

بررسی تأثیر درصد مگنتیت بر ویژگی‌های مکانیکی و لرزه‌ای کانسنگ‌های آهن: مطالعه موردی کانسنگ معدن چادرملو

حسین اینانلو عربی شاد^۱، فرهنگ سرشکی^۲، محمد عطایی^۳ و محمد کار آموزیان^۲

^۱دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۳استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۲۸

چکیده

بررسی عوامل مؤثر بر ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی موادمعدنی از متغیرهای بسیار مهم و با اهمیت در تعیین ویژگی‌های شکست و رفتار مکانیک سنگی آنهاست. این بررسی‌ها می‌تواند کمک شایانی در مراحل مختلف عملیات معدنکاری از حفاری و انفجار تا خردایش مکانیکی (سنگ‌شکنی و آسیا) و برنامهریزی تولید کند. در این پژوهش ابتدا مقاطع میکروسکوپی اکسیدهای آهن در معدن سنگ آهن چادرملو در نوره‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. سپس متغیرهای ژئومکانیکی و لرزه‌ای و ویژگی‌های شکست کانه‌های آهن نسبت به درصد مگنتیت آزمایش و بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌داد که با افزایش درصد مگنتیت متغیرهای مقاومت فشاری، کششی تک‌محوره، مدول یانگ، سرعت انتشار موج P و سرعت انتشار موج S افزایش و متغیرهای نسبت پواسون، تخلخل و جذب آب کاهش می‌یابد. در مرحله پایانی این پژوهش ارتباط میان نرم‌شدگی ناشی از انفجار با میزان درصد مگنتیت بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد مگنتیت، نرم‌شدگی ناشی از انفجار نیز افزایش می‌یابد، که این امر سبب کاهش هزینه‌های بسیار زیاد خردایش مکانیکی می‌شود و در صورتی که درصد مگنتیت بار ورودی به کارخانه در معدن سنگ آهن چادرملو از ۲۵ تا ۵۰ درصد افزایش یابد، میزان مصرف انرژی از ۷۰ کیلووات بر ساعت به ۴۰ کیلووات بر ساعت کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: کانسنگ اکسیده آهن، درصد مگنتیت، ویژگی‌های ژئومکانیکی، ویژگی‌های شکست، نرم‌شدگی.

نویسنده مسئول: حسین اینانلو عربی شاد

E-mail: h.inanloo@shahroodut.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

آهن یکی از فلزات استراتژیک و با اهمیت در صنعت معدنکاری و فولاد است. Morgan and Anders (1980) عنوان کردند که ۳۲/۰۷ درصد حجم سیاره زمین از آهن تشکیل شده است. همچنین این ماده معدنی به ترتیب ۵ و ۸۰ درصد پوسته و هسته سیاره زمین را تشکیل می‌دهد. مگنتیت، هماتیت و گوتیت سه کانی اصلی تشکیل‌دهنده سنگ آهن به ترتیب دارای ساختار بلورشناسی کوبیک، هگزاگونال (تری‌انگولار) و اورتورومیک هستند (Morgan and Anders, 1980; Waychunas, 1991; Ohmoto, 2003; Clout and Manuel, 2015). تعیین ویژگی‌های مکانیکی و لرزه‌ای کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ آهن از عوامل بسیار مهم در تعیین واکنش آنها نسبت به خردایش مکانیکی و خردایش ناشی از انفجار است. Morales et al. (2008) نشان دادند که ویژگی‌های لرزه‌ای کانی‌های مگنتیت، هماتیت و کوارتز وابسته به کانی‌های تشکیل‌دهنده آنهاست. آنها همچنین عنوان کردند که ویژگی‌های آیزتروپی کانی‌های یادشده وابسته به جهت مقدم کریستالوگرافیک موجود در آنهاست (Morales et al., 2008; Chicot et al. (2011)). نیز به بررسی ویژگی‌های مکانیکی کانی‌های خالص و مرکب مگنتیت، هماتیت و گوتیت با استفاده از ابزاربندی فرورفتگی و آنالیز دینامیکی مولکولی در مقیاس میلی‌متر پرداختند. آنها نشان دادند که مدول یانگ، مدول بالک، نسبت پواسون و مدول برشی اندازه‌گیری شده وابسته به نوع کانی است (Chicot et al., 2011). بررسی واکنش کانه آهن نسبت به اعمال نیرو و از متغیرهای بسیار تأثیرگذار و با اهمیت در عملیات معدنکاری این ماده معدنی است. شناخت این واکنش می‌تواند کمک بسیار مهمی در بهینه‌سازی مصرف انرژی مراحل مختلف معدنکاری همچون حفاری، انفجار و خردایش مکانیکی (سنگ‌شکنی و آسیا) کند. همچنین مرحله پایانی عملیات معدنکاری (آزادسازی ماده معدنی) کاملاً وابسته به شکست سنگ در مراحل انفجار و خردایش مکانیکی است. شکست سنگ موضوعی بسیار مهم و مرتبط با انتشار ترک و شکستگی‌های موجود در سنگ است که خردایش و گسیختگی را نتیجه می‌دهد. این پدیده در ارتباط مستقیم با همه مراحل معدنکاری است

(Eloranta, 1997; Åkesson et al., 2004; Michaux and Djordjevic, 2005; Parra Galvez, 2011; Kim, 2012). بررسی ویژگی‌های شکست و لرزه‌ای مواد معدنی امری بسیار ضروری در فرایندهای بهینه‌سازی عملیات معدنکاری است. تاکنون مطالعات مناسبی در زمینه بررسی اثر اکسیدهای آهن بر ویژگی‌های مکانیکی و لرزه‌ای این ماده معدنی با اهمیت صورت نگرفته است. همان‌طور که اشاره شد این نوع مطالعات می‌تواند کمک بسیار مهمی در عملیات انفجار و خردایش مکانیکی (سنگ‌شکنی و آسیا) کند. هدف از این پژوهش بررسی اثر کانی‌های مگنتیت و هماتیت بر ویژگی‌های مکانیکی و لرزه‌ای و تأثیر آنها بر ویژگی‌های شکست ماده معدنی کانه‌های آهن است.

۲- معرفی معدن مورد مطالعه

معدن سنگ آهن چادرملو یکی از معادن مهم روباز کشور است. محدوده معدن چادرملو در خاور ایران مرکزی، در استان یزد و در عرض جغرافیایی ۱۵° ۳۳ تا ۳۰° ۳۲ و طول جغرافیایی ۱۵° ۵۵ تا ۴۵° ۴۵ در ۴۵ کیلومتری خاور خراتق و ۱۶۵ کیلومتری خاور یزد جای گرفته است. در حال حاضر عملیات معدنکاری در حال انجام و پیت معدن در حال گسترش بوده که قطر تقریبی آن ۱۲۰۰ متر و بیشینه ارتفاع دیواره آن ۳۰۰ متر است. کانسنگ اصلی معدن سنگ آهن چادرملو توسط سنگ‌های آذرین و دگرگونی دربر گرفته شده است. سنگ‌های آذرین شامل دیوریت، گابرو، دیاباز، گرانیت و ریولیت و سنگ‌های دگرگونی شامل میکاشیست، مرمر و کوارتزیت است. سازنده‌های سنگی یاد شده را برشی آذرآواری متشکل از دانه‌های گوشه‌دار مگنتیت، هماتیت و سنگ‌های باطله دربر می‌گیرد و در پایان همه آنها به وسیله نهشته‌های کوهرفتی و آبرفتی دوران چهارم پوشیده می‌شوند (Mohammad Torab, 2008; Sabet-Mobarhan-Talab et al., 2015).

به‌طور کلی کانسار سنگ آهن در معدن چادرملو از دو نوع کانی اصلی مگنتیت و هماتیت تشکیل شده است. مطالعات مقاطع میکروسکوپی صورت گرفته در

در بررسی‌های صورت گرفته میان مقاومت فشاری و سرعت انتشار موج P توسط پژوهشگران مختلف، این دو متغیر دارای ارتباط مستقیم و در بیشتر موارد از نوع درجه یک هستند. به عبارت دیگر، با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره، سرعت انتشار موج P نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد (Goktan, 1988; Tuğrul and Zarif, 1999; Yasar and Erdogan, 2004; Khandelwal and Singh, 2009; Diamantis, et al., 2009; Sharma and Singh, 2011). همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۱۰ دیده می‌شود؛ ارتباط میان درصد مگنتیت با متغیرهای مقاومت فشاری تک‌محوره و سرعت انتشار موج P به صورت خطی است که این امر افزون بر تأیید رابطه خطی مقاومت فشاری تک‌محوره با سرعت انتشار موج P، نشان‌دهنده اثر معنی‌دار مگنتیت درصد با مقاومت فشاری تک‌محوره نیز است.

۴- بررسی تأثیر کانه‌های آهن بر نرم‌شدگی ناشی از انفجار

به‌طور کلی مواد معدنی بر پایه عیار، جنس زمین‌شناسی و ویژگی‌های شیمیایی (مانند درصد سولفور)، ژئومکانیکی و شکست تقسیم‌بندی می‌شود. از میان موارد یاد شده، ویژگی‌های شکست سنگ/ ماده معدنی برای طراحی و بهینه‌سازی عملیات معدن تا کارخانه فرآوری بسیار مهم‌تر است. این ویژگی‌های برای عملیات انفجار متفاوت از ویژگی‌هایی است که برای عملیات آسیا و سنگ‌شکنی در نظر گرفته می‌شوند. برای درک این تفاوت می‌توان به متغیرهای تأثیرگذار بر ویژگی‌های شکست در عملیات انفجار و خردایش مکانیکی اشاره کرد. در خردایش ناشی از انفجار، ساختار و ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ از متغیرهای بسیار مهم هستند؛ حال آنکه شبکه میکروشکست‌ها و نرم‌شدگی، آماده‌سازی اولیه، کانی‌شناسی، اندازه دانه و ویژگی‌های دانه در عملیات آسیا و سنگ‌شکنی اهمیت دارند (Kojovic et al., 1995; Kanchibotla et al., 1998; Kojovic, 2005; Michaux and Djordjevic, 2005).

نرم‌شدگی، فرایند کاهش مقاومت ماده معدنی و یا به عبارت دیگر تغییر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ به دلیل گستردگی ترک‌های اولیه و ایجاد ریزترک‌های ناشی از اعمال نیرو تعریف می‌شود. انفجار به عنوان یکی از عوامل اصلی برای نرم‌شدگی مواد معدنی است. به‌طور کلی نرم‌شدگی در اثر دو عامل در مواد معدنی تشکیل می‌شود. عامل اول پدیده‌های زمین‌شناسی همچون تشکیل سنگ‌ها، زمین‌لرزه‌ها، فوران‌های آتشفشانی یا انقباضات گرمایی است که ریزشکست و درشت‌شکست‌هایی را درون توده سنگ ایجاد می‌کند. عامل دوم انفجار است که با انتقال تنش سبب ایجاد ریزشکست و درشت‌شکست‌هایی در سنگ می‌شود. به‌طور کلی عامل‌های اصلی مؤثر بر شکل شکستگی‌ها و در حالت کلی نرم‌شدگی شامل تنش ایجاد شده، ساختار کانی‌شناسی، بافت، ویژگی‌های مکانیکی و الاستیکی سنگ و تخلخل طبیعی یا ترک‌های اولیه است (Kern and Wenk, 1985; Jern, 2002; Takemura et al., 2003; Åkesson et al., 2004; Liu et al., 2006).

(Liu et al., 2006)؛ Åkesson et al. (2004) و Omar et al. (2009) عنوان کردند که بافت و کانی‌های تشکیل‌دهنده مواد معدنی یکی از عامل‌های اصلی در تشکیل ریزترک‌های درون مواد معدنی در اثر اعمال تنش است. این امر اثبات می‌کند که بافت و کانی‌های تشکیل‌دهنده می‌توانند مقاومت مواد معدنی را نسبت به نرم‌کنندگی ناشی از تنش کنترل کنند. این پژوهش‌ها به ارتباط میان کانی‌شناسی و الگوهای ریزشکستگی کمک می‌کند.

(Liu et al., 2006) گزارش کردند که تنش‌های بالاتری برای شکل‌گیری ریزترک‌ها در گرانیت دانه‌ریز در مقایسه با گرانیت دانه‌درشت مورد نیاز است. این امر اثبات می‌کند که بافت می‌تواند مقاومت مواد معدنی را نسبت به نرم‌کنندگی ناشی از تنش کنترل کند. (Ozkahraman, 2010) بیان کرد که شمار شکست‌ها ارتباط مستقیمی با اندازه دانه‌ها دارد؛ با افزایش اندازه دانه‌ها مقاومت نسبی مواد معدنی و میزان انرژی مورد نیاز برای خردایش کاهش می‌یابد. (Jern, 2002) با توجه به ویژگی‌های سنگ به بررسی متغیرهای مؤثر بر مقاومت سنگ و انتشار ریزشکست‌ها پرداخت. بررسی‌های

معدن سنگ آهن چادرمو نشان می‌دهد که بلورهای مگنتیت دارای ساختار مکعبی و بلورهای هماتیت دارای ساختاری تیغه‌ای است. در شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب بلورهای تیغه‌ای هماتیت و بلورهای مکعبی مگنتیت به همراه سه رخ موجود در کانسار سنگ آهن معدن چادرمو مشخص شده است. همچنین به همراه کانی‌های اصلی کانسار سنگ آهن چادرمو، کانی‌های فرعی همچون پریت، آپاتیت، کوارتز و فلدسپار نیز وجود دارد. در شکل ۳ کانی‌های اصلی سنگ آهن به همراه کانی‌های فرعی دیده می‌شود.

۳- بررسی تأثیر کانی‌های هماتیت و مگنتیت بر ویژگی‌های ژئومکانیکی و لرزه‌ای کانه آهن

در این پژوهش ابتدا نمونه‌های سنگ آهن با درصد مگنتیت و هماتیت متفاوت از بخش‌های مختلف معدن سنگ آهن چادرمو گردآوری شد. به منظور بررسی دقیق اثر اکسیدهای آهن بر ویژگی‌های مکانیکی و لرزه‌ای، نمونه‌های گردآوری شده بدون باطله و شامل کانی هماتیت و مگنتیت بودند. با توجه به اینکه ویژگی‌های ژئومکانیکی و لرزه‌ای مواد معدنی تحت تأثیر کانی‌های تشکیل‌دهنده آنهاست؛ بنابراین آزمایش‌های مکانیکی و لرزه‌ای نمونه‌های به‌دست آمده از مغزه‌های حفاری بر پایه درصد مگنتیت انجام شد. این آزمایش‌ها شامل مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، مقاومت کششی تک‌محوره (T)، مدول الاستیک (E)، نسبت پواسون (ν)، تخلخل، میزان جذب آب، سرعت انتشار موج P (V_p) و سرعت انتشار موج S (V_s) است. در شکل‌های ۴ تا ۱۱ ارتباط میان درصد مگنتیت با متغیرهای یاد شده نشان داده شده است. در جدول ۱ ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطای معادلات میان درصد مگنتیت و متغیرهای ژئومکانیکی مشخص شده است. همان‌طور که در شکل‌های یاد شده دیده می‌شود؛ متغیر درصد مگنتیت به‌طور معنی‌داری بر متغیرهای مکانیکی مورد آزمایش در این پژوهش تأثیر دارد. از میان این متغیرها مقاومت فشاری تک‌محوره مدول الاستیک، تخلخل و میزان جذب آب بیشترین ضریب همبستگی با درصد مگنتیت را دارند. همچنین متغیرهای مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی تک‌محوره، مدول الاستیک، سرعت انتشار موج P و سرعت موج انتشار S دارای ارتباط مستقیم و متغیرهای نسبت پواسون، تخلخل و میزان جذب دارای ارتباط وارون با درصد مگنتیت هستند.

(Morales et al., 2008) سرعت انتشار موج‌های P و S را در راستاهای مختلفی برای کانی‌های هماتیت، مگنتیت و کوارتز با استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی (EBSD/SEM) اندازه‌گیری کردند. آنها نشان دادند که سرعت انتشار موج P در کانی مگنتیت نسبت به کانی‌های هماتیت و کوارتز بیشتر و سرعت انتشار موج‌های برشی کمینه و بیشینه (S_1 و S_2) در بیشترین مقدار به ترتیب برای کانی‌های کوارتز، هماتیت و مگنتیت است (جدول‌های ۲ و ۳). آنها همچنین نشان دادند که آنیزوتروپی سرعت انتشار موج‌های P و برشی کمینه و بیشینه (S_1 و S_2) کانی مگنتیت کمتر از کانی هماتیت است؛ که این امر کمتر بودن آنیزوتروپی کانی مگنتیت نسبت به کانی هماتیت را نشان می‌دهد. یکی از دلایل کاهش آنیزوتروپی، نبود یا ضعیف بودن جهت مقدم کریستالوگرافیک در کانی‌ها تشکیل‌دهنده مواد معدنی و یا به عبارت دیگر آنیزوتروپی آنهاست. از دلایل دیگر می‌توان به وجود کانی‌های کویبک مگنتیت اشاره کرد که این امر می‌تواند سبب کاهش آنیزوتروپی و افزایش سرعت انتشار موج P شود (Morales et al., 2008). افزون بر این، وجود کانی‌های کویبک و فشرده مگنتیت سبب کاهش تخلخل در کانه‌های آهن و افزایش چگالی آن می‌شود. در شکل ۱۲ بیشینه، کمینه و میانگین چگالی سنگ آهن مگنتیت و هماتیت معدن سنگ آهن چادرمو برای ۶۲۷ دسته داده مشخص شده است. همچنین افزایش چگالی سبب افزایش عیار آهن به دلیل کاهش تخلخل می‌شود که این مقدار در کانی‌های مگنتیت و هماتیت معدن سنگ آهن چادرمو به ترتیب $60/8$ و $57/6$ درصد است. با کاهش تخلخل و افزایش چگالی، جذب آب در نمونه‌هایی با درصد مگنتیت بالا، افزایش می‌یابد که این امر در شکل‌های ۸ و ۹ نیز به روشنی مشخص است.

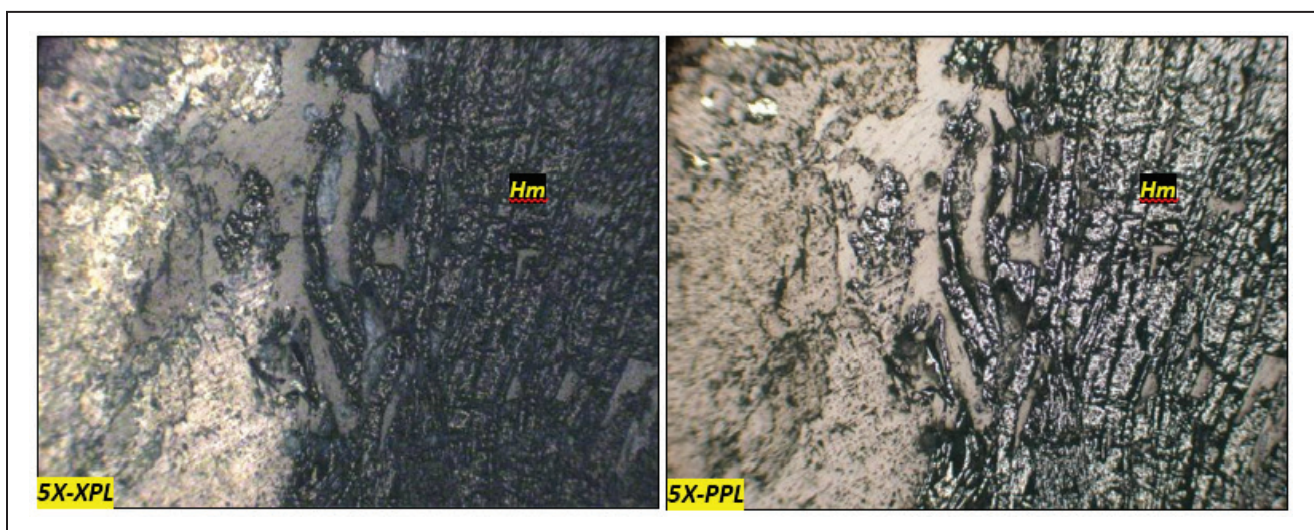
هستند که اندازه‌گیری مستقیم از ریزشکست‌ها را فراهم می‌کند. از دیگر روش‌ها، اندازه‌گیری غیرمستقیم ریزشکست‌هاست که برپایه تغییر ویژگی‌های فیزیکی همچون اندازه‌گیری سرعت موج‌های S و P، آزمایش باند و آزمایش سقوط وزنه، گسترش داده شده‌اند. روش‌های مستقیم در تجزیه و تحلیل کوچک‌مقیاس بسیار مناسب‌تر است و اندازه‌گیری دقیقی از ریزترک‌ها را تأمین می‌کند. با این وجود در این روش‌ها حجم داده‌ها برای تجزیه و تحلیل کم و محدود به نمونه‌هایی با اندازه کوچک است. به بیان دیگر روش‌های غیرمستقیم برای تجزیه و تحلیل بزرگ‌مقیاس با حجم سنگ زیاد، مناسب است. در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از انفجار دو نمونه، از روش اندازه‌گیری غیرمستقیم ریزترک‌ها و نرم‌شدگی استفاده شد. با توجه به اندازه‌گیری اندیس کار باند در استوک پایل‌های ورودی به آسیا معدن سنگ آهن چادرمولو، ارتباط اندیس کار باند و میزان درصد مگنتیت موجود در استوک پایل‌ها به عنوان کانی اصلی تشکیل‌دهنده سنگ آهن پرداخته شد. در شکل ۱۶ ارتباط میان درصد مگنتیت موجود در استوک پایل‌ها و اندیس کار باند آنها در ۴۳۰ سری داده مشخص شده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ دیده می‌شود با افزایش درصد مگنتیت، اندیس کار باند کاهش می‌یابد. کاهش اندیس کار باند سبب کاهش میزان انرژی مصرفی در فرایند خردایش مکانیکی و در نتیجه سبب کاهش هزینه‌های فرآوری می‌شود. همچنین همان‌طور که در شکل ۱۷ دیده می‌شود در صورتی که درصد مگنتیت بار ورودی به کارخانه در معدن سنگ آهن چادرمولو از ۲۵ تا ۵۰ درصد افزایش یابد، میزان مصرف انرژی از ۷۰ کیلووات بر ساعت به ۴۰ کیلووات بر ساعت کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

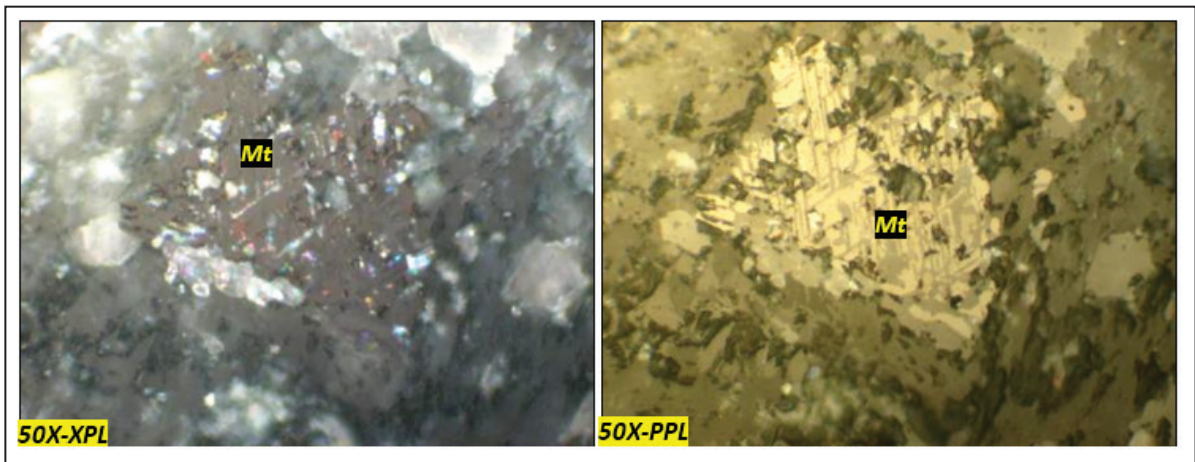
عوامل مؤثر بر ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی اکسیدهای آهن بررسی شد. در این پژوهش ابتدا مقاطع میکروسکوپی اکسیدهای آهن در معدن سنگ آهن چادرمولو در نورهای مختلف مطالعه و سپس متغیرهای مکانیکی و فیزیکی کانه‌های آهن نسبت به درصد مگنتیت آزمایش و بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش درصد مگنتیت، متغیرهای مقاومت فشاری، کششی تک‌محوره، مدول یانگ، سرعت انتشار موج‌های P و S و افزایش و متغیرهای نسبت پواسون، تخلخل و جذب آب کاهش می‌یابند. همچنین نتایج نشان داد با افزایش درصد مگنتیت، نرم‌شدگی ناشی از انفجار نیز افزایش می‌یابد که این امر سبب کاهش هزینه‌های بسیار زیاد خردایش مکانیکی در معدن سنگ آهن چادرمولو می‌شود.

ایشان نشان می‌داد که اندازه دانه، تقارن مرزی دانه، مقاومت مرزی دانه، صفحات کلیواژ و سختی همگی بر مقاومت سنگ و بر انتشار ریزشکست‌ها اثر دارد. مطابق با این بررسی، وجود مواد معدنی سخت‌تر، ریزشکستگی را افزایش می‌دهد. حال آنکه سنگ‌های تشکیل شده از دانه‌های ریزتر - دانه‌های کوچک‌تر سبب افزایش مقاومت سنگ می‌شود - استعداد کمتری برای نرم‌شدگی دارد. همچنین دانه‌های دارای الگوهای نامنظم، مقاومت بیشتری نسبت به دانه‌های با ساختارهای منظم دارند. در این پژوهش، به منظور بررسی گسترش ریزترک‌ها و ترک‌ها در کانه‌های آهن با درصد مختلف کانی‌های مگنتیت و هماتیت، دو مغزه با قطر ۶۵ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر توسط فنیله انفجاری ۵ گرم بر متر مورد انفجار قرار گرفت. به منظور رعایت شرایط مرزی و بازتاب نداشتن موج ناشی از انفجار از سطح آزاد، نمونه‌های سنگی توسط مواد الاستیک با سبترای ۷ میلی‌متر پوشش داده شدند. در جدول ۴ و شکل ۱۳ ویژگی‌های نمونه‌های مورد آزمایش ارائه شده است.

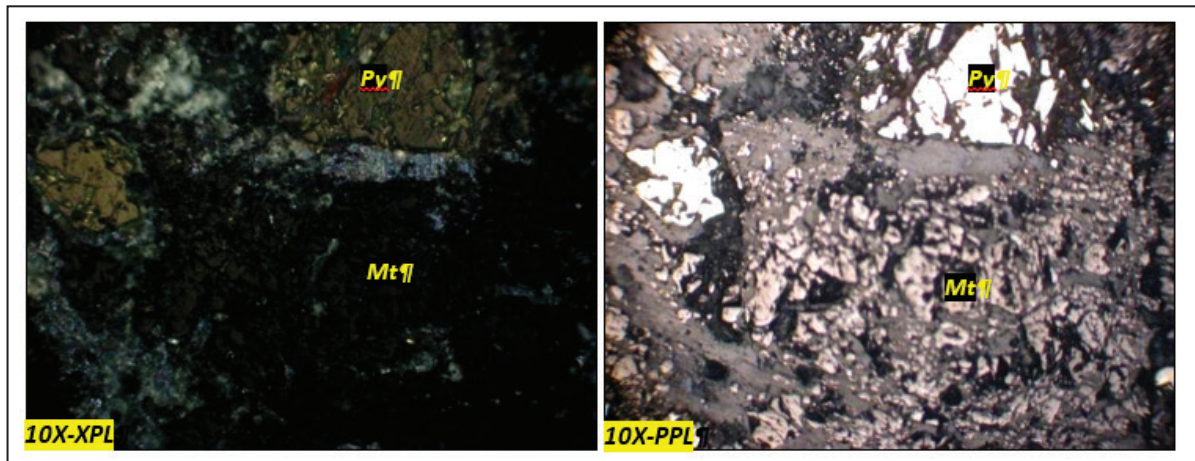
پس از انفجار دو نمونه مشخص شد که نمونه با درصد مگنتیت کمتر ترک‌های کمتری دارد. در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ میزان ترک‌های ناشی از انفجار نشان داده شده است. دلیل این رفتار بالا بودن سختی مگنتیت نسبت به هماتیت است. سختی مواد معدنی، مقاومت ماده معدنی در برابر تغییر شکل پلاستیک ناشی از فرورفتگی تعریف می‌شود. (Chicot et al., 2011) بررسی‌هایی روی سختی کانی‌های مگنتیت، هماتیت و گوتیت توسط روش ابزاربندی فرورفتگی انجام دادند. سختی مواد معدنی، مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک توسط فرورفتگی تعریف می‌شود و واحد آن همانند تنش مگاپاسکال و این متغیر تابعی از مدول برشی است. آنها در این پژوهش نشان دادند که سختی کانی مگنتیت نسبت به کانی هماتیت و گوتیت دارای مقدار بیشتری است و در برابر فرورفتگی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد. آنها دلیل این امر را ساختار مکعبی کانی مگنتیت دانستند که سبب افزایش ایزوتروپی ویژگی‌های الاستیک در مقایسه با کانی‌های غیرمکعبی (هماتیت) می‌شود (Chicot et al., 2011). ساختار مکعبی و بالا بودن ایزوتروپی ویژگی‌های الاستیک سبب افزایش شکنندگی و ترک‌های ناشی از انفجار در مگنتیت می‌شود. یک ماده معدنی شکننده زمانی که تحت تأثیر تنش قرار می‌گیرد، بدون تغییر شکل پلاستیک مهم دچار شکست و گسیختگی می‌شود. مواد معدنی شکننده حتی با مقاومت بالا انرژی به نسبت کمی پیش از شکست جذب می‌کند. در بررسی ریزترک‌ها و نرم‌شدگی دو عامل باید بررسی شود. عامل اول اندازه‌گیری آنها و دومین عامل بررسی اثر آنها بر تولید، مصرف انرژی و هزینه‌هاست. تصویربرداری میکروسکوپی و توپوگرافی پرتو ایکس تنها روش‌هایی



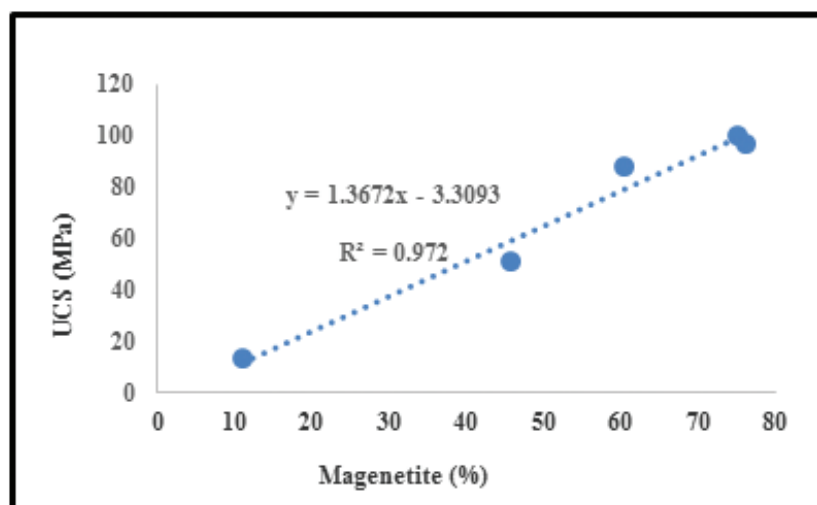
شکل ۱- نمایی از بلورهای تیغه‌ای کانی هماتیت در مقاطع میکروسکوپی با نورهای مختلف (هماتیت: Hm).



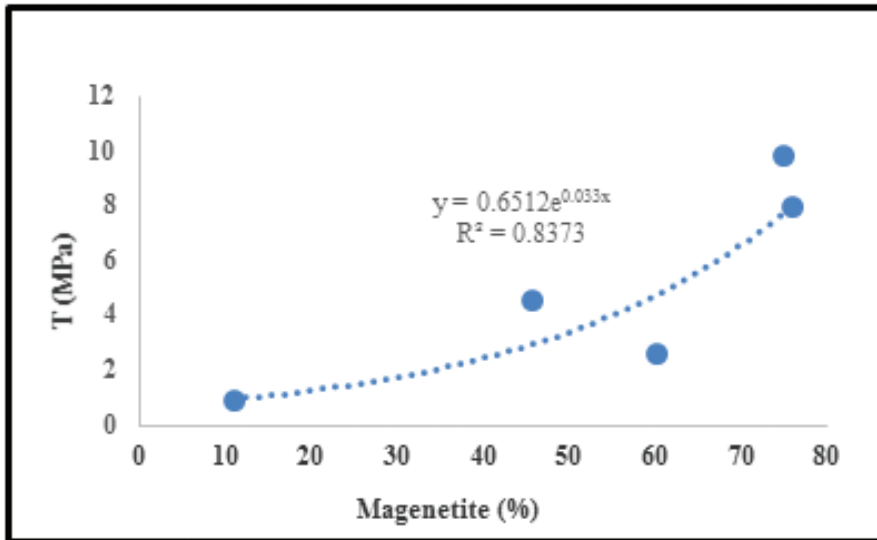
شکل ۲- نمایی از بلورهای مگنتیت و سه جهت رخ موجود در آن در مقاطع میکروسکوپی با نورهای مختلف (مگنتیت: Mt).



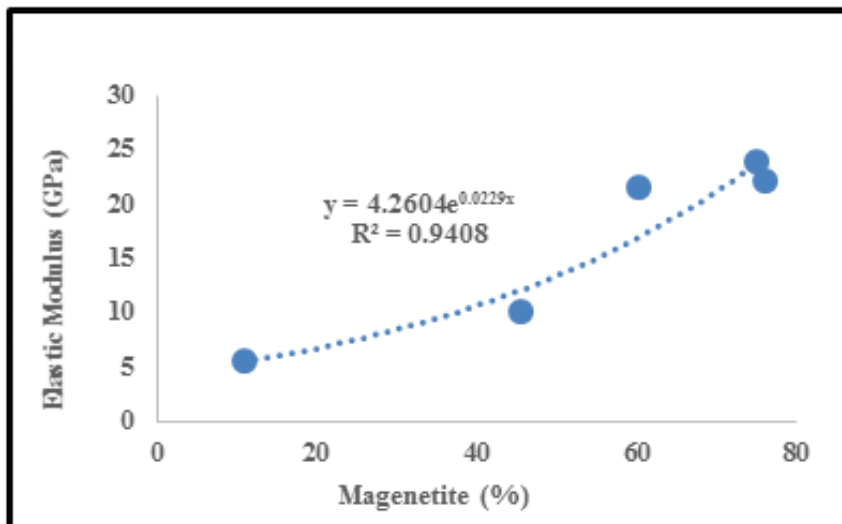
شکل ۳- نمایی از بلورهای مگنتیت و پیریت در مقاطع میکروسکوپی با نورهای مختلف (مگنتیت: Mt پیریت: Py).



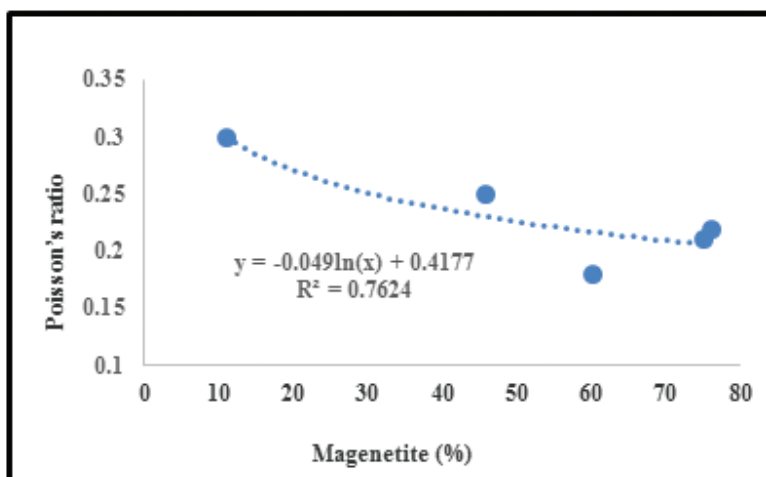
شکل ۴- ارتباط میان درصد مگنتیت و مقاومت فشاری تک‌محوره.



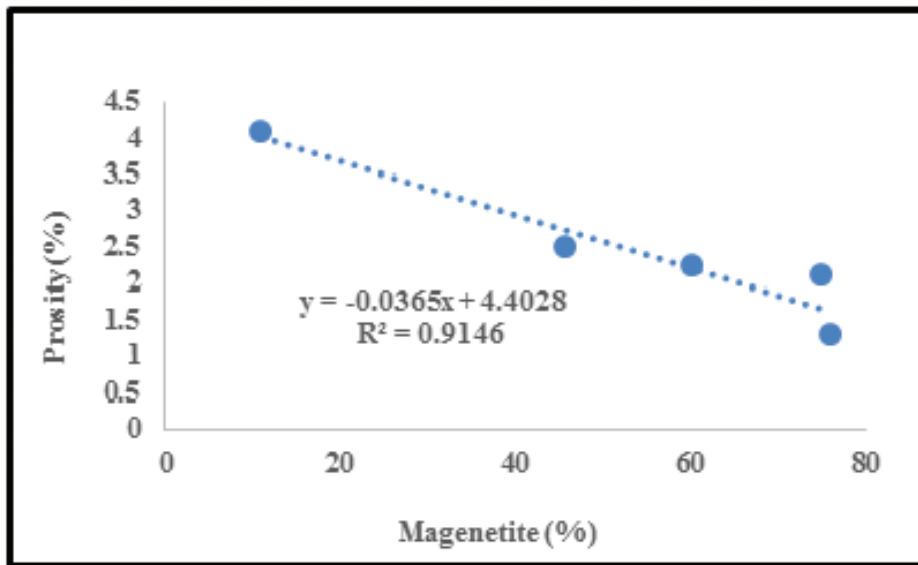
شکل ۵- ارتباط میان درصد مگنتیت و مقاومت کششی تک محوره.



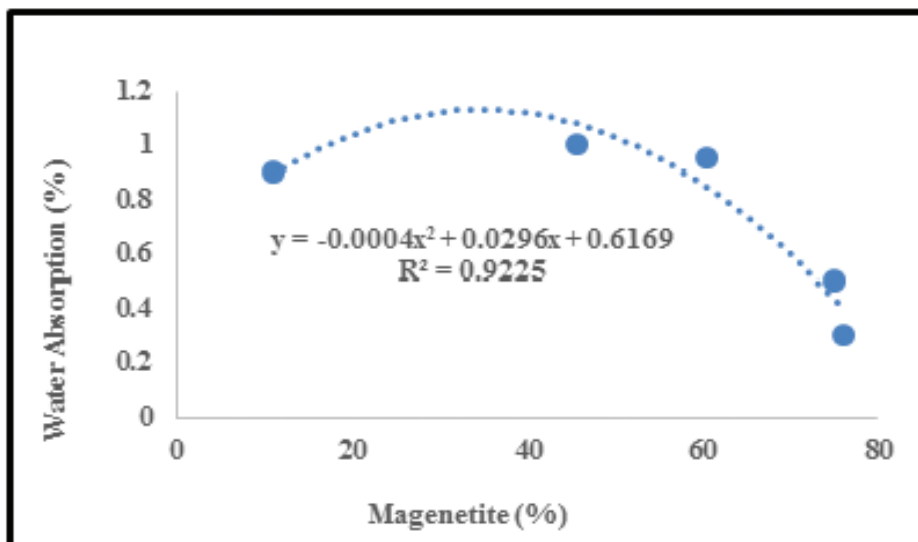
شکل ۶- ارتباط میان درصد مگنتیت و مدول الاستیک.



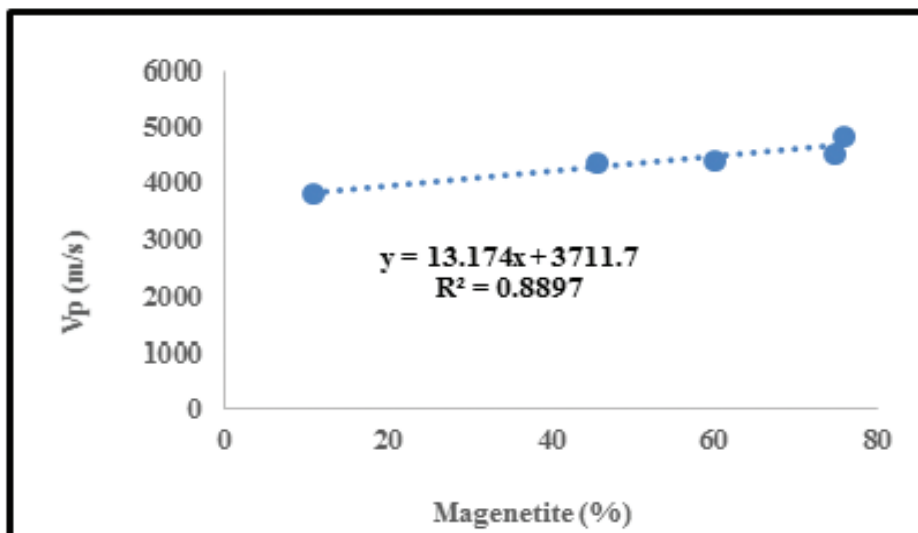
شکل ۷- ارتباط میان درصد مگنتیت و نسبت پواسون.



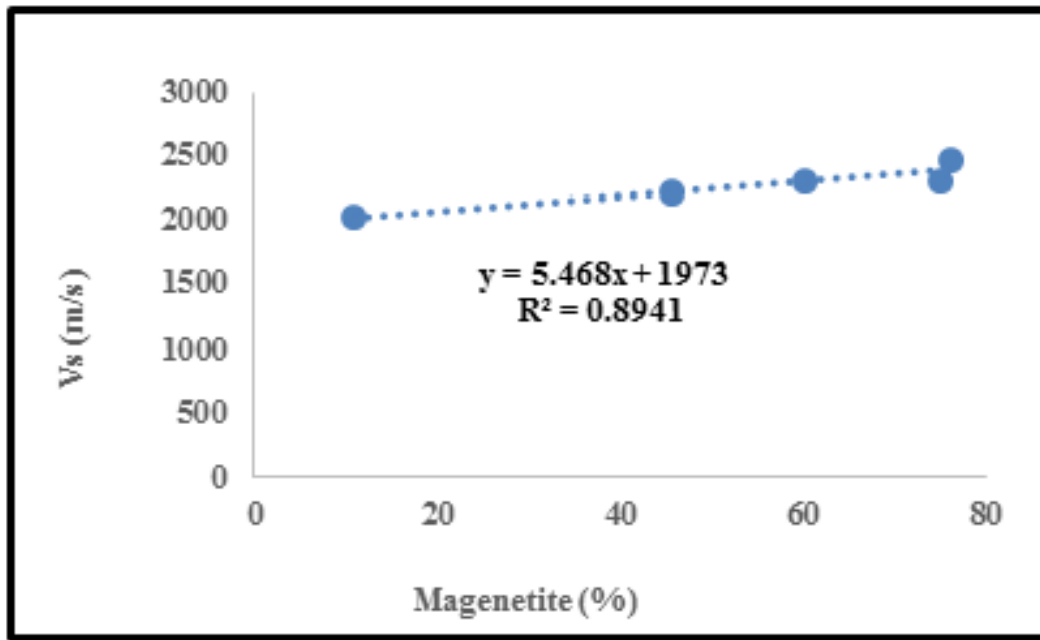
شکل ۸- ارتباط میان درصد مگنتیت و تخلخل.



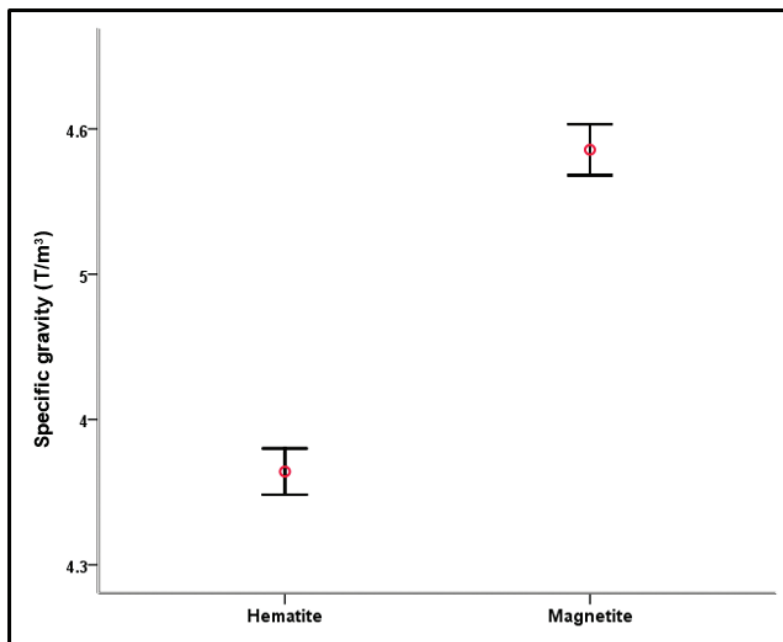
شکل ۹- ارتباط میان درصد مگنتیت و میزان جذب آب.



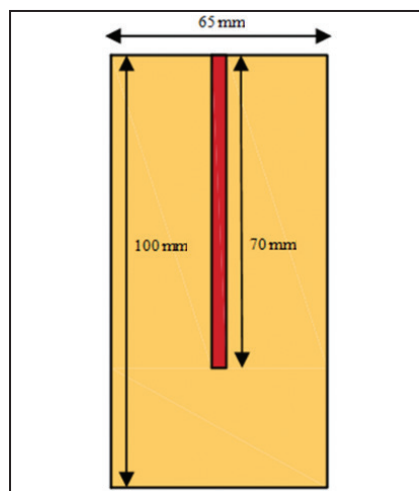
شکل ۱۰- ارتباط میان درصد مگنتیت و سرعت انتشار موج P.



شکل ۱۱- ارتباط میان درصد مگنتیت و سرعت انتشار موج S.



شکل ۱۲- بیشینه، کمینه و میانگین وزن مخصوص سنگ آهن مگنتیت و هماتیت معدن سنگ آهن چادرملو.



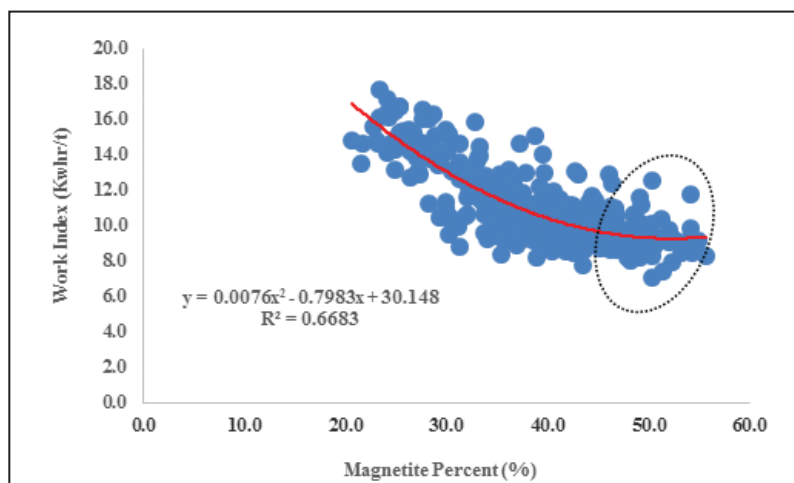
شکل ۱۳- ویژگی‌های نمونه مورد آزمایش (شامل فته انفجاری و نمونه سنگی).



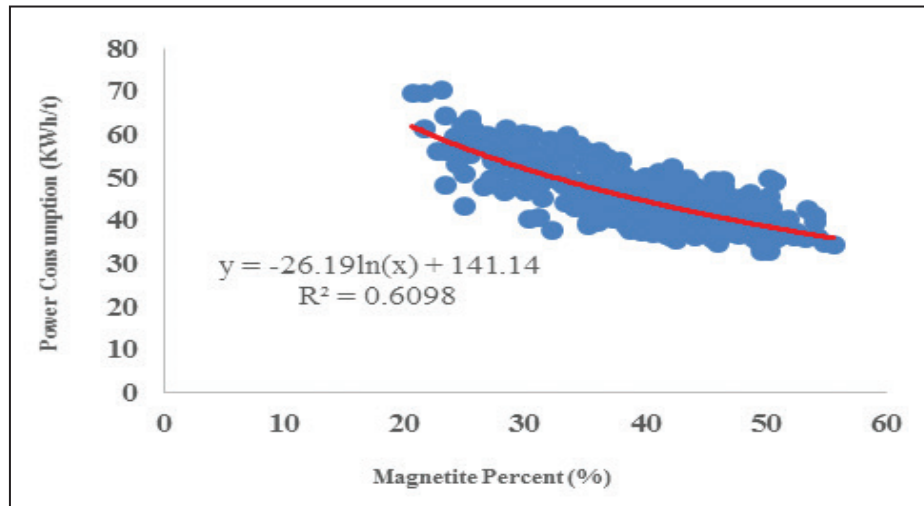
شکل ۱۴- تعداد ترک‌های ایجاد شده در نمونه با درصد مگنتیت ۴۲ درصد.



شکل ۱۵- تعداد ترک‌های ایجاد شده در نمونه با درصد مگنتیت ۷۳ درصد.



شکل ۱۶- ارتباط میان درصد مگنتیت و اندیس کار.



شکل ۱۷- ارتباط میان درصد مگنتیت و میزان مصرف انرژی در آسیابها، معدن سنگ آهن چادرمولو.

جدول ۱- ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خط میان درصد مگنتیت و متغیرهای ژئومکانیکی.

	مقاومت فشاری تک محوره	مقاومت کششی	ضریب بواسون	مدول الاستیک	میزان جذب آب	تخلخل	سرعت انتشار موج P	سرعت انتشار موج S
	(MPa)	(MPa)		(GPa)	(%)	(%)	(m/s)	(m/s)
R ²	۰/۹۷۲	۰/۸۳۷	۰/۷۶۲	۰/۹۴۰	۰/۹۲۲	۰/۹۱۴	۰/۸۸۹	۰/۸۹۴
RMSE	۵/۵۱	۱/۵۲	۰/۰۴	۲/۶۴	۰/۱۳	۰/۲۷	۱۱۱	۱۶۳

جدول ۲- سرعت انتشار موج P و آنیزوتروپی برای کانی‌های خالص مگنتیت، هماتیت و کوارتز (Morales et al., 2008).

کوارتز	هماتیت	مگنتیت	بزرگی امواج لرزه‌ای
۷/۰۳	۶/۸۶	۷/۴۷	پیشینه سرعت انتشار موج P (km/s)
۵/۳۲	۶/۱۴	۷/۱۶	کمینه سرعت انتشار موج P (km/s)
۲۷/۲	۱۱/۱	۴/۲	آنیزوتروپی سرعت انتشار موج P (%)
۲/۶۵	۵/۲۵	۵/۲۶	چگالی (g/cm ³)

جدول ۳- سرعت انتشار موج P و آنیزوتروپی در نمونه‌هایی از کانه‌های آهن دارای مگنتیت، هماتیت و کوارتز (Morales et al., 2008).

شماره	سرعت انتشار موج P	سرعت انتشار موج S	آنیزوتروپی سرعت انتشار موج P	وزن مخصوص	مگنتیت	هماتیت	کوارتز
	(km/s)	(km/s)	(%)	(Kg/m ³)	(%)	(%)	(%)
۱	۶/۷۶	۶/۷۲	۰/۵۰	۵۲۵۷	۳۷/۸۵	۶۷/۱۵	۰/۰۰
۲	۶/۶۷	۶/۶۰	۱/۱۰	۵۲۵۶	۲۷/۱۰	۷۲/۹۰	۰/۰۰
۳	۶/۶۷	۶/۵۵	۱/۸۰	۵۲۵۶	۱۴/۷۴	۸۵/۲۶	۰/۰۰
۴	۶/۷۲	۶/۴۹	۳/۴۰	۵۲۵۶	۱۳/۴۳	۸۶/۵۷	۰/۰۰
۵	۶/۱۶	۵/۹۹	۲/۷۰	۳۹۵۲	۰/۰۰	۵۰	۵۰

جدول ۴- ویژگی‌های نمونه مورد آزمایش.

شماره	هماتیت	مگنتیت	ارتفاع خرج	فتیله انفجاری	قطر چال	ارتفاع	قطر
	(%)	(%)	(mm)	(g/m)	(mm)	(mm)	(mm)
نمونه ۱	۲۷	۷۳	۷۰	۵	۶/۵	۱۰۰	۶۵
نمونه ۲	۵۸	۴۲	۷۰	۵	۶/۵	۱۰۰	۶۵

References

- Åkesson, U., Hansson, J. and Stigh, J., 2004- Characterisation of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading. *Engineering Geology* 72(1-2): 131–142.
- Chicot, D., Mendoza, J., Zaoui, a., Louis, G., Lepingle, V., Roudet, F. and Lesage, J., 2011- Mechanical properties of magnetite (Fe₃O₄), hematite (α-Fe₂O₃) and goethite (α-FeO•OH) by instrumented indentation and molecular dynamics analysis. *Materials Chemistry and Physics* 129(3): 862–870.
- Clout, J. M. F. and Manuel, J. R., 2015- *Processing and Environmental Sustainability*, Elsevier Ltd.
- Diamantis, K., Gartzos, E. and Migiros, G., 2009- Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: Test results and empirical relations. *Engineering Geology* 108(3-4): 199–207.
- Eloranta, J., 1997- The efficiency of blasting verses crushing and grinding. *Proceedings of 23th annual general conference on explosives and blasting technique*, Las Vegas, USA, February 2-5, pp 157-163.
- Goktan, R. M., 1988- Theoretical and practical analysis of rock rippability. PhD Thesis, Istanbul Technical University.
- Jern, M., 2002- Micro and macro crack growth as a result of blasting. *Proceedings of the 7th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*. Beijing, China, August 11-15, pp 155-161, pp. 155-161.
- Kanchibotla, S. S., Valery, W. and Morrell, S., 1998- Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding. *Proceedings of the Explo 1999 conference*, Carlton, Victoria, Australian, pp. 137-144.
- Kern, H. and Wenk, H. R., 1985- Preferred Orientation in Deformed Metal and Rocks. *Preferred Orientation in Deformed Metal and Rocks*. Elsevier.
- Khandelwal, M. and Singh, T. N., 2009- Correlating static properties of coal measures rocks with P-wave velocity. *International Journal of Coal Geology* 79(1-2): 55–60.
- Kim, K., 2012- Rock fracturing and mine to mill optimization. PhD thesis, Department of Mining and Geological Engineering, University of Arizona, USA.
- Kojovic, T., 2005- Influence of aggregate stemming in blasting on the SAG mill performance. *Minerals Engineering* 18(15): 1398–1404.
- Kojovic, T., Michaux, S. and McKenzie, C., 1995- Impact of blast fragmentation on crushing and screening operations in quarrying. *Proceeding of EXPLO 1995 Conference*, Brisbane, Australia, pp. 427-436.
- Liu, S., Faisal Anwar, A. H. M., Cheol Kim, B. and Ichikawa, Y., 2006- Observation of microcracks in granite using a confocal laser scanning microscope. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43(8): 1293–1305.
- Michaux, S. and Djordjevic, N., 2005- Influence of explosive energy on the strength of the rock fragments and SAG mill throughput. *Minerals Engineering* 18(4): 439–448.
- Morales, L. F. G., Lagoeiro, L. E. and Endo, I., 2008- First results on the LPO-derived seismic properties of iron ores from the Quadrilátero Ferrífero region, southeastern Brazil. *Tectonophysics* 460(1-4): 21–33.
- Morgan, J. W. and Anders, E., 1980- Chemical composition of Earth, Venus, and Mercury. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 77: 6973–6977.
- Ohmoto, H., 2003- Nonredox transformations of magnetite-hematite in hydrothermal systems. *Economic Geology*, 98: 299–304.
- Omar, H., Pauzi, N. I. M., Abu-Shariah, M., Yusof, Z. M. and Maail, S. B., 2009- Microcracks pattern and the degree of weathering in granite. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 14 F, Bundle B.
- Ozkahraman, H. T., 2010- Breakage mechanisms and an encouraging correlation between the Bond parameters and the friability value, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 110(3):153-159.
- Parra Galvez, H. I., 2011- Analysis of the state of the art of blast-induced fragment conditioning. *Minerals Engineering* 24(14): 1638–1640.
- Sabet-Mobarhan-Talab, A., Alinia, F., Ghannadpour, S. S. and Hezarkhani, A., 2015- Geology, geochemistry, and some genetic discussion of the Chador-Malu iron oxide-apatite deposit, Bafq District, Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 8(10): 8399-8418.
- Sharma, P. K. and Singh, T. N., 2011- A correlation between Schmidt hammer rebound numbers with impact strength index, slake durability index and P-wave velocity. *International Journal of Earth Sciences* 100(1): 189–195.
- Takemura, T., Golshani, A., Oda, M. and Suzuki, K., 2003- Preferred orientations of open microcracks in granite and their relation with anisotropic elasticity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40(4): 443–454.
- Mohammad Torab, F., 2008- Geochemistry and metallogeny of magnetite- apatite deposits of the Bafq Mining District, Central Iran. PhD Thesis, Clausthal University of Technology, Germany.
- Tuğrul, A. and Zarif, I., 1999- Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology* 51(4), 303–317.
- Waychunas, G. A., 1991- Crystal chemistry of oxides and oxyhydroxides. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 25(1): 11-68.
- Yasar, E. and Erdogan, Y., 2004- Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(5): 871-875.

Investigation of effect of magnetite percent on geomechanical and seismic parameters: case study Chadormalu ore deposit

H. Inanloo Arabi Shad^{1*}, F. Sereshki², M. Ataei³ and M.d Karamoozian²

¹PhD. Student, Department of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

²Associate Professor, Department of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

³Professor, Department of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 2016 October 20

Accepted: 2017 January 17

Abstract

Investigation of effective parameters on mechanical and physical properties of ore deposits is very important in determination of their rock mechanic and failure properties. This investigation can be suitable in different mining operations such as drilling, blasting, comminution and mine planning. In this paper, at first, microscopic sections were studied under different lights in Chadormalu iron ore mine. Then geomechanical and seismic properties as well as failure behaviour of the oxide ores (magnetite and hematite) were studied. The results demonstrated that the percentage of magnetite has a direct relationship with uniaxial compressive strength, tensile strength, Young modulus and P and S wave velocities; and the magnetite percentage has an inverse relationship with Poisson's ratio, porosity and saturation. Finally, the relation between magnetite percent and blast-induced preconditioning was investigated. The results showed that increasing the percentage of magnetite will increase the blast-induced preconditioning and increasing preconditioning decreased comminution processes in the Chadormalu iron ore mine. Also increasing the percentage of magnetite in feed of process factory from 25 to 50% decreases the power consumption from 70 (KWh/t) to 40 (KWh/t).

Keywords: Iron oxides deposit, Magnetite percent, Geomechanical parameters, Failure properties, Preconditioning.

For Persian Version see pages 59 to 68

*Corresponding author: H. Inanloo Arabi Shad; E-mail: h.inanloo@shahroodut.ac.ir