

بررسی تأثیر تابش مایکروویو بر خواص مغناطیسی هماتیت معدن چاه چغوک

فاطمه جهانبخش^۱، سیده نسترن حسینی^۲، شادی تشکری^۳، اسد عبدی^۴، سلمان فرهادی^۵

هاجر زارعی^۶

^۱گروه تحقیق و توسعه، شرکت ایده بنیان راد، تهران، ایران
^۲آزمایشگاه نانو بیو فوتونیک، گروه میکروسیستم و فوتونیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
^۳گروه رادیولوژی، فیزیک پزشکی، مرکز پزشکی دانشگاه فرایبورگ، فرایبورگ، آلمان
^۴گروه تحقیق و توسعه، شرکت تحقیقاتی زمین ریزکاوان، تهران، ایران
^۵مدیرعامل شرکت دانش بنیان ایده گستر حدید
^۶دکتری فیزیک، پژوهشگر پسا دکتری دانشگاه امیرکبیر دانشکده فیزیک و انرژی

چکیده

گرمایش با مایکروویو به عنوان یک روش امیدوارکننده برای صرفه‌جویی انرژی و جایگزینی کارآمدتر برای پردازش حرارتی سنتی مواد معدنی شناخته می‌شود. در مطالعه‌ای، اثرات تشویه مایکروویو بر روی نمونه‌های سنگ آهن ایران بررسی شد. این تحقیق تأثیر زمان‌های مختلف قرارگرفتن در معرض مایکروویو بر خواص مغناطیسی سنگ معدن هماتیت قبل و بعد از پیش تشویه را ارزیابی می‌کند. نتایج نشان داد که زمان‌های طولانی‌تر قرارگرفتن در معرض تابش مایکروویو با توان ثابت، بازده تابش مایکروویو را افزایش می‌دهد. همچنین، جداسازی مغناطیسی سنگ آهن مورد تابش مایکروویو بهبود قابل‌توجهی در بازیابی آهن داشت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تشعشعات مایکروویو تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مغناطیسی هماتیت دارد و با ایجاد فازهای مغناطیسی جدید مانند مگنتیت/مگهمایت، جداسازی آن‌ها از کانی‌های غیرمغناطیسی را تسهیل کرده است. در این پژوهش نشان داده شد که میزان FeO از ۵ درصد در خوراک به ۲۱ درصد پس از تابش می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: مایکروویو، جداسازی مغناطیسی، سنگ معدن هماتیت، مگنتیت، مگهمایت.

۱- مقدمه

تولید آهن و فولاد نقش حیاتی در اقتصاد کشورها دارد و ذخایر سنگ آهن پایه‌گذار این صنعت هستند. تقاضا برای سنگ آهن با تولید فولاد همخوانی دارد، اما افزایش مصرف فولاد نگرانی‌هایی را به دلیل تخلیه سریع ذخایر با عیار بالا ایجاد کرده است. در ایران بیش از ۲۰۰ ذخیره آهن با حدود ۴ میلیارد تن سنگ آهن وجود دارد، اما این صنعت با چالش کاهش ذخایر با کیفیت بالا مواجه است. به دلیل وابستگی عملیات کوره بلند به سنگ‌های با عیار متوسط (۶۴ تا ۶۵ درصد آهن)، توجه به مدیریت کانه‌های با عیار پایین ضروری است که استانداردهای تولید آهن را برآورده نمی‌کنند. برای غلبه بر این چالش، نیاز به تکنیک‌های فراوری مختلف برای افزایش محتوای آهن در سنگ‌های ریزدانه وجود دارد. مطالعه ما بر بهبود کیفیت سنگ معدن آهن هماتیت با عیار پایین، یک ماده خام کلیدی برای تولید فولاد، تمرکز دارد. برای این منظور، فرایندهای فیزیکی یا ترموشیمیایی متعددی می‌توان به کار گرفت که هدف نهایی این پژوهش، تغلیظ مواد معدنی آهن و حذف ناخالصی‌ها به منظور تولید سنگ آهن با عیار بالاتر است. تشویه می‌تواند خواص مغناطیسی مواد معدنی اکسید آهن را بهبود بخشد. صنعت استخراج سنگ آهن به‌طور فزاینده‌ای از تشویه مغناطیسی به کمک مایکروویو بهره‌مند می‌شود و این تکنیک تحول چشمگیری ایجاد کرده است. این روش از خواص مایکروویو استفاده کرده و مزایای قابل توجهی نسبت به روش‌های سنتی دارد [۱].

۲- ادبیات تحقیق

موفقیت در فرایند مایکروویو به تعامل مواد با امواج مایکروویو وابسته است که به خواص دی‌الکتریک (ϵ) و مغناطیسی (μ) مواد مربوط است و گرما را در سطح اتمی تولید می‌کند. نفوذپذیری الکتریکی شامل ثابت دی‌الکتریک (ϵ')، که انرژی ذخیره‌شده را نشان می‌دهد، و ضریب تلفات دی‌الکتریک (ϵ'')، که ظرفیت ماده برای تبدیل انرژی مایکروویو به گرما را مشخص می‌کند، است [۲]. ضریب تلفات دی‌الکتریک پارامتر اصلی موثر بر تولید گرما در تابش امواج مایکروویو برای مواد غیرمغناطیسی است. در مواد مغناطیسی، نفوذپذیری نیز تاثیرگذار است و بخش موهومی آن در تولید گرما نقش دارد. معادله ۱-۱ برآوردی از توان جذب شده در ماده را ارائه می‌دهد [۳]، [۴].

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E_{rms}^2 + 2\pi f \mu_0 \mu'' H_{rms}^2 \quad 1-1$$

این معادله رابطه‌ای مستقیم بین توان جذب شده توسط یک ماده (P) در طول تابش امواج مایکروویو و ضریب‌های گذردهی (ϵ'') و نفوذپذیری آن (μ'') را نشان می‌دهد. در این معادله، f نشان‌دهنده فرکانس توان ورودی و E_{rms} و H_{rms} به ترتیب میدان الکتریکی و مغناطیسی هستند. همچنین، ϵ_0 و μ_0 به گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی محیط خلاء اشاره می‌کنند. این معادله اهمیت خواص دی‌الکتریک و مغناطیسی یک ماده را در تبدیل انرژی مایکروویو به گرما به تصویر می‌کشد. هنگام تعامل امواج مایکروویو با مواد مغناطیسی مانند آهن، فرایند تولید گرما پیچیده است و شامل حرکت الکترون‌های آزاد و تأثیر میدان مغناطیسی بر چرخش الکترون‌ها و ساختار داخلی ماده می‌باشد. تابش مایکروویو می‌تواند منجر به تغییر در ترکیب و رفتار مغناطیسی هماتیت شود. برخلاف روش‌های دیگر تشویه که گرما از سطح به حجم نمونه منتقل می‌شود، انرژی مایکروویو به طور یکنواخت درون ماده جذب می‌شود و حرارت یکنواختی ایجاد می‌کند که به تغییرات ساختاری و مغناطیسی مشاهده شده در هماتیت منجر می‌شود.

مطالعات مختلفی در حیطه تأثیر تشعشعات مایکروویو بر هماتیت مورد توجه و بررسی فراوان قرار گرفته است. در مطالعه‌ای توسط کانگینا^۱، پودر هماتیت به مدت ۱۰ دقیقه در هوای مرطوب تحت تابش مایکروویو ۸۰۰ W با فرکانس ۲.۴۵ GHz قرار گرفت و کاهش ۴۰ درصدی در فرم کریستالی هماتیت مشاهده شد. با وجود این کاهش، تعداد اجزای کریستالی به دلیل ظهور یک فاز پارامغناطیسی جدید به نام مگهمایت افزایش یافت. در پژوهشی دیگر، ویناواچاو^۲ و همکارانش نمونه‌های هماتیت را با امواج مایکروویو ۵۰۰ W تا ۱۳۰۰ W در ۲۵ MHz و به مدت ۲ دقیقه در دمای ۱۰۵۰°C قرار دادند که منجر به تبدیل هماتیت با

¹ O. N. Kanygina² Wentao Zhou

خاصیت مغناطیسی ضعیف به مگنتیت/مگهمایت با خاصیت مغناطیسی بیشتر شد و کنسانتره آهن با عیار ۵۸,۷۲٪ و بازیابی ۸۹,۳۲٪ به دست آمد. همچنین، مغناطش اشباع از $0.33 \text{ A} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$ در سنگ معدن خام به $2.52 \text{ A} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$ در محصولات تشویه شده افزایش یافت. کیاراکاردنیا^۳ و همکارانش گرمایش مایکروویو از ۰ تا 22 Kw در 2.45 MHz را به عنوان روشی مؤثر برای تبدیل هماتیت و گوتیت به مگنتیت و آهن معرفی کردند. آن‌ها همچنین فرایند تشویه کربوترمیک را با بهینه‌سازی تأثیر مایکروویو، زمان تابش و منبع کربن مطالعه کردند که به احیای موفقیت‌آمیز اکسیدهای Fe^{3+} به Fe^{2+} و Fe منجر شد و سینتر حاوی ۷۹٪ آهن فلزی و فازهای کریستالی مانند FeO ، Fe_3O_4 و FeAl_2O_4 را به وجود آورد.

از نظر کاربردهای صنعت فولاد، سنگ‌های آهن را می‌توان بر اساس خواص مغناطیسی به دو گروه سنگ‌های مغناطیسی قوی و ضعیف (کانسنگ‌های آهن اکسید شده) تقسیم کرد. از میان کانی‌های سنگ آهن، مگنتیت (حاوی ۷۲,۴٪ آهن) به دسته قوی مغناطیسی و هماتیت (حاوی ۷۰٪ آهن)، مارتیت (حاوی ۷۰٪ آهن)، اسپکولاریت (حاوی ۷۰٪ آهن)، لیمونیت (حاوی ۵۷,۱۴٪ آهن) و سیدریت (حاوی ۴۸,۲٪ آهن) به رده مغناطیس ضعیف تعلق دارد [۵]. جدول ۱ پذیرفتاری مغناطیسی را برای کانی‌های اصلی سنگ آهن نشان می‌دهد.

جدول شماره ۱. پذیرفتاری مغناطیسی و فرمول شیمیایی کانی‌های اصلی سنگ آهن

نام کانی	پذیرفتاری مغناطیسی ($10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$)	فرمول شیمیایی
مگنتیت ^۴	625-1156	Fe_3O_4
مارتیت ^۵	6.2-13.5	Fe_2O_3
هماتیت ^۶	0.6-2.16	Fe_2O_3
اسپکولاریت ^۷	3.7	Fe_2O_3
لیمونیت ^۸	0.31-1.0	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

مگنتیت به دلیل خواص مغناطیسی بالا، برای جداسازی مغناطیسی گزینه‌ای ایده‌آل است. اما سنگ معدن آهن اکسید شده مانند آهن، به دلیل حساسیت مغناطیسی کم، تنها حدود ۱٪ از خواص مگنتیت را دارد [۶]. این موضوع باعث می‌شود بازیابی این سنگ‌ها که عیار پایینی دارند، پیچیده‌تر شود و به فرایندهای اولیه غنی‌سازی قبل از استفاده در صنعت آهن و فولاد نیاز داشته باشد؛ بنابراین، انتخاب یک تکنیک بهره‌وری بالا با توجه به ترکیب معدنی و ویژگی‌های فیزیکی سنگ آهن برای جداسازی مؤثر بسیار مهم است. سنگ معدن آهن اکسیدهای ضعیف مغناطیسی را می‌توان با استفاده از تشویه مغناطیسی بهبود بخشید. این روش با تبدیل شیمیایی به کمک گرما، اکسیدها را به مگنتیت پارامغناطیسی تبدیل می‌کند که جداسازی آن‌ها از مواد ناخواسته را آسان‌تر می‌کند [۷، ۸].

هدف این پروژه، تغییر فاز کانی هماتیت از فاز غیرمغناطیسی به فاز مغناطیسی است. یکی از چالش‌های پرعیارسازی سنگ هماتیت، پارامغناطیسی بودن آن است. با استفاده از روش‌های مختلف تشویه، می‌توان سنگ آهن غیرمغناطیسی را به سنگ

³ Chiara Cardenia

⁴ Magnetite

⁵ Martite

⁶ Hematite

⁷ Specularite

⁸ Limonite

آهن مغناطیسی تبدیل کرد تا بتوان در مراحل بعدی فراوری با جداسازی مغناطیسی در شدت‌های مغناطیسی پایین‌تر و به‌صرفه‌تر آن را پرعیار کرد. در این میان، استفاده از مایکروویو در سال‌های اخیر به علت مزایای بسیاری که دارد به عنوان روشی بهینه مورد توجه و استفاده فراوان قرار گرفته است [۶]، [۹]، [۱۰]، [۱۱].

در آزمایش‌هایی که کینگمن^۹ و همکارانش بر نمونه‌های ۵ گرمی سنگ‌های سولفیدی و اکسیدی شامل هماتیت با دانه‌بندی حدود $250\text{ }\mu\text{m}$ در فرکانس 2.45 GHz در توان‌های 3000 W ، 1500 W ، 650 W بدون استفاده از عوامل احیاکننده در مدت زمان‌های مختلفی تا دمای حدود 900°C انجام داده‌اند، تغییرات قابل توجهی در هماتیت در واکنش به تابش مایکروویو و تغییر خاصیت مغناطیسی گزارش شده است [۱۶]. بارانی^{۱۰} و همکارانش در سال ۲۰۱۱ اثر تشویه مایکروویو بر سنگ معدنی شامل ۶۴٪ مگنتیت، ۳۴٪ هماتیت و ۱٪ کوارتز را مطالعه کردند. نتایج نشان‌دهنده تأثیر زمان تابش امواج بر خواص مغناطیسی، افزایش خاصیت مغناطیسی و تبدیل هماتیت با خاصیت مغناطیسی ضعیف به مگهمایت پارامغناطیسی بوده است. عمران^{۱۱} و همکارانش در سال ۲۰۱۴ نشان دادند که تشعشعات مایکروویو از طریق تشکیل فازهای مغناطیسی جدید که جداسازی آن‌ها از کانی‌های غیرمغناطیسی را تسهیل می‌کند، تأثیر قابل توجهی بر خواص مغناطیسی هماتیت دارد و در نتیجه بازیابی بالایی به دست می‌آید [۴]. جداسازی مغناطیسی سنگ آهن پیش‌فراوری شده و پیش‌فراوری نشده با مایکروویو نشان داد که بازیابی آهن از ۵۴،۳۹٪ در نمونه پیش‌فراوری نشده به ۹۵،۹۷٪ در نمونه پیش‌فراوری شده با مایکروویو افزایش یافته است. راث^{۱۲} و همکارانش در سال ۲۰۱۶ با مقایسه تشویه مایکروویو با تشویه سنتی، به پتانسیل فوق‌العاده مایکروویو در تولید یک محصول تشویه شده با بازیابی بالای آهن در یک دوره زمانی کوتاه‌تر همراه با تشکیل کمتر فرآورده‌های ناخواسته مانند فایالیت^{۱۳} در مقایسه با تشویه سنتی رسیدند [۳].

همان‌طور که بیان شد، هدف این تحقیق بررسی تأثیر گرمایش مایکروویو بر تغییر فاز مغناطیسی سنگ معدنی بوده است که با آزمایش نمونه‌های مختلف تغییر فاز مغناطیسی بهینه سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از آزمون‌های شیمی‌تر و میکروسکوپی، تغییر به فاز مغناطیسی در اثر تابش مایکروویو مشاهده و میزان بازیابی آهن به دست آمد.

۳- مواد و روش‌ها

نمونه‌های مورد آزمایش از معدن چاه چغوک شرکت حدید گستر سیرجان تهیه شده است. نمونه خاک رسیده از معدن ابتدا مورد مطالعه قرار گرفته و مطالعات میکروسکوپی با هدف فراوری، بیانگر بهترین درجه آزادی در دانه‌بندی $d_{80}=250\text{ }\mu\text{m}$ است. عیار خاک دریافتی برای آهن Fe_t و FeO به ترتیب برابر ۳ و ۲۲ درصد بوده است. همچنین، این مطالعات بیانگر این است که کانه اقتصادی هماتیت-گوتیت با کانی‌های کوارتز، مسکویت^{۱۴}، بیوتیت^{۱۵} و کلریت^{۱۶} به عنوان بخش باطله درگیر هستند.

از جمله عوامل مؤثر بر آزمایش‌ها، اندازه ذرات مواد، ارتفاع پودر ریخته شده در بوته و زمان تابش مایکروویو است. با تعریف این عوامل به عنوان متغیر، جهت دستیابی به بهترین زمان تابش، در راستای یافتن بهینه‌ترین دانه‌بندی ذرات و درجه آزادی جهت افزایش عیار نمونه، آزمایش‌ها طراحی و هر کدام جداگانه بررسی شدند. در این آزمایش‌ها، ابتدا نمونه هدف با اندازه ذرات مطلوب دانه‌بندی $d_{80}=250\text{ }\mu\text{m}$ تعیین و سپس، در حجم‌ها و ارتفاع‌های مختلف داخل بوته آلومینا ریخته شده و درون محفظه مایکروویو در زمان‌های مختلف بین ۴ تا ۶ دقیقه تحت تابش قرار گرفت.

⁹ Kingman

¹⁰ Barani

¹¹ Emran

¹² Rath

¹³ Fayalite ($\text{Fe}^{+2}\text{SiO}_4$)

¹⁴ Muscovite

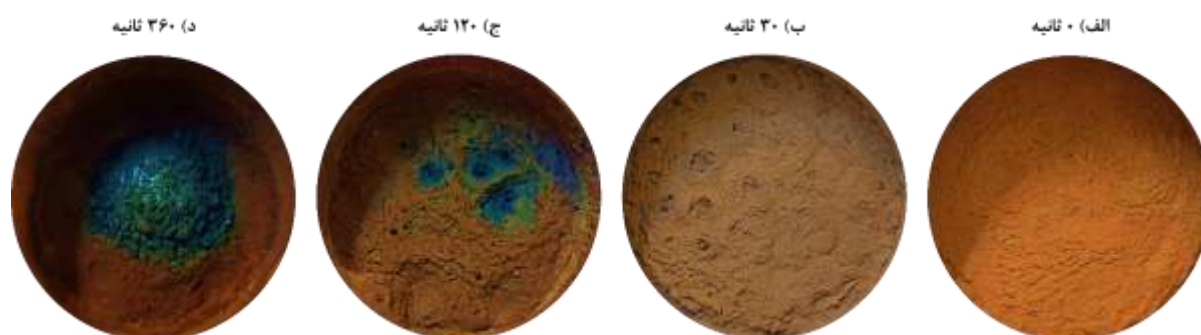
¹⁵ Biotite

¹⁶ Chlorite

از دیگر عواملی که تأثیر آن بر میزان بازیابی بررسی شد، جدایش مغناطیسی پیش از تابش میکروویو بود. بدین منظور قبل از شروع فرایند آزمایش، نمونه‌ها به گروه‌های هم‌وزن در بازه ۱۰۰ تا ۲۰۰ گرم قسمت‌بندی شدند. سپس دو گروه رندوم انتخاب کرده، یکی را به عنوان نمونه مرجع دست‌نخورده نگه داشته و دیگری را توسط آهنربا ۱۰۰۰ گوسی به دو گروه دارای خواص مغناطیسی و غیرمغناطیسی قسمت کردیم.

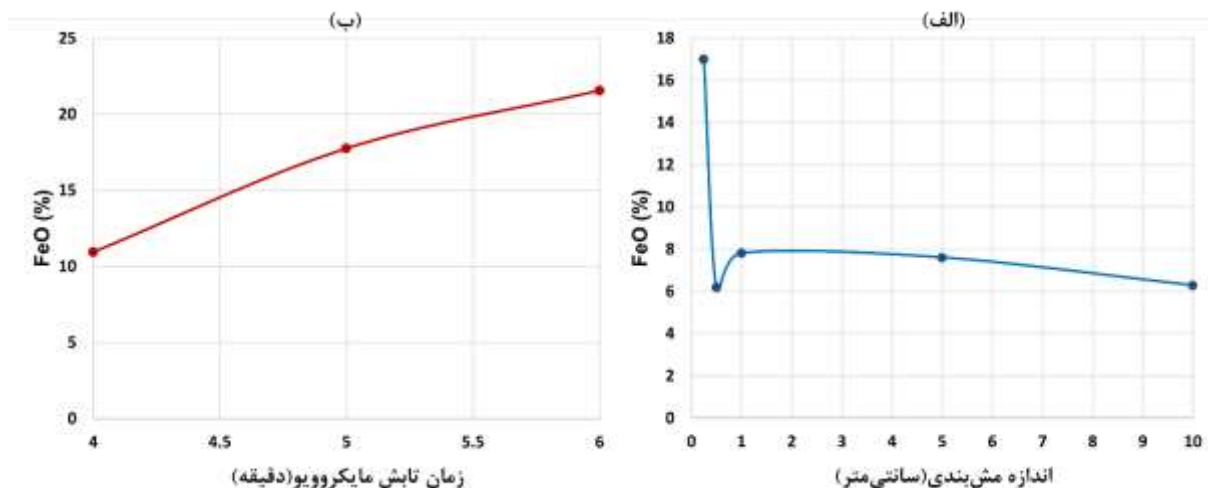
۴- نتایج

پس از اعمال تابش میکروویو به نمونه‌ها، تغییرات چشمگیری در شکل و رنگ آن‌ها به وضوح قابل مشاهده بود. این تغییرات از نظر بصری کاملاً محسوس بودند و به نظر می‌رسید که تحت تأثیر زمان‌های مختلف تابش میکروویو میزان تغییرهای متفاوتی در رنگ داشتند. در شکل ۱، نمونه‌ها قبل و بعد از تابش میکروویو در زمان‌های مختلف نمایش داده شده‌اند. این مقایسه به ما امکان می‌دهد تا تأثیرات دما و شدت تابش میکروویو بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها را بررسی کنیم.



شکل شماره ۱. نمونه تحت تابش میکروویو در ازای زمان‌های (الف) ۰ ثانیه، (ب) ۳۰ ثانیه، (ج) ۱۲۰ ثانیه و (د) ۳۶۰ ثانیه

جهت مقایسه بهتر نتایج بازیابی آهن، نتایج بر اساس فاز مغناطیسی محصول تشویه شده در دو دسته مغناطیسی و غیرمغناطیسی قرار گرفته‌اند تا مقایسه و تأثیر شرایط به‌درستی بررسی شود. (لازم به ذکر است در این پژوهش منظور از اصطلاح غیرمغناطیسی، نمونه‌ای است که با آهنربا ۱۰۰۰ گوس تحت فرایند جداسازی قرار نگرفته است و در واقع، به معنای غیرمغناطیسی بودن کامل نمونه نیست.) همان‌طور که انتظار می‌رود، بالاترین درصد بازیابی آهن از فاز مغناطیسی حاصل نمونه‌ای است که تشویه شده باشد و فازهای غیرمغناطیسی تشویه شده، بازیابی پایین‌تری داشتند. در نمودار شکل ۲ میزان بازیابی آهن مغناطیسی FeO در زمان‌های مختلف، برای خوراک با انواع شرایط (با جداسازی به دو قسمت جداگانه، یکی حاوی فاز مغناطیسی و دیگری حاوی فاز غیرمغناطیسی و قسمت سوم متعلق به نمونه بدون جداسازی) آورده شده است. در شکل ۲ تأثیر زمان تابش بر میزان بازیابی مشخص شده است. بیشترین بازیابی ممکن مربوط به خوراک مغناطیسی تغذیه شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، می‌توان گفت که با افزایش زمان تابش میکروویو افزایش درصد FeO و به دنبال آن افزایش خاصیت مغناطیسی نمونه اتفاق می‌افتد. بیشترین بازیابی آهن مغناطیسی به میزان ۲۱٫۵۶٪، با آهن FeO ۵٫۸۳٪ و Fe_2O_3 ۳۴٫۷۴٪، مربوط به نمونه‌ای است که به مدت ۶ دقیقه تحت تابش میکروویو با فرکانس ۲٫۴۵ گیگاهرتز بوده است. از طرف دیگر، در بررسی تأثیر جداسازی مغناطیسی پیش از تابش، با توجه به مقدار آهن بازیابی شده در وزن‌های مختلف نمونه‌ها، در مجموع این نتیجه حاصل شد که به طور چشمگیری بر میزان بازیابی آهن مغناطیسی تأثیرگذار نبوده است.



شکل شماره ۲. درصد آهن مغناطیسی FeO بازیابی شده مربوط به محصولات تشویه شده مغناطیس

به منظور تعیین ماندگاری خاصیت مغناطیسی ایجاد شده در نمونه‌های تحت تابش امواج مایکروویو با گذر زمان، از تست‌های دیویس و مغناطیس‌سنج لرزشی کمک گرفته شد. در مورد تست دیویس، پس از گذشت ۲۴ ساعت از انجام آزمایشات، برخی نمونه‌ها مجدد با استفاده از آزمایش‌های دیویس مورد بررسی قرار گرفته و عیار آهن آن‌ها مشخص شد که در جدول ۲ قابل مشاهده است. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده، میزان درصد آهن برای کنسانتره از هماتیت در حدود ۶۰٪ و بالاتر خواهد بود.

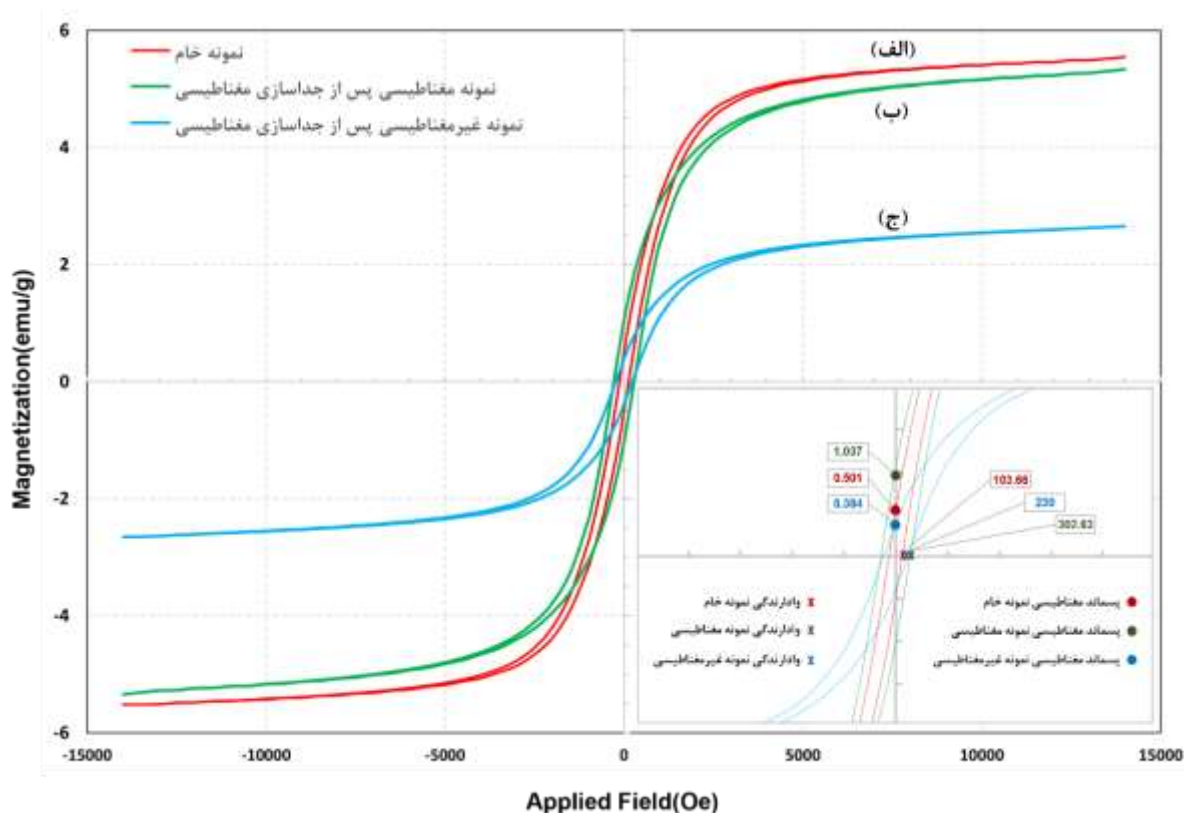
جدول شماره ۲. نتایج آزمایش دیویس

شماره نمونه	غلظت Fe (%)	غلظت FeO (%)	بازیابی (%)	کنسانتره Fe (%)
۱	۳۸,۶۵	۱۵,۵۵	۳۲,۹	۵۹,۱۵
۲	۳۰,۰۸	۶,۰۲	۹,۷۸	۶۴,۴۵

در تست مغناطیس‌سنج لرزشی^{۱۷} از گراف‌های هیستریزیس برای بررسی خواص مغناطیسی مواد به‌ویژه رفتار مغناطش آن‌ها در پاسخ به میدان مغناطیسی استفاده می‌شود. این گراف‌ها معمولاً به‌صورت یک لوپ تشکیل می‌شود که رفتار مغناطش نمونه را در پاسخ به میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. لوپ به بخش‌هایی تقسیم می‌شود که بر اساس جهت میدان مغناطیسی و رفتار مغناطش نتیجه‌گیری می‌شود. منحنی اولیه نشان‌دهنده مغناطش با افزایش میدان است، در حالی که منحنی بعدی مغناطش را با کاهش میدان نشان می‌دهد. در این گراف محور X وادارندگی میدان مغناطیسی و محور Y پسماند مغناطیسی ماده را نمایش می‌دهد. در هر دو گراف، پس از یک نقطه خاص (نزدیک به $+5000$ یا -5000 در محور افقی)، ماندگاری مغناطیسی به حداکثر می‌رسد و با افزایش میدان مغناطیسی بیشتر افزایش نمی‌یابد که این نقاط به ناحیه اشباع معروف هستند. نقاطی که منحنی‌های مغناطش هر نمونه با محورهای X و Y تلاقی دارد به ترتیب بیانگر پارامترهای وادارندگی و پسماند مغناطیسی است. جهت مقایسه مقدار وادارندگی منحنی‌ها نقاط تلاقی هر منحنی با محور X را مشخص می‌کنیم که این مقادیر برای نمونه خام و نمونه‌های شامل قسمت‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی پس از جداسازی مغناطیسی بعد از تابش مایکروویو به ترتیب ۳۰۲,۶۳، ۲۳۰ و ۱۰۳,۶۶ می‌باشد. انتظاری که قبل از بررسی این پارامتر داشتیم این بود که پس از تابش امواج مایکروویو به نمونه، میزان وادارندگی نمونه افزایش یابد که این امر محقق گردیده است. در هر سه گراف موجود در شکل ۱

¹⁷ Vibrating Sample Magnetometer

پس از اینکه میدان مغناطیسی به صفر می‌رسد، مقداری از پسماند مغناطیسی باقی می‌ماند. این مقدار در گراف (ب) که مختص به بخش مغناطیسی نمونه پس از جداسازی است، بیشتر است (۳۰۲,۶۳) که نشان‌دهنده خاصیت مغناطیسی قوی‌تر در نمونه است و در گراف (ج) مقدار پسماند کمتر است (۲۳۰) که دال بر خاصیت مغناطیسی ضعیف‌تر آن است. گراف (الف) که نماینده مغناطش نمونه خام است قبل از تابش مایکروویو دارای خواص مغناطیسی کمتری است و پس از تابش مایکروویو خاصیت مغناطیسی افزایش یافته، که بخش مغناطیسی آن توسط آهنربا ۱۱۰۰ گوسی جدا شده و بخش غیرمغناطیسی نمونه باقی می‌ماند. بنابراین طبیعی است که قسمت باقی مانده پس از فرایند جداسازی دارای خاصیت مغناطیسی و مقدار مغناطش کمتری از بخش مغناطیسی باشد. با توجه به این تحلیل، می‌توان گفت که تابش مایکروویو با توان ۱ کیلووات طی مدت زمان ۵ دقیقه باعث افزایش خاصیت مغناطیسی نمونه گردیده است. همچنین تقاطع گراف‌های هیستریزس با محور Y که نمایانگر پسماند مغناطیسی است برای نمونه خام، نمونه مختص قسمت مغناطیسی و غیرمغناطیسی به ترتیب ۰,۵۰۱، ۱,۰۳۷ و ۰,۳۸۴ است.



شکل شماره ۳. نمودارهای هیستریزس حاصل از مغناطیس‌سنج لرزشی برای نمونه خام، قسمت مغناطیسی و غیرمغناطیسی نمونه پس از جداسازی با مگنت.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها، به‌وضوح می‌توان گفت که تابش مایکروویو موجب افزایش خاصیت مغناطیسی در حجم قابل‌توجهی از نمونه‌ها شده است. این یافته می‌تواند مقدمه‌ای بر تحولی در عرصه معادن کشور باشد و ارزش معادن هماتیت را بیش‌ازپیش افزایش دهد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود برای کنسانتره‌سازی هماتیت، از خط کنسانتره‌سازی مگنتیت استفاده شود؛ این موضوع می‌تواند به حجم عظیمی از بهره‌وری و سود برای کارخانه‌های کنسانتره و معادن هماتیتی

منجر گردد. به علاوه، ارزش افزوده حاصل از این فرایند به تقویت ارزش معادن هماتیت و پیشگیری از خام فروشی مواد معدنی کمک خواهد کرد. با در نظر گرفتن حالت بهینه به دست آمده از آزمایش‌ها، دستیابی به عیار آهن حدود ۶۰٪ و افزایش چشمگیر خاصیت مغناطیسی از مزایای این طرح به شمار می‌آید. این موضوع نهایتاً بر پیاده‌سازی فرایند جداسازی مؤثر مغناطیسی با مگنت‌های ضعیف در مراحل بعدی فراوری محصول تأثیر مثبت خواهد داشت.

نتایج آزمایش‌ها حاکی از این است که تابش مایکروویو توانسته کانه هماتیت با ماهیت مغناطیسی ضعیف را به مگنتیت با ماهیت مغناطیسی قوی تبدیل کند. همچنین، این نتایج نشان‌دهنده تأثیر اندازه ذرات بر گرمایش مایکروویو است؛ به طوری که برای به دست آوردن بیشترین درجه آزادی در تشویه مواد آسیاب‌شده، اندازه بهینه ذرات کمتر از ۲۵۰ میکرومتر تعیین شده است. لازم به ذکر است، همان‌طور که در شکل ۳(الف) قابل مشاهده است بازیابی مغناطیسی برای ذرات با مش‌بندی بین ۵۰ تا ۱۰ سانتی‌متر تفاوت چشمگیری ندارد.

تأثیر حجم مواد بر رسیدن به دمای مطلوب جهت تغییر فاز مغناطیسی بسیار قابل توجه است. به گونه‌ای که با افزایش حجم و کاهش زمان اعمال امواج مایکروویو، نرخ تبدیل فاز مغناطیسی در نمونه‌های حجیم‌تر با زمان تابش کمتر، بیشتر از نمونه‌های با حجم کمتر و زمان تابش بیشتر بود. در نهایت، با توجه به نوع و حجم ماده و اندازه ذرات، به وزن بهینه‌ای در حدود ۱۰۰ گرم بدون فرایند جداسازی و ۲۰۰ گرم با انجام فرایند جداسازی مغناطیسی قبل از تابش دست یافتیم (منظور از حجم نمونه، حجم بوته‌ای است که نمونه به صورت پودر شده در آن ریخته می‌شود).

جدا کردن فاز مغناطیسی از فاز غیرمغناطیسی نمونه پیش از تابش مایکروویو تأثیری بر میزان مغناطیسی شدن نمونه ندارد. زمان تابش مایکروویو به طور مستقیم بر میزان مغناطش ماده تأثیر می‌گذارد، اما افزایش زمان تابش امواج مایکروویو بیش از مقدار بهینه، تأثیری بر افزایش مغناطش مواد نخواهد داشت؛ بنابراین در هر سری از آزمایش‌ها، زمان بهینه با توجه به حجم مواد و با ثابت نگه داشتن عوامل دیگر در حالت بهینه، به طور جداگانه بررسی گردید. در نهایت، جهت تغییر فاز مغناطیسی ۱۰۰ گرم نمونه پودر هماتیت با دانه‌بندی ۲۵۰ میکرومتر، طی تابش امواج مایکروویو با فرکانس ۲،۴۵ گیگاهرتز، زمان بهینه ۶ دقیقه گزارش شد. درصد آهن بازیابی شده در این شرایط برابر با ۲۱٪ بود که قابلیت تغلیظ هماتیت تا ۶۰٪ را نشان می‌دهد. با توجه به توان دستگاه مورد استفاده، پیش‌بینی می‌شود با استفاده از دستگاهی با توان بالاتر، زمان تابش مؤثر جهت تغلیظ‌سازی هماتیت کاهش یابد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از شرکت حدید گستر سیرجان جهت تأمین و فراهم نمودن شرایط مدنظر نهایت تقدیر و تشکر را دارد.

منابع

- [1] R. R. Mishra and A. K. Sharma, "Microwave-material interaction phenomena: Heating mechanisms, challenges and opportunities in material processing," 2016. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.10.035.
- [2] C. Leonelli, C. Siligardi, and P. Veronesi, "Microwave processing of glass".
- [3] S. . Rath, "Beneficiation studies of a difficult to treat iron ore using conventional and microwave roasting," *Powder Technol.*, 2016.
- [4] M. Omran, "Effect of microwave pre-treatment on the magnetic properties of iron ore and its implications on magnetic separation," *Sep. Purif. Technol.*, 2014.
- [5] "Recent Advances in Magnetization Roasting of Refractory Iron Ores_ A Technological Review in the Pas _ Enhanced Reader.pdf."

- [6] Q. Zhang, "Whether magnetization roasting requires complete phase reconstruction of iron minerals: A study of phase transition and microstructure evolution," *Powder Technol.*, 2022.
- [7] S. . et al. Kumar, "Rapid carbon-free iron ore reduction using an atmospheric pressure hydrogen microwave plasma," *Chem. Eng. J.*, 2023.
- [8] S. Mustafa; L. Luo; B. Zheng; C. Wei; and N. Christophe, "Mineralogical and Chemical Changes after Reduction Roasting of Xinjiang Iron Ore, China," *Metals (Basel)*., 2022.
- [9] C. Cardenia, E. Balomenos, and D. Parias, "Optimization of Microwave Reductive Roasting Process of Bauxite Residue," *Metals (Basel)*., vol. 10, no. 8, p. 1083, Aug. 2020, doi: 10.3390/met10081083.
- [10] A. D. Chandio *et al.*, "Beneficiation of Low-Grade Dilband Iron Ore by Reduction Roasting," *Metals (Basel)*., vol. 13, no. 2, 2023, doi: 10.3390/met13020296.
- [11] S. K. Roy, D. Nayak, and S. S. Rath, "A review on the enrichment of iron values of low-grade Iron ore resources using reduction roasting-magnetic separation," May 2020. doi: 10.1016/j.powtec.2020.04.047.