ارتباط تخلخل و چگالی بر اندیس بار نقطه‌ای سنگ آهن مگنتیت (مطالعه موردی: معدن سرویان)

مقاله پژوهشی

شبیر ارشدنژاد*، استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد محلات، محلات، ایران
محمد جواد عرب، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحدمحلات، محلات، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: s_arshadnejad@yahoo.com

دریافت: ۹۸/۰٤/۱۵- پذیرش:۹۸/۱۱/۰۵
صفحه٦٦-۵۹

چکیده

یکی از پارامترهای بسیار مهم در تحلیل پایداری شیب نهایی معادن و یا تونل‌ها، پارامترهای مقاومتی سنگ بکر نظیر مقاومت فشاری است. خواص فیزیکی سنگ مانند تخلخل و چگالی به عنوان یکی از پارامترهای فیزیکی در سنگ و تأثیرگذار بر مقاومت آن از اهمیت زیادی برخوردار است. از این رو برقراری رابطه میان خواص فیزیکی و مقاومت سنگ می‌تواند راهکاری ابتکاری و آسان جهت تخمین مقاومت مکانیکی سنگ‌ها باشد. در این مقاله سعی شده با انجام آزمایش‌های ساده صحرایی و برقراری رابطه میان آن‌ها فرمولهایی ارائه شوند که انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی پر هزینه و وقت گیر که گاهی در صحرا ممکن نیست، با آزمایش‌های ساده جایگزین گردد. این آزمایش‌ها بر روی ۳۷ نمونه سنگ آهن مگنتیت با تخلخل و چگالی‌های متفاوت برای هر آزمایش انجام پذیرفته است. نمونه‌ها از معدن سرویان نزدیک دلیجان تهیه شده‌اند. نتایج آزمایش‌ها دوبه‌دو با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته تا تأثیر آن‌ها بر یکدیگر مشخص گردید. در نهایت با ترکیب دو متغیر تخلخل و چگالی به صورت یک متغیر مستقل، معادله‌ای لگاریتمی با ضریب همبستگی ۰/۸۹ پیشنهاد شد.

واژگان کلیدی: تخلخل، چگالی، بار نقطه‌ای

۱- مقدمه

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری از مرسوم‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیکی سنگ بکر است که با وجود ظاهری ساده، انجام دقیق آن بسیار مهم است. این آزمون به عنوان آزمایش پایه در اکثر پروژه‌های مهندسی معدن و عمران انجام گرفته و به ندرت اتفاق می‌افتد که در پروژه‌ای مقاومت فشاری تک محوری مورد نیاز نباشد. اگر چه این آزمون عمدتاً به عنوان شاخصی برای مقایسه سنگ‌ها شناخته می‌شود، لیکن کاربردهای وسیع دیگری نیز در حل مسائل عملی مکانیک سنگ، از جمله معیار گسیختگی هوک و براون و تخمین مدول دگر شکلی توده سنگ پیدا کرده است. به طور کلی عوامل موثر بر مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها به دو گروه عوامل داخلی که به خصوصیات داخلی سنگ از قبیل ترکیب کانی‌شناسی، چگالی، تخلخل، ابعاد و شکل دانه‌ها و عوامل خارجی وابسته به روش آزمایش، شامل شرایط محیطی و شخص آزمایش کننده بستگی دارد. در این میان برای تخمین مقاومت فشاری روش‌هایی نظیر اندیس بار نقطه‌ای و سختی اشمیت به عنوان روش‌هایی ساده، ارزان و سریع بسیار پرکاربرد شده‌اند. بنابراین بررسی ارتباط تجربی بین این

پارامترها به منظور تخمین سریع از مقاومت سنگ می‌تواند برای طراحان و مهندسان بسیار راهگشا باشد. سنگ آهن مگنتیت یکی از مهمترین کانسنگ‌های استراتژیک برای صنایع هر کشور است. اما تاکنون تحقیقات بسیار اندکی در زمینه تخمین پارامترهای مکانیک سنگی این سنگ شده است. از آنجا که وزن حجمی این سنگ با عیار آن ارتباط مستقیمی دارد می‌توان دریافت که وزن حجمی می‌تواند احتمالاً پارامتر مهمی در تشخیص رفتار مکانیکی این سنگ باشد. از طرفی دیگر اندازه‌گیری وزن حجمی سنگ بسیار آسان بوده و اگر بتوان رابطه‌ای بین وزن حجمی و اندیس بار نقطه‌ای و یا سختی اشمیت سنگ پیدا نمود، دارای ارزش و کاربرد فراوانی خواهد بود. تاریخچه مطالعات انجام شده مرتبط با این پژوهش در جدول ۱ آورده شد است.

جدول ۱. تاریخچه مطالعات انجام شده

بنیاوسکی، ۱۹۷۵	مغزه NX (٥٤ میلی‌متر) را مرجع بهتری برای آزمایش قطری دانست و پیشنهاد کرد که آزمایش بار نقطه‌ای روی نمونه‌هایی با قطر کمتر از BX (٤٢ میلی‌متر) انجام نگیرد.
ریچموت، ۱۹٦۸	از آزمایش بار نقطه‌ای برای تعیین مقاومت کششی و شکنندگی نسبی سنگ‌های ترد استفاده نمود و تأثیر ابعاد نمونه روی نتایج آزمایش را مورد بررسی قرار داد. وی برای محاسبه مقاومت کششی، رابطه زیر را پیشنهاد نمود: (۱) $S_t = K_s \frac{P}{h^2} + K_b p$ S_t مقاومت کششی، P بار اعمالی، h فاصله بین نقاط بارگذاری، K_s ضریب شکل و K_b ضریب شکنندگی.
براش و فرانکلین، ۱۹۷۲	با انجام طیف وسیعی از آزمایش‌ها نشان دادند که در روش قطری، تأثیر اندازه کاملاً مشهود است و بنابراین قطر ۵۰ میلیمتر را به عنوان قطر استاندارد انتخاب نمودند.
حسنی و همکاران، ۱۹۸۰	نمودارهایی را برای تصحیح اثر اندازه ارائه دادند که شیبی بیشتر از نمودارهای براش و فرانکلین داشتند. اختلاف این نمودارها در قطرهای بالای ٦۰ میلی‌متر نمود بیشتری دارد.
بهی، ۱۳۸٦	مطالعات انجام شده روی توده سنگ sp معدن مس سونگون نشان داد که مقاومت فشاری توده سنگ با عمق و خواص ژئومکانیکی توده سنگ رابطه مشخصی دارد. همچنین عمق معدن با چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی رابطه مستقیم دارد. $c = ۱۹۳/۷H^{۰/۱۱}$ (۲) $\varphi = -۲/۹ \ln H + ۳/۷$ (۳) $c = ۱٤/۷\ln H + ۱۳٦$ (٤) $\varphi = -۱/۱H + ۳۰$ (۵) زاویه اصطکاک (درجه)φ، MPa چسبندگی(c)، m عمق معدن (H
شمس‌الدین سعید و همکاران، ۳۹۳	چند معادله تجربی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی چندگانه و با کمک شبکه عصبی مصنوعی ارائه گردید.
ارشدنژاد و عرب، ۱۳۹۸	در این پژوهش مدلی تجربی بین پارامترهای تخلخل و چگالی با مقاومت کششی برزیلی برای سنگ آهن مگنتیت با کمک رگرسیون غیر خطی به صورت زیر پیشنهاد کردند. $\sigma_t = ۰/۰۱۹ \left(\frac{\rho_d^{۰/٤۵}}{n}\right)^2 + ۰/۰٤۰۷(\frac{\rho_d^{۰/٤۵}}{n}) + ۸/۲۸۵۲$ (٦)

۲- منطقه مورد مطالعه

معدن سنگ آهن سرویان در استان مرکزی و در فاصله ۲۸ کیلومتری شمال شرقی دلیجان و حد فاصل جاده ارتباطی دلیجان به سلفچگان واقع شده است. جهت دسترسی به معدن پس از طی مسیر ۱۰ کیلومتر از جاده آسفالته دلیجان به سلفچگان، حد فاصل روستای جاسب و راونج، روبروی سد ۱۵ خرداد یک جاده فرعی خاکی به سمت شمال شرق منشعب شده و پس از طی ۱۸ کیلومتر جاده خاکی و عبور از یک روستا به معدن می‌رسد.

۳- تخمین تخلخل، چگالی و بار نقطه‌ای

۳-۱- آزمایش تخلخل، چگالی (روش اشباع و اندازه گیری ابعاد، ISRM)

این روش برای نمونه‌هایی به کار برده می‌شود که اشکال هندسی منظمی دارند (مثل مغزه‌های استوانه‌ای یا نمونه‌های منشوری راست گوشه یا مکعبی). نمونه معرف این آزمایش شامل حداقل ۳ قطعه سنگ با جرم تقریبی ۵۰ گرم و یا ابعادی حداقل ۱۰ برابر قطر بزرگ‌ترین دانه سنگ می‌باشد (فهیمی فر، ۱۳۸۰). تعداد ٤٣ نمونه برای این آزمایش آماده گردید که تنها ۳۷ نمونه تا آزمایش بار نقطه‌ای باقی‌ماندند (عرب، ۱۳۹۵). شکل ۱ نحوه تهیه نمونه جهت انجام آزمایش بار نقطه‌ای می‌باشد.

شکل ۱. تصاویری از تهیه نمونه جهت آزمایش (عرب، ۱۳۹۵)

۳-۲- تعیین شاخص مقاومت بار نقطه‌ای سنگ

آماده‌سازی نمونه در این آزمایش اندک است و دارای دستگاه سبک و قابل حملی است. بنابراین می‌توان این آزمایش را به‌صورت بر جا و در محل انجام داد. این آزمایش به‌منظور رفع مشکلات مقاومت فشاری تک‌محوری همچون آماده‌سازی دقیق نمونه، در اختیار داشتن دستگاه‌های گران و حساس، وابستگی شدید نتایج حاصل به شیوه بارگذاری پیشنهاد گردید (فهیمی‌فر، ۱۳۸۰).

۳-۳- نمونه‌های مورد آزمایش

نمونه‌های سنگی بر اساس نوع و مقاومت تخمینی سنگ گروه‌بندی می‌شوند. اگر نمونه‌ها مغزه‌ای یا بلوکی باشند، حداقل ۱۰ نمونه و چنانچه به شکل کلوخه‌ای باشند، حداقل ۲۰ نمونه آزمایش می‌شود. ابعاد نمونه‌ها نباید از ۳۰ میلی‌متر کمتر و از ۸۵ میلیمتر بیشتر باشد. ابعاد حدود ۵۰ میلیمتر به‌عنوان استاندارد پیشنهاد شده است (فهیمی‌فر، ۱۳۸۰). شکل ۲ نحوه بارگذاری

به‌صورت محوری و شکل ۳ تصویری از شکست سنگ‌ها نمایش داده شده است.

شکل ۲. انجام آزمایش محوری (عرب، ۱۳۹۵)

شکل ۳. آزمایش‌های انجام شده (عرب، ۱۳۹۵)

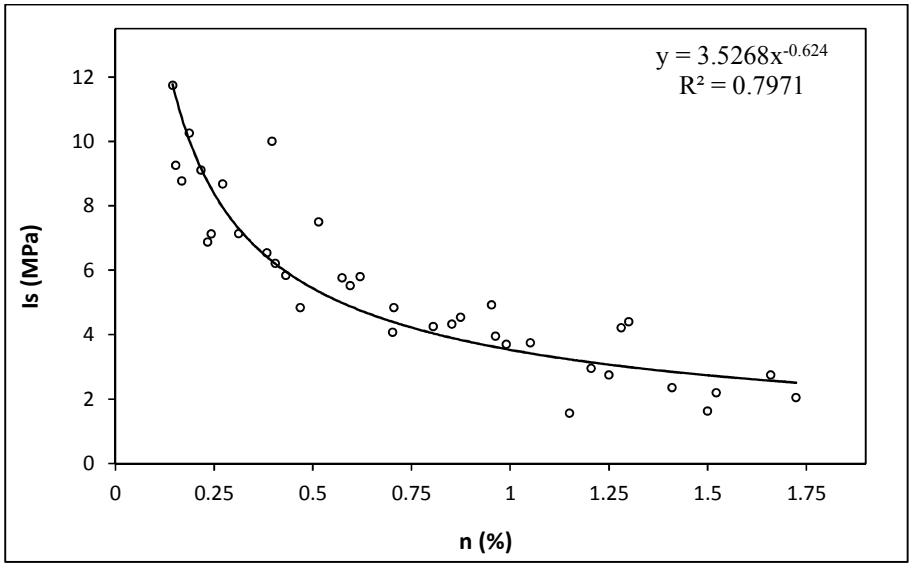
٤- تحلیل نتایج آزمایشگاهی

آزمایش‌های تخلخل، چگالی و بار نقطه‌ای تحت استاندارد ISRM روی ٤٣ نمونه از سنگ آهن مگنتیت در شرایط آزمایشگاهی انجام شدند و از تعداد ٤٣ نمونه اولیه، تنها ٣٧ نمونه برای آزمون بار نقطه‌ای به دست آمد و انجام این آزمایش برای ٦ نمونه دیگر به واسطه آسیب دیدن در زمان آماده‌سازی، امکان پذیر نبود.

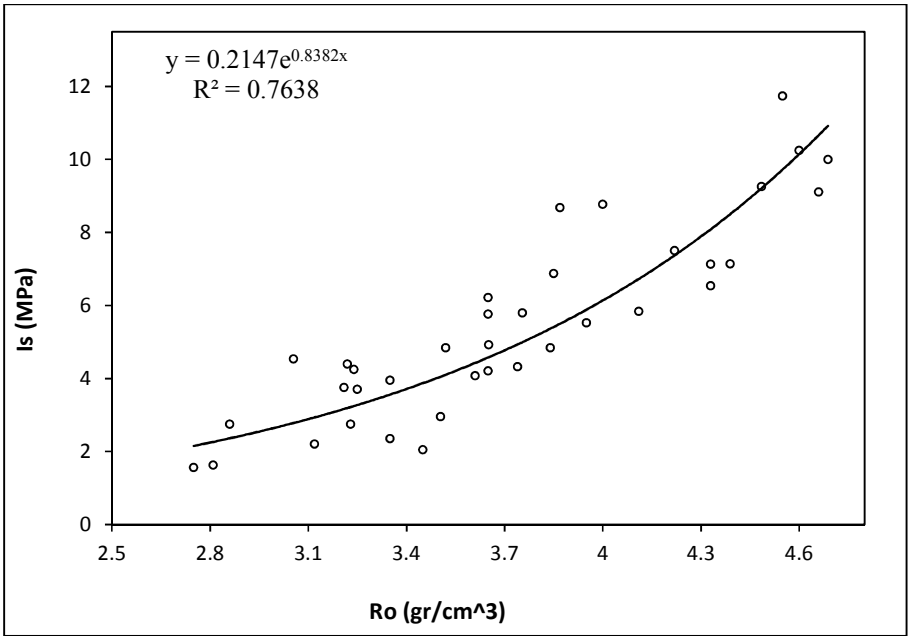
از رابطه به دست آمده بین تخلخل و اندیس بار نقطه‌ای توسط رگرسیون چند جمله‌ای به دلیل روند غیر منطقی آن صرف نظر شده و از میان روابط دیگر (نمایی R^2 = ۰/۷٦٤۲، خطی R^2 = ۰/۷۰۹۱، توانی R = ۰/۷۹۷۱ و لگاریتمی R = ۰/۷۳۲۵) با ضریب همبستگی مناسب استفاده گردید. با توجه به بالا بودن ضریب همبستگی رگرسیون توانی رابطه مربوطه به شرح زیر پیشنهاد می‌گردد.

$$I_s = 3.53n^{-0.624} \qquad (۷)$$

که در آن n، تخلخل سنگ بر حسب درصد و Is، اندیس بار نقطه‌ای بر حسب مگاپاسکال است.



شکل ٤. تخلخل و بار نقطه‌ای با رگرسیون لگاریتمی



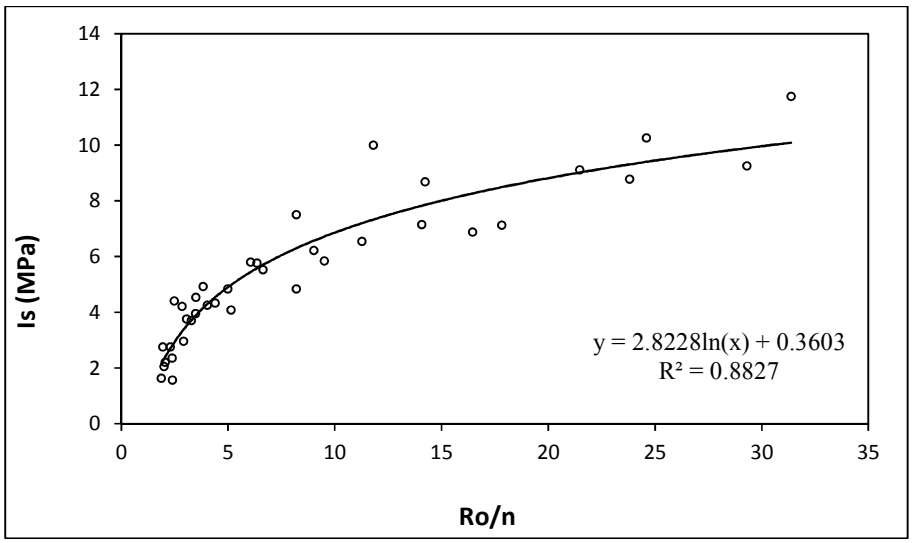
شکل ۵. نمودار رابطه چگالی و بار نقطه‌ای با رگرسیون نمایی

از رابطه به دست آمده بین چگالی و اندیس بار نقطه‌ای توسط رگرسیون چند جمله‌ای، مجدداً به دلیل روند غیر منطقی آن و همچنین از روابط خطی، لگاریتمی و توانی با ضریب همبستگی پایین صرف نظر شد. تنها رابطه نمایی با ضریب همبستگی R = ۰/۷۶۳۸ مناسب تشخیص داده شد که به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد.

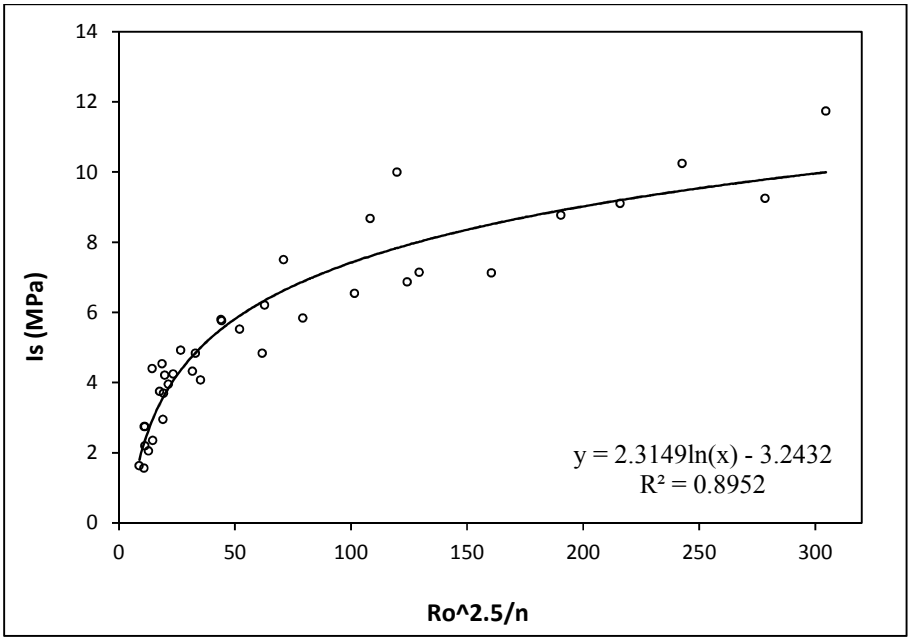
$$I_s = 0.215e^{0.838\rho} \qquad (۸)$$

در ادامه با ترکیب دو پارامتر چگالی و تخلخل به عنوان یک متغیر مستقل و پارامتر اندیس بار نقطه‌ای به عنوان متغیر وابسته چندین برازش آماری صورت گرفته و مدل های زیر پیشنهاد شدند. از میان انواع رگرسیون‌ها با توجه به بالا بودن ضریب همبستگی رگرسیون لگاریتم طبیعی رابطه مربوطه به شرح زیر پیشنهاد می‌گردد.

$$I_s = 2.82 \ln\left(\frac{\rho}{n}\right) + 0.36 \qquad (۹)$$



شکل ٦. چگالی با توان ۱، تخلخل و بار نقطه‌ای



شکل ۷. چگالی با توان ۲/۵، تخلخل و بار نقطه‌ای

حالات متعددی از ترکیب دو متغیر چگالی و تخلخل بررسی شدند در نهایت مناسبترین رابطه ریاضی برای پارامتر چگالی با توان ۲/۵ و تخلخل با توان یک بدست آمد. روابط (نمایی $R^2 = ۰/۷۵۵٤$، خطی $R^2 = ۰/۸۱۱۸$، چند جمله‌ای $R^2 = ۰/۸۱٤۱$، توانی $R = ۰/٦٦۲۷$ و لگاریتمی $R = ۰/۸۹۵۲$) با ضریب همبستگی مناسب بدست آمدند که با توجه به بالا بودن ضریب همبستگی رگرسیون لگاریتم طبیعی، رابطه مربوطه به شرح زیر پیشنهاد می‌گردد.

$$I_s = 2.31 \ln\left(\frac{\rho^{2.5}}{n}\right) - 3.24 \qquad (۱۰)$$

٦- نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایش‌های تخلخل، چگالی و بار نقطه‌ای بر روی ۳۷ نمونه سنگ آهن مگنتیت با چگالی متفاوت (gr/cm3) ۵-۳ انجام شدند. این آزمایش‌ها بر اساس استاندارد ISRM انجام شده و تعدادی از نمونه‌ها به دلیل معایب هندسی در زمان آماده‌سازی از چرخه آزمایشات خارج شدند. نتایج آزمایش‌ها دوبه‌دو با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته تا تأثیر آن‌ها بر یکدیگر مشخص شده و رابطه موجود در بین آن‌ها به دست آید. بعد از برقراری این ارتباط، تعدادی از این روابط به دلیل بازدهی پایین و یا عدم روند منطقی حذف گردیده و روابط مناسب مشخص گردید. مناسبترین مدل تجربی ترکیبی از چگالی با توان ۲/۵ و تخلخل با توان یک به عنوان متغیر مستقل برای اندیس بار نقطه‌ای به عنوان متغیر وابسته بود.

۷- مراجع

- ارشدنژاد، ش.، عرب، م. ج.، (۱۳۹۷)، "ارتباط تخلخل و چگالی بر مقاومت کششی (برزیلی) سنگ آهن مگنتیت (مطالعه موردی: معدن سرویان)"، فصلنامه علمی جاده، شماره ۹۵، ص.۱۵۹-۱۵۱.

-بهی، ن.، (۱۳۸٦)، "ارایه رابطه تجربی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و پارامترهای رفتاری توده سنگ مطالعه موردی: معدن مس سونگون"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ص.۱۵٤-۱٤۹.

-شمس‌الدین سعید، م.، معارف‌وند، پ.، اورنگی، ف.، (۱۳۹۳)، "پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ با استفاده از روشهای رگرسیون خطی چندگانه و شبکه‌های عصبی مصنوعی"، کنفرانس ملی علوم معدنی.

-علی آبادی، م. ع.، خدامی، م.، کرمی، م.، (۱۳۹۰)، "مطالعات مقدماتی زمین شناسی و کانی شناسی معدن آهن سرویان"، چهارمین همایش ملی زمین شناسی اقتصادی.

-**عرب، م.ج.، (۱۳۹۵)، "**بررسی خواص فیزیکی بر اندیس بار نقطه‌ای و سختی اشمیت سنگ آهن – مطالعه موردی: معدن سرویان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد محلات.

-فهیمی فر، ا.، (۱۳۸۰)، "آزمایشات مکانیک سنگ"، شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، جلد اول.

-Bieniawski. Z. T, (1975), "The Point- Load test in geotechnical practice, Engineering Geology", Volume 9, Issue 1, pp. 1–11.

-Broch, E., Franklin, J.A., (1972), "The point-load strength test, Int. J. Rock Mech". Min. Sci. & Geomech. Abstr. , pp. 669-698.

-Broch, E., Franklin, J. A., (1972), "The Point-Load Strength Test, Int". J. Rock Mech. Min. Sci. Volume 9, Issue 6, pp. 669–676.

-Hassani, F.P., Scobie, M. J., Whittaker, B. N., (1980), "Application of the point-load index test to strength determination of rock and proposals a new size-correction chart", Proc. 21st U. S. Symp. On Rock Mechanics, Rolla, Missouri, pp. 543-553.

-Reichmuth, D.R., (1968), "Point- Load testing of brittle materials to determine tensile strength and relative brittleness, Proc". 9th Symp, On Rock Mechanics, University Of Colorado, pp. 134-159.

Relationship between Porosity and Density and Point Load Index for Magnetite (Case Study: Sarvian Mine)

Shobeir Arshadnejad, Department of Mining Engineering, Mahallat Branch, Islamic Azad University, Mahallat, Iran.

Mohammad Javad Arab, M.Sc., Grad., Department of Mining Engineering, Mahallat Branch, Islamic Azad University, Mahallat, Iran.

E-mail: s_arshadnejad@yahoo.com

Received: September 2019-Accepted: February 2020

ABSTRACT

Compressive and tensile strength of intact rocks are very important to evolution of rock slope stability and tunnels analysis. The physical properties of rock such as porosity and density as physical parameters of the rock that affects strength, are of utmost importance. Finding a relationship between the physical properties and strength of rock may be innovative and easy method to estimate the mechanical strength of rocks. In this paper, conducting simple field tests and establishing relationships between them, it has been tried to present relations for replacing simple tests with costly and time-consuming laboratorial test in the field. The tests are conducted on 37 samples of magnetite iron ore with different densities for each test. Samples have collected Sarvian Mine, near Delijan. Then, the tests were compared pairwise in order to determine their effects and obtain their relationships. The experimental model was a relationship with 0.89 correlation coefficient.

Keywords: Porosity, Density, Point Load Index