



نشریه روش های تحلیلی و عددی



در مهندسی معدن

تارنمای نشریه: <http://anm.yazd.ac.ir/>

پرعیارسازی نمونه هماتیتی کم عیار به روش های ثقلی و مغناطیسی (مطالعه موردی: خاک سرخ معدن ساحل)

چکیده

در این تحقیق، فرآوری نمونه کانسنگ خاک سرخ منطقه غرب بندرعباس مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات کانی شناسی نشان داد کانی های آهن دار نمونه شامل هماتیت و گوتیت بوده و کوارتز و کلسیت عمده کانی های باطله را تشکیل می دهند. 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 می باشد. جهت فرآوری و کاهش کانی های باطله، آزمایش های ثقلی میز لرزان، آزمایش های مغناطیسی تر و خشک شدت و گرادیان بالا بر روی نمونه صورت پذیرفت. در انجام آزمایش های میز لرزان از روند طراحی آزمایش ها به روش فاکتوریل کامل استفاده شد و تاثیر پارامترهای شیب، دبی آب شستشو و آب خوراک بر عیار و بازیابی کنسانتره مورد بررسی قرار گرفت. برای آزمایش های میز لرزان که برای ابعاد درشت تر 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 می توان به عنوان روش پیش فرآوری استفاده نمود. جدایش مغناطیسی خشک گرادیان بالا پس از نرمه گیری 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 آزمایش های جدایش مغناطیسی تر شدت بالا نمونه خوراک اولیه نیز نهایتاً محصولی با عیار ۵۷/۵۳٪ هماتیت و بازیابی ۶۴/۹ درصد به دست آمد.

کلمات کلیدی

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

۱- مقدمه

علاوه بر این، خاک سرخ در صنایع دیگر از جمله صنایع شیمیایی، سیمان، پلاستیک، کاغذ سازی، شیشه سازی، سرامیک و لوازم آرایشی نیز به کار می رود [۱-۴].

یکی از رنگینه های مهم اکسید آهن که به صورت وسیع در صنایع رنگ سازی جهت تولید رنگ های مختلف روغنی، ساختمانی، صنعتی و غیره مصرف می شود، خاک سرخ است.

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

ذخایر خاک سرخ به طور عمده در مناطق حاره و مرطوب به صورت تمرکزهای باقیمانده از آهن تشکیل می‌شوند. در تشکیل این ذخایر، هوازگی و آب‌های نفوذی یا فرورو، به عنوان دو عامل مؤثر و اصلی محسوب می‌شوند [۶ و 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 به صورت خالص یافت می‌شود. انحلال نمک و مهاجرت محلول‌های نمکی به پایین باعث می‌شود که خاک سرخ درون نمک به صورت نامحلول و درجا در داخل حفرات ایجاد شده باقی بماند و تشکیل کانسار خاک سرخ را دهد [۹].

علاوه بر مصرف هماتیت به عنوان 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 به صورت رنگدانه استخراج می‌گردند از نظر دانه‌بندی ریزتر و ساده‌تر شوند تا از لحاظ تجارتي اهمیت و ارزش بیشتری کسب کنند. کانی‌های اصلی اکسید آهن بر اساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی دسته‌بندی شده و مورد توجه واقع می‌شوند. ترکیب شیمیایی کانی‌هایی مانند گوتیت و هماتیت اکثراً به صورت خالص نیستند و تغییراتی توسط کارخانه‌های فرآوری رنگدانه، بر روی آن‌ها انجام می‌گیرد [۱۱].

نمونه مورد مطالعه در این تحقیق متعلق به معدن ساحل در استان هرمزگان است که در فاصله ۲۰ کیلومتری غرب

بندرعباس قرار دارد. ذخیره قطعی این معدن، ۵۰۰۰۰ تن برآورد شده است. این معدن به عنوان نمونه شاخصی از ذخایر متعدد و با ذخیره کم موجود در منطقه می‌باشد که به صورت اقتصادی از آن‌ها بهره گرفته نمی‌شود. مطالعه حاضر با هدف انجام بررسی‌های فرآوری به منظور افزایش عیار آهن از نمونه کم عیار هماتیته از ذخیره فوق‌الذکر صورت پذیرفت. در این ارتباط ابتدا نمونه مورد نیاز تهیه و پس از آماده‌سازی، بررسی‌های لازم بر روی آن انجام شد.

۲- پیشینه تحقیق

در ارتباط با پریارسازی نمونه‌های کم عیار هماتیته تحقیقات بسیاری در ایران و جهان انجام شده است، که در این قسمت به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. سنگ معدن هماتیت کم عیار در اگمیر ترکیه با استفاده از تجهیزات جداسازی ثقلی مرسوم، جیگ‌ها و میزهای لرزان، و جدا کننده مغناطیسی با شدت بالا مورد فرآوری قرار گرفت. در این تحقیق هم جداسازی ثقلی و هم جداسازی مغناطیسی با شدت بالا بر پریارسازی سنگ معدن هماتیت کم عیار مؤثر بودند و کنسانتره‌ای (۹۵۳+۶۳۵- 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 هماتیته از استان سین کیانگ چین به منظور افزایش عیار آهن و کاهش سیلیس مورد بررسی 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 فلوئاسیون معکوس به دست آمد [۱۳].

بهنام فرد و خافاجه^۱ (۲۰۱۹)، با استفاده از روش مغناطیسی خشک شدت پایین، سنگ آهن کم عیار سنگان را پریارس کردند. میزان آهن، اکسید آهن و محتوای گوگرد نمونه به ترتیب ۳۶/۸۶، ۸/۱ و ۰/۱۲ درصد بود. در این تحقیق

¹ Khaphaje

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 پریارسازی سنگ آهن هماتیتهی زون کم عیار (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^۱ 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 مورد استفاده قرار گیرد. در روش فیزیکی، کانی‌های حاوی آهن مستقیماً با استفاده از جدایش ثقلی، جدایش مغناطیسی و فلوتاسیون فرآوری می‌شوند [۱۶].

جیانگ^۲ و همکاران، مخروط‌های مستقیم سنتی را با مخروط‌های سهموی مکعبی در هیدروسیکلون جایگزین کردند که به طور موثر 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^۳ 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. بمنظور افزایش محتوای کل آهن کنسانتره، لی^۴ و همکاران [۱۹] یک فرآیند جداسازی مغناطیسی دو مرحله‌ای 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 ابرسانا با گرادیان

بالا برای بهبود محتوای کل آهن کنسانتره استفاده کردند و به راندمان وزنی حدود ۶۷ درصد برای هماتیت رسیدند [۲۰]. سونگ^۵ و همکارانش [۲۱] تاثیر متقابل کلکتورهای مختلف را بررسی کردند. هنگامی که متیلن بیس‌آکریل‌آمید ($C_6H_{12}N_4$) و نشاسته به عنوان کلکتور با یکدیگر مخلوط شدند، بازیابی کلی آهن و بازیابی آهن کنسانتره به ترتیب ۴۹/۸۱ و ۷۴/۶۴ درصد بود. هوانگ^۶ 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 با هم ترکیب کردند. رای^۷ 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^۸ و همکاران (۲۰۲۲)، گل قرمز بایر با محتوای آهن کل برابر با ۲۶/۸۶ درصد را برای استحصال عناصر ارزشمند اسکندیم، تیتانیم و گالیوم مورد بررسی قرار دادند. فرآیند موثر 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 کم هزینه و در مقیاس بزرگ از روش "کلسیناسیون-کربنیزاسیون" پیشنهاد شد. با استفاده از این فناوری برای عمل آوری گل قرمز کم آهن، سدیم و بخشی از آلومینا در گل قرمز قابل بازیابی می‌باشد 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 هماتیتهی حدود ۳۰ درصد (کارخانه چاپهار) را پریار کردند و به عیار ۶۵ درصد آهن دست یافتند [۲۶].

^۴ Xiao

^۱ Kong

^۲ Jiang

^۳ Jamieson

^۴ Li

^۵ Song

^۶ Huang

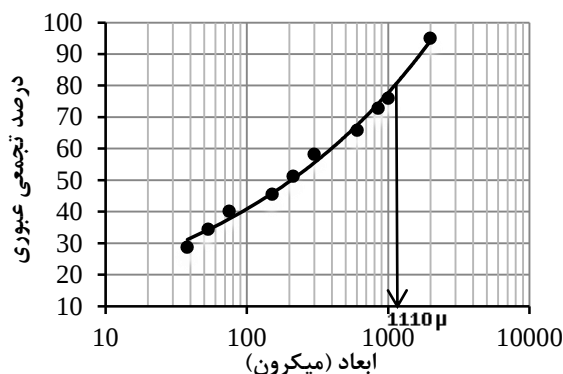
^۷ Rai

بررسی لازم صورت پذیرفت. با توجه به مثبت بودن نتایج، آزمایش‌های مغناطیسی انجام شد و در نهایت نتیجه دو روش مغناطیسی و ثقلی مورد بررسی قرار گرفتند.

۳- روش تحقیق

۳-۱- تهیه و آماده‌سازی نمونه

در این مرحله، ۱۵۰ کیلوگرم نمونه معرف از منطقه مورد مطالعه 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 سرنده ۲/۳۵ میلیمتر سرنده شد و سپس مواد باقی مانده روی سرنده طی یک مرحله سنگ‌شکنی در مسیر بسته توسط سنگ شکن غلتکی مورد خردایش قرار گرفت. بدین صورت 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 دانه بندی 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 خرد شده، در این مرحله طی تقسیمات متوالی توسط ریفل، به بخش‌های ۲ کیلوگرمی قابل استفاده در آزمایش‌های مختلف تقسیم شد.

۳-۲- شناسایی نمونه

۳-۲-۱- آنالیز XRD

ناوی^۱ و همکاران (۲۰۲۳)، استخراج آهن از گل قرمز را با استفاده از تشویه احیائی مورد بررسی قرار دادند. این روش شامل احیاء در کوره مافل و لوله‌ای است و دما، عامل احیاء، و نوع افزودنی به عنوان پارامترهای مهم بررسی شدند. اعمال شدت میدان مغناطیسی حدود ۱۰۰۰ گاوس منجر به بازیابی ۸۹/۹ درصد آهن شد [۲۱].

سو^۲ 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 مورد بررسی قرار دادند [۲۷].

یو^۳ 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^۴ 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^۵ و همکاران (۲۰۲۵)، فرآوری سنگ آهن کم عیار (با عیار آهن کل ۳۹/۵ درصد) را با استفاده از جدا کننده مغناطیسی بررسی کردند. نمونه سنگ معدن مورد استفاده 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 قابل دستیابی است، اما بازیابی آن در مقدار قابل قبولی نبود [۲۹].

در این تحقیق، نمونه مورد استفاده که از معدن ساحل در استان هرمزگان تهیه شد، در ابتدا با روش غرق و شناور-سازی 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

^۴ Chen

^۵ Fariss

^۱ Navi

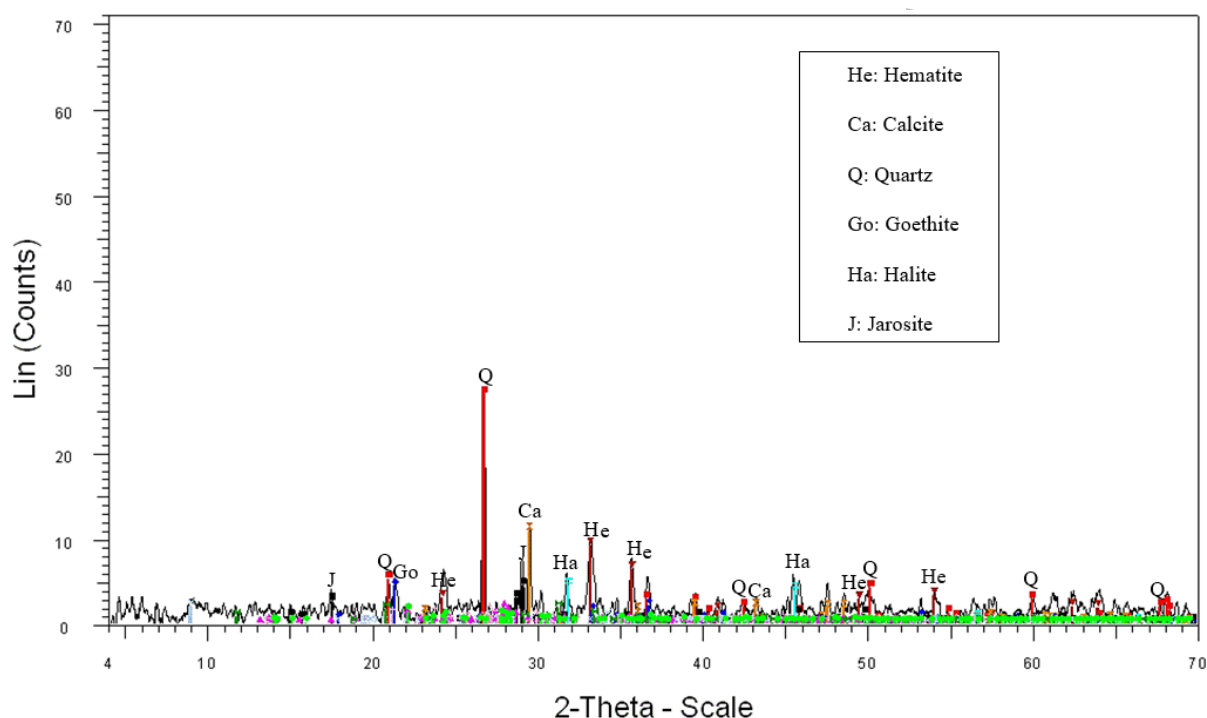
^۲ Su

^۳ Yu

نام ترکیب	ترکیب شیمیایی
هماتیت	Fe ₂ O ₃
کوارتز	SiO ₂
کلسیت	CaCO ₃
گوتیت	FeO(OH)
هالیت	NaCl
ژاروسیت	(K,H ₃ O)Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
آنورتیت	CaAl ₂ Si ₂ O ₈
اورتوکلاز	KAlSi ₃ O ₈
بیوتیت	KMg ₃ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂
ژپس	CaSO ₄ ·2H ₂ O
آلیت	NaAlSi ₃ O ₈
منیتیت	Fe ₃ O ₄

نخستین گام پس از آماده‌سازی نمونه و تهیه نمونه معرف، انجام مطالعات کانی‌شناسی و آنالیز شیمیایی می‌باشد. از این‌رو 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 مورد استفاده مدل D8 Advance ساخت شرکت Bruker 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 مورد مطالعه



شکل ۲- Error! No text of specified style in document. گراف XRD نمونه معرف

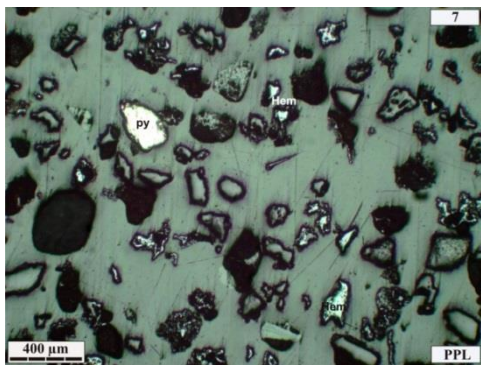
تهیه و مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت. نتایج آنالیز عیارسنجی در محدوده‌های ابعادی مختلف در شکل ۳ Error! No text of specified style in document. عیار کل آهن نمونه نیز ۳۱/۳ درصد به دست آمد. همانطور که از شکل ۳ Error! No text of specified style in document. می‌توان نتیجه گرفت، در محدوده ابعادی ریزتر از ۷۵ میکرون، میزان توزیع آهن نسبت به چند محدوده ابعادی درشت‌تر خود افزایش داشت، که این امر می‌تواند ناشی از تمرکز هماتیت دانه ریز و خاکی در این محدوده باشد.

۳-۲-۲- تجزیه شیمیایی نمونه اولیه

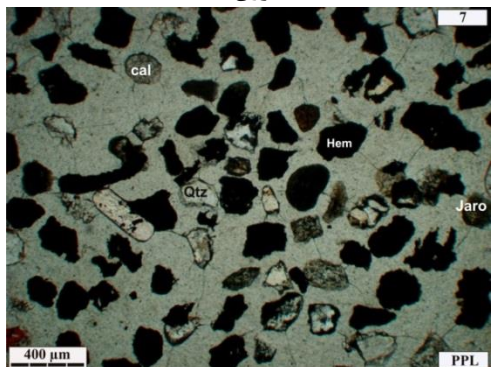
بمنظور انجام مطالعات عیارسنجی از روش تیتراسیون استفاده شد. برای تعیین دقیق مقدار آهن موجود در خوراک اولیه، دو نمونه معرف برای آنالیز شیمیایی تیتراسیون تهیه شد. نتیجه آنالیز نشان داد که میزان آهن موجود در نمونه برابر با ۳۱/۳ درصد (۴۴/۷۱ درصد هماتیت) است.

۳-۲-۳-۱ آنالیز سرندي و شیمیایی ابعادی

بمنظور تعیین توزیع آهن نمونه مورد مطالعه، آزمایش آنالیز ابعادی انجام شد. از طبقات سرندي به دست آمده یک نمونه



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

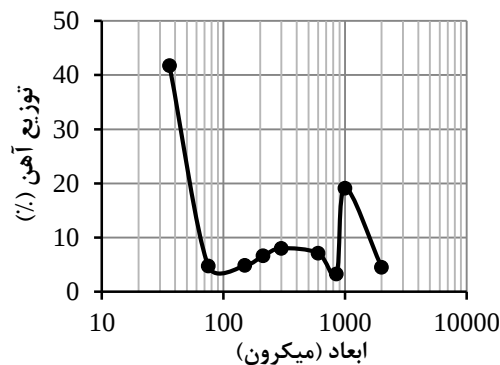


شکل ۵- نمایی از تیغه نازک محدوده ابعادی ۲۱۲+۱۵۰- میکرون

مغناطیسی شدت و گرادیان بالا برای نسل دوم بسیار دانه ریز مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج مطالعات، نشان داد که درجه آزادی هماتیت بلوری و دانه درشت، در سایز ۱۵۰ میکرون، برابر ۸۵ درصد و برای هماتیت دانه ریز در ابعاد ۳۵ میکرون برابر ۳۵-۴۰ درصد می‌باشد.

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 گلوله- ای استاندارد باند مورد آزمایش قرار گرفت [۳۰]، و مقدار آن برابر ۸/۲۹ kWh/t به دست آمد.



شکل Error! No text of specified style in document.

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 میکرون و ریزتر از ۷۵ میکرون مقاطع صیقلی و نازک تهیه شد. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب مقطع صیقلی و تیغه نازک در محدوده ابعادی ۲۱۲+۱۵۰- را نشان می‌دهد. خلاصه نتایج بررسی‌های کانی‌شناسی به شرح ذیل می‌باشد.

- عمده کانی آهن‌دار نمونه، هماتیت است که به دو فرم بلوری و ریز و خاکی یافت می‌شود. همچنین هماتیت به طور 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 مد نظر 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 دانه درشت نزدیک به ۲۰ درصد قطعات و هماتیت دانه ریز 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 ثقیلی برای جدایش نسل اول دانه درشت و روش‌های جدایش

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

۳-۳- آزمایش مایع سنگین

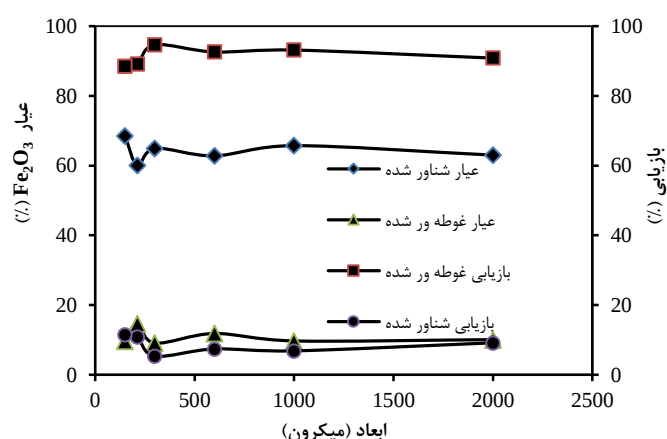
استفاده از روش‌های ثقلی علیرغم بهره‌گیری از تکنیک‌ها و تجهیزات متفاوت، نیازمند استفاده از اطلاعاتی است که از مطالعات مراحل آزمایشگاهی و نیمه‌صنعتی به دست می‌آیند. یکی از این اطلاعات، رفتار ماده معدنی در آزمایش‌های غرق و شناورسازی است. در این آزمایش‌ها با استفاده از محلول‌های واسطه سنگین، بخش شناور و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

به منظور تعیین دقیق درجه و سایز آزادی نمونه، آزمایشی با مایع سنگین برموفرم با وزن مخصوص 2.82 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 2.82 g/cm^3 هستند، بنابراین در بخش شناور تجمع می‌یابند و بخش غوطه‌ور شامل هماتیت است که دارای وزن مخصوص بیشتر از 2.82 g/cm^3 می‌باشد.

بمنظور انجام آزمایش مایع سنگین از هر یک از بخش‌های ابعادی خوراک (۶ طبقه سرندي ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۶۰۰، ۳۰۰ و ۲۱۲ 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، ۱۵۰ 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 دانه درشت و بلوری در این بخش به درجه آزادی کافی رسیده‌اند.

۳-۴- آزمایش‌های فرآوری

آزمایش‌های فرآوری که به منظور پری‌عیارسازی 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 نرم افزار Design Expert 7 جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها، و توجه به اندرکنش پارامترها استفاده شد. همچنین در جدول ۲، تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش‌های پری‌عیارسازی ارائه شده است.



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

جدول ۲- تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها			
نوع دستگاه	مورد استفاده	میز لرزان	کوارتز و ذرات باطله از هماتیت
مایع سنگین	امکانسنجی استفاده از روش‌های ثقلی (جدایش)	جدایش ذرات ریز و درشت مغناطیسی	

جداکننده مغناطیسی شدت
بالا با شدت ۱٫۷ تسلا
جداکننده مغناطیسی
خشک از نوع القائی با شدت
۱٫۷ تسلا

ذرات ریز مغناطیسی
ذرات درشت مغناطیسی

فاکتورهای انتخابی، شیب میز، دبی آب خوراک و دبی آب
شستشو بودند. مقادیر سطوح این فاکتورها در جدول ۳ آورده
شده است.

جدول ۳- فاکتورهای موثر بر آزمایش‌های میز لرزان و سطوح آن‌ها

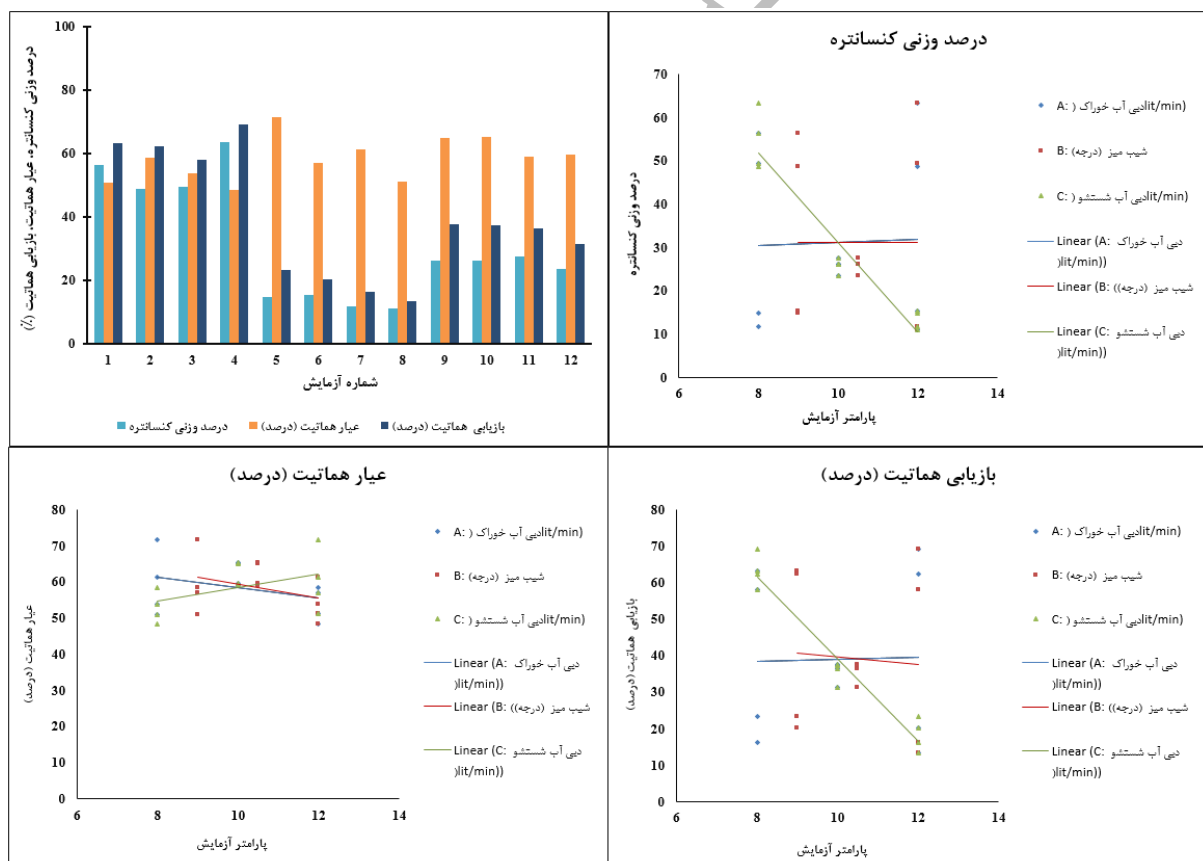
فاکتور سطح	سطح پایین	سطح میانی	سطح بالا
شیب میز	۸	۱۰	۱۲
آب شستشو	۹	۱۰٫۵	۱۲
آب خوراک	۸	۱۰	۱۲

۴- ارائه نتایج و بحث

۴-۱- آزمایش‌های میز لرزان

کانی‌های موجود در خاک سرخ منطقه غرب بندرعباس بطور عمده شامل هماتیت، کلسیت و کوارتز با وزن مخصوص‌های به ترتیب برابر ۴٫۹-۵٫۲، ۲٫۶ و ۲٫۶ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشند. آزمایش‌ها به روش فاکتوریل کامل و ۴ بار تکرار برای نقطه مرکزی طراحی شدند. عیار و بازیابی هماتیت به عنوان 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 مورد نظر گرفته شد.

هدف از انجام این آزمایش‌ها، به دست آوردن شرایطی با عیار حداقل ۵۵ درصد هماتیت و بازیابی حداکثر می‌باشد. همچنین نمونه خوراک تمامی آزمایش‌ها دارای عیار متوسط ۴۴/۳ درصد هماتیت است. در شکل ۷، شرایط و نتایج آزمایش‌ها ارائه شده است.

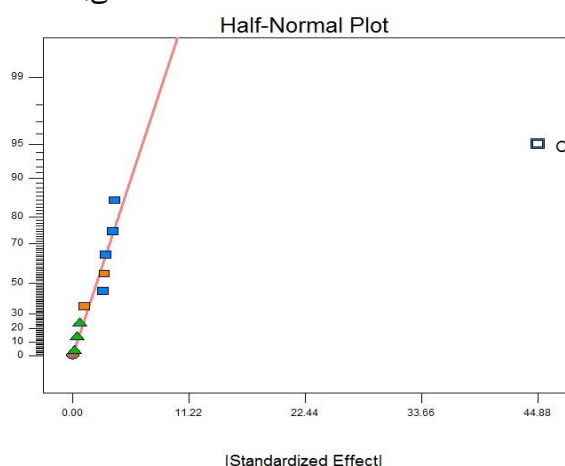


شکل ۷- شرایط و نتایج آزمایش‌های میز لرزان و سطوح آن‌ها

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

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

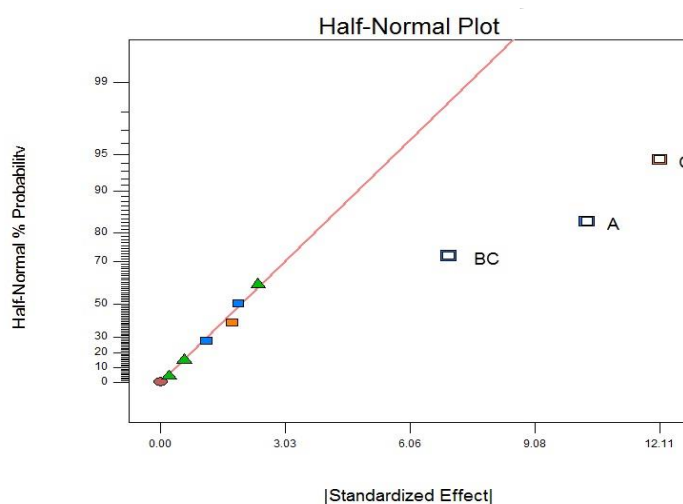
می باشد.



شکل ۹، نمودار نصف نرمال برای بازیابی را نشان می دهد.

Design-Expert® Software
grade

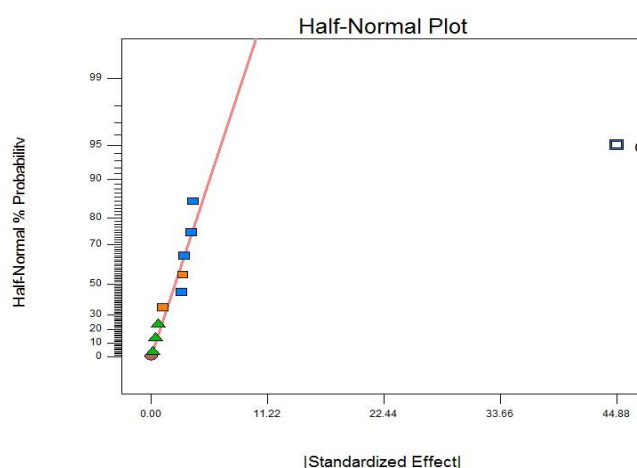
Shapiro-Wilk test
W-value = 0.902
p-value = 0.392
A: feed water
B: wash water
C: dip
Positive Effects
Negative Effects



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

Design-Expert® Software
recovery

Shapiro-Wilk test
W-value = 0.804
p-value = 0.063
A: feed water
B: wash water
C: dip
Positive Effects
Negative Effects



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

۲-۴-۱- بررسی و تحلیل نتایج نرم افزار

به منظور کنترل درستی پارامترهای انتخاب شده (به عنوان پارامترهای موثر) از فیلترهای مختلفی استفاده شد که

۱۰/۵۵ و برای بازیابی ۲۲/۱۸ است و دلالت بر آن دارد که به اندازه کافی سیگنال وجود دارد. در این جداول، انحنای^۳ (به کمک انحنای میانگین پاسخ سطوح نقاط با نقاط مرکزی مقایسه می‌شود) نیز از نظر آماری معنادار است که بیانگر خطی نبودن پاسخ‌ها می‌باشد. همچنین این جداول نشان می‌دهد که نقصان در برازش^۴ معنادار نیست که نشان دهنده مطلوبیت مدل می‌باشد. چنانچه نقصان در برازش معنی‌دار باشد، به این مفهوم است که واریانس تکرارها نسبت به مقادیر میانگین‌شان کمتر از واریانس نقاط طراحی شده نسبت به مقادیر پیش‌بینی 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 پیش‌بینی شده هماهنگی خوبی وجود دارد.

مهمترین آن‌ها، بررسی جدول آنالیز واریانس^۱ و استفاده از نمودار توزیع باقیمانده‌ها^۲ است. در این منحنی هرچه مقادیر باقی مانده به دست آمده به خط نرمال نزدیک‌تر باشد، صحت مدل پیش‌بینی شده 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 گرفته شده برای پاسخ‌ها ۹۵ درصد است. ملاحظه می‌شود که مدل‌های انتخاب شده برای هر دو پاسخ از نظر 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

جدول ۴- نتایج بررسی آنالیز واریانس برای عیار هماتیت در کنسانتره (نتایج نرم‌افزار)

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

فاکتورهای کد شده بیان شده‌اند. در این مدل‌ها فاکتوری که بزرگترین ضریب را دارد، دارای بیشترین تاثیر بر مدل است.

مدل‌های ارائه شده توسط نرم‌افزار برای دو پاسخ مورد نظر در جدول ۵ آورده شده است. این مدل‌ها بر اساس

جدول ۵- مدل‌های پیشنهادی برای پاسخ‌های آزمایش‌های میز لرزان

پاسخ	مدل پیشنهادی
عیار هماتیت	$\% \text{Grade} = 54.24 - 5.18 \times A + 6.06 \times C - 3.50 \times B \times C$
بازیابی هماتیت	$\% \text{Recovery} = 40.75 - 22.44 \times C$

جدول ۶- نتایج بررسی آنالیز واریانس برای بازیابی هماتیت در کنسانتره (نتایج نرم‌افزار)

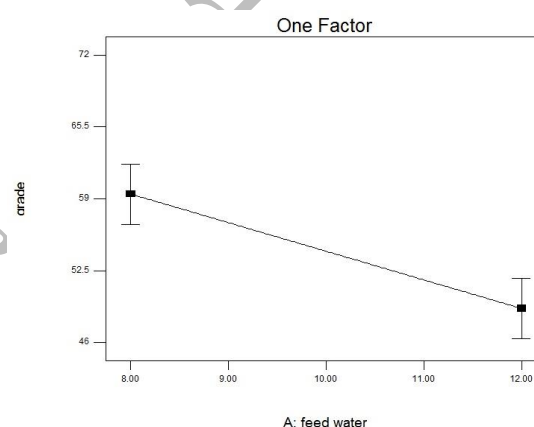
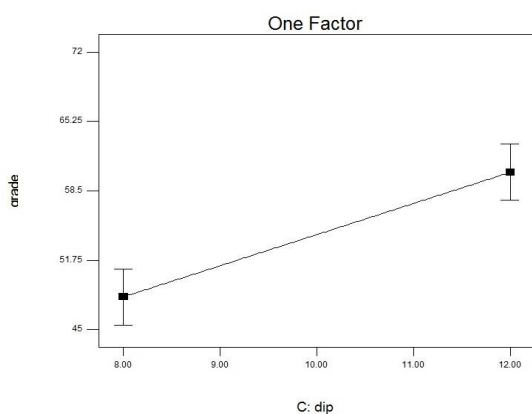
3. curvature
4. Lack of Fit

1. ANOVA
2. Normal Plot of Residuals

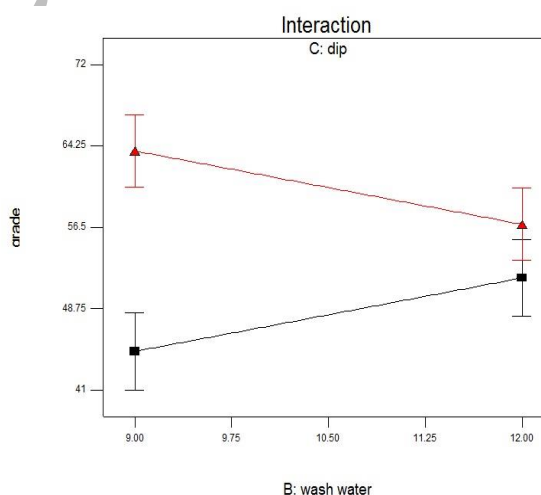
	p-value Prob > F	F Value	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
معنی دار	< ۰٫۰۰۰۱	۲۴۵٫۹۵	۴۰۲۷٫۵۳	۱	۴۰۲۷٫۵۳	مدل
	< ۰٫۰۰۰۱	۲۴۵٫۹۵	۴۰۲۷٫۵۳	۱	۴۰۲۷٫۵۳	شیب-C
بی معنی	۰٫۰۷۱۸	۴٫۱۶	۶۸٫۱۴	۱	۶۸٫۱۴	Curvature
			۱۶٫۳۸	۹	۱۴۷٫۳۸	Residual
بی معنی	۰٫۲۶۳۹	۲٫۳۰	۲۰٫۱۸	۶	۱۲۱٫۰۶	Lack of Fit
			۸٫۷۷	۳	۲۶٫۳۲	Pure Error
				۱۱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

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 تاثیر پارامتر C بر مدل انتخاب شده برای بازیابی را نشان می دهد.

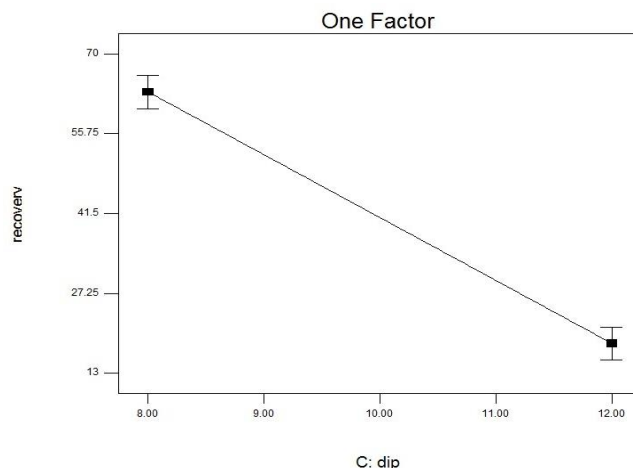
شکل ۱۰، نمودار چگونگی تاثیر پارامترهای A و C و BC را بر حسب عیار کنسانتره نشان می دهد. بر اساس این نمودارها، با افزایش پارامتر شیب، عیار افزایش و با افزایش دبی آب خوراک، عیار کاهش می یابد. همچنین پارامترهای شیب و دبی آب شستشو اثر متقابل دارند. برای دستیابی به



Design-Expert® Software
grade
● Design Points
■ C- 8.000
▲ C+ 12.000
X1 = B: wash water
X2 = C: dip
Actual Factor
A: feed water = 10.00



شکل ۱۰- نمودار تاثیر پارامتر A، C و BC بر عیار کنسانتره



شکل ۱۱- نمودار چگونگی تاثیر پارامتر C بر بازیابی

۴-۲- آزمایش‌های مغناطیسی تر شدت بالا

پرباربردترین و مهم‌ترین روش رایج برای فرآوری خاک سرخ، روش مغناطیسی تر شدت بالا است. این جدا کننده‌ها قابلیت تولید میدانی با شدتی به مراتب بالاتر از جدا کننده‌های مغناطیسی خشک را دارند و همچنین برای ذرات ریز محدودیت کاربرد ندارند [۳۲].

حداکثر میزان مغناطیسی قابل تولید توسط جدا کننده مغناطیسی شدت بالای موجود در آزمایشگاه کانه آرایی دانشگاه تهران، ۱/۷ تسلا بود. برای انجام تست‌های مغناطیسی، نمونه معرف، خرد شده و به درجه آزادی مطلوب ۱۵۰ میکرون رسانده شد. آزمایش‌ها با دستگاه جدا کننده شدت بالای نوع Boxmag انجام شدند. فاکتورهای موثر بر کار این جدا کننده، شدت میدان، دور روتور و آب خوراک می‌باشند. به منظور بهینه‌سازی شرایط آزمایش‌ها، هر یک از پارامترهای موثر بر فرآیند در دو سطح به روش فاکتوریل کامل و نقطه مرکزی با چهار بار تکرار مورد بررسی قرار گرفتند. عیار و بازیابی هماتیت به عنوان پاسخ آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. سطوح انتخابی برای انجام آزمایش‌ها در جدول ۷ آورده شده است. هم چنین 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

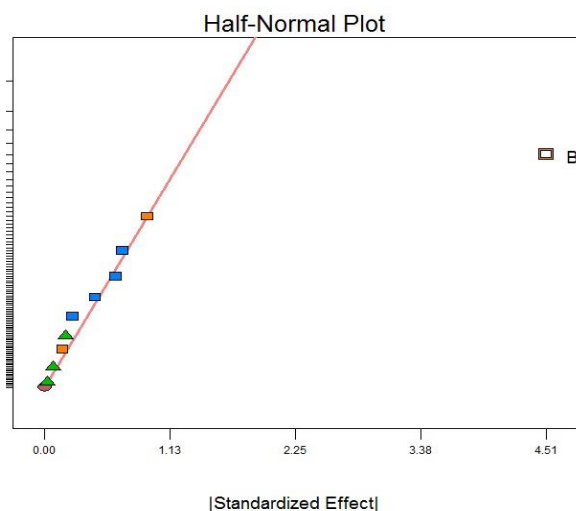
۴-۱-۳- بهینه‌سازی شرایط آزمایش‌های میز لرزان

هدف از انجام آزمایش‌ها رسیدن به عیار حداقل بالای ۵۵ درصد هماتیت با بیشترین بازیابی می‌باشد که محصول حاصل قابل استفاده در صنعت مانند کارخانه‌های سیمان باشد. با بالا رفتن عیار، بازیابی کاهش می‌یابد و همان‌طور که مشاهده می‌شود فاکتور شیب میز در مدل‌های عیار و بازیابی در سطوح مخالف قرار دارند. در تعیین شرایط بهینه، هر دو شرط عیار و بازیابی در نظر گرفته شد و کنسانتره دارای عیار حداقل ۵۵ درصد به عنوان هدف در نظر 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 پرعیار سازی، قابل توجه و بالا است، ولی با استفاده از میز لرزان به نتایج قابل توجهی 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 دانه بندی بار ورودی به سیستم اشاره کرد و وجود نسل دانه‌ریز هماتیت در نمونه که دارای ابعاد بسیار ریز درجه آزادی می‌باشد و با کانی‌های باطله کلسیت و کوارتز درگیری نشان می‌دهد و باعث می‌شود تا ذره‌ای با دانسیته بیش از ۲/۶ گرم بر سانتی متر مکعب تشکیل گردد و این ذره در طی آزمایش نیز مانند کانی با ارزش رفتار خواهد کرد و به کنسانتره راه می‌یابد.

الف) عیار هماتیت: با توجه به نمودار Half-Normal رسم شده توسط نرم افزار، آب خوراک مؤثرترین پارامتر بر مدل می باشد.



شکل ۱۲ نمودار نصف نرمال برای عیار را نشان می دهد. (ب) بازیابی هماتیت: با توجه به نمودار Half-Normal رسم شده توسط نرم افزار، مؤثرترین پارامترها بر پاسخ بازیابی، دور روتور، شدت میدان مغناطیسی و اثر متقابل آب خوراک و دور روتور می باشند. شکل ۱۳ نمودار نصف نرمال برای بازیابی را نشان می دهد.

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 آن ها

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

۱-۲-۴- بررسی پارامترهای مؤثر بر پاسخ های جدایش مغناطیسی

عوامل مؤثر بر پاسخ ها از نمودار نصف نرمال رسم شده توسط نرم افزار مشخص شدند.

Design-Expert® Software
Grade

▲ Error from replicates

Shapiro-Wilk test

W-value = 0.874

p-value = 0.241

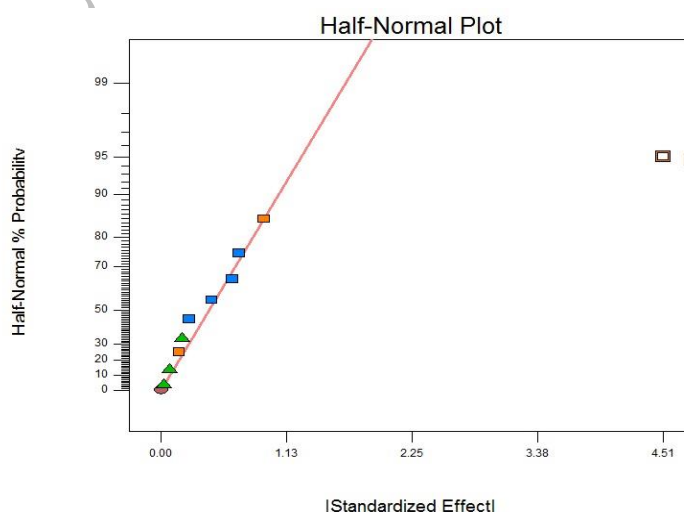
A: intensity

B: feed water

C: revolution

■ Positive Effects

■ Negative Effects



شکل ۱۲- نمودار Half-Normal مربوط به عیار کنسانتره

Design-Expert® Software
Recovery

▲ Error from replicates

Shapiro-Wilk test

W-value = 0.805

p-value = 0.112

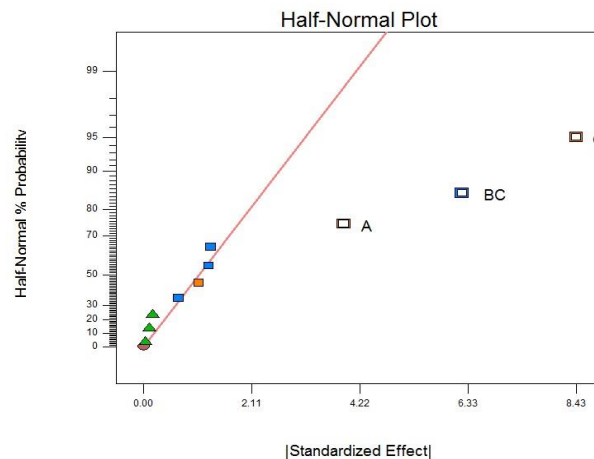
A: intensity

B: feed water

C: revolution

■ Positive Effects

■ Negative Effects



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

۴-۲-۲- بررسی و تحلیل نتایج نرم افزار

نتایج ۹۵ درصد در نظر گرفته شد. مقادیر P-Value پارامترهای موثر در مدل‌های هر پاسخ کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد که بیانگر آن است که پارامترهای انتخاب شده به احتمال ۹۵ درصد صحیح است.

بمنظور 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 انتخاب شده برای هر دو پاسخ از نظر آماری معنی‌دار است. سطح اعتماد در تحلیل

جدول ۹- نتایج بررسی آنالیز واریانس برای عیار کنسانتره

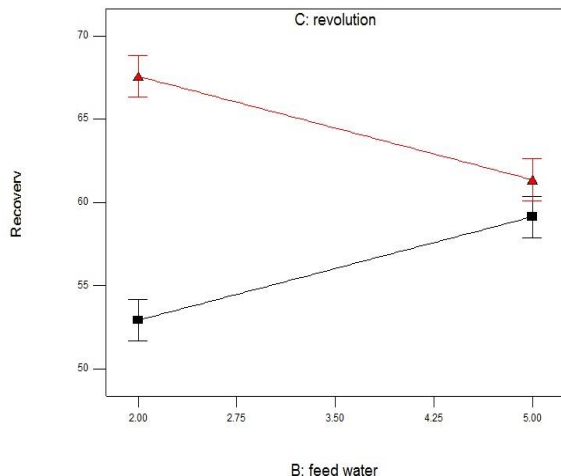
	p-value Prob > F	F Value	Mean Square	df	Sum of Squares	Source
معنی‌دار	< ۰/۰۰۰۱	۷۳/۵۵	۸۲/۸۸	۱	۸۲/۸۸	مدل
	< ۰/۰۰۰۱	۷۳/۵۵	۸۲/۸۸	۱	۸۲/۸۸	آب خوراک-B
معنی‌دار	۰/۰۰۰۳	۳۳/۶۱	۳۷/۸۸	۱	۳۷/۸۸	Curvature
			۱/۱۳	۹	۱۰/۱۴	Residual
بی‌معنی	۰/۲۶۲۸	۲/۳۱	۱/۳۹	۶	۸/۳۴	Lack of Fit
			۰/۶۰	۳	۱/۸۱	Pure Error
				۱۱	۱۳۰۰/۹	Cor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

جدول ۱۰- نتایج بررسی آنالیز واریانس برای بازیابی کنسانتره

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

۰.۶۰	۳	۱,۸۰	Pure Error
	۱۱	۲۷۴,۳۸	Cor Total

میزان زمان ماند ذرات در دستگاه جدا کننده مغناطیسی کاهش یافته، بنابراین ذرات کاملاً با ارزش به کنسانتره راه می‌یابند و باعث افزایش عیار می‌شوند.



شکل ۱۵ چگونگی تاثیر پارامترهای A، C و BC بر مدل انتخاب شده برای بازیابی را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار، با افزایش فاکتورهای شدت میدان و دور روتور، بازیابی افزایش می‌یابد. هم چنین فاکتور تاثیر متقابل دور روتور و آب خوراک نیز در بازیابی تاثیر دارد.

در جداول ۹ و ۱۰، انحراف نیز از نظر آماری معنادار است که نشان دهنده خطی نبودن پاسخ‌ها می‌باشد. همچنین این امر دلالت بر آن دارد که نقصان در برآزش معنادار نیست و بیانگر مطلوبیت مدل می‌باشد. ضریب همبستگی بین نتایج پیش بینی مدل و نتایج واقعی آزمایش‌ها برای بازیابی کنسانتره، ۰.۹۹۴۹ بود که نشان می‌دهد بین مقادیر آزمایشگاهی و پیش بینی شده هماهنگی خوبی وجود دارد. مدل‌های ارائه شده توسط نرم افزار برای دو پاسخ مورد نظر در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۱- مدل‌های پیشنهادی برای پاسخ‌های آزمایش‌ها

پاسخ	مدل پیشنهادی
عیار هماتیت (درصد)	$\%Grade = 51.27 + 2.15 \times B$
بازیابی هماتیت (درصد)	$\%Recovery = 32.96 + 0.2 \times A + 3.72 \times B + 11.46 \times C - 2.07 \times B \times C$

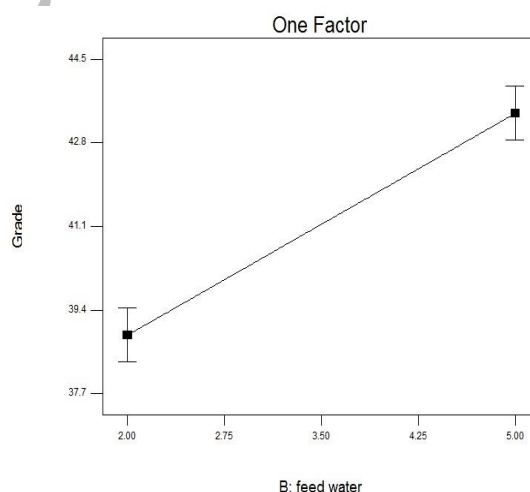
این مدل‌ها بر اساس فاکتورهای واقعی شده، بیان شده است. در این مدل‌ها، فاکتوری که بزرگترین ضریب را دارد، دارای بیشترین اثر بر مدل است. شکل ۱۴، چگونگی تاثیر پارامتر B (دبی آب خوراک) را بر عیار کنسانتره نشان می‌دهد. بر اساس این نمودارها با افزایش پارامتر آب خوراک،

Design-Expert® Software

Grade

X1 = B: feed water

Actual Factors
A: intensity = 30.00
C: revolution = 2.00

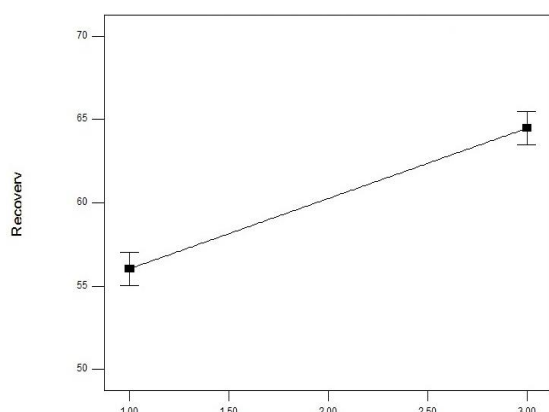


شکل ۱۴- نمودار تاثیر پارامتر B بر عیار کنسانتره

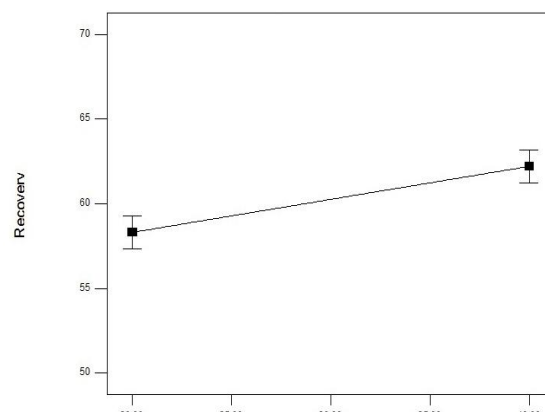
از آنجایی که هدف، عیار بالای ۵۵ درصد هماتیت است و بررسی آماری انجام شده، شرایط بهینه آزمایش بر اساس جدول ۱۲ را پیشنهاد می‌دهد.

جدول ۱۲- شرایط انجام آزمایش پیشنهادی توسط نرم افزار

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

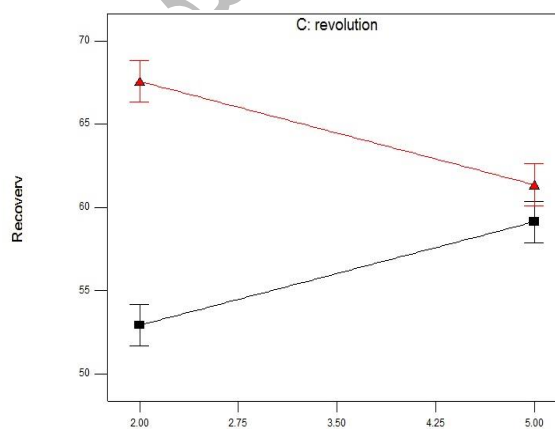


C: revolution



A: intensity

Recovery
 ● Design Points
 ■ C- 1.000
 ▲ C+ 3.000
 X1 = B: feed water
 X2 = C: revolution
 Actual Factor
 A: intensity = 30.00



B: feed water

شکل ۱۵- نمودار چگونگی تاثیر پارامترهای A، C و BC بر بازیابی

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

بمنظور اطمینان از نتایج و مدل‌های به دست آمده 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 ارائه شده توسط نرم‌افزار را تأیید می‌کنند.

جدول ۱۳- نتایج و شرایط آزمایش‌های تکمیلی جدیدی مغناطیسی تر شدت بالا و سطوح آن‌ها

در ادامه جهت بررسی تاثیر آسیاکنی بر افزایش درجه آزادی هماتیت ریز و خاکی و همچنین بر عیار و بازیابی کنسانتره، تعدادی آزمایش با مدت زمانهای خردایش متفاوت انجام گرفت که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرند. یک نمونه به مدت زمان 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 ذکر شده است.

وزن نمونه: ۱ کیلوگرم

خردایش: ۸ دقیقه

شدت جریان: 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 می شود با افزایش خردایش نمونه از ۴ دقیقه به ۸ دقیقه، به نظر می رسد میزان آزاد شدگی 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 تاثیری نداشت. آزمایش دیگری جهت بررسی بیشتر تاثیر مدت زمان خردایش بر عیار محصول در پی گرفته شد. در این حالت نیز سرند کنترل، اندازه ۱۵۰ میکرون و مدت زمان خردایش ۱۳ دقیقه بود. شرایط و نتیجه حاصل به شرح جدول ۱۵ است. خردایش: ۱۳ دقیقه

سرند کنترل: ۱۵۰ میکرون

شدت جریان: 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 می شود میزان عیار و بازیابی کنسانتره حاصل نسبت به حالتی که نمونه خوراک تحت خردایش به مدت زمان ۴ دقیقه قرار گرفته باشد، کمتر است و این نشان می دهد که خردایش بیش از حد، موجب تولید نرمه و در برخی موارد نیز کاهش نسبی مقدار آهن در نمونه می شود. بنابراین بهترین روش ارتقای کیفی محصول، اعمال یک تا دو مرحله شستشو (کلینر) در فرآیند می باشد. علیرغم موارد فوق، نتیجه حاصل همچنان در محدوده قابل قبول محصول هدف می باشد. 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 ارائه شده است.

وزن نمونه: ۱ کیلوگرم ریزتر از ۱۵۰ میکرون

بدون خردایش

شدت جریان: 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 می دهد که دستیابی به محصولی با عیار حداقل ۵۵ درصد هماتیت، امکان پذیر است. بنابراین با انجام آزمایشهای تکمیلی برای افزایش بازیابی کانه مفید و آزمایشهای تکمیلی باطله های جدایش مغناطیسی و اعمال یک مرحله شستشو، در مجموع دو محصول به صورت 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 رمق گیری با حدود ۱۰ درصد وزنی بار اولیه با عیار ۴۶٫۷۹ درصد هماتیت، بعد از یک مرحله شستشوی باطله حاصل از مرحله رافر

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.

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

ارزیابی افزایش عیار نشان می‌دهد که دستیابی به عیار بالاتر از ۵۵ درصد آهن (۷۸ درصد هماتیت) ممکن بوده و تنها بازیابی بیشتر باید مد نظر قرار گیرد. نگاهی به محصولات کلینر نشان می‌دهد در شرایط بهینه، محصولات جدا شده 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 به دست آمده به شرح جدول ۲۰ است.

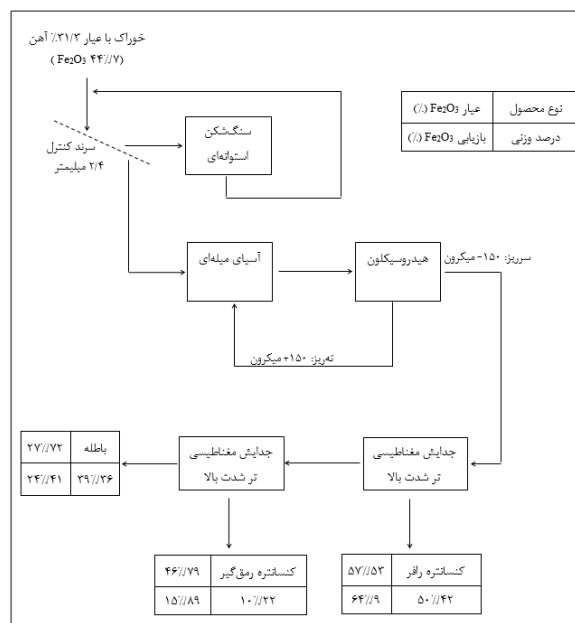
جدول ۱۹- نتایج آزمایش مرحله پرعیارسازی ثانویه

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

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

۴-۲-۳- نتیجه‌گیری و فلو شیت پیشنهادی



شکل ۱۶- فلو شیت 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 امکان پذیر نیست. در عین حال علیرغم اینکه هماتیت در شدت‌های میدان مغناطیسی کمتر از ۱ تسلا نیز قابل جدایش است، اما ریز دانه بودن و حضور گوتیت به عنوان بخشی از کانی حاوی آهن عملاً استفاده از شدت‌های متوسط را نیز غیر ممکن ساخته است. در آزمایش‌های به عمل آمده ابتدا بیشترین بازیابی در مرحله رافر مد نظر قرار گرفت و برای بهترین شرایط رافر، آزمایش‌های کلینر (شستشو) در دو تا سه مرحله انجام شد. در ادامه بهترین نتایج، حاصل و فلو شیت انتخابی ارائه شده است. آزمایش‌های این مرحله بهینه‌سازی با جدا کننده مغناطیسی تر شدت بالا، آسیای مواد در ۴ دقیقه و سرد کنترل ۱۵۰ میکرون بود. شرایط و نتیجه حاصل به شرح جدول ۱۷ است.

وزن نمونه : ۱ کیلوگرم

خردایش : ۴ دقیقه

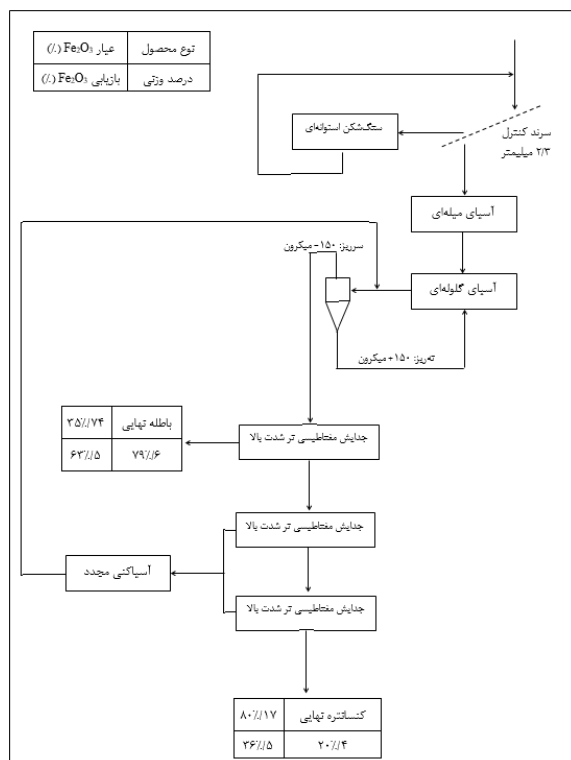
سرد کنترل: ۱۵۰ میکرون

شدت جریان : 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



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

۴-۲-۴- جدایش مغناطیسی خشک گرادیان بالا

جدا کننده‌های مغناطیسی خشک برای ذرات درشت کارایی مناسب را دارا می‌باشند [۳۱]. جدا کننده مغناطیسی خشک در دسترس، از نوع القائی با قابلیت تولید میدان مغناطیسی حداکثر به شدت ۱/۷ تسلا بود. از پارامترهای قابل تنظیم دستگاه می‌توان به تیغه جدا کننده باطله-میانی و میانی-کنسانتره اشاره کرد که با افزایش زاویه تیغه میانی-کنسانتره، عیار کنسانتره افزایش و بازایی 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 سرنده خشک و توزیع عیار آهن در طبقات سرندهی مختلف

محدوده ابعادی (میکرون)	درصد وزن روی سرنده	عیار آهن (درصد)
۱۰۰۰+۲۳۸۰-	۶۶	۳۰/۶

نتایج بررسی‌های به عمل آمده 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 تاسیسات مورد نیاز به عمل آید تا سوددهی تعیین شود. با توجه به ارزش کنسانتره آهن با توجه به مشخصات ماده معدنی مورد مطالعه، این امر (سوددهی) باید با دقت و حساسیت بیشتری بررسی شود.

در پیشنهاد فلوشیت مورد نیاز 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 سنگ شکنی دو مرحله‌ای برای کاهش ابعاد تا حد ۲۰ میلیمتر می‌باشد. بخشی از فلوشیت که شامل ابتدای مسیر تا قبل از آسیای گلوله‌ای می‌باشد، در صورت استفاده از بار ورودی ریزتر از ۵ میلیمتر (مانند نمونه تحویلی برای آزمایش‌ها) مورد نیاز 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 می‌باشد. بنابراین برای یک واحد کوچک، بخش خردایش می‌تواند در یک آسیای گلوله‌ای خلاصه شود. در برخی از حالت‌ها می‌توان از یک مرحله آسیای گلوله‌ای در مدار باز 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 جدا کننده مغناطیسی شدت بالای پیوسته می‌باشد. 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).

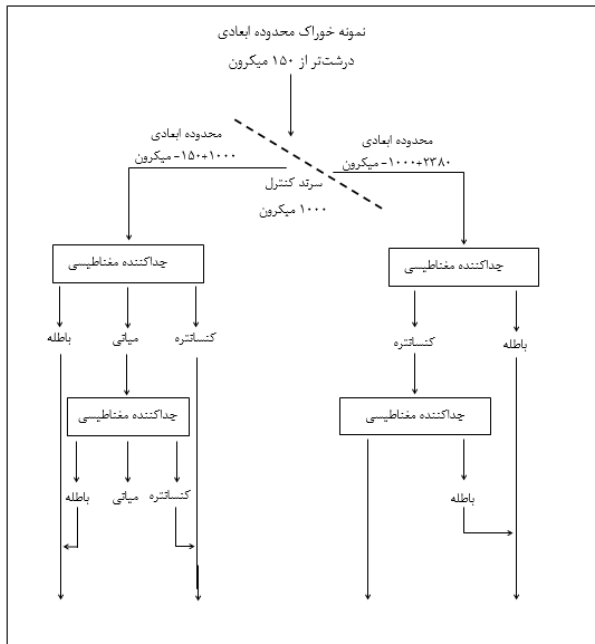
۳۲,۷۳	۲۴,۳	-۲۰۰۰+۱۰۰۰
۳۴,۳۸	۱۴,۲	-۱۰۰۰+۶۰۰
۳۴,۵۴	۱۶,۴	-۶۰۰+۳۰۰
۳۱,۵۹	۹,۳	-۳۰۰+۲۱۲
۲۸,۰۸	۳	-۲۱۲+۱۵۰
۲۷,۸۸	۲۶,۲	-۱۵۰

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

بمنظور این بخش از ذرات، با توجه به این که مقدار بسیار کمی خوراک به بخش کنسانتره راه یافت، بنابراین محصول میانی به عنوان 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 پریارسازی 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

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

بمنظور این بخش از ذرات، زوایای مختلف تیغه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت 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 به عنوان 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 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد.

- مطالعات XRD، آنالیز شیمیایی و کانی شناسی نشان داد مهمترین کانی‌های تشکیل دهنده 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 کیلو وات ساعت بر تن کوچک به دست آمد که نشان دهنده 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 در نهایت کنسانتره‌ای با عیار ۵۵٫۸۷ درصد هماتیت و بازیابی ۶۳٫۲۵ درصد به دست آمد.
- بهترین نتایج با استفاده از جدا کننده‌های 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.

فهرست منابع

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

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 Floccs from Iron Ores", *Mineral Engineering*, vol. 15, issue 6, pp. 415-422.
- 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.