

## اثر فعال سازی مکانیکی و پرتودهی مایکروویو بر احیای مستقیم

### سنگ آهن گل گهر

محسن معیری<sup>۱\*</sup>، علی سعیدی<sup>۲</sup>، رضا ابراهیمی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۲- استاد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

#### چکیده

در این تحقیق اثر فعال سازی مکانیکی و پرتودهی با مایکروویو بر روی احیا مستقیم سنگ آهن گل گهر مورد بررسی قرار گرفت. فعال سازی مکانیکی در یک آسیاب سیاره‌ای انجام شد. برای پرتودهی مایکروویو از یک مایکروفر خانگی با توان ۹۰۰W و فرکانس ۲۴۵۰MHZ استفاده شد. برای ارزیابی احیا پذیری نمونه‌ها از آزمایش سبد در یک مدول احیا میدرکس استفاده شد. نتایج نشان داد نمونه‌های لامپ سنگ آهن وقتی تحت پرتودهی مایکروویو قرار می‌گیرند استحکام خود را از دست داده و در آزمایش سبد تحت فشار ستون بار به کلی منهدم و خرد می‌شوند. آزمایش سبد انجام شده روی نمونه‌های کنسانتره که پس از فعال سازی تبدیل به گندله شده بود نشان داد بیشترین درجه احیا برای نمونه‌ای بدست می‌آید که ۱۰ ساعت فعال سازی شده است.

کلمات کلیدی: سنگ آهن گل گهر، فعال سازی مکانیکی، پرتودهی مایکروویو، احیا

#### مقدمه

امروزه آهن پر مصرف‌ترین فلز در صنایع می‌باشد. تولید و مصرف آهن و آلیاژهای آن در طی قرون اخیر به تدریج افزایش یافته و در سال ۲۰۱۱ میلادی به حدود یک میلیارد و ۴۸۹ میلیون تن رسیده است. هم اکنون علاوه بر روش سنتی کوره بلند، بیش از صد فرآیند تولید آهن به روش احیا مستقیم در سطوح آزمایشگاهی، نیمه صنعتی و صنعتی ابداع گردیده‌اند. هدف از ابداع این روش‌ها حذف اکسیژن در اکسیدهای آهن به کمک عوامل احیا کننده بر اساس شرایط اقلیمی هر منطقه می‌باشد. در سالهای اخیر به دلیل افزایش قیمت کک متالورژی، استفاده از عوامل احیا کننده مختلف مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این عوامل به گاز طبیعی و ذغال‌های نامرغوب می‌توان اشاره نمود. با توجه به مصرف گاز طبیعی در صنایع پتروشیمی و قیمت روز افزون این ماده طبیعی و از طرف دیگر دسترسی به ذخائر فراوان ذغال‌های نامرغوب به نظر می‌رسد که تولید آهن خام در سطح جهان در آینده بیشتر به سمت احیا با استفاده از ذغال کشیده شود. از این رو تحقیقات در زمینه تولید آهن به روش‌های جدید که در آنها سرعت

احیا بالا رفته و یا از ذغال‌های نامرغوب در فرآیند احیا استفاده شود در سراسر جهان در حال انجام است [۲۱]. بخش عمده‌ای از تحقیقات پایه‌ای روی روش‌های کاهش حداقل دمای احیا و افزایش احیا پذیری کانی‌ها و کنسانتره‌های آهن متمرکز شده است. بسیاری از این گروه تحقیقات فعلاً مستقل از اقتصادی بودن یا نبودن روش انجام می‌شود. استفاده از آسیاکاری به منظور فعال سازی کانی یکی از روش‌هایی است که تحقیق زیادی را به خود اختصاص داده است. محققین با استفاده از این روش سنگ معدن‌های مختلفی را فعال نموده و شرایط احیای آن‌ها را تسهیل نموده‌اند. در این راستا باب جدیدی در تحقیقات متالورژی استخراجی مواد و روش‌های مکانوشیمی باز شده است. همچنین در سالهای اخیر استفاده از منابع جدید انرژی که راندمان بیشتر و آلودگی کمتری را به همراه داشته باشند مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این منابع انرژی جدید، انرژی امواج میکروویو است. امواج میکروویو نوعی از امواج الکترومغناطیس با طول موج ۱ mm تا ۱ m هستند و در طیف امواج الکترومغناطیس در حاشیه ناحیه مادون قرمز قرار دارند [۳]. استفاده از این امواج در خلال جنگ جهانی دوم و به منظور ارتباطات آغاز شد. پس از پی بردن به قابلیت گرمایشی این امواج، کاربرد گسترده‌ای در فرآیندهای آزمایشگاهی و صنعتی پیدا کرد و به سرعت در حال گسترش می‌باشد [۴]. برخی از مزایای استفاده از انرژی میکروویو عبارتند از: قابلیت گرم شدن حجمی، انتخابی و موضعی، کاهش زمان گرم کردن و زمان واکنش‌ها، افزایش راندمان، کاهش آلودگی محیط زیست، کاهش انرژی اکتیواسیون و افزایش نفوذ. البته عواملی نظیر امکان استفاده از میکروویو برای فلزات، مشکل بودن کنترل و اندازه‌گیری دما و توزیع دمای غیر یکنواخت باعث شده‌اند که نتوان به راحتی میکروویو را جایگزین روش‌های سنتی کرد [۳]. در سالهای اخیر تحقیقات زیادی به منظور استفاده از این انرژی در زمینه سرامیک‌ها و دیگر فرآیندهای مواد و متالورژی نظیر آماده سازی و احیای کانه‌ها، سنتز احتراقی، جوشکاری و سینتر کردن سرامیک‌ها، عملیات حرارتی، رسوب دهی فیزیکی و شیمیایی بخار صورت گرفته است [۵]. در این تحقیق سعی بر این بوده است که از این زمینه‌های تحقیقاتی جدید (فعال سازی مکانیکی و پرتو دهی میکروویو) به منظور تسریع در استخراج فلز آهن استفاده گردد. در مورد اثر این فرآیندها بر احیا پذیری کنسانتره‌های سنگ آهن طبیعی اطلاعات مدونی وجود ندارد لذا هدف از انجام این تحقیق بررسی دقیق اثر فرآیندهای مذکور بر رفتار احیایی گندله‌های ساخته شده از سنگ معدن گل گهر تحت شرایط واقعی در کوره‌های احیا بوده است.

### مواد و روش انجام تحقیق

مواد اولیه: در این تحقیق از کنسانتره مگنتیتی گل گهر با اندازه ذرات ۸۵ درصد زیر ۴۵ میکرون و همچنین لامپ سنگ آهن گل گهر با قطر تقریبی ۲۰-۱۵ میلیمتر به عنوان مواد اولیه استفاده گردید. ترکیب شیمیایی سنگ آهن مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی کنسانتره سنگ آهن گل گهر مورد استفاده

آنالیز شیمی دستگاهی (XRF)					آنالیز شیمی تر (Wet Chemical)		
CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	S	FeO	Fe <sub>total</sub>
۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۲۵	۱/۷۶	۱/۵۸	۰/۸۸	۲۵/۹۴	۶۶/۹

از پودر بتونیت که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۲ آورده شده است، به عنوان ماده افزودنی به منظور تهیه گندله برای انجام آزمایش‌ها استفاده گردید.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی پودر بتونیت مورد استفاده

Physical Analysis		Chemical Analysis					
BLAINE (cm <sup>2</sup> /gr)	ENSLIN	P	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	FeO	آهن کل
۳۶۷۰	۷۷۶	۰/۰۳۴	۱/۷۶	۷۲/۷۳	۲/۵۹	۰/۲۲	۱/۵۵

### روش انجام تحقیق

آزمایش‌های مربوط به فرآیند آسیاکاری: در این آزمایش‌ها جهت رطوبت گیری، کنسانتره سنگ آهن مورد نظر، به مدت ۴-۳ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد قرار داده شده است. بعد از رطوبت گیری، کنسانتره سنگ آهن مورد آزمایش در یک آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای ساخت شرکت فرا پژوهش اصفهان مدل FP2 در محفظه‌ای از جنس فولاد سخت کروم‌دار به حجم ۱۲۵ میلی‌لیتر و قطر ۱۰ سانتی‌متر آسیا گردیدند. گلوله‌های مورد استفاده از جنس فولاد زنگ نزن با قطر ۲۰ میلیمتر بود. وزن گلوله‌های مصرفی ۱۴۴ گرم و نسبت وزنی گلوله به پودر ۱:۱۰ انتخاب گردید. محفظه تحت اتمسفر هوا با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه (rpm) گردش می‌نمود. تحت این شرایط نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه (به عنوان نمونه صفر ساعت آسیاکاری)، ۵، ۱۰ و ۲۰ ساعت آسیا گردیدند. به منظور تهیه نمونه از نمونه‌های آسیاکاری شده جهت انجام آزمایش‌های احیایی ابتدا هر یک از نمونه‌های آسیاکاری شده در مدت زمان‌های مختلف، با ۱ درصد وزنی بتونیت به صورت دستی کاملاً مخلوط شده، سپس برای تهیه گندله، ۸ درصد وزنی آب به مخلوط فوق اضافه شده و توسط قالب سنبه و ماتریس تحت فشار ۷۷ MPa با استفاده از دستگاه پرس مکانیکی (سنتام) گندله‌هایی استوانه‌ای به قطر تقریبی ۹ میلی‌متر تهیه شده، گندله‌ها به مدت ۴۸ ساعت در هوا و سپس به مدت ۲ ساعت در آون (oven) با دمای ۸۰ درجه سانتیگراد خشک شده‌اند. به منظور عملیات پخت، گندله‌ها از دمای محیط تا دمای ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد در کوره آزمایشگاهی با اتمسفر محیط گرم شده و سپس به مدت ۱ ساعت در دما ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد نگهداری گردیده و در انتها تا دمای محیط در کوره سرد شدند.

آزمایش‌های مربوط به پرتودهی مایکروویو: در آزمایش‌های مربوط به پرتودهی مایکروویو از یک دستگاه مایکروفر خانگی ساخت شرکت الکترا (Electra) مدل EM-2800E که تامین کننده انرژی مایکروویو می‌باشد مورد استفاده قرار گرفت. در این آزمایش‌ها، پنج عدد لامپ سنگ آهن گل گهر به قطر تقریبی ۲۰-۱۵ میلیمتر در ظرف سرامیکی مخصوص مایکروویو (Microwave-safe) در داخل یک دستگاه مایکروفر خانگی با توان ۹۰۰W و به مدت زمان ۶۰ دقیقه تحت پرتودهی مایکروویو قرار داده شدند.

آزمایش‌های احیایی: برای ارزیابی رفتار احیایی نمونه‌های فعال شده و پرتودهی شده تحت شرایط واقعی در کوره‌های احیا از آزمایش سبد (Bucket test) استفاده گردید. در این روش سبدهای استوانه‌ای که دارای دو قسمت می‌باشند (یکی برای نمونه مورد آزمایش و دیگری برای مرجع) بکار برده شد. گندله‌های ساخته شده از نمونه‌های آسیا شده به علت کوچک بودن سایز (قطر

حدود ۹ میلیمتر) و تعداد کم (۶ عدد) ابتدا در سبدهای کوچکتری بسته‌بندی شده و سپس در داخل سبد اصلی بسته‌بندی گردید. پس از توزین نمونه‌های مورد آزمایش و مرجع (بحرین)، سبدهای آماده شده از هر نمونه به همراه مواد ورودی به درون نرمال ترین کوره احیا شارژ گردید. بعد از خروج سالم سبدها از مدول شماره ۴ میدرکس شرکت فولاد مبارکه (این مدول از یکنواختی بالاتری برخوردار است)، نمونه‌های احیا شده برای تعیین درجه فلز شدگی و کربن گیری مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. با استفاده از آنالیز شیمیایی به روش شیمی تر درجه فلزی آهن اسفنجی تولیدی اندازه‌گیری شد و همچنین با استفاده از دستگاه ELTRA CS 800 درصد کربن اندازه‌گیری شد. گندله مرجع گندله خریداری شده از بحرین است که این گندله با چسب آهک تولید شده و دارای درجه خلوص بالا (بیش از ۹۵ درصد هماتیت) بوده و احیاپذیری عالی دارد.

## نتایج و بحث

**فعال سازی مکانیکی :** همانطور که در قسمت قبل اشاره شد نمونه‌هایی از کنسانتره گل گهر پس از فعال سازی در آسیاب گلوله‌ای به مدت‌های ۵، ۱۰ و ۲۰ ساعت به گندله تبدیل شدند و پس از پخت در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد احیاپذیری آنها توسط تست سبد در راکتور میدرکس اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه شرایط احیایی در نقاط مختلف راکتور یکسان نیست از یک گندله مرجع (گندله بحرینی) جهت مقایسه در هر یک از سبدها استفاده شد. بعد از خروج سالم سبدها از مدول شماره ۴ میدرکس نمونه‌های احیا شده برای تعیین درجه فلز شدگی و کربن مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. درجه فلز شدگی و درصد کربن نمونه‌ها و نمونه مرجع در جدول ۳ آورده شده است.

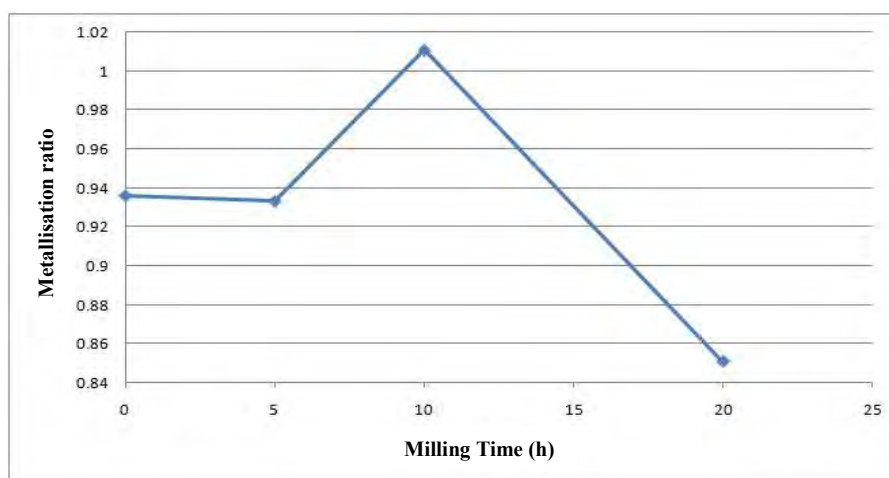
جدول ۳- نتایج آزمایش‌های سبد صورت گرفته بر روی گندله‌های تهیه شده

شماره نمونه	آهن اسفنجی	درجه فلز شدگی (%)	کربن (%)
۱	آزمایشگاه (صفر ساعت آسیا کاری)	۸۸	۰/۷۵
۱	مرجع	۹۴	
۲	آزمایشگاه (۵ ساعت آسیاکاری)	۸۴	۰/۹۸
۲	مرجع	۹۰	
۳	آزمایشگاه (۱۰ ساعت آسیاکاری)	۹۳	۰/۹۵
۳	مرجع	۹۲	
۴	آزمایشگاه (۲۰ ساعت آسیاکاری)	۸۰	۰/۹۵
۴	مرجع	۹۴	

این نتایج به دلیل نسبی بودن به تنهایی قابل تحلیل نیستند لذا پارامتری بنام نسبت فلز شدگی بصورت زیر تعریف شد:

$$(1) \quad \text{نسبت فلز شدگی } (\alpha) = \frac{\text{درجه فلز شدگی نمونه فعال شده}}{\text{درجه فلز شدگی نمونه مرجع}}$$

از پارامتر  $\alpha$  می‌توان به عنوان معیاری از احیا پذیری نسبی استفاده نمود. این معیار هر چه بالاتر باشد (به ۱ نزدیک‌تر باشد) احیا پذیری بالاتر است. مقدار  $\alpha$  برای نمونه فعال نشده و نمونه‌های فعال شده در زمان‌های مختلف در شکل ۱ به صورت نمودار رسم شده است.



شکل ۱- اثر زمان آسیاکاری بر روی نسبت فلز شدگی کانه آهن گل گهر

همانطور که ملاحظه می‌شود نسبت فلز شدگی به جز برای نمونه فعال شده به مدت ۱۰ ساعت برای سایر نمونه‌ها کوچکتر از یک شده یعنی احیا پذیری نمونه مورد آزمایش از گندله مرجع کمتر است. با توجه به اینکه کنسانتره مورد آزمایش پس از فعال سازی در دمای ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد پخته شده لذا پیش بینی می‌شد بخشی از اثرات فعال سازی مکانیکی مانند جمع شدن تنش که عامل فعال شدن است در دمای بالا حذف شده باشد ولی نتایج نشان می‌دهد نمونه ۱۰ ساعت فعال سازی شده احیاپذیری بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد، این می‌تواند به دلیل افزایش سطح ویژه ذرات در نتیجه کاهش اندازه ذرات و به دنبال آن افزایش سطح تماس میان پودر و عامل احیا کننده (مخلوط  $H_2$  و CO) باشد [۶]. اگر این استدلال را بپذیریم آنگاه باید احیا پذیری نمونه ۲۰ ساعت نیز نسبت به بقیه نمونه‌ها بالاتر باشد در حالی که درست بر عکس است. دو احتمال وجود دارد. به احتمال زیاد (اگر چه نمی‌شود اثبات کرد) درجه فلز شدگی پایین‌تر نمونه ۲۰ ساعت ناشی از اکسیداسیون مجدد این نمونه در فاصله خروج از کوره و اندازه‌گیری درجه فلز شدگی بوده است. با توجه به اینکه سطح ویژه کنسانتره مصرفی در نمونه ۲۰ ساعت بسیار بالا بوده احتمال اکسیداسیون مجدد آن نیز بیشتر است. احتمال دوم آگلومره شدن ذرات نمونه یاد شده می‌باشد. آگلومره شدن ذرات در حین آسیا کاری شدید برای کانه‌های سولفیدی و کانه‌های اکسیدی گزارش شده است [۶ و ۷]. با توجه به نوع آسیا، سرعت و زمان آسیاکاری درجه فلز شدگی پایین‌تر نمونه ۲۰ ساعت می‌تواند ناشی از آگلومره شدن این نمونه باشد. لذا سطح ویژه این نمونه کاهش و متعاقب آن درجه فلز شدگی نیز کاهش می‌یابد. میزان کربن ترکیبی نمونه‌های احیا شده همانطور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود برای تمام نمونه‌ها بسیار کم بوده و خیلی تحت تاثیر فعال سازی مکانیکی نیست. میزان کربن ترکیبی تابع عوامل مختلفی از جمله شرایط و اتمسفر کوره میدرکس است [۱] که از بحث این تحقیق خارج می‌باشد.

فرآیند پرتودهی مایکروویو: همانطور که اشاره شد پنج عدد لامپ سنگ آهن مگنتیتی گل گهر به قطر تقریبی ۲۰-۱۵ میلی‌متر تحت پرتودهی مایکروویو به مدت ۶۰ دقیقه قرار گرفته و سپس برای ارزیابی رفتار احیایی آنها تحت شرایط واقعی در کوره‌های

احیا از آزمایش سبذ استفاده گردید. پس از توزین نمونه‌های مورد آزمایش و مرجع (بحرین)، سبدهای آماده شده از هر نمونه به همراه مواد ورودی به درون نرمال‌ترین کوره احیا شارژ گردید. بعد از خروج سالم سبدها، نمونه‌های احیا شده برای تعیین درجه فلز شدگی و کربن گیری مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. مشخصات نمونه‌های تهیه شده در جدول ۴ درج گردیده است.

جدول ۴- مشخصات نمونه های تهیه شده از لامپ سنگ آهن گل گهر

شماره نمونه	تعداد نمونه	قطر تقریبی (mm)	زمان پرتودهی (min)
۱	۵	۲۰-۱۵	۶۰
۲	۵	۲۰-۱۵	۰

بعد از خروج سالم سبدها از مدول شماره ۴ میدرکس مشاهده گردید که نمونه‌های لامپ سنگ آهن مورد نظر در زمان احیا به شدت خرد و متلاشی شده‌اند. نکته جالب توجه آن بود که نمونه پرتودهی شده، ۱۰۰ درصد خرد شده و هیچ مقداری در سبذ باقی نمانده در حالی که نمونه بدون پرتودهی اگر چه در موقع احیا و خروج از کوره خرد شده ولی حدود ۵۰ درصد آن در سبذ باقیمانده است. درجه فلز شدگی و کربن ترکیبی نمونه بدون پرتودهی در جدول ۵ درج گردیده است.

جدول ۵- نتایج آزمایش سبذ صورت گرفته بر روی لامپ سنگ آهن بدون پرتودهی

شماره نمونه	آهن اسفنجی	درجه فلز شدگی	کربن (%)
۲	آزمایشگاه	۸۶	۰/۸۸
۲	مرجع	۹۲	

این موضوع از آن جا ناشی می شود که در میان اکسیدهای آهن، مگنتیت انرژی میکروویو را شدیداً جذب می‌کند [۹و۸] و از آنجایی که لامپ سنگ آهن مورد نظر، از اکسیدهای مختلفی تشکیل شده است که هر یک رفتار گرمایشی منحصر به فردی در معرض انرژی میکروویو از خود نشان می‌دهند. اختلاف در سرعت گرمایش اکسیدها، می‌تواند باعث بروز شیب درجه حرارت موضعی در گستره لامپ سنگ آهن مورد نظر شده و ایجاد تنش داخلی نموده و یا باعث ترک خوردن سنگ آهن شود. علاوه بر این در صورت وجود آب ساختمانی یا جذبی در دانه‌های سنگ آهن تبخیر این آب توسط انرژی میکروویو نیز می‌تواند تنش ایجاد کند. ایجاد ترک های ناشی از تنش حرارتی در نتیجه گرمایش میکروویو در لامپ سنگ آهن توسط محققین دیگر نیز گزارش گردیده است [۱۰-۱۳]. در نتیجه نمونه‌های پرتودهی شده استحکام خود را از دست داده و در آزمایش سبذ تحت فشار ستون بار کاملاً منهدم و خرد می‌شوند.

### نتیجه گیری

- ۱- نمونه کنسانتره گل گهر ۱۰ ساعت فعال سازی شده احیا پذیری بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد.
- ۲- میزان کربن ترکیبی برای نمونه‌های کنسانتره گل گهر فعال سازی شده بسیار کم بوده و خیلی تحت تاثیر فعال سازی مکانیکی نیست.

۳- نمونه‌های لامپ سنگ آهن گل گهر پرتودهی شده در آزمایش سبد تحت فشار ستون بار به کلی منهدم و خرد می‌شوند.

### تشکر و قدردانی

در اینجا لازم می‌دانیم از پرسنل محترم شرکت فولاد مبارکه اصفهان و شرکت سنگ آهن گل گهر سیرجان که همکاری صمیمانه در اجرای این پروژه داشتند، تشکر و قدردانی نماییم.

### منابع

- [۱] توحیدی، ن، احیای مستقیم تئوری آهن اسفنجی، انتشارات دانشگاه تهران، پاییز ۱۳۸۲.
- [۲] رایگان، ش، بررسی اثر فعال سازی مکانیکی بر چگونگی احیای مخلوط پودری هماتیت و گرافیت در دمای بالا، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت، بهمن ۱۳۸۱.
- [3] Pickles, C.A, "Microwaves in extractive metallurgy:part 1- Review of fundamentals", Mineral Engineering, Vol.22, PP.1102-1111, 2009.
- [4] Yoshikawa, N.Ishizuka, E.Mashiko, K.Chen,Y and Taniguchi,S, " Brief review on Microwave heating .Its application to iron & steel industry and to the relevant environmental techniques", ISIJ international, Vol.47, No.4, PP.523-527, 2007.
- [5] Pickles, C.A, "Microwaves in extractive metallurgy:part 2-A review of applications", Mineral Engineering, Vol.22, PP.1112-1118, 2009.
- [6] Balaz, p, "Extractive Metallurgy of Activated Minerals", Elsevier, Amsterdam, 2000.
- [7] Forssberg, E.Pourghahramani, P, "Effects of mechanical activation on the reduction behavior of hematite concentrate", Int.J.Miner.Process, Vol.82, PP.96-105, 2007.
- [8]Standiah, N.Huang, W, "Microwave Application in Carbothermic Reduction of Iron Ores", ISIJ International, Vol. 31, No.3, PP.241-245, 1991.
- [۹] سلیمانی استیاری، ک، وحدتی خاکی، ج و ابوطالبی، م، "مروری بر کاربردهای انرژی مایکروویو در مهندسی مواد، مهندسی متالورژی"، شماره ۲، صص ۴۲-۴۹، ۱۳۷۷.
- [10] Standish, N and Pramusanto, "Reduction of Microwave Irradiated Iron Ore Particles in CO", ISIJ International, Vol.31, No. 1, PP. 11-16, 1991.
- [11] Kumar, P.Sahoo, B.K.Chakraborty, S, "Iron ore grindability improve- ement by microwave pre-treatment", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol.16, PP.805-812, 2010.
- [12] Cumbane, A.J, "Microwave Treatment of Minerals and Ores", University of Nottingham, October, 2003.
- [13] Voster, W,"The Effect of Microwave Radiation on Mineral Processing", School of Chemical Engineering,University of Birmingham, June 2001.