# مطالعه کاربرد ماکروویو در جدایش مغناطیسی مواد معدنی با بررسی جدایش حرارتی-مغناطیسی کانسنگ کم عیار آهن

**مهدی آشتیانی فر[۱*]، خداکرم غریبی[۲]**
**دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد**
(**Mehdi.Ashtianifar@stu.yazd.ac.ir** *)

## چکیده

یکی از روشهای بهبود کارایی فرآیند های پرعیار سازی استفاده از انرژی های نوین بخصوص گرمایش، مایکروویو است که در سالهای اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. بررسی ها نشان دهنده تاثیر قابل توجه گرمایش مایکروویو بر خواص فیزیکی، شیمیایی و فیزیکی-شیمیایی سطح کانی ها است و از این تغییرات می توان برای بهبود فرآیند های ، خردایش، جدایش مغناطیسی، فلوتاسیون، لیچینگ، شستشوی ذغال سنگ، مسائل محیط زیستی و موارد مشابه استفاده کرد. استفاده از گرمایش مایکروویو باعث افزایش بازیابی فلزات، افزایش کارایی فرآیند، کاهش هزینه ها، صرفه جویی در زمان، کاهش آلایندگی و موارد مشابه می شود. گرمایش ماکروویو با توجه به انتخابی بودنش می تواند باعث بهبود جدایش مغناطیسی مواد شود. در تاثیر گرمایش ماکروویو خواص مغناطیسی سنگ تغییر کرده به طوری که با افزایش زمان تابش تا ۶۰ ثانیه مغناطیس پذیری افزایش یافته ولی با افزایش زمان مجددا کاهش می یابد. با افزایش زمان گرمایش مایکروویو مغناطیس پذیری بخش فرومنیتیت افزایش می یابد که ناشی از تبدیل هماتیت به یک ماده فرومنیتیت است

**واژه‌های کلیدی:** ماکروویو، جدایش مغناطیسی، هماتیت، مگنتیت، پیریت، گوتیت.

## ۱- مقدمه

امواج ماکروویو یک حالت غیر یونیزه از امواج الکترومغناطیسی در محدوده فرکانس بین 300MHZ تا 300GHZ می باشند. گرمایش ماکروویو از این خاصیت استفاده میکند که برخی مواد انرژی الکترومغناطیسی را به گرمایی تبدیل میکنند. مواد به طور کلی می توانند امواج الکترومغناطیس را از خود عبور دهند(مانند سیلیکات ها) یا آنها را بازتاب دهند (مانند فلزات) یا اینکه آنرا جذب کنند.در مورد سنگ آهن، تاثیر ماکروویو بر روی افزایش خاصیت مغناطیسی آهن اثبات شده است اما این خاصیت دارای شرایط حدی است. یعنی در زمان های بیشتر از شرایط حدی، گرمایش مایکروویو تاثیر معکوس داشته و باعث کاهش مغناطیس پذیری می شود[۱].

اثر تابش مایکروویو بر روی کانی هایی مثل هماتیت، مگنتیت، سیدریت، پیریت مطالعه و اثبات شده است. در این تحقیق اثر بخشی مایکروویو بر روی سه کانی مگنتیت، هماتیت و گوتیت مورد بررسی قرار میگیرد.

---

۱- کارشناسی ارشد مهندسی معدن- فرآوری دانشگاه یزد
۲- استادیار فرآوری دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد

www.SID.ir

## ۲- بهبود جدایش مغناطیسی کانسنگ های آهن

تاثیر گرمایش مایکروویو در بهبود مغناطیسی کانسنگ های آهن توسط محققان بررسی شده است. مطالعه مغناطیس پذیری کانسنگ آهن شامل اجزای اصلی هماتیت و منیتیت نشان میدهد که در اثر گرمایش مایکروویو خواص مغناطیسی سنگ تغییر کرده به طوری که با افزایش زمان تابش تا ۶۰ ثانیه مغناطیس پذیری افزایش یافته ولی با افزایش زمان مجددا کاهش یافته است. با افزایش زمان گرمایش مایکروویو مغناطیس پذیری بخش پارامنیتیت کاهش یافته و به صفر می رسد و این در حالی است که مغناطیس پذیری بخش فرومنیتیت افزایش می یابد که احتمالا ناشی از تبدیل هماتیت به یک ماده فرو منیتیت است. یکی از روشهای موثر در بازیابی آهن از کانسنگ های کم عیار که پرعیار سازی های آنها با روشهای معمول بسیار سخت می باشد استفاده از تکنیک ترکیبی احیای گرمایی و جدایش مغناطیسی است[۲].

## ۳- جدایش مغناطیسی در کانسنگ های کم عیار با تاثیر ماکروویو

استفاده از انرژی ماکروویو در احیای کربوترمال کانسنگ های کم عیار آهن می تواند به عنوان یک گام جدید و موثر در فرآوری آن به حساب بیاید.[ ۳]

در بررسی فاز تبدیل شده و خاصیت مغناطیسی لیومنیت با میزان آهن ۴۰٪ توسط انرژی ماکروویو همراه با Lignin به عنوان احیا کننده مشاهده شد فاز هماتیت و گوتیت به مگنتیت با ۵۷٪ آهن احیا گردیده است.

فرآیند احیای آهن(۳۷٪) با ذغال چوب با کمک انرژی ماکروویو توسط Raypudi گزارش گردیده است[۴]. نتیجه این تحقیق نشان میدهد عیار آهن به ۶۱/۶ درصد رسیده است در تابش ماکروویو با ۷۲۰وات توان و میزان ۹٪ زغال چوب و مدت زمان ۸ دقیقه. خارج از مزایای بسیار مثبتی چون نرخ احیای بسیار سریع، تشکیل فاز مضر و بدون فایده ای چون فایالیت نیز بسیار اندک گزارش شده است.[۵] .

خارج از مطالعات صورت گرفته بر روی احیا، تاثیر ماکروویو بر روی قابلیت های خردایش کانی های آهن دار نیز مورد بررسی قرار گرفته است[۶-۷] .

از آنجایی که کانی های مختلف رفتار گرمایشی متفاوتی در برابر اثر ماکروویو دارند، لازم است میزان پاسخ به این طرح برای کانی هایی که ساختار مینرالوژی متفاوتی دارند و با درجه آزادی های مختلف به دقت بررسی شود.

رفتار ذغال سنگ به عنوان یک عامل احیا کننده در یک محیط تابش ماکروویو، از آنجایی که جاذب خوبی برای پرتوهای ماکروویو نیست، بسیار مورد بحث و بررسی و کانون توجه می باشد[۴-۵-۸].

در این تحقیق از دو سنگ معدن با ترکیبات مشابه آهن استفاده شده است اما خواص کانی شناسی آنها متفاوت می باشد. یکی از آنها دارای مقدار قابل توجهی گوتیت و لیمونیت می باشد، در حالی که دیگری تیتانو مگنتیت است.

برای این تحقیق از سنگ معدن های حاوی هماتیت استفاده نشده است، زیرا با دیگر فاز ها همراهی ندارد فازهایی چون گوتیت، کائولینیت و گیبسیت. این فازها با مقدار زیادی آب در ساختارشان محصور شده اند که نتیجه آن کاهش بسیار زیاد وزن در احتراق و حرارت است.(LOI بسیار بالا)

در تحقیق حاضر تمرکز بر روی مقایسه رفتار گرمایشی ماکروویو و احیایی تیتانو مگنتیت با گوتیت در حضور ذغال سنگ به عنوان احیاکننده می باشد.

آزمایش ها بر اساس تاکوچی طراحی شده است و مطالعات ساختاری توسط XRD انجام شده است تا تفاوت ها در پاسخ به همراه مکانیسم احیا بررسی شود.


www.SID.ir

## ۱-۳- مواد و روش ها

هر دو نمونه مربوط به تیتانومگنتیت و سنگ معدن آهن تا ابعاد زیر ۱۰ میلی متر خردایش گردیدند و جهت تهیه نمونه معرف ریفل شدند.

نتایج عیار سنجی مربوط به نمونه معرف در جدول ۱ آورده شده است. یک نمونه حاوی خاکستر زغال چوب با مشخصات کربن ۳۴/۵۷ ٪ ، مواد فرار ۲۹٪ ، خاکستر ۲۳ ٪ و رطوبت ۱۳/۳۴ می باشد.

سایز ذرات زغال تا زیر ۱ میلی متر در تمامی آزمایش ها خرد شده است. آنالیز دانه بندای سنگ معدن و زغال در جدول ۲ آورده شده است. در نمونه O1 دیده میشود با کاهش سایز میزان آهن کاهش یافته است در صورتی که در نمونه O2 تقریبا در تمامی دانه بندی ها عیار آهن برابر است.

**جدول ۱ : آنالیز شیمیایی دو نمونه مورد آزمایش**

| **Iron Ore** | Fe | Al2O3 | SiO2 | TiO2 | MgO | LOI |
|---|---|---|---|---|---|---|
| O1 | 49.6 | 6.1 | 7.2 | 13.1 | 1.1 | 1.5 |
| O2 | 49.1 | 10.2 | 7.3 | - | - | 12.3 |

**جدول ۲: آنالیز دانه بندی دو نمونه مورد آزمایش**

| **Iron Ore** | | | | | **Coal** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Size,µm | O1 | | O2 | | Size, µm | Wt, % | Ash % |
| | WT, (%) | Fe(T) | Wt(%) | Fe(T) | | | |
| -10000+5600 | 15.38 | 51.97 | 33.12 | 49.78 | -1000+500 | 54.38 | 21.45 |
| -5600+3350 | 14.85 | 51.99 | 23.2 | 49.26 | | | |
| -3350+2000 | 11.3 | 50.13 | 13.12 | 49.09 | -500+300 | 14.88 | 23.94 |
| -2000+1000 | 18.41 | 50.89 | 12.96 | 48.65 | | | |
| -1000+500 | 15.59 | 53.53 | 5.6 | 48.51 | -300+150 | 14.1 | 24.58 |
| -500+300 | 8.58 | 50.66 | 3.68 | 48.33 | | | |
| -300+150 | 8.16 | 42.62 | 3.52 | 47.95 | -150+100 | 4.44 | 25.1 |
| -150+100 | 2.3 | 38.92 | 1.12 | 46.99 | | | |
| -100 | 5.44 | 32.96 | 3.68 | 46.98 | -100 | 11.75 | 27.34 |
| BULK | 100 | 49.6 | 100 | 49.1 | Bulk | 100 | 23.12 |

## ۲-۳- احیای حرارتی بر اساس ماکروویو

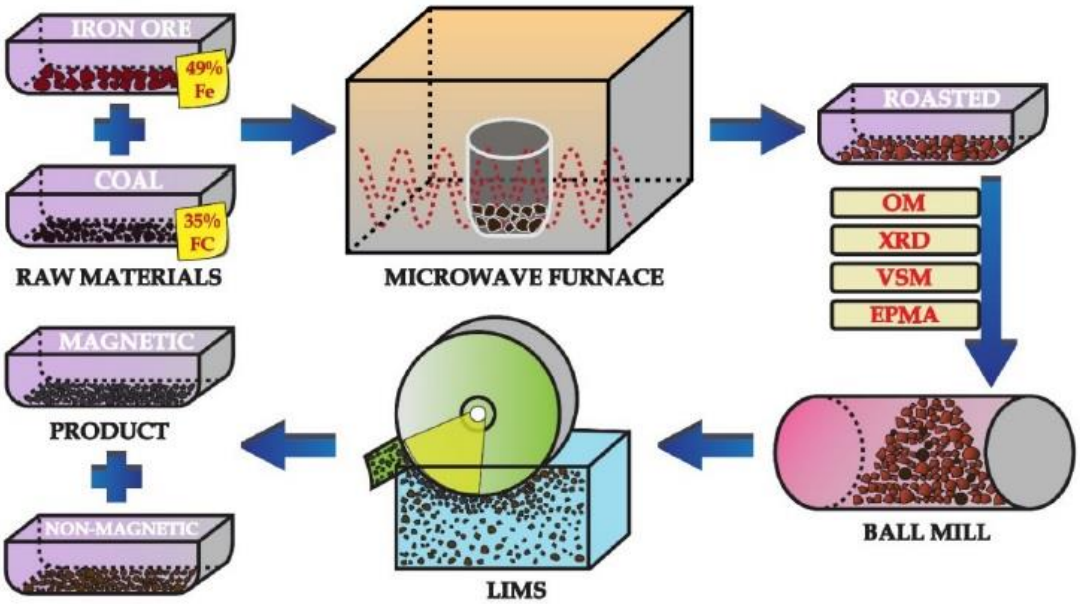
آزمایش های مربوط به احیای حرارتی در مقیاس آزمایشگاهی انجام گرفت. دما با تابش امواج الکترومغناطیس تا ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد قابل افزایش بود در این آزمایش. مقدار نمونه ترکیب شده با زغال میزان ۵۰۰ گرم در هر آزمایش بوده است که به مدت زمان مشخصی در معرض هوا در برابر تابش ماکروویو با توان خاص قرار داده شده است و پس از طی زمان مورد نظر با آب سریعا خنک گردیده تا از اکسیداسیون مجدد جلوگیری شود.

همزمان میزان ماده بدست آمده از تابش جهت بررسی توسط دستگاه های ارسال گردیده است.


www.SID.ir

## ۳-۳- جدایش مغناطیسی

جامد حرارت دیده و احیا شده به صورت جامد ۳۰٪ ریپالپ شده و با یک آسیای گلوله ای تا زیر ۷۵ میکرون خردایش گردید. محصول بدست آمده به یک مگنتیک سپراتور تر با شدت میدان ۱۵۰۰ گوس وارد شده و پس از جدایش فاز محصول و باطله به طور جداگانه خشک گردیده و به آزمایشگاه جهت بررسی عیار آهن و دیگر ناخالصی ارسال گردیده است. دیاگرام کلی عملیات در شکل ۱ آورده شده است.




**شکل ۱: فلودیاگرام فرآیندی آزمایش احیای ماکروویو و جدایش مغناطیسی**

## ۳-۴- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش با تاگوچی L16 ارتوگونال توسط نرم افزار minitab 14 انجام شده است. هدف پیدا کردن بالاترین عیار آهن و میزان راندمان با توجه به سطوح فاکتورهای تاثیر گذار می باشد. جزئیات مربوط به فاکتورها و سطح پاسخ آنها در جدول ذیل آورده شده است:

**جدول ۳ : سطوح و فاکتورهای استفاده شده در احیا**

| Factors | Level 1 | Level 2 | Level 3 | Level 4 |
|---|---|---|---|---|
| Power, kw | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Time, min | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Coal to Ore ratio | 0.05 | 0.1 | 0.15 | 0.2 |

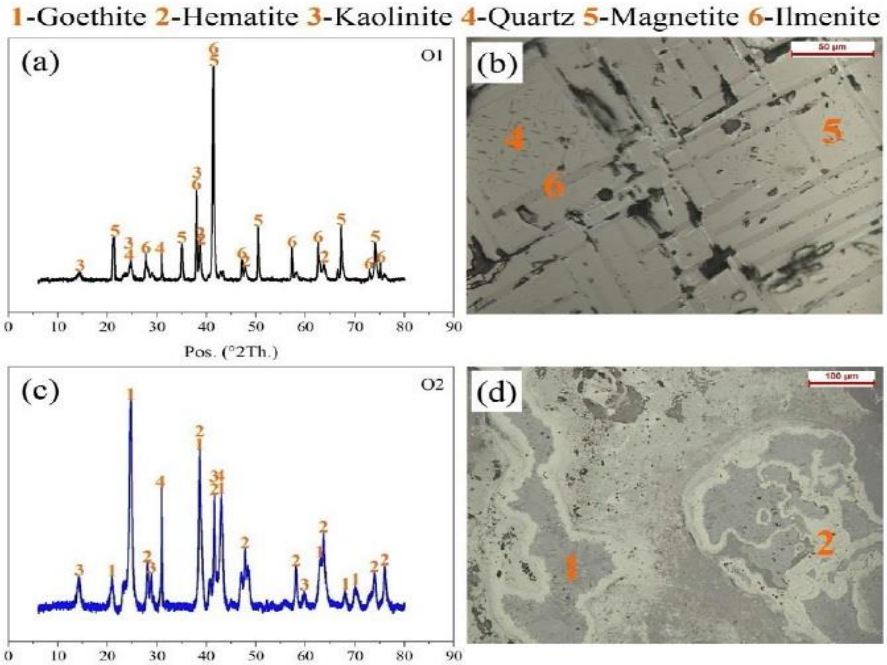
www.SID.ir

## ۴- بحث و بررسی

نمونه های O1 و O2 با دستگاه XRD مورد بررسی قرار گرفت تا فازهای موجود در هر کدام از نمونه ها به طور دقیق مشخص گردد. همانطور که در شکل 2a نشان داده شده است نمونه O1 دارای مگنتیت و ایلمنیت به عنوان کانی های اصلی می باشد. در شکل 2b به طور مشخص می توان دید که فاز مگنتیت هموژنز نیست و حاوی کانی سازی بسیار اندک ایلمینیت می باشد.

مگنتیت به عنوان فاز غالب از یک کانی اکسیدی به صورت دانه های بزرگ و بدون شکل منظم ایجاد شده است که با نور سفید خاکستری در زیر نور پلارایزد قابل تشخیص می باشد. همچنین قابل مشاهده است مگنتیت حاوی exsolution textur حاوی ایلمینیت های لایه است. یافتن مگنتیت خالص بدون هیچ کانی زایی دیگر در نمونه به ندرت دیده شد.

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش XRD ، مطابق با شکل 2C ، نمونه O2 یک کانی گوتیت را نشان میدهد که با هماتیت، کائولینیت و کوارتز درگیر می باشد. گوتیت به طور معمول در یک شرایط اکسیداسیون در محیط حامل آهن ایجاد می شود. در این نمونه حضور هماتیت در پیرامون گوتیت نشان از فرآیند دی هیدارسیون دارد که منجر به تشکیل آنها شده است.



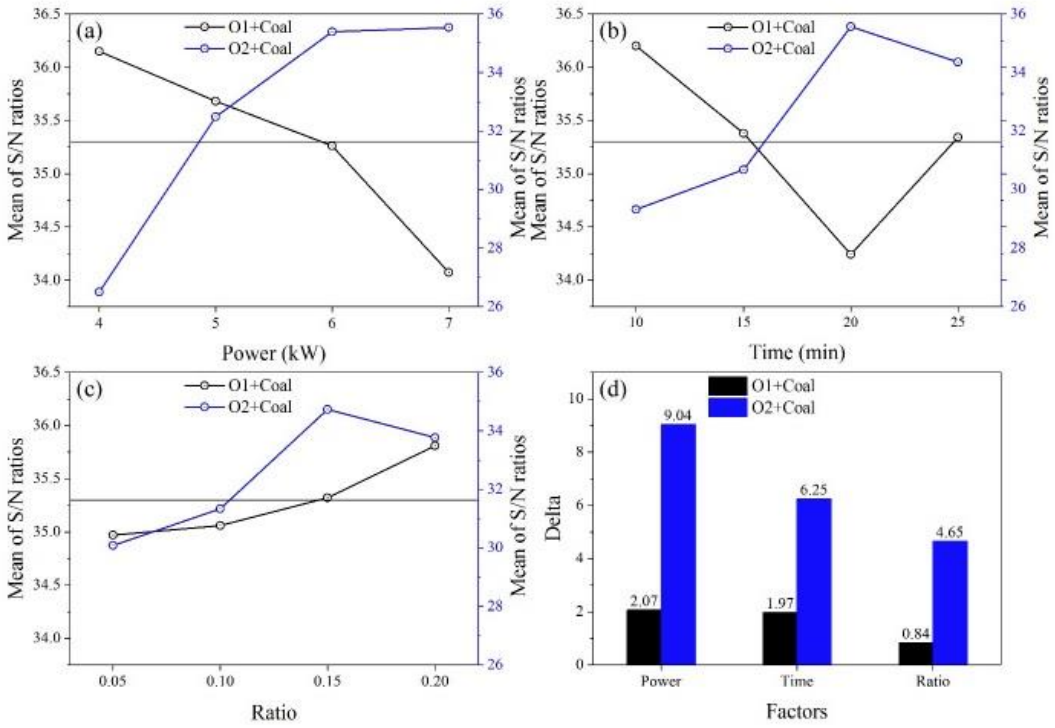

**شکل ۲: نمودار XRD و میکروگرافهای نوری کانی های خوراک O1 (a و b)و O2 (c و d)**

### ۴-۱- احیای مبتنی بر مایکروویو در نمونه های O1 و O2

هر جدایش مغناطیسی همراه با احیای گرمایی بر اساس طراحی آزمایش L16 انجام گرفت و نتایج آن بر اساس عیار و بازیابی در جدول ۴ آورده شده است. در مقام مقایسه بین عیار و بازیابی دو نمونه مورد بحث، نتایج نشان می دهد نمونه O1 بهتر از نمونه O2 عمل کرده است. از نتایج بدست آمده میتوان دید که نمونه O1 میتواند تا عیار آهن % 62.88 و بازیابی 62.19% برسد. در نمونه O2 عیار آهن به % 60.2 و بازیابی به 66.32% رسید.

لازم به ذکر است نمونه O2 به میزان توان بیشتری در از ماکروویو و زمان اقامت بالاتری نیاز داشت تا در آن به عیار 60.2% عیار آهن دست یافت.

www.SID.ir




**شکل ۳: نمودار تاثیر فاکتور ها در احیای ماکروویو نمونه O1 و O2 + Coal(نمودار a قدرت MW ، b زمان ، C نسبت coal/ore ، d مقادیر Delta)**

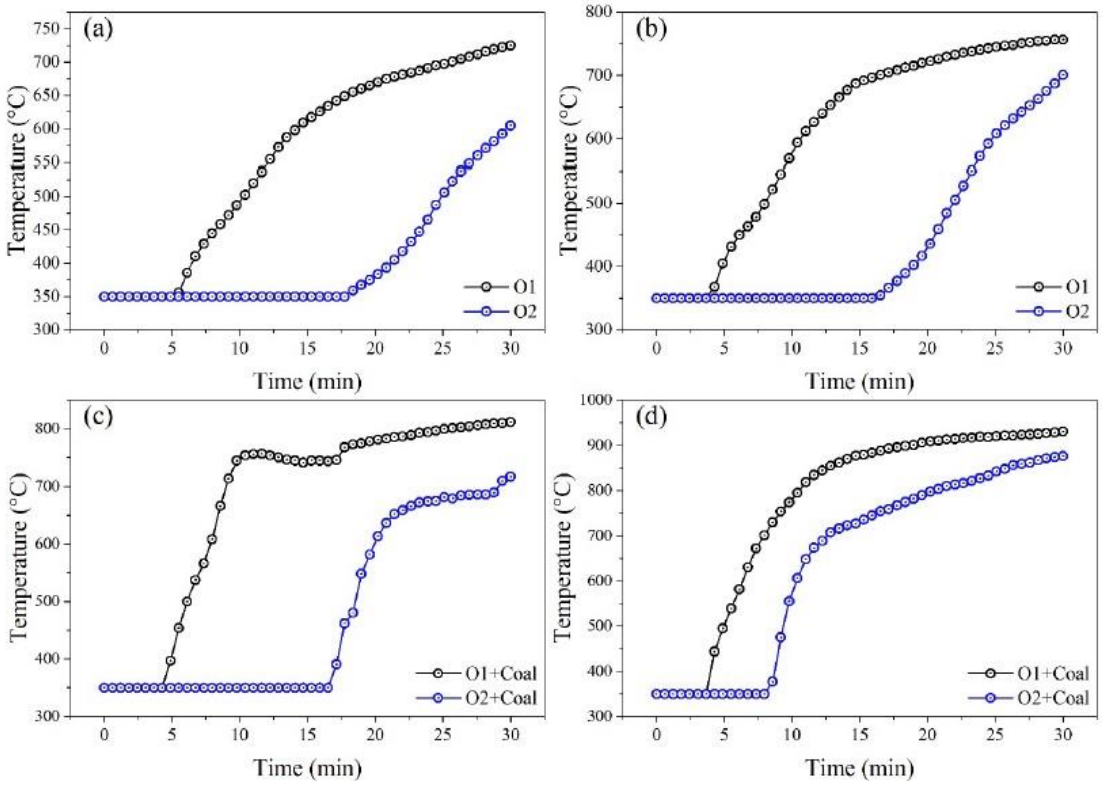
**جدول۴: پاسخ عیار آهن و بازیابی در طراحی آزمایش انجام شده**

| Exp. No. | Experimental Conditions | | | O1+Coal | | O2+coal | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Power, kw | Time, min | Coal to Ore ratio | Grade, % | Recovery, % | Grade, % | Recovery, % |
| 1 | 4 | 10 | 0.05 | 61.59 | 72.59 | 59.57 | 6.48 |
| 2 | 4 | 15 | 0.1 | 60.14 | 77.40 | 59.51 | 11.33 |
| 3 | 4 | 20 | 0.15 | 61.31 | 58.97 | 58.97 | 36.89 |
| 4 | 4 | 25 | 0.2 | 60.47 | 66.36 | 57.24 | 24.13 |
| 5 | 5 | 10 | 0.1 | 58.97 | 74.30 | 58.73 | 21.57 |
| 6 | 5 | 15 | 0.05 | 61.08 | 55.44 | 59.89 | 20.36 |
| 7 | 5 | 20 | 0.2 | 62.88 | 62.19 | 58.36 | 80.16 |
| 8 | 5 | 25 | 0.15 | 66.85 | 51.62 | 59.17 | 61.96 |
| 9 | 6 | 10 | 0.15 | 62.24 | 66.61 | 58.06 | 52.11 |
| 10 | 6 | 15 | 0.2 | 65.34 | 54.00 | 59.14 | 48.5 |
| 11 | 6 | 20 | 0.05 | 64.11 | 40.82 | 58.41 | 78.64 |
| 12 | 6 | 25 | 0.1 | 63.22 | 59.1 | 58.35 | 66.66 |
| 13 | 7 | 10 | 0.2 | 59.67 | 65.48 | 58.32 | 46.00 |
| 14 | 7 | 15 | 0.15 | 70.55 | 43.01 | 57.78 | 62.86 |
| 15 | 7 | 20 | 0.1 | 66.59 | 29.77 | 59.32 | 76.47 |
| 16 | 7 | 25 | 0.05 | 65.25 | 45.08 | 60.2 | 66.32 |

www.SID.ir

شکل ۳ نشان میدهد هر کدام از پارامترها چه تاثیری بر روی عیار و بازیابی هر دو نوع نمونه O1 و O2 دارند. مهمترین تاثیر همانطور که در نمودار delta نشان داده شده است توان ماکروویو و زمان در تماس قرار گرفتن مهمترین پارامترهای تاثیر گذار می باشد و نسبت نمونه به Coal کمترین تاثیر را دارد.همچنین از شکل ۳ کاملا مشخص است میانگین نسبت S/N برای برای نمونه O1 با افزایش توان از ۴ به ۷ کیلووات کاهش می یابد. برخلاف آن در نمونه O2 با افزایش توان این نسبت نیز افزایش می یابد. این تفاوت در پاسخ دهی می تواند به دلیل تفاوت در ساختار کانی شناسی و مینرالوژی این دو نمونه باشد. هرچند روند مشابهی در مورد زمان تماس (در معرض مایکروویو قرار گرفتن) ممکن است مشاهده شود، اما مقداری افزایش در میانگین نسبت S/N برای O1 در زمان ۲۵ دقیقه وجود خواهد داشت. میانگین نسبت S/N بدست آمده در نسبت های مختلف زغال به ماده معدنی برای نمونه O1 خیلی معنی دار نیست وقتی این فاکتور تاثیر کمی بر روی عیار و بازیابی آهن در مقایسه با زمان تابش ماکروویو دارد. هرچند افزایش میانگین S/N در بالاترین نسبت ماده معدنی به ذغال خصوصا در نسبت های 0.15 و 0.2 برای O2 نشان میدهد این نمونه به اندازه O1 در برابر تابش ماکروویو تاثیر پذیر نمی باشد. بنابراین رفتار گرمایی این دو نمونه برای بررسی بیشتر انجام شده است

## ۲-۴- مطالعه رفتار حرارتی دو نمونه با اضافه کردن ذغال در برابر تابش ماکروویو




**شکل ۴: رفتار حرارتی دو نمونه اولیه O1 و O2 در معرض تابش ماکروویو با توان ۵ و ۷ کیلووات(شکل a و b) و همچنین با اضافه کردن ذغال به آنها در همان توان تابش ماکروویو(شکل های C و d)**

دماهای نمونه های O1 و O2 در برابر زمان های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. نمونه O1 بسیار بهتر از نمونه O2 عمل کرده است. همچنین این نمونه در ترکیب با زغال نیز نتایج بهتری داشته است و توانسته به دمای بسیار بالاتری در مقایسه با حالت قبل(بدون زغال) دست یابد.

در بررسی مشخصات نمونه های گرمادیده عیار سنجی و راندمان جدایش مغناطیسی در یک میدان مغناطیسی شدت پایین انجام شده است و نتایج آن در جدول ۵ آورده شده است.

www.SID.ir

**جدول ۵: شرایط آزمایش جدایش مغناطیسی و نتایج مربوط به نمونه های O1 و O2**

| | شرایط آزمایش | | Grade % | Recovery % |
|---|---|---|---|---|
| | **Power, KW** | **Time, min** | | |
| **O1 + Coal** | 5 | 15 | 62.57 | 60.01 |
| | 7 | 25 | 67.9 | 44.34 |
| **O2 + Coal** | 5 | 15 | 59.02 | 16.86 |
| | 7 | 25 | 64.4 | 33.3 |

همانطور که نتایج نشان میدهد در نمونه O1 افزایش زمان تابش و توان تابش موجب افزایش عیار گردیده اما بازیابی را به شدت کاهش داده است. اما در نمونه O2 افزایش زمان و توان موجب افزایش عیار و بازیابی گردیده است. این موضوع به شرایط کانی شناسی و اختلافات مربوط به فازهای آنها بر میگردد.

نمودارهای مربوط به آنالیز XRD هر دو نمونه O1 و O2 در شکل ۵ نشان داده شده است. بخش مگنتیتی نمونه O1 که در شرایط ماکروویو با توان ۵ کیلووات و زمان ۱۵ دقیقه نسبت زغال به ماده معدنی ۰/۲ بوده است نشان میدهد مگنتیت به عنوان فاز اصلی به همراه مقداری وستیت و آهن فلزی وجود دارد.(شکل 5a) همچنین فاز غیر مگنتیتی نیز شامل ایلمنیت و کوارتز به همراه مقدار بسیار جزئی وستیت است.( شکل 5b)

بنابراین پیشبینی میشود در این نمونه هماتیت موجود از قبل بر اثر تابش ماکروویو به مگنتیت تبدیل شده و مگنتیت موجود از قبل نیز به وستیت و آهن فلزی تبدیل شده است. حضور آهن فلزی و وستیت در محصول نشان می دهد فرآیند احیا بیشتر از حد مورد انتظار جهت مگنتیت سازی فاز هماتیتی در نمونه O1 بوده است.

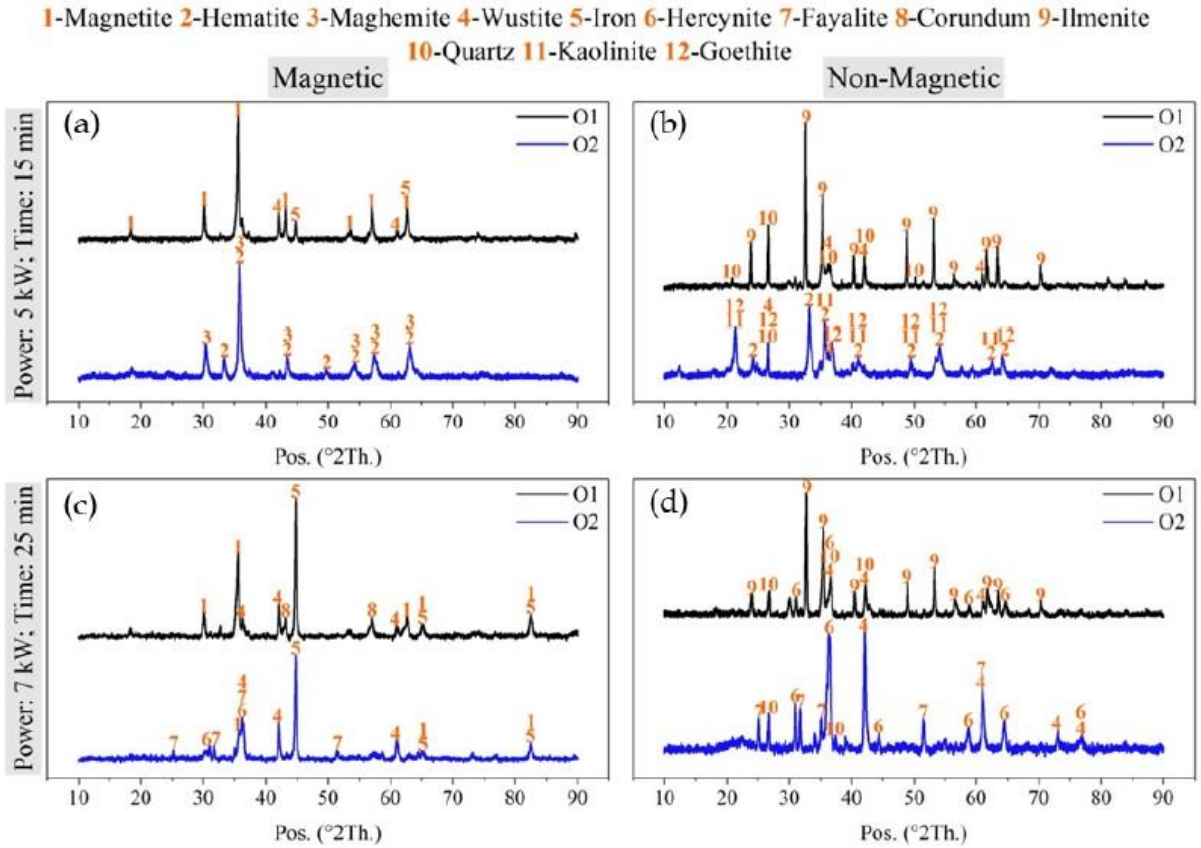
از طرفی دیگر بخش مگنتیتی حرارت دیده بدست آمده از نمونه O2 در شرایط یکسان با نمونه اول، از حضور هماتیت و مگهمیت در آن حکایت می کند( شکل 5a). لازم به ذکر است مگهمیت به عنوان فاز واسطه بین بین هماتیت و مگنتیت در تبدیل این دو به یکدیگر می باشد و حضور این فاز نشان میدهد شرایط تبدیل به طور کامل وجود نداشته است.

عیار پایین تر آهن در نمونه O2 بعد از جدایش مغناطیسی و همچنین بازیابی پایین آن نشان دهنده این عدم تبدیل کامل می باشد. همچنین حضور هماتیت، گوتیت و کائولینیت در بخش غیر مغناطیسی نشان میدهد شرایط برای حتی دی هیدارته شدن فاز هم مناسب نمی باشد.

در نمودارهای XRD مربوط به بخش مگنتیتی نمونه O1 حرارت دیده در شرایط توان ۷ کیووات و زمان ۲۵ دقیقه و نسبت ذغال به ماده معدنی ۰/۲ ( شکل 5c) آهن فلزی اصلی ترین فاز به همراه مگنتیت می باشد. بنابراین بازیابی ۴۴/۳۴ ٪ به همراه عیار ۶۷/۹ ٪ نیز حاصل شده است.

آنالیز XRD مربوط به محصول مگنتیکی حرارت دیده O2 در شرایط یکسان با نمونه قبلی از نظر تابش، نشان دهنده محتوای مگنتیت و آهن فلزی به همراه وستیت و فایالیت می باشد. در این نمونه محصول مگنتیکی با عیار ۶۴/۴ ٪ و بازیابی ۳۳/۳ ٪ بدست آمد که بیشتر از شرایط قبلی بوده است.


www.SID.ir




شکل ۵: نتایج آنالیز **XRD** کنسانتره و باطله بدست آمده از فرایند احیای حرارتی نمونه های **O1** و **O2** در دوشرایط **a** و **b** ( توان ۵ کیلووات و زمان ۱۵ دقیقه) و **c** و **d** ( توان ۷ کیلووات و زمان ۲۵ دقیقه)

## ۹- نتیجه‌گیری

پرعیار سازی دو نمونه کم عیار آهن با روش احیای حرارتی و جدایش مغناطیسی انجام شد.

بررسی های انجام شده نشان میدهد در این روش نتایج نهایی تا حد بسیار زیادی بستگی به مشخصات کانی شناسی نمونه دارد. همچنین:

الف: نمونه اول در شرایط تابش ماکروویو با توان ۵ کیلووات و نسبت ذغال به ماده معدنی ۰/۲ و زمان ۱۵ دقیقه به بازیابی حدود ۶۰ درصد رسید در صورتی که نمونه دوم در همین شرایط بازیابی کمتر از ۱۷ درصد داشت. این نتیجه نشان میدهد مشخصات کانی شناسی اصلی ترین نقش در این روش را بر عهده دارد.

ب: بررسی ها نشان میدهد مگنتیتی ساختن نمونه های حاوی گوتیت بسیار مشکل است به طوری که با صرف توان ۷ کیووات و زمان ۲۵ دقیقه نتیجه حاصله پایین تر از نمونه دیگر بود.

ج: احیای حرارتی و به دنبال آن جدایش مغناطیسی یکی از بهترین روش های پرعیار سازی آهن برای کانی های آزاد می باشد. از این رو از روش ماکروویو به عنوان یک روش پیشرو در این صنعت می توان به نحو بسیار موثری استفاده نمود.


www.SID.ir

## مراجع

1. Mamdouh Omran a,b,⇑, Timo Fabritius a, Ahmed M. Elmahdy b, Nagui A. Abdel-Khalek b, Mortada El-Aref c, Abd El-Hamid Elmanawi "Effect of microwave pre-treatment on the magnetic properties of iron ore and its implications on magnetic separation'

۲- سید محمد کلینی و بهزاد شهبازی " کاربرد ماکروویو در فرآوری مواد معدنی" انتشارات دانشگاه تفرش، چاپ اول ۱۳۹۶.

3. F. Wu, Z. Cao, S. Wang and H. Zhong, Novel and green metallurgical technique of comprehensive utilization of refractory limonite ores, *Journal of Cleaner Production*, 171 (2018) p. 831.

4. V. Rayapudi, S. Agrawal and N. Dhawan, Optimization of microwave carbothermal reduction for processing of banded hematite jasper ore, *Minerals Engineering.* 138 (2019) p. 204.

5. S.S. Rath, N. Dhawan, D.S. Rao, B. Das and B.K. Mishra, Beneficiation studies of a difficult to treat iron ore using conventional and microwave roasting, Powder Technology. 301 (2016) p. 1016.

6. P. Kumar, B.K. Sahoo, S. De, D.D. Kar, S. Chakraborty and B.C. Meikap, Iron ore grindability improvement by microwave pre-treatment, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16 (2010) p. 805.

7. J. Wang, T. Jiang, Y. Liu and X. Xue, Influence of microwave treatment on grinding and dissociation characteristics of vanadium titano-magnetite, *Int J Miner Metall Mater.*, 26 (2019) p. 160.

8.J.A. Menéndez, A. Arenillas, B. Fidalgo, Y. Fernández, L. Zubizarreta, E.G. Calvo and J.M. Bermúdez, Microwave heating process involving carbon materials, *Fuel Processing Technology* 91 (2010) p. 1.



www.SID.ir