



اثر عملیات حرارتی بر تغییرات فازی و اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند

منیره حشامی^۱، رحمان احمدی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
۲- استادیار فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(دریافت ۱۳۹۶/۰۲/۲۵، پذیرش ۱۳۹۶/۰۵/۲۹)

چکیده

در این مقاله، اثر عملیات حرارتی بر تبدیلات فازی و قابلیت خردایش کانسنگ منگنز کم عیار حاوی سیلیس مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی تبدیلات فازی و تغییرات ساختاری نمونه ناشی از عملیات حرارتی از آنالیز حرارتی (DTA/TG) و همچنین مطالعات میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد. اثر حرارت بر قابلیت خردایش کانسنگ با تعیین شاخص اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند در زمان‌ها و دماهای مختلف حرارت‌دهی بر روی بار ورودی آسیا بررسی شد. بر اساس نتایج بدست آمده از آنالیز حرارتی (DTA/TG)، حرارت تا دمای ۷۵۰°C منجر به دی‌هیدروکسیلیشن کانی‌های رسی و همچنین تجزیه کلسیت و خروج گاز کربن دی‌اکسید (CO₂) و در دمای ۸۵۰°C منجر به تجزیه کانی رسی مونت‌موریلونیت به کانی‌هایی با سختی بالاتر (کریستوبالیت، مولیت، اسپینل و کوردیریت) اثبات شد. مطالعات SEM نیز حاکی از ایجاد ترک و شکاف با ابعاد (۲۸۰×۱۳ μm) در محدوده ابعادی (۳/۳۵، +۱۲- میلی‌متر) در اثر حرارت و عمدتاً بواسطه تبدیل فازی کوآرتز آلفا به بتا (α→β) و تجزیه کلسیت در نمونه است. بر اساس تغییرات ساختاری و فازی انجام گرفته در نمونه، در مدت زمان حرارت‌دهی ۶۰ دقیقه، با اعمال حرارت تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار محصول تولیدی در یک دور چرخش آسیا (G_p) و اندازه محصول نهایی آسیا (P₈₀) به ترتیب ۹۰ درصد و ۱۰ درصد افزایش و شاخص اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند از ۲۰/۰۶ Kwh/t به ۱۴/۳۵ Kwh/t کاهش یافت.

کلمات کلیدی

کانسنگ منگنز، عملیات حرارتی، اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند، آنالیز حرارتی، تبدیلات فازی.

۱- مقدمه

سقوط وزنه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که قابلیت شکست ذره (t_{10}) بر اثر حرارت ۳۶ درصد افزایش یافته است. افزایش در مقدار t_{10} بیانگر کاهش مقاومت کانسنگ در برابر شکست ضربه‌ای است. آزمایش کومار^۱ و همکاران [۱۰]، بر روی اثر حرارت بر خردایش کانسنگ آهن نشان داد، تابع انتخاب^۱ (S_1) که بیانگر آهنگ ناپدید شدن ذرات از روی سرد اول است، برای محدوده ابعادی (۱۲۷، +۱۹،۵- میلی‌متر)، ۵۰ درصد افزایش یافته است.

شینگ- هوی^{۱۱} و همکاران [۱۱]، اثر حرارت بر خردایش ایلمنیت را مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس نتایج جدایش مغناطیسی بازیابی از ۴۴ تا ۷۷ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این، نتایج بدست آمده از تحقیقات مسری^{۱۲} و همکاران [۱۲]، بر روی اثر حرارت بر مقاومت مکانیکی شیل نشان داد، حرارت باعث افزایش شکنندگی شیل و در نهایت باعث کاهش در مقاومت فشاری کانسنگ شده است.

با توجه به بررسی پیشینه و سوابق فعالیت‌های انجام گرفته قبلی، در اکثر تحقیقات انجام شده برای مطالعه اثر حرارت بر قابلیت خردایش، از آزمایش بار نقطه‌ای و سقوط وزنه استفاده شده است.

آزمایش سقوط وزنه، تنها قادر به پیش‌بینی خصوصیات کانسنگ‌هایی است که در آسیای خودشکن و نیمه خودشکن تحت خردایش قرار می‌گیرند. برای کانسنگ‌های حاوی کانی‌های رسی، تعیین خصوصیات کانسنگ با این روش قابل اعتماد نیست. همچنین آزمایش بار نقطه‌ای قادر به بیان دقیق خصوصیات کانسنگ نیست [۱۳] بنابراین در این تحقیق، اثر عملیات حرارتی بر قابلیت خردایش نمونه کانسنگ منگنز با تعیین اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند که روشی بسیار دقیق، تکرارپذیر و قابل اعتماد است بر روی نمونه حرارت‌دهی شده و بدون اعمال حرارت مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. در این راستا، تبدیلات فازی انجام گرفته و تغییرات ساختاری ایجاد شده در نمونه با آنالیزهای حرارتی (DTA/TG) و مطالعات میکروسکوپ الکترونی (SEM) بطور دقیق توجیه و تفسیر شده است.

۲- مواد، تجهیزات و روش‌ها

۱-۲- مواد و تجهیزات

نمونه منگنز مورد استفاده در آزمایش‌ها از معدن ونارچ قم

خردایش با دو مفهوم اصلی کاهش اندازه ذرات و مصرف انرژی مرتبط است [۱]. در همین راستا تحقیقات گذشته تاکنون، منجر به ارایه روابط و مدل‌هایی شده است. از جمله مناسب‌ترین و در عین حال پرکاربردترین این مدل‌ها روابط ارایه شده توسط باند^۱ است. در مدل‌های باند، علاوه بر تاثیر اندازه ذرات، پارامتر اندیس کار^۲ در نظر گرفته شده است که نشان دهنده میزان مقاومت ماده در برابر خردایش است. قابلیت خردایش یکی از مهم‌ترین داده‌های لازم برای طراحی سیستم‌های خردایش است که بیان‌کننده بسیاری از پارامترهای مکانیکی مواد از جمله سختی، الاستیسیته، پلاستیسیته، مقاومت و تخلخل است و با ناهمگن شدن مواد پیچیدگی آن نیز بیشتر می‌شود [۲،۱]. همچنین، این اندیس، بیان‌کننده میزان انرژی مصرفی در فرآیند خردایش است و برای بهینه‌سازی مدار خردایش به منظور پیشینه کردن توان عملیاتی و کمینه کردن انرژی مصرفی استفاده می‌شود. علاوه بر این، با استفاده از این شاخص می‌توان ابعاد آسیای مورد نیاز را با توجه به دبی بار ورودی به آسیا و تخمین توان موتور آن تعیین کرد [۴،۳]. تغییر در خصوصیات کانی برای کاهش مقاومت و افزایش درجه آزادی، یکی از روش‌های بهبود کارایی فرآیندهای خردایش است که در سال‌های اخیر مورد توجه صنایع و مراکز تحقیقاتی قرار گرفته است [۵]. یکی از راه‌های تغییر در خصوصیات خردایش کانسنگ، عملیات حرارتی است. عملیات حرارتی، باعث تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سنگ‌ها و همچنین باعث تغییر در ویژگی‌های مغناطیسی و دی‌الکتریک مواد می‌شود [۶].

تاثیر حرارت بر خردایش کانسنگ توسط تعدادی از محققان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. کینگمن^۳ و همکاران [۷]، اثر حرارت را بر روی مقاومت کانه سرب و روی با استفاده از آزمایش سقوط وزنه^۴ که روشی برای تعیین مقاومت کانسنگ است، مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده، مقاومت کانسنگ با اعمال حرارت، تا ۴۰ درصد کاهش یافت. سیکونگ^۵ و بانسین^۶ [۸]، از آزمایش بار نقطه‌ای^۷ برای بررسی تغییرات مقاومت کانسنگ با دما در شرایط اعمال تنش‌های فشاری بر روی سنگ گرانیات استفاده کردند. نتایج تحقیقات نشان داد که مقاومت فشاری سنگ^۸ (مگاپاسکال) بر اثر حرارت تا ۷۰ درصد کاهش یافته است. بارانی و همکاران [۹]، نیز اثر حرارت بر روی کانسنگ آهن را با انجام آزمایش

۲-۲-۳- اثر عملیات حرارتی بر ساختار نمونه

برای بررسی اثر حرارت بر روی ساختار نمونه و همچنین مشاهده تغییرات ساختاری نمونه، قبل و بعد از حرارت، از میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد. در این روش، ابتدا با روش آنالیز سرندهی محدوده ابعادی (۳٫۳۵، +۱۲- میلی‌متر) تهیه و با کمک مقسم به دو قسمت تقسیم شد. در ادامه، یک نمونه، تحت حرارت تا دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۶۰ دقیقه قرار گرفت. پس از حرارت، ۲ نمونه موجود (نمونه حرارت داده شده و نمونه بدون اعمال حرارت) در رزین اپوکسی قرار داده شده و سطح آن‌ها با استفاده از پودر الماسه، پولیش داده شد. پس از اتمام پولیش، پوشش کربنی در سطح آن‌ها ایجاد شد و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت.

۲-۲-۴- اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند

برای انجام آزمایش‌های اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند، نمونه‌هایی با ابعاد $d_{1..}$ برابر با ۱۲٫۵ میلی‌متر با عملیات سنگ‌شکنی تهیه و آنالیز سرندهی شد. براساس نتایج آنالیز سرندهی، F_{80} بار ورودی ۱۰۹۴۸ میکرون تعیین شد. با کمک مقسم، نمونه‌هایی با حجم ۱۲۵۰ میلی‌لیتر (گرم = ۲۵۰۰ W) برای انجام آزمایش‌های اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند در دماهای مختلف برداشته شده و در ادامه از رابطه ۱، برای محاسبه اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند استفاده شد. از سرنده ۱۱۸۰ میکرومتر (۱۶ مش) به‌عنوان سرنده کنترل (P_i) استفاده شد.

$$W_i = \frac{62}{P_i^{0.23} G_i^{0.625}} \times \left[\frac{1}{\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}}} \right] \quad (1)$$

که در آن:

W_i اندیس کار (کیلووات ساعت بر تن)

F_{80} دهانه سرندهی که ۸۰ درصد بار ورودی از آن عبور

می‌کند (میکرون)

P_{80} دهانه سرندهی که ۸۰ درصد محصول از آن عبور

می‌کند (میکرون)

G_i مقدار محصول تولید شده در یک دور آسیا (گرم بر دور)

P_i اندازه روزنه سرنده کنترل (میکرون)

مطابق جدول ۱، آزمایش اول اندیس کار آسیای میله‌ای

تهیه شد. برای این منظور، از دپوی دو خط ۱ و ۲ کم عیار معدن پیروزی نمونه‌گیری انجام شد. برای شناسایی کانی‌های موجود در نمونه از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) مدل PW1800 ساخت شرکت PHILIPS با لامپ مس و تعیین ترکیبات و عناصر موجود در نمونه از دستگاه فلورسانس اشعه ایکس (XRF) مدل PW1480 ساخت شرکت PHILIPS کشور هلند و برای مشاهده ترک و شکاف ایجاد شده در نمونه بر اثر حرارت، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل LEO1430VP محصول مشترک کشور آلمان و انگلستان استفاده شد. بررسی تبدیلات فازی موجود در نمونه در اثر حرارت با کمک دستگاه آنالیز حرارتی (DTA/TG) مدل STA409PC LUXX ساخت شرکت NETZSCH آلمان انجام شد. برای تعیین اندیس کار از آسیای میله‌ای استاندارد باند ساخت شرکت Labtech Essa Pty Ltd استرالیا به قطر ۳۰۵ میلی‌متر و طول ۵۵۹ میلی‌متر با سرعت بحرانی ۴۶ دور بر دقیقه، استفاده شد. بار خرد کننده آن شامل ۸ عدد میله فولادی با طول ۵۳۳ میلی‌متر بوده است که دو عدد آن به قطر ۴۴٫۵ میلی‌متر و ۶ عدد به قطر ۳۱٫۷۵ میلی‌متر و وزن کل میله‌ها نیز معادل ۳۲۹۴۸ گرم اندازه‌گیری شد. کلیه آزمایش‌های عملیات حرارتی در کوره مافل مدل AWF ۱۲٫۲۵ ساخت شرکت Lenton انگلستان انجام شد.

۲-۲-۲- روش‌ها

۲-۲-۱- شناسایی نمونه

از آنالیزهای XRD و XRF برای شناسایی نمونه استفاده شد. برای انجام این آنالیزها، دو نمونه هر یک با وزن ۱۰۰ گرم تا ابعاد $d_{1..}$ برابر با ۱۰۰- میکرون با استفاده از پودرکن دیسکی خرد شده و آنالیز شدند.

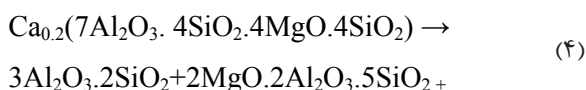
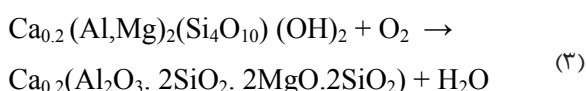
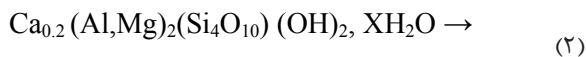
۲-۲-۲- آنالیز حرارتی (DTA/TG)

برای بررسی تغییرات فازی و وزنی نمونه در دماهای مختلف از آنالیز حرارتی استفاده شد. برای این منظور، ۱۰۰ گرم از نمونه تا ابعاد $d_{1..}$ برابر با ۱۰۰- میکرون پودر شده و آنالیز حرارتی نمونه در بازه دمایی ۲۲ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط) تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با آهنگ حرارت ۱۰ درجه بر دقیقه در شرایط اتمسفر انجام شد.

نتایج آنالیز XRF نمونه در جدول ۲ آورده شده است. ترکیبات و عناصر اصلی موجود در نمونه بر حسب درصد شامل: CaO : ۸,۳۱، Fe_2O_3 : ۳۱,۵۱، SiO_2 : ۲۶,۹۰، MnO : ۱۶,۹۷ است. با توجه به نتایج، نمونه منگنز، کم عیار و کانی‌های غیر فلزی موجود در نمونه عمدتاً کوارتز و کلسیت‌اند.

۲-۲- آنالیز حرارتی (DTA/TG)

نتایج آنالیز حرارتی در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به منحنی آنالیز حرارتی افتراقی (DTA)، پیک گرماگیر اول در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد که به صورت کاهش وزن در نمودار جرم سنج حرارتی (TG) مشاهده می‌شود را می‌توان به خروج آب حفره‌ای، جذبی و بین لایه‌ای نمونه منگنز در اثر حرارت ارتباط داد (معادله ۲). کاهش وزن تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با شیب آرامی ادامه دارد که ناشی از دی‌هیدروکسیلیشن^{۱۳} کانی رسی مونت‌موریلونیت (خروج یون هیدروکسیل از ساختار مونت‌موریلونیت) موجود در نمونه است (معادله ۳). این تغییر تا دمای ۷۷۵ درجه سانتی‌گراد ادامه یافته است. جوشی^{۱۴} و همکارانش (۱۹۹۴) [۱۴] و اوحدی (۱۳۹۱) [۱۵] فرآیند دی‌هیدروکسیلیشن کانی رسی مونت‌موریلونیت را در این محدوده ابعادی تایید کرده‌اند. در دمای ۶۰۰ تا ۷۷۵ درجه سانتی‌گراد با افزایش شیب نمودار TG، یک افت وزنی ناگهانی در نمونه، تقریباً معادل ۵ درصد روی داده است که علاوه بر دی‌هیدروکسیلیشن مونت‌موریلونیت، ناشی از تجزیه کلسیت در این محدوده دمایی است (معادله ۵). پیک گرماگیر دوم در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، ناشی از این پدیده است. پیک گرمازا در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد و کاهش وزن از دمای ۷۷۵ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، بواسطه تجزیه مونت‌موریلونیت به کانی‌های سیلیکاته اسپینل، کلدیریت، مولیت و کریستوبالیت است (معادله ۴) [۱۶-۱۸].



باند بدون اعمال حرارت بر روی نمونه اولیه و آزمایش‌های ۲ تا ۸ با اعمال حرارت در دماهای مختلف (۳۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) بر روی نمونه اولیه انجام شده است. در کلیه آزمایش‌ها، حرارت‌دهی در بازه‌های زمانی مختلف ۳۰-۹۰ دقیقه انجام گرفت.

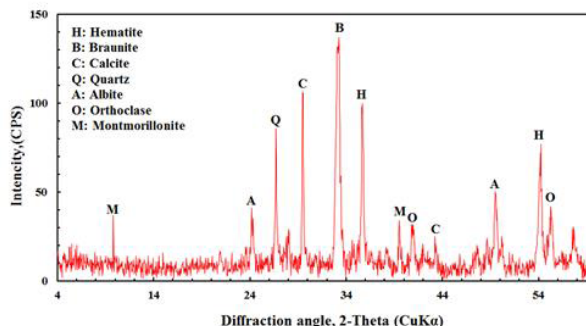
جدول ۱: طرح آزمایش‌های آسیای میله‌ای استاندارد باند در دماهای مختلف

شماره آزمایش	دما (درجه سانتی‌گراد)
۱	بدون حرارت (دمای محیط)
۲	۳۰۰
۳	۵۰۰
۴	۶۰۰
۵	۷۰۰
۶	۸۰۰
۷	۹۰۰
۸	۱۰۰۰

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شناسایی نمونه

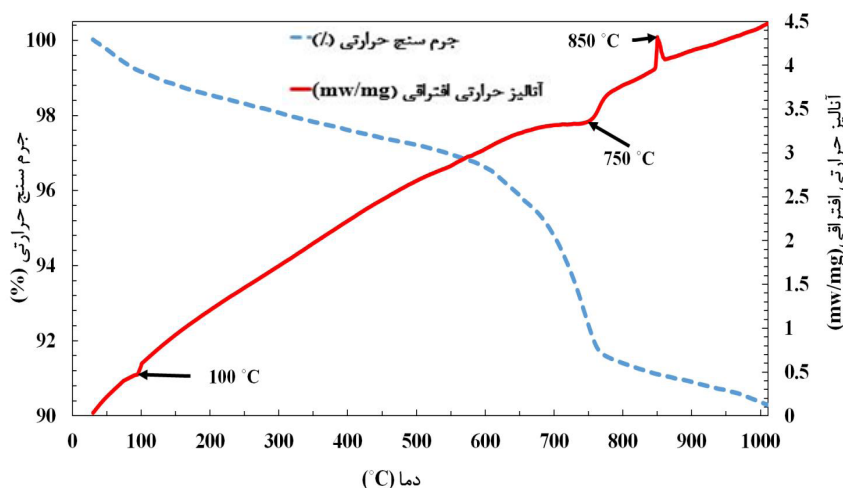
گراف آنالیز XRD نمونه منگنز در شکل ۱ آورده شده است. مطابق شکل، کانی‌های اصلی موجود در نمونه شامل هماتیت (Fe_2O_3)، براونیت ($\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}\text{SiO}_{12}$)، کوارتز (SiO_2) و کلسیت (CaCO_3) و کانی‌های فرعی شامل، آلپیت ($\text{Na,Ca}(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$)، ارتوکلاز (KAlSi_3O_8) و مونت‌موریلونیت ($\text{Ca}_{0.2}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot \text{XH}_2\text{O}$) است. مونت‌موریلونیت تنها کانی آبدار موجود در نمونه است.



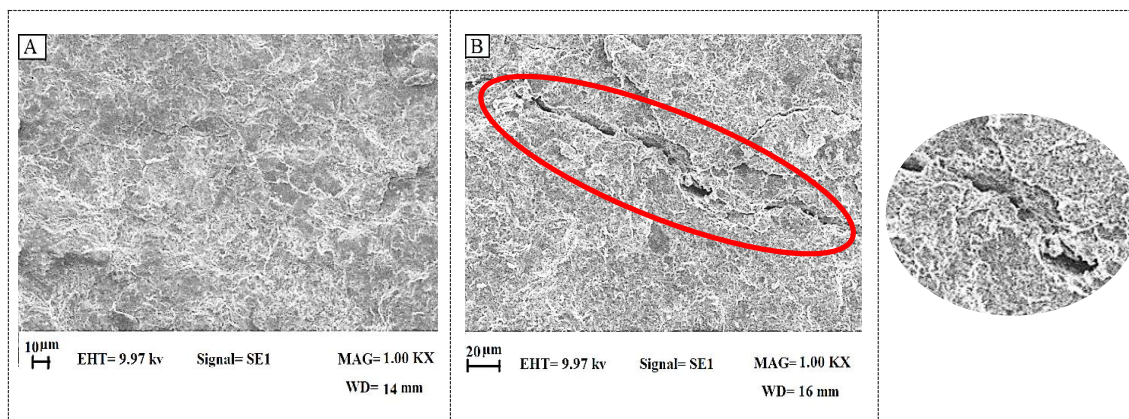
شکل ۱: گراف XRD نمونه منگنز

جدول ۲: نتایج آنالیز شیمیایی (XRF) نمونه منگنز

نام ترکیب	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	As ₂ O ₃	TiO ₂	L.O.I	جمع
مقدار (درصد)	۳۱٫۵۱	۲۶٫۹۰	۱۶٫۹۷	۸٫۳۱	۷٫۰۶	۱٫۱۸	۰٫۱۳	۰٫۲۶	۰٫۵۳	۷٫۱۵	۱۰۰



شکل ۲: آنالیز حرارتی (DTA/TG) نمونه منگنز



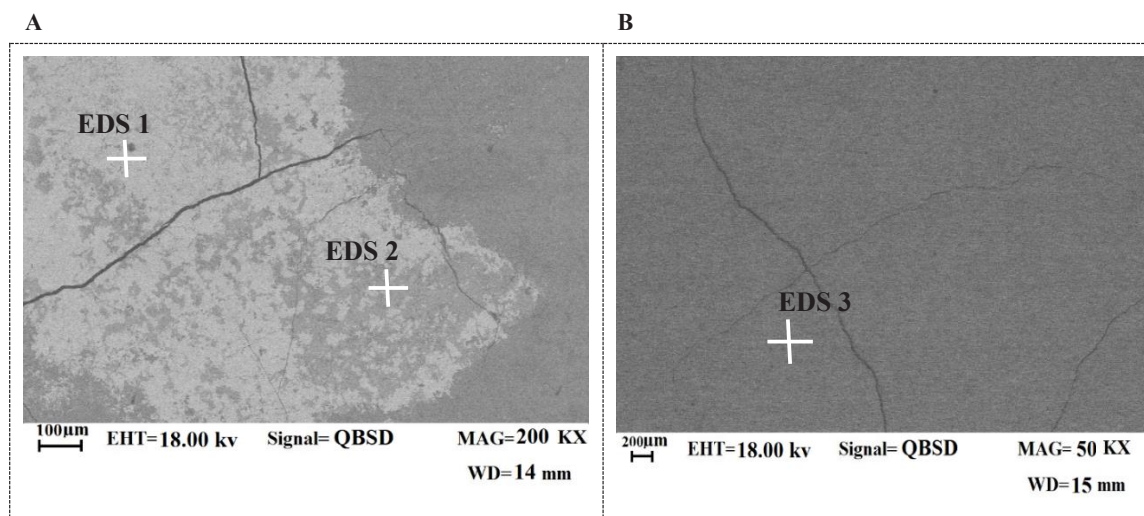
شکل ۳: تصاویر SEM محدوده ابعادی (۳/۳۵، +۱۲- میلی‌متر)؛ قبل از حرارت (A) و بعد از حرارت (B) در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه

شده است. مطابق شکل، در نمونه تحت حرارت (B)، ترک‌ها و شکستگی‌های زیادی ایجاد شده است که عمدتاً به صورت ماکرو ترک و پیوسته است. با توجه به مقیاس روی شکل، طول ترک تقریباً برابر ۲۸۰ و عرض آن ۱۳ میکرومتر (۲۸۰×۱۳ μm) است.

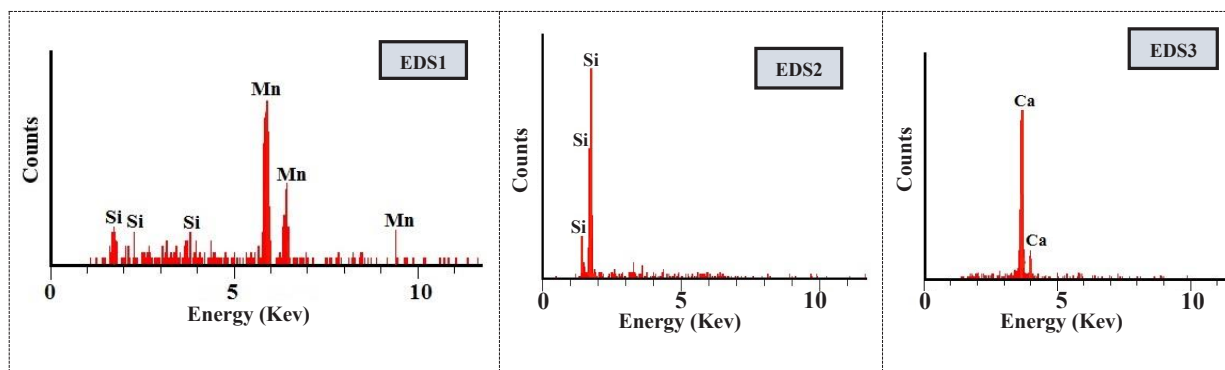


۳-۳- اثر عملیات حرارتی بر ساختار نمونه

تصاویر SEM نمونه‌های بدون اعمال حرارت و تحت حرارت برای محدوده ابعادی (۳/۳۵، +۱۲- میلی‌متر) در شکل ۳ آورده



شکل ۴: ترک‌های ایجاد شده در اثر عملیات حرارتی (دما ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه) در کانسنگ منگنز ناشی از تجزیه کوارتز (شکل A) - کلسیت (شکل B)

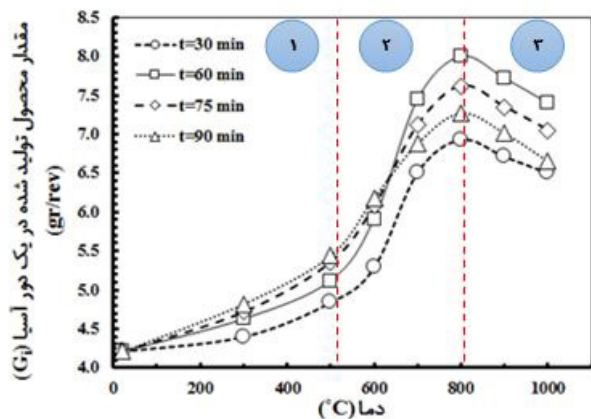


شکل ۵: طیف سنجی تفکیک انرژی نقاط (EDS 1, EDS 2, EDS 3)

فاز آلفا به بتا ($\alpha \rightarrow \beta$) تبدیل می‌شود که این تغییر فاز، منجر به افزایش حجم معادل ۲ درصد در نمونه می‌شود. بنابراین، با توجه به درصد بالای SiO_2 (تقریباً ۲۷ درصد) مطابق نتایج آنالیز XRF و XRD که عمدتاً مربوط به کانی کوارتز است، یکی از دلایل ایجاد ترک و شکاف در نمونه منگنز را میتوان به تغییرات فازی و حجمی کوارتز در محدوده دمایی یاد شده ارتباط داد، بنابراین قرار گرفتن کوارتز در زمینه براونیت (شکل ۴A) مویید تبدیل فازی کوارتز از آلفا به بتا ($\alpha \rightarrow \beta$) و تغییرات حجمی منجر به ایجاد ترک در اثر عملیات حرارتی است. آنالیز حرارتی (DTA/TG) قادر به تشخیص این تغییر ساختار در نمونه نبوده است. این امر، به دلیل سرعت حرارت‌دهی بالا

شکل ۴ تصاویر SEM، ترک‌های ایجاد شده در نمونه منگنز با محدوده ابعادی (۳۵، +۱۲، - میلی‌متر) را با روش آنالیز نقطه‌ای در سه نقطه متفاوت (EDS1, EDS2, EDS3) پس از عملیات حرارتی نشان می‌دهد. طیف‌سنجی تفکیک انرژی^{۱۵} این نقاط به صورت منحنی‌های EDS در شکل ۵ آمده است. مطابق شکل (۴A و ۵)، نقطه EDS1 (خاکستری روشن) بیانگر فاز حاوی منگنز سیلیکات یا کانی منگنزدار براونیت ($\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}\text{SiO}_{12}$)، و نقطه EDS2 (خاکستری تیره) نماینده فاز سیلیکاته یا کوارتز است. بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده توسط سینگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۶]، کانی کوارتز در محدوده دمایی ۵۷۳ درجه سانتی‌گراد از

چرخش آسیا (G_p) شده است.



شکل ۶: اثر دما و زمان حرارت‌دهی بر میزان محصول تولید شده در یک دور چرخش آسیا (G_p) در آسیای میله‌ای استاندارد باند
 ۱- خروج آب بین لایه‌ای، دی‌هیدروکسیلیشن مونت‌موریلونیت،
 ۲- دی‌هیدروکسیلیشن مونت‌موریلونیت، تبدیل کوارتز (آلفا به بتا) و تجزیه کلسیت و ۳- تجزیه مونت‌موریلونیت

بر اساس شکل ۶، تا دمای حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش زمان حرارت‌دهی نمونه از ۳۰ دقیقه به ۹۰ دقیقه، باعث افزایش محصول تولیدی (G_p) شده است. در دماهای بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های حرارت‌دهی بیش از ۶۰ دقیقه، به دلیل افزایش مدت زمان حرارت، نمونه دچار ذوب جزئی^۶ (بخشی) شده است و این پدیده با ایجاد تنش‌های داخلی در نمونه، منجر به کاهش تولید محصول در یک دور چرخش آسیا (G_p) شده است که در تحقیقات [۲۰، ۱۹] نیز مورد تایید قرار گرفته است. بطوریکه در آزمایش مشابهی که کینگمن و همکاران [۱۹] روی تاثیر تابش مایکروویو بر کانسنگ مس انجام داده‌اند، در توان مایکروویو ۲٫۶ kW و زمان بیشتر از ۶۰ دقیقه، به دلیل ذوب بخشی در نمونه، اندیس کار به مقدار بسیار کمی افزایش یافته است اما در زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه همچنان روند افزایشی G_p در دماهای بالای ۶۰۰°C ادامه یافته است. با توجه به شکل، در مدت زمان ۶۰ دقیقه، با افزایش دما مقدار محصول بیشتری در یک دور آسیا (G_p) تولید شده است. بطوریکه با افزایش دما از دمای محیط تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مقدار محصول تولیدی در یک دور آسیا از ۴٫۲۱ به ۸ گرم (افزایش ۹۰ درصدی) افزایش یافته است.

(۱۰ درجه بر دقیقه) برای نشان دادن تغییرات ناشی از تبدیل فاز کوارتز آلفا به بتا است.

دلیل دیگر ایجاد ترک ناشی از عملیات حرارتی، تجزیه کلسیت و خروج گاز CO_2 است. شکل (۴B) تصویر SEM ترک ایجاد شده در نمونه منگنز را در نقطه EDS3 نشان می‌دهد. بر اساس آنالیز نقطه‌ای و طیف‌سنجی تفکیک انرژی مطابق شکل (۵-EDS3) این شکستگی و ترک در بلور کلسیت موجود در سنگ رخ داده است. آنالیز حرارتی (DTA/TG) نیز وقوع این تغییر ساختار را در کانی کلسیت در محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۷۷۵ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.

۴-۳- اثر عملیات حرارتی بر قابلیت خردایش

شکل ۶، اثر دما و زمان حرارت‌دهی نمونه بر میزان محصول تولید شده در یک دور چرخش آسیای میله‌ای استاندارد باند (G_p) را نشان می‌دهد. مطابق شکل، با افزایش دما در زمان‌های حرارت‌دهی مختلف روی نمونه بار ورودی آسیا، مقدار محصول تولید شده در یک دور چرخش آسیا (G_p) تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. نمودار یاد شده دو شیب ملایم در بازه دمایی تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد (ناحیه ۱) و شیب تند در ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد (ناحیه ۲) دارد. در بازه دمایی ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، محصول با آهنگ بیشتری تولید شده است. دلیل این امر، علاوه بر تبدیل فازی کوارتز آلفا به بتا مطابق تصاویر SEM و آنالیز نقطه‌ای EDS (شکل ۴A و ۵) در دمای ۵۷۳ درجه سانتی‌گراد، ناشی از تجزیه کلسیت در این محدوده دمایی است (شکل ۴B و ۵) که منجر به ایجاد ترک و سست شدن نمونه شده است.

بر اساس نتایج آنالیز حرارتی (DTA/TG) در محدوده دمایی ۱۰۰۰-۷۷۵ درجه سانتی‌گراد، حرارت، منجر به تجزیه کانی رسی و تبدیل به کانی‌های سیلیکاته با فاز جدید شده است (جدول ۳). با توجه به نتایج جدول ۳، کانی مونت‌موریلونیت با سختی ۲ بر اثر حرارت به کانی‌های سیلیکاته با سختی بطور میانگین ۷ تبدیل شده است. همچنین بر اساس نتایج محققان قبلی، حرارت، منجر به افزایش مقاومت کانی رسی تا سه برابر می‌شود [۱۴، ۱۵]، اما با توجه به نتایج SEM مطابق شکل (B) ۳، در این محدوده ابعادی، ترک‌های ماکرووی ایجاد شده در نمونه، بر تغییر ساختار ناشی از کانی رسی که باعث سخت شدن نمونه شده، غلبه کرده است. این عوامل در نهایت در دماهای بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۶، ناحیه ۳)، باعث کاهش کمی در میزان محصول تولید شده در یک دور

جدول ۳: تبدیلات فازی کانی رسی (مونت‌موریلونیت) به سایر کانی‌ها با سختی بالا بر اثر حرارت

سختی (موس)	فرمول شیمیایی	نام کانی	
۱-۲	$Ca_{0.2}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2, xH_2O$	مونت‌موریلونیت	قبل از حرارت
۶-۷	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	مولیت	بعد از حرارت
۶-۷	SiO_2	کریستوبالیت	
۷-۷.۵	$2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$	کردیریت	
۷.۵-۸	$MgO \cdot Al_2O_3$	اسپینل	

جدول ۴: اثر دما و زمان حرارت دهی بر اندازه محصول نهایی آسیای میله‌ای استاندارد باند (P80)

اندازه محصول نهایی آسیای میله‌ای (P80)، میکرون				دما (درجه سانتی‌گراد)	شماره آزمایش
t= ۹۰ min	t= ۷۵ min	t= ۶۰ min	t= ۳۰ min		
۸۵۰	۸۵۰	۸۵۰	۸۵۰	بدون حرارت (دمای محیط)	۱
۸۶۹	۸۶۷	۸۶۲	۸۵۸	۳۰۰	۲
۸۹۰	۸۸۵	۸۸۰	۸۷۰	۵۰۰	۳
۹۰۱	۸۹۸	۸۹۵	۸۸۱	۶۰۰	۴
۹۱۶	۹۱۵	۹۲۵	۹۰۷	۷۰۰	۵
۹۲۳	۹۲۷	۹۳۵	۹۱۷	۸۰۰	۶
۹۲۰	۹۲۵	۹۲۹	۹۱۰	۹۰۰	۷
۹۱۱	۹۱۷	۹۲۵	۹۰۵	۱۰۰۰	۸

شده قابل توجه است. با افزایش G_1 یا آهنگ تولید محصول تولیدی از نمونه حرارت‌دهی شده در یک دور چرخش آسیا، تعداد دورهای مورد نیاز آسیای میله‌ای کاهش یافته و بنابراین تولید نرمه کمتر و ابعاد محصول درشت‌تر شده است. در دماهای بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به علت تجزیه کانی رسی مونت‌موریلونیت به کانی‌هایی با سختی بالاتر (جدول ۳)، P_{80} محصول آسیای میله‌ای استاندارد باند کاهش یافته است. مطابق شکل ۶ (ناحیه ۳)، در این ناحیه G_1 کاهش یافته است. با کاهش مقدار محصول تولید شده در یک دور آسیا، زمان ماند ذرات در آسیا افزایش یافته و بنابراین ابعاد محصول ریزتر شده است.

اندازه محصول نهایی آسیای میله‌ای استاندارد باند (P_{80}) در دماهای مختلف حرارت‌دهی بر روی نمونه منگنز در جدول ۴ آورده شده است. مطابق جدول ۴، در مدت زمان‌های مختلف با افزایش دما از دمای محیط تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، ابعاد محصول آسیای میله‌ای افزایش یافته است. بطوریکه در مدت زمان ۶۰ دقیقه، با افزایش دما از دمای محیط تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، ابعاد محصول آسیای میله‌ای از ۸۵۰ میکرون در حالت بدون اعمال حرارت به ۹۳۵ میکرون افزایش یافته است. افزایش تقریباً ۱۰ درصدی ابعاد محصول نهایی آسیا در مدت زمان ۶۰ دقیقه، بواسطه افزایش محصول در یک دور چرخش آسیا (G_1) (شکل ۶) از نمونه حرارت‌دهی

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر عملیات حرارتی بر تبدیلات فازی و قابلیت خردایش کانسنگ منگنز کم عیار حاوی سیلیس مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج SEM، حرارت بواسطه تبدیلات فازی کوارتز آلفا به بتا و تجزیه کلسیت باعث ایجاد ترک و شکاف با ابعاد (280×13) میکرومتر در نمونه می‌شود. نتایج آنالیز حرارتی (DTA/TG) نشان می‌دهد، با اعمال حرارت با آهنگ ۱۰ درجه بر دقیقه، در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، خروج آب حفره‌ای، جذبی و بین لایه‌ای نمونه منگنز و در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، پدیده دی هیدروکسیلیشن کانی‌های رسی (خروج OH^- از ساختار مونت‌موریلونیت) انجام می‌گیرد. در بازه دمایی ۶۰۰ تا ۷۷۵ درجه سانتی‌گراد، علاوه بر پدیده دی هیدروکسیلیشن، تجزیه کلسیت و خروج گاز کربن دی‌اکسید و در دماهای بالاتر تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، تجزیه کانی رسی مونت‌موریلونیت به کانی‌هایی با سختی بالاتر (کریستوبالیت، مولیت، اسپینل و کلدیریت) اتفاق می‌افتد. بر اساس تغییرات ساختاری و فازی انجام گرفته در نمونه، در مدت زمان حرارت دهی ۶۰ دقیقه، با اعمال حرارت تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مقدار محصول تولیدی در یک دور چرخش آسیا (G_1) و اندازه محصول نهایی آسیا (P_{80}) به ترتیب ۹۰ و ۱۰ درصد افزایش و شاخص اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند از ۲۰٫۰۶ به ۱۴٫۳۵ کیلووات ساعت بر تن کاهش یافت.

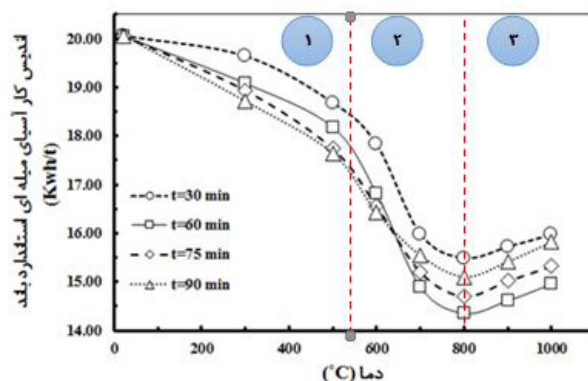
۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از معاونت پژوهش و فناوری سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران برای حمایت مالی پروژه، از مدیریت مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران و دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) که شرایط مناسبی برای انجام تحقیقات فراهم کردند، تقدیر و تشکر نمایند.

۶- مراجع

- [1] Refahi, A., Rezai, B., and Aghazadeh Mohandesi, J. (2007). "Use of rock mechanical properties to predict the Bond crushing index". Minerals Engineering, 20: 662-669.
- [2] Demirel, H. (1988). "Grindability determination". Proceeding of the III international Min Proce,

تغییرات اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند نمونه منگنز در دماها و زمان‌های مختلف در شکل ۷ آورده شده است. نمودار تغییرات اندیس کار در زمان‌های مختلف با افزایش دما دو شیب متفاوت دارد. مطابق شکل، تا دمای حدوداً ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، تغییرات اندکی در اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند ایجاد شده است. با افزایش دما، تبدیل فازی کوارتز آلفا به بتا مطابق تصاویر SEM و آنالیز نقطه‌ای EDS (شکل ۴A و ۵) در دمای ۵۷۳ درجه سانتی‌گراد و همچنین تجزیه ناشی از کلسیت در محدوده دمایی بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد (شکل ۴B و ۵) رخ می‌دهد. این پدیده‌ها باعث کاهش سریع اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند شده است. کاهش اندیس کار تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ادامه یافته است. در دماهای بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، بواسطه تجزیه کانی رسی مونت‌موریلونیت به کانی‌های با سختی بیشتر (جدول ۳)، افزایش کمی در اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند مشاهده می‌شود. مطابق شکل، بیش‌ترین کاهش در اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند در زمان ۶۰ دقیقه رخ داده است. بطوریکه، با افزایش دمای حرارت‌دهی نمونه از دمای محیط تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، اندیس کار آسیای میله‌ای باند از ۲۰٫۰۶ به ۱۴٫۳۵ کیلووات ساعت بر تن کاهش یافته است.



شکل ۷: اثر دما و زمان حرارت‌دهی بر اندیس کار آسیای میله‌ای استاندارد باند

- ۱- خروج آب بین لایه‌ای، دی‌هیدروکسیلیشن مونت‌موریلونیت،
- ۲- دی‌هیدروکسیلیشن مونت‌موریلونیت، تبدیل کوارتز (آلفا به بتا) و تجزیه کلسیت و ۳- تجزیه مونت‌موریلونیت

- Strength of Clays*". Geotechnical Engineering, 120: 1080-1088.
- [۱۵] برنامه و تهیه ضوابط و معیارهای معدن-وزارت صنعت، معدن و تجارت؛ ۱۳۹۳؛ "دستورالعمل تعیین شاخص خردایش در آسیاهای مختلف"، انتشارات سازمان نظام مهندسی معدن، ص ۱۲-۳.
- [16] Foldvari, M. (2011). "*Handbook of Thermo gravimetric System of Minerals and Its Use in Geological Practice*". Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary, pp. 213.
- [17] Grim, E. R., and Rowland, R. A. (1942). "*Differential Thermal Analyses of Clay Minerals and Other Hydrous Materials*". State Geological Survey, 27(11): 746-761.
- [18] Emmerich, K., Madsen, F. T., and Kahr, G. (1999). "*Dehydroxylation Behavior of Heat-Treated and Steam-Treated Homoionic*". Clay and Clay Minerals, 47(5): 591-604.
- [19] Kingman, S. W., Vorster, W., and Rowson, N. A. (2000). "*The Effect of Microwave Radiation on the Processing of Palabora Copper Ore*". The South African Institute of Mining and Metallurgy, 197-204.
- [20] Drost, J. J., and Mahan, W. M. (1973). "*Effects of Thermal Treatments upon Concentratability of a non-Magnetic Iron Ore*". Washington, U.S. Bureau of Mines.
- [21] Vorster, W. (2001). "*The Effect of Microwave Radiation on Mineral Processing*". Degree of Doctor of Philosophy, the University of Birmingham.
- [22] Jones, D. A., Kingman, S. W., Whittles, D. N., and Lowndes, I. S. (2007). "*The Influence of Microwave Energy Delivery Method on Strength Reduction in Ore Samples*". Chemical Engineering and Processing, 46: 291-299.
- [23] Koleini, S. M. J., Barani, K., and Rezaei, B. (2012). "*The Effect of Microwave Treatmeant on Dry Grinding Kinetics of Ore*". Mineral Processing & Extractive Metall. Rev., 33: 159-169.
- [24] Omran, M., Fabritius, T., and Mattila, R. (2015). "*Thermally Assisted Liberation of High Phosphorus Oolitic Iron Ore: A Comparison between Microwave and Conventional Furnaces*". Powder Technology, 269: 7-14.
- Symposium, 21-32.
- [3] Man, Y. T. (2002). "*Technical Note why is the Bond Ball Mill Grindability Test done the way it is done?*". Mineral Processing and Environmental Protection, 2(1): 34-39.
- [4] Sahoo, B. K., De, S., and Meikap, B. C. (2011). "*Improvement of Grinding Characteristics of Indian Coal by Microwave Pre-Treatment*". Fuel Processing Technology, 92: 1920-1928.
- [5] Kingman, S. W., Jackson, K., Cumbane, A., Bradshaw, S. M., Rowson, N. A., and Greenwood, R. (2004). "*Recent developments in microwave-assisted comminution*". International Journal of Mineral Processing, 74: 71-83.
- [6] Singh, V., Tathavadkar, V., Denys, M. B., and Venugopal, R. (2012). "*Application of Quartz Inversion Phenomenon in Mineral Processing – A Case Study of Siliceous Manganese Ores*". Minerals Engineering, 32: 8-11.
- [7] Kingman, S. W., Jackson, K., Bradshaw, N. A., and Greenwood, R. (2004). "*An investigation into the influence of microwave treatment on mineral ore comminution*". Powder Technology, 146: 176-184.
- [8] Sikong, L., and Bunsin, T. (2009). "*Mechanical Property and Cutting Rate of Microwave Treated Granite Rock*". Songklanakarin Journal of Science and Technology, 31(4): 447-452.
- [9] Barani, k., Koleini, S. M. J., and Ergun, L. (2010). "*The Effect of Microwave Treatment upon an Iron Ore Comminution*". International Mining Congress, Tehran, Iran.
- [10] Kumar, P., Sahoo, B. K., De, S., Kar, D. D., Chakraborty, S., and Meikap, B. C. (2010). "*Iron ore grindability improvement by microwave pretreatment*". Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 16: 805-812.
- [11] Sheng-hui, G., Guo, CH., Jin-hui, P., Chen, J., Dong-bo, L., and Li-jun, L. (2011). "*Microwave Assisted Grinding of Ilmenite Ore*". Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21: 2122-2126.
- [12] Masri, M., Sibai, M., Shao, J. F., and Mainguy, M. (2014). "*Experimental investigation of the effect of temperature on the mechanical behavior of Tournemire shale*". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 70(9): 185-91.

[۱۳] اوحدی، و. ح؛ پور زعفرانی، م؛ ۱۳۹۱؛ "مطالعه تأثیر حرارت بر فرایند اندرکنش کائولینیت و کربنات"، دومین کنفرانس ملی سازه- زلزله- ژئوتکنیک، مازندران.

[14] Joshi, R. C., Asce, F., Achari, G., Horsfield, D., and Nagaraj, T. S. (1994). "*Effect of Heat Treatmeant on*

^۱ Bond

^۲ Work Index

^۳ Kingman

- ^۴ Drop weight tests
- ^۵ Sikong
- ^۶ Bunsin
- ^۷ Point load test
- ^۸ Compressive Strength
- ^۹ Kumar
- ^{۱۰} Breakage Selection Function
- ^{۱۱} Sheng-hui
- ^{۱۲} Masri
- ^{۱۳} dehydroxylation
- ^{۱۴} Joshi
- ^{۱۵} Energy Dispersive X- ray Spectroscopy
- ^{۱۶} Partial melting