

تخمین شاخص‌های شکنندگی ماسه‌سنگ‌های سازند قم در شمال همدان با استفاده از نسبت بین شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل

محمدحسین قبادی^۱، مهرداد امیری^{۲*} و مجتبی رحیمی‌شهید^۳

۱- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

۲ و ۳- دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

نویسنده مسئول: a.mehrdad1372@yahoo.com *

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹

دریافت: ۱۴۰۰/۷/۷

چکیده

شکنندگی یکی از خواص مهم سنگ است که در خصوصیات مهندسی سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. تخمین شاخص‌های شکنندگی روشی مفید برای برآورد شکنندگی سنگ است. با این حال، هنوز عدم قطعیت زیادی در مورد رابطه بین شکنندگی سنگ و شکست سنگ مانند شکستگی هیدرولیکی، ترکیدن سنگ در معادن زغال‌سنگ و تونل‌ها وجود دارد. این واقعیت را می‌توان به فقدان مفهوم شکنندگی پذیرفته شده جهانی و شاخص شکنندگی نسبت داد. در این مقاله، رابطه شکنندگی سنگ با استفاده از نسبت شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل (PMP) در ماسه‌سنگ‌های سازند قم بررسی می‌شود. علاوه بر این، روش‌های برآورد موجود برای شاخص شکنندگی سنگ خلاصه شده و کاربرد آن‌ها به‌طور خلاصه مورد بحث قرار می‌گیرد. به‌منظور تخمین شاخص‌های شکنندگی و نسبت شاخص بار نقطه‌ای، ۱۵ بلوک از ماسه‌سنگ‌های لنگه در شمال همدان انتخاب شده است. خصوصیات سنگ‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این دسته از ماسه‌سنگ‌ها تعیین شده است. نمونه‌ها تحت آزمایش‌های شاخص بار نقطه‌ای (PLI)، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و مقاومت کشش برزیلی (BTS) قرار گرفته‌اند. سپس نسبت بار نقطه‌ای به تخلخل (PMP) محاسبه شده است. برای رسیدن به هدف مورد نظر، مناسب‌ترین و معنادارترین روابط بین شکنندگی سنگ و نسبت شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل (PMP) با روش رگرسیون ارائه شده است. روابط بین شاخص بار نقطه‌ای، تخلخل و شاخص‌های شکنندگی (B1، B2، B3، B4 و BI) با استفاده از تکنیک‌های رگرسیون ساده (SR) با استفاده از نرم‌افزار Minitab 16 انجام شده است. تحلیل‌های آماری وجود همبستگی قوی بین نسبت بار نقطه‌ای به تخلخل (PMP) با شاخص‌های شکنندگی (B3 و B4) در حالت خشک را نشان می‌دهد و همچنین همبستگی قوی بین نسبت بار نقطه‌ای به تخلخل (PMP) با شاخص‌های شکنندگی (B1 و B2) در حالت اشباع را می‌توان دید.

واژه‌های کلیدی: سازند قم، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، ماسه‌سنگ، شکنندگی، همدان

پیشگفتار

بر فرایند شکست و واکنش توده‌سنگ به فعالیت‌های معدنی، حفاری تونل و فضای زیرزمینی دارد (صفری‌فرخند و همکاران، ۱۳۹۸). امروزه بسیاری از حفاری‌های تونل با استفاده از ماشین‌های تونل‌بری (TBM) و ماشین‌های حفاری بازویی^۱ در حال انجام هستند (یاریلی و سویر، ۲۰۱۱؛ صفری‌فرخند و همکاران، ۱۳۹۸). روش‌های پیش‌بینی و برآورد هزینه‌های TBM توسط محققین متعددی گسترش یافته است (فروغ و همکاران، ۲۰۱۹؛ سلیمی و همکاران، ۲۰۱۸). با وجود اینکه شکنندگی از اهمیت بالایی برخوردار است بین محققین در رابطه با تعریف، مفهوم و روش اندازه‌گیری آن توافق نظر وجود

شکنندگی یکی از شاخص‌های مهم برای پیش‌بینی انفجار سنگ است که می‌تواند برای تجزیه و تحلیل پایداری توده‌های سنگی اطراف و تولید نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرد (آلتینداگ، ۲۰۰۲). علاوه بر این، شاخص شکنندگی یک شاخص مهم برای تجزیه و تحلیل ژئومکانیکی مخزن در ارزیابی پایداری چاه و قابلیت حفاری و خواص مکانیکی یک بستر مخزن است. با این حال، تاکنون هیچ روش استاندارد و تعریف واحدی برای محاسبه و تخمین شکنندگی سنگ وجود ندارد. شکنندگی یکی از مهم‌ترین خصوصیات مکانیکی سنگ است که تأثیر زیادی

¹ Roadheader

فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک آسماری در سایت سد خرسان ۲ در جنوب غربی ایران" صورت گرفت. در این مقاله روابط تجربی برای تخمین شاخص‌های شکنندگی سنگ‌آهک آسماری برقرار شده است. معادلات ارائه شده برای پیش‌بینی شکنندگی بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی از دقت بالایی برخوردار بود. علاوه بر این، نتایج نشان داد که برآورد شکنندگی از طریق موج فشارشی³ (V_p) بر اساس مفهوم B_3 (نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری به مقاومت کششی تقسیم بر ۲) دقت بیشتری نسبت به مفاهیم B_2 (نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری منهای مقاومت کششی به مقاومت فشاری تک‌محوری بعلاوه مقاومت کششی) و B_1 (نسبت مقاومت فشاری به مقاومت کششی) دارد (لشکری‌پور و همکاران، ۲۰۱۸). پژوهش دیگری به‌وسیله کایوندا و آسبوری (۲۰۱۶) با هدف پیش‌بینی شکنندگی سنگ با استفاده از روش‌های غیرمخرب برای تونل زدن در سنگ‌های سخت صورت گرفت. در این مطالعه برای تخمین شاخص شکنندگی سنگ از پارامترهای ویژگی الاستیکی و سرعت موج (V_p و V_s)⁴ استفاده گردید. معادلات از طریق برنامه نویسی به روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN^5) تهیه شدند. با انجام آنالیزهای رگرسیونی، ضرایب همبستگی برای این نوع از معادلات، منطقی قلمداد گردید. همچنین در مطالعه‌ای با عنوان "تخمین شکنندگی سنگ‌های آهکی سازند قم با استفاده از خصوصیات فیزیکی" که به‌وسیله محمدی و توسلی لاین (۱۳۹۵) صورت گرفت نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی با پارامترهای شکنندگی سنگ‌های منطقه مورد مطالعه رابطه منطقی و قابل قبولی دارند ($R^2 \geq 0.80$). روابط ویژگی‌های فیزیکی با پارامتر B_3 در مقایسه با دو شاخص B_1 و B_2 ضرایب همبستگی بالاتری دارند. در نهایت استفاده از ویژگی‌های فیزیکی به‌عنوان آزمایش‌های ساده و ارزان در تعیین شاخص‌های شکنندگی سنگ‌های مورد پژوهش پیشنهاد شد. در مطالعه‌ای تحت عنوان "تعیین شکنندگی پریدوتیت‌ها با استفاده از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی (مطالعه موردی: هرسین، استان کرمانشاه)" که توسط قبادی و همکاران (۱۳۹۷) صورت گرفت با استفاده از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی معمول ضمن تعیین

ندارد مورلی (۱۹۴۴) آن را به عنوان عدم شکل‌پذیری تعریف می‌کند و شکل‌پذیری را خاصیتی از ماده می‌داند که اجازه می‌دهد اجزا تشکیل‌دهنده آن توسط اعمال نیروی کششی به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم شود. هتینی (۱۹۶۶) شکنندگی را عدم شکل‌پذیری تعریف می‌کند. همچنین وایبول (۱۹۳۹) عدم شکل‌پذیری را به‌عنوان شکنندگی یک ماده تعریف کرد. براساس آبرت و دوال (۱۹۶۷)، شکنندگی به موادی مانند چدن یا بیشتر سنگ‌ها که در نقطه تنش تسلیم یا کمی بعد از آن دچار شکست می‌شوند به‌عنوان مواد شکننده نامیده می‌شود. رمزی (۱۹۶۷) معتقد است که وقتی چسبندگی داخل سنگ در مرحله الاستیک از بین می‌رود و ماده دچار شکست می‌شود در نتیجه شکننده است. هاول (۱۹۵۹) پیشنهاد کرد که شکنندگی مواد خاصیت شکست با شکل‌پذیری بسیار کم است (صفری‌فرخند و همکاران، ۱۳۹۸). رمزی (۱۹۶۷) نشان داد که شکست شکننده سنگ زمانی رخ می‌دهد که انسجام از بین می‌رود. شکنندگی سنگ یکی از خواص مکانیکی آن می‌باشد که در عملیات حفاری و سازه‌های زیرزمینی از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. شکنندگی تابعی از مقاومت است که نشان‌دهنده استحکام سنگ در مقابل تغییر شکل در محدوده الاستیک می‌باشد. در حال حاضر برای اندازه‌گیری مستقیم شکنندگی سنگ روش استاندارد ارائه نشده است، اما از طریق روش‌های غیرمستقیم می‌توان برای تعیین شاخص شکنندگی سنگ اقدام نمود. مطالعات آزمایشگاهی و تجارب دستگاه‌های حفاری (TBM^2) نشان داده است که سازوکار ایجاد ترک و خردشدگی در سنگ‌های شکننده‌تر، سریع‌تر صورت می‌گیرد؛ بنابراین نیاز به شاخصی جهت تعیین میزان شکنندگی یک سنگ در پروژه‌های مکانیک سنگ امری ضروری است. به همین دلیل با پیشرفت علم و فناوری و توسعه ماشین‌های TBM از یک‌سو و تأثیر شکنندگی بر عملکرد و راندمان این ماشین‌ها از سوی دیگر، نیاز به ارائه شاخصی برای تعیین این پارامتر احساس می‌شود. به همین منظور پژوهش‌های متنوعی توسط محققین مختلف صورت گرفته است که به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. پژوهشی توسط لشکری‌پور و همکاران (۲۰۱۸) تحت عنوان " بررسی ضریب شکست و همبستگی تجربی بین پارامترهای

⁵ . Artificial neural network

² . Tunnel boring machine

³ . Pressure wave

⁴ . Shear wave

استان در نتیجه وجود کوه‌های مرتفع، رودخانه‌ها، پستی و بلندی‌های زیاد، به‌شدت متغیر است. زمستان‌های این استان سرد، پربرف و باران و در تابستان‌ها دما معتدل است. توده‌های هوایی که استان را تحت تأثیر قرار می‌دهند:

- ۱- توده‌های غربی: این توده‌های هوا در ماه‌های مرطوب سال یعنی از آبان تا خرداد، از غرب، جنوب غرب و شمال غرب وارد کشور شده و موجب کاهش نسبی دما در سطح استان و بارندگی در استان می‌شود.
- ۲- توده‌های شمالی: این توده هوا در ماه‌های سرد سال از عرض‌های شمالی وارد استان می‌شوند و باعث کاهش دما و بارندگی به‌صورت برف در استان می‌شوند.
- ۳- توده‌های جنوبی: این توده هوا در ماه‌های گرم سال از عرض‌های جنوبی وارد استان شده و موجب افزایش دما و کاهش یا قطع بارندگی می‌شوند (آقانباتی، ۱۳۸۳). در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

زمین‌شناسی منطقه

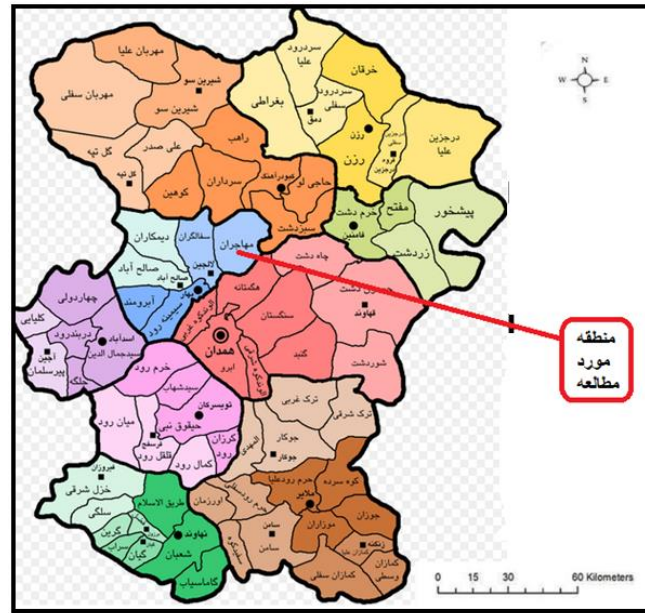
همدان یکی از استان‌های غربی ایران است که اشکال مورفولوژیک و جایگاه زمین‌شناسی ویژه دارد. از نگاه ژئومورفولوژی تغییرات اشکال فیزیوگرافیک استان از قله بلند الوند (۳۵۸۰ متر) تا نواحی دشت‌گونه و کم ارتفاع دشت رزن متغیر است. از نظر ساختاری، استان همدان در فصل مشترک چند قلمروی ساختاری متفاوت قرار گرفته است که شامل زاگرس مرتفع، زون سنندج-سیرجان و ایران مرکزی است. منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیمات ساختاری و چینه‌شناسی در زون سنندج-سیرجان واقع شده است. زون سنندج - سیرجان استان همدان عمدتاً متشکل از سنگ‌های دگرگونی به دو سن پالئوزوئیک تا اوایل مزوزوئیک و مزوزوئیک تا اوایل سنوزوئیک هستند (آقانباتی، ۱۳۸۳). منطقه مورد مطالعه به لحاظ واحدهای لیتولوژی به ترتیب سن از جدید به قدیم شامل:

الف) رسوبات آبرفتی عهد حاضر، ب) سنگ‌آهک قهوه‌ای تا کرم‌رنگ به سن الیگومیوسن، ج) ماسه‌سنگ متوسط دانه کرم‌رنگ به سن الیگومیوسن و د) ماسه‌سنگ متوسط دانه، ماسه‌سنگ دولومیتی و کنگلومرا و میکروکنگلومرای قهوه‌ای رنگ به سن کرتاسه می‌باشد (آقانباتی، ۱۳۸۳). در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه آورده شده است.

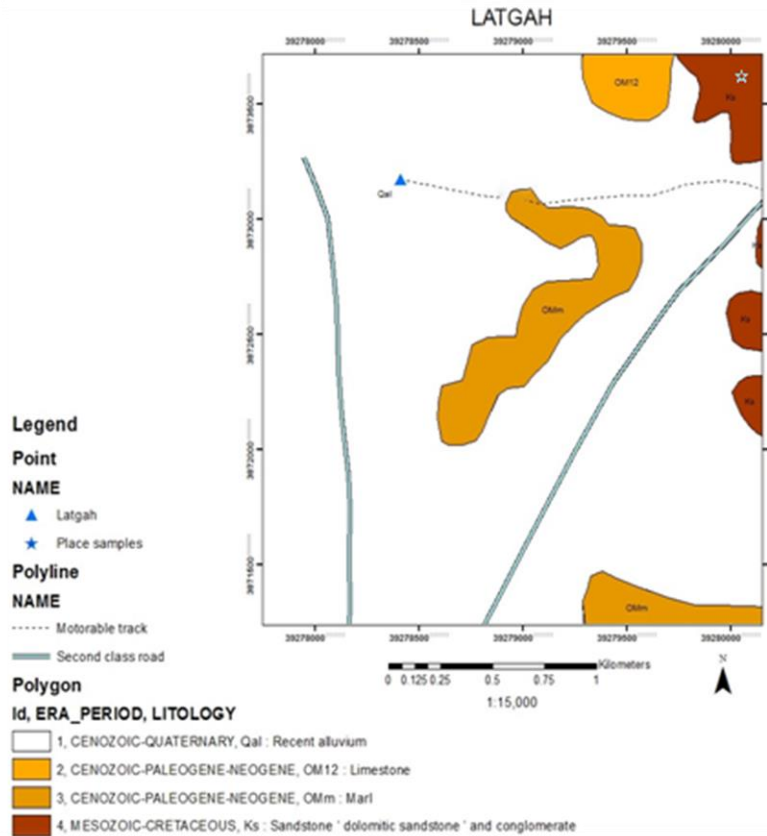
مفاهیم شکنندگی، ارتباط بین پارامترهای شکنندگی با خصوصیات فیزیکی تعیین گردید. بر اساس نتایج به دست آمده بیشترین انطباق بین آزمایش درصد جذب آب، آزمایش چکش‌اشمیت و آزمایش بار نقطه‌ای به ترتیب با مقادیر شاخص شکنندگی BI، BI و B3 می‌باشد. بررسی‌های کاراکول و اولوسای (۲۰۱۳) نشان داد با افزایش درجه اشباع، ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری سنگ‌ها کاهش می‌یابند. درحالی‌که سرعت موج فشاری روند متغیری را نشان می‌دهد. کاراکول (۲۰۱۶) رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری و چکش‌اشمیت که به درجه اشباع ماده سنگ بستگی دارد را پیشنهاد کرد. در یک مطالعه ژیا و همکاران (۲۰۱۹) به ارزیابی شکنندگی سنگ و کاربرد آن پرداخت. کراری و همکاران (۱۳۹۹) روابط آماری بین شاخص‌های شکنندگی با مدل چقرمگی ارائه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌دهنده ارتباط قوی بین شاخص شکنندگی B3 و B4 با چقرمگی سنگ است. قبادی و همکاران (۱۳۹۹) با بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی پریودیت‌ها در شهرستان هرسین استان کرمانشاه به این نتیجه رسیدند که انطباق بیشتری بین خصوصیات در شرایط خشک نسبت به اشباع را نشان می‌دهد. در مکانیک سنگ از روابط تجربی برای محاسبه شاخص‌های شکنندگی استفاده می‌شود در این رابطه محققان مختلف روابط تجربی را برای محاسبه پارامترهای مذکور ارائه کردند که برخی از مهم‌ترین آن‌ها در ادامه (جدول ۱۱) آورده شده است. با توجه به اینکه تاکنون روش استاندارد شده‌ای برای تعیین شاخص شکنندگی ارائه نشده است هدف این مطالعه پیش‌بینی شاخص شکنندگی سنگ با استفاده از نسبت شاخص بارنقطه‌ای و تخلخل (PMP) می‌باشد.

موقعیت جغرافیایی و اقلیم

منطقه مورد مطالعه در ۱۴ کیلومتری شمال شهر همدان، بخش لالجین، دهستان مهاجران، روستای لتگاه به طول جغرافیای ۴۸ درجه و ۳۳ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی و به عرض ۳۴ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۸ دقیقه قرار دارد. از لحاظ اقلیمی شهر همدان، دارای اقلیمی سرد و نیمه‌خشک بوده و دارای چهار فصل کامل است. آب و هوای استان، تحت تأثیر عرض جغرافیایی، ارتفاع، مکان، امتداد کوه‌ها و فاصله از دریاست. به‌طور کلی آب و هوای



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی منطقه [اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ (همدان)]

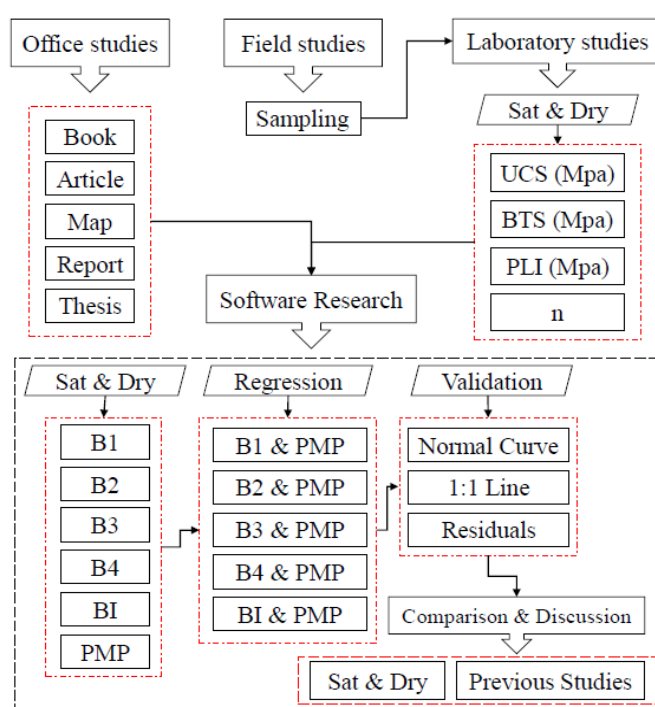
مواد و روش‌ها

تهیه شده، در آزمایشگاه ۱۵ نمونه‌ی مغزه‌ی استوانه‌ای با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر دورانی تهیه شد. بر این اساس از نمونه‌های سنگی جمع‌آوری شده، مغزه استوانه‌ای به قطر ۵۴ میلی‌متر تهیه و آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مطابق با دستورالعمل‌های (ASTM, 2001) و (ISRM, 2007) بر

به منظور انجام این مطالعه و تهیه‌ی اطلاعات پایه، در ابتدا منابع مرتبط مختلف شامل کتاب، مقاله، گزارش، نقشه و ... مورد بررسی قرار گرفت. سپس مطالعات میدانی به‌منظور تهیه‌ی بلوک‌های سنگی انجام شد. از بلوک‌های سنگی

BI) با استفاده از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی محاسبه شده در آزمایشگاه، برآورد شد. سپس با تقسیم مقادیر شاخص بارنقطه‌ای (PLI) به تخلخل (n)، مقادیر PMP محاسبه شد. بین PMP با شاخص‌های شکنندگی در شرایط خشک و اشباع روابط رگرسیونی برقرار شد. پس از اعتبارسنجی روابط رگرسیونی ارائه شده، نتایج در شرایط خشک و اشباع با هم مقایسه شدند. همچنین نتایج این مطالعه با مطالعات مشابه پیشین مقایسه و بحث شد. روش کار به صورت شماتیک در شکل ۳ آورده شده است.

روی آن‌ها انجام شده است. در راستای این پژوهش، پس از نمونه‌برداری از منطقه مورد مطالعه و تهیه مغزه، ویژگی‌های سنگ‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از تهیه مقاطع نازک و مطالعه با میکروسکوپ پلاریزان تعیین شده است. همچنین، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها شامل شاخص بارنقطه‌ای (PLI)، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، مقاومت کشش برزیلی (BTS) و تخلخل (n) در شرایط خشک و اشباع تعیین شد. در مرحله‌ی بعد، شاخص‌های شکنندگی (B1, B2, B3, B4) و



شکل ۳. فلوچارت روش انجام پژوهش

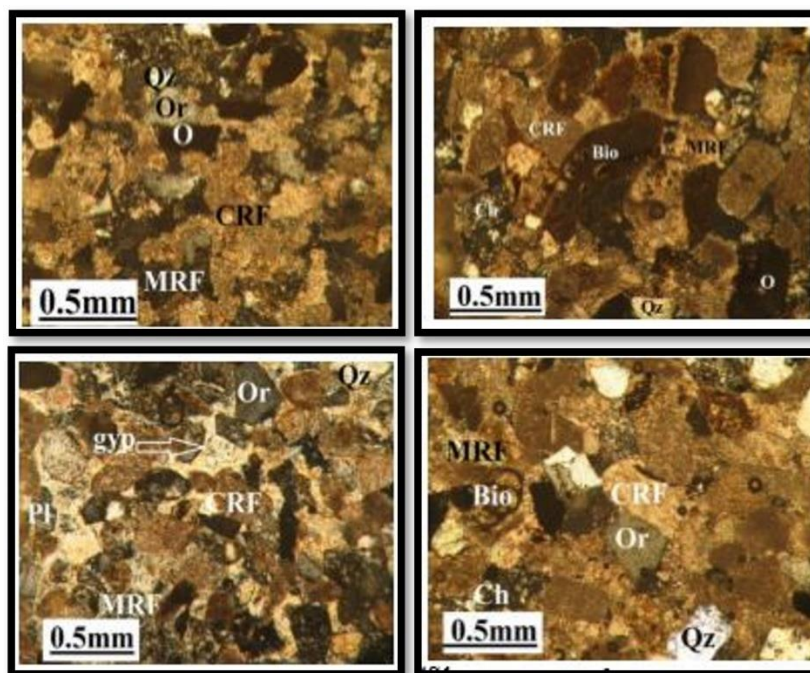
نیمه گرد شده بوده و از جورشدگی متوسط تا بد برخوردار هستند. تماس بین دانه‌ها از نوع خطی و نقطه‌ای است.

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد بررسی

اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی نمونه‌های ماسه‌سنگ لتگاه مطابق استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 2007) انجام شده است. این ویژگی‌ها شامل وزن واحد حجم (γ) و درصد تخلخل (n) است. در جدول ۱ خلاصه‌ای از نتایج خصوصیات فیزیکی آورده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود تخلخل تمامی نمونه‌های ماسه‌سنگی کم (کم‌تر از ۶ درصد) است.

سنگ‌شناسی

ترکیب کانی‌شناسی و خصوصیات بافتی ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از مقاطع نازک مطالعه گردید. بررسی مقاطع نازک نشان داد که این ماسه‌سنگ‌ها از خرده‌سنگ‌های کربناته، کوارتز، چرت، خرده‌سنگ‌های شیستی، اکسید آهن و فلدسپات تشکیل شده‌اند. ماسه‌سنگ‌های مذکور بر اساس طبقه‌بندی فولک (۱۹۷۴) کالکلیت‌آرنایت هستند. در تمام نمونه‌های مورد مطالعه متوسط اندازه ذرات کربناته بین ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر است. کوارتز در این سنگ‌ها به صورت تک‌بلوری و چندبلوری قابل مشاهده است. نوع سیمان غالب در این سنگ‌ها کلسیتی بوده که به صورت موضعی ذرات کانی را به هم متصل کرده‌اند ولی سیمان ژپسی هم دیده شد. دانه‌های تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌ها



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی: ماسه‌سنگ‌های سازند قم (لنگاه همدان)، Bio: بایوکلاست، F: دانه دگرگونی و شیل، Ch: چرت، Q: کوارتز، PI: کوارتز چندبلوری، Or: ارتوز، C: دانه کربناته، PI: پلاژیوکلاز، Z: زیرکون، gy: سیمان ژیبسی، O: اکسید آهن.

جدول ۱. خلاصه‌ای از نتایج آزمون تعیین خصوصیات فیزیکی نمونه‌های مورد مطالعه

پارامتر	Number	Min	Max	avg	Std
n (%)	۱۵	۵/۱۷	۵/۶۲	۵/۲۱	۰/۰۰۰۲
(gr/cm ³) γ_d	۱۵	۲/۴۷	۲/۵۱	۲/۴۹	-
(gr/cm ³) γ_t	۱۵	۲/۴۹	۲/۵۳	۲/۵۰	-
(gr/cm ³) γ_{sat}	۱۵	۲/۵۰	۲/۵۵	۲/۵۲	-

جدول ۲. خلاصه‌ای از نتایج آزمایش خصوصیات مکانیکی در حالت خشک

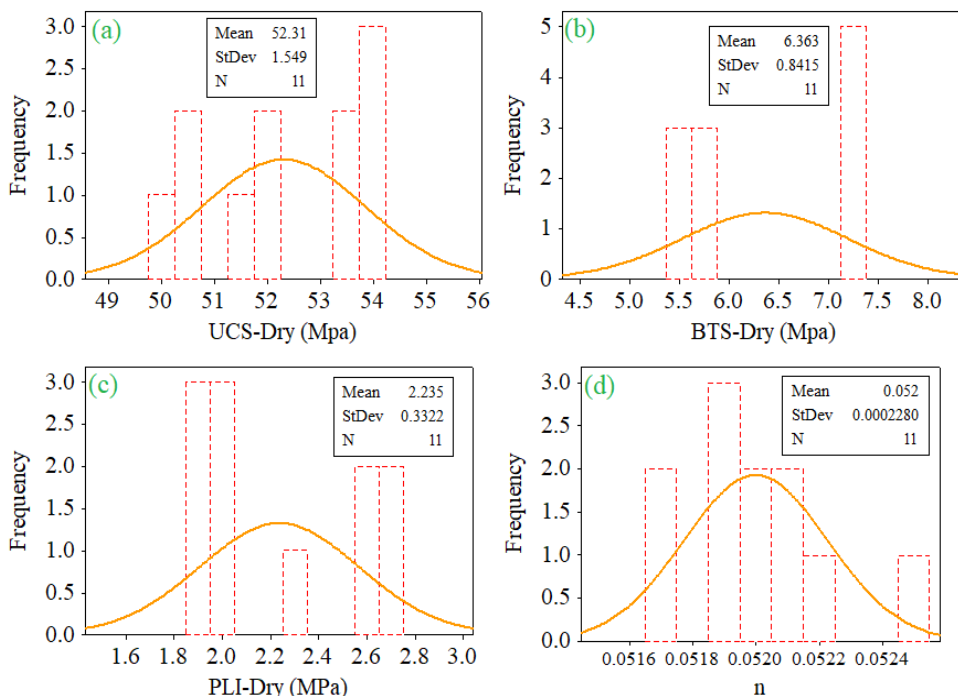
پارامتر	Number	Min	Max	avg	Std
UCS (MPa)	۱۱	۵۰/۰۵	۵۶/۵۵	۵۲/۰۶	۱/۵۴
BTS (MPa)	۱۱	۵/۴۵	۷/۲۹	۶/۶۳۸	۰/۸۴
PLI (MPa)	۱۱	۱/۸۲	۲/۷۰	۲/۴۳	۰/۳۳

بیش از ۵۰ MPa است. در شکل‌های ۵ و ۶ نمودار فراوانی و منحنی نرمال پارامترهای فیزیکی و مکانیکی شامل تخلخل، مقاومت فشاری تک‌محوری، شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی در شرایط خشک و اشباع ارائه شده است. پس از حذف داده‌های پرت و خارج از رده سعی شد بانک اطلاعات اولیه دارای توزیع نرمال شوند که مطابق شکل‌های ۵ و ۶، تا حدودی این هدف محقق شده است. در این شکل‌ها توزیع مقادیر خصوصیات مختلف و حداکثر فراوانی هر خصوصیت در دو حالت خشک و اشباع قابل مشاهده است.

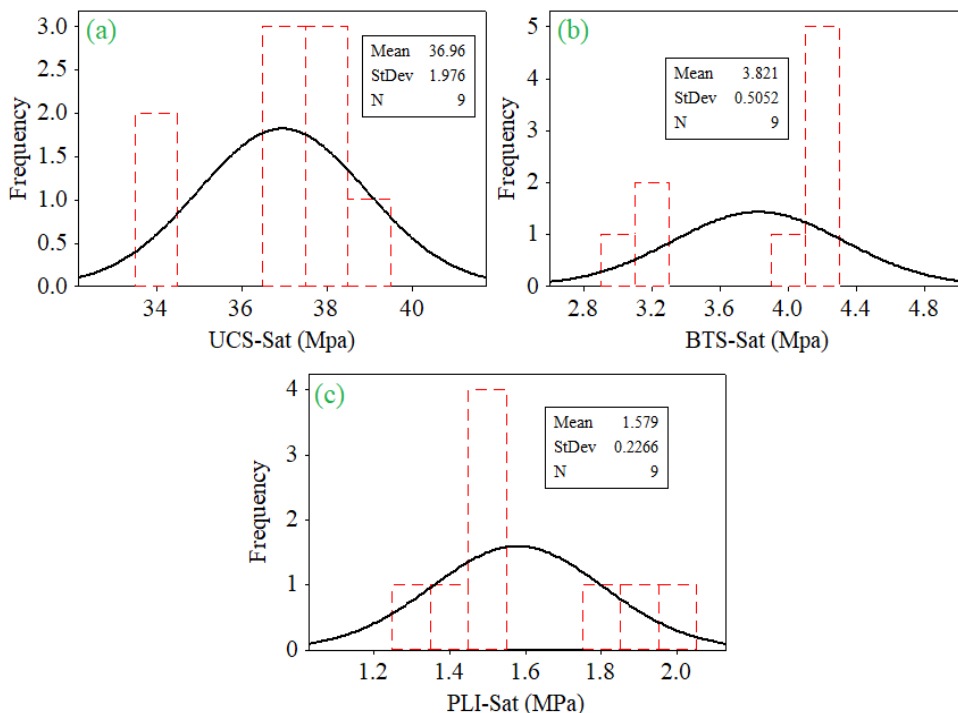
خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها نیز مطابق استاندارد (2007 ISRM) و شامل شاخص بار نقطه‌ای (PLI)، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و مقاومت کششی برزیلی (BTS) ماسه‌سنگ‌های لنگاه اندازه‌گیری شدند. آزمایش شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت فشاری تک‌محوری روی نمونه‌های استوانه‌ای در حالت خشک و اشباع انجام شده است. در جدول‌های ۲ و ۳ خلاصه‌ای از نتایج خصوصیات مکانیکی (پس از حذف مقادیر پرت و خارج از رده) در دو حالت خشک و اشباع آورده شده است. مقادیر پارامترهای مکانیکی مطابق انتظار در شرایط خشک مقادیر بالاتری دارند و در شرایط خشک مقاومت تراکمی تمام نمونه‌ها

جدول ۳. خلاصه‌ای از نتایج آزمایش خصوصیات مکانیکی در حالت اشباع

پارامتر	Number	Min	Max	avg	Std
UCS(MPa)	۹	۳۳/۵۳	۳۹/۳۱	۳۶/۷۹	۱/۹۷
BTS(MPa)	۹	۲/۹۴	۴/۲۵	۳/۴۸	۰/۵۰
PLI(MPa)	۹	۱/۱۸	۱/۹۷	۱/۵۹	۰/۲۲



شکل ۵. نمودار فراوانی و منحنی نرمال پارامترهای فیزیکی و مکانیکی در شرایط خشک، a: مقاومت فشاری تک‌محوری، b: مقاومت کششی برزیلی، c: شاخص بار نقطه‌ای و d: تخلخل.



شکل ۶. نمودار فراوانی و منحنی نرمال پارامترهای مکانیکی در شرایط اشباع، a: مقاومت فشاری تک‌محوری، b: مقاومت کششی برزیلی و c: شاخص بار نقطه‌ای

نتایج و بحث

شاخص‌های شکنندگی و نسبت بارنقطه‌ای به تخلخل (PMP)

با توجه به نوع سنگ از ۰/۱۷ تا ۰/۶۵۹ متغیر می‌باشد (قهرمان و آلتینداگ، ۲۰۰۴). مقدار K از جدول ۵ محاسبه می‌شود که برای سنگ‌های گروه C مانند ماسه‌سنگ برابر ۰/۲۷۰ می‌باشد. پس از تعیین σ_c مقاومت فشاری تک‌محوری و ضریب K از طریق رابطه ۵ مقدار BI به دست می‌آید. در جدول ۶ مقادیر طبقه‌بندی این پارامتر ارائه شده است. PMP نسبت بارنقطه‌ای به تخلخل می‌باشد که برای پیش‌بینی شاخص‌های شکنندگی استفاده می‌شود و از رابطه ۶ محاسبه می‌شود (جمشیدی و همکاران، ۲۰۲۰).

$$PMP \text{ (MPa)} = \frac{PLI}{n} \quad (۶)$$

که در آن PLI (MPa) شاخص بار نقطه‌ای و n تخلخل می‌باشد. در شکل‌های ۷ و ۸ نمودار فراوانی و منحنی نرمال و در جدول‌های ۷ و ۸ خلاصه‌ای از نتایج مقادیر ضرایب شکنندگی B1, B2, B3, BI و PMP نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تقریب قابل قبولی می‌توان توزیع شاخص‌های شکنندگی و PMP را نرمال فرض کرد. بر اساس شاخص BI، ماسه‌سنگ‌های مورد بررسی در هر دو حالت خشک و اشباع شکنندگی کمی دارند (طبق طبقه‌بندی هوک، ۱۹۸۳).

شکنندگی را می‌توان به‌عنوان مقادیر اندک طولیل‌شدگی ذرات، جدایش شکستگی^۱ نسبت بالاترین مقاومت فشاری به کششی در نظر گرفت (قهرمان و آلتینداگ، ۲۰۰۴). در این پژوهش خصوصیات فیزیکی و مکانیکی از قبیل مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کشش برزیلین، آزمایش بارنقطه‌ای، تخلخل و دانسیته نمونه‌ها تعیین شده است. برای تعیین شاخص شکنندگی در نمونه‌ها، از چهار نسبت مختلف استفاده شده است. جدول ۴ مفاهیم شکنندگی استفاده شده در این پژوهش را نمایش می‌دهد. برای بیان شاخص شکنندگی (BI) از رابطه (۵) استفاده شده است که با استفاده از مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ محاسبه می‌شود (گوکتان و ایلماز، ۲۰۰۵):

$$BI = 2.065 + K (\log \sigma_c)^2 \quad (۵)$$

در این رابطه BI شاخص شکنندگی، σ_c مقاومت فشاری تک‌محوری برحسب KPa و K ضریبی است که مقدار آن

جدول ۴. مفاهیم شکنندگی مورد استفاده در این پژوهش

$B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}$	(هانکا و داس، ۱۹۷۴)	رابطه (۱)
$B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}$	(هانکا و داس، ۱۹۷۴)	رابطه (۲)
$= \frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2} B_3$	(آلتینداگ، ۲۰۰۲)	رابطه (۳)
$B_4 = (\sigma_c \times \sigma_t)^{0.72}$	(یاریلی و سویر، ۲۰۱۱)	رابطه (۴)
B1, B2, B3, B4 شاخص‌های شکنندگی هستند. σ_c و σ_t به ترتیب مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی سنگ بر حسب مگاپاسکال می‌باشد.		

جدول ۵. رده‌بندی سنگ‌ها بر اساس ضریب K (هانکا و داس، ۱۹۷۴)

K	نوع ماده	گروه سنگ‌ها
۰/۱۷	مواد کربناتی یا با رخ بلوری به خوبی توسعه یافته (به عنوان مثال، سنگ آهک، دولومیت و سنگ مرمر)	گروه a
۰/۲۳۱	مواد آرزلیتی (به عنوان مثال، گلسنگ، شیل، خاک رس)	گروه b
۰/۲۷۰	مواد آرنایتی با بلورهای قوی و رخ با توسعه ضعیف بلوری (به عنوان مثال، ماسه‌سنگ و سنگ شنی محتوی کوارتز)	گروه c
۰/۲۷۶	مواد بلوری آذرین پلی‌مینرال ریزدانه (به عنوان مثال آندزیت، دلریت، دیاباز و ریولیت)	گروه d
۰/۶۵۹	مواد دگرگونی و آذرین پلی‌مینرال درشت‌دانه (برای مثال گرانیت، گابرو، گنیس)	گروه e

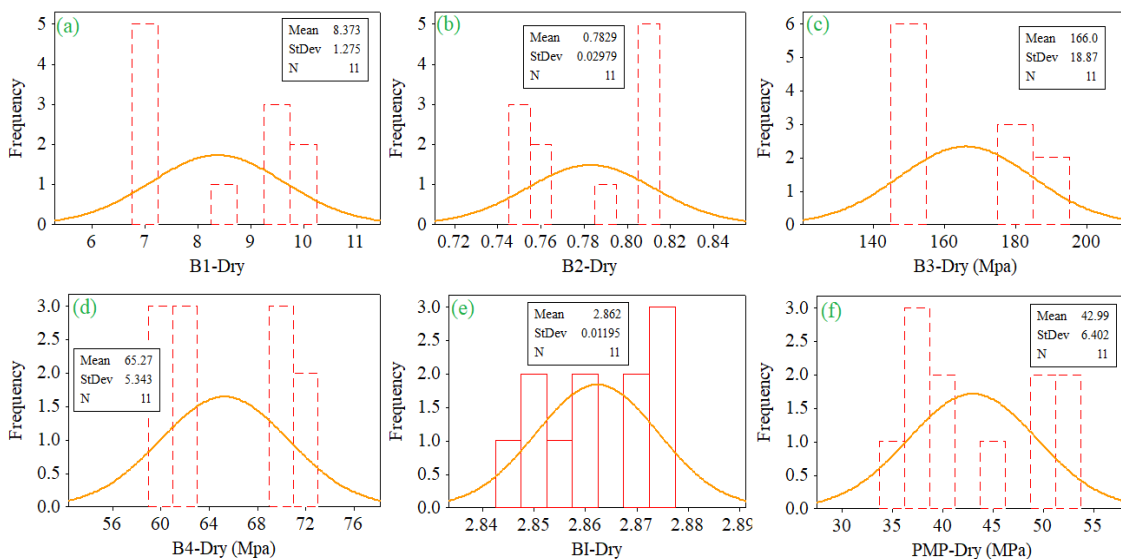
¹ fracture failure

جدول ۶. رده‌بندی سنگ‌ها بر اساس شاخص شکنندگی (هوک، ۱۹۸۳)

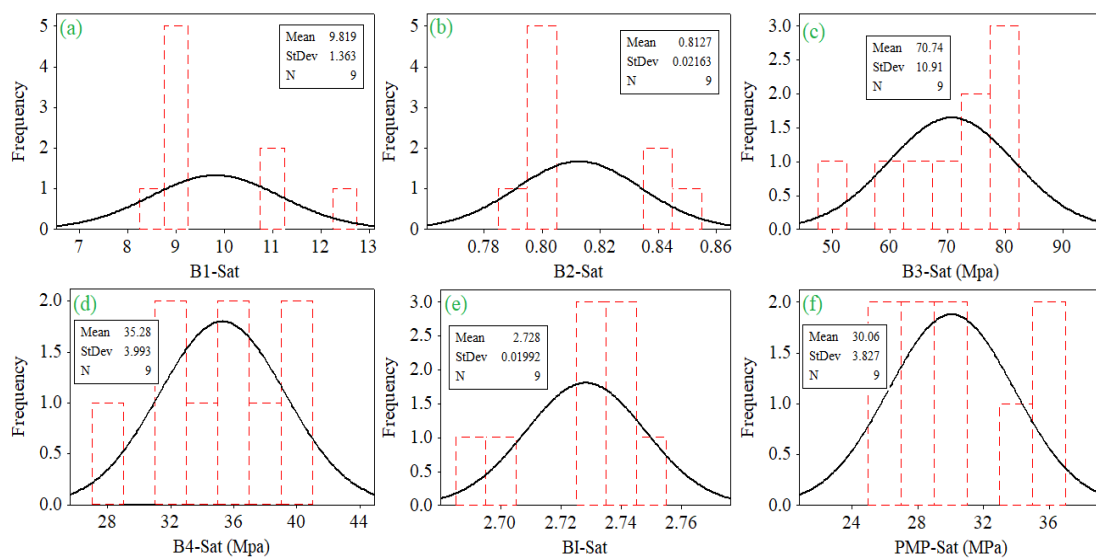
رده سنگ	شاخص شکنندگی (BI)	توصیف
۱	$BI > 25$	خیلی شکننده
۲	$15 < BI < 25$	شکننده
۳	$10 < BI < 15$	متوسط شکننده
۴	$BI < 10$	کمی شکننده

جدول ۷. خلاصه‌ای از نتایج مقادیر شاخص‌های شکنندگی و PMP در حالت خشک

پارامتر	Number	Min	Max	avg	Std
PMP(MPa)	۱۱	۳۵/۸۰	۵۲/۰۲	۴۲/۹۸	۶/۴۰۲
B1	۱۱	۶/۹۱	۹/۷۷	۸/۳۶	۱/۲۷
B2	۱۱	۰/۷۴	۰/۸۱	۰/۷۷	۰/۰۲
B3	۱۱	۱۴۵/۱۸	۱۸۷/۵۲	۱۶۶	۱۸/۸۷
B4	۱۱	۵۹/۳۳	۷۱/۳۴	۶۵/۲۶	۵/۳۴
BI	۱۱	۲/۸۴	۲/۸۷	۲/۸۵	۰/۰۱۱



شکل ۷. نمودار فراوانی و منحنی نرمال شاخص‌های شکنندگی و PMP در شرایط خشک



شکل ۸. نمودار فراوانی و منحنی نرمال شاخص‌های شکنندگی و PMP در شرایط اشباع

جدول ۸. خلاصه‌ای از نتایج مقادیر شاخص‌های شکنندگی و PMP در حالت اشباع

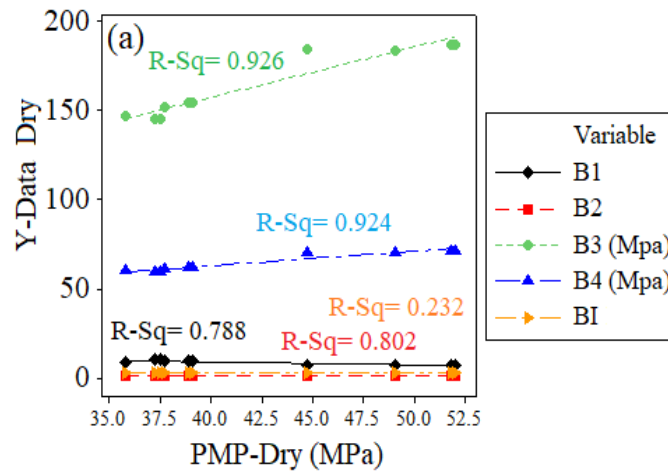
پارامتر	Number	Min	Max	avg	Std
PMP(MPa)	۹	۲۲/۶۰	۳۵/۰۵	۳۰/۰۶	۳/۸۲
B1	۹	۸/۴۷	۱۳/۸۱	۹/۸۱	۱/۳۶
B2	۹	.۷۸	.۸۶	.۸۱	۰/۰۲
B3	۹	۵۱/۸۵	۸۱/۶۸	۷۰/۷۴	۱۰/۹۱
B4	۹	۲۷/۷۲	۳۹/۲۱	۳۵/۲۸	۳/۹۹
BI	۹	۲/۶۹	۲/۷۵	۲/۷۲	۰/۰۱

مهندسی ژئوتکنیک نیز به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (جبین‌پور و همکاران، ۱۳۹۷؛ رحیمی‌شهید و هاشمیان، ۲۰۲۱؛ کرمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ رحیمی‌شهید و همکاران، ۱۴۰۰). بر اساس این تحلیل هر چه میانگین باقیمانده‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد، اعتبار روابط بیشتر است (حسنی‌پاک، ۱۳۸۹). همچنین نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها اعتبار بالای روابط را نشان می‌دهد. منحنی برازش خطی ساده هر رابطه به ترتیب بین شاخص شکنندگی با PMP (شکل ۹) در شرایط خشک نشان داده شده است (روابط در جدول ۹). بر اساس جدول ۹، روابط در سطح معناداری ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$)، معنادار ($\text{Sig} < 0.05$) هستند (به جز رابطه‌ی ۱۱). بنابراین بین PMP و BI خشک رابطه‌ی معناداری وجود ندارد. برای سایر شاخص‌های شکنندگی ضریب تعیین بیش از ۷۸ درصد است و همبستگی بین PMP و شاخص‌های شکنندگی در حالت خشک از نوع مستقیم است (شکل ۹ و جدول ۹). حداکثر دقت روابط نیز بر اساس مقدار ضریب تعیین به‌دست‌آمده بین PMP با B3 و B4 به ترتیب $R^2=0.926$ و $R^2=0.924$ است.

برای بررسی اعتبار معادلات رگرسیونی جدول ۹، منحنی نرمال توزیع مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی شاخص‌های شکنندگی در حالت خشک در شکل ۱۰ ارائه شده است. بر اساس این شکل منحنی توزیع نرمال مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی B1، B2، B3، و B4 تقریباً بر هم منطبق هستند ولی مطابق انتظار برای BI خشک، اختلاف فاحشی بین منحنی‌ها دیده می‌شود. از طرفی برای B1، B2، B3، و B4، مقادیر میانگین و انحراف معیار برای مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده، خیلی به هم نزدیک است (شکل ۱۰). همچنین میزان همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی B1، B2، B3، و B4 در شرایط خشک بیش از ۷۸ درصد است و نشان از اعتبار بالای معادلات جدول ۹ دارد (شکل ۱۱).

بررسی روابط بین شاخص‌های شکنندگی و PMP در شرایط خشک و اشباع

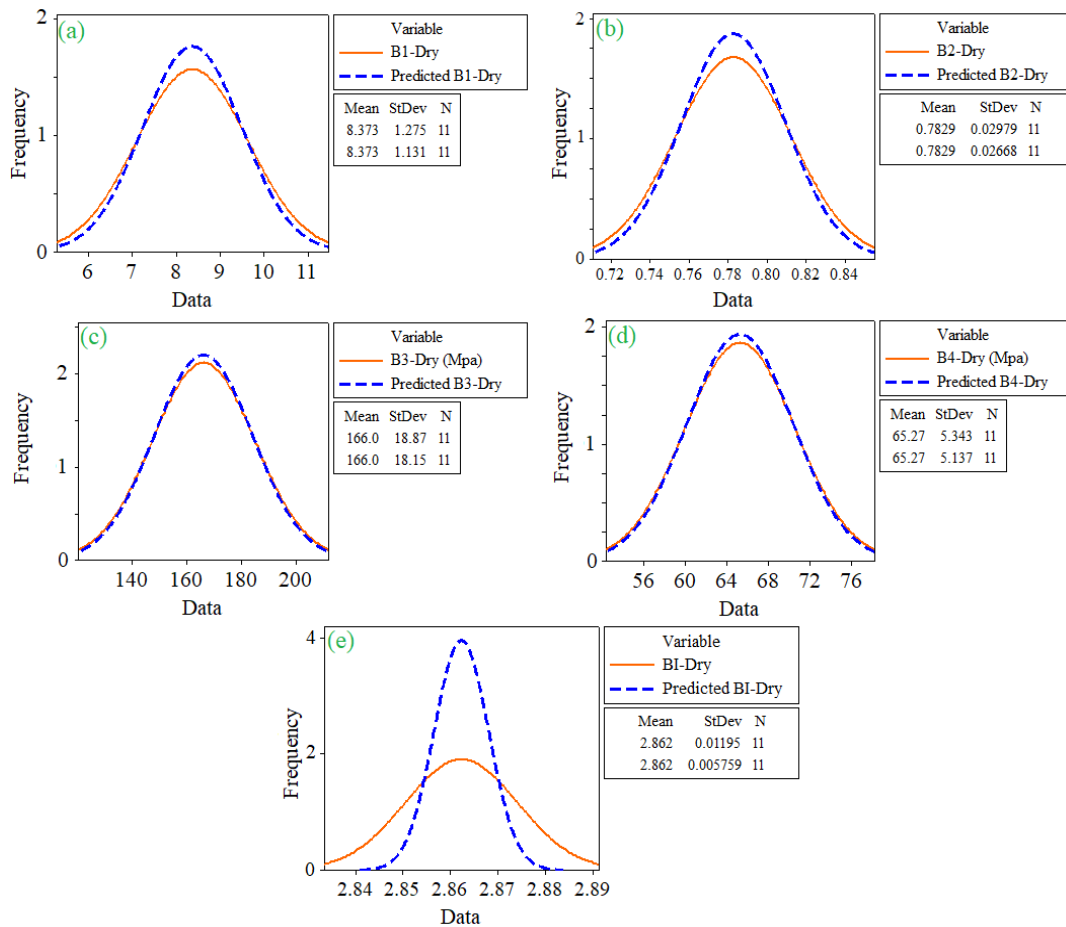
در این بخش پس از شناسایی و حذف داده‌های پرت و خارج از رده، به‌منظور به دست آوردن رابطه شکنندگی سنگ با استفاده از نسبت شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل (PMP) در ماسه‌سنگ‌های سازند قم، از آنالیز رگرسیون ساده استفاده شده است. آنالیز رگرسیون یک روش ساده و در عین حال کاربردی است که به‌خصوص در مطالعات جدید ژئوتکنیک به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد و نتایج قابل قبولی را نیز به همراه داشته است (چمن‌زاده و همکاران، ۲۰۱۶؛ رحیمی‌شهید و هاشمیان، ۲۰۲۱؛ کرمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ رحیمی‌شهید و همکاران، ۱۴۰۰). در این روش روابط بین دو متغیر تصادفی و دارای توزیع نرمال تعیین می‌گردد. در این مطالعه آنالیز رگرسیون توابع خطی (به دلیل دقت بالای این نوع رگرسیون) مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش روابط تخمین زده شده در سطح اطمینان ۹۵ درصد آزمون شده‌اند. برای آنالیز رگرسیون توابع خطی از ضریب تعیین استفاده شده است. ضریب تعیین یکی از شاخص‌های مهم آماری برای ارزیابی مدل‌ها است که هر چه مقدار آن برای یک مدل خاص به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده اعتبار بالای آن مدل است. استفاده از نتایج یک آماره به‌تنهایی نمی‌تواند دقت و اعتبار روابط رگرسیونی را نشان دهد. به همین منظور پس از تعیین روابط رگرسیونی، بررسی میزان دقت، صحت و معناداری این روابط امری ضروری است. در این مطالعه برای تعیین معناداری و صحت روابط از آماره Sig و برای بررسی دقت و اعتبار نتایج روابط از تحلیل باقیمانده‌ها و تعیین میزان همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده استفاده شده است. تحلیل اختلاف مقادیر واقعی و مقادیر تخمینی (باقیمانده‌ها) یکی از روش‌های پرکاربرد برای اعتبارسنجی روابط رگرسیونی و سایر مدل‌سازی‌ها است (حسنی‌پاک، ۱۳۸۹) که در مطالعات



شکل ۹. روابط بین شاخص‌های شکنندگی و PMP در شرایط خشک

جدول ۹. معادلات رگرسیون خطی بین شاخص‌های شکنندگی و PMP در شرایط خشک

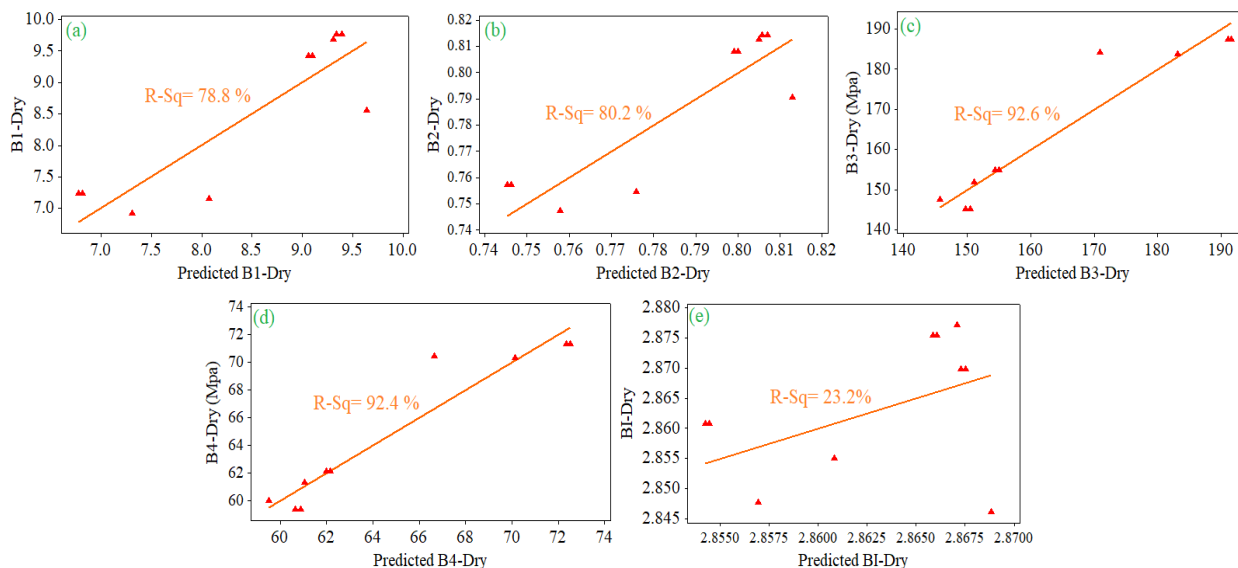
شماره معادله	معادله	R ² %	Sig.
۷	$B1_{Dry} = 15.97 - 0.1767 PMP_{Dry}$	۷۸/۸	۰/۰۰
۸	$B2_{Dry} = 0.9621 - 0.004167 PMP_{Dry}$	۸۰/۲	۰/۰۰
۹	$B3_{Dry} = 44.11 + 2.835 PMP_{Dry}$	۹۲/۶	۰/۰۰
۱۰	$B4_{Dry} = 30.78 + 0.802 PMP_{Dry}$	۹۲/۴	۰/۰۰
۱۱	$BI_{Dry} = 2.901 - 0.0009 PMP_{Dry}$	۲۳/۲	۰/۱۳



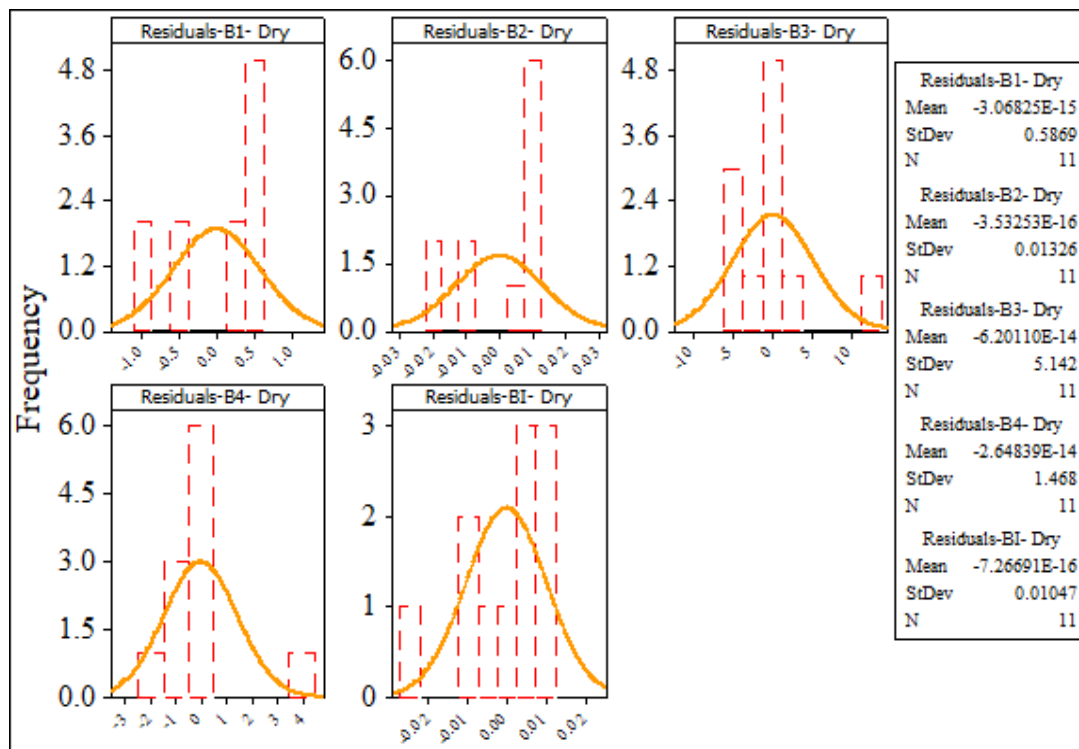
شکل ۱۰. مقایسه‌ی منحنی نرمال مقادیر ورودی و خروجی معادلات رگرسیون شاخص‌های شکنندگی در شرایط خشک

جدول ۱۰، روابط در سطح معناداری ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$)، معنادار ($\text{Sig} < 0.05$) به‌جز رابطه‌ی ۱۶ (BI) اشباع با PMP)، هستند. دقت روابط نیز بر اساس مقدار ضریب تعیین به‌دست‌آمده بین PMP با B1 و B2 به ترتیب $R^2 = 0.88$ و $R^2 = 0.87$ است و برای B3 و B4 این مقدار کم‌تر از ۰/۶ و از نوع رابطه‌ی معکوس است. بنابراین در شرایط اشباع، برای تعیین B3 و B4، استفاده از PMP توصیه نمی‌شود.

منحنی نرمال باقی‌مانده‌های معادلات جدول ۹ در شکل ۱۲ ارائه شده است. تحلیل باقیمانده‌های نشان می‌دهد که توزیع باقیمانده‌ها تقریباً نرمال است و میانگین باقیمانده‌ها نیز به صفر میل می‌کند (شکل ۱۰). همچنین در اکثر موارد باقیمانده‌های صفر حداکثر فراوانی را نشان می‌دهند. به‌طور مشابه منحنی برازش خطی ساده هر رابطه به ترتیب بین شاخص شکنندگی با PMP در شرایط اشباع در شکل ۱۳ نشان داده شده است (روابط در جدول ۱۰). بر اساس



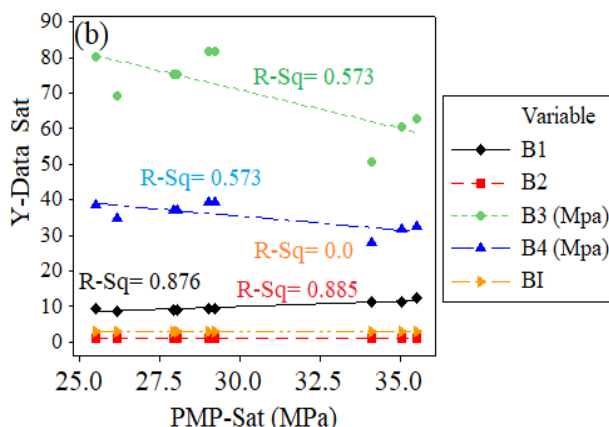
شکل ۱۱. همبستگی بین مقادیر ورودی و خروجی معادلات رگرسیون شاخص‌های شکنندگی در شرایط خشک



شکل ۱۲. نمودار فراوانی و منحنی نرمال باقیمانده‌های معادلات رگرسیون شاخص‌های شکنندگی در شرایط خشک

همچنین میزان همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی B1 و B2 در شرایط اشباع بیش از ۸۷ درصد است (شکل ۱۵). منحنی نرمال باقی‌مانده‌ها در شرایط اشباع در شکل ۱۶ ارائه شده است. تحلیل باقیمانده‌های نشان می‌دهد که توزیع باقیمانده‌ها تقریباً نرمال است و میانگین باقیمانده‌ها نیز به صفر میل می‌کند (شکل ۱۶). همچنین باقیمانده‌های صفر حداکثر فراوانی را نشان می‌دهند.

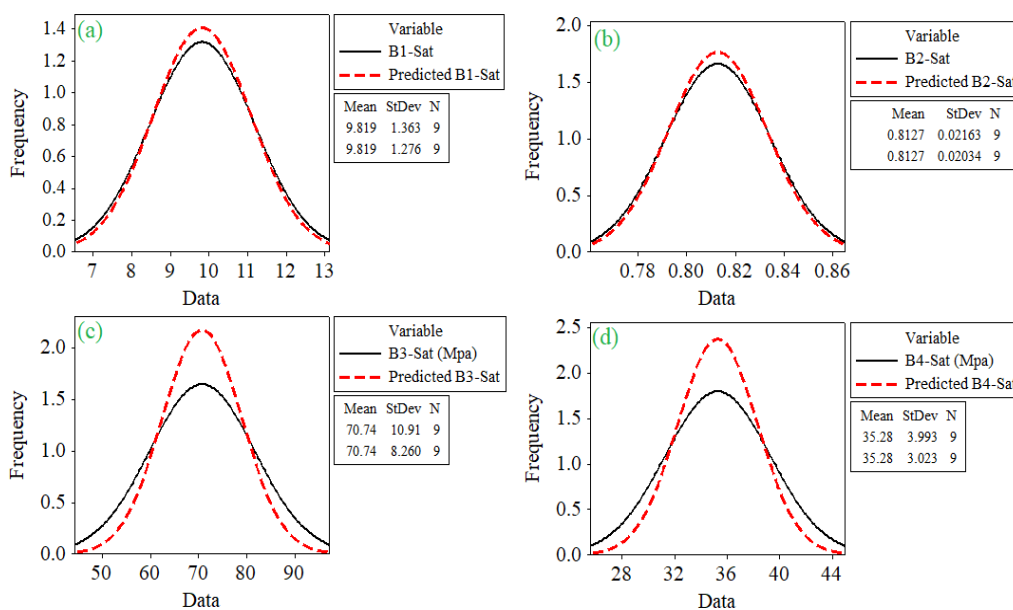
منحنی نرمال توزیع مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی شاخص‌های شکنندگی در حالت اشباع (جدول ۱۰) در شکل ۱۴ ارائه شده است. بر اساس این شکل منحنی توزیع نرمال مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی B1 و B2 تقریباً بر هم منطبق هستند ولی برای B3، B4 و B1، اختلاف فاحشی بین منحنی‌ها دیده می‌شود. همچنین برای B1 و B2، مقادیر میانگین و انحراف معیار برای مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده، خیلی به هم نزدیک است (شکل ۱۴).



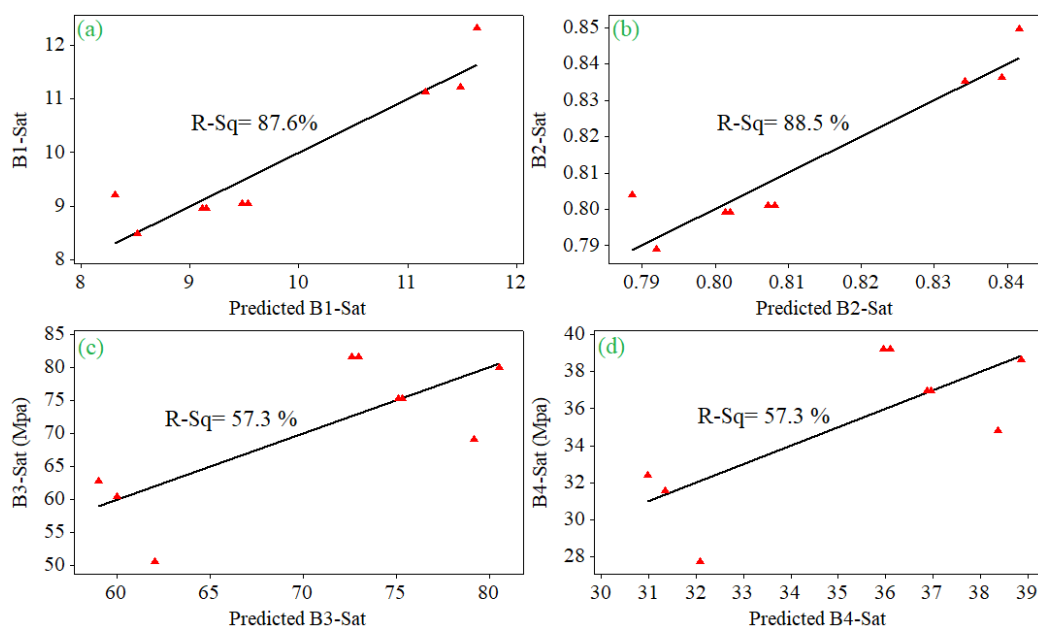
شکل ۱۳. روابط بین شاخص‌های شکنندگی و PMP در شرایط اشباع

جدول ۱۰. معادلات رگرسیون خطی بین شاخص‌های شکنندگی و PMP در شرایط اشباع

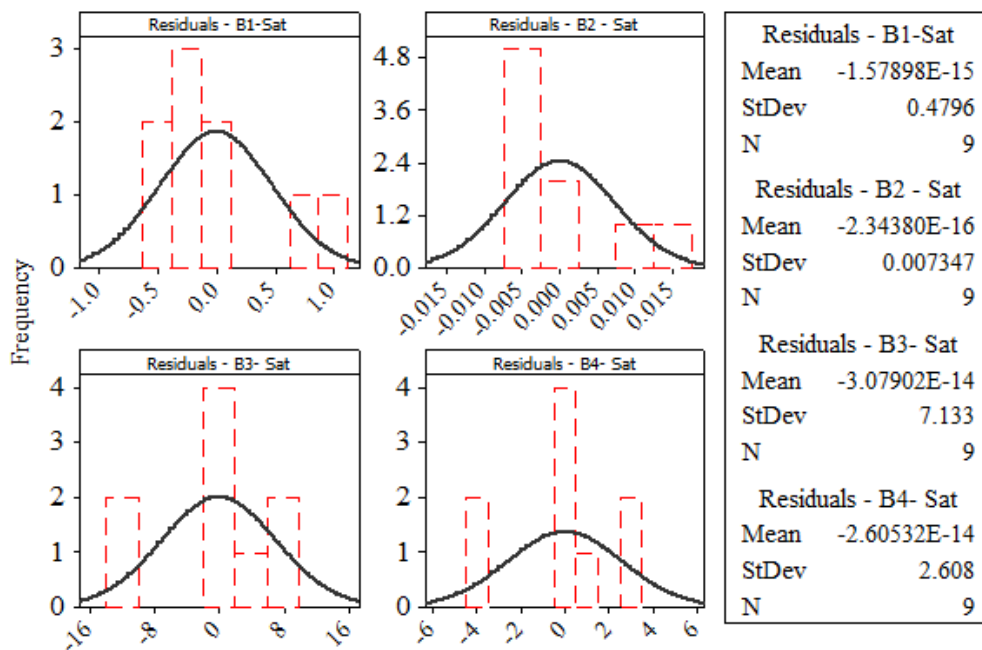
شماره	معادله	R ² %	Sig.
۱۲	$B1_{Sat} = -0.205 + 0.333 PMP_{Sat}$	۸۷/۶	۰/۰۰
۱۳	$B2_{Sat} = 0.6529 + 0.005315 PMP_{Sat}$	۸۸/۵	۰/۰۰
۱۴	$B3_{Sat} = 135.6 - 2.159 PMP_{Sat}$	۵۷/۳	۰/۰۲
۱۵	$B4_{Sat} = 59.03 - 0.79 PMP_{Sat}$	۵۷/۳	۰/۰۲
۱۶	$BI_{Sat} = 2.728 - 0.00002 PMP_{Sat}$	۰/۰۰	۰/۱



شکل ۱۴. مقایسه‌ی منحنی نرمال مقادیر ورودی و خروجی معادلات رگرسیون شاخص‌های شکنندگی در شرایط اشباع



شکل ۱۵. همبستگی بین مقادیر ورودی و خروجی معادلات رگرسیون شاخص‌های شکنندگی در شرایط اشباع



شکل ۱۶. نمودار فراوانی و منحنی نرمال باقیمانده‌های معادلات رگرسیون شاخص‌های شکنندگی در شرایط اشباع

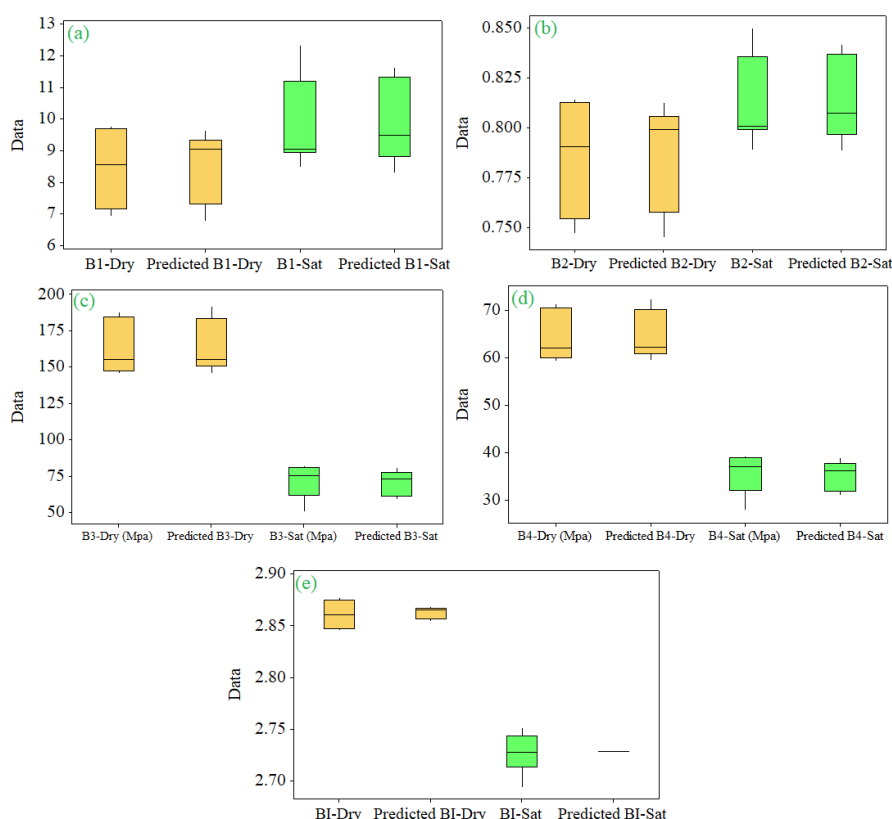
حداقل مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی B1، در شرایط خشک به هم نزدیک‌تر است درحالی‌که همین مقدار برای B1 در شرایط اشباع اختلاف به‌مراتب بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین مینیمم مؤثر (۰.۲۵) و میان‌های مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی B1، در شرایط خشک نسبت به حالت اشباع به هم نزدیک‌تر است. برای B2 نتایج تقریباً مشابه B1 است (شکل ۱۷). حداکثر و حداقل مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی B3، به ترتیب در شرایط اشباع و خشک به هم نزدیک‌تر است. همچنین مینیمم مؤثر (۰.۲۵)،

مقایسه نتایج معادلات رگرسیون در شرایط خشک و اشباع

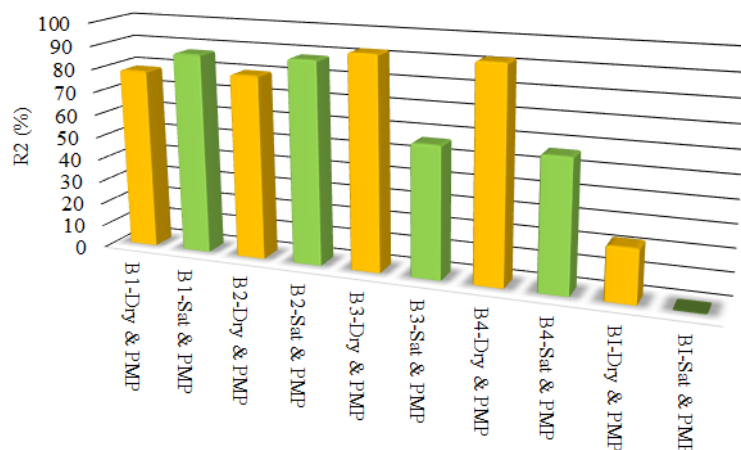
در ادامه به مقایسه روابط رگرسیونی به‌دست‌آمده در یک سنگ خاص پرداخته شده است. همچنین سعی شده مقایسه‌ای شاخص‌های شکنندگی در شرایط خشک و اشباع پرداخته شود. در شکل ۱۷ مقایسه‌ای بین شاخص‌های شکنندگی در شرایط خشک و اشباع با استفاده از نمودارهای Boxplot به‌دست‌آمده در این پژوهش در ماسه‌سنگ صورت گرفته است. حداکثر و

در شکل ۱۸ مقایسه‌ای از نظر ضریب تعیین روابط به‌دست‌آمده در این پژوهش در، ماسه‌سنگ‌های سازند قم در دو حالت خشک و اشباع صورت گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود، در ماسه‌سنگ‌های سازند قم میزان ضریب تعیین به‌دست‌آمده بین ضرایب شکنندگی B3 با PMP و B4 با PMP در حالت خشک، رابطه قابل قبول‌تر و بهتری را نشان می‌دهد. همچنین پارامتر شکنندگی BI با PMP در حالت خشک و اشباع رابطه قابل قبولی را نشان نمی‌دهد.

ماکسیمم مؤثر (۷۵٪) و میانه‌ی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی B3، در شرایط خشک نسبت به حالت اشباع به هم نزدیک‌تر است. برای B4، نتایج مشابه B3 است (شکل ۱۷). نتایج نشان می‌دهد بین حداکثر و حداقل مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی BI، مینیمم مؤثر (۲۵٪)، ماکسیمم مؤثر (۷۵٪) و میانه‌ی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی BI در شرایط خشک و اشباع، انطباق قابل قبولی وجود ندارد. بنابراین تعیین BI با استفاده از PMP در شرایط خشک و اشباع نتایج معتبری ارائه نمی‌کند.



شکل ۱۷. مقایسه شاخص‌های شکنندگی در شرایط خشک و اشباع با استفاده از نمودارهای Boxplot



شکل ۱۸. مقایسه‌ی ضریب همبستگی معادلات ارائه شده در شرایط خشک و اشباع در این مطالعه

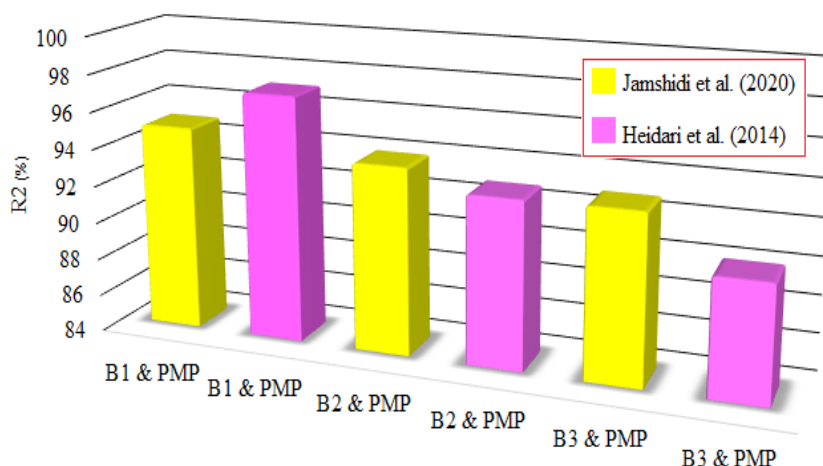
مقایسه نتایج به دست آمده با مطالعات گذشته

در سال‌های اخیر استفاده از رگرسیون در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی برای برآورد پارامترهای مختلف به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور برآورد پارامترهای مختلف فیزیکی، مکانیکی و ضرایب شکنندگی در شرایط (خشک و اشباع) بسیاری از پژوهشگران روابطی را ارائه کرده‌اند. به منظور ارزیابی صحت و دقت روابط ارائه شده در این پژوهش، نتایج مطالعه‌ی حاضر با نتایج مطالعات گذشته مقایسه شد (جدول ۱۱). در میان روابط مختلف ارائه شده، سعی شد روابط جدید و مرتبط با نتایج مطالعه‌ی حاضر استخراج و مورد بحث و بررسی قرار گیرد. همان‌طور که در جدول ۱۱ نشان داده شده است، شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل هر یک به‌عنوان یک متغیر مستقل در معادلات رگرسیون در سنگ‌های مختلف استفاده شده است و نتایج قابل قبولی را هم ارائه کرده است. مشخص است که تأثیر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی به‌طور همزمان در مقدار شاخص‌های

شکنندگی می‌تواند نتایج واقع‌بینانه‌تری (از بعد ژئوتکنیک) ارائه نماید. بدین منظور در مطالعه‌ی جمشیدی و همکاران (۲۰۲۰)، از پارامتر PMP برای تعیین شاخص‌های شکنندگی استفاده شد که هم از لحاظ آماری ($R^2 > 93\%$) و هم از لحاظ بعد ژئوتکنیکی (نسبت شاخص بار نقطه‌ای به تخلخل به‌عنوان یک متغیر مستقل)، نتایج قابل قبولی ارائه شد. در مطالعه‌ی حاضر نیز بین شاخص‌های شکنندگی (به‌جز BI) و PMP نتایج معتبری ارائه شد. در شکل ۱۹ مقایسه‌ای بین ضریب همبستگی معادلات ارائه شده در پژوهش جمشیدی و همکاران (۲۰۲۰) و حیدری و همکاران (۲۰۱۴) انجام شده است. همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود بین ضریب شکنندگی B3 با PMP رابطه معناداری خوبی دیده می‌شود ولی بالاترین همبستگی بین B1 با PMP دیده می‌شود. در حالت اشباع در مطالعه‌ی حاضر نیز رابطه بین B1 و B2 با PMP نسبت به رابطه B3 با PMP همبستگی بالاتری را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱. مقایسه‌ی معادلات رگرسیون شاخص‌های شکنندگی در این مطالعه با مطالعات گذشته

نوع سنگ	(R ²)	روابط مقاومت فشاری	محققین
پریدوتیت	0.54	$B1 = 0.1504 I_{S50} + 7.739$	قبادی و همکاران (۱۳۹۷)
	0.50	$B2 = 0.0072 I_{S50} + 0.6384$	
	0.98	$B3 = -0.3929 I_{S50} + 159.32$	
	0.41	$B4 = 0.58 I_{S50} + 57.51$	
	0.51	$BI = -0.248 I_{S50} + 4.11$	
ماسه‌سنگ	0.95	$B1 = 1.4402 \ln(PMP) + 2.7663$	جمشیدی و همکاران (۲۰۲۰)
	0.94	$B2 = 0.0345 \ln(PMP) + 0.6507$	
	0.93	$B3 = 95.728 \ln(PMP) - 201.62$	
-	0.98	$B3_{dry} = 138.82 I_{S50} - 204.48$	حیدری و همکاران (۲۰۱۴)
	0.97	$B3_{dry} = 95.67 I_{S50} - 118.44$	
ماسه‌سنگ	0.78	$B1_{Dry} = 15.97 - 0.1767 PMP_{Dry}$	در این مطالعه
	0.80	$B2_{Dry} = 0.9621 - 0.004167 PMP_{Dry}$	
	0.92	$B3_{Dry} = 44.11 + 2.835 PMP_{Dry}$	
	0.92	$B4_{Dry} = 30.78 + 0.802 PMP_{Dry}$	
	0.23	$BI_{Dry} = 2.901 - 0.0009 PMP_{Dry}$	
	0.87	$B1_{Sat} = -0.205 + 0.333 PMP_{Sat}$	
	0.88	$B2_{Sat} = 0.6529 + 0.005315 PMP_{Sat}$	
	0.57	$B3_{Sat} = 135.6 - 2.159 PMP_{Sat}$	
	0.57	$B4_{Sat} = 59.03 - 0.79 PMP_{Sat}$	
	0.00	$BI_{Sat} = 2.728 - 0.00002 PMP_{Sat}$	



شکل ۱۹. مقایسه ضریب همبستگی معادلات ارائه شده توسط جمشیدی و همکاران (۲۰۲۰) و حیدری و همکاران (۲۰۱۴)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تخمین پارامتر شکنندگی بر اساس نسبت بار نقطه‌ای به تخلخل (PMP) بر روی ماسه‌سنگ لتگاه بررسی شد و نتایج زیر به دست آمده است:

- ۱- برای بررسی شکنندگی سنگ‌ها می‌توان از نسبت بار نقطه‌ای به تخلخل (PMP) استفاده نمود.
- ۲- ماسه‌سنگ لتگاه در حالت خشک نسبت به اشباع شکننده‌تر هستند.
- ۳- همبستگی بین نسبت بار نقطه‌ای به تخلخل (PMP) با پارامترهای شکنندگی در حالت خشک بهتر و بیشتر از حالت اشباع می‌باشد.
- ۴- بیشترین همبستگی بین نسبت بار نقطه‌ای به تخلخل (PMP) با پارامترهای شکنندگی (B3 و B4) در حالت خشک می‌باشد که مقدار آن به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۹۲ می‌باشد و بین شاخص شکنندگی BI با نسبت بار نقطه‌ای به تخلخل (PMP) رابطه معناداری وجود ندارد.
- ۵- بین نسبت بار نقطه‌ای به تخلخل (PMP) با پارامترهای شکنندگی (B1 و B2) در حالت اشباع رابطه معنادار و خوبی دیده می‌شود که مقدار آن به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۸۸ می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان کمال تشکر را از گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی‌سینا به دلیل فراهم نمودن امکانات لازم برای تهیه مغزه‌های سنگی و مقاطع نازک میکروسکوپی را دارند.

منابع

آقائاتی، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

جبین‌پور، ع. ر.، یاراحمدی بافقی، ع. ر.، غلام‌نژاد، ج (۱۳۹۷) مدل‌سازی زمین‌آماری تخریب‌پذیری توده‌سنگ مبتنی بر روش تجربی لابسچر در معدن سه‌چاهون، نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره ۳، شماره ۲، ص ۵۳-۶۹.

حسنی‌پاک، ع (۱۳۸۹) زمین‌آمار (ژئواستاتستیک)، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم، ۳۱۴ ص.

رحیمی‌شهید، م.، کرمی، م.، لشکری‌پور، غ. ر. (۱۴۰۰) استفاده از رگرسیون چندمتغیره برای ارزیابی تراوایی توده سنگ‌های ساختگاه سد خرسان ۲ با استفاده از ویژگی‌های سیستم ناپیوستگی، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۶، شماره ۳۱، ص ۳۲-۵۱.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور، نقشه زمین‌شناسی چهارگوش همدان، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، تهران.

صفری‌فرخند، س.، لشکری‌پور، غ. ر.، حافظی‌مقدس، ن (۱۳۹۸) ارزیابی شاخص شکنندگی S20 سنگ‌آهک و بررسی عوامل موثر بر آن در حالت خشک و اشباع، مجله زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد ۱۲، شماره ۳، ص ۲۱-۳۶.

فهمی‌فر، ا.، و سروش ح (۱۳۸۰) آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول.

قبادی، م. ح.، امیری، م.، آلیانی، ف (۱۳۹۹) بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی پدیدتیت‌ها (مطالعه‌ی موردی: شهرستان هرسین، استان کرمانشاه)، نشریه‌ی زمین‌شناسی مهندسی، شماره ۱، ص ۱۰۵-۱۳۲.

قبادی، م. ح.، حیدری، م.، رفیعی، ب.، موسوی، س (۱۳۹۲) بررسی تأثیر و زمان چرخه‌ها بر روی رفتار دوام‌پذیری

- Management and Environment in the Third Millennium, Rasht, Iran, p.12
- Folk, R. L (1974) Petrology of sedimentary rocks, Hemphill Publishing Company Texas, USA.
- Frough, O., Khetwal, A., Rostami, J (2019) Predicting TBM utilization factor using discrete event simulation models. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 87: 91-99.
- Goktan, R. M., and Yilmaz Gunes, N (2005) a new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting efficiency. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 105 (10): 727-734.
- Heidari, M. Khanlari, G. R., Torabi-Kaveh, M. Kargarian, S. Saneie, S (2014) Effect of porosity on rock brittleness. *Rock Mech Rock Eng*, 47: 785-790
- Hetenyi, M., I (1966) *Handbook of Experimental Stress Analysis*. 15p.
- Hoek, E (1983) Strength of jointed rock masses. *Geotechnique*, 33 (3): 187-223.
- Hucka, V. Das, B (1974) Brittleness determination of rocks by different methods. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 11: 389-392.
- ISRM (2007) "The Complete ISRM, Suggested Methods for Rock characterization testing and monitoring, International Society of rock mechanics. Morley, A., 1944. *Strength of Material*. Longman, Green, London.
- Jamshidi, A., Abdi, Y., Sarikhani, R (2020) Prediction of Brittleness Indices of Sandstones Using a Novel Physico-Mechanical Parameter. *Geotech Geol Eng*, 9pp.
- Kahraman, S. and Altindag, R (2004) a brittleness index to estimate fracture toughness. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41: 343-348.
- Karakul, H., Ulusay, R (2013) Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation. *Rock Mech. Rock Eng*, 46 (5): 981-999.
- Kaunda, R. B., Asbury, B (2016) Prediction of rock brittleness using nondestructive methods for hard rock tunneling. *JRMGE*, 8 (4): 533-540.
- Lashkaripour, G. R., Rastegarnia, A. and Ghafouri, M (2018) Assessment of brittleness and empirical correlations between physical and mechanical parameters of the Asmari limestone in Khersan 2 dam site, in southwest of Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 138: 124-132.
- Obert, L., Duvall, W. I (1967) *Rock mechanics and the design of structures in rock*. J. Wiley.
- Rahimi Shahid, M., Hashemian, N. S (2021) Evaluation of Kriging method on estimation of Lugeon data. 39th National Congress and 4th International Congress of Earth Sciences, Tehran, Iran, 1-12.
- ماسه‌سنگ‌های سازندهای سازند آغاچاری در جنوب استان خوزستان، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- قبادی، م.، امیری، م.، آلیانی، ف (۱۳۹۷) تعیین شکنندگی پریدوتیت‌ها با استفاده از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی (مطالعه موردی: هرسین، استان کرمانشاه)، *مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی*، دوره ۱۲، شماره ۲۴، ص ۲۶-۳۸.
- کراری، س. م.، حیدری، م.، خادمی‌حمیدی، ج.، شریفی‌تشنیزی، ا (۱۳۹۹) ارزیابی شاخص‌های شکنندگی سنگ‌ها برای تخمین مدول چقرمگی، *مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران*، دوره ۱۳، شماره ۳، ص ۵۱-۶۵.
- کریمی، م.، رحیمی‌شهید، م.، لشکری‌پور، غ. ر (۱۴۰۰) پیش‌بینی شاخص شکنندگی و تعیین همبستگی تجربی بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک سازند تله‌زنگ در ساختگاه سد هواسان، *مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی*، دوره ۱۵، شماره ۳۰، ص ۱۲۵-۱۴۵.
- محمدی، د.، توسلی لاین، ن (۱۳۹۵) تخمین شاخص شکنندگی سنگ‌های آهکی سازند قم با استفاده از خصوصیات فیزیکی، نهمین همایش ملی زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران.
- محمدی، د.، موسوی، س.، محمدی، ن (۱۳۹۵) بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی ماسه‌سنگ‌های سازند آغاچاری در شمال و شمال شرق استان خوزستان، نهمین همایش ملی زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، دانشگاه خوارزمی تهران.
- Altindag, R (2002) the evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hold drills. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 102 (1): 61-66.
- Altindag, R. and Guney, A (2010) Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. *Scientific research and Essays*, 5(16): 2107-2118.
- ASTM (2001) "Annual Book of ASTM Standard – Natual Building Stone": Soil and Rock, part 19. ASTM Publication office. Philadelphia.
- ASTM (2001) "Standard method for determination of the point load strength index of rock", ASTM Standards on Disc 04.08.; Designation D5731.
- ASTM (2001) "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens" D3967.
- Chamanzadeh, A., Moshrefy-Far, M. R., Rahimi Shahid, M., Moosavi, S. M (2016) Statistical analysis of the rock masses permeability in Shahid dam site. *International Conference on Civil Engineering, Architecture, Urban*

- Ramsay, J. G (1967) Folding and fracturing of rocks. Mc Graw Hill Book Company, 568p
- Salimi, A., Faradonbeh, R. S., Monjezi, M., Moormann, C (2018) TBM performance estimation using a classification and regression tree (CART) technique. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77: 429-440.
- Xia, Y., Zhou, H., Zhang, C., He, S., GAO, Y., Wang, P (2019) the evaluation of rock brittleness and its application: a review study, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 4: 1-41.
- Yarali, O. & Soyer, E (2011) The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability, *Scientific Research and Essays*, 6(5): 1077-1088.
- Yarali, O. and Soyer, E (2013) Assessment of relationship between drilling rate index and mechanical properties of rocks. In: *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33: 46-53.

The estimation of Brittleness indexes of Qom Formation sandstones in northern Hamedan using the ratio between point load index and porosity

M. H. Ghobadi¹, M. Amiri^{2*} and M. Rahimi Shahid³

1- Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran

2, 3- Ph. D. student, Dept., of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

* a.mehrdad1372@yahoo.com

Received: 2021/9/29 Accepted: 2022/1/9

Abstract

Brittleness which is of great significance in rock engineering properties is one of the most important properties of rock. The evaluation of brittleness indexes is a helpful method for the estimation of rock brittleness. However, there is still much uncertainty about the relation between rock brittleness and rock failures (i.e. Hydraulic fracture, Rock blasting in coal mines and tunnels). This fact can be attributed to the lack of a concept of universally accepted brittleness and brittleness index. In this paper, the relationship between rock brittleness is investigated by using the ratio of point index to porosity (PMP) in the sandstones of the Qom Formation. In addition, the available estimation methods for the rock brittleness index are summarized and their application is briefly discussed. In order to estimate of brittleness index and the ratio of point load index, 15 blocks from Latgah sandstones in northern Hamedan have been selected. Lithological characteristics, physical and mechanical properties of these sandstones have been determined. The samples have been tested under point load strength index (PLI), uniaxial compressive strength (UCS), and Brazilian tensile strength (BTS) experimentals. Then, the ratio of point load index to porosity (PMP) has been calculated. To achieve the desired target, the most appropriate and meaningful relationships between brittleness rock and the ratio of point load index to porosity (PMP) have been presented by the regression method. The relationships between point load index, porosity, and brittleness indexes (B1, B2, B3, B4, and BI) have been evaluated by simple regression (SR) techniques using Minitab 16 software. The statistical analyses revealed the existence of powerful correlations between the ratio point load index to porosity (PMP) with brittleness indexes (B3, B4) in the dry state and also, the powerful correlations between the ratio point load index to porosity (PMP) with brittleness indexes (B1, B2) in the saturated state.

Keywords: Qom Formation, Physical and Mechanical Properties, Sandstone, Brittleness, Hamedan