دوره ۱۶، شماره ۴۶، بهار ۱۴۰۵، صفحه ۶۹-۸۷

نشریه روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن

تارنمای نشریه: http://anm.yazd.ac.ir/

مقاله پژوهشی

پرعیارسازی نمونه هماتیتی کم‌عیار به روش‌های ثقلی و مغناطیسی (مطالعه موردی: خاک سرخ معدن ساحل)

سید حمزه امیری[۱]، مرضیه حسینی نسب[۲*]، محمد نوع‌پرست[۱]، سید ضیاءالدین شفایی تنکابنی[۱]

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(دریافت: ۱۴ اسفند ۱۴۰۳، بازنگری: ۱۵ شهریور ۱۴۰۴، پذیرش: ۱۸ شهریور ۱۴۰۴)

چکیده

در این تحقیق، فرآوری نمونه کانسنگ خاک سرخ منطقه غرب بندرعباس موردبررسی قرار گرفت. مطالعات کانی‌شناسی نشان داد کانی‌های آهن‌دار نمونه شامل هماتیت و گوتیت بوده و کوارتز و کلسیت عمده کانی‌های باطله را تشکیل می‌دهند. نتایج آنالیز شیمیایی تیتراسیون نشان داد که عیار هماتیت در نمونه حاضر ۴۴/۷۱ درصد هماتیت (۳۱/۳ درصد آهن) است و هدف رسیدن به عیار بالای ۵۵-۵۶ درصد هماتیت است. جهت فرآوری و کاهش کانی‌های باطله، آزمایش‌های ثقلی میز لرزان، آزمایش‌های مغناطیسی تر و خشک شدت و گرادیان بالا بر روی نمونه صورت پذیرفت. در انجام آزمایش‌های میز لرزان از روند طراحی آزمایش‌ها به روش فاکتوریل کامل استفاده شد و تأثیر پارامترهای شیب، دبی آب شستشو و آب خوراک بر عیار و بازیابی کنسانتره موردبررسی قرار گرفت. برای آزمایش‌های میز لرزان که برای ابعاد درشت‌تر از ۱۵۰ میکرون انجام شد، در بهترین شرایط با دبی آب خوراک ۸ لیتر در دقیقه، شیب ۸ درجه و آب شستشو ۱۱/۵ لیتر در دقیقه محصولی با عیار ۵۵/۸۷ درصد هماتیت و بازیابی ۶۳/۲۵ درصد به دست آمد که از آن می‌توان به‌عنوان روش پیش فرآوری استفاده نمود. جدایش مغناطیسی خشک گرادیان بالا پس از نرمه‌گیری نمونه خوراک اولیه، در محدوده ابعادی ۱۰۰۰+۲۳۸۰- میکرون، محصولی با عیار ۵۷/۶ درصد هماتیت و بازیابی ۹۵/۱۱ درصد و در محدوده ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون نیز محصولی با عیار ۶۴/۳۴ درصد هماتیت و بازیابی ۷۵/۱۴ درصد را حاصل نمود. در آزمایش‌های جدایش مغناطیسی تر شدت بالا نمونه خوراک اولیه نیز نهایتاً محصولی با عیار ۵۷/۵۳ درصد هماتیت و بازیابی ۶۴/۹ درصد به دست آمد.

کلمات کلیدی

خاک سرخ، هماتیت، میز لرزان، جدایش مغناطیسی، فاکتوریل کامل

*عهده‌دار مکاتبات: hosseininasab@eng.usb.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2025.22874.1669

۱- مقدمه

یکی از رنگینه‌های مهم اکسید آهن که به‌صورت وسیع در صنایع رنگ‌سازی جهت تولید رنگ‌های مختلف روغنی، ساختمانی، صنعتی و غیره مصرف می‌شود، خاک سرخ است. علاوه بر این، خاک سرخ در صنایع دیگر ازجمله صنایع شیمیایی، سیمان، پلاستیک، کاغذسازی، شیشه‌سازی، سرامیک و لوازم‌آرایشی نیز به کار می‌رود [۱-۴].

امروزه کاربردها و نیازهای وسیع صنایع مختلف به خاک سرخ سبب شده تا بشر در جهت کشف و بهره‌برداری از ذخایر جدید خاک سرخ برآید و حتی به علت پایین بودن کیفیت و کمیت خاک سرخ طبیعی، نسبت به تولید خاک سرخ مصنوعی نیز اقدام نماید [۲، ۳، ۵].

ذخایر خاک سرخ به‌طور عمده در مناطق حاره و مرطوب به‌صورت تمرکزهای باقیمانده از آهن تشکیل می‌شوند. در تشکیل این ذخایر، هوازدگی و آب‌های نفوذی یا فرورو، به‌عنوان دو عامل مؤثر و اصلی محسوب می‌شوند [۶، ۷].

این خاک‌ها از آهن یا آلومینیوم یا هر دو غنی هستند [۸]. در برخی از کانسارهای خاک سرخ مانند خاک سرخ در قسمت جنوبی کشور، خاک سرخ که عمدتاً از هماتیت تشکیل شده و همچنین اولیژیست و منیتیت به همراه نمک دیده می‌شود و در بعضی قسمت‌ها نیز نمک به‌صورت خالص یافت می‌شود. انحلال نمک و مهاجرت محلول‌های نمکی به پایین باعث می‌شود که خاک سرخ درون نمک به‌صورت نامحلول و درجا در داخل حفرات ایجادشده باقی بماند و تشکیل کانسار خاک سرخ را دهد [۹]. علاوه بر مصرف هماتیت به‌عنوان یکی از کانی‌های اکسیده در تولید آهن و فولاد، هماتیت در شرایط معینی تبدیل به خاک سرخ شده که در صنعت رنگ‌سازی از آن استفاده می‌شود [۱۰]. معمولاً لازم است تا اکسیدهای آهن طبیعی که برای مصرف به‌صورت رنگ‌دانه استخراج می‌گردند ازنظر دانه‌بندی ریزتر و ساده‌تر شوند تا ازلحاظ تجارتی اهمیت و ارزش بیشتری کسب کنند. کانی‌های اصلی اکسید آهن بر اساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی دسته‌بندی شده و موردتوجه واقع می‌شوند. ترکیب شیمیایی کانی‌هایی مانند گوتیت و هماتیت اکثراً به‌صورت خالص نیستند و تغییراتی توسط کارخانه‌های فرآوری رنگ‌دانه، بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد [۱۱].

نمونه موردمطالعه در این تحقیق متعلق به معدن ساحل در استان هرمزگان است که در فاصله ۲۰ کیلومتری غرب بندرعباس قرار دارد. ذخیره قطعی این معدن، ۵۰۰۰۰۰ تن برآورد شده است. این معدن به‌عنوان نمونه شاخصی از ذخایر متعدد و با ذخیره کم موجود در منطقه است که به‌صورت اقتصادی از آن‌ها بهره گرفته نمی‌شود. مطالعه حاضر باهدف انجام بررسی‌های فرآوری به‌منظور افزایش عیار آهن از نمونه کم‌عیار هماتیتی از ذخیره فوق‌الذکر صورت پذیرفت. دراین‌ارتباط ابتدا نمونه موردنیاز تهیه و پس از آماده‌سازی، بررسی‌های لازم بر روی آن انجام شد.

۲- پیشینه تحقیق

در ارتباط با پرعیارسازی نمونه‌های کم‌عیار هماتیتی تحقیقات بسیاری در ایران و جهان انجام شده است که در این قسمت به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. سنگ معدن هماتیت کم‌عیار در اگمیر ترکیه با استفاده از تجهیزات جداسازی ثقلی مرسوم، جیگ‌ها و میزهای لرزان و جداکننده مغناطیسی با شدت بالا مورد فرآوری قرار گرفت. در این تحقیق هم جداسازی ثقلی و هم جداسازی مغناطیسی با شدت بالا بر پرعیارسازی سنگ معدن هماتیت کم‌عیار مؤثر بودند و کنسانتره‌ای (۶٫۳۵+۹٫۵۳- میلی‌متر) حاوی ۵۱٫۱ درصد آهن با بازیابی ۶۷٫۸۹ درصد از خوراک با ۴۰٫۸۳ درصد آهن، با استفاده از جیگ به دست آمد. در جداسازی مغناطیسی، کنسانتره‌ای با ۴۷٫۲۱ درصد آهن و ۸۶٫۶۶ درصد بازیابی از خوراک با عیار ۳۹٫۳۴ درصد آهن در ابعاد ریزتر از ۳ میلی‌متر حاصل شد [۱۲].

سنگ معدن هماتیتی از استان سین کیانگ چین به‌منظور افزایش عیار آهن و کاهش سیلیس موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کنسانتره آهن با ۶۱ درصد آهن و بازیابی ۶۶ درصد با استفاده از دو مرحله مغناطیسی شدت بالا و فلوتاسیون معکوس به دست آمد [۱۳].

بهنام فرد و خافاجه[1] (۲۰۱۹)، با استفاده از روش مغناطیسی خشک شدت پایین، سنگ‌آهن کم‌عیار سنگان را پرعیار کردند. میزان آهن، اکسید آهن و محتوای گوگرد نمونه به ترتیب ۳۶٫۸۶، ۸٫۱ و ۰٫۱۲ درصد بود. در این تحقیق کنسانتره‌ای با عیار ۴۷٫۱۵ درصد آهن و بازدهی ۶۸٫۵۶ درصد تولید شد [۱۴]. اکبری و همکاران (۱۳۹۵)، امکان استفاده از میز لرزان برای پرعیارسازی سنگ‌آهن هماتیتی زون کم‌عیار (۴۵ درصد آهن) معدن تنگزاغ استان هرمزگان را بررسی کردند. در شرایط بهینه استفاده از میز لرزان طی دو مرحله رافر و اسکونجر از عیار ۴۵ درصد آهن، کنسانتره‌ای

با عیار متوسط ۵۷/۰۸ درصد و بازیابی کل ۳۵/۲ درصد حاصل شد [۱۵].

کونگ[۲] و همکاران (۲۰۲۲)، روش فیزیکی و روش‌های شیمیایی (هیدرو و پیرومتالورژی) بازیابی آهن از گل قرمز را بررسی نمودند و نشان دادند که این ترکیب می‌تواند در آینده در صنعت مورداستفاده قرار گیرد. در روش فیزیکی، کانی‌های حاوی آهن مستقیماً با استفاده از جدایش ثقلی، جدایش مغناطیسی و فلوتاسیون فرآوری می‌شوند [۱۶].

جیانگ[۳] و همکاران، مخروط‌های مستقیم سنتی را با مخروط‌های سهموی مکعبی در هیدروسیکلون جایگزین کردند که به‌طور مؤثر محتوای ذرات ریز در ته ریز را کاهش داد [۱۷]. برخی از محققان از فرآیند جدایش مغناطیسی برای جداسازی بخش حاوی آهن بر مبنای اختلاف خاصیت مغناطیسی استفاده می‌کنند. جیمیسون[۴] و همکاران [۱۸] جدایش مغناطیسی شدت پایین و جدایش مغناطیسی تر شدت بالا را ترکیب کردند و کنسانتره‌ای با ۵۶ درصد وزنی از هماتیت به دست آوردند. به‌منظور افزایش محتوای کل آهن کنسانتره، لی[۵] و همکاران [۱۹] یک فرآیند جداسازی مغناطیسی دومرحله‌ای را به کار بردند؛ هر مرحله شامل جداسازی مغناطیسی ضعیف و جداسازی مغناطیسی قوی حلقه عمودی بود. محتوای کل آهن و نرخ بازیابی کنسانتره به ترتیب ۲۴/۶۳ و ۴۳/۲۹ درصد بود. لی و همکاران در تحقیق دیگری از جداسازی مغناطیسی ابررسانا با گرادیان بالا برای بهبود محتوای کل آهن کنسانتره استفاده کردند و به راندمان وزنی حدود ۶۷ درصد برای هماتیت رسیدند [۲۰]. سونگ[۶] و همکارانش [۲۱] تأثیر متقابل کلکتورهای مختلف را بررسی کردند. هنگامی‌که متیلن بیس‌آکریل‌آمید ($C_6H_{12}N_4$) و نشاسته به‌عنوان کلکتور با یکدیگر مخلوط شدند، بازیابی کلی آهن و بازیابی آهن کنسانتره به ترتیب ۴۹/۸۱ و ۷۴/۶۴ درصد بود. هوانگ[۷] و همکارانش [۲۲] دریافتند که مواد هیومیکی دارای گروه‌های عاملی اسیدی هستند و در تعامل با اکسیدهای آهن، انتخابی‌تر عمل می‌کنند. بازیابی کلی آهن و بازیابی آهن حاصل از کنسانتره حاصل، به ترتیب ۶۱/۱۲ و ۸۶/۲۵ درصد بودند.

برخی از محققان چندین روش فیزیکی را باهم ترکیب کردند. رای[۸] و همکاران [۲۳] به دلیل چگالی بالای اکسید آهن و اکسید تیتانیوم، آن‌ها را با استفاده از هیدروسیکلون از گل قرمز به دست آوردند. شیائو[۹] و همکاران (۲۰۲۲)، گل قرمز بایر با محتوای آهن کل برابر با ۲۶/۸۶ درصد را برای استحصال عناصر ارزشمند اسکاندیم، تیتانیم و گالیوم موردبررسی قرار دادند. فرآیند مؤثر تشویه با نمک کلسیم و جدایش مغناطیسی برای استخراج آهن از گل قرمز انجام شد [۲۴]. برای گل قرمز کم آهن، یک فناوری جذب جدید کم‌هزینه و در مقیاس بزرگ از روش "کلسیناسیون-کربنیزاسیون" پیشنهاد شد. با استفاده از این فناوری برای عمل‌آوری گل قرمز کم‌آهن، سدیم و بخشی از آلومینا در گل قرمز قابل بازیابی است و محتوای اکسید سدیم در باطله‌های نهایی کمتر از ۱ درصد است که می‌تواند مستقیماً برای تهیه سیمان یا خاک استفاده شود [۲۵].

ابول پور و همکاران (۱۴۰۱)، در تحقیقی پودر معدنی با عیار آهن هماتیتی حدود ۳۰ درصد (کارخانه چابهار) را پرعیار کردند و به عیار ۶۵ درصد آهن دست یافتند [۲۶].

ناوی[۱۰] و همکاران (۲۰۲۳)، استخراج آهن از گل قرمز را با استفاده از تشویه احیائی موردبررسی قرار دادند. این روش شامل احیاء در کوره مافل و لوله‌ای است و دما، عامل احیاء و نوع افزودنی به‌عنوان پارامترهای مهم بررسی شدند. اعمال شدت میدان مغناطیسی حدود ۱۰۰۰ گاوس منجر به بازیابی ۸۹/۹ درصد آهن شد [۲۱].

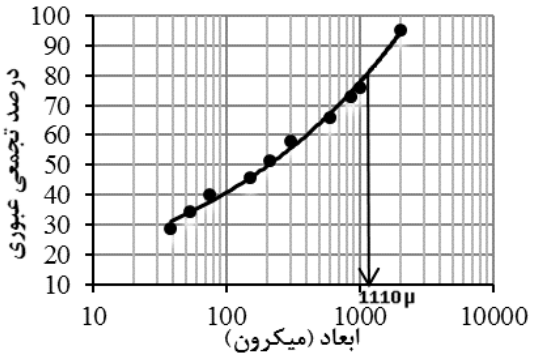
سو[۱۱] و همکاران (۲۰۲۴)، در بخشی از تحقیق خود، بازیابی اسکاندیم از گل قرمز (پسماند جامد حاصل از فرآیند آلومینا) را با استفاده از روش تبادل یونی موردبررسی قرار دادند [۲۷]. یو[۱۲] و همکاران (۲۰۲۴)، آهن و آلومینیوم را از پسماند بوکسیت (گل قرمز) بازیابی کردند. استخراج و استفاده از منابع آهن و آلومینیوم از گل قرمز می‌تواند مشکل جستجوی ذخیره گل قرمز در مقیاس وسیع را برطرف کند. بازیابی و انحلال بالا (بیش از ۹۰ درصد) می‌تواند طی فرآیند دما بالا و لیچینگ ممکن شود [۲۸]. چن[۱۳] و همکاران (۲۰۲۳)، استخراج آهن و آلومینیوم از گل قرمز را طی فرآیند زینترینگ مغناطیسی غیر مضر بررسی کردند. در این مطالعه، فرآیند لیچینگ فشار اتمسفری برای بازیابی منابع آلومینا اتخاذ شد [۲۲]. فارس[۱۴] و همکاران (۲۰۲۵)، فرآوری سنگ‌آهن کم‌عیار (با عیار آهن کل ۳۹/۵ درصد) را با استفاده از جداکننده مغناطیسی بررسی کردند. نمونه سنگ معدن مورداستفاده متشکل از اکسید آهن (گوتیت و هماتیت)، کوارتز، کلریت، مسکویت، پلاژیوکلاز و سایر کانی‌ها بود. نتایج نشان داد که محصول (۵-۰/۱ میلی‌متر) با عیار Fe(T) برابر با ۶۷/۶۷ درصد قابل‌دستیابی است، اما بازیابی آن در مقدار قابل قبولی نبود [۲۹].

در این تحقیق، نمونه مورداستفاده که از معدن ساحل در استان هرمزگان تهیه شد، در ابتدا با روش غرق و شناورسازی با دانسیته‌های مختلف (چندین دانسیته بین ماده با ارزش و باطله) امکان‌سنجی استفاده از روش‌های ثقلی مشخص شد. سپس به دلیل مثبت بودن نتایج آزمایش‌های غرق و شناورسازی از میز لرزان در چندین دانسیته مختلف بررسی لازم صورت پذیرفت. با توجه به مثبت بودن نتایج، آزمایش‌های مغناطیسی انجام شد و درنهایت نتیجه دو روش مغناطیسی و ثقلی موردبررسی قرار گرفتند.

۳- روش تحقیق

۳-۱- تهیه و آماده‌سازی نمونه

در این مرحله ۱۵۰ کیلوگرم نمونه معرف از منطقه موردمطالعه در بندرعباس برداشت و جهت انجام آزمایش‌های فرآوری به آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشکده معدن دانشگاه تهران انتقال یافت. برای آماده‌سازی نمونه جهت استفاده در آزمایش‌های مختلف، ابتدا تمامی نمونه دریافتی خاک سرخ با استفاده از سرند ۲٫۳۵ میلی‌متر سرند و سپس مواد باقی‌مانده روی سرند طی یک مرحله سنگ‌شکنی در مسیر بسته توسط سنگ‌شکن غلتکی مورد خردایش قرار گرفت و تمامی مواد به ابعاد ریزتر از ۲٫۳۵ میلی‌متر رسانده شد و سپس نمونه مورد اختلاط و همگن‌سازی قرار گرفت. شکل ۱ نمودار تجمعی عبوری ذرات را نشان می‌دهد.



شکل ۱: منحنی توزیع دانه‌بندی محصول نهایی اختلاط و همگن‌سازی

با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که d_{80} محصول نهایی تقریباً ۱۱۱۰ میکرون بوده و همچنین ۵۰ درصد ذرات ریزتر از ۲۰۰ میکرون می‌باشند. نمونه‌های خردشده، در این مرحله طی تقسیمات متوالی توسط ریفل، به بخش‌های ۲ کیلوگرمی قابل‌استفاده در آزمایش‌های مختلف تقسیم شد.

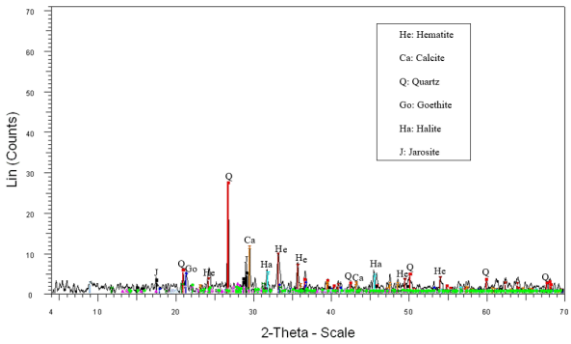
۳-۲- شناسایی نمونه

۳-۲-۱- آنالیز XRD

نخستین گام پس از آماده‌سازی نمونه و تهیه نمونه معرف، انجام مطالعات کانی‌شناسی و آنالیز شیمیایی است. ازاین‌رو نمونه معرفی به وزن تقریبی ۵۰۰ گرم تهیه و توسط آسیای میله‌ای خرد و پودر شد و جهت انجام آزمایش‌های XRD به آزمایشگاه مربوط انتقال یافت. دستگاه XRD مورداستفاده مدل D8 Advance ساخت شرکت Bruker axs در آزمایشگاه اشعه ایکس دانشکده معدن دانشگاه تهران بود. نتایج این آنالیز در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است که دلالت بر آن دارد که عمده کانی‌های نمونه، هماتیت و کلسیت و کوارتز و به مقدار جزئی‌تر گوتیت، کانی‌های نمکی، ژاروسیت، آنورتیت و اورتوکلاز می‌باشند.

جدول ۱: آنالیز *XRD* نمونه موردمطالعه

نام ترکیب	ترکیب شیمیایی
هماتیت	Fe_2O_3
کوارتز	SiO_2
کلسیت	$CaCO_3$
گوتیت	$FeO(OH)$
هالیت	$NaCl$
ژاروسیت	$(K,H_3O)Fe_3(SO_4)_2(OH)_6$
آنورتیت	$CaAl_2Si_2O_8$
اورتوکلاز	$KAlSi_3O_8$
بیوتیت	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
ژیپس	$CaSO_4{\cdot}_2H_2O$
آلبیت	$NaAlSi_3O_8$
منیتیت	Fe_3O_4



شکل ۲: گراف *XRD* نمونه معرف

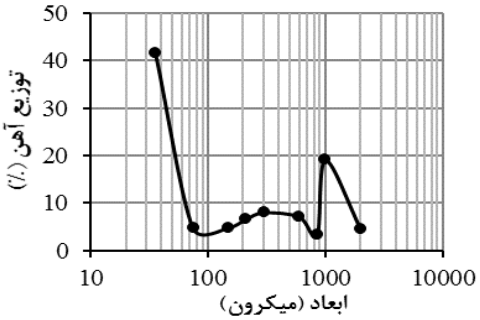
۳-۲-۲- تجزیه شیمیایی نمونه اولیه

به‌منظور انجام مطالعات عیارسنجی از روش تیتراسیون استفاده شد. برای تعیین دقیق مقدار آهن موجود در خوراک اولیه، دو نمونه معرف برای آنالیز شیمیایی تیتراسیون تهیه

شد. نتیجه آنالیز نشان داد که میزان آهن موجود در نمونه برابر با ۳۱٫۳ درصد (۴۴٫۷۱ درصد هماتیت) است.

۳-۲-۱- آنالیز سرندی و شیمیایی ابعادی

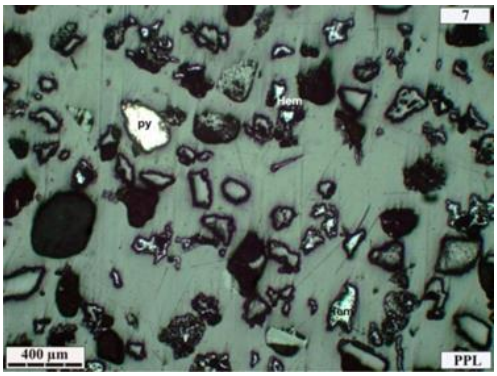
به‌منظور تعیین توزیع آهن نمونه موردمطالعه، آزمایش آنالیز ابعادی انجام شد. از طبقات سرندی به‌دست‌آمده یک نمونه تهیه و مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت. نتایج آنالیز عیارسنجی در محدوده ابعادی مختلف در شکل ۳ آمده است. عیار کل آهن نمونه نیز ۳۱٫۳ درصد به دست آمد. همان‌طور که از شکل ۳ می‌توان نتیجه گرفت، در محدوده ابعادی ریزتر از ۷۵ میکرون، میزان توزیع آهن نسبت به چند محدوده ابعادی درشت‌تر خود افزایش داشت که این امر می‌تواند ناشی از تمرکز هماتیت دانه‌ریز و خاکی در این محدوده باشد.



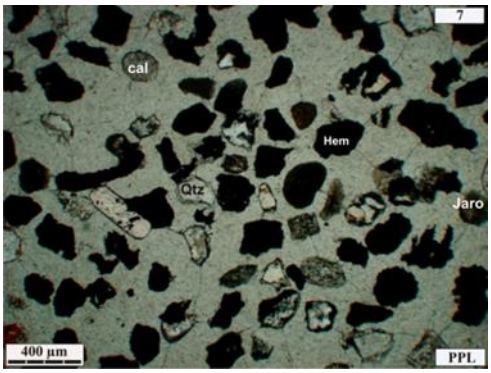
شکل ۳: توزیع آهن در محدوده‌های ابعادی مختلف

۳-۲-۳- مطالعات مقاطع صیقلی و تیغه نازک

مطالعه میکروسکوپی بر روی ۹ مقطع صیقلی و ۹ تیغه نازک انجام شد. در عمل ابتدا یک نمونه از ماده معدنی در بخش‌های مختلف مورد تجزیه ابعادی قرار گرفت و از محدوده‌های ابعادی ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۸۵۰، ۶۰۰، ۳۰۰، ۲۱۲،۱۵۰، ۷۵ میکرون و ریزتر از ۷۵ میکرون مقاطع صیقلی و نازک تهیه شد. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب مقطع صیقلی و تیغه نازک در محدود ابعادی ۱۵۰+۲۱۲- را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمایی از مقطع صیقلی محدوده ابعادی ۱۵۰+۲۱۲- میکرون



شکل ۵: نمایی از تیغه نازک محدوده ابعادی ۱۵۰+۲۱۲- میکرون

خلاصه نتایج بررسی‌های کانی‌شناسی به شرح ذیل است:

- عمده کانی آهن‌دار نمونه، هماتیت است که به دو فرم بلوری و ریز و خاکی یافت می‌شود. همچنین هماتیت به‌طور متوسط ۳۰ درصد قطعات را به خود اختصاص داده است.
- هماتیت ریز و خاکی در اکثر محدوده‌های ابعادی هم با هماتیت بلوری و هم با کانی‌های شفاف درگیری نشان می‌دهد که این موضوع باید در انتخاب روش فرآوری مدنظر قرار گیرد.
- کانی‌های کلسیت و کوارتز عمده کانی‌های باطله نمونه و در مقادیر کمتر ژاروسیت، فلدسپات، ژیپس و کانی‌های رسی و نمکی نیز مشاهده می‌شوند.
- هماتیت بلوری دانه‌درشت نزدیک به ۲۰ درصد قطعات و هماتیت دانه‌ریز نزدیک به ۱۲ درصد را به خود اختصاص داده است. با توجه به کانی‌سازی هماتیت این نمونه که در دو نسل ابعاد درشت و ریز صورت گرفته است، تجربه نشان می‌دهد که در این‌گونه موارد انتخاب روش فرآوری ثقلی برای جدایش نسل اول دانه‌درشت و روش‌های جدایش مغناطیسی شدت و گرادیان بالا برای نسل دوم بسیار دانه‌ریز موردبررسی قرار می‌گیرد.
- نتایج مطالعات، نشان داد که درجه آزادی هماتیت بلوری و دانه‌درشت، در سایز ۱۵۰ میکرون، برابر ۸۵ درصد و برای هماتیت دانه‌ریز در ابعاد ۳۵ میکرون برابر ۳۵-۴۰ درصد است.

۳-۲-۴- وزن مخصوص، اندیس کار و زمان بهینه خردایش نمونه

وزن مخصوص ظاهری و واقعی نمونه بعد از سه بار تکرار به ترتیب برابر با ۱٫۴۹ و ۳٫۲۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب

حاصل شد. همچنین اندیس کار نمونه به روش آسیای گلوله‌ای استاندارد باند مورد آزمایش قرار گرفت [۳۰] و مقدار آن برابر ۸٫۲۹ kWh/t به دست آمد.

نمونه موردنظر در زمان‌های ۲، ۴، ۵ و ۸ دقیقه تحت خردایش با آسیای میله‌ای دنور به‌صورت تر قرار گرفت که زمان ۴ دقیقه، زمان بهینه برای رسیدن به ابعاد مطلوب (۱۵۰ میکرون) بود.

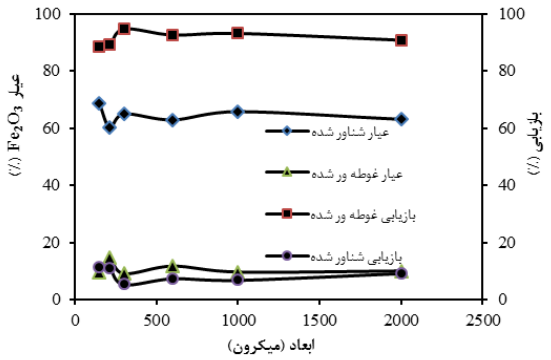
۳-۳- آزمایش مایع سنگین

استفاده از روش‌های ثقلی علیرغم بهره‌گیری از تکنیک‌ها و تجهیزات متفاوت، نیازمند استفاده از اطلاعاتی است که از مطالعات مراحل آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی به دست می‌آیند. یکی از این اطلاعات، رفتار ماده معدنی در آزمایش‌های غرق و شناورسازی است. در این آزمایش‌ها با استفاده از محلول‌های واسطه سنگین، بخش شناور و غوطه‌ور در دانه‌بندی خاص از ماده معدنی موردمطالعه در چگالی مشخص از مایع یا واسطه سنگین مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

برای تعیین دقیق درجه و سایز آزادی نمونه، آزمایشی با مایع سنگین برموفرم با وزن مخصوص ۲٫۸۲ g/cm^3 روی بخش‌های ابعادی مختلف نمونه انجام شد. لازم به توضیح می‌داند، انتخاب این وزن مخصوص به دلیل آن است که اکثر کانی‌های باطله مانند کلسیت و کوارتز دارای وزن مخصوص کمتر از ۲٫۸۲ g/cm^3 هستند، بنابراین در بخش شناور تجمع می‌یابند و بخش غوطه‌ور شامل هماتیت است که دارای وزن مخصوص بیشتر از ۲٫۸۲ g/cm^3 است.

به‌منظور انجام آزمایش مایع سنگین از هر یک از بخش‌های ابعادی خوراک (۶ طبقه سرندی ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۶۰۰، ۳۰۰، ۲۱۲ و ۱۵۰ میکرون) حدود ۵۰ گرم نمونه معرف تهیه شد و مورد آزمایش قرار گرفت. به دلیل ایجاد سوسپانسیون و عدم شرایط ته‌نشینی در ابعاد ریز، حداقل ابعاد برای تست مایع سنگین ۱۵ میکرون در نظر گرفته شد.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، خوراک در اندازه ۱۵۰ میکرون، دارای بیشترین عیار و بازیابی بسیار بالا در بخش غوطه‌ور و عیار پایین در بخش شناور شده است. با توجه به این امر می‌توان به این نتیجه رسید که ذرات هماتیت دانه‌درشت و بلوری در این بخش به درجه آزادی کافی رسیده‌اند.



شکل ۶: نمودار عیار و بازیابی هماتیت نسبت به ابعاد در آزمایش مایع سنگین

۳-۴- آزمایش‌های فرآوری

آزمایش‌های فرآوری که به‌منظور پرعیارسازی نمونه خاک سرخ انجام شد، شامل آزمایش‌های ثقلی میز لرزان و آزمایش‌های مغناطیسی خشک و تر بودند. امروزه استفاده صحیح از روش‌های آماری طراحی آزمایش‌ها علاوه بر سهولت در اجرای آن‌ها باعث ارتقاء سطح اطمینان داده‌ها و تحلیل و پردازش آماری آن‌ها می‌شود [۳۱].

در این تحقیق از نرم‌افزار Design Expert 7 جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها و توجه به اندرکنش پارامترها استفاده شد. همچنین در جدول ۲، تجهیزات مورداستفاده برای آزمایش‌های پرعیارسازی ارائه شده است.

جدول ۲: تجهیزات مورداستفاده در آزمایش‌ها

نوع دستگاه	مورداستفاده
مایع سنگین	امکان‌سنجی استفاده از روش‌های ثقلی (جدایش کوارتز و ذرات باطله از هماتیت)
میز لرزان	جدایش ذرات ریزودرشت مغناطیسی
جداکننده مغناطیسی شدت بالا با شدت ۱٫۷ تسلا	ذرات ریز مغناطیسی
جداکننده مغناطیسی خشک از نوع القائی با شدت ۱٫۷ تسلا	ذرات درشت مغناطیسی

۴- ارائه نتایج و بحث

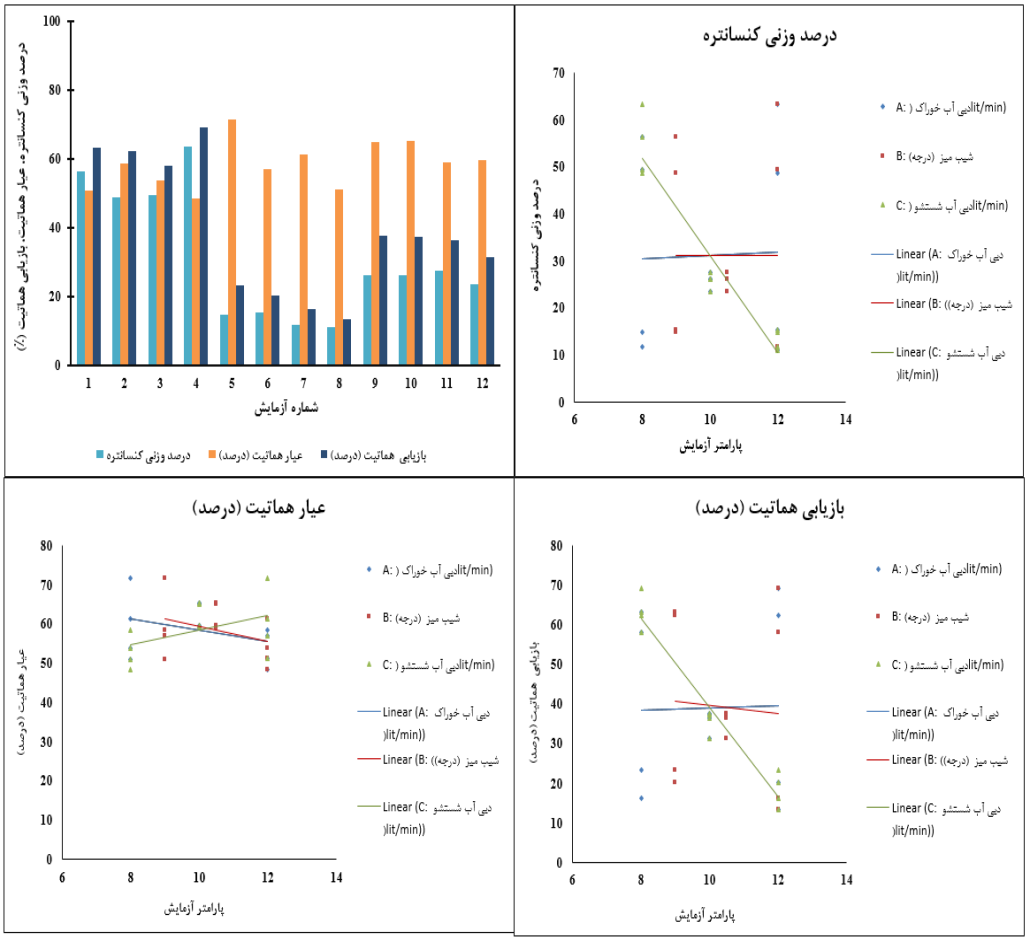
۴-۱- آزمایش‌های میز لرزان

کانی‌های موجود در خاک سرخ منطقه غرب بندرعباس به‌طور عمده شامل هماتیت، کلسیت و کوارتز با وزن

مخصوص‌های به ترتیب برابر ۴/۹-۵/۲، ۲/۶ و ۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشند. آزمایش‌ها به روش فاکتوریل کامل و ۴ بار تکرار برای نقطه مرکزی طراحی شدند. عیار و بازیابی هماتیت به‌عنوان جواب آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. دبی جامد، مقدار ثابت ۳۳۰ گرم بر دقیقه و فرکانس نوسانات میز، ۳۶۰ دور در دقیقه در همه آزمایش‌ها موردنظر گرفته شد. فاکتورهای انتخابی، شیب میز، دبی آب خوراک و دبی آب شستشو بودند. مقادیر سطوح این فاکتورها در جدول ۳ آورده شده است. هدف از انجام این آزمایش‌ها، به دست آوردن شرایطی با عیار حداقل ۵۵ درصد هماتیت و بازیابی حداکثر است. همچنین نمونه خوراک تمامی آزمایش‌ها دارای عیار متوسط ۴۴/۳ درصد هماتیت است. در شکل ۷، شرایط و نتایج آزمایش‌ها ارائه شده است.

جدول ۳: فاکتورهای مؤثر بر آزمایش میز لرزان و سطوح آن‌ها

فاکتور / سطح	سطح پایین	سطح میانی	سطح بالا
شیب میز	۸	۱۰	۱۲
آب شستشو	۹	۱۰/۵	۱۲
آب خوراک	۸	۱۰	۱۲



شکل ۷: شرایط و نتایج آزمایش‌های میز لرزان و سطوح آن‌ها

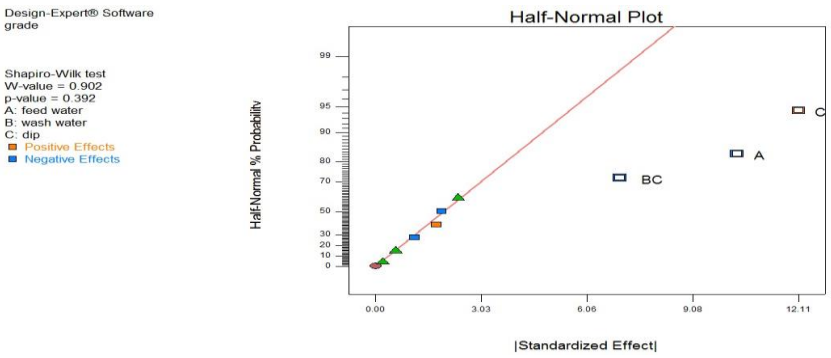
نتایج حاصل با استفاده از نرم‌افزار، مورد تجزیه تحلیل قرار گرفت که در زیر ارائه شده است.

۴-۱-۱- بررسی پارامترهای مؤثر بر پاسخ‌های میز لرزان

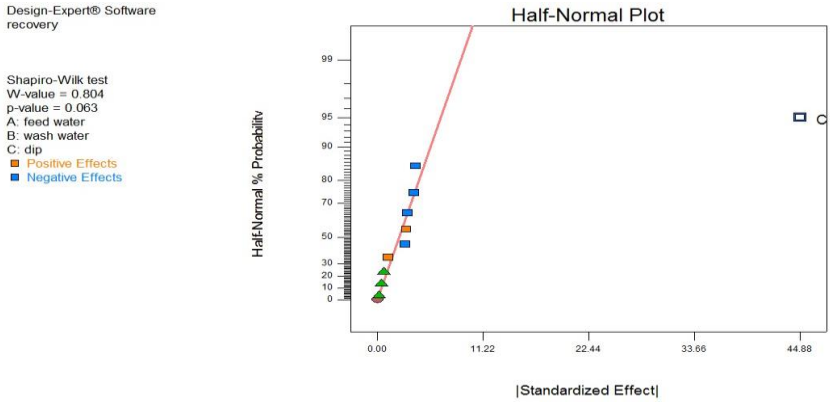
عوامل مؤثر بر پاسخ‌ها از نمودار نصف نرمال رسم شده توسط نرم‌افزار مشخص شدند.

الف) عیار هماتیت: با توجه به نمودار Half-Normal رسم شده توسط نرم‌افزار، شیب، آب خوراک و اثر متقابل شیب و آب شستشو، به ترتیب مؤثرترین پارامترها بر مدل است. شکل ۸، نمودار نصف نرمال برای عیار را نشان می‌دهد.

ب) بازیابی هماتیت: با توجه به نمودار Half-Normal رسم شده توسط نرم‌افزار، مؤثرترین پارامتر بر پاسخ بازیابی، شیب میز است. شکل ۹، نمودار نصف نرمال برای بازیابی را نشان می‌دهد.



شکل ۸: نمودار Half-Normal مربوط به عیار کنسانتره میز



شکل ۹: نمودار Half-Normal مربوط به پاسخ بازیابی کنسانتره میز

۴-۱-۲- بررسی و تحلیل نتایج نرم‌افزار

به‌منظور کنترل درستی پارامترهای انتخاب‌شده (به‌عنوان پارامترهای مؤثر) از فیلترهای مختلفی استفاده شد که مهم‌ترین آن‌ها، بررسی جدول آنالیز واریانس[۱۵] و استفاده از نمودار توزیع باقیمانده‌ها[۱۶] است. در این منحنی هرچه مقادیر باقی‌مانده به‌دست‌آمده به خط نرمال نزدیک‌تر باشد، صحت مدل پیش‌بینی‌شده بیشتر است. تحلیل واریانس مربوط به عیار کنسانتره در جدول ۴ و تحلیل واریانس مربوط به بازیابی در جدول ۶ ارائه شده است. سطح اعتماد در نظر گرفته‌شده برای پاسخ‌ها ۹۵ درصد است. ملاحظه می‌شود که مدل‌های انتخاب‌شده برای هر دو پاسخ ازنظر آماری معنی‌دار است. در قسمت پایین جداول تحلیل واریانس، مقادیر R-squared، Adj R-squared، Pred R-squared (ضریب همبستگی خط برازش شده به نقاط) و Adeq Precision (نسبت سیگنال به اغتشاش) نشان داده شده است.

اختلاف Adj R-squared و Pred R-squared باید کمتر از ۰/۲ باشد که در مورد هر دو پاسخ صادق است و Adeq Precision باید بزرگ‌تر از ۴ باشد که برای عیار، این مقدار ۱۰/۵۵ و برای بازیابی ۲۲/۱۸ است و دلالت بر آن دارد که به‌اندازه کافی سیگنال وجود دارد.

در این جداول، انحنا[۱۷] (به کمک انحنا، میانگین پاسخ سطوح نقاط با نقاط مرکزی مقایسه می‌شود) نیز ازنظر آماری معنادار است که بیانگر خطی نبودن پاسخ‌ها است. همچنین این جداول نشان می‌دهد که نقصان در برازش[۱۸] معنادار نیست که نشان‌دهنده مطلوبیت مدل است. چنانچه نقصان در برازش معنی‌دار باشد، به این مفهوم است که واریانس تکرارها نسبت به مقادیر میانگین‌شان کمتر از واریانس نقاط طراحی‌شده نسبت به مقادیر پیش ینی شده است. وقتی نقصان در برازش معنی‌دار است، یا آزمایش‌های تکرار شده مشکل دارند و یا مدل برازش مناسب نیست. ضریب همبستگی بین نتایج پیش‌بینی مدل و نتایج واقعی آزمایش‌ها برای عیار هماتیت در کنسانتره، ۰/۹۹۰۶ بود که نشان می‌دهد بین مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده هماهنگی خوبی وجود دارد. مدل‌های ارائه‌شده توسط نرم‌افزار برای دو پاسخ موردنظر در جدول ۵ آورده شده است. این مدل‌ها بر اساس فاکتورهای کد شده بیان شده‌اند. در این مدل‌ها فاکتوری که بزرگ‌ترین ضریب را دارد، دارای بیشترین تأثیر بر مدل است.

جدول ۴: نتایج بررسی آنالیز واریانس برای عیار هماتیت درکنسانتره (نتایج نرم‌افزار)

Source	sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
مدل	۲۸۹٫۱۵	۳	۹۶٫۳۸	۹٫۶۶	۰٫۰۱۰۳	معنی‌دار
آب خوراک-A	۱۷۱٫۴۴	۱	۱۷۱٫۴۴	۱۷٫۱۹	۰٫۰۰۶۰	
شیب-C	۲۳۴٫۶۹	۱	۲۳۴٫۶۹	۲۳٫۵۳	۰٫۰۰۲۹	
BC	۷۸٫۳۲	۱	۷۸٫۳۲	۷٫۸۵	۰٫۰۳۱۱	
Curvature	۱۵۵٫۰۱	۱	۱۵۵٫۰۱	۱۵٫۵۴	۰٫۰۰۷۶	معنی‌دار
Residual	۵۹٫۸۵	۶	۹٫۹۸			
Lack of Fit	۲۳٫۷۲	۳	۷٫۹۱	۰٫۶۶	۰٫۶۳۱۱	بی‌معنی
Pure Error	۳۶٫۱۳	۳	۱۲٫۰۴			
Cor Total	۵۰۴٫۰۲	۱۰				

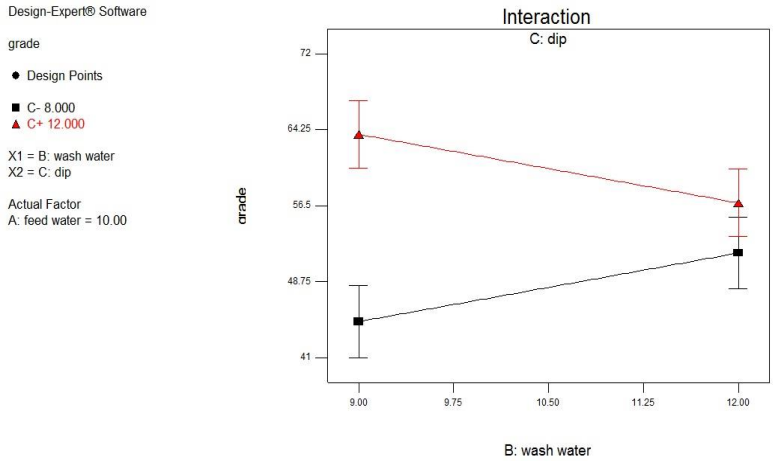
جدول ۵: مدل‌های پیشنهادی برای پاسخ‌های آزمایش میز لرزان

مدل پیشنهادی	پاسخ
$\% Grade = ۵۴٫۲۴ - ۵٫۱۸xA + ۶٫۰۶xC - ۳٫۵۰xBxC$	عیار هماتیت
$\%Recovery = ۴۰٫۷۵ - ۲۲٫۴۴xC$	بازیابی هماتیت

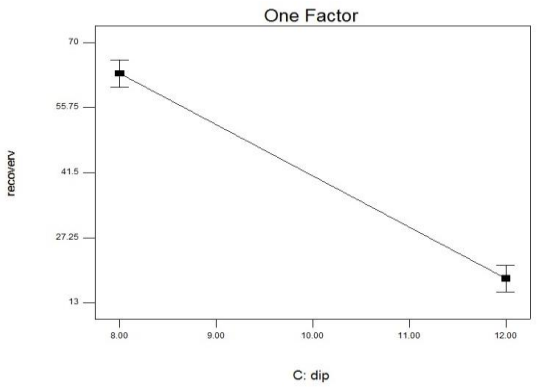
جدول ۶: نتایج بررسی آنالیز واریانس برای بازیابی هماتیت درکنسانتره (نتایج نرم‌افزار)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
مدل	۴۰۲۷٫۵۳	۱	۴۰۲۷٫۵۳	۲۴۵٫۹۵	۰٫۰۰۰۱<	معنی‌دار
شیب-C	۴۰۲۷٫۵۳	۱	۴۰۲۷٫۵۳	۲۴۵٫۹۵	۰٫۰۰۰۱<	
Curvature	۶۸٫۱۴	۱	۶۸٫۱۴	۴٫۱۶	۰٫۰۷۱۸	بی‌معنی
Residual	۱۴۷٫۳۸	۹	۱۶٫۳۸			
Lack of Fit	۱۲۱٫۰۶	۶	۲۰٫۱۸	۲٫۳۰	۰٫۲۶۳۹	بی‌معنی
Pure Error	۲۶٫۳۲	۳	۸٫۷۷			
Cor Total	۴۲۴۳٫۰۵	۱۱				

شکل ۱۰ نمودار چگونگی تأثیر پارامترهای C و A و BC را برحسب عیار کنسانتره نشان می‌دهد. بر اساس این نمودارها، با افزایش پارامتر شیب، عیار افزایش و با افزایش دبی آب خوراک، عیار کاهش می‌یابد. همچنین پارامترهای شیب و دبی آب شستشو اثر متقابل دارند. برای دست‌یابی به عیار بالا باید فاکتور شیب، در سطح بالا و آب خوراک، در سطح پایین و فاکتور آب شستشو (به دلیل اثر متقابل)، در سطح مخالف شیب انتخاب شود. شکل ۱۱ نمودار چگونگی تأثیر پارامتر C بر مدل انتخاب‌شده برای بازیابی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: نمودار تأثیر پارامتر A، C و BC بر عیار کنسانتره



شکل ۱۱: نمودار چگونگی تأثیر پارامتر *C* بر بازیابی

۴-۱-۳- بهینه‌سازی شرایط آزمایش‌های میز لرزان

هدف از انجام آزمایش رسیدن به عیار حداقل بالای ۵۵ درصد هماتیت با بیشترین بازیابی است که محصول حاصل قابل‌استفاده در صنعت مانند کارخانه‌های سیمان باشد. با بالا رفتن عیار، بازیابی کاهش می‌یابد و مشاهده می‌شود که فاکتور شیب میز در مدل‌های عیار و بازیابی در سطوح مخالف قرار دارد. در تعیین شرایط بهینه، هر دو شرط عیار و بازیابی درنظر گرفته و کنسانتره دارای عیار حداقل ۵۵ درصد به‌عنوان هدف درنظر گرفته شد. در شرایط پیشنهادی دبی آب خوراک (۸ لیتر در دقیقه)، شیب (۸ درجه) و آب شستشو (۱۱٫۵ لیتر در دقیقه) تعیین شد که محصول دارای عیار ۵۵٫۸۷ درصد هماتیت و بازیابی ۶۳٫۲۵ درصد بود.

۴-۱-۴- نتیجه‌گیری آزمایش‌های میز لرزان

علیرغم اینکه معیار پرعیارسازی، قابل‌توجه و بالا است، ولی با استفاده از میز لرزان به نتایج قابل‌توجهی حاصل نشد. در طی آزمایش‌های میز لرزان مشاهده گردید که ذرات باطله نیز به کنسانتره راه می‌یابند. از دلایلی که وجود دارند می‌توان به توزیع دانه‌بندی بار ورودی به سیستم اشاره کرد و وجود نسل دانه‌ریز هماتیت در نمونه که دارای ابعاد بسیار ریز درجه آزادی است و با کانی‌های باطله کلسیت و کوارتز درگیری نشان می‌دهد و باعث می‌شود تا ذره‌ای با دانسیته بیش از ۲٫۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب تشکیل گردد و این ذره در طی آزمایش نیز مانند کانی با ارزش رفتار خواهد کرد و به کنسانتره راه می‌یابد.

۴-۲- آزمایش‌های مغناطیسی تر شدت بالا

پرکاربردترین و مهم‌ترین روش رایج برای فرآوری خاک سرخ، روش مغناطیسی تر شدت بالا است. این جداکننده‌ها قابلیت تولید میدانی با شدتی به‌مراتب بالاتر از جداکننده‌های مغناطیسی خشک را دارند و همچنین برای ذرات ریز محدودیت کاربرد ندارند [۳۲].

حداکثر میزان مغناطیسی قابل‌تولید توسط جداکننده مغناطیسی شدت بالای موجود در آزمایشگاه کانه‌آرایی دانشگاه تهران، ۱٫۷ تسلا بود. برای انجام تست‌های مغناطیسی، نمونه معرف، خردشده و به درجه آزادی مطلوب ۱۵۰ میکرون رسانده شد. آزمایش‌ها با دستگاه جداکننده شدت بالای نوع *Boxmag* انجام شدند. فاکتورهای مؤثر بر کار این جداکننده، شدت میدان، دور روتور و آب خوراک می‌باشند. به‌منظور بهینه‌سازی شرایط آزمایش‌ها، هر یک از پارامترهای مؤثر بر فرآیند در دو سطح به روش فاکتوریل کامل و نقطه مرکزی با چهار بار تکرار موردبررسی قرار گرفتند. عیار و بازیابی هماتیت به‌عنوان پاسخ آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. سطوح انتخابی برای انجام آزمایش‌ها در جدول ۷ آورده شده است. هم‌چنین عیار متوسط هماتیت خوراک نمونه نیز ۴۴٫۳ درصد بود.

جدول ۷: فاکتورهای مؤثر بر آزمایش جدایش مغناطیسی تر شدت بالا و سطوح آن‌ها

فاکتورها	سطح پایین	سطح میانی	سطح بالا
A: شدت میدان (تسلا)	۱٫۲	۱٫۴۵	۱٫۷
B: آب خوراک (لیتر بر دقیقه)	۲	۳٫۵	۵
C: دور روتور (دور بر دقیقه)	۱	۲	۳

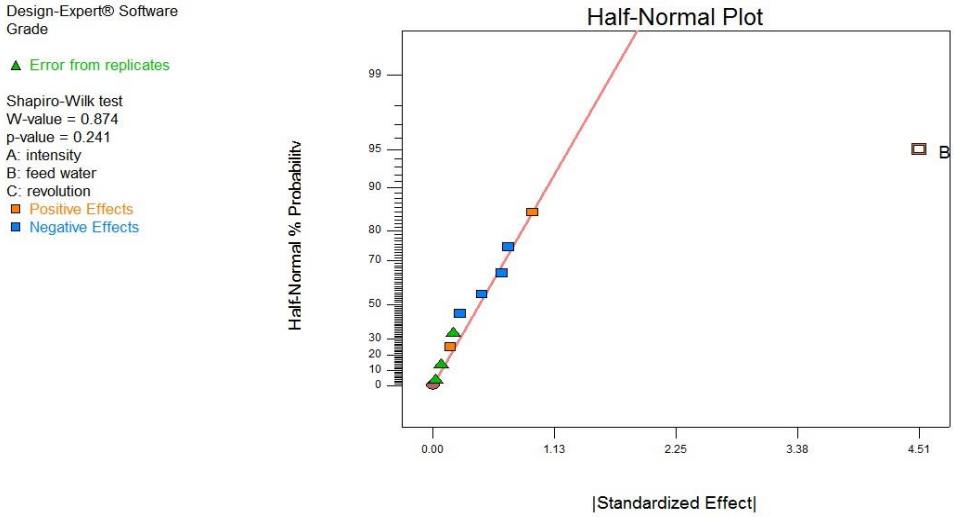
جدول ۸: نتایج و شرایط آزمایش جدایش مغناطیسی تر شدت بالا و سطوح آن‌ها

شماره آزمایش	A	B	C	درصد وزنی کنسانتره	عیار (درصد)	بازیابی (درصد)
۱	۱٫۲	۲	۱	۳۹٫۵۶	۵۷٫۴۳	۵۰٫۰۹
۲	۱٫۷	۲	۱	۴۴٫۵۹	۵۶	۵۷٫۰۵
۳	۱٫۲	۵	۱	۴۱٫۰۴	۶۲	۵۶٫۷۸
۴	۱٫۷	۵	۱	۴۳٫۳۰	۶۱٫۶۷	۶۰٫۲۴
۵	۱٫۲	۲	۳	۵۴٫۷۸	۵۳٫۹۷	۶۷٫۱۲
۶	۱٫۷	۲	۳	۵۷٫۶۴	۵۴٫۸۳	۶۹٫۳۱
۷	۱٫۲	۵	۳	۴۲٫۵۳	۶۳	۵۹٫۲۴
۸	۱٫۷	۵	۳	۴۵٫۵۴	۶۱٫۳۱	۶۲٫۲۳
۹	۱٫۴۵	۳/۵	۲	۴۲٫۴۶	۶۱٫۷۱	۵۸٫۳۷
۱۰	۱٫۴۵	۳/۵	۲	۴۱٫۰۲	۶۱٫۹۳	۵۷٫۰۶
۱۱	۱٫۴۵	۳/۵	۲	۴۱٫۵۰	۶۱٫۵۱	۵۸٫۸۹
۱۲	۱٫۴۵	۳/۵	۲	۴۱٫۴۵	۶۲٫۷۹	۵۷٫۹۳

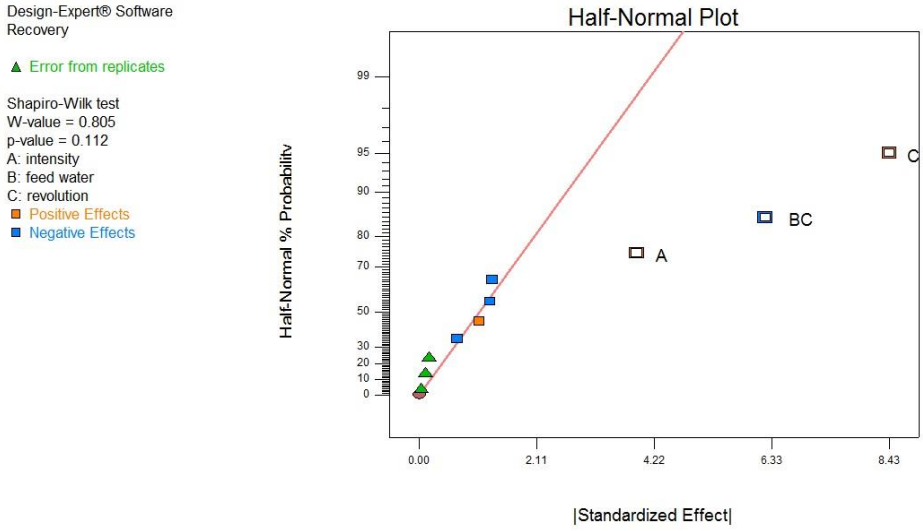
۴-۲-۱- بررسی پارامترهای مؤثر بر پاسخ‌های جدایش مغناطیسی

عوامل مؤثر بر پاسخ‌ها از نمودار نصف نرمال رسم شده توسط نرم‌افزار مشخص شدند.

الف) عیار هماتیت: با توجه به نمودار Half-Normal رسم شده توسط نرم‌افزار، آب خوراک مؤثرترین پارامتر بر مدل است. شکل ۱۲ نمودار نصف نرمال برای عیار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: نمودار Half-Normal مربوط به عیار کنسانتره



شکل ۱۳: نمودار Half-Normal مربوط به پاسخ بازیابی کنسانتره

ب) بازیابی هماتیت: با توجه به نمودار Half-Normal رسم شده توسط نرم‌افزار، مؤثرترین پارامترها بر پاسخ بازیابی، دور روتور، شدت میدان مغناطیسی و اثر متقابل آب خوراک و دور روتور می‌باشند. شکل ۱۳ نمودار نصف نرمال برای بازیابی را نشان می‌دهد.

۴-۲-۲- بررسی و تحلیل نتایج نرم‌افزار

به‌منظور کنترل صحت مدل‌ها و نتایج، جدول تحلیل واریانس‌ها (ANOVA) بررسی شد. جدول ANOVA مربوط به عیار و بازیابی کنسانتره به ترتیب در جداول ۹ و ۱۰ آورده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که مدل‌های انتخاب‌شده برای هر دو پاسخ ازنظر آماری معنی‌دار است. سطح اعتماد در تحلیل نتایج ۹۵ درصد در نظر گرفته شد. مقادیر P-Value پارامترهای مؤثر در مدل‌های هر پاسخ کمتر از ۰/۰۵ است که بیانگر آن است که پارامترهای انتخاب‌شده به‌احتمال ۹۵ درصد صحیح است.

جدول ۹: نتایج بررسی آنالیز واریانس برای عیار کنسانتره

Source	Squares Sum of	df	Square Mean	Value F	Prob > F p-value	
مدل	۸۲٫۸۸	۱	۸۲٫۸۸	۷۳٫۵۵	۰٫۰۰۰۱<	معنی‌دار
آب خوراک-B	۸۲٫۸۸	۱	۸۲٫۸۸	۷۳٫۵۵	۰٫۰۰۰۱<	
Curvature	۳۷٫۸۸	۱	۳۷٫۸۸	۳۳٫۶۱	۰٫۰۰۰۳	معنی‌دار
Residual	۱۰٫۱۴	۹	۱٫۱۳			
Lack of Fit	۸٫۳۴	۶	۱٫۳۹	۲٫۳۱	۰٫۲۶۲۸	بی‌معنی
Pure Error	۱٫۸۱	۳	۰٫۶۰			
Cor Total	۱۳۰۰٫۹	۱۱				

جدول ۱۰: نتایج بررسی آنالیز واریانس برای بازیابی کنسانتره

Source	Squares Sum of	df	Square Mean	Value F	Prob > F p-value	
مدل	۲۴۹٫۸۵	۳	۸۳٫۲۸	۴۹٫۹۰	۰٫۰۰۰۱<	معنی‌دار
شدت-*A*	۳۰٫۴۲	۱	۳۰٫۴۲	۱۸٫۲۳	۰٫۰۰۳۷	
دور روتور-*C*	۱۴۲٫۳۰	۱	۱۴۲٫۳۰	۸۵٫۲۶	۰٫۰۰۰۱<	
BC	۷۷٫۱۳	۱	۷۷٫۱۳	۴۶٫۲۱	۰٫۰۰۰۳	
Curvature	۱۲٫۸۵	۱	۱۲٫۸۵	۷٫۷۰	۰٫۰۲۷۵	معنی‌دار
Residual	۱۱٫۶۸	۷	۱٫۶۷			
Lack of Fit	۹٫۸۸	۴	۲٫۴۷	۴٫۱۱	۰٫۱۳۷۴	بی‌معنی
Pure Error	۱٫۸۰	۳	۰٫۶۰			
Cor Total	۲۷۴٫۳۸	۱۱				

در جداول ۹ و ۱۰، انحنا نیز ازنظر آماری معنادار است که نشان‌دهنده خطی نبودن پاسخ‌ها است. همچنین این امر دلالت بر آن دارد که نقصان در برازش معنادار نیست و بیانگر مطلوبیت مدل است. ضریب همبستگی بین نتایج پیش‌بینی مدل و نتایج واقعی آزمایش‌ها برای بازیابی کنسانتره، ۰٫۹۹۴۹ بود که نشان می‌دهد بین مقادیر آزمایشگاهی و پیش‌بینی‌شده هماهنگی خوبی وجود دارد.

مدل‌های ارائه‌شده توسط نرم‌افزار برای دو پاسخ موردنظر در جدول ۱۱ آورده شده است.

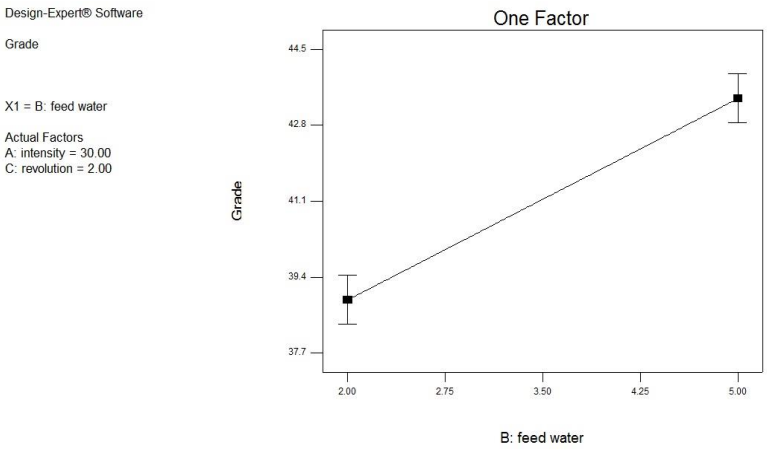
جدول ۱۱: مدل‌های پیشنهادی برای پاسخ‌های آزمایش‌ها

پاسخ	مدل پیشنهادی
عیار هماتیت (درصد)	$\%Grade = ۵۱٫۲۷ + ۲٫۱۵ \times B$
بازیابی هماتیت (درصد)	$\%Recovery = ۳۲٫۹۶ + ۰٫۲ \times A + ۳٫۷۲ \times B + ۱۱٫۴۶ \times C - ۲٫۰۷ \times B \times C$

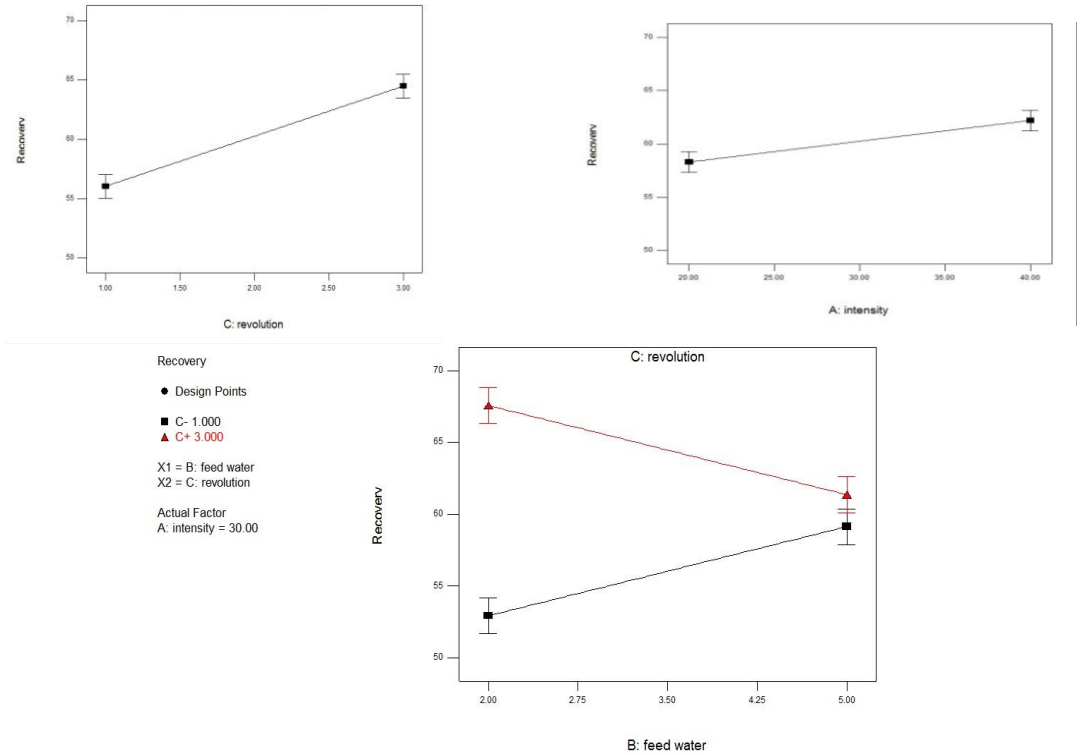
این مدل‌ها بر اساس فاکتورهای واقعی شده، بیان‌شده است. در این مدل‌ها، فاکتوری که بزرگ‌ترین ضریب را دارد، دارای بیشترین اثر بر مدل است. شکل ۱۴، چگونگی تأثیر پارامتر B (دبی آب خوراک) را بر عیار کنسانتره نشان می‌دهد. بر اساس این نمودارها با افزایش پارامتر آب خوراک، میزان زمان ماند ذرات در دستگاه جداکننده مغناطیسی کاهش‌یافته، بنابراین ذرات کاملاً با ارزش به کنسانتره راه می‌یابند و باعث افزایش عیار می‌شوند. شکل ۱۵ چگونگی تأثیر پارامترهای A، C و BC بر مدل انتخاب‌شده برای بازیابی را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، با افزایش فاکتورهای شدت میدان و دور روتور، بازیابی افزایش می‌یابد. هم‌چنین فاکتور تأثیر متقابل دور روتور و آب خوراک نیز در بازیابی تأثیر دارد.

ازآنجایی‌که هدف، عیار بالای ۵۵ درصد هماتیت است و بررسی آماری انجام‌شده، شرایط بهینه آزمایش بر اساس جدول ۱۲ را پیشنهاد می‌دهد.

به‌منظور اطمینان از نتایج و مدل‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار، تعدادی آزمایش تکمیلی نیز انجام شد که نتیجه آن‌ها در جدول ۱۳ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج حاصل از آزمایش‌ها، مدل‌های ارائه‌شده توسط نرم‌افزار را تائید می‌کنند.



شکل ۱۴: نمودار تأثیر پارامتر *B* بر عیار کنسانتره



شکل ۱۵: نمودار چگونگی تأثیر پارامترهای *A*، *C* و *BC* بر بازیابی

جدول ۱۲: شرایط انجام آزمایش پیشنهادی توسط نرم‌افزار

شماره آزمایش	شدت (تسلا)	آب خوراک (لیتر بر دقیقه)	دور روتور(دور بر دقیقه)	عیار (درصد)	بازیابی (درصد)	مطلوبیت
۱	۱٫۷	۲٫۰۱	۳	۵۵٫۵۸	۶۹٫۵	۱
۲	۱٫۶۶	۲	۳	۵۵٫۵۶	۶۹٫۲	۱
۳	۱٫۷	۲	۲٫۹۵	۵۵٫۵۶	۶۹٫۲	۱

جدول ۱۳: نتایج و شرایط آزمایش‌های تکمیلی جدایش مغناطیسی تر شدت بالا و سطوح آن‌ها

شماره آزمایش	*A*	*B*	*C*	نتایج حاصل از نرم‌افزار		نتایج حاصل از انجام آزمایش	
				عیار هماتیت (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)
۱	۱٫۲	۲٫۷۴	۳	۵۷٫۱۶	۶۴٫۵۲	۵۷٫۵۳	۶۴٫۹
۲	۱٫۷	۵	۳	۶۲٫۰۲	۶۲٫۸۹	۶۲٫۰۴	۶۲٫۱
۳	۱٫۷	۳	۱	۵۷٫۷۲	۵۷٫۳۷	۵۶٫۹۵	۵۷٫۸۳

در ادامه جهت بررسی تأثیر آسیاکنی بر افزایش درجه آزادی هماتیت ریز و خاکی و همچنین بر عیار و بازیابی کنسانتره، تعدادی آزمایش با مدت‌زمان‌های خردایش متفاوت انجام گرفت که در ادامه موردبررسی قرار می‌گیرند. یک نمونه به مدت‌زمان ۸ دقیقه آسیا شد، در این حالت ۱۰۰ درصد ذرات از اندازه ۲۱۲ میکرون ریزتر بودند. نمونه بعد از آسیا مورد آزمایش قرار گرفت که نتیجه آن در جدول ۱۴ ذکرشده است.

وزن نمونه: ۱ کیلوگرم

خردایش: ۸ دقیقه

شدت‌جریان: ۱/۷ تسلا

دور روتور: ۳ دور در دقیقه

جدول ۱۴: نتایج حاصل از آزمایش مغناطیسی تر شدت بالا با خردایش اولیه به مدت ۸ دقیقه

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار Fe (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۴۱/۷۴	۲۹/۱۹	۱۰۰
کنسانتره	۴۵/۵۱	۵۹/۱۶	۴۱/۳۷	۶۴/۴۹
باطله	۵۴/۴۹	۲۷/۱۹	۱۹/۰۲	۳۵/۵۱

ملاحظه می‌شود با افزایش خردایش نمونه از ۴ دقیقه به ۸ دقیقه، به نظر می‌رسد میزان آزادشدگی به مقدار بسیار کمی افزایش یافته و با توجه به نتایج جدول ۱۴ باعث افزایش عیار به مقدار ۲ درصد شده و بر روی بازیابی تأثیری نداشت. آزمایش دیگری جهت بررسی بیشتر تأثیر مدت‌زمان خردایش بر عیار محصول در پی گرفته شد. در این حالت نیز سرند کنترل، اندازه ۱۵۰ میکرون و مدت‌زمان خردایش ۱۳ دقیقه بود. شرایط و نتیجه حاصل به شرح جدول ۱۵ است.

خردایش: ۱۳ دقیقه

سرند کنترل: ۱۵۰ میکرون

شدت‌جریان: ۱/۷ تسلا

دور روتور: ۳ دور در دقیقه

جدول ۱۵: نتایج حاصل از آزمایش مغناطیسی تر شدت بالا با خردایش اولیه به مدت ۱۳ دقیقه

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار Fe (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۴۱/۲۷	۲۸/۸۶	۱۰۰
کنسانتره	۴۶/۱۳	۵۵/۹۷	۳۹/۱۴	۶۲/۵۷
باطله	۵۳/۸۷	۲۸/۶۸	۲۰/۰۵	۳۷/۴۳

ملاحظه می‌شود میزان عیار و بازیابی کنسانتره حاصل نسبت به حالتی که نمونه خوراک تحت خردایش به مدت‌زمان ۴ دقیقه قرارگرفته باشد، کمتر است و این نشان می‌دهد که خردایش بیش‌ازحد، موجب تولید نرمه و در برخی موارد نیز کاهش نسبی مقدار آهن در نمونه می‌شود؛ بنابراین بهترین روش ارتقای کیفی محصول، اعمال یک تا دو مرحله شستشو (کلینر) در فرآیند است. علیرغم موارد فوق، نتیجه حاصل همچنان در محدوده قابل‌قبول محصول هدف است. جهت کنترل و اصلاح نتایج و دستیابی به عیارهای بالاتر و اعمال مراحل شستشو، آزمایش‌های جدایش مغناطیسی با ابعاد ریزتر از ۱۵۰ میکرون ادامه یافت. در ادامه، آزمایش دیگری نیز بر روی یک کیلوگرم نمونه ریزتر از ۱۵۰ میکرون انجام شد که نتایج آن در جدول ۱۶ ارائه‌شده است.

وزن نمونه: ۱ کیلوگرم ریزتر از ۱۵۰ میکرون بدون خردایش

شدت‌جریان: ۱/۷ تسلا

دور روتور: ۳ دور در دقیقه

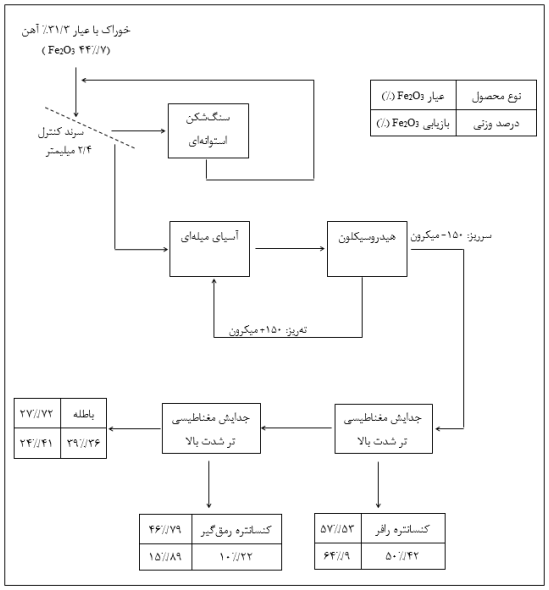
جدول ۱۶: نتایج حاصل از آزمایش مغناطیسی تر شدت بالا نمونه خوراک ریزتر از ۱۵۰ میکرون بدون خردایش

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار Fe (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۴۶/۲۰	۳۲/۳۴	۱۰۰
کنسانتره	۲۶/۷۶	۶۶	۴۶/۱۹	۳۸/۲۲
باطله	۷۳/۲۴	۳۸/۹۷	۲۷/۲۸	۶۱/۷۸

نتایج آزمایش‌ها تا این مرحله نشان می‌دهد که دستیابی به محصولی با عیار حداقل ۵۵ درصد هماتیت، امکان‌پذیر است؛ بنابراین با انجام آزمایش‌های تکمیلی برای افزایش بازیابی کانه مفید و آزمایش‌های تکمیلی باطله‌های جدایش مغناطیسی و اعمال یک مرحله شستشو، درمجموع دو محصول به‌صورت ذیل به دست آمد (شکل ۱۶).

الف- محصول مرحله رافر با ۵۰/۴۲ درصد وزنی از بار اولیه ورودی به سیستم با عیار کنسانتره بیش از ۵۵ درصد هماتیت.

ب- محصول مرحله رمق‌گیری با حدود ۱۰ درصد وزنی بار اولیه با عیار ۴۶/۷۹ درصد هماتیت، بعد از یک مرحله شستشوی باطله حاصل از مرحله رافر.



شکل ۱۶: فلوشیت برای دست‌یابی به محصول با عیار حداقل ۵۵ درصد هماتیت

آزمایش‌های اولیه نشان داد که به علت عدم حضور منیتیت، بازیابی آهن در میدان مغناطیسی با شدت کم عملاً امکان‌پذیر نیست. درعین‌حال علیرغم اینکه هماتیت در شدت‌های میدان مغناطیسی کمتر از ۱ تسلا نیز قابل جدایش است، اما ریزدانه بودن و حضور گوتیت به‌عنوان بخشی از کانی حاوی آهن عملاً استفاده از شدت‌های متوسط را نیز غیرممکن ساخته است. در آزمایش‌های به‌عمل‌آمده ابتدا بیشترین بازیابی در مرحله رافر مدنظر قرار گرفت و برای بهترین شرایط رافر، آزمایش‌های کلینر (شستشو) در دو تا سه مرحله انجام شد. در ادامه بهترین نتایج، حاصل و فلوشیت انتخابی ارائه‌شده است. آزمایش‌های این مرحله بهینه‌سازی با جداکننده مغناطیسی تر شدت بالا، آسیای مواد در ۴ دقیقه و سرند کنترل ۱۵۰ میکرون بود. شرایط و نتیجه حاصل به شرح جدول ۱۷ است.

وزن نمونه: ۱ کیلوگرم

خردایش: ۴ دقیقه

سرند کنترل: ۱۵۰ میکرون

شدت‌جریان: ۱/۷ تسلا

دور روتور: ۳ دور در دقیقه

جدول ۱۷: نتایج آزمایش مرحله رافر خوراک

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار *Fe* (درصد)	توزیع هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۴۴٫۹۷	۳۱٫۴۸	۱۰۰
کنسانتره	۳۴٫۳۹	۶۶٫۰۲	۴۶٫۲۱	۵۰٫۴۹
باطله	۶۵٫۶۱	۳۳٫۹۳	۲۳٫۷۵	۴۹٫۵۱

ملاحظه می‌شود کنسانتره با عیار بیش از ۶۶ درصد و بازیابی ۵۰٫۴۹ درصد حاصل شد. برای بررسی امکان افزایش عیار این محصول، آزمایش کلینر در شرایط مشابه رافر انجام شد که نتیجه حاصل در جدول ۱۸ ارائه گردید. ارزیابی افزایش عیار نشان می‌دهد که دستیابی به عیار بالاتر از ۵۵ درصد آهن (۷۸ درصد هماتیت) ممکن بوده و تنها بازیابی بیشتر باید مدنظر قرار گیرد. نگاهی به محصولات کلینر نشان می‌دهد در شرایط بهینه، محصولات جداشده در مرحله رافر باید برای افزایش عیار به ابعاد ریزتری آسیا شود. به همین دلیل می‌توان خردایش مجدد باطله کلینر را در نظر گرفت. نتایج به‌دست‌آمده به شرح جدول ۲۰ است.

جدول ۱۸: نتایج آزمایش مرحله پرعیار کنی اولیه

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار Fe (درصد)	توزیع هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۶۷/۹۱	۴۷/۵۴	۱۰۰
کنسانتره	۸۳/۱۹	۷۲/۱۱	۵۰/۴۸	۸۸/۳۳
باطله	۱۶/۸۱	۴۷/۱۵	۳۳/۰۱	۱۱/۶۷

جدول ۱۹: نتایج آزمایش مرحله پرعیارسازی ثانویه

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار *Fe* (درصد)	توزیع هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۷۲٫۱۱	۵۰٫۴۸	۱۰۰
کنسانتره	۷۱٫۳۱	۸۰٫۱۷	۵۶٫۱۲	۷۹٫۲۸
باطله	۲۸٫۶۹	۵۲٫۰۸	۳۶٫۴۶	۲۰٫۷۲

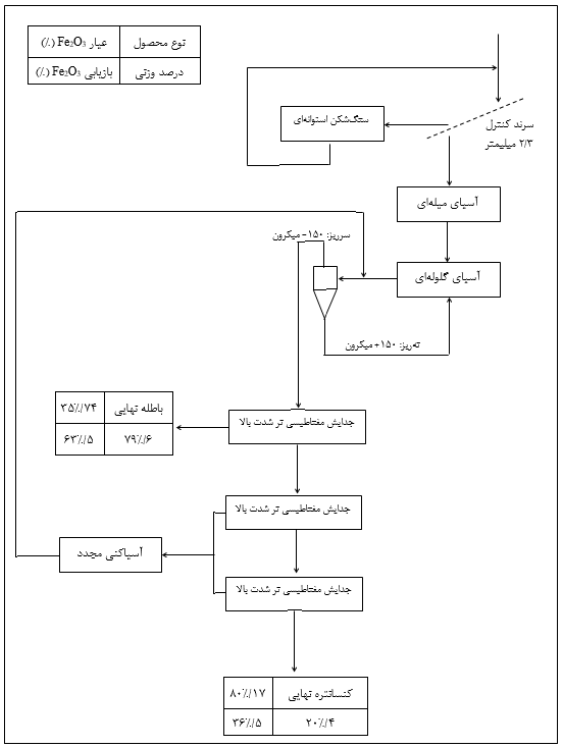
جدول ۲۰: نتایج نهایی حاصل از دو مرحله پرعیارسازی کنسانتره رافر

نوع محصول	وزن (درصد)	عیار هماتیت (درصد)	عیار Fe (درصد)	توزیع هماتیت (درصد)
خوراک	۱۰۰	۴۴/۹۷	۳۱/۴۸	۱۰۰
کنسانتره نهائی	۲۰/۴	۸۰/۱۷	۵۶/۱۲	۳۶/۵۰
باطله	۷۹/۶	۳۵/۷۴	۲۵/۰۲	۶۳/۵۰

۴-۲-۳- نتیجه‌گیری و فلوشیت پیشنهادی

نتایج بررسی‌های به‌عمل‌آمده نشان می‌دهد که در بهترین وضعیت، وزن کنسانتره تولیدی با عیار بیش از ۵۶ درصد آهن و ۸۰ درصد هماتیت حاوی ۲۰ درصد وزن بار اولیه است. در حقیقت باید ارزیابی اقتصادی برای تولید تناژ مشخص و تأسیسات موردنیاز به‌عمل آید تا سوددهی تعیین شود. باتوجه به ارزش کنسانتره آهن و مشخصات ماده معدنی موردمطالعه، این امر (سوددهی) باید با دقت و حساسیت بیشتری بررسی شود.

در پیشنهاد فلوشیت موردنیاز دو فرض در نظر گرفته شده است. فرض اول این است که ماده معدنی در ابعاد درشت به کارخانه فرآوری باردهی می‌شود که در این صورت نیاز به بخش سنگ‌شکنی دومرحله‌ای برای کاهش ابعاد تا حد ۲۰ میلی‌متر است. بخشی از فلوشیت که شامل ابتدای مسیر تا قبل از آسیای گلوله‌ای است، در صورت استفاده از بار ورودی ریزتر از ۵ میلی‌متر (مانند نمونه تحویلی برای آزمایش‌ها) موردنیاز نخواهد بود و می‌تواند حذف شود. در این فلوشیت، دو مرحله آسیای میله‌ای و گلوله‌ای در نظر گرفته شد که برای واحدهای کوچک، یک مرحله آسیای گلوله‌ای در مسیر بسته (برای کاهش تولید نرمه) کافی است؛ بنابراین برای یک واحد کوچک، بخش خردایش می‌تواند در یک آسیای گلوله-ای خلاصه شود. در برخی از حالت‌ها می‌توان از یک مرحله آسیای گلوله‌ای در مدارباز نیز استفاده کرد. در این فلوشیت، بخش طبقه‌بندی شامل هیدروسیکلون برای جدا کردن ابعاد ریزتر از ۱۵۰ میکرون برای ارسال به بخش جدایش مغناطیسی است که شامل سه جداکننده مغناطیسی شدت بالای پیوسته است. در این فلوشیت، کنسانتره تولیدی در رافر بعد از دو مرحله کلینر به تولید محصول هدف خواهد انجامید. باطله دو مرحله کلینر بعد از آسیای مجدد، وارد سیستم هیدروسیکلون و مسیر بسته می‌شوند (شکل ۱۷).



شکل ۱۷: فلوشیت برای دستیابی به عیار بیش از ۸۰ درصد هماتیت

۴-۲-۴- جدایش مغناطیسی خشک گرادیان بالا

جداکننده‌های مغناطیسی خشک برای ذرات درشت کارایی مناسب را دارا می‌باشند [۳۱]. جداکننده مغناطیسی خشک در دسترس، از نوع القائی با قابلیت تولید میدان مغناطیسی حداکثر به‌شدت ۱٫۷ تسلا بود. از پارامترهای قابل تنظیم دستگاه می‌توان به تیغه جداکننده باطله-میانی و میانی-کنسانتره اشاره کرد که با افزایش زاویه تیغه میانی-کنسانتره، عیار کنسانتره افزایش و بازیابی آن کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش زاویه تیغه باطله-میانی، حجم بیشتری از خوراک به باطله راه می‌یابد. برای انجام آزمایش‌های مغناطیسی خشک گرادیان بالا با توجه به توزیع عیار آهن و درصد وزنی در محدوده‌های مختلف ابعادی که در جدول ۲۱ آورده شده است، از دو محدوده ۱۰۰۰+۲۳۸۰- میکرون و ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون، نمونه معرف تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. تمامی آزمایش‌ها در شدت میدان ۱٫۷ تسلا و دور روتور ۸۰ دور بر دقیقه انجام شدند.

جدول ۲۱: تجزیه سرندی خشک و توزیع عیار آهن در طبقات سرندی مختلف

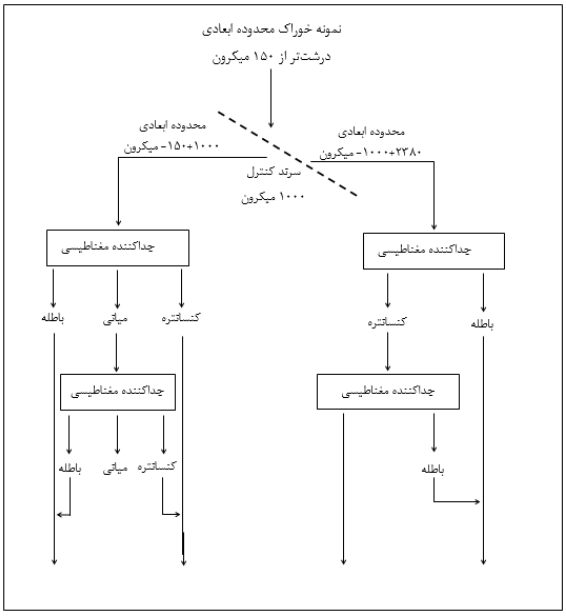
محدوده ابعادی (میکرون)	درصد وزن روی سرند	عیار آهن (درصد)
-۲۳۸۰+۲۰۰۰	۶٫۶	۳۰٫۶
-۲۰۰۰+۱۰۰۰	۲۴٫۳	۳۲٫۷۳
-۱۰۰۰+۶۰۰	۱۴٫۲	۳۴٫۳۸
-۶۰۰+۳۰۰	۱۶٫۴	۳۴٫۵۴
-۳۰۰+۲۱۲	۹٫۳	۳۱٫۵۹
-۲۱۲+۱۵۰	۳	۲۸٫۰۸
-۱۵۰	۲۶٫۲	۲۷٫۸۸

۴-۲-۴-۱- محدوده ابعادی ۱۰۰۰+۲۳۸۰- میکرون

به‌منظور این بخش از ذرات، با توجه به این‌که مقدار بسیار کمی خوراک به بخش کنسانتره راه یافت، بنابراین محصول میانی به‌عنوان کنسانتره در نظر گرفته شد. در حالت بهینه، زاویه تیغه باطله روی ۸۰ درجه قرار داشت. محصول حاصل از جدایش مرحله اول، مجدداً به دستگاه برگردانده و تحت یک مرحله پرعیارسازی با همان شرایط قبل قرار گرفت. شکل ۱۸ نمایی از این فرآیند را نشان می‌دهد. نتیجه این آزمایش‌ها در جدول ۲۲ آورده شده است.

جدول ۲۲: نتایج جدایش مغناطیسی خشک شدت بالا برای محدوده ابعادی ۱۰۰۰+۲۰۰۰- میکرون

نوع محصول	درصد وزنی	عیار هماتیت (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)
خوراک مرحله اول	۱۰۰	۴۴/۸۴	۱۰۰
کنسانتره مرحله اول	۷۷/۶۲	۵۶/۰۶	۹۷/۰۳
باطله مرحله اول	۲۲/۳۸	۵/۹۶	۲/۹۷
خوراک مرحله دوم	۷۷/۶۲	۵۶/۰۶	۹۷/۰۳
کنسانتره مرحله دوم	۷۴/۰۶	۵۷/۶	۹۵/۱۱
باطله مرحله دوم	۳/۵۶	۲۴/۱۳	۱/۹۲
کنسانتره نهایی	۷۴/۰۶	۵۷/۶	۹۵/۱۱
باطله نهایی	۲۵/۹۴	۲۴/۱۳	۱/۹۲



شکل ۱۸: نمایی از جدایش مغناطیسی خشک گرادیان بالای محدوده‌های ابعادی ۱۰۰۰+۲۰۰۰- و ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون

۴-۲-۴-۲- محدوده ابعادی ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون

به‌منظور این بخش از ذرات، زوایای مختلف تیغه‌ها موردبررسی قرار گرفت. درنهایت در حالت بهینه، زاویه تیغه باطله و کنسانتره به ترتیب روی ۸۰ و ۹۰ درجه تنظیم شد. برای این محدوده، سه محصول به دست آمد. سپس با توجه به حجم بالای محصول میانی، این قسمت مجدداً به دستگاه برگردانده و مورد جدایش مغناطیسی قرار گرفت، در این حالت نیز زاویه تیغه باطله و کنسانتره به ترتیب روی ۹۰ و ۸۰ درجه تنظیم شد. کنسانتره مرحله اول و مرحله دوم با یکدیگر مخلوط شده و به‌عنوان کنسانتره نهایی در نظر گرفته شد. نتیجه حاصل در جدول ۲۳ ارائه شده است.

جدول ۲۳: نتایج جدایش مغناطیسی خشک شدت بالا برای محدوده ابعادی ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون

نوع محصول	درصد وزنی	عیار هماتیت (درصد)	بازیابی هماتیت (درصد)
خوراک مرحله اول	۱۰۰	۴۴/۷۶	۱۰۰
کنسانتره مرحله اول	۲۹/۳۲	۶۵/۸۱	۴۳/۱۱
میانی مرحله اول	۵۶/۸۴	۴۴/۰۹	۵۵/۹۴
باطله مرحله اول	۱۳/۸۴	۲/۹	۰/۹۵
خوراک مرحله دوم	۵۶/۸۴	۴۴/۰۹	۵۵/۹۴
کنسانتره مرحله دوم	۲۲/۹۵	۶۲/۴۶	۳۲/۵
میانی مرحله دوم	۲۸/۷	۳۴/۵	۲۲/۴۹
باطله مرحله دوم	۵/۱۹	۸/۰۹	۰/۹۵
کنسانتره نهایی	۵۲/۲۷	۶۴/۳۴	۷۵/۱۴
میانی نهایی	۲۸/۷	۳۴/۵	۲۲/۴۹
باطله نهایی	۱۹/۰۳	۴/۳۱	۲/۳۷

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق فرآوری نمونه خاک سرخ معدن ساحل در غرب بندرعباس موردبررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد.

- مطالعات XRD، آنالیز شیمیایی و کانی‌شناسی نشان داد که مهم‌ترین کانی‌های تشکیل‌دهنده نمونه، هماتیت، گوتیت، کوارتز، کلسیت و در مقادیر کمتر ژاروسیت، فلدسپات، ژیپس و کانی‌های رسی و نمکی می‌باشند. عیار هماتیت در نمونه، ۴۴/۷ درصد است. عمده کانی آهن‌دار نمونه، هماتیت است که به دو فرم بلوری و ریز و خاکی یافت می‌شود. هماتیت ریز و خاکی هم با هماتیت بلوری و هم با کانی‌های شفاف، درگیری نشان می‌دهد و حتی در ابعاد ریزتر از ۷۵ میکرون، درجه آزادی آن ۳۵ درصد برآورد شد.
- ابعاد اولیه نمونه ریزتر از ۵ میلی‌متر بود و اندیس کار آن برابر ۸/۲۹ کیلووات ساعت بر تن کوچک به دست آمد که نشان‌دهنده مصرف کم انرژی برای دستیابی به ابعاد ریزتر از ۱۵۰ میکرون است.
- در آزمایش‌های مربوط به جدایش میز، پارامترهای شیب، آب خوراک و اثر متقابل شیب و آب شستشو، به ترتیب مؤثرترین پارامترها بر عیار هماتیت و شیب، مؤثرترین پارامتر بر بازیابی هماتیت را به خود

اختصاص دادند و درنهایت کنسانتره‌ای با عیار ۵۵٫۸۷ درصد هماتیت و بازیابی ۶۳٫۲۵ درصد به دست آمد.

- بهترین نتایج با استفاده از جداکننده‌های مغناطیسی تر شدت بالا حاصل شد. با یک مرحله پرعیارسازی محصولی با عیار ۵۷٫۵۳ درصد هماتیت و بازیابی ۶۴٫۹ درصد به دست آمد. همچنین در ادامه آزمایش‌های تکمیلی جدایش مغناطیسی تر شدت بالا نیز محصولی با عیار ۸۰٫۱۷ درصد هماتیت و بازیابی ۳۶٫۵ درصد بعد از دو مرحله کلینر حاصل شد.
- جدایش مغناطیسی خشک گرادیان بالا برای دو محدوده ابعادی ۱۰۰۰+۲۳۸۰- میکرون و ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون انجام شد که محدوده ابعادی ۱۰۰۰+۲۳۸۰- میکرون دارای محصولی با عیار ۵۷٫۶ درصد هماتیت و بازیابی ۹۵٫۱۱ درصد و محدوده ابعادی ۱۵۰+۱۰۰۰- میکرون نیز دارای محصولی با عیار ۶۴٫۳۴ درصد هماتیت و بازیابی ۷۵٫۱۴ درصد بود.

مراجع

[1] Chatterjee, K., 2009, "Uses of Industrial Minerals and Rocks and Freshwater", Nova Science Publishers Inc., New York.

[2] Potter, M. J., 2010, "2007 Minerals yearbook, Iron oxide pigments", U.S., Geological Survey.

[3] Karimpour, M., 2006, "Industrial Minerals and Stones", Ferdowsi University of Mashhad, 398 p. [In Persian]

[4] Chatterjee, k., 2007, "Uses of metals and metallic minerals", New Age International Publishers, New Delhi.

[5] Farahmandpour, Sh., 2005, "Ochre and its application in the dye industry", Master's thesis, Supervisor: Dr. Faranak Feyzi, Mining Engineering Department, Islamic Azad University, South Tehran Branch. [In Persian]

[6] Jafarzadeh, A., Ghorbani, M., Pezeshkpour, M., 1995, "Geology of Iran: Iron Deposits", Ministry of Industries and Mines Publications, Geology and Mineral Exploration Organization of the Country, 213 pages. [In Persian]

[7] Renaud, K. M., 2023, "2017-2018 Minerals Yearbook, india", U.S., Geological Survey.

[8] Ghosh, G. K., 2019, "Red and lateritic soils and agri-productivity: Issues and strategies", Journal of the Indian Society of Soil Science, 67(4), S104-S121.

[9] Harben, P. W., 1999, " The Industrial Minerals andybook: A Guide to Markets, Specifications, & Prices", Industrial Minerals Information, 296 pages.

[10] "Hematite iron ore, from chemical formula to method of identification and application", Majd Steel, http://www.majdstel.com ،2025/06/03. [In Persian]

[11] Cornell, R. M., Schwertmann, U., 2000, "The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses", 1st edition, Wiley-chv.

[12] Aydin, G., Sivrikaya, O., Sozeri, H., 2009, "Production of hematite concentrate from low grade hematite ores", Proceeding of the XIII Balkan mineral processing congress, 466-469.

[13] Liu, C. S., Li, J. S., Tang, H. Y., Gao, Y. W., 2014, "Research on mineral processing for high silica low grade hematite ore in Xinjiang", Ironmaking & Steelmaking, 41(7), 481-485.

[14] Behnamfard, A., Khaphaje, E., 2019, "Characterization of Sangan low-grade iron ore and its processing by dry low-intensity magnetic separation", International Journal of Mining and Geo-Engineering, 53(2), 111-116.

[15] Akbari, H., Noaparast, M., Shefaei Tonekaboni, Z., Hajati, A., 2016, "Gravity enrichment of hematite sample from Tang-Zagh mine by shaking table using Box-Behnken experimental design model", 10th Mining Engineering Student Conference, Kashan. [In Persian]

[16] Kong, H., Zhou, T., Yang,, X., Gong Y., Zhang, M., Yang, H., 2022, "Iron recovery technology of red mud—a review", Energies, 15(10), 3830.

[17] Jiang, L., Liu P., Yang, X., Zhang, Y., Li, F., 2019, "Comparative Classification Studies of Red Mud by Using Hydrocyclones", Miner. Eng., 131, 124–130.

[18] Jamieson, E., Jones, A., Cooling, D., Stockton, N., 2006, "Magnetic Separation of Red Sand to Produce Value", Miner. Eng., 19, 1603–1605.

[19] Li, W., Han, Y., Liu, X., Shan, Y., Li, Y., 2019, "Effect of Fluidized Magnetizing Roasting on Iron Recovery and Transformation of Weakly Magnetic Iron Mineral Phase in Iron Tailings", Physicochem. Probl. Miner. Process., 55, 906–916.

[20] Li, Y., Wang, J., Wang, X., Wang, B., Luan, Z., 2011, "Feasibility Study of Iron Mineral Separation from Red Mud by High Gradient

Superconducting Magnetic Separation", Phys. C Supercond, vol. 471, issue 3-4, pp. 91–96.

[21] Navi, N., Karamoozian, M., Khani, M. R., 2023, "Recovery of Iron from Bauxite Red Mud by Reduction Roasting Method", Journal of Mining and Environment, 14(4), 1295-1305.

[22] Chen, R., Shi, L., Huang, H., Yuan, J., 2023, "Extraction of iron and alumina from red mud with a non-harmful magnetization sintering process", Minerals, 13(3), 452.

[23] Xiao, J., Zou, K., Zhong, N., Gao, D., 2023, "Selective separation of iron and scandium from Bayer Sc-bearing red mud", Journal of Rare Earths, 41(7), 1099-1107.

[24] Xiao, J., Zhong, N., Gao, D., Zou, K., Wang, Z., Huang, W., Xiong, W., 2022, "An efficient process to recover iron from Bayer red mud", JOM, 74(8), 3172-3180.

[25] Wang, K., Dou, Z., Liu, Y., Li, X., Lv, G., Zhang, T. A., 2022, "Summary of research progress on separation and extraction of valuable metals from Bayer red mud", Environmental Science and Pollution Research, 29(60), 89834-89852.

[26] Abolpour, B., Abbaslou, H., Balvardi, M., 2022, "Enrichment of hematite iron mineral by reduction method and investigation of its properties", Fifth National Congress of Chemistry and Nanochemistry from Research to Technology, Tehran, Iran. [In Persian]

[27] Su, W., Tan, X., Wang, Z., 2024, "Critical applications of scandium and progress in the extraction of different scandium resources", In E3S Web of Conferences (Vol. 520, p. 03001), EDP Sciences.

[28] Yu, Q., Jin, Y., Lu, S., Ma, D., 2024, "Recent Research on Recovery of Iron and Aluminium from Bauxite Residue in China", TRAVAUX 53, Proceedings of the 42nd International ICSOBA Conference, Lyon, 27 - 31 Oct. 2024, pp. 701-710.

[29] Fariss, A. H. B., Ibrahim, A. I. I., Ozdemir, A. C., Top, S., Kursunoglu, S., Altiner, M., 2025, "Beneficiation of Low-Grade Iron Ore Using a Dry-Roll Magnetic Separator and its Modeling via Artificial Neural Network", Journal of Sustainable Metallurgy, 1-17.

[30] Nematollahi, H., 2003, "Mineral processing", Tehran University Press, third edition, 432 p. [In Persian]

[31] Duckworth, W. E., 1968, "Statistical techniques in technological research: An aid to research productivity", London, Methuen.

[32] Song, S., 2002, "Magnetite separation of Hematite and Limonite Fines as Hydrophobic Flocs fromIron Ores", Mineral Engineering, vol. 15, issue 6, pp. 415-422.

---

[1] Khaphaje
[] Kong
[] Jiang
[] Jamieson
[] Li
[] Song
[] Huang
[] Rai
[] Xiao
[] Navi
[] Su
[] Yu
[13] Chen
[] Fariss
[15] ANOVA
[16] Normal Plot of Residuals
[17] curvature
[18] Lack of Fit