

بررسی تأثیر دما بر خردایش سنگ آهن گل گهر

نوراله طاهری مقدم^۱، مجتبی طاهری مقدم^۲، یعقوب یعقوبی نژاد^۳، مهدی عارفی نسب^۴ و فرشید زمانی^۵

۱- کارشناس متالورژی و عضو باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان

۲- کارشناسی اقتصاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان

۴- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان

۵- کارشناس ارشد، مدیر تحقیق و توسعه گل گهر

norallah_taheri@yahoo.com

چکیده

تغییر سختی سنگ معدن در آسیاهای نوع خودشکن باعث نوسان چشمگیر در ظرفیت و نهایتاً تولید کارخانه می‌شود. در این ارتباط، یکی از مهمترین پارامترها سختی سنگ معدن است. در این مقاله منظور از سختی^۱ سنگ معدن، میزان مقاومتی است که سنگ معدن در مقابل خردایش از خود نشان می‌دهد. در آسیاهای خودشکن به‌روش خشک هوای گرم به‌داخل آسیا دمیده می‌شود، در حالی که در آزمایش سختی مواد در دمای محیط آزمایش می‌شوند. در تحقیقات گذشته به تأثیر حرارت بر سختی سنگ آهن اشاره‌ای نشده بود. در این تحقیق تأثیر حرارت بر سختی سنگ معدن مورد بررسی قرار گرفت. از نتایج به‌دست آمده این بود که با افزایش درجه حرارت تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، سختی نمونه سنگ آهن ۴/۹ دقیقه کاهش یافت. همچنین مشاهده شد که حرارت دادن سنگ آهن تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر آنچنانی بر ترکیب شیمیایی و عیار سنگ آهن ندارد.

واژه‌های کلیدی:

سختی، خردایش، حرارت، سنگ آهن، معدن گل گهر.

۱- مقدمه

کردن بیشتر محصول بعد از مراحل سنگ‌شکنی، از انواع آسیاها استفاده می‌شود [۲]. آسیاها به‌دو طریق خشک و تر کار می‌کنند که انتخاب آسیا بستگی به نوع کانه و مراحل بعدی عملیات دارد که کانه‌های آهن را به‌طریقه تر یا خشک آسیا می‌کنند [۳، ۴ و ۵]. به‌طور کلی آسیاهای گردان از بدنه‌ای استوانه‌ای یا استوانه‌ای-مخروطی شکل تشکیل شده‌اند که حول محور افقی خود گردش می‌کنند، جداره داخلی آنها (آستر) از جنس

اولین بخش هر واحد فرآوری بعد از مرحله سنگ‌شکنی، خردایش سنگ معدن است (هدف از خردایش سنگ معدن، رساندن ابعاد بار اولیه به‌حد مطلوب جهت عملیات بعدی می‌باشد) که نقش مهمی را در عملکرد و اقتصاد این واحدها بر عهده دارد [۱]، به‌طوری که بیش از ۵۰٪ هزینه فرآوری و بالغ بر ۷۰٪ انرژی مصرفی را به‌خود اختصاص می‌دهد. برای خرد

شرکت Minnovex امکان استفاده از آزمایش کوچک مقیاس نیمه خودشکن (نمونه‌ای به وزن ۲ kg) متشکل از مغزه‌های حفاری را جهت پیش‌بینی توان مورد نیاز آسیاهای نوع خودشکن پیشنهاد داد [۳، ۱۲ و ۱۳].

پس از آزمایش‌های بسیاری که توسط این شرکت در معادن مختلف بر روی آسیاهای نیمه‌خودشکن صورت گرفت، در نهایت طبق استاندارد SPI پیش‌بینی توان مصرفی این نوع آسیاها به صورت زیر ارائه گردید:

$$(1) \quad P_{80} = (2.2 + 0.1T) \cdot (P_{80})^{-0.33} = \text{توان آسیای نیمه خودشکن صنعتی (kWh/t)}$$

P_{80} = اندازه محصول آسیای نیمه خودشکن صنعتی (میکرون)

T = زمان حاصل از آزمایش سختی (دقیقه) [۱ و ۱۴]

بررسی تأثیرات حرارت بر نحوه خردایش سنگ آهن ضرورت و اهمیت دارد، به دلیل اینکه در آسیاهای خودشکن خشک هوای گرم به داخل آسیا دمیده می‌شود، در حالی که در آزمایش سختی مواد در دمای محیط آزمایش می‌شوند. به عنوان مثال دمای مواد داخل آسیای خودشکن کارخانه فرآوری گل‌گهر به حدود ۸۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. از طرفی پیدا کردن روشی برای کاهش سختی سنگ آهن و کاهش هزینه‌های خردایش گامی مثبت برای صنعت خواهد بود [۳ و ۱۵]. در تحقیقات گذشته به تأثیر دما بر سختی سنگ آهن اشاره‌ای نشده بود. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر دما بر خردایش و سختی سنگ آهن و ارائه یک راهکار جهت کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش راندمان تولید برای واحدهای فرآوری و معدنی می‌باشد.

۲- روش تحقیق

به مقدار ۲۵ کیلوگرم سنگ معدن متشکل از نمونه‌های ۴۰۰ گرمی تهیه شده و جهت انجام مراحل بعدی به آزمایشگاه منتقل می‌شود.

جهت آماده‌سازی نمونه‌ها، کل نمونه (۲۵ kg) توسط سنگ‌شکن فکی تا ۱۰۰٪ عبوری از سرند ۱۹ mm خرد می‌شود،

مقاومی پوشیده می‌شود. قسمتی از حجم آسیا توسط بار خردکننده‌ای مانند گلوله‌های فولادی، میله‌های فولادی، قلوه سنگ‌هایی از جنس مقاوم (اپال) و یا قطعات درشتی از خود کانه معدنی پر می‌شود [۶ و ۷]. سرعت گردش این آسیاها به نحوی انتخاب می‌شود که سرعت نسبی سقوط بار خردکننده بر روی بار ورودی آسیا حداکثر باشد. بنابراین استفاده از آسیاهای نوع خودشکن به دلیل بکارگیری ماده معدنی به عنوان واسطه خردایش که منجر به افزایش ظرفیت تولید و نیز کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی می‌شود، عمومیت یافته‌است [۱ و ۸]. معمولاً تغییر سختی سنگ معدن در آسیاها نوع خودشکن باعث نوسان چشمگیر در ظرفیت و نهایتاً تولید کارخانه می‌شود. در این ارتباط، یکی از مهمترین پارامترها، سختی سنگ معدن است که معرف میزان مقاومتی است که سنگ معدن در مقابل خردایش از خود نشان می‌دهد [۱ و ۹]. بنابراین هر چه سختی سنگ آهن بیشتر باشد عمل خردایش بسیار مشکل و هزینه‌های خردایش، تعمیرات و نگهداری افزایش یافته و در نتیجه راندمان تولید کاهش می‌یابد. اگر بتوان سختی سنگ آهن را با هر روشی کاهش داد عمل خردایش بهتر انجام می‌شود، هزینه‌های ذکر شده کاهش می‌یابد و در نتیجه راندمان تولید افزایش می‌یابد [۱۰].

مروری به تحقیقات گذشته نشان می‌دهد به طور معمول برای مقابله با تغییرات سختی دو راه مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک روش، نصب تجهیزات خردایشی معمول در کنار مدار آسیای نیمه‌خودشکن به منظور جلوگیری از تجمع ذراتی با ابعاد بحرانی در داخل آسیا و دیگری نصب تجهیزات و وسایل همگن‌ساز جهت حذف نوسانات کوتاه‌مدت می‌باشد [۱ و ۱۱]. در روشهای قبلی برای اندازه‌گیری سختی توده معدنی باید نمونه‌هایی بالغ بر ۲۰ تن، جهت انجام آزمایش‌های نیمه‌صنعتی آماده می‌شد. هزینه زیاد و مشکل تهیه نمونه به روش متداول، شرکت‌های مختلف را بر آن داشت تا روش ساده‌تری را پیدا کنند. شرکت Minnovex آزمایش تعیین شاخص توان نیمه‌خودشکن (SPI:SAG Power Index) را پیشنهاد داد. در سال ۱۹۹۳

جدول (۱): درجه حرارت اعمال شده بر نمونه‌ها.

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
دما (°C)	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰

جدول (۲): مقدار کاهش سختی نمونه در دماهای مختلف.

دما (°C)	۲۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰
مقدار کاهش سختی سنگ آهن (min)	۰	۰/۹۸	۱/۲۲۵	۱/۴۷	۱/۹۶	۲/۹۴	۳/۹۲	۴/۹

زمان‌های به‌دست آمده از آزمایش یادداشت می‌گردد. مجموع این زمان‌ها (بر حسب دقیقه) نمایانگر میزان سختی نسبی نمونه مزبور می‌باشد که به‌صورت فرمول ذکر شده‌است. هنگامی که عملیات نرم‌کنی به‌پایان رسید، آنالیز سرندي کاملي روی نمونه انجام می‌شود [۱].

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n \quad (2)$$

T = زمان حاصل از آزمایش سختی (دقیقه)

$t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$: زمان‌های خردایش در هر دوره

بعد از آزمایش نمونه خوراک به‌نمونه‌های بعدی طبق جدول (۱) حرارت می‌دهیم.

حرارت دادن در درجه‌های مختلف به‌این صورت است که ابتدا نمونه ۲ kg را در داخل کوره قرار داده، کوره را روشن و درجه حرارت دلخواه را تنظیم کرده و به‌مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده و نمونه را از داخل کوره برداشته و جهت خردایش به آسیای گلوله‌ای ریخته می‌شود. در هنگام انتقال نمونه از کوره به آسیا افت درجه حرارت را خواهیم داشت، چون این عمل در دمای محیط انجام می‌شود. درجه حرارت مربوط به هر نمونه در جدول (۱) ذکر شده‌است.

بعد از اینکه نمونه‌ها در مدت زمان مشخص و درجه حرارت‌های مختلف تحت آزمایش قرار گرفتند، آنالیز سرندي می‌شوند و طبق استاندارد SPI و فرمول مربوطه (۲) مقدار سختی هر نمونه به‌طور دقیق به‌دست می‌آید که مقدار کاهش سختی نمونه‌ها در دماهای مختلف در جدول (۲) ذکر شده‌است.

به‌طوری‌که نمونه دارای $k_{80} = 1/7$ mm (اندازه ۸۰ درصد عبوری از سرندي) باشند توسط دستگاه تقسیم نمونه، نمونه را دقیقاً (از نظر دانه‌بندی) به‌نمونه‌های ۲ kg تقسیم و خشک کرده تا هیچ رطوبتی نداشته باشند.

یک نمونه به‌عنوان نمونه خوراک برداشته و آنالیز سرندي کرده و نتایج حاصل را جهت مقایسه با نتایج سایر نمونه‌ها ثبت می‌کنیم. از مواد روی سرندي $12/7$ mm به‌مقدار ۴۰۰ g و از مواد زیر این سرندي به‌مقدار ۱۶۰۰ گرم برداشته و جهت خردایش به آسیای گلوله‌ای شارژ می‌گردد. مقدار k_{80} خوراک آسیا، حتماً بایستی برابر با $12/7$ mm باشد [۳ و ۱۴]. قطر آسیای گلوله‌ای برابر با $30/5$ cm و طول آن $10/2$ cm می‌باشد که با ۷۰٪ سرعت بحرانی کار می‌کند و ۱۵٪ حجمی آسیا را گلوله‌هایی به قطر $2/5$ cm تشکیل داده‌اند [۶].

بعد از شارژ آسیای گلوله‌ای، آسیا و زمان‌سنج به‌طور هم‌زمان شروع به کار می‌کنند. اولین زمان نرم‌کنی (به‌طور تجربی) در حدود نصف زمانی که برای نرم‌کنی کامل مورد نیاز است، تخمین زده می‌شود. پس از اولین مرحله نرم‌کنی، نمونه از داخل آسیا برداشته شده و با سرندي $1/7$ mm سرندي می‌شود. در صورتی که وزن مواد مانده روی این سرندي بیش از ۴۰۰ گرم باشد، نمونه مجدداً به‌همراه گلوله‌ها جهت نرم‌کنی و خردایش بیشتر به آسیا برگردانده می‌شود. زیرا بایستی ۸۰٪ مواد از سرندي $1/7$ mm عبور کند.

با تکرار این روش (در صورت لزوم تا چندین بار)، نمونه تا اندازه تعیین شده (۸۰٪ عبوری از سرندي $1/7$ mm) نرم می‌شود.

جدول (۳): درصدهای مانده روی سرند کنترلی ۱۷۰۰ میکرون در دماهای مختلف.

درجه حرارت (°C)	خوراک	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰
درصد مانده	۲۳/۷	۲۲/۸	۲۲/۵	۲۱/۹	۲۰/۷	۲۰/۳	۲۰	۱۶/۲	۱۴/۸	۱۳/۳	۱۱/۹

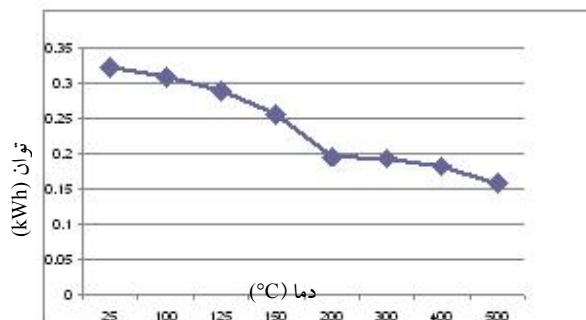
بعد از به دست آمدن سختی به مقدار gt ۱۰۰ از نمونه مورد نظر، که به طور مناسبی همگن شده باشد، جهت بررسی و مشخص نمودن ترکیب شیمیایی برداشته شده و توسط دستگاه کاپ میل تا اندازه زیر ۱۰۰ میکرون خرد شده و برای تشخیص ترکیب شیمیایی آن به آزمایشگاه مربوطه ارسال می شود.

۳- نتایج و مباحث

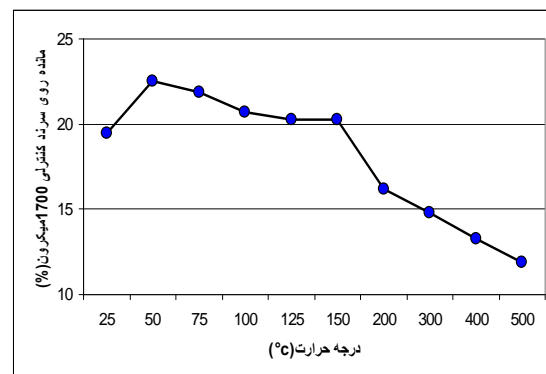
در هر واحد فرآوری معدنی کاهش توان مصرفی آسیا که از مهمترین پارامترهای کاهش هزینه و افزایش راندمان تولید می باشد، همواره از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده [۱ و ۶] همچنین با مروری بر تحقیقات گذشته در رابطه با کاهش توان مصرفی آسیاها جناب آقای اکبری نسب در پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی «بررسی تأثیر سختی خوراک بر توان مصرفی آسیاهای نیمه خودشکن در مدار خردایش سنگ آهن گل گهر» نتایج قابل توجهی را ارائه کرده اند و موفق به کاهش ۱٪ (یک درصد) توان مصرفی آسیاهای خودشکن شده اند [۱ و ۲] بنابراین در شکل (۱) قابل ملاحظه می باشد که با افزایش دما نیز، توان مصرفی آسیا کاهش می یابد.

شکل (۲) و جدول (۳) نشان دهنده درصد مانده روی سرند کنترلی ۱۷۰۰ میکرون در دماهای مختلف می باشد. از این جا نتیجه می شود که با افزایش دما درصد مانده روی سرند کنترلی ۱۷۰۰ میکرون از ۲۳/۷ درصد در دمای محیط، به ۱۱/۹ درصد در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد کاهش می یابد، این کاهش نشان دهنده این است که خردایش بهتر انجام شده و هزینه های فرآوری کاهش یافته و راندمان تولید افزایش می یابد.

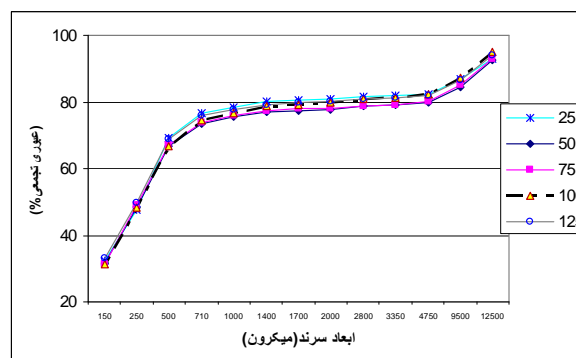
شکل های (۳) و (۴) به ترتیب درصد عبوری تجمعی در دماهای ۲۵ تا ۱۲۵ و ۱۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد را نشان می دهند. از



شکل (۱): تغییرات توان آسیا بر حسب دما.



شکل (۲): مقایسه درصدهای مانده روی سرند کنترلی ۱۷۰۰ میکرون در دماهای مختلف.



شکل (۳): نمودارهای دانه بندی محصول های آسیا در دماهای ۲۵ تا ۱۲۵ درجه سانتی گراد.

جدول (۴): آنالیز شیمیایی نمونه‌ها در محدوده دمایی بین ۵۰۰°C و خوراک.

Fe%	FeO%	P%	S%	ترکیب شیمیایی
۶۷/۵۸	۶/۳۹	۰/۰۹۲	۰/۰۸۴	خوراک
۶۷/۶۵	۵/۹۶	۰/۱۰۳	۰/۰۷۵	نمونه ۵۰۰°C

شکل‌های (۳) و (۴) چنین برداشت می‌شود که در اندازه‌های کوچکتر از ۵۰۰۰ میکرون تأثیر دما قابل ملاحظه بوده و بیشتر از آن محسوس نمی‌باشد.

شکل (۵) نشان می‌دهد که مقدار k_{80} یک روند نزولی را دارا می‌باشد. لذا با افزایش دما k_{80} کاهش می‌یابد که این کاهش در واحد فرآوری گل گهر بسیار حائز اهمیت و مفید می‌باشد. نکته قابل توجه در این شکل این است که در تغییر دمایی ۷۵ به ۱۰۰ درجه سانتی گراد کاهش قابل توجهی در k_{80} دیده می‌شود.

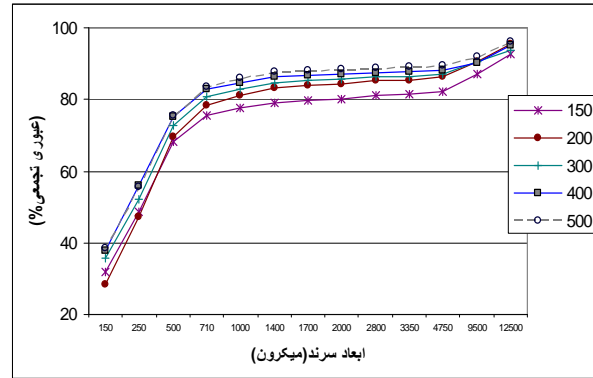
شکل (۶) روند تغییرات سختی (T) سنگ آهن بر حسب دقیقه را نشان می‌دهد. در اثر افزایش دما سختی سنگ آهن حدود ۴/۹ دقیقه کاهش می‌یابد، بنابراین تغییرات دما بر روی بافت درونی و ساختار سنگ آهن تأثیر گذاشته و باعث نرم شدن و به هم ریختن شبکه سنگ و نهایتاً متلاشی شدن آن می‌شود.

جهت بررسی تأثیر درجه حرارت بر روی ترکیب شیمیایی سنگ آهن، نمونه خوراک اولیه و نمونه‌ای که در درجه حرارت ۵۰۰ درجه سانتی گراد آزمایش شده بود، آنالیز شیمیایی شده و نتایج آن در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به جدول نتیجه می‌گیریم که با افزایش درجه حرارت تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد تغییر آنچنانی در ترکیب شیمیایی سنگ آهن صورت نگرفته است.

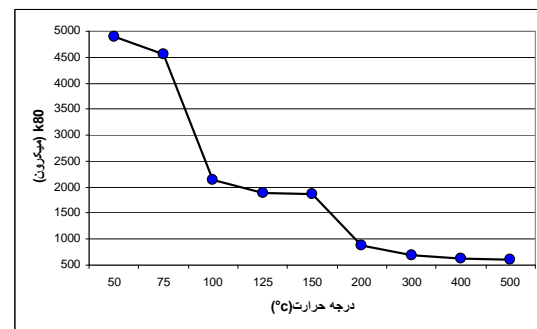
۴- نتیجه گیری

۱- با افزایش درجه حرارت تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد، سختی نمونه سنگ آهن ۴/۹ دقیقه کاهش یافت. به طوری که درصد مانده روی سرند کنترلی ۱۷۰۰ میکرون ۱۱/۸ درصد کاهش یافت.

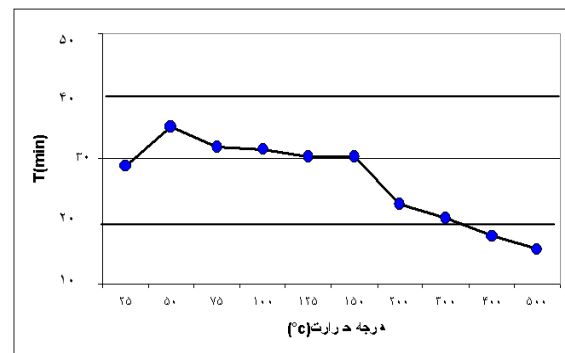
۲- بیشترین تأثیر حرارت بر سختی سنگ آهن در درجه حرارت‌های ۱۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد مشاهده شد.



شکل (۴): نمودارهای دانه‌بندی محصول‌های آسیا در دماهای ۱۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد.



شکل (۵): مقدار k_{80} (اندازه ۸۰٪ عبوری مواد از سرند) در دماهای مختلف.



شکل (۶): روند نزولی سختی سنگ آهن در دماهای مختلف [T = زمان حاصل از آزمایش سختی (دقیقه)].

[۶] م. ت. کره‌ای، "بررسی عملکرد کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی فلزی استان یزد"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، تابستان ۱۳۸۲.

- [7] G. Kosick and C. Bennet, "The Value of Orebody Power Requirement Profile for SAG Circuit Design", 31st Annual General Meeting of the Canadin Mineral Processors, Ottawa, p. 241-253, 1999.
- [8] J. Starkey and G. Dobby, "Application of the Minnovex SAG Power Index at Five Canadin SAG Plants", International Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, p. 345-360, 1996.
- [9] G. S. Pettifer and P. G. Fookes, "A Revision of the Graphical Method for Assessing the Excavability of Rock", Q J End Geol, Vol. 27, pp. 145-164, 1994.
- [10] R. Tatiya, "Surface and Underground Excavation Methods, Techniques and Equipments", Bulkema Pub., 2005.
- [11] B. Singh and R. K. Goel, "Rock Mass Classification, a Practical Approach in Civil Engineering", Elsevier Science Ltd., 1999.
- [12] A. C. Toepfer, "Construction Methods for Cutting and Slopes in Rock", In Geotechnical Engineering Handbook, Ulrich Smolczyk. Ed., Ernst & Sohn, pp. 399-427, 2003.
- [13] E. Hoek and A. Karzulovic, "Rock Mass Properties for Surface Mines", In Slope Stability in Surface Mining, Hustrulid, Mccarter and Van Zyl (eds.), SME, Colorado, pp. 59-70, 2000.
- [14] V. Marinos, P. Marinos and E. Hoek, "The Geological Strenght Index: Applications and Limitations", Bull Eng Geol Env. Vol. 64, No. 1, pp. 55-65, 2005.
- [15] W. A. Deer, R. A. Howie and J. Zussman, An in Troduction to the Rock Forming Minerals. Second Edition, Longman Scientific and Technical, p. 696, 1992.

۶- پی‌نوشت

1- Hardness

- ۳- حرارت دادن سنگ آهن تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر آنچنانی بر ترکیب شیمیایی و عیار سنگ آهن ندارد.
- ۴- با افزایش دما مقدار k_{80} سنگ آهن به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که بیشترین کاهش در محدوده دمایی ۷۵-۱۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده‌است.
- ۵- بیشترین تأثیر افزایش دما بر روی ذرات کوچکتر از ۵۰۰۰ میکرون بوده و بیشتر از آن محسوس نمی‌باشد.
- ۶- با افزایش دما توان مصرفی آسیا کاهش می‌یابد.

۵- مراجع

- [۱] ا. اکبری‌نسب، "بررسی تأثیر سختی خوراک بر توان مصرفی آسیاهای نیمه خودشکن در مدار خردایش سنگ آهن گل‌گهر"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۲.
- [۲] ب. رضایی، "تکنولوژی فرآوری مواد معدنی (خردایش و طبقه‌بندی)"، مؤسسه تحقیقاتی و انتشاراتی نور، ۱۳۷۶.
- [۳] ف. زمانی، "فناوری آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب، ۱۳۷۹.
- [۴] ب. رضایی، "تکنولوژی فرآوری مواد معدنی (پر عیارسازی به روش مغناطیسی)"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر تهران، ۱۳۸۱.
- [۵] ح. نعمت‌اللهی، کان‌آرایی، جلد اول، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۱.