

بهینه سازی تشویه مغناطیسی هماتیت کم عیار با متان به عنوان عامل احیا در راکتور بستر ثابت: مدیریت پارامترهای احیا و تحلیل کیفیت کنسانتره مغناطیسی

محمدرضا هوشمند^{۱*}، مهدی نصیری سروی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، گروه فرآوری مواد معدنی،

mr.hooshmand00@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، گروه فرآوری مواد معدنی، mnsarvi@iut.ac.ir

خلاصه

فولاد به عنوان یک ماده استراتژیک، ستون اصلی بسیاری از صنایع زیربنایی و توسعه ای به شمار می رود و تولید آن به طور مستقیم به منابع سنگ آهن وابسته است. با کاهش ذخایر پرعیار و افزایش استخراج ذخایر هماتیتی با عیار پایین (کمتر از ۴۵ درصد آهن کل)، بهبود فناوری های فرآوری این منابع اهمیت یافته است. هماتیت به دلیل خاصیت مغناطیسی ضعیف و حضور ناخالصی های مزاحم، معمولاً نیازمند فرآیندهای پیش احیا برای ارتقای کیفیت و بازیابی مؤثر آهن می باشد. در این پژوهش، فرآیند تشویه احیایی هماتیت با استفاده از گاز متان به عنوان عامل احیاکننده در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی گراد مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر این پارامتر بر ساختار، ویژگی های مغناطیسی و کیفیت محصول نهایی ارزیابی شد. نمونه اولیه از یک معدن در استان فارس با عیار آهن کل ۳۰/۵۵ درصد و کانی باطله غالب کوارتز انتخاب گردید. پس از آماده سازی و انجام تشویه در راکتور بستر ثابت، نتایج XRD نشان داد که تبدیل هماتیت به مگنتیت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد به خوبی انجام شده و افزایش دما به ۶۵۰ درجه می تواند سبب تشکیل وستیت و افت خاصیت مغناطیسی شود. همچنین آنالیز مغناطیس سنجی VSM افزایش اشباع مغناطیسی نمونه احیا شده را در دمای ۶۰۰ درجه تأیید کرد. بررسی ریزساختار توسط SEM-EDS نیز نشان داد ساختار متخلخل و ریزترک های به وجود آمده در محصول احیا، شرایط مساعدی برای خردایش و جدایش مغناطیسی فراهم نموده است. نتایج آزمایشات دیویس تیوب در ابعاد زیر ۲۰۰ و زیر ۴۰۰ مش حاکی از آن بود که خردایش تا ابعاد زیر ۴۰۰ مش همراه با دمای بهینه ۶۰۰ درجه، بالاترین بازیابی (۸۸ درصد) و بیشترین عیار آهن (۶۵.۱۲ درصد) را در کنسانتره نهایی به همراه داشته است. در نهایت کاهش چشمگیر مقادیر سیلیس و گوگرد در محصول نهایی به عنوان یک مزیت کیفی فرآیند ارزیابی شد. این تحقیق نشان می دهد که استفاده از متان در شرایط کنترل شده دمایی می تواند به عنوان روشی اقتصادی و مؤثر برای بهبود فرآوری ذخایر هماتیت کم عیار توسعه یابد و قابلیت گسترش به مقیاس صنعتی را داشته باشد.

کلمات کلیدی: تشویه مغناطیسی، هماتیت کم عیار، گاز متان، جدایش مغناطیسی، راکتور بستر ثابت

1. مقدمه

صنعت فولاد به عنوان یکی از ستون های اصلی توسعه اقتصادی و صنعتی کشورها، به طور مستقیم به تأمین پایدار منابع آهن وابسته است [۱]. در دهه های اخیر با کاهش ذخایر پرعیار سنگ آهن و افزایش مصرف جهانی فولاد، استخراج و

* mr.hooshmand00@gmail.com

بهره‌برداری از کانسنگ‌های کم‌عیار به‌ویژه هماتیت اهمیت فزاینده‌ای یافته است [۲]. هماتیت (Fe_2O_3) یکی از رایج‌ترین کانی‌های آهن‌دار در پوسته زمین محسوب می‌شود که به دلیل ساختار بلوری پایدار و سختی نسبی، بازیابی آن با روش‌های مرسوم دشوار است [۳]. ویژگی مغناطیسی ضعیف هماتیت مانع از آن می‌شود که بتوان آن را مستقیماً با جدایش مغناطیسی پری‌عیارسازی کرد [۴]؛ در حالی که مگنتیت (Fe_3O_4) با خاصیت مغناطیسی قوی، قابلیت جدایش آسان و کارآمدی در مدارهای مغناطیسی دارد [۵]. همین امر موجب شده تبدیل هماتیت به مگنتیت به‌عنوان یک مرحله پیش‌فرآوری کلیدی مورد توجه قرار گیرد.

یکی از مؤثرترین روش‌ها برای بهبود خاصیت مغناطیسی هماتیت، فرآیند تشویه احیایی* است که در حضور عامل احیاکننده مانند گازهای CO ، H_2 یا CH_4 انجام می‌شود [۶]. طی این فرآیند، هماتیت در اثر واکنش‌های کاهشی به مگنتیت تبدیل شده و ساختار آن دستخوش تغییراتی نظیر ایجاد ترک‌های ریز و افزایش تخلخل می‌گردد که همین تغییرات باعث بهبود قابلیت جدایش در مراحل بعدی می‌شود [۷]. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که با انتخاب شرایط بهینه دما، زمان و نوع گاز احیاکننده، می‌توان بازده احیا را افزایش داد و در عین حال مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای را کنترل کرد [۸].

تحقیقات گسترده‌ای در زمینه احیای هماتیت به مگنتیت از طریق تشویه مغناطیسی انجام شده است. به‌عنوان مثال، استفاده از کوره‌های بستر سیال و سیستم‌های تعلیقی توانسته زمان واکنش را کاهش داده و راندمان فرآیند را افزایش دهد [۹]. در برخی پژوهش‌ها نشان داده شده است که حتی حضور مقدار اندکی از مگنتیت اولیه در ساختار کانسنگ می‌تواند به‌عنوان مرکز هسته‌زایی برای واکنش احیا عمل کرده و فرآیند تبدیل را تسریع کند [۱۰]. همچنین گاز هیدروژن به دلیل قابلیت احیای پاک، توجه زیادی به خود جلب کرده است؛ چراکه در مقایسه با گازهای سنتی مانند CO ، تولید دی‌اکسید کربن کمتری دارد و با سیاست‌های زیست‌محیطی روز هماهنگ است [۱۱].

از سوی دیگر، کیفیت محصول نهایی پس از تشویه احیایی به پارامترهای معدنی سنگ آهن وابسته است. کانی‌های باطله همراه با هماتیت، نظیر سیلیسیم، در فرآیند احیا رفتار متفاوتی نشان داده و گاهی باعث افت بازیابی یا عیار می‌شوند [۱۲]. بنابراین طراحی فرآیند باید به‌گونه‌ای باشد که علاوه بر بهینه‌سازی احیا، شرایط لازم برای جدایش مغناطیسی در مراحل بعدی را نیز فراهم آورد [۱۳]. در پژوهش‌های اخیر استفاده از افزودنی‌هایی مانند مواد کربنی جامد یا کانی‌های فسفات به‌عنوان کمک‌احیاکننده نیز مورد ارزیابی قرار گرفته که منجر به بهبود راندمان تبدیل هماتیت به مگنتیت شده است [۱۴].

جدایش مغناطیسی پس از احیا، به‌عنوان بخش مکمل این فرآیند نقش اساسی دارد. چرا که پس از تقویت خاصیت مغناطیسی سنگ آهن، امکان حذف مؤثر گانگ† و افزایش کیفیت کنسانتره فراهم می‌شود [۱۵]. در این بخش، شدت میدان مغناطیسی، اندازه ذرات، نرخ خوراک‌دهی و دبی پالپ از پارامترهای کلیدی هستند که باید به طور دقیق کنترل شوند تا محصول با بیشترین بازیابی و بالاترین عیار تولید گردد [۱۶]. گزارش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از میدان‌های مغناطیسی شدت پایین برای پری‌عیارسازی کنسانتره مگنتیتی پس از تشویه، عملکرد قابل توجهی دارد و می‌تواند بخش عمده‌ای از آهن را بازیابی کند [۱۷].

در مجموع، می‌توان گفت تبدیل هماتیت به مگنتیت به‌عنوان روشی پایدار، اقتصادی و قابل توسعه برای ارتقاء منابع

* Reduction Roasting

† Gangue

کم‌عیار آهن در سطح جهانی شناخته شده است [۲]. این رویکرد نه تنها از نظر فنی مزایای فراوانی دارد، بلکه از منظر زیست‌محیطی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز مورد تأیید است [۱۱]. حرکت به سمت استفاده از گازهای احیایی سبز نظیر هیدروژن، یا حتی احیای خود-مغناتیسی*، می‌تواند در آینده نزدیک جایگاه ویژه‌ای در فرآوری کانسنگ‌های کم‌عیار پیدا کند [14].

۲. مواد و روش‌ها

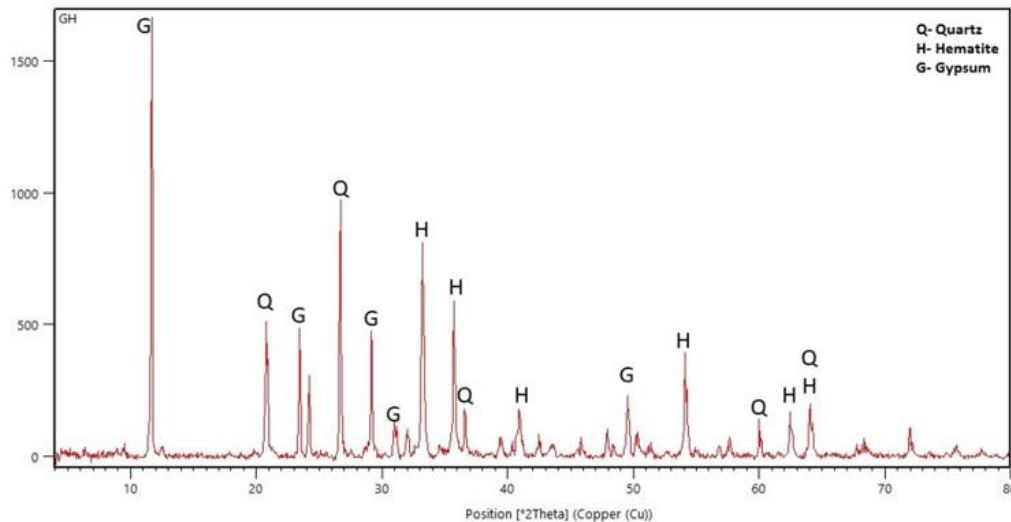
۲-۱- نمونه خام

نمونه مربوط به معدنی در استان فارس می‌باشد و ترکیب شیمیایی نمونه در جدول ۱ نشان داده شده است که کانی‌های هماتیت با محتوی آهن کل ۳۰/۵۵ درصد و کوارتز به عنوان ناخالصی اصلی با ۲۲/۲۵ درصد را شامل می‌شود. آنالیز XRD نمونه خام در شکل ۱ نشان داده شده است که همان‌طور که مشخص است، کانی‌های هماتیت و کوارتز دو کانی اصلی این کانسنگ هستند.

جدول ۱- نتایج آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) نمونه خام

Fe _{total}	SO ₃	CaO	MnO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	ترکیب
۳۰/۵۵	۷/۹۱	۶/۹۷	۲/۶۲	۲/۱۱	۳/۴۲	۲۲/۲۵	۴۳/۶۴	درصد
		LOI	BaO	P ₂ O ₅	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	ترکیب
		۹/۱۳	۰/۳۷	۰/۱۲	۰/۱۷	۱/۰۸	۰/۰۶	درصد

* Self-magnetization roasting



شکل ۱ - آنالیز XRD نمونه خام

۲-۲- ریفل و خردایش

با توجه به اینکه ذرات به صورت ریزدانه بودند در ابتدا نیازی به خردایش نبود. مقدار ۵۰ کیلوگرم نمونه با استفاده از ریفل همگن شد. سپس با استفاده از ریفل، مقدار ۲ کیلوگرم نمونه به عنوان نمونه مرجع جهت انجام تست‌های اولیه آزمایشگاهی جدا شد. سپس از سرنده ۵۰۰ میکرون عبور داده شد و ذرات بزرگ‌تر از آن به وسیله سنگ‌شکن غلتکی و میکروسایزر خرد شدند و از همان سرنده عبور کردند.

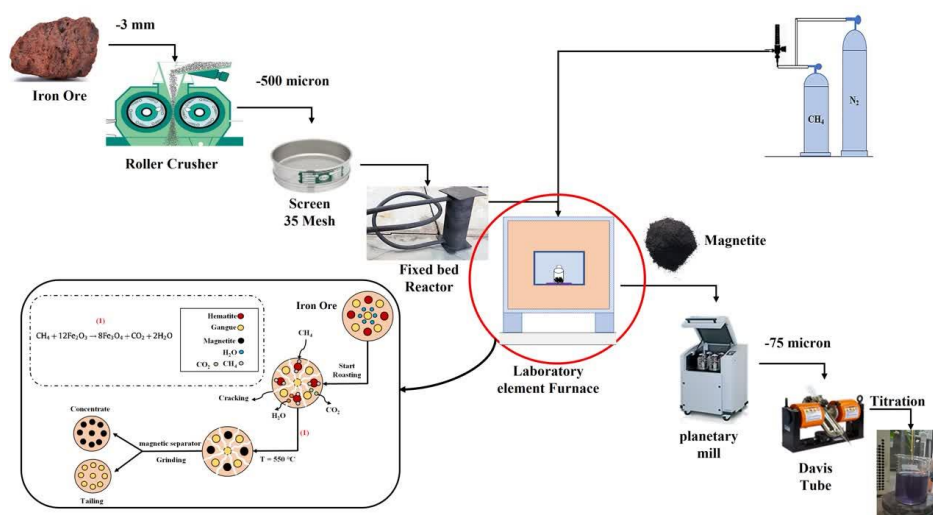
۲-۳- تشویه مغناطیسی

در ابتدا با توجه به پارامترهای اثرگذار بر تشویه و همین‌طور تنها پارامتر متغیر یعنی دما که در جدول ۲ نشان داده شده است،

جدول ۲- پارامترهای اثرگذار بر تشویه

مقدار نمونه اولیه (g)	مقدار نمونه احیا شده (g)	دبی متان (lit/min)	زمان تشویه (min)	اندازه ذرات (میکرون)	دما (درجه سانتی گراد)
۱۰	۹.۵	۱	۱۷	-۵۰۰	۵۰۰
۱۰	۹.۳	۱	۱۷	-۵۰۰	۵۵۰
۱۰	۹.۲	۱	۱۷	-۵۰۰	۶۰۰
۱۰	۹	۱	۱۷	-۵۰۰	۶۵۰

طراحی آزمایش انجام شد که به سبب آن ۴ تست تشویه در دماهای ۵۰۰، ۵۵۰، ۶۰۰ و ۶۵۰ برنامه ریزی شد. این آزمایشات درون رآکتوری از جنس استیل-۳۰۴ صورت گرفت که شماتیک کلی فرایند را در شکل ۲ مشاهده میکنید.



شکل ۲- شماتیک کلی فرایند

برای انجام هر تست تشویه احیایی با استفاده از رآکتور بستر ثابت مقدار ۱۰ گرم نمونه وزن شده و به عنوان خوراک ورودی درون رآکتور ریخته شد. بعد از آن رآکتور را در کوره قرار داده و دمای کوره، بر روی دمای مدنظر تنظیم شد. در حین افزایش دمای کوره، گاز نیتروژن را با دبی ۱ لیتر بر دقیقه به رآکتور تزریق شد تا گاز بی اثر نیتروژن، اکسیژن را که عامل اکسندگی است را از فضا خارج کند. زمانی که کوره به دمای مدنظر رسید، به مدت ۱۰ دقیقه زمان داده شد که تا حد ممکن دمای رآکتور در تمام نقاط آن یکسان شود. سپس گاز نیتروژن قطع شده و گاز متان با دبی ۰/۵ لیتر بر دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه در رآکتور دمیده شد تا احیا صورت بگیرد. پس از اتمام زمان موردنظر گاز متان قطع شد و کوره خاموش گردید سپس گاز نیتروژن به منظور خنک سازی نمونه به مدت ۲۰ دقیقه با دبی ۲ لیتر بر دقیقه وارد شد. بعد از آنکه دمای کوره و رآکتور تا حد مطلوبی کاهش پیدا کرد، رآکتور را خارج کرده و به وسیله باد فشرده به طور کامل آن را خنک کرده و نمونه احیا شده را از آن خارج کرده و برای آزمایشات بعدی نگهداری می شود.

۲-۴- خراش مرحله دوم

برای رسیدن به جدایش مطلوب به یک مرحله دیگر خردایش نیاز داریم تا مگنتیت احیا شده تاحدامکان به درجه آزادی برسد. برای این منظور از آسیا سیاره‌ای استفاده شد و ذرات از سرنند ۲۰۰ مش عبور داده شد و آماده آزمایش شد. به منظور بررسی اثر اندازه ابعاد ذرات، بعد از عبور ذرات از سرنند ۲۰۰ مش، آن را به وسیله میکروسایزر یک مرحله دیگر تحت خردایش قرار داده و بعد از آن نمونه‌ها به وسیله اتانول از سرنند ۴۰۰ مش عبور داده و آماده انجام آزمایش دیویس تیوب شدند.

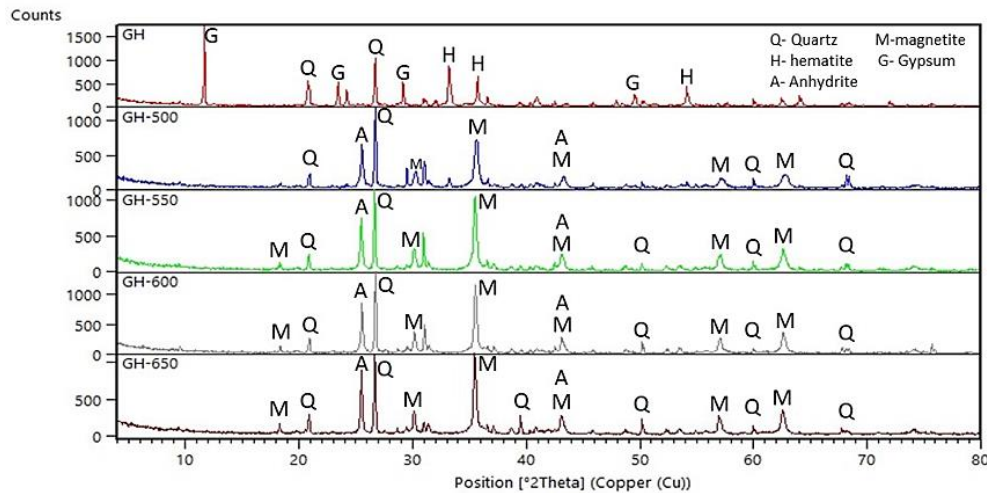
۲-۵- جدایش مغناطیسی

نمونه‌های آماده شده با وزن مشخص همگی به دو بخش تقسیم شده و برای نمونه هر دما، دو بار تست انجام شد تا نتایج دقیق‌تر شود. به‌عنوان مثال اگر مقدار نمونه زیر ۲۰۰ مش برای دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۰ گرم بود، نمونه به دو بخش ۵ گرمی تقسیم میشد و تست به‌صورت جداگانه انجام میشد و در نهایت کنسانتره هر دو تست با هم مخلوط شد و برای خشک شدن درون آن قرار داده شد. نمونه‌های زیر ۲۰۰ مش همگی در ابتدای کار به وسیله میدان مغناطیسی ۸۰۰ گاوس جذب شده و پس از شسته شدن مناسب در نهایت میدان به ۶۰۰ گاوس کاهش داده میشد و حدود ۱۰ دقیقه زمان داده میشد تا به‌صورت کامل باطله از کنسانتره شسته شود و در نهایت میدان خاموش شده و نمونه کنسانتره در ظرف ریخته میشد. پس از گذشت حدود ۱ ساعت، نمونه در ظرف ته‌نشین شده بود و آب اضافه آن گرفته شده و ظرف به مدت یک روز درون آن در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته تا خشک شود. نمونه‌های زیر ۴۰۰ مش هم به همین گونه آماده سازی شدند اما نحوه انجام تست دیویس تیوب آنها متفاوت بود. بدین منظور بعد از انجام مرحله اول دیویس، کنسانتره و باطله گرفته شد سپس یک تست بر روی باطله مرحله قبل و یک تست بر روی کنسانتره آن انجام شد که به صورت کلی میتوان گفت که از یک سیستم رافر، کلینر و اسکونجر استفاده شد که در سه میدان متفاوت ۶۰۰، ۴۰۰ و ۲۰۰ گاوس انجام گرفت.

۳. نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر دما

آنالیز XRD دماهای ۵۰۰، ۵۵۰، ۶۰۰ و ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد و نمونه خام که در شکل ۲ آورده شده است و مورد بحث قرار می‌گیرد.

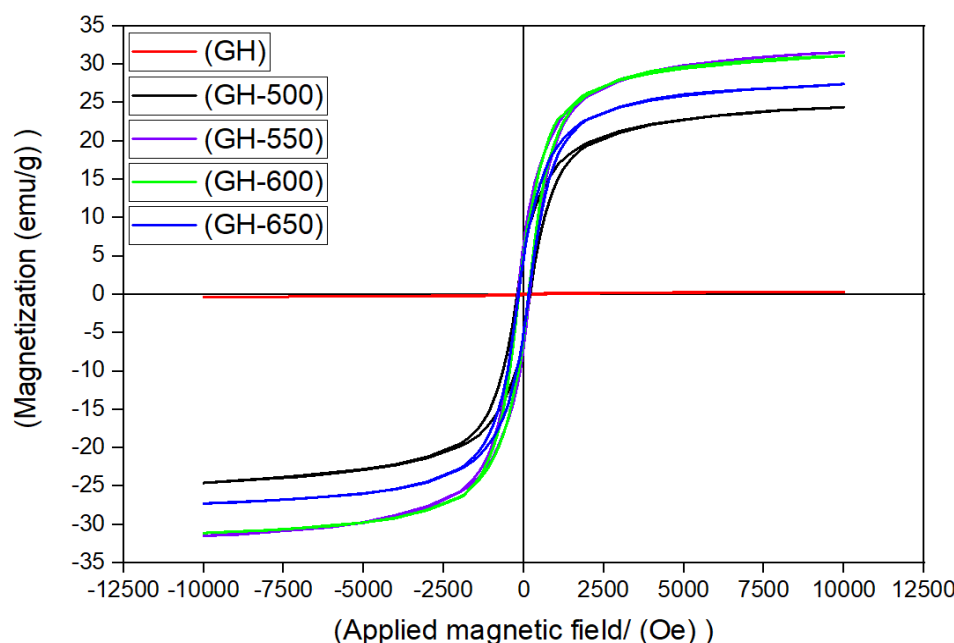


شکل ۳ - آنالیز XRD نمونه خام و نمونه های تشویه شده

همان طور که از تحلیل XRD در شکل ۳ مشخص است، در فرایند احیا، ژئیس تماماً به آنیدریت و هماتیت به مگنتیت تبدیل شده است و با افزایش دما شاهد اوج گیری و تثبیت پیک های مربوط به مگنتیت هستیم و در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد پیک های مربوط به مگنتیت اوج بیشتری نسبت به بقیه دماها دارد و این را می توان به عنوان یک هشدار در نظر گرفت که کمی دما بالا تر رود شاهد حضور وستیت به جای آن هستیم که به تبع آن خاصیت مغناطیسی نمونه کاهش پیدا کرده و بازیابی جدایش مغناطیسی دچار کاهش خواهد شد و چه بسا حتی در همین دما هم مقداری وستیت تشکیل شده باشد که در ادامه با انجام آنالیز VSM که مربوط به خاصیت مغناطیس سنجی نمونه است می توان اظهار نظر قطعی کرد. از طرفی تبدیل ژئیس به آنیدریت، کمک شایانی در راستای کاهش گوگرد نمونه می کند؛ زیرا آنیدریت تشکیل شده در دماهای ذکر شده شامل CaO آزاد است و در نتیجه گوگردی که در ساختار آن است به صورت گاز از راکتور خارج خواهد شد.

۳-۲- آنالیز مغناطیس سنجی

همان طور که در نموداری که در شکل ۴ آمده است، مشاهده می شود که با افزایش دما شاهد احیا شدن نمونه و افزایش خاصیت مغناطیسی هستیم.



شکل ۴ - آنالیز VSM نمونه خام و نمونه های تشویه شده

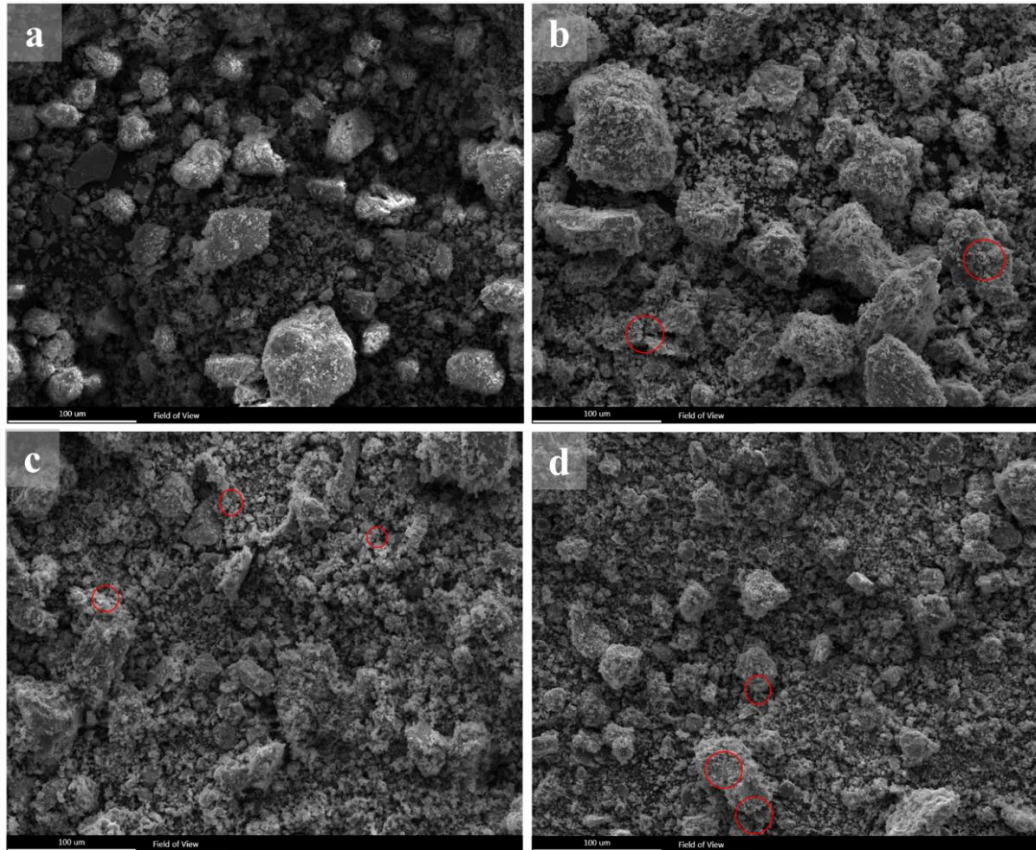
اما همان طور که در قسمت تحلیل XRD گفته شد در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد شاهد کاهش خاصیت مغناطیسی هستیم که می توان این نتیجه را گرفت که مقداری وستیت در این دما تشکیل شده است پس بهتر است که در دماهای پایین تر از آن شرایط احیا را تنظیم کنیم.

در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد هم شاهد عدم احیا کامل نمونه هستیم و می توان این نتیجه را عنوان کرد که هنوز مقداری هماتیت در نمونه ی این دما موجود است و برای احیا کامل و تبدیل هماتیت به مگنتیت نیازمند زمان بیشتر احیا در همین دما و یا افزایش دما هستیم.

دماهای ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد اختلاف به شدت ناچیزی با یکدیگر دارند و بهتر است یکی از این دو دما یا دمایی در این محدوده به عنوان دمای بهینه در نظر گرفت.

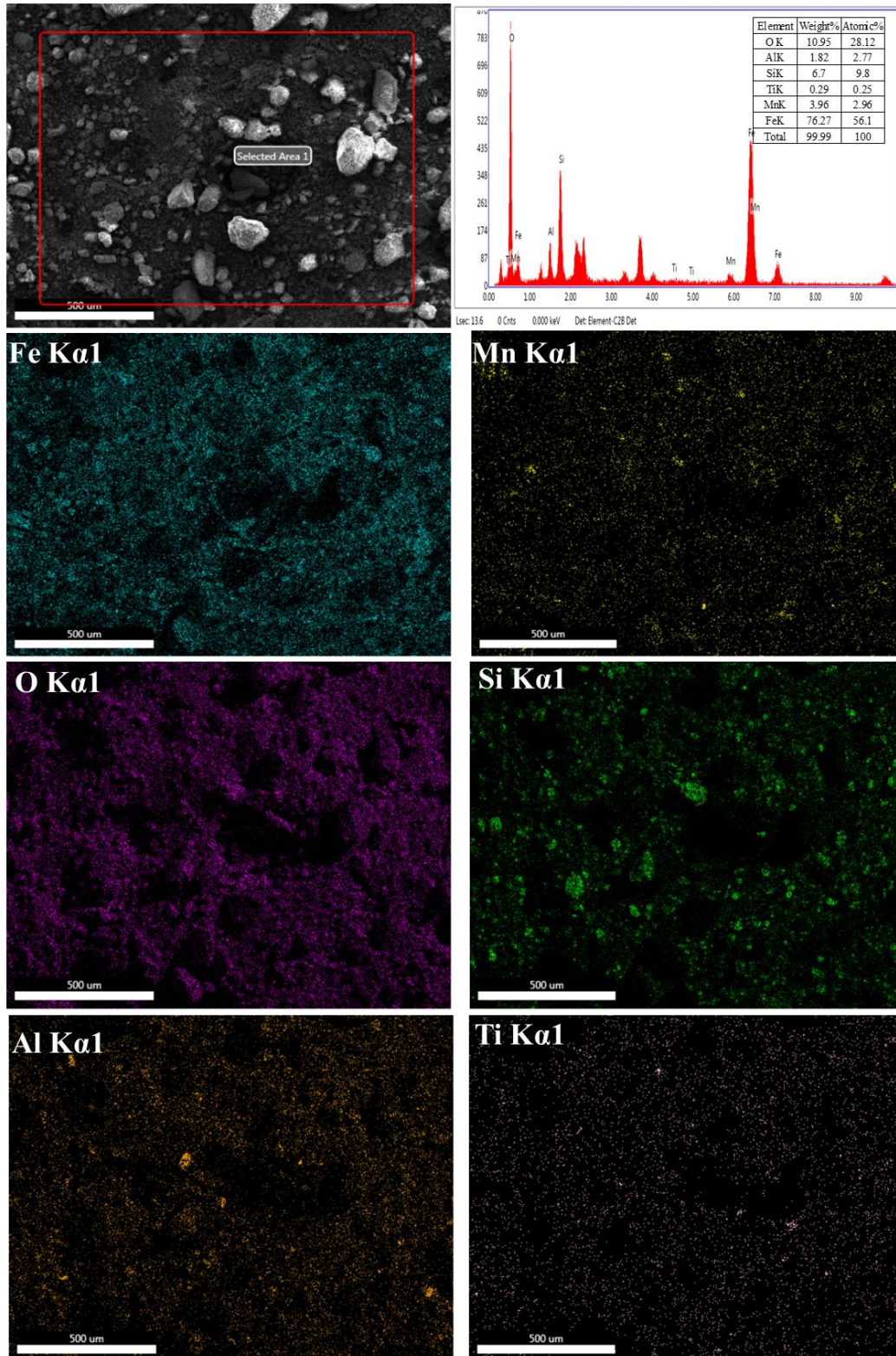
۳-۳- آنالیز ریز ساختار

همان طور که در شکل ۵ مشخص شده است، شکل (a-۵) مربوط به نمونه خام است و هیچ گونه ترک یا ریز ترکی در ساختار آن مشاهده نمی شود در صورتی که در شکل های (b-۵)، (c-۵) و (d-۵) که به ترتیب مربوط به احیا در دماهای مشخص می باشد، شاهد حضور ترک و ریز ترک و حفره هایی در ساختار ماده هستیم که این نوع ساختار های به وجود آمده برای خردایش مرحله دوم و همینطور جدایش مغناطیسی موثر واقع می شود و سبب جدایش موثر مگنتیت از باطله ها می شود.

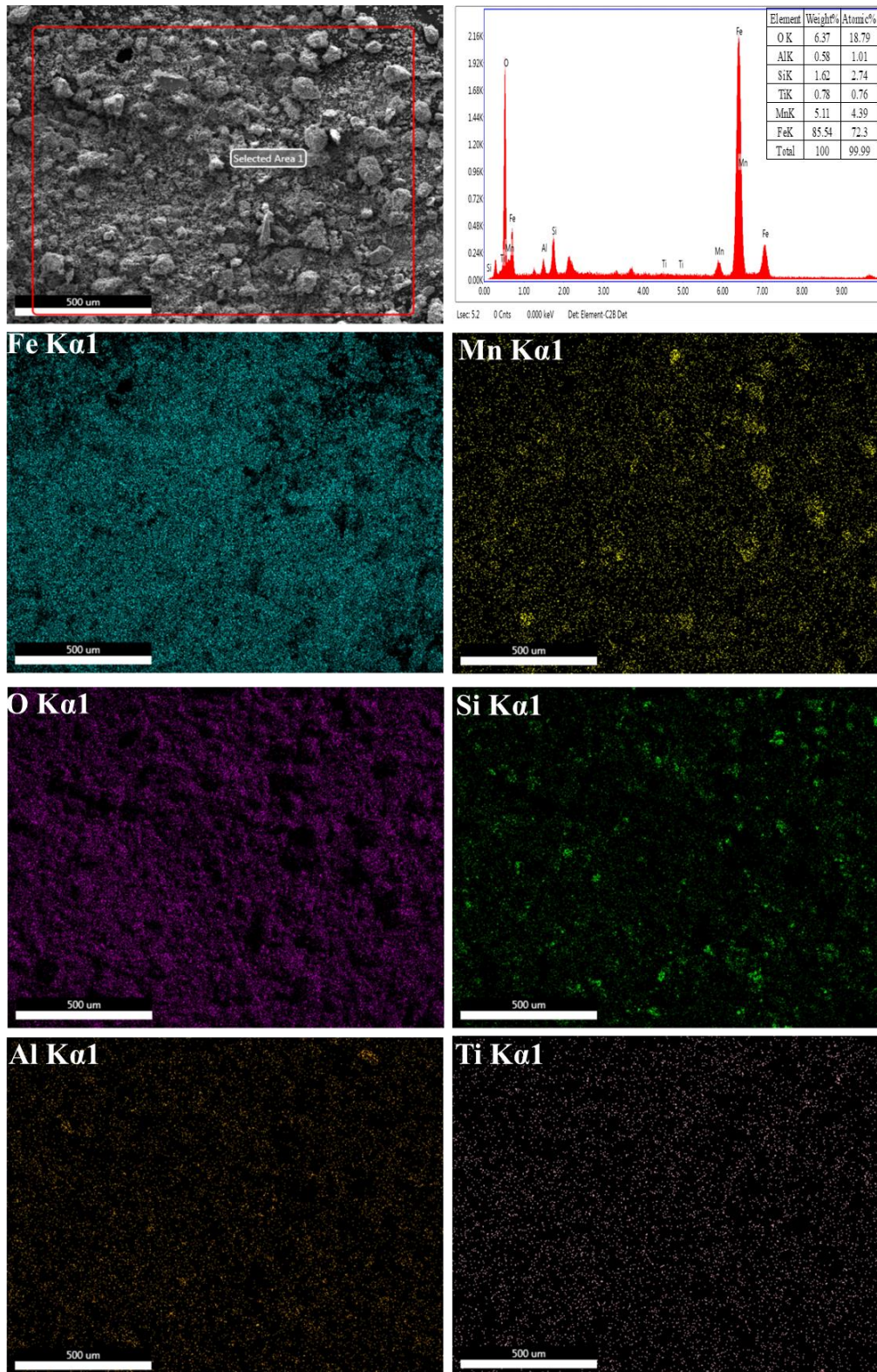


شکل ۵ - مقایسه ریزساختارهای سطح نمونه خام قبل و بعد از تشویه

برای تعیین تغییرات در ریزساختار نمونه خام و محصول تشویه شده در استفاده از گاز متان در فرایند تشویه مغناطیسی، آنالیز SEM-EDS مورد استفاده قرار گرفت. دو نمونه خام و تشویه در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد مورد آنالیز قرار گرفت که شکل ۶ مربوط به نمونه خام و شکل ۷ مربوط به ماده تشویه شده است. همان طور که در تصاویر مشخص است، مقادیر تقریبی آهن و اکسیژن در نمونه خام برابر با ۷۶/۲۷٪ و ۱۰/۹۵٪ در صورتی که در نمونه تشویه شده مقادیر آهن و اکسیژن آن برابر با ۸۵/۵۴٪ و ۶/۳۷٪ است. این نتایج نشان می دهد احیا اکسید آهن و کاهش اکسیژن در نمونه تشویه شده به درستی انجام شده است و مقدار آن تقریباً نصف شده است. همچنین اسکن سطحی نمونه خام و محصول تشویه شده نشان داد که نقاط توزیع، ناخالصی هایی مثل سیلیس و آلومینیوم در نمونه خام روشن تر و بیشتر از محصول تشویه شده است و پس از تشویه در دمای بالاتر این مقادیر برای سیلیس و آلومینیوم کاهش یافته است.



شکل ۶ - آنالیز SEM-EDS از نمونه خام



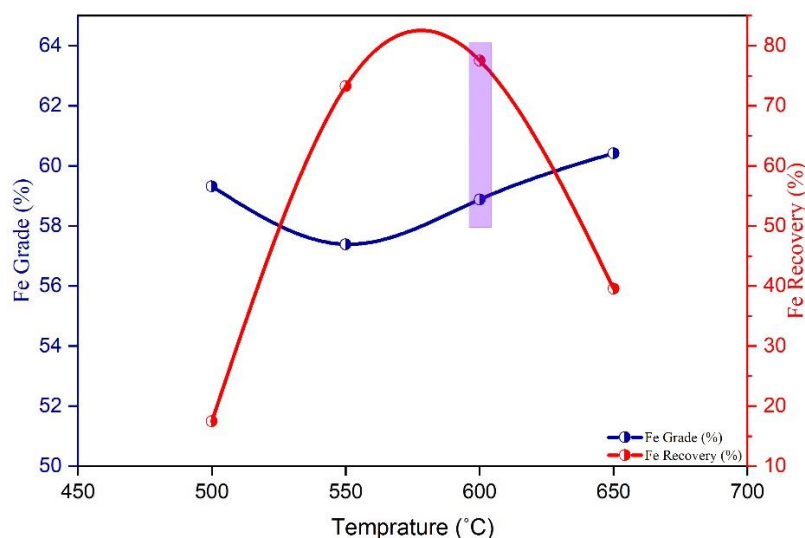
شکل ۷ - آنالیز SEM-EDS از نمونه تشویه شده

۳-۴-عیار و بازیابی

آنالیز شیمی تر به جهت تعیین عیار آهن کل نمونه کنسانتره دیویس در اندازه ذرات و میدان مغناطیسی‌های متفاوت که در بخش جدایش مغناطیسی نحوه انجام آن شرح داده شد، انجام شد.

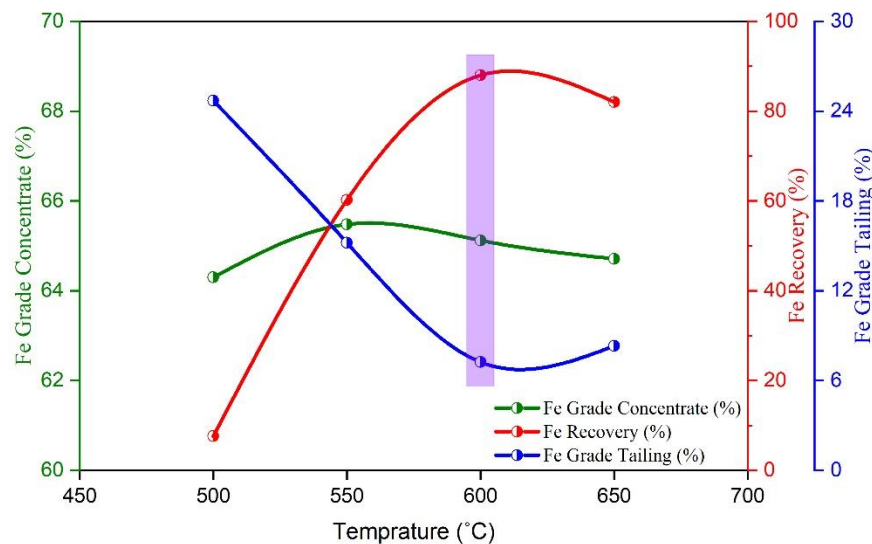
$$(۱) \quad \text{بازیابی (\%)} = \frac{\text{وزن کنسانتره} \times \text{عیار کنسانتره}}{\text{وزن خوراک} \times \text{عیار خوراک}} \times 100$$

بازیابی با توجه به فرمول ۱ محاسبه می‌شود و آنالیز تیتراسیون برای عیار نمونه توسط اپراتور انجام شد. در شکل ۸ نمودار مربوط به دانه بندی زیر ۲۰۰ مش را مشاهده می‌کنید که میتوان نتیجه گرفت که دمای احیا در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، بهترین جدایش مغناطیسی نسبت به بقیه دماها صورت گرفته است و هر دو پارامتر اثرگذار یعنی عیار و بازیابی به نسبت بقیه حالت بهتری را شامل می‌شود.



شکل ۸ - تاثیر پارامتر دمای تشویه توسط گاز متان بر عیار و بازیابی کنسانتره آهن مغناطیسی با اندازه ذرات کوچکتر از ۲۰۰ مش

اما در ادامه نمودار مربوط به کنسانتره و باطله نهایی جدایش مغناطیسی با ابعاد زیر ۴۰۰ مش در شکل ۹ آورده شده است. این نکته قابل ذکر است که در رابطه با بازیابی مربوط به نمونه‌های کوچکتر از ۴۰۰ مش، بازیابی برای یک فرایند سه مرحله‌ای رافر، کلینر و اسکونجر محاسبه شد و بازیابی نهایی با در نظر گرفتن بازیابی کلی این فرایند محاسبه شد.



شکل ۹ - تاثیر پارامتر دمای تشویه توسط گاز متان بر عیار و بازیابی کنسانتره آهن مغناطیسی با

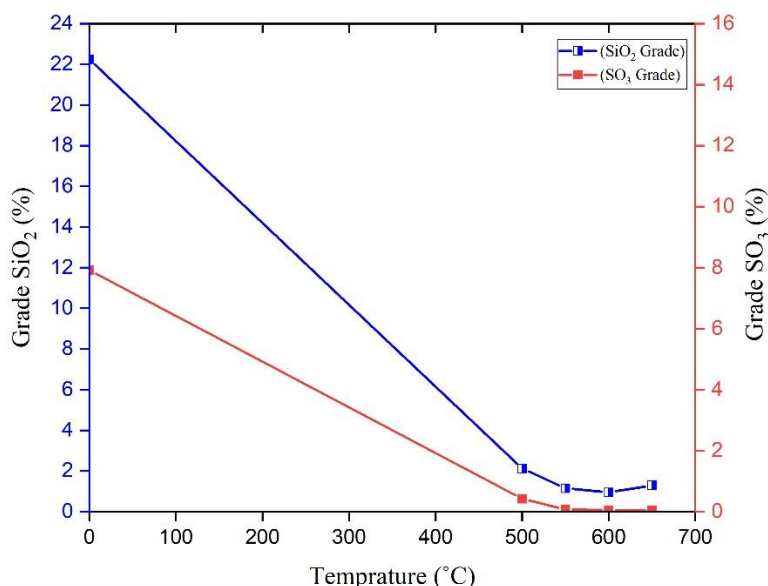
اندازه ذرات کوچکتر از ۴۰۰ مش در سیستم سه مرحله‌ای رافر، کلینر، اسکونجر

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، دمای بهینه برای بهترین حد جدایش مغناطیسی و همچنین بازیابی دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است که در آن عیار آهن در کنسانتره نهایی برابر با ۶۵/۱۲٪ و در باطله نهایی برابر با ۷٪/۲۴ است و همین‌طور بازیابی در این دما ۸۸٪ بود که این نشان دهنده این است که تشویه به صورت مناسبی صورت گرفته است. در جدول ۳ نتایج آنالیز FeO آورده شده است که همان‌طور که مشخص است، بیشترین میزان مربوط به دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است که نشان دهنده احیای کامل تر هماتیت به مگنتیت نسبت به بقیه دماها است.

جدول ۳- آنالیز FeO بر روی کنسانتره های جدایش مغناطیسی در ابعاد زیر ۴۰۰ مش

FeO (%)	دما (درجه سانتی‌گراد)
۱۰/۷	۵۰۰
۱۵	۵۵۰
۲۱/۷۳	۶۰۰
۱۴/۱۷	۶۵۰

مقدار SiO_2 و SO_3 هم در شکل ۱۰ قابل مشاهده است که نشان دهنده کاهش به شدت خوب سیلیس به عنوان کانی باطله اصلی و همین‌طور گوگرد به عنوان یکی از عناصر مشکل زا در فرایند تولید فولاد است که باعث تشکیل یک کمپلکس با آهن شده که به موجب آن، خاصیت مکانیکی فولاد دست خوش تغییر شده و یک فاز با تردی زیاد تشکیل شده که موجب کاهش کیفیت تولید می‌شود.



شکل ۱۰ - تاثیر پارامتر دمای تشویه توسط گاز متان بر عیار SiO_2 و SO_3 با اندازه ذرات کوچکتر از ۴۰۰ مش

۴. نتیجه گیری

بعد از بررسی های کامل آزمایشگاهی نتایج زیر حاصل شد:

- ❖ نتایج احیا در دماهای مختلف نشان داد که دمای بهینه جهت دستیابی به عیار بیشینه ۶۰۰ درجه سانتی گراد است و بیشینه بازیابی و عیار نیز در این دما حاصل شد.
- ❖ بررسی نتایج XRD و VSM نیز تأیید بر تبدیل هماتیت به مگنتیت به صورت کامل در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد دارد.
- ❖ اندازه ذرات نیز پارامتر تأثیرگذار دیگری است که مقایسه دو اندازه ذره زیر ۲۰۰ و زیر ۴۰۰ مش نشان داد برای دست یابی به عیار بالای ۶۵ درصد آهن کل خردایش تا مش ۴۰۰ ضروری است.
- ❖ نتایج عیارسنجی گوگرد نیز نشان می دهد گوگرد در فرایند احیا با توجه به تخریب ژپیس (که در برگیرنده ی مقدار اصلی گوگرد است) به صورت قابل توجهی کاهش می یابد.

۵. مراجع

- [۱] Y. Cao, Y. Sun, P. Gao, Y. Han, and Y. Li, "Mechanism for suspension magnetization roasting of iron ore using straw-type biomass reductant," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 31, no. 6, pp. 1075-1083, 2021.
- [۲] J. Jin, X. Zhu, P. Li, Y. Li, and Y. Han, "Clean utilization of limonite ore by suspension magnetization roasting technology," *Minerals*, vol. 12, no. 2, p. 260, 2022.
- [۳] W. Li, J. Chen, W. Zhou, Y. Han, and Y. Shan, "Effect of bastnaesite as reductant on hematite reduction during in-situ suspension magnetization roasting of refractory iron ore under neutral atmosphere," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 32, no. 4, pp. 877-886, 2022.
- [۴] Y. Li, Q. Zhang, S. Yuan, and H. Yin, "High-efficiency extraction of iron from early iron tailings via the suspension roasting-magnetic separation," *Powder Technology*, vol. 379, pp. 466-477, 2021.
- [۵] X. Liu, P. Gao, S. Yuan, Y. Lv, and Y. Han, "Clean utilization of high-iron red mud by suspension magnetization roasting," *Minerals engineering*, vol. 157, p. 106553, 2020.
- [۶] E. R. Monazam, R. W. Breault, R. Siriwardane, G. Richards, and S. Carpenter, "Kinetics of the reduction of hematite (Fe_2O_3) by methane (CH_4) during chemical looping combustion: A global mechanism," *Chemical Engineering Journal*, vol. 232, pp. 478-487, 2013.
- [۷] Y. Sun, X. Zhang, Y. Han, and Y. Li, "A new approach for recovering iron from iron ore tailings using suspension magnetization roasting: A pilot-scale study," *Powder Technology*, vol. 371, pp. 571-580, 2020.
- [۸] S. Yuan, H. Xiao, R. Wang, Y. Li, and P. Gao, "Improved iron recovery from low-grade iron ore by efficient suspension magnetization roasting and magnetic separation," *Minerals Engineering*, vol. 186, p. 107761, 2022.
- [۹] S. Yuan, Q. Zhang, H. Yin, and Y. Li, "Efficient iron recovery from iron tailings using advanced suspension reduction technology: A study of reaction kinetics, phase transformation, and structure evolution," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 404, p. 124067, 2021.
- [۱۰] S. Yuan, W. Zhou, Y. Han, and Y. Li, "Individual enrichment of manganese and iron from complex refractory ferromanganese ore by suspension magnetization roasting and magnetic separation," *Powder Technology*, vol. 373, pp. 689-701, 2020.
- [۱۱] H. Zhang, P. Zhang, F. Zhou, and M. Lu, "Application of multi-stage dynamic magnetizing roasting technology on the utilization of cryptocrystalline oolitic hematite: A review," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 32, no. 4, pp. 865-876, 2022.
- [۱۲] Q. Zhang, Y. Sun, Y. Han, Y. Li, and P. Gao, "Effect of thermal oxidation pretreatment on the magnetization roasting and separation of refractory iron ore,"

Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, vol. 43, no. 2, pp. 182-187, ۲۰۲۲.

- [۱۳] X. Zhang, P. Liu, P. Gao, W. Li, Y. Han, and Y. Li, "A clean and green technology for iron extraction from refractory siderite ore via fluidization self-magnetization roasting," *Powder Technology*, vol. 444, p. 119993, 2024.
- [۱۴] X. Zhang, Z. Niu, Q. Zhang, Y. Yuanxing, P. Gao, and Y. Han, "Efficient development of ultra-low-grade iron ore by hydrogen-based mineral phase transformation: Magnetic transition, phase transformation, and microstructure evolution," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 97, pp. 757-765, 2025.
- [۱۵] B. Zhao, P. Gao, Z. Tang, and W. Zhang, "The efficient improvement of original magnetite in iron ore reduction reaction in magnetization roasting process and mechanism analysis by in situ and continuous image capture ", *Minerals*, vol. 11, no. 6, p. 645, 2021.

[۱۶] س. راه کان and م. نصیری سروی، "بررسی روش تشویه مغناطیسی با گاز شهری به عنوان کاهنده در فرآوری باطله های خط جداسازی مگنتیت جهت فرآوری آهن،" presented at the "هشتمین کنفرانس ملی مواد، متالورژی و معدن، ۱۴۰۳. [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/2230982>

[۱۷] ک. وزیرنظامی and م. نصیری سروی، "احیای هماتیت به مگنتیت با استفاده از فرآیندهای اکسیداسیون، تشویه احیایی و جدایش مغناطیسی،" presented at the "های محیط زیست: صنعت و معدن سبز، ۱۴۰۳. [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/2035089>