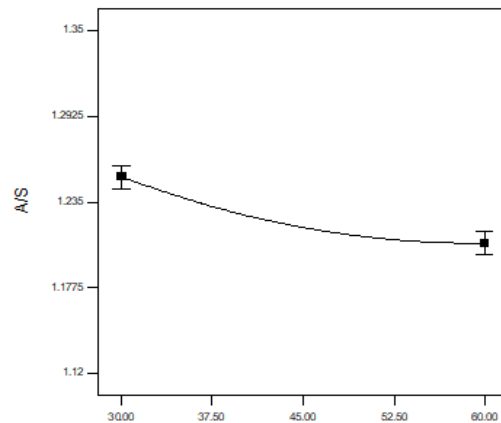


(ب)

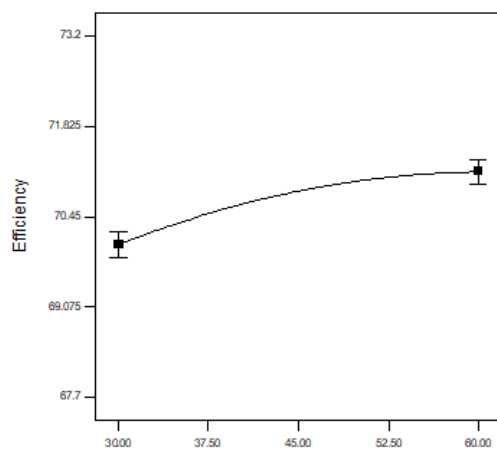
شکل ۴-۱۲: تأثیر مقدار آهک بر الف) A/S، ب) N/S، ج) راندمان انحلال در دما، غلظت Na_2O و زمان ثابت

۴-۳-۴-۴- تأثیر زمان

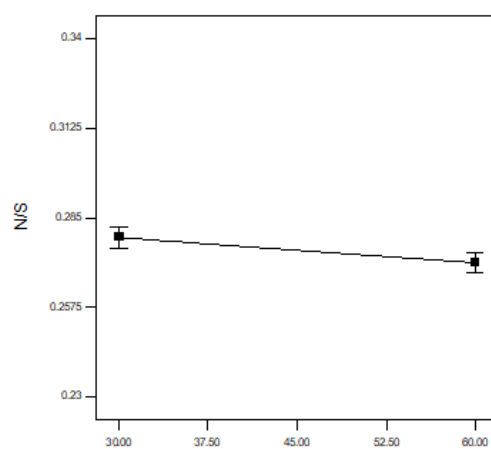
تأثیر زمان ماند در سه سطح ۳۰، ۴۵ و ۶۰ دقیقه بر انحلال Al_2O_3 بوکسیت در مقادیر ثابت غلظت Na_2O محلول، زمان و آهک مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۴-۱۳) تأثیر زمان بر A/S، N/S و راندمان انحلال را نشان می‌دهد. با افزایش زمان از ۳۰ به ۶۰ دقیقه، مقادیر A/S و N/S گل کاهش و مقدار راندمان انحلال افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل (۴-۱۳) مشخص است از زمان ۵۰ دقیقه به بالا تأثیر آن بر میزان کاهش A/S، N/S و افزایش راندمان انحلال کم‌تر شده و تأثیر زیادی ندارد. افزایش زمان ماند باعث کامل شدن واکنش‌ها در فرآیند انحلال شده، در نتیجه در بهبود انحلال مؤثر است.



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۴-۱۳: تأثیر زمان بر (a) A/S (b) N/S (c) راندمان انحلال در دما، غلظت Na_2O و مقدار آهک ثابت

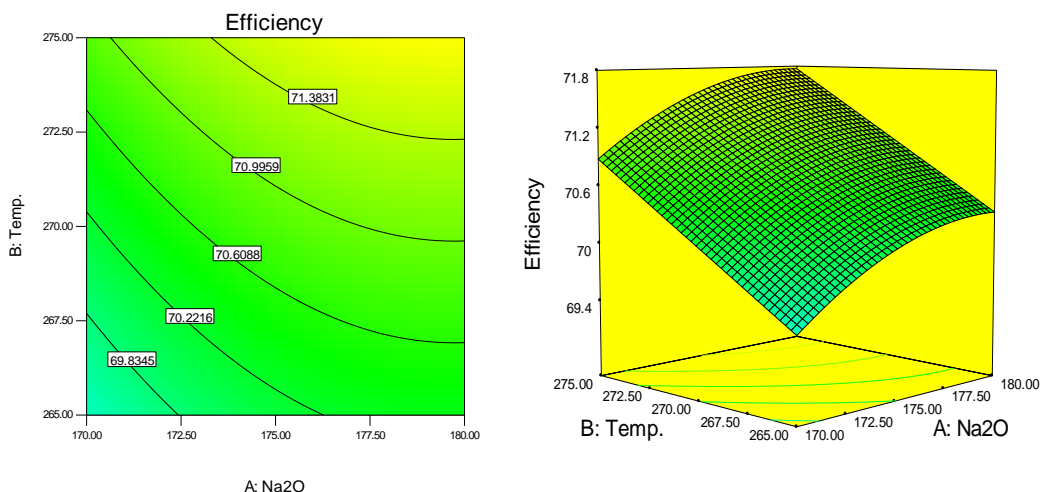
۴-۳-۵- بررسی تأثیر اندرکنش فاکتورها بر پاسخها

تأثیر اندرکنش فاکتورها و همزمان آن ها (دو فاکتور) دوبه دو درمقابل پاسخ را می توان با رسم نمودارهای سطوح تراز، سه بعدی و اثر متقابل فاکتورها به راحتی تفسیر و درک کرد، لذا برای هر کدام از پاسخها به طور جداگانه بحث و بررسی شد.

۴-۳-۵-۱- بررسی تأثیر اندرکنش فاکتورها بر راندمان انحلال

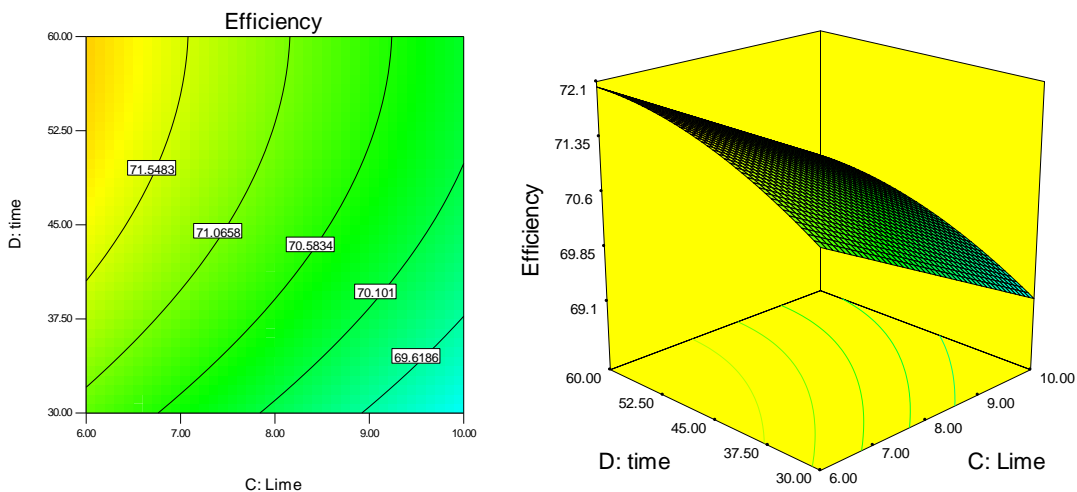
تفسیرهای انجام شده و نتایج به دست آمده از جدول (۴-۱۲) از طریق نمودارهای سه بعدی و سطوح تراز که در آن دو فاکتور دوبه دو در مقابل پاسخهای خروجی (راندمان انحلال) رسم می شوند، بیشتر می تواند قابل درک باشد. نمودارهای سه بعدی سطوح تراز فاکتورها برای راندمان انحلال در شکل های (۴-۱۴) تا (۴-۱۹) آورده شده اند.

شکل (۴-۱۴) نشان می دهد که هر چه غلظت Na_2O محلول و دما بالاتر رفته، درصد راندمان انحلال نیز افزایش یافته است. در دمای بالا هرچه مقدار غلظت Na_2O محلول بیش تر شده درصد راندمان انحلال نیز بالاتر رفته است.



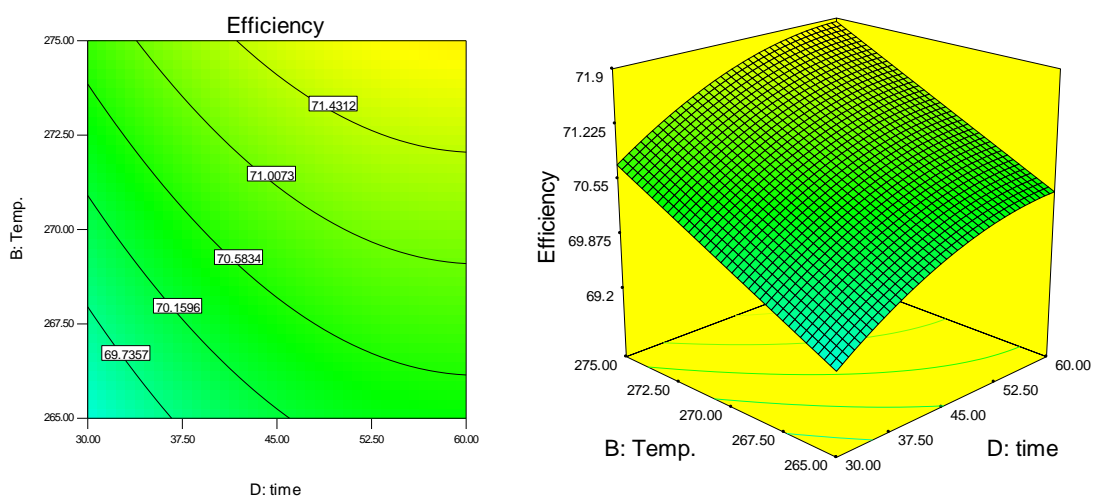
شکل ۴-۱۴: نمودار سطوح تراز و سه بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای غلظت Na_2O محلول -دما، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۱۵) نشان می‌دهد که هر چه مقدار آهک کم‌تر و زمان بیش‌تر شده، درصد راندمان انحلال افزایش یافته است. تأثیر هم‌زمان این دو عامل در افزایش راندمان انحلال مشهود است به طوری که در کم‌ترین مقدار آهک و بیش‌ترین مقدار دما، راندمان انحلال به حداکثر مقدار خود رسیده است.



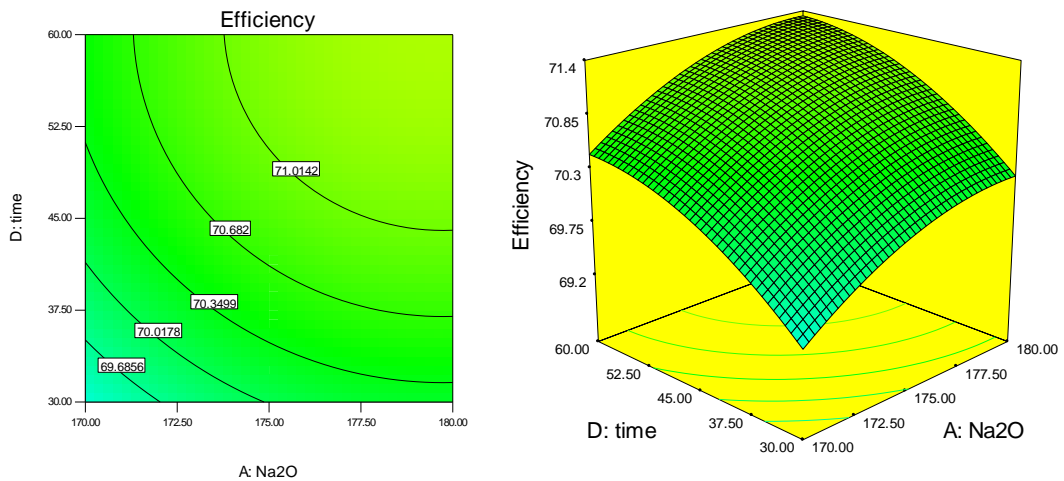
شکل ۴-۱۵: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای مقدار درصد آهک-زمان، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۱۶) نشان می‌دهد که هر چه دما و زمان بیش‌تر شده درصد راندمان انحلال نیز افزایش یافته است. در تأثیر هم‌زمان این دو عامل در سطوح بالا مقدار راندمان انحلال به حداکثر رسیده است اما تأثیر دما نسبت به زمان در افزایش راندمان بیش‌تر است.



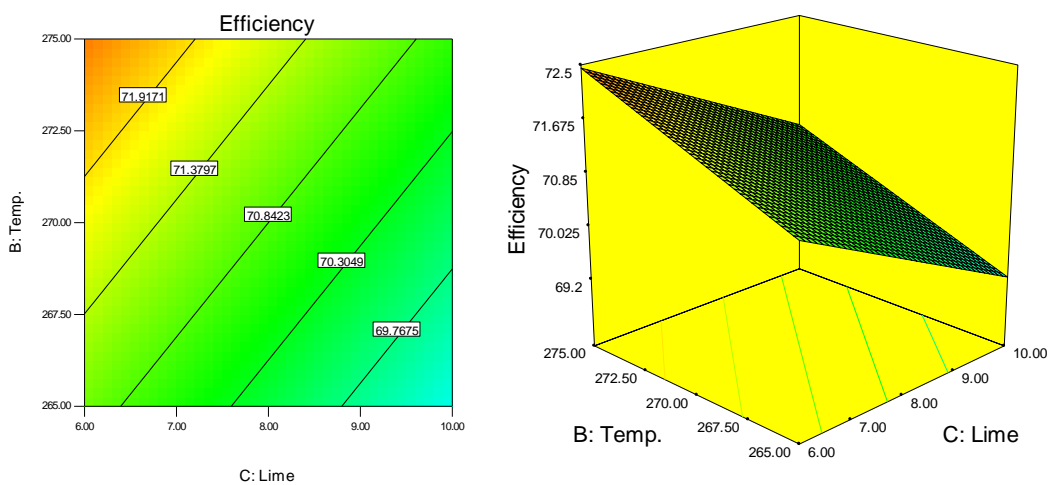
شکل ۴-۱۶: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای مقدار دما-زمان، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۱۷) نشان می‌دهد که با افزایش سطوح زمان و غلظت Na_2O محلول مقدار راندمان انحلال افزایش یافته است. در تأثیر هم‌زمان این دو عامل حداکثر مقدار راندمان انحلال در حداکثر مقادیر این دو عامل به دست آمده است.



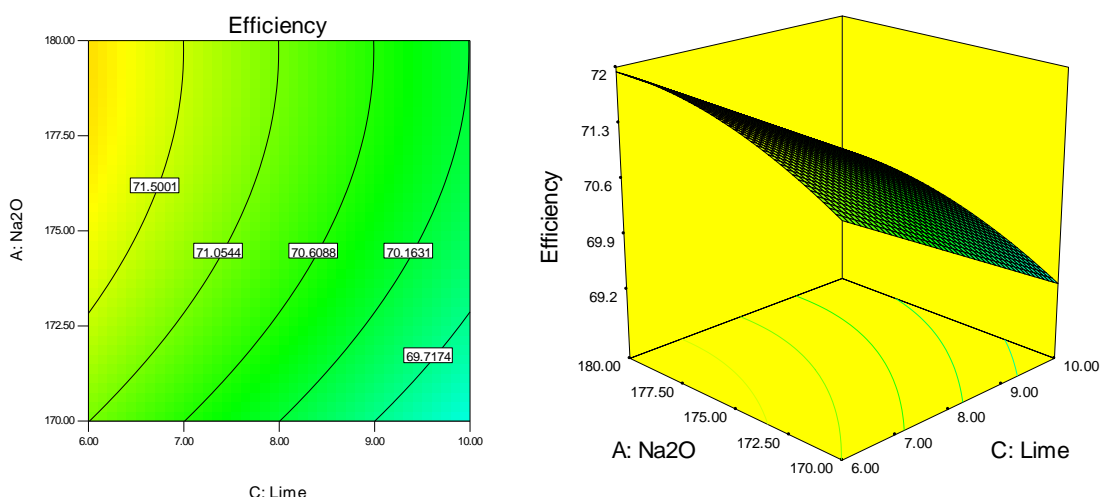
شکل ۴-۱۷: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای غلظت Na_2O محلول - زمان، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۱۸) نشان می‌دهد که هر چه مقدار آهک کم‌تر شده و دما بیش‌تر شده مقدار راندمان انحلال نیز افزایش یافته است. تأثیر هم‌زمان این دو عامل نشان می‌دهد که در سطح پایین مقدار آهک و سطح بالایی دما، حداکثر راندمان انحلال حاصل شده است.



شکل ۴-۱۸: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای مقدار درصد آهک - دما، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۱۹) نشان می‌دهد که با کاهش سطوح آهک و افزایش سطوح غلظت Na_2O محلول درصد راندمان انحلال نیز افزایش یافته است. تأثیر هم‌زمان این دو عامل نشان می‌دهد که در سطح پایین مقدار آهک و سطح بالای غلظت Na_2O محلول راندمان انحلال به حداکثر مقدار رسیده است.



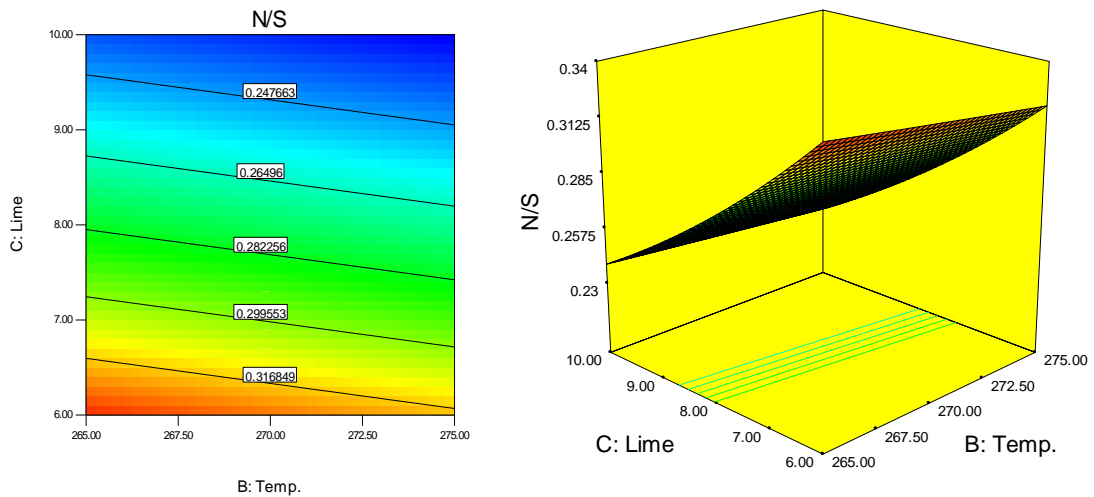
شکل ۴-۱۹: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای مقدار آهک - غلظت Na_2O محلول، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

مطابق رابطه (۴-۱) مدل تجربی بدست آمده بیانگر آن است که هیچ‌کدام از فاکتورها در این بازه سطوح تعریف‌شده تأثیر متقابلی بر راندمان انحلال ندارند ولی اگر بازه سطوح بیشتر شود احتمال اثر متقابل فاکتورها راندمان انحلال وجود خواهد داشت.

۴-۳-۵-۲- بررسی تأثیر اندرکنش فاکتورها بر مقدار N/S

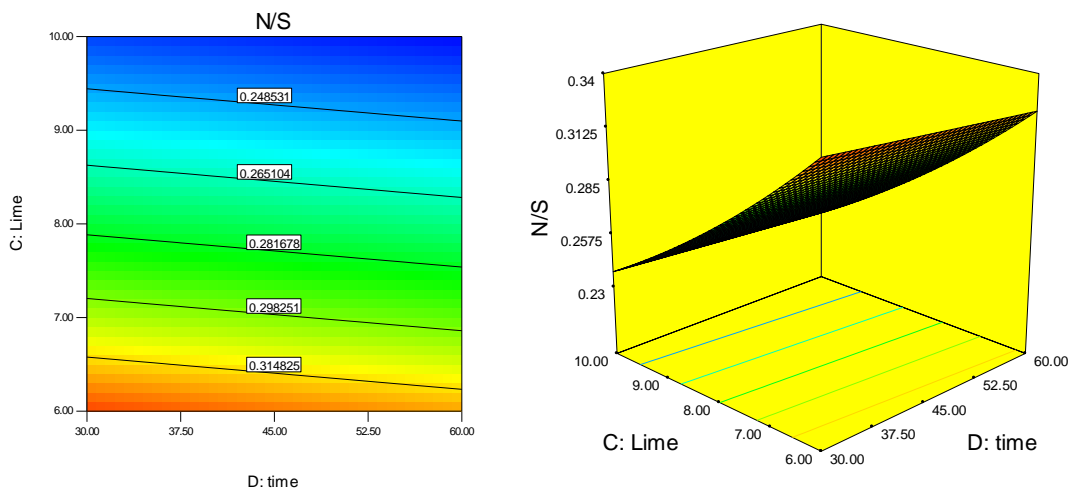
تفسیرهای انجام‌شده و نتایج به‌دست‌آمده از جدول (۴-۱۴) از طریق نمودارهای سه‌بعدی و سطوح تراز که در آن دو فاکتور دوبه‌دو در مقابل پاسخ‌های خروجی (N/S) رسم می‌شوند، بیش‌تر می‌تواند قابل‌درک باشد. نمودارهای سه‌بعدی و سطوح تراز فاکتورها برای N/S در شکل‌های (۴-۲۱) تا (۴-۲۶) آورده شده‌اند.

شکل (۴-۲۰) نشان می‌دهد که در مقدار آهک بالا، N/S گل دارای کمترین مقدار است. همچنین در تأثیر همزمان مقدار آهک و دما، مقدار N/S بیش‌تر تابع درصد آهک بوده و آهک نقش اساسی دارد و کم‌وزیاد شدن دما در این بازه دمایی تأثیری بر مقدار N/S ندارد.



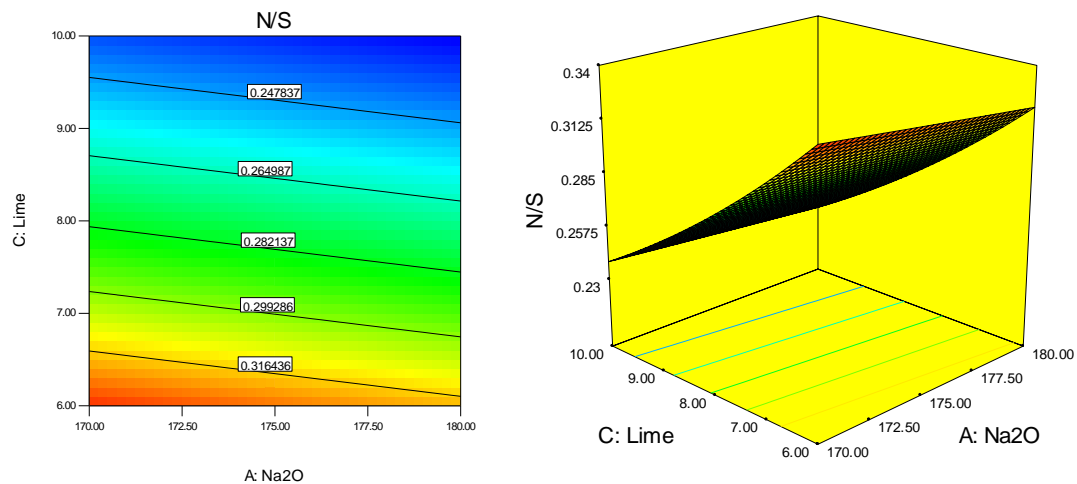
شکل ۴-۲۰: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای دما-مقدار آهک، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۲۱) نشان می‌دهد که با افزایش سطح آهک، N/S گل کم‌تر شده است. همچنین در تأثیر همزمان مقدار آهک و زمان مقدار N/S بیش‌تر تابع درصد آهک بوده و کم‌وزیاد شدن زمان در این بازه تأثیری بر مقدار N/S ندارد.



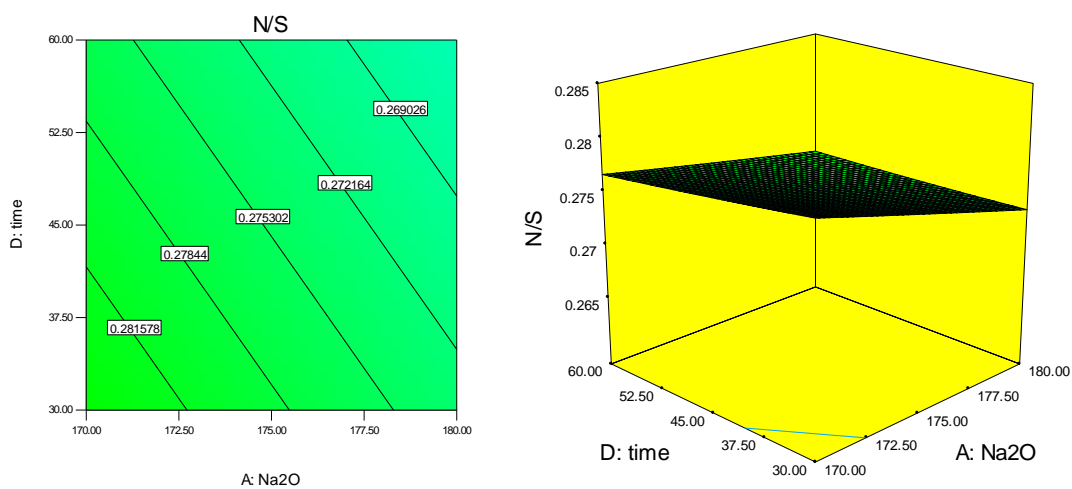
شکل ۴-۲۱: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای زمان-مقدار آهک، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۲۲) نشان می‌دهد که در مقدار آهک بالا، N/S گل دارای کم‌ترین مقدار است. همچنین در تأثیر هم‌زمان مقدار آهک و Na_2O محلول، مقدار N/S بیش‌تر تابع درصد آهک بوده و کم‌وزیاد شدن غلظت Na_2O در این بازه تأثیری بر مقدار N/S ندارد.



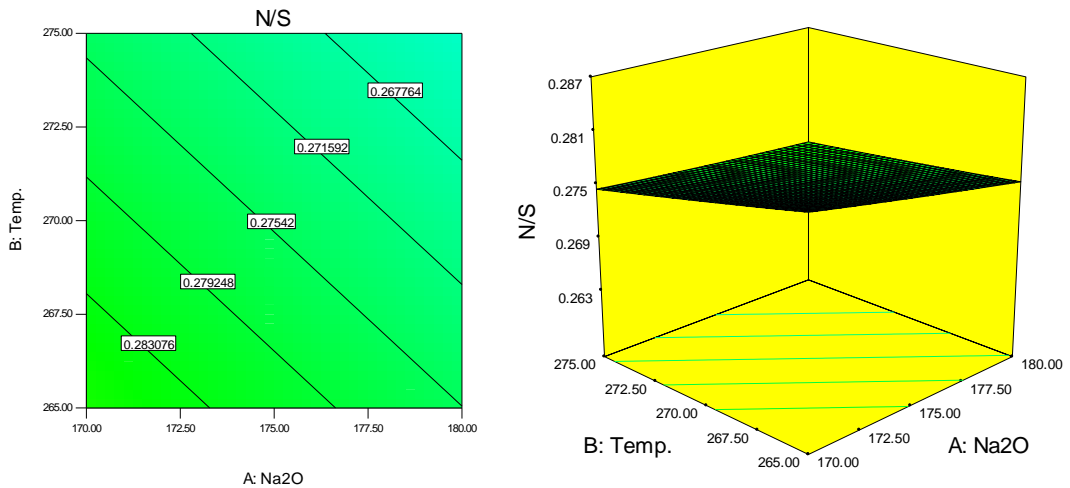
شکل ۴-۲۲: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای غلظت Na_2O محلول - مقدار آهک، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۲۳) نشان می‌دهد که در سطوح بالای زمان و غلظت Na_2O محلول، N/S گل کاهش یافته است. در تأثیر هم‌زمان غلظت Na_2O محلول و زمان ماند در شرایطی که مقادیر زمان و غلظت بالا بوده، N/S گل دارای کم‌ترین مقدار است.



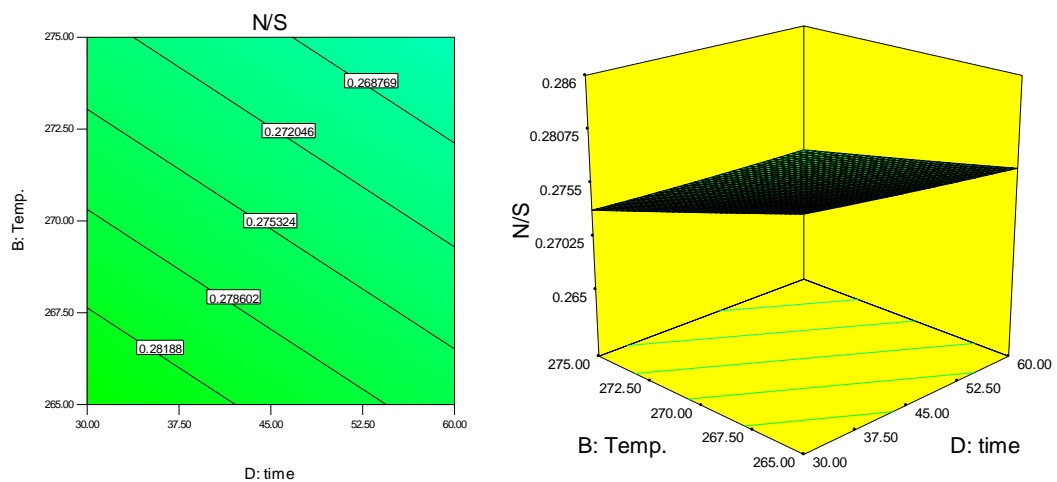
شکل ۴-۲۳: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای غلظت Na_2O محلول - زمان، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۲۴) نشان می‌دهد که در سطوح بالای دما و غلظت Na_2O محلول، N/S گل کاهش یافته است. در تأثیر هم‌زمان غلظت Na_2O محلول و زمان ماند در شرایطی که مقادیر زمان و غلظت بالا بوده، N/S گل دارای کم‌ترین مقدار است. در تأثیر هم‌زمان دما و غلظت Na_2O محلول در بالاترین مقدار دما و غلظت، N/S گل به حداقل مقدار رسیده است.



شکل ۴-۲۴: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای غلظت Na_2O محلول-دما، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۲۵) نشان می‌دهد که در سطوح بالای دما و زمان، N/S گل کاهش یافته است. در تأثیر هم‌زمان مقادیر دما و زمان ماند، در بالاترین مقدار دما و زمان، N/S گل به حداقل مقدار رسیده است.



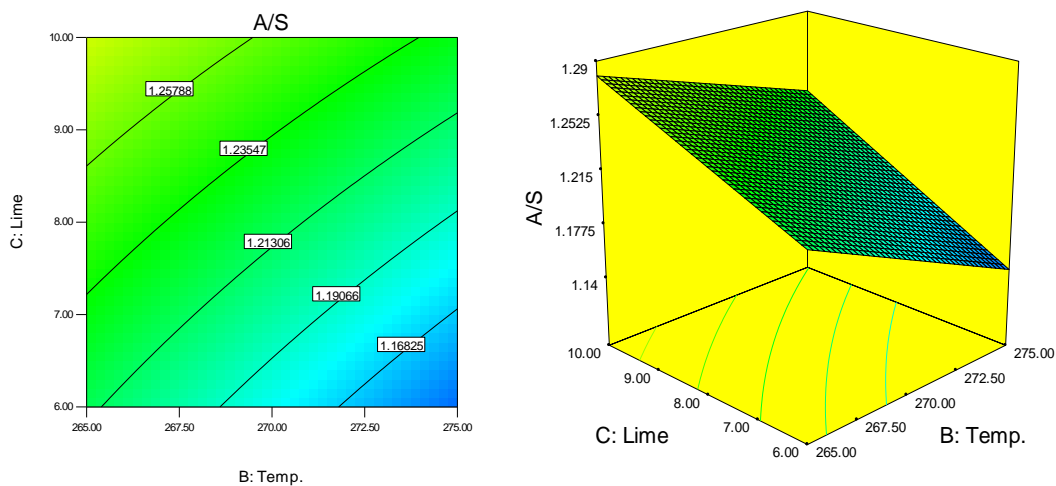
شکل ۴-۲۵: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای غلظت Na_2O محلول-دما، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

مطابق رابطه (۳-۴)، مدل تجربی بدست آمده بیانگر آن است که هیچ‌کدام از فاکتورها در این بازه سطوح تعریف‌شده تأثیر متقابلی بر N/S ندارند. ولی اگر بازه سطوح بیشتر شود احتمال اثر متقابل فاکتورها بر N/S وجود خواهد داشت.

۳-۵-۳-۴- بررسی تأثیر اندرکنش فاکتورها بر مقدار A/S

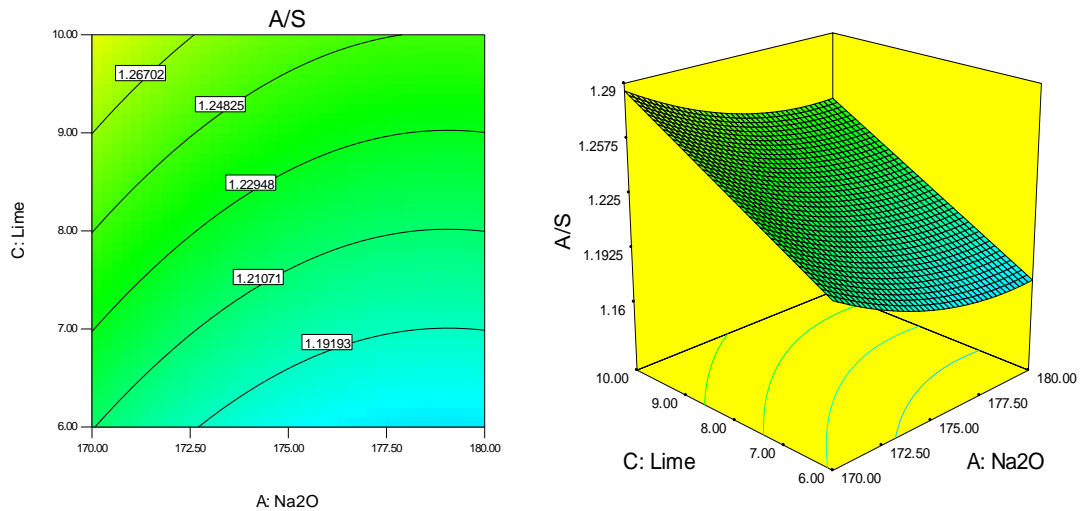
تفسیرهای انجام‌شده و نتایج به‌دست‌آمده از جدول (۴-۱۳) از طریق نمودارهای سه‌بعدی و سطوح تراز که در آن دو فاکتور دوبه‌دو در مقابل پاسخ‌های خروجی (A/S) رسم می‌شوند، بیش‌تر می‌تواند قابل‌درک باشد. نمودارهای سه‌بعدی و سطوح تراز فاکتورها برای A/S در شکل‌های (۴-۲۶) تا (۴-۳۱) آورده شده‌اند.

شکل (۴-۲۶) نشان می‌دهد که در سطوح بالای دما و پایین مقدار آهک، A/S گل کاهش‌یافته است در تأثیر هم‌زمان این دو عامل، در سطح پایینی آهک و سطح بالایی دما، مقدار A/S گل به کم‌ترین مقدار رسیده است.



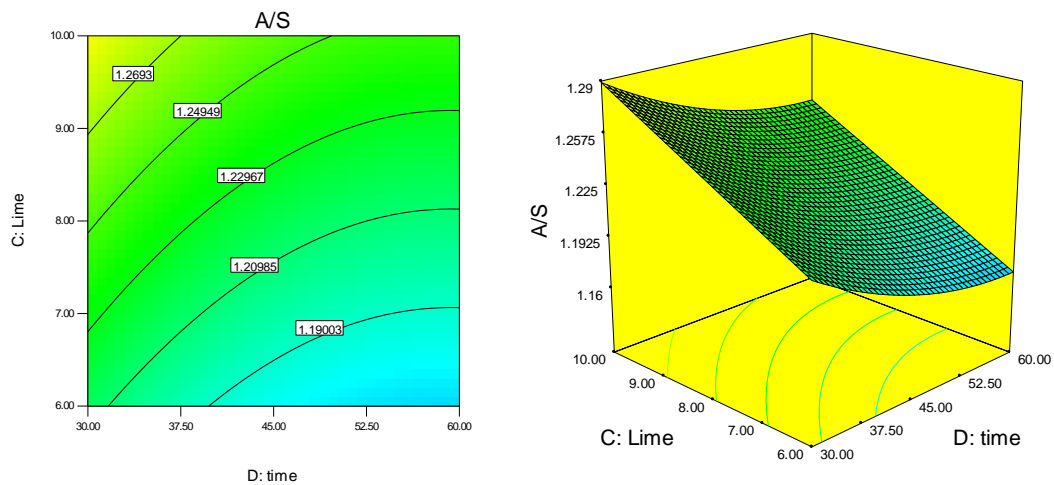
شکل ۴-۲۶: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای مقدار آهک-دما، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۲۷) نشان می‌دهد که با افزایش غلظت Na_2O محلول و کاهش مقدار آهک، A/S گل کاهش یافته است. در تأثیر هم‌زمان این دو عامل، در سطح پایینی آهک و سطح بالایی غلظت Na_2O محلول، مقدار A/S گل به کم‌ترین مقدار رسیده است. تأثیر آهک در کاهش مقدار A/S بیش‌تر است.



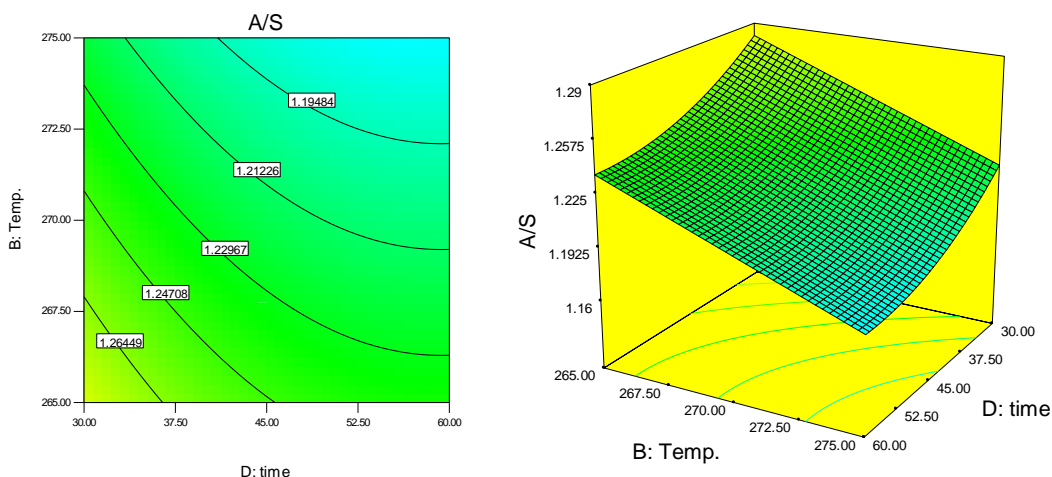
شکل ۴-۲۷: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای مقدار آهک- غلظت Na_2O محلول، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۲۸): نشان می‌دهد که در سطوح بالای زمان و پایین مقدار آهک، A/S گل کاهش یافته است. در تأثیر هم‌زمان این دو عامل در سطح پایینی آهک و سطح بالایی دما، مقدار A/S گل به کم‌ترین مقدار رسیده است. تأثیر آهک در کاهش مقدار A/S بیش‌تر است.



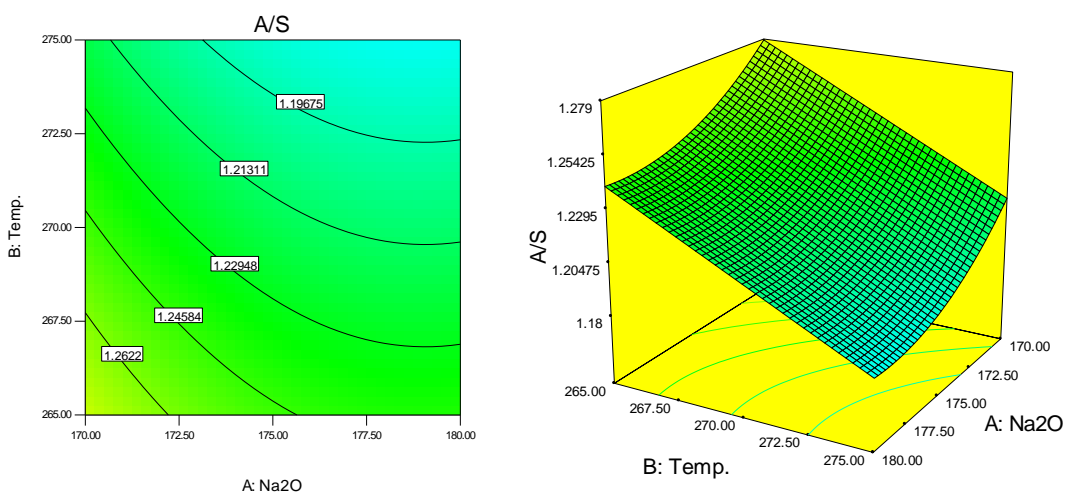
شکل ۴-۲۸: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای مقدار آهک-زمان، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۲۹) نشان می‌دهد که در سطوح بالای زمان و دما، A/S گل کاهش یافته است. در تأثیر هم‌زمان این دو در بیش‌ترین مقادیر دما و زمان، مقدار A/S گل به کم‌ترین مقدار رسیده است.



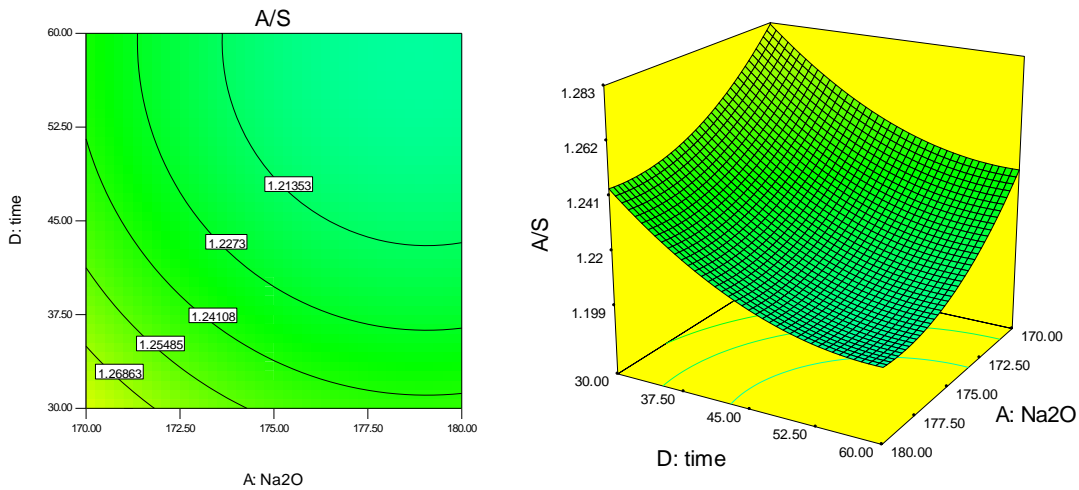
شکل ۴-۲۹: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای مقدار دما-زمان، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۳۰) نشان می‌دهد که با افزایش مقادیر دما و غلظت Na_2O محلول، A/S گل کاهش یافته است. در تأثیر هم‌زمان مقدار دما و Na_2O ، در سطوح بالایی این دو عامل، A/S دارای کم‌ترین مقدار است.



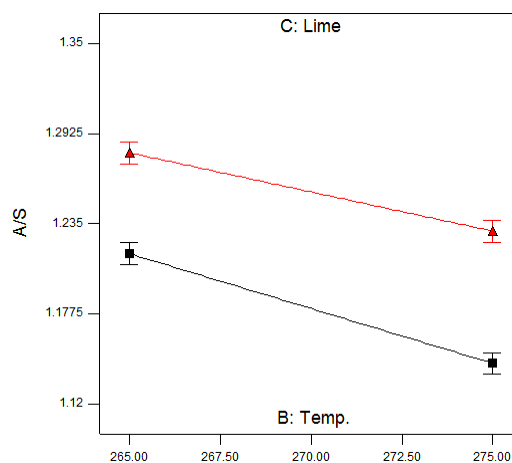
شکل ۴-۳۰: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای مقدار دما-غلظت Na_2O محلول، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

شکل (۴-۳۱) نشان می‌دهد که: با افزایش سطوح زمان و غلظت Na_2O محلول، A/S کاهش یافته است. در تأثیر هم‌زمان مقدار زمان و Na_2O ، در سطوح بالایی این دو عامل، A/S دارای کم‌ترین مقدار است.



شکل ۴-۳۱: نمودار سطوح تراز و سه‌بعدی حاصل از فرآیند انحلال بوکسیت بر اساس فاکتورهای مقدار زمان-غلظت Na_2O محلول، هنگامی که دیگر فاکتورها در سطح مرکزی (سطح صفر) خود ثابت بودند.

علاوه بر نمودارهای سطوح تراز و سه‌بعدی، اثر متقابل فاکتورها در شکل (۴-۳۲) نیز برای فهم و نمایش بهتر آورده شده‌است. نتایج حاصل بیانگر آن است که به‌جز فاکتورهای آهک-دما که تأثیر متقابل اندکی بر A/S دارد بقیه فاکتورها در این بازه سطوح تعریف‌شده، تأثیر متقابلی بر A/S ندارند ولی اگر بازه سطوح بیشتر شود احتمال اثر متقابل فاکتورها بر A/S وجود خواهد داشت.



شکل ۴-۳۲: نمودار اثر متقابل فاکتورها بر A/S

۴-۳-۶- تعیین شرایط بهینه و اعتبارسنجی مدل

تجزیه و تحلیل آماری و کیفی نشان داد که افزایش پارامترهای غلظت Na_2O محلول، دما، زمان ماند و کاهش مقدار آهک اضافه شده باعث زیاد شدن راندمان انحلال می شود. از سوی دیگر، کاهش مقدار آهک راندمان انحلال را بالا می برد ولی باعث افزایش N/S یا تلفات سود می شود. نتایج آزمایش های انجام شده نشان داد که راندمان انحلال در شرایط سطوح بالایی غلظت Na_2O محلول، دما و زمان و همچنین سطح پایینی آهک به حداکثر مقدار خود یعنی ۷۳/۱۵ درصد رسید. در شرایط ذکر شده مقدار N/S و A/S به ترتیب برابر با ۰/۳۱ و ۱/۱۲ است که مقدار تلفات سود نسبتا بالا است.

برای تعیین مدل بهینه در قسمت بهینه سازی نرم افزار، ابتدا محدوده فاکتورها (برای فاکتور زمان چون امکان زمان بیش از ۵۰ دقیقه در واحد انحلال وجود ندارد حداکثر رنج زمان ۵۰ دقیقه انتخاب شد) و سپس میزان دستیابی به هدف برای هر کدام از پاسخ ها مشخص شد. به طوری که برای راندمان حداکثر مقدار و برای A/S و N/S حداقل مقدار انتخاب شد، سپس مقدار اهمیت برای راندمان و A/S، حداکثر مقدار ولی برای N/S، متوسط مقدار در نظر گرفته شد؛ زیرا امکان دستیابی هم زمان به حداکثر راندمان و حداقل مقدار N/S وجود ندارد و چون راندمان از اولویت بالاتری برخوردار بوده بنابراین راندمان حداکثر و N/S متوسط در نظر گرفته شد. با این شرایط مقادیر بهینه فاکتورها به دست آمد و غلظت Na_2O برابر ۱۸۰ گرم بر لیتر، دمای ۲۷۵ درجه سانتی گراد، مقدار آهک ۷/۷ درصد و زمان ۵۰ دقیقه خواهد شد. با توجه مقادیر بهینه تعیین شده، مدل های پیشنهادی، مقادیر راندمان انحلال، N/S و A/S را به ترتیب برابر ۷۲/۰۵ درصد، ۰/۲۷ و ۱/۱۷ پیش بینی می کنند.

به منظور اعتبارسنجی مدل، آزمایشی در سطوح پیشنهادی نقطه بهینه انجام شد. نتایج نشان داد که مقادیر آزمایشگاهی و مدل پیش بینی شده به هم نزدیک و در نتیجه پاسخ های مدل مناسب است. در این آزمایش راندمان انحلال، N/S و A/S به ترتیب برابر با ۷۲/۲۴٪، ۰/۲۸ و ۱/۱۶۲ به دست آمد. بدین ترتیب نسبت به شرایط فعلی فرآیندی یعنی غلظت Na_2O برابر ۱۷۰ گرم بر لیتر، دمای ۲۷۰

درجه سانتی‌گراد، آهک ۸ درصد و زمان ۴۵ دقیقه (آزمایش شماره ۱۷) راندمان انحلال بیش از ۰.۲٪ و مقادیر N/S و A/S به ترتیب حدود ۰/۰۲ و ۰/۰۹ بهبود یافت.

۴-۳-۷- دستاورد اقتصادی پروژه:

همان‌طور که در پیوست‌های ۴ و ۶ آمده است مصارف ویژه^۱ و راندمان در شرایط بهینه نسبت به شرایط فعلی کارخانه بهبود یافته است به طوری که مصارف ویژه بوکسیت، آهک و سود در شرایط فعلی به ترتیب برابر ۳/۰۸ تن، ۲۴۶ کیلوگرم و ۲۹۶ کیلوگرم هست در صورتی که مصارف ویژه بوکسیت، آهک و سود بر اساس مدل بهینه پیشنهادی به ترتیب برابر ۲/۹۹ تن، ۲۳۱ کیلوگرم و ۲۸۸ کیلوگرم می‌باشد.

عواید حاصل از بهینه‌سازی این پروژه را می‌توان با توجه به مقایسه راندمان انحلال و مقدار مصرف ویژه سود، مربوط به آزمایش شماره ۱۷ (شرایط فعلی کارخانه) و آزمایش انجام شده بر اساس مدل بهینه پیشنهادی (Optimized) محاسبه نمود.

مقدار افزایش تولید حاصل از بهینه‌سازی بر اساس تولید ۲۴۰ هزار تن در سال برابر است با:

$$\text{تن } ۲۹۱.۷ = ۲۴۰,۰۰۰ \times (۰/۷۲۲۴ \div ۰/۷۰۱۱) - ۲۴۰,۰۰۰$$

مقدار کاهش مصرف سود سوزآور (NaOH) در سال را بر اساس اختلاف مصرف ویژه سود می‌توان محاسبه نمود. مصرف ویژه سود مربوط به آزمایش شماره ۱۷ (شرایط فعلی کارخانه) برابر است با ۲۹۶ و مصرف ویژه سود مربوط به آزمایش انجام شده مدل بهینه پیشنهادی برابر ۲۸۸ کیلوگرم بنابراین میزان کاهش سالیانه مصرف سود برابر است با:

$$\text{تن } ۹۲۰.۱ = ۲۴۰,۰۰۰ \times (۲۹۶ - ۲۸۸)$$

^۱ مصرف ویژه عبارت است از مقدار مصرف از ماده اولیه به ازاء یک تن آلومینای تولیدی

فصل ۵

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری:

۱- بوکسیت خوراک کارخانه آلومینای جاجرم باتوجه به برنامه تولید معادن جاجرم و سایر منابع و آنالیز شیمیایی برای رسیدن به مدول ۴/۲، بهترین ترکیب اختلاط با نسبت‌های ۵۰٪ تاش، ۳۵٪ جاجرم، ۱۰٪ یزد و ۵٪ شیرین چشمه به دست آمد.

۲- شرایط انحلال بوکسیت‌های خوراک مخصوصاً از نظر مقدار آهک متفاوت است، در حالت بهینه انحلال (بیشترین راندمان انحلال و کمترین مقادیر N/S و A/S) برای بوکسیت‌های تاش، جاجرم، یزد و شیرین چشمه به ترتیب برابر ۶، ۱۰، ۶ و ۱۲ درصد و از نظر دما، بوکسیت یزد نسبت به سایر بوکسیت‌ها دارای دمای انحلال بالاتر یعنی ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد است. راندمان انحلال بوکسیت‌های تاش، جاجرم، یزد و شیرین چشمه در شرایط فعلی فرآیند آلومینای جاجرم در بهترین حالت به ترتیب برابر ۷۴/۴، ۶۶/۱، ۷۳/۷ و ۷۷/۵ درصد است. مقدار N/S گل بوکسیت‌های تاش، جاجرم، یزد و شیرین چشمه به ترتیب برابر ۰/۲۷، ۰/۳۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۶ و مقدار A/S گل نیز برای بوکسیت‌های تاش، جاجرم، یزد و شیرین چشمه به ترتیب برابر ۱/۱۴، ۱/۲۵، ۱/۲۶ و ۱/۲۱ است.

۳- راندمان انحلال بوکسیت خوراک کارخانه آلومینای جاجرم با تغییر شرایط فرآیند انحلال و استفاده از نرم‌افزار طراحی آزمایش Dx7 با روش سطح پاسخ افزایش و مدل بهینه انحلال به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش غلظت Na_2O ، دما، زمان و کاهش مقدار آهک نسبت به شرایط فعلی فرآیند در کارخانه بر ارتقای راندمان انحلال مؤثر است. شرایط بهینه انحلال بوکسیت فعلی خوراک کارخانه، غلظت Na_2O برابر ۱۸۰ گرم بر لیتر، دمای ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد، مقدار آهک ۷/۷۳ درصد و زمان ماند ۵۰ دقیقه تعیین شد. لازم به ذکر است زمان ۵۰ تا ۶۰ دقیقه در افزایش راندمان تأثیر زیادی نداشته است و باتوجه به شرایط موجود که حداکثر زمان ماند انحلال در کارخانه ۵۰ دقیقه است لذا زمان بهینه ۵۰ در نظر گرفته شد که با این شرایط راندمان انحلال ۷۲/۰۵ درصد و مقادیر N/S و A/S به ترتیب برابر ۰/۲۷ و ۱/۱۷ پیش‌بینی شده است. آزمایش اعتبارسنجی مدل انحلال در آزمایشگاه تحقیقات شرکت آلومینای ایران در شرایط بهینه پیشنهاد شده، انجام شد که در نتیجه راندمان انحلال

برابر ۷۲/۲۴٪ و مقدار A/S و N/S به ترتیب برابر ۱/۱۶ و ۰/۲۸ به دست آمد. بنابراین نسبت به شرایط فعلی فرآیند انحلال در کارخانه یعنی غلظت Na_2O برابر ۱۷۰ گرم بر لیتر، دمای ۲۷۰ درجه سانتی گراد، آهک ۸ درصد و زمان ۴۵ دقیقه (آزمایش شماره ۱۷) راندمان انحلال بیش از ۲٪ و مقادیر N/S و A/S به ترتیب حدود ۰/۰۲ و ۰/۰۹ بهبود یافت.

۴- مصارف ویژه عملیاتی در شرایط بهینه نسبت به شرایط فعلی کارخانه بهبود یافته است به طوری که مصارف ویژه بوکسیت، آهک و سود در شرایط فعلی به ترتیب برابر ۳/۰۸ تن، ۲۴۶ کیلوگرم و ۲۹۶ کیلوگرم به ازای یک تن آلومینا هست در صورتی که مصارف ویژه بوکسیت، آهک و سود بر اساس مدل بهینه پیشنهادی به ترتیب برابر ۲/۹۹ تن، ۲۳۱ کیلوگرم و ۲۸۸ کیلوگرم به ازای یک تن آلومینا خواهد شد.

۴- با توجه به نتیجه حاصل از بهینه سازی انحلال بوکسیت خوراک کارخانه جاجرم پیش بینی می شود در مقایسه با شرایط فعلی منجر به افزایش تولید سالیانه حدود ۷,۲۹۱ تن آلومینا و کاهش مصرف سود حدود ۱,۹۲۰ تن شود.

۵-۲- پیشنهادها

- ۱- با توجه به این که مدول و عیار Al_2O_3 بوکسیت باید مناسب خوراک کارخانه باشد تا بتواند در فرآیند تولید آلومینا استفاده شود، لذا خوراک یکنواخت و بدون نوسان نیز در بهبود انحلال مؤثر است. از آنجایی که عملیات همگن سازی بوکسیت در بخش خردایش به خوبی انجام نمی شود بنابراین پیشنهاد می شود پشته های خوراک ۱۰ هزار تنی همگن و دارای مدول مشخص و یکنواخت قبل از ارسال به کارخانه آماده سازی و سپس ارسال شود.
- ۲- از آنجایی که ماهیت نرمه های بوکسیت، بیش تر کانی های آلوموسیلیکاته که عامل اصلی تلفات سود و آلومینا در فرآیند تولید هستند؛ لذا پیشنهاد می شود عملیات پیش فرآوری برای جداسازی نرمه ها با روش آسان و کم هزینه انجام شود تا بوکسیت با کیفیت در فرآیند مصرف شود و راندمان انحلال بهبود یابد.

۳- پیشنهاد می‌شود تأثیر عوامل دیگری که می‌تواند بر بهبود انحلال بوکسیت نقش مثبت داشته مانند اندازه ذرات، کیفیت آهک پخته‌شده (اکتیویته آهک) و عوامل دیگری که می‌تواند بر بهبود انحلال نقش منفی داشته مانند ترکیبات کربناته بوکسیت (مقادیر MgO و CaO) مطالعه و بررسی شوند.

منابع

- [۱] فتحی حبشی، ۱۳۹۶، "هیدرومتالورژی"، جلد اول، محمود عبداللهی، سید ضیاءالدین شفایی، چاپ دوم، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۲] ریچارد ادواردز، کیث اتیکنسون، ۱۳۷۷، "زمین‌شناسی کانسارها"، فرید مر، محمدعلی نکو وقت تک، انتشارات دانشگاه شیراز.
- [۳] شهاب‌پور، جمشید، ۱۳۸۲، "زمین‌شناسی اقتصادی" انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [۴] شهریاری، محمد، ۱۳۵۹، "روش‌های تولید آلومینا" شرکت آلومیران.
- [۵] Smith, P. (2009). *The processing of high silica bauxites—review of existing and potential processes. Hydrometallurgy*, 98(1-2), 162-176.
- [۶] Gao, S. L., Li, X. A., Wei, D. Z., Ping, F. A. N. G., Jia, C. Y., Liu, W. G., & Cong, H. A. N. (2008). *Beneficiation of low-grade diasporic bauxite with hydrocyclone. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18(2), 444-448.
- [۷] Shadloo, M., & Zarbayani, M. (2015). *Improving Characterization of Low Grade Elburz Bauxite to Be Utilized in Jajarm Alumina Plant. In Light Metals 2015* (pp. 15-20). Springer, Cham.
- [۸] Rezaee Rad, M., Shahhoseini, S., Janfada, M., Mirzaee, H. A., & Kelidari, P. (2017). *Investigation of parameters affecting desilication of diasporic bauxite in Jajarm mine by thermo-chemical treatment. Journal of Mining and Environment*, 8(1), 75-81.
- [۹] Pehlivan, A., Aydin, A. O., & Alp, A. (2012). *Alumina extraction from low grade diasporic bauxite by pyro-hydro metallurgical process. Sak. Univ. J. Sci*, 16(2), 92-98.
- [۱۰] Kshatriya, N.K., Chandel, G.R., Dasghupta, S., & Raghuvan, P.K.N. (2006). *Bauxite digestion studies for optimization of operetaing parameters, in International conferance on Non-ferrous metals 2006: Bhubaneswar.*
- [۱۱] Abdel-Aal, E. S. A. (2016). *Leaching kinetics of gibbsitic bauxite with sodium hydroxide. In E3S Web of Conferences* (Vol. 8, p. 01021). EDP Sciences.
- [۱۲] Songqing, G. (2016). *Bayer process efficiency improvement. In Light Metals 2013* (pp. 163-167). Springer, Cham.

- [۱۳] Jiang, T., Pan, X., Yu, H., Hou, X., Tu, G., Zhang, R., & Lu, Y. (2016). *Effect of Lime Addition During Digestion on Stability of Digested Liquor of Diasporic Bauxite*. In *Light Metals 2016* (pp. 45-49). Springer, Cham.
- [۱۴] Pan, X. L., Yu, H. Y., Dong, K. W., Tu, G. F., & Bi, S. W. (2012). *Pre-desilication and digestion of gibbsitic bauxite with lime in sodium aluminate liquor*. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 19(11), 973-977.
- [۱۵] وزارت صنایع و معادن، طرح تجهیز معدن و کارخانه تولید آلومینا از بوکسیت " متن آموزش فرآیند " فصل ۱-۶، ۱۳۷۵.
- [۱۶] Habashi, F. (1995). *Bayer's process for alumina production: a historical perspective*. *Bull. Hist. Chem.* 17(18): p. 15.
- [۱۷] ALUTERV-FKI, (1990). *Thechno economic feasibility study by the bayer tube digestion process*, *United Nations Industrial Development Organization*, 4(1), 36-96.
- [۱۸] Geraylou, O., Hosseini, S., Sargheyini, J., & Salimi, R. (2011). *Studies on processability of Iranian bauxite resources to produce alumina in Jajarm Alumina Beneficiation Plant*.
- [۱۹] Li, X., Gu, S., Yin, Z., Wu, G., & Zhai, Y. (2010). *Regulating the digestion of high silica bauxite with calcium ferrite addition*. *Hydrometallurgy*, 104(2), 313-316.
- [۲۰] Raghavan, P. K. N., Kshatriya, N. K., & Dasgupta, S. (2011). *Digestion Studies on Central Indian Bauxite*. In *Light Metals 2011* (pp. 29-32). Springer, Cham.
- [۲۱] Li, X., Yu, S., Dong, W., Chen, Y., Zhou, Q., Qi, T., ... & Jiang, Y. (2015). *Investigating the effect of ferrous ion on the digestion of diasporic bauxite in the Bayer process*. *Hydrometallurgy*, 152, 183-189.
- [۲۲] Liu, Z., Li, W., Ma, W., Yin, Z., & Wu, G. (2015). *Research on digestion behavior of sulfur in high-sulfur bauxite*. In *Light Metals 2015* (pp. 39-43). Springer, Cham.
- [۲۳] Roach, G. I. D., & White, A. J. (2016). *Dissolution kinetics of kaolin in caustic liquors*. In *Essential Readings in Light Metals* (pp. 240-246). Springer, Cham.
- [۲۴] Li, G., Luo, J., Jiang, T., Li, Z., Peng, Z., & Zhang, Y. (2016). *Digestion of alumina from non-magnetic material obtained from magnetic separation of reduced iron-rich diasporic bauxite with sodium salts*. *Metals*, 6(11), 294.

- [۲۵] Luo, M., Cao, W., & Liping, Z. (2016). *Effect of Different Silica Mineral Compositions on the Digestion Results in Bayer Process*. In *Light Metals 2016* (pp. 39-43). Springer, Cham.
- [۲۶] Oku, T., & Yamada, K. (2016). *The dissolution rate of quartz and the rate of desilication in the Bayer liquor*. In *Essential Readings in Light Metals* (pp. 247-254). Springer, Cham.
- [۲۷] Le, T., Ju, S., Lu, L., Peng, J., Zhou, L., & Wang, S. (2017). *A novel process and its mechanism for recovering alumina from diasporic bauxite*. *Hydrometallurgy*, 169, 124-134.
- [۲۸] Dickson, R., Saleem, M., & Bhatti, M. A. (2017). *The Production of $\text{Al}(\text{OH})_3$ from Indigenous High-Silica Bauxite*. *Arabian journal for science and engineering*, 42(4), 1529-1535.
- [۲۹] Li, G., Gu, F., Jiang, T., Luo, J., Deng, B., & Peng, Z. (2017). *Beneficiation of Aluminum-, iron-, and titanium-bearing constituents from diasporic bauxite ores*. *JOM*, 69(2), 315-322.
- [۳۰] Le, T., Ju, S., Koppala, S., Peng, J., Pan, B., Zhang, L., ... & Li, X. (2018). *Kinetics study of microwave enhanced reactions between diasporic bauxite and alkali solution*. *Journal of Alloys and Compounds*, 749, 652-663.
- [۳۱] Deng, B. N., Li, G. H., Luo, J., Zeng, J. H., Rao, M. J., Peng, Z. W., & Jiang, T. (2018). *Alkaline digestion behavior and alumina extraction from sodium aluminosilicate generated in pyrometallurgical process*. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 25(12), 1380-1388.
- [۳۲] Witek-Krowiak, A., Chojnacka, K., Podstawczyk, D., Dawiec, A., & Pokomeda, K. (2014). *Application of response surface methodology and artificial neural network methods in modelling and optimization of biosorption process*. *Bioresource technology*, 160, 150-160.

پیوست‌ها

PRFR-017-02 کد فرم : تاریخ بازنگری : ۱۳۹۰/۰۳/۲۲		آزمایشات شیمیایی و فیزیکی ارمال نایچ غیر روغن					شرکت ایستای اوزن واحد درخواست کننده : تحقیق و توسعه			
No.	Sample No.	Lab. No.	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	L.O.I %
1	B-Jajarm		45.81	12.43	22.49	5.29	0.63	0.34	0.30	11.40
2	B-Tash		46.96	10.68	22.00	3.38	2.15	0.42	0.25	13.50
3	B-Yazd		45.86	9.71	24.45	5.11	0.34	0.37	0.40	11.90
4	B China cheshmeh		52.70	9.82	16.84	6.59	0.40	0.21	0.35	12.40
5	B-Mix		46.35	11.08	22.13	4.11	1.50	0.41	0.30	12.60
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										
33										
34										

تأیید کننده:

تاریخ:

رئیس آزمایشگاه:

مسئول آزمایشگاه:

تاریخ تمام آزمون:

ساعت تمام آزمون:

پیوست ۱: مشخصات شیمیایی بوکسیت‌های جاجرم، تاش، یزد و شیرین چشمه و بوکسیت اختلاط

PRFR-017-02 کد فرم:		آزمایشات شیمیایی و فیزیکی					شرکت اوستال ایران				
تاریخ بازنگری: ۱۷/۰۷/۱۴		ارسال تاریخ مهر روان					تاریخ ارسال مهر:				
تاریخ ارسال مهر:		نوع نمونه: گل قریز					نوع و نحوه				
No.	Sample No.	Lab. No.	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	L.O.I %	
1	R-TSH-01		17.22	16.13	34.88	5.64	11.54	0.98	4.11	10.50	
2	R-TSH-02		17.25	14.12	33.12	5.48	13.49	1.15	3.68	10.30	
3	R-TSH-03		16.31	12.84	32.28	5.21	15.87	1.80	3.02	11.20	
4	R-Jajarm-01		17.80	14.93	31.47	7.20	9.84	1.10	6.25	10.30	
5	R-Jajarm-02		18.17	14.53	29.42	6.64	12.20	1.70	5.09	10.70	
6	R-Jajarm-03		18.35	13.98	28.89	6.12	13.70	1.80	4.60	10.80	
7	R-Chi.Ch-01		17.93	15.64	23.64	7.30	13.32	2.68	6.88	11.40	
8	R-Chi.Ch-02		18.23	15.36	22.56	7.14	14.14	2.98	6.93	11.70	
9	R-Chi.Ch-03		18.07	14.98	22.69	7.08	16.18	3.10	6.33	11.90	
10	R-Yazd-01		14.14	10.96	38.12	7.40	10.13	2.80	2.70	11.70	
11	R-Yazd-02		15.85	11.42	35.24	6.28	12.39	2.90	2.47	11.70	
12	R-Yazd-03		16.85	11.46	33.75	6.81	13.55	2.95	2.42	11.80	
13	R-Yazd-04		13.94	11.10	38.70	7.49	9.94	2.65	2.82	11.00	
14	R-Yazd-05		15.50	11.97	36.21	6.75	12.12	2.60	2.69	11.50	
15	R-Yazd-06		16.24	11.34	33.80	6.27	14.11	3.02	2.24	11.80	
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											
31											
32											
33											
34											

تایید کننده:

تاریخ:

رئیس آزمایشگاه:

مسئول آزمایشگاه:

تاریخ اعلام نتیجه:

باعتبار اعلام نتیجه:

پیوست ۲: مشخصات شیمیایی گل بوکسیت‌های جاجرم، تاش، یزد و شیرین چشمه با شرایط مختلف


PRFR-017-02 : کد فرم		آزمایشات شیمیایی و فیزیکی					شرکت آلومینای ایران			
تاریخ بازنگری : ۹۷/۰۷/۲۲		ارسال نتایج غیر روتین					واحد درخواست کننده: تحقیق و توسعه			
تاریخ ارسال نمونه:		نوع نمونه: کل قرمز								
No.	Sample No.	Lab. No.	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	L.O.I %
1	R-mix-01		18.06	14.24	28.63	5.85	11.35	3.36	4.85	10.80
2	R-mix-02		17.37	14.12	28.63	5.97	11.75	3.15	4.66	11.40
3	R-mix-03		17.02	13.98	30.55	6.21	11.44	2.96	4.70	11.50
4	R-mix-04		16.48	14.09	33.22	6.40	11.63	2.09	4.38	10.70
5	R-mix-05		17.28	12.79	28.26	5.83	14.99	3.46	3.16	11.40
6	R-mix-06		17.64	13.34	29.17	5.98	14.86	2.62	3.17	10.50
7	R-mix-07		16.88	13.07	31.20	6.12	15.11	0.98	2.96	11.90
8	R-mix-08		16.51	13.20	30.80	6.22	15.22	1.53	3.10	11.60
9	R-mix-09		17.91	14.35	32.09	6.38	10.96	0.92	4.93	11.40
10	R-mix-10		16.67	13.83	32.50	6.53	10.36	1.17	4.62	11.70
11	R-mix-11		16.42	14.20	33.12	6.46	10.66	2.26	4.61	11.20
12	R-mix-12		16.36	14.56	34.16	6.62	10.62	1.02	4.65	10.90
13	R-mix-13		17.57	13.61	27.99	5.80	14.73	3.06	3.27	11.40
14	R-mix-14		16.88	13.40	29.51	5.96	15.37	2.33	3.13	10.90
15	R-mix-15		16.86	13.52	30.88	6.25	14.64	1.16	3.05	11.00
16	R-mix-16		17.50	14.40	29.35	6.26	15.22	1.96	3.38	10.20
17	R-mix-17		16.71	13.36	30.38	6.14	13.35	2.77	3.95	10.50
18	R-mix-18		18.22	15.07	30.26	6.22	13.38	1.56	4.14	10.10
19	R-mix-19		16.18	13.01	30.11	6.08	13.92	3.65	3.58	10.80
20	R-mix-20		16.72	13.88	30.59	6.26	13.35	2.49	3.75	10.30
21	R-mix-21		18.43	15.43	31.20	6.54	11.22	1.00	4.85	10.80
22	R-mix-22		16.55	13.14	30.22	6.28	16.07	0.97	3.03	11.00
23	R-mix-23		16.54	13.12	29.57	6.25	13.70	2.80	3.63	11.40
24	R-mix-24		16.26	13.53	33.24	6.44	13.23	1.27	3.47	10.50
25	R-mix-25		16.36	13.51	32.35	6.68	13.46	1.20	3.60	10.60
26	R-mix-26		17.60	14.53	31.14	6.40	13.56	1.09	4.13	10.10
27	R-mix-27		16.86	13.92	30.12	6.12	13.16	3.26	3.78	10.50
28	R-mix-28		17.13	14.03	29.91	6.10	13.65	2.64	3.99	10.10
29	R-mix-29		16.50	13.51	31.52	6.44	13.48	1.98	3.77	10.80
30	R-mix-30		17.80	14.57	31.49	6.22	12.85	0.89	4.13	10.30
31	R-mix-optimized		17.61	15.16	31.49	6.46	12.22	0.94	4.19	10.90
32										
33										
34										

تأیید کننده:
تاریخ:


رئیس آزمایشگاه:

مسئول آزمایشگاه:
تاریخ انجام آنالیز:
ساعت انجام آنالیز:


پیوست ۳: مشخصات شیمیایی گل آزمایش‌های انحلال بوکسیت اختلاط

کد فرم: PRFR-217-01 تاریخ بازنگری: ۹۲/۱۲/۱۸	پایش فرآوری بوکسیت	 شرکت آلومینای ایران																													
شماره:	تاجیه مورد ارزیابی: اختلاط	تاریخ انجام:																													
تاریخ ارسال نمونه: ۹۷/۹/۱۳	مشخصات بوکسیت ورودی																														
مشخصات مواد ورودی	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Sample No.</th> <th>Al₂O₃ (%)</th> <th>SiO₂ (%)</th> <th>Fe₂O₃ (%)</th> <th>TiO₂ (%)</th> <th>CaO (%)</th> <th>MgO (%)</th> <th>Na₂O (%)</th> <th>LOI (%)</th> <th>μ_s</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B-Mix-17</td> <td>46.36</td> <td>11.08</td> <td>22.13</td> <td>4.11</td> <td>1.5</td> <td>0.41</td> <td>0.3</td> <td>12.8</td> <td>4.18</td> </tr> </tbody> </table>										Sample No.	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	LOI (%)	μ _s	B-Mix-17	46.36	11.08	22.13	4.11	1.5	0.41	0.3	12.8	4.18	
	Sample No.	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	LOI (%)	μ _s																					
	B-Mix-17	46.36	11.08	22.13	4.11	1.5	0.41	0.3	12.8	4.18																					
مشخصات لیکور ورودی																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Sample No.</th> <th>Na₂O (g/l)</th> <th>Al₂O₃ (g/l)</th> <th>SiO₂ (g/l)</th> <th>Density (g/ml)</th> <th>Volume (ml)</th> <th>Na₂O₁ (g/l)</th> <th>α_s</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L-516</td> <td>189.83</td> <td>91.80</td> <td>0.3</td> <td>1.310</td> <td>100</td> <td>194.06</td> <td>3.04</td> </tr> </tbody> </table>										Sample No.	Na ₂ O (g/l)	Al ₂ O ₃ (g/l)	SiO ₂ (g/l)	Density (g/ml)	Volume (ml)	Na ₂ O ₁ (g/l)	α _s	L-516	189.83	91.80	0.3	1.310	100	194.06	3.04						
Sample No.	Na ₂ O (g/l)	Al ₂ O ₃ (g/l)	SiO ₂ (g/l)	Density (g/ml)	Volume (ml)	Na ₂ O ₁ (g/l)	α _s																								
L-516	189.83	91.80	0.3	1.310	100	194.06	3.04																								
مشخصات آهک مصرفی																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Sample No.</th> <th>CaO_{act} (%)</th> <th>Al₂O₃ (%)</th> <th>SiO₂ (%)</th> <th>Fe₂O₃ (%)</th> <th>TiO₂ (%)</th> <th>CaO (%)</th> <th>MgO (%)</th> <th>Na₂O (%)</th> <th>K₂O (%)</th> <th>Lime_{equiv} add. (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L-05</td> <td>86</td> <td>0.28</td> <td>0.51</td> <td>0.28</td> <td></td> <td></td> <td>0.02</td> <td></td> <td></td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table>										Sample No.	CaO _{act} (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Lime _{equiv} add. (%)	L-05	86	0.28	0.51	0.28			0.02			8
Sample No.	CaO _{act} (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Lime _{equiv} add. (%)																					
L-05	86	0.28	0.51	0.28			0.02			8																					
شرایط انحلال	شرایط انحلال																														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Dry Bauxite mass (gr)</th> <th>Lime mass (gr)</th> <th>Liquor mass (gr)</th> <th>Digestion Temp. (°C)</th> <th>Mixing Rate (rpm)</th> <th>Holding Time (min)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>23.48</td> <td>1.88</td> <td>131.0</td> <td>270</td> <td>38</td> <td>45</td> </tr> </tbody> </table>										Dry Bauxite mass (gr)	Lime mass (gr)	Liquor mass (gr)	Digestion Temp. (°C)	Mixing Rate (rpm)	Holding Time (min)	23.48	1.88	131.0	270	38	45										
Dry Bauxite mass (gr)	Lime mass (gr)	Liquor mass (gr)	Digestion Temp. (°C)	Mixing Rate (rpm)	Holding Time (min)																										
23.48	1.88	131.0	270	38	45																										
مشخصات مواد خروجی	مشخصات لیکور خروجی																														
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Sample No.</th> <th>Na₂O (g/l)</th> <th>Al₂O₃ (g/l)</th> <th>SiO₂ (g/l)</th> <th>Density (g/ml)</th> <th>Volume (ml)</th> <th>Na₂O₁ (g/l)</th> <th>α_s</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L-Mix-17</td> <td>153.1</td> <td>168.8</td> <td>0.6</td> <td>1.335</td> <td>105</td> <td>178.3</td> <td>1.40</td> </tr> </tbody> </table>										Sample No.	Na ₂ O (g/l)	Al ₂ O ₃ (g/l)	SiO ₂ (g/l)	Density (g/ml)	Volume (ml)	Na ₂ O ₁ (g/l)	α _s	L-Mix-17	153.1	168.8	0.6	1.335	105	178.3	1.40					
	Sample No.	Na ₂ O (g/l)	Al ₂ O ₃ (g/l)	SiO ₂ (g/l)	Density (g/ml)	Volume (ml)	Na ₂ O ₁ (g/l)	α _s																							
L-Mix-17	153.1	168.8	0.6	1.335	105	178.3	1.40																								
مشخصات کل فرمز خروجی																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Sample No.</th> <th>weight (gr)</th> <th>Al₂O₃ (%)</th> <th>SiO₂ (%)</th> <th>Fe₂O₃ (%)</th> <th>TiO₂ (%)</th> <th>CaO (%)</th> <th>MgO (%)</th> <th>Na₂O (%)</th> <th>A/S</th> <th>N/S</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R-Mix-17</td> <td>16.40</td> <td>16.71</td> <td>13.36</td> <td>30.38</td> <td>6.14</td> <td>13.35</td> <td>2.77</td> <td>3.95</td> <td>1.25</td> <td>0.30</td> </tr> </tbody> </table>										Sample No.	weight (gr)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	A/S	N/S	R-Mix-17	16.40	16.71	13.36	30.38	6.14	13.35	2.77	3.95	1.25	0.30
Sample No.	weight (gr)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	A/S	N/S																					
R-Mix-17	16.40	16.71	13.36	30.38	6.14	13.35	2.77	3.95	1.25	0.30																					
نتایج انحلال	نتایج انحلال																														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Digestion Yield %</th> <th>Bauxite Consumption (t/Alumina)</th> <th>Lime Consumption (kg/t Alumina)</th> <th>Soda Consumption (kg/t Alumina)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>70.11</td> <td>3.08</td> <td>246</td> <td>296</td> </tr> </tbody> </table>										Digestion Yield %	Bauxite Consumption (t/Alumina)	Lime Consumption (kg/t Alumina)	Soda Consumption (kg/t Alumina)	70.11	3.08	246	296														
Digestion Yield %	Bauxite Consumption (t/Alumina)	Lime Consumption (kg/t Alumina)	Soda Consumption (kg/t Alumina)																												
70.11	3.08	246	296																												
نتایج نه نشینی	مشخصات لیکور رقیق سازی																														
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Sample No.</th> <th>Na₂O (g/l)</th> <th>Al₂O₃ (g/l)</th> <th>SiO₂ (g/l)</th> <th>Density (g/ml)</th> <th>Volume (ml)</th> <th>Na₂O₁ (g/l)</th> <th>α_s</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										Sample No.	Na ₂ O (g/l)	Al ₂ O ₃ (g/l)	SiO ₂ (g/l)	Density (g/ml)	Volume (ml)	Na ₂ O ₁ (g/l)	α _s													
	Sample No.	Na ₂ O (g/l)	Al ₂ O ₃ (g/l)	SiO ₂ (g/l)	Density (g/ml)	Volume (ml)	Na ₂ O ₁ (g/l)	α _s																							
شرایط نه نشینی																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Digested Slurry (ml)</th> <th>Make up Liquor (gr)</th> <th>Settling Temp. (°C)</th> <th>Floculant Type/ Concentration (g/l)</th> <th>Floculant Addition (ppm)</th> <th>Settling Rate (m/h)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										Digested Slurry (ml)	Make up Liquor (gr)	Settling Temp. (°C)	Floculant Type/ Concentration (g/l)	Floculant Addition (ppm)	Settling Rate (m/h)																
Digested Slurry (ml)	Make up Liquor (gr)	Settling Temp. (°C)	Floculant Type/ Concentration (g/l)	Floculant Addition (ppm)	Settling Rate (m/h)																										
نمودار نه نشینی	تهیه کننده:					تاریخ:																									
	تایید کننده:					تاریخ:																									

پیوست ۴: آزمایش انحلال بوکسیت خوراک کارخانه (اختلاط) در شرایط فعلی کارخانه

کد فرم : PRFR-217-01		بایش فرآوری بوکسیت				 شرکت آلومینای ایران				
تاریخ بازنگری : ۹۲/۱۲/۱۸						تاریخ ارسال نمونه : ۹۷/۹/۱۳				
شماره :		ناحیه مورد ارزیابی : اختلاط		تاریخ انجام						
مشخصات مواد ورودی	مشخصات بوکسیت ورودی									
	Sample No.	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	L.O.I (%)	μ _s
	B-Mix-12	46.36	11.08	22.13	4.11	1.5	0.41	0.3	12.8	4.18
	مشخصات لیکور ورودی									
Sample No.	Na ₂ O _{eq} (g/l)	Al ₂ O ₃ (g/l)	SiO ₂ (g/l)	Density (g/ml)	Volume (ml)	Na ₂ O ₁ (g/l)	Q _c			
L-516	189.42	96.39	0.3	1.325	100	204.91	3.08			
مشخصات آهک مصرفی										
Sample No.	CaO _{act} (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Lime _{act} add. (%)
L-03	86	0.28	0.51	0.28			0.02			6
شرایط انحلال	شرایط انحلال									
	Dry Bauxite max (gr)	Lime max (gr)	Liquor max (gr)	Digestion Temp. (°C)	Mixing Rate (rpm)	Holding Time (min)				
	25.16	1.51	182.5	275	38	60				
مشخصات مواد خروجی	مشخصات لیکور خروجی									
	Sample No.	Na ₂ O ₁ (g/l)	Al ₂ O ₃ (g/l)	SiO ₂ (g/l)	Density (g/ml)	Volume (ml)	Na ₂ O ₁ (g/l)	Q _c		
	L-Mix-12	158.1	176.7	0.6	1.347	106	184	1.47		
مشخصات گل قرمز خروجی										
Sample No.	weight (gr)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	A/S	N/S
R-Mix-12	15.95	16.36	14.56	34.16	6.62	9.62	1.02	4.65	1.12	0.32
نتایج انحلال	نتایج انحلال									
	Digestion Yield %	Bauxite Consumption (g/t Alumina)	Lime Consumption (g/t Alumina)	Soda Consumption (g/t Alumina)						
	73.15	2.95	177	318						
نتایج نه نشینی	مشخصات لیکور رقیق سازی									
	Sample No.	Na ₂ O ₁ (g/l)	Al ₂ O ₃ (g/l)	SiO ₂ (g/l)	Density (g/ml)	Volume (ml)	Na ₂ O ₁ (g/l)	Q _c		
شرایط نه نشینی										
Dispersed Slurry (ml)	Make up Liquor (gr)	Settling Temp. (°C)	Floculant Type/ Concentration (g/l)	Floculant Addition (ppm)	Settling Rate (m/h)					
نمودار نه نشینی	تهیه کننده :									
	تاریخ : امضاء									
تأیید کننده :										
تاریخ : امضاء										

پیوست ۵: آزمایش انحلال بوکسیت خوراک کارخانه (اختلاط) در شرایط حداکثر راندمان انحلال

PRFR-217-01 : کد فرم		بایش فرآوری بوکسیت		 شرکت آلومینای ایران						
۹۷/۱۲/۱۸ : تاریخ بازنگری										
شماره:		تاریخ ارسال نمونه: ۹۷/۹/۱۳		تاریخ انجام		ناحیه مورد ارزیابی: اختلاط				
مشخصات مواد ورودی	مشخصات بوکسیت ورودی									
	Sample No.	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	L.O.I (%)	μ _s
	B-Mix-Optimized	46.36	11.98	22.13	4.11	1.5	0.41	0.3	12.8	4.18
مشخصات مواد خروجی	مشخصات لیکور ورودی									
	Sample No.	Na ₂ O ₂ (g/l)	Al ₂ O ₃ (g/l)	SiO ₂ (g/l)	Density (g/ml)	Volume (ml)	Na ₂ O ₂ (g/l)	μ _c		
L-516	180.42	96.39	0.3	1.325	100	204.91	3.98			
شرایط انحلال	مشخصات آهک مصرفی									
	Sample No.	CaO _{act} (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)
L-03	86	0.28	0.51	0.28			0.02			7.73
شرایط انحلال	شرایط انحلال									
	Dry Bauxite mass (g)	Lime mass (g)	Liquor mass (g)	Digestion Temp. (°C)	Mixing Rate (rpm)	Holding Time (min)				
25.16	1.94	132.5	275	38	50					
نتایج انحلال	مشخصات لیکور خروجی									
	Sample No.	Na ₂ O ₂ (g/l)	Al ₂ O ₃ (g/l)	SiO ₂ (g/l)	Density (g/ml)	Volume (ml)	Na ₂ O ₂ (g/l)	μ _c		
	L-Mix-Optimized	158.7	176.5	0.6	1.347	100	184.1	1.48		
نتایج انحلال	مشخصات گل ترمز خروجی									
	Sample No.	weight (g)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	A/S
E-Mix-Optimized	16.28	17.61	15.16	31.40	6.46	12.22	0.94	4.19	1.16	0.28
نتایج نه نشینی	نتایج انحلال									
	Digestion Yield %	Bauxite Consumption (t/t Alumina)	Lime Consumption (kg/t Alumina)	Soda Consumption (kg/t Alumina)						
72.24	2.99	231	288							
نتایج نه نشینی	مشخصات لیکور رقیق سازی									
	Sample No.	Na ₂ O ₂ (g/l)	Al ₂ O ₃ (g/l)	SiO ₂ (g/l)	Density (g/ml)	Volume (ml)	Na ₂ O ₂ (g/l)	μ _c		
نمودار نه نشینی	شرایط نه نشینی									
	Digested Slurry (ml)	Make up Liquor (g)	Settling Temp. (°C)	Flucculant Type/ Concentration (g/l)	Flucculant Addition (ppm)	Settling Rate (m/h)				
نمودار نه نشینی					تهیه کننده:					
					تاریخ:					
				تأیید کننده:						
				تاریخ:						

پیوست ۶: آزمایش انحلال بوکسیت خوراک کارخانه (اختلاط) بر اساس مدل بهینه پیشنهادی

Abstract

In the present work, we investigated and optimized the digestion efficiency, A/S and N/S of mixed bauxite in Jajarm Alumina Factory. Factory feed is a mixture of bauxites of Jajarm (35 %), Tash (50 %), Yazd (10 %) and Shirin Cheshmeh (5 %). To achieve optimum process conditions, effective parameters on digestion such as Na₂O concentration of alkaline solution, temperature, amount of lime addition and retention time were studied. Before digestion experiments on mixing bauxite, the digestion conditions of each bauxite were studied individually according to the current conditions of the process. Based on the results, the optimum amount of lime for the Jajarm, Tash, Yazd and Shirin Cheshmeh was 10, 6, 6 and 12 %, respectively, the temperature digestion of Yazd bauxite is 275 °C, which is 5 °C more than other bauxites. A 4-factor 3-level response surface methodology was applied for the design and analysis of experiment with the optimization of effective parameters on digestion. Two quadratics and one linear model were derived for the prediction of digestion efficiency, A/S and N/S responses. The results showed that the optimum amounts for Na₂O concentration, temperature, amount of lime addition and retention time were 180 g/l, 275 ° C, 7.73% and 50 minutes, respectively in which the digestion efficiency, A/S and N/S reached 72.05%, 1.169 and 0.27 respectively. Validation experiment showed that the digestion efficiency, A/S and N/S were 72.22%, 1.162 and 0.28% respectively which means 2% increase in digestion efficiency and a 0.09 and 0.02 decrease in A/S and N/S respectively compared to the current operating conditions.

Keywords: Bayer process, Bauxite, Optimization, Digestion efficiency, Modeling, Response surface methodology



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
M.Sc. Thesis in Mineral Processing

**Study and optimization of digestion efficiency of various
bauxites as Jajarm alumina factory feed**

By: Mohammad Reza Khani

Supervisor:
Dr. M.Karamoozian

June 2019