

## پیش‌بینی شاخص شکنندگی و تعیین همبستگی تجربی بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ آهک سازند تله‌زنگ در ساخت‌گاه سد هواسان

مهدی کرمی<sup>۱\*</sup>، مجتبی رحیمی‌شهید<sup>۲</sup> و غلامرضا لشکری‌پور<sup>۳</sup>

۱ و ۲- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

نویسنده مسئول: [Geotechnical47@gmail.com](mailto:Geotechnical47@gmail.com)\*

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۹۹/۱۲/۱۶

دریافت: ۹۹/۸/۱۰

### چکیده

تعیین پارامترهای شکنندگی و ژئومکانیکی به‌ویژه مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) و مدول یانگ ( $E_s$ )، برای طراحی و کاربردهای مختلف مهندسی سنگ مورد نیاز است. ارزیابی این پارامترها، فرآیندی زمان‌بر، طاقت‌فرسا و هزینه‌بر است و نیازمند تهیه‌ی مغزه‌های سنگی مناسب است؛ بنابراین، از همبستگی‌های تجربی برای پیش‌بینی خصوصیات سنگ‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش، برای پیش‌بینی شکنندگی و تعیین همبستگی تجربی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سازند آهکی تله‌زنگ، از ۷۴ نمونه مغزه‌سنگی تهیه شده از حفاری ۱۰ گمانه ژئوتکنیکی به عمق ۷۰ متر در ساخت‌گاه سد هواسان در شرایط خشک و اشباع استفاده شد. پس از بررسی آمار توصیفی نمونه‌ها در نرم‌افزار SPSS 25، روابط همبستگی از نوع رگرسیون ساده بر طبق بهترین برازش بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی برقرار شد و معادله تجربی با ضریب تعیین ( $R^2=96$ )، با استفاده از مدل رگرسیون چندگانه نیز برای پیش‌بینی شاخص شکنندگی سنگ‌آهک تله‌زنگ ارائه گردید. در نهایت معادله تجربی به‌دست‌آمده برای تعیین شاخص شکنندگی (BI) در شرایط اشباع، بر اساس مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، مقاومت کششی برزیلی (BTS) و سرعت موج فشاری ( $V_p$ ) و روابط آماری بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی با روابط گذشته مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد صحت و دقت روابط آماری ارائه شده با روابط گذشته مطابقت دارد.

واژه‌های کلیدی: شکنندگی، پارامترهای ژئومکانیکی، روابط آماری، سازند تله‌زنگ، سد هواسان

### ۱- پیشگفتار

بازگشتی اشمیت که به درجه اشباع ماده‌سنگ بستگی دارد را پیشنهاد کرد. در مطالعه اوزترک و آلتینپینار (۲۰۱۷) روابطی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و بار نقطه‌ای برآورد شد. واسانلی و همکاران (۲۰۱۵) نیز بین مقاومت فشاری با چگالی ظاهری و سرعت موج فشاری ( $V_p$ ) در شرایط خشک و اشباع رابطه برقرار کردند. در بعضی شرایط از سرعت موج فشاری ( $V_p$ ) و سرعت موج برشی ( $V_s$ ) و شاخص بار نقطه‌ای برای تعیین پارامترهای استاتیکی و دینامیکی سنگ‌های دست‌نخورده استفاده می‌شود که به نظر می‌رسد در ارزیابی هوازدگی سنگ، پیش‌بینی تغییر شکل توده‌سنگ و تخمین زون‌های خورد شده مفید باشد. انجام آزمایش‌های غیر مخرب التراسونیک<sup>۱</sup> در مقایسه با آزمون‌های آزمایشگاهی، ساده‌تر، سریع‌تر و اقتصادی‌تر هستند (عبدالرحیم و همکاران، ۲۰۰۹؛ غفوری و همکاران، ۲۰۱۸).

تعیین پارامترهای شکنندگی و ژئومکانیکی، به‌ویژه مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) و مدول یانگ ( $E_s$ ) سنگ‌ها برای طراحی و کاربردهای مختلف مهندسی سنگ مورد نیاز است. ارزیابی این پارامترها فرآیندی زمان‌بر، طاقت‌فرسا و هزینه‌بر است و نیازمند تهیه‌ی مغزه‌های سنگی مناسب است؛ بنابراین از همبستگی‌های تجربی برای پیش‌بینی خصوصیات سنگ‌ها استفاده می‌شوند. مطالعات متعددی برای پیش‌بینی خصوصیات فیزیکی، استاتیکی و دینامیکی سنگ‌ها در شرایط خشک و اشباع بر اساس روابط آماری انجام شده است. بررسی‌های کاراکول و اولوسای (۲۰۱۳) نشان داد با افزایش درجه اشباع، ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل سنگ‌ها کاهش می‌یابند درحالی‌که سرعت موج فشاری ( $V_p$ ) روند متغیری را نشان می‌دهد. کاراکول (۲۰۱۶) رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مقادیر

<sup>1</sup> Ultrasonic test

تک‌محوره، سرعت موج فشاری، تخلخل و شاخص جذب سریع (QAI) (به‌استثنای چگالی خشک)، همبستگی خوبی با شاخص شکنندگی (B3) دارد. براساس نتایج بدست آمده از مطالعه قبادی و همکاران (۱۳۹۷)، رابطه منطقی و قابل قبولی بین دانسیته خشک و آزمایش سرعت صوت با شکنندگی پریدوتیت‌های هرسین استان کرمانشاه، وجود ندارد. بیش‌ترین انطباق بین آزمایش درصد جذب آب، آزمایش چکش‌اشمیت و آزمایش بار نقطه‌ای به ترتیب با مقادیر شاخص شکنندگی BI، B1 و B3 می‌باشد. در واقع خصوصیات مکانیکی پریدوتیت‌ها نسبت به خصوصیات فیزیکی انطباق بیشتری را با شاخص شکنندگی نشان می‌دهد. در پژوهش‌های بعدی قبادی و همکاران (۱۳۹۸) با ارزیابی مقاومت فشاری و کششی سنگ‌های کربناته با استفاده از آزمایش بار نقطه‌ای، روابط همبستگی با ارزش ضربه‌ای سنگ‌دانه را ارائه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد رگرسیون چندمتغیره، تخمین بهتری از مقاومت فشاری تک‌محوره را ارائه می‌دهد. بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی پریدوتیت‌ها در شهرستان هرسین استان کرمانشاه بر اساس مطالعات قبادی و همکاران (۱۳۹۹) میزان انطباق بیش‌تری بین نتایج خصوصیات مکانیکی در شرایط خشک نسبت به شرایط اشباع را نشان می‌دهد. عبدی (۱۳۹۹) کاربرد آنالیز رگرسیون چندمتغیره برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از خصوصیات پتروگرافی را مورد بررسی قرار داد. وی تعدادی معادله پیش‌بینی کننده چندمتغیره برای پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی با استفاده از خصوصیات پتروگرافی معرفی کرد. برخی روابط تجربی ارائه‌شده توسط محققین مختلف بین پارامترهای مقاومتی و شکنندگی در جدول (۱) آورده شده است.

در اغلب پروژه‌های مهندسی به دلیل گسترش سنگ‌های آهکی در سطح زمین، مطالعه خصوصیات مهندسی این گونه سنگ‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این خصوصیات در پروژه‌های مهندسی سنگ، مانند تونل و مغارهای زیرزمینی، فونداسیون سدها، حفاری و تجزیه و تحلیل پایداری شیب‌های سنگی، مورد استفاده قرار می‌گیرند (چانگ و همکاران ۲۰۰۶؛ آلمداگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ یتکین و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین به دلیل

شکنندگی نیز یکی از ویژگی‌های کنترل‌کننده رفتار ماده سنگ است. این عامل در پروژه‌های مهندسی سنگ، سازه‌های زیرزمینی و حفاری توده‌های سنگی (معادن) کاربرد دارد. از دهه ۱۹۷۱ تاکنون مفهوم شکنندگی سنگ توسط محققین بسیاری توصیف شده است. شکنندگی، حاصل شکست همراه با تغییر شکل سنگ است. مقدار شاخص شکنندگی سنگ به‌طور غیرمستقیم با استفاده از مقادیر مقاومت کششی برزیلی (BTS) و مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) قابل‌اندازه‌گیری است (آلتینداگ، ۲۰۱۰). محققین مختلفی شکنندگی سنگ را با استفاده از روش‌های مختلف آزمایش سنگ توصیف و اندازه‌گیری می‌کنند. با این حال هیچ توافقی بر روی اندازه‌گیری شکنندگی در جامعه مکانیک سنگ به‌استثنای اندازه‌گیری غیرمستقیم آن به‌عنوان تابعی از مقاومت سنگ مانند مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین وجود ندارد (یاگیز، ۲۰۰۶؛ گنگ و ژاو، ۲۰۰۷؛ آلتینداگ، ۲۰۱۰؛ یاگیز و گوکسولگو، ۲۰۱۰). شکنندگی و شکست سنگ به نوع سنگ، بافت سنگ، دما، تخلخل و رطوبت مرتبط است. از این رو می‌توان با توجه به این پارامترها که شکنندگی سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به تخمین شکنندگی سنگ‌ها پرداخت. در سال‌های گذشته برخی محققین تلاش کردند که شاخص شکنندگی را با سایر ویژگی‌های مقاومتی مرتبط سازند.

کهرمان و همکاران (۲۰۱۷) با تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، مقاومت کششی برزیلین (BTS) شکنندگی بسیاری از سنگ‌ها را برآورد کردند. در مطالعات ازفیرات و همکاران (۲۰۱۶)، کاندا و آسبوری (۲۰۱۶) و ژائو و همکاران (۲۰۱۷) روش‌های مختلفی برای برآورد شکنندگی سنگ‌ها ارائه شد. در یک مطالعه‌ی موردی، ژیا و همکاران (۲۰۱۹) به ارزیابی شکنندگی سنگ و کاربرد آن پرداخت. کراری و همکاران (۱۳۹۹) نیز روابط آماری بین شاخص‌های شکنندگی با مدول چقرمگی ارائه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌دهنده‌ی ارتباط قوی بین شاخص شکنندگی B3 و B4 با مدول چقرمگی سنگ‌ها است. قبادی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از خصوصیات ژئومکانیکی، به پیش‌بینی شکنندگی سنگ‌آهک پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که بر اساس رگرسیون ساده، خواص ژئومکانیکی شامل مقاومت کششی، مقاومت فشاری

هواسان، همبستگی‌های تجربی مناسبی در شرایط خشک و اشباع برقرار شد و معادله‌ای برای پیش‌بینی شاخص شکنندگی با استفاده از رگرسیون چندگانه ارائه گردید. در نهایت روابط آماری پیشنهاد شده با روابط پیشین مقایسه شد.

کاربرد گسترده این نوع سنگ‌ها به‌عنوان مصالح ساختمانی، برآورد شکنندگی، خصوصیات استاتیکی و دینامیکی آن‌ها در مکانیک سنگ و مهندسی سنگ اهمیت فراوانی دارد. در این پژوهش، پس از بررسی آماری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک سازند تله‌زنگ در ساخت‌گاه سد

جدول ۱. روابط تجربی بین پارامترهای مقاومتی و شکنندگی

معادله	R square (R <sup>2</sup> )	توصیف	منبع
$UCS_{sat} = 204.8 * n^{(-1.121)}$	۰/۸۴	سنگ‌های رسوبی	ارگولر و الوسای (۲۰۰۹)
$\rho_{sat} = 0.403 * \rho_{dry} + 1.252$	۰/۹۲	سنگ‌های آهکی	واسانلی و همکاران (۲۰۱۵)
$UCS_{dry} = 1.4e^{-0.164n}$	۰/۹۳	سنگ‌های رسوبی	ارگولر و الوسای (۲۰۰۹)
$UCS_{sat} = 393.1n^{(-0.847)}$	۰/۸۶	سنگ‌های رسوبی	ارگولر و الوسای (۲۰۰۹)
$V_{p\_dry} = -0.021 * n^{(4.32)}$	۰/۸۹	سنگ‌های کالک‌آرنایت	عبدلایی و همکاران (۲۰۱۳)
$V_{p\_sat} = 0.94 * (V_{p\_dry}) + 2.10$	۰/۷۴	سنگ‌های مختلف	کهرمان (۲۰۰۷)
$V_{p\_sat} = 0.804 * (V_{p\_dry}) + 352.64$	۰/۸۶	سنگ‌های آهکی	واسانلی و همکاران (۲۰۱۵)
$V_{p\_sat} = -0.0224 * n + 4.4$	۰/۹۴	سنگ‌های کالک‌آرنایت	عبدلایی و همکاران (۲۰۱۳)
$UCS_{sat} = 3.774 * (V_{p\_sat})^{1.71}$	۰/۷۲	سنگ‌های مختلف	کاراکول و الوسای (۲۰۱۳)
$TS_{dry} = 1.05 * (V_{p\_sat})$	۰/۷۵	سنگ‌های مختلف	کاراکول و الوسای (۲۰۱۳)
$TS = 0.701e^{(0.0005 * V_{p\_dry})}$	۰/۸۹	گارت	واسکونسوز و همکاران (۲۰۰۸)
$UCS_{sat} = 0.659 * UCS_{dry}$	۰/۹۳	سنگ‌های آهکی	واسارهلی (۲۰۰۵)
$E_{s\_sat} = 0.657 * E_{s\_dry}$	۰/۸۷	سنگ‌های آهکی	واسارهلی (۲۰۰۵)
$UCS_{sat} = 0.879 * UCS_{dry} + 0.818$	۰/۹۵	تراورتن	ترک و واسارهلی (۲۰۱۰)
$UCS_{sat} = 0.759 * UCS_{dry}$	۰/۹۱	ماسه‌سنگ	واسارهلی (۲۰۰۳)
$UCS_{sat} = 0.729 * UCS_{dry}$	۰/۹۰	توف آتشفشانی	واسارهلی (۲۰۰۲)
$E_{s\_sat} = 0.807 * E_{s\_dry}$	۰/۹۰	توف آتشفشانی	واسارهلی (۲۰۰۲)
$BI = 0.2\sigma_c - 2.2\sigma_t + 0.91p - 3.81$	۰/۸۸	سنگ‌های مختلف	یاگیز (۲۰۰۹)
$B_3 = 0.06\sigma^2 - 1.3\sigma_c + 23.87$	۰/۹۸	سنگ‌های مختلف	منگ و همکاران (۲۰۰۵)
$B_3 = 0.06 SH^{1.45}$	۰/۷۲	سنگ‌های مختلف	آلتینداگ و گونی (۲۰۱۰)

۲- سد هواسان بلورین است تشکیل می‌دهد. سازند تله‌زنگ واحد کربنات‌های به سن پالئوسن تا ائوسن میانی در برش الگو و شامل ۸۷۰ متر سنگ‌آهک خاکستری است که به‌طور معمول روی سازند آواری امیران و زیر سازند کشکان قرار دارد (آقنابتی، ۱۳۸۳). این سازند به‌طور کلی شامل تناوبی از آهک‌های ماسه‌ای، آهک‌های بلورین و آهک‌های مارنی به رنگ‌های خاکستری روشن است که عموماً نازک لایه تا متوسط لایه است. از مشخصه‌های سازند تله‌زنگ وجود افق‌های متعددی از آهک‌های حفره‌دار است که به‌صورت پراکنده در بخش‌های مختلف از ردیف کربناته آشکار شده‌اند. تکیه‌گاه راست محور سد را سازند شیلی مارنی امیران تشکیل داده که غالباً از تناوب طبقات مارنی و شیلی خاکستری تیره تشکیل یافته است. مهم‌ترین عارضه ساختاری نزدیک به ساخت‌گاه شاخه‌ای از گسل اصلی زاگرس است که به گسل جبهه کوهستان موسوم

## ۲- سد هواسان

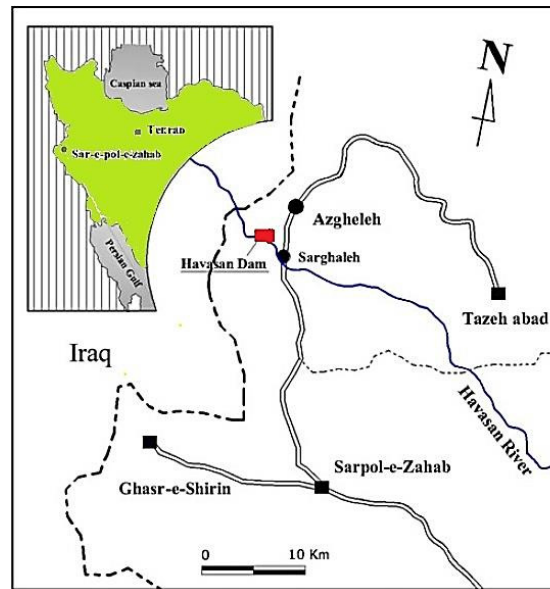
سد مخزنی هواسان از نوع سد سنگریزه‌ای با هسته رسی با ارتفاع ۵۴ متر از پی و طول تاج ۱۲۰۰ متر و حجم مخزن ۷۰ میلیون متر مکعب با هدف تأمین آب کشاورزی و تولید برق بر روی رودخانه هواسان در فاصله تقریبی ۳۹ کیلومتری شمال باختری شهرستان سرپل‌ذهاب از توابع استان کرمانشاه و در غرب ایران قرار گرفته است. در شکل (۱) موقعیت سد هواسان نشان داده شده است.

## ۳- زمین‌شناسی

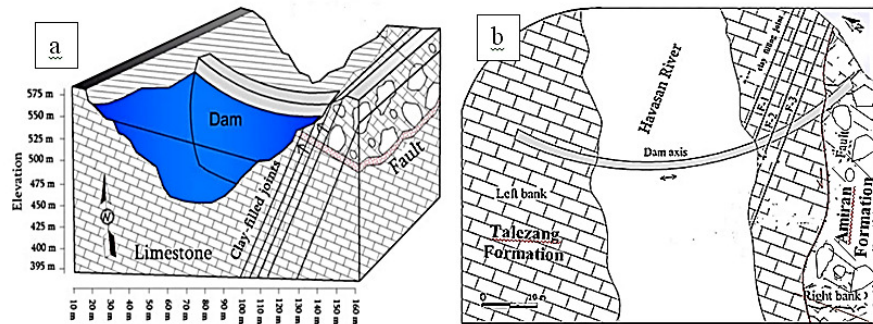
واحدهای سنگ‌چینه‌شناسی تشکیل‌دهنده ساخت‌گاه سد هواسان شامل واحدهای سنگی آهکی و شیلی مارنی اواخر دوران دوم و اوایل دوران سوم و نیز نهشته‌های جوان است. تکیه‌گاه چپ و بستر سد هواسان را سازند تله‌زنگ که شامل سنگ‌های آهکی خاکستری روشن ماسه‌ای تا مارنی و بعضاً

سیستم تخلیه سیلاب (سرریز) در سازند آهکی تله‌زنگ جای گرفته است. در شکل (۲) موقعیت سه‌بعدی ساختگاه سد هواسان و نقشه زمین‌شناسی محل سد نشان داده شده است. همچنین در شکل (۳) مقطع زمین‌شناسی محور سد و موقعیت گمانه‌های حفاری شده نمایش داده شده است.

است. این شاخه خود به چندین شعبه فرعی تقسیم گردیده است که یکی از شاخه‌های فرعی آن از فاصله بسیار نزدیکی از تکیه‌گاه چپ محور سد می‌گذرد. سیستم انحراف آب به دلیل شکل قوسی کل مسیر سیستم، در بخش‌های ابتدایی و انتهایی در سازند امیران و در بخش میانی در سازند تله‌زنگ جای گرفته است. همچنین تمامی مسیر اجزای



شکل ۱. موقعیت سد هواسان در استان کرمانشاه و در غرب ایران



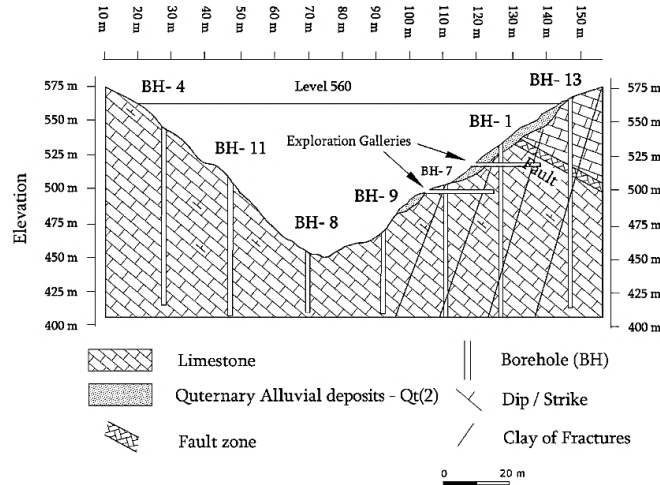
شکل ۲. a. موقعیت سه‌بعدی ساختگاه سد هواسان، b نقشه زمین‌شناسی محل سد (ملکی، ۲۰۱۱)

۴- مواد و روش‌ها  
برای انجام این پژوهش، در ابتدا ۷۴ نمونه سنگی بر اساس استاندارد ASTM D 4543، از حفاری ۱۰ گمانه ژئوتکنیکی به عمق ۷۰ متر در ساخت‌گاه سد هواسان تهیه شد. سپس برای پیش‌بینی شکنندگی و تعیین همبستگی تجربی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سازند آهکی تله‌زنگ در شرایط خشک و اشباع، نمونه‌های مغزه‌گیری شده به طول  $54\text{mm}(N_x)$  و نسبت طول به قطر  $2/5$  برش داده شد. پس از بررسی خصوصیات آماری نمونه‌ها در نرم‌افزار SPSS 25، روابط همبستگی از نوع رگرسیون ساده بر اساس بهترین برازش بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی برقرار شد؛ و معادله تجربی برای تعیین شاخص شکنندگی (BI) در شرایط اشباع، با استفاده از مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، مقاومت کششی برزیلی (BTS) و

برای انجام این پژوهش، در ابتدا ۷۴ نمونه سنگی بر اساس استاندارد ASTM D 4543، از حفاری ۱۰ گمانه ژئوتکنیکی به عمق ۷۰ متر در ساخت‌گاه سد هواسان تهیه شد. سپس برای پیش‌بینی شکنندگی و تعیین همبستگی تجربی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی سازند آهکی تله‌زنگ در شرایط خشک و اشباع، نمونه‌های مغزه‌گیری شده به طول

یکسان نیستند. برای تفسیر صحیح نتایج شامل تاثیر شرایط اشباع و مقایسه بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و دینامیکی در هردو شرایط خشک و اشباع سعی شد میانگین نتایج هر پارامتر مد نظر قرار گیرد. که در ادامه به شرح آزمایش‌های انجام شده پرداخته شده است.

سرعت موج فشاری ( $V_p$ ) بر اساس مدل رگرسیون چندگانه مورد ارزیابی قرار گرفت و با استفاده از تحلیل باقیمانده‌ها و روش مقایسه با روابط ارائه‌شده در گذشته، صحت و دقت روابط آماری پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش با توجه به اینکه تعداد برخی از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی در شرایط خشک و اشباع



شکل ۳. مقطع زمین‌شناسی و موقعیت گمانه‌های حفاری‌شده در محور سد هواسان (ملکی، ۲۰۱۱)

۵۴ میلی‌متر و طول ۱۱۰ تا ۱۳۰ میلی‌متر استفاده شد و پس‌ازاینکه دو انتهای هر نمونه با استفاده از اره کاملاً صاف و موازی برش داده شد در شرایط خشک و شرایط اشباع مورد آزمایش قرار گرفت. تعیین سرعت موج فشاری ( $V_p$ ) و موج برشی ( $V_s$ ) نیز بر اساس استاندارد ASTM D 2845 انجام شده است. به‌منظور ارزیابی سرعت موج نمونه سنگ‌های با قطر ۵۴ میلی‌متر و طول ۲۵ تا ۳۰ تهیه شد. همچنین برای ارزیابی دوام - وارفتگی ( $Id_2$ ) و آماده‌سازی نمونه‌های سنگی روش آزمایش با توجه به استاندارد ASTM D 4644 انجام شد. نتایج آماری توصیفی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سنگ‌آهک تله‌زنگ در جدول (۲) ارائه شده است.

#### تعیین شاخص شکنندگی

آزمایش شکنندگی اندازه‌گیری مطمئنی از مقاومت سنگ در اثر ضربات مکرر به دست می‌دهد. روش آزمایش شکنندگی مورد استفاده برای اولین بار توسط ماترن و هجلمر (۱۹۴۳)، در سوئد گسترش یافت. شکنندگی را

#### آزمون‌های فیزیکی

اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها مطابق استانداردهای ISRM 1981<sup>۱</sup> انجام شده است. این ویژگی‌ها شامل وزن واحد حجم خشک ( $\gamma_{dry}$ ) و اشباع ( $\gamma_{sat}$ )، درصد جذب آب ( $w.o\%$ )، درصد تخلخل ( $n\%$ ) است. در جدول (۲) میانگین نتایج خصوصیات فیزیکی نمونه‌های سنگ‌آهک سازند تله‌زنگ ارائه شده است.

#### آزمون‌های مکانیکی

به‌منظور ارزیابی مقاومت کششی ( $\sigma_t$ ) از آزمایش برزیلین (BTS) استفاده شده است. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D 3967 انجام شد. برای تعیین این پارامتر، نمونه‌های با قطر ۵۴ میلی‌متر و ضخامت ۲۴ تا ۳۱ میلی‌متر تهیه شد و آزمایش برزیلین بر روی نمونه‌ها در شرایط خشک و اشباع انجام شده است. پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول یانگ ( $E$ ) و نسبت پواسان ( $\nu$ ) نیز بر اساس استاندارد ASTM D 7012 برآورد گردید. برای انجام آزمایش تراکم تک‌محوری (UCS) از مغزه‌های با قطر

<sup>1</sup> International Society for Rock Mechanics

تعیین خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلین) از چهار رابطه مختلف استفاده شده است. جدول (۳) مفاهیم شکنندگی استفاده شده در این پژوهش را نمایش می‌دهد.

می‌توان به‌عنوان مقادیر اندک طول‌شدگی ذرات، جدایش شکستگی<sup>۲</sup> و نسبت بالاترین مقاومت فشاری به کششی در نظر گرفت (کهرمان و آلتینداگ، ۲۰۰۴). برای تعیین شاخص شکنندگی نمونه‌های سنگ‌آهک تله‌زنگ، پس از

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی، مکانیکی، دینامیکی و ضرایب شکنندگی نمونه‌های سنگ‌آهک تله‌زنگ

	تعداد	محدوده	حداقل	حداکثر	میانگین	واریانس	انحراف معیار
$\gamma$ -Dry (gr/cm <sup>3</sup> )	۷۴	۰/۵۶	۲/۱۱	۲/۶۷	۲/۴۸	۰/۰۱	۰/۰۹۹
$\gamma$ -sat (gr/cm <sup>3</sup> )	۷۴	۰/۳۹	۲/۲۹	۲/۶۸	۲/۵۵	۰/۰۰۵	۰/۰۶۸
n (%)	۷۴	۱۸/۳۰	۰/۵۸	۱۸/۸۸	۶/۴۴	۱۴/۴۸	۳/۸۰
W.O (%)	۷۴	۸/۷۵	۰/۲۲	۸/۹۷	۲/۶۵	۲/۸۴	۱/۶۸
Id <sub>1</sub> (%)	۴۳	۳/۲۲	۹۶/۵۷	۹۹/۷۹	۹۹	۰/۵۲	۰/۷۲
Id <sub>2</sub> (%)	۴۳	۵/۶۳	۹۴/۰۰	۹۹/۶۳	۹۸/۱۷	۱/۹۲	۱/۳۸
UCS-dry (Mpa)	۲۲	۱۰۲/۴۰	۲۱/۰۰	۱۲۳/۴۰	۵۶/۳۸	۸۵۳/۸۴	۲۹/۲۲
UCS-sat (Mpa)	۴۲	۹۶/۲۱	۱۹/۳۷	۱۱۵/۵۸	۴۸/۴	۵۱۵/۷۱	۲۲/۷۰
ES-dry (GPa)	۲۰	۷۲/۲۱	۱۰/۷۱	۸۲/۹۲	۳۴/۵۳	۳۸۰/۶۱	۱۹/۵۰
ES-sat (GPa)	۴۲	۶۲/۴۸	۱۰/۰۱	۷۲/۴۹	۲۶/۶۱	۲۷۱/۴۴	۱۶/۴۷
$\nu$ -dry	۲۰	۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۳۱	۰/۱۹	۰/۰۰۳	۰/۰۵
$\nu$ -sat	۴۲	۰/۳۷	۰/۰۷	۰/۳۷	۰/۱۹	۰/۰۰۳	۰/۰۵
BTS-dry (MPa)	۲۲	۱۰/۰۶	۱/۱۹	۱۱/۲۵	۵/۴۳	۱۱/۴۹	۳/۳۹
BTS-sat (MPa)	۳۲	۱۰/۳۸	۱/۱۹	۱۱/۵۷	۴/۹۰	۷/۷۲	۲/۷۷
Vp-dry (m/s)	۲۶	۳۹۳۰	۲۲۲۸	۶۱۵۸	۴۱۳۰/۷۳	۱۱۶۷۵۱۶/۲۰	۱۰۸۰/۵۱
Vp-sat (m/s)	۴۱	۴۱۳۵	۱۷۳۶	۵۸۷۱	۳۹۳۷/۳۱	۱۱۳۵۲۴۶/۳۲	۱۰۶۵/۴۷
Vs-dry (m/s)	۲۶	۲۱۴۳	۱۰۵۳	۳۱۹۶	۲۱۱۹/۴۶	۳۲۶۹۰۳/۱۳	۵۷۱/۷۵
Vs-sat (m/s)	۴۱	۳۱۳۵/۳۶	۱۸۶۴	۳۱۵۴	۱۹۴۸/۶۹	۳۶۶۹۸۰/۷۰	۶۰۵/۷۸
B1-dry	۱۹	۲۹/۳۸	۶/۷۳	۳۶/۱۱	۱۱/۵۰	۴۵/۴۵	۶/۷۴
B1-sat	۳۱	۳۱/۸۱	۲/۷۲	۳۴/۵۳	۱۲/۶۴	۴۳/۴۲	۶/۵۸
B2-dry	۱۹	۰/۲۰	۰/۷۴	۰/۹۵	۰/۸۱	۰/۰۰۳	۰/۰۵
B2-sat	۳۱	۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۹۴	۰/۸۱	۰/۰۱	۰/۱۰۲
B3-dry	۱۹	۶۵۷/۹۴	۱۸/۹۱	۶۷۶/۸۵	۲۰۶/۲۶	۴۳۴۱۷/۹۴	۲۰۸/۳۶
B3-sat	۳۱	۵۱۲/۰۲	۱۷/۳۴	۵۲۹/۳۶	۱۴۲/۱۰	۱۷۱۲۶/۹۵	۱۳۰/۸۷
BI-dry	۲۲	۱/۲۳	۵/۳۴	۶/۴۷	۵/۸۲	۰/۱۳۹	۰/۳۵
BI-sat	۴۲	۱/۲۳	۵/۱۹	۶/۴۲	۵/۷۴	۰/۰۷۹	۰/۲۸

آلتینداگ، ۲۰۰۴). مقدار ضریب K از رده‌بندی سنگ‌ها که توسط هونکا و داس (۱۹۷۴) ارائه شده است، قابل محاسبه است. مقدار این ضریب برای سنگ‌آهک‌های تله‌زنگ برابر ۰/۱۷ است. پس از تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری و ضریب K، با استفاده از رابطه گوکتان و یلمازگانز (۲۰۰۵) مقدار BI به دست می‌آید که مقادیر آن در جدول (۲) ارائه شده است.

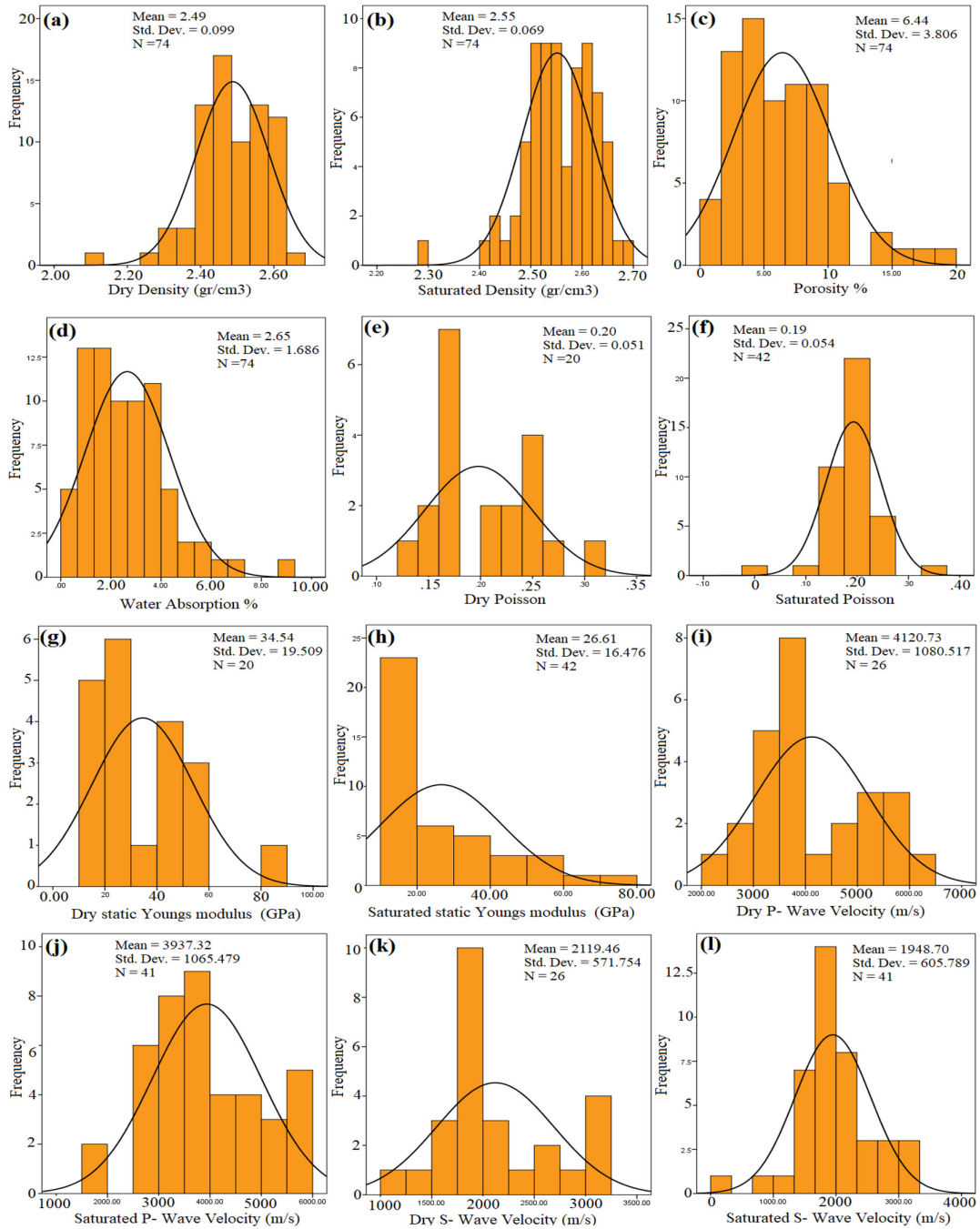
در شکل‌های (۴ و ۵) هیستوگرام فراوانی داده‌های فیزیکی، مکانیکی، دینامیکی مغزه‌های سنگی به همراه منحنی

در جدول (۳) B<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>1</sub> و BI شاخص‌های شکنندگی و  $\sigma_c$  و  $\sigma_t$  به ترتیب مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی سنگ‌بر حسب (Mpa) است. برای بیان شاخص شکنندگی BI از رابطه گوکتان و یلمازگانز (۲۰۰۵) استفاده شده است که با استفاده از مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ محاسبه انجام می‌شود. در این رابطه BI شاخص شکنندگی،  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب KPa و K ضریبی است که مقدار آن با توجه به نوع سنگ از ۰/۱۷ تا ۰/۶۵۹ متغیر است (کهرمان و

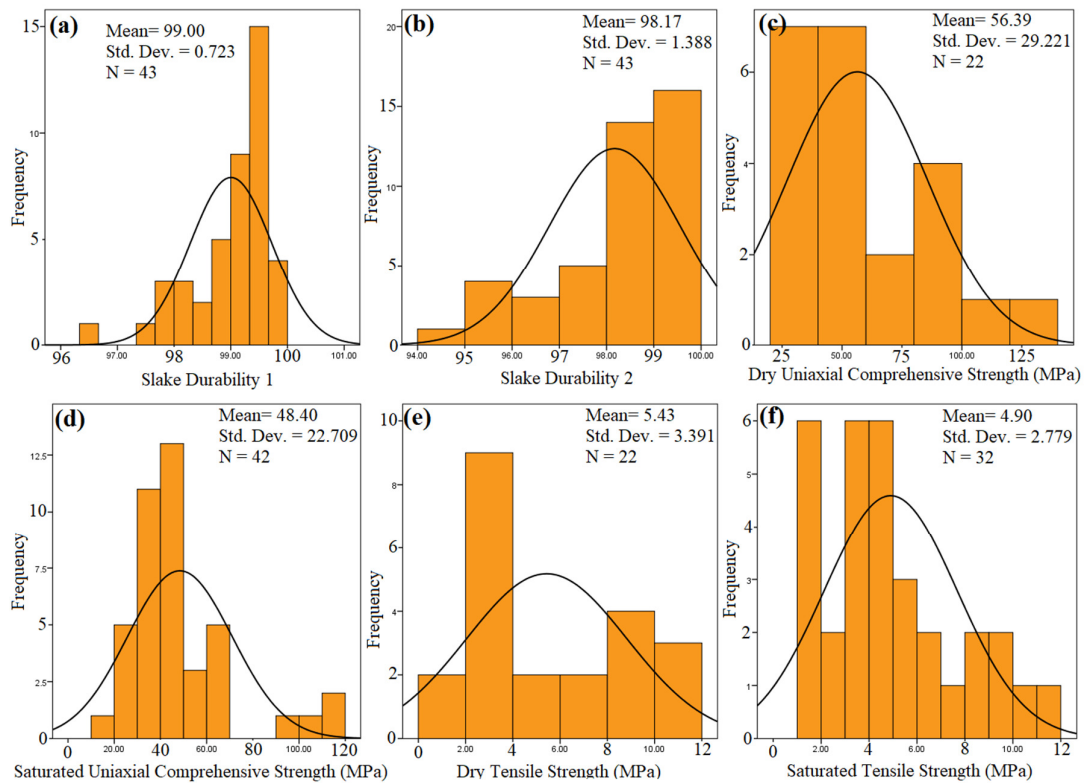
<sup>2</sup> -fracture failure

مقاومت کششی خشک و اشباع ارائه شده است؛ و در شکل‌های (۶ و ۷) هیستوگرام فراوانی و منحنی نرمال مقادیر ضرایب شکنندگی  $B_3, B_2, B_1$  و شاخص شکنندگی BI نشان داده شده است.

نرمال داده‌ها شامل دانسیته خشک و اشباع، تخلخل، درصد جذب آب، پواسون خشک و اشباع، مدول یانگ استاتیکی خشک و اشباع، سرعت موج فشاری خشک و اشباع، سرعت موج برشی خشک و اشباع، شاخص دوام شکستگی سیکل ۱ و سیکل ۲، مقاومت فشاری تک‌محوره خشک و اشباع،



شکل ۴. هیستوگرام فراوانی و منحنی نرمال داده‌های اولیه خصوصیات فیزیکی مغزه‌های حفاری a. دانسیته خشک b. دانسیته اشباع c. تخلخل d. درصد جذب آب e. پواسون خشک f. پواسون اشباع g. مدول یانگ استاتیکی خشک h. مدول یانگ استاتیکی اشباع i. سرعت موج فشاری خشک j. سرعت موج فشاری اشباع k. سرعت موج برشی خشک l. سرعت موج برشی اشباع



شکل ۵. هیستوگرام فراوانی و منحنی نرمال خصوصیات مکانیکی مغزه‌های حفاری a. شاخص دوام شکستگی سبکل ۱ b. شاخص دوام شکستگی سبکل ۲ c. مقاومت فشاری تک‌محوره خشک d. مقاومت فشاری تک‌محوره اشباع e. مقاومت کششی خشک f. مقاومت کششی اشباع

جدول ۳. ضرایب شکنندگی مورد استفاده در این پژوهش

۱	$B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}$	هونکا و داس (۱۹۷۴)
۲	$B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}$	هونکا و داس (۱۹۷۴)
۳	$\frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2} B_3$	التینداگ (۲۰۰۲)
۴	$(\log \sigma_c)^2 BI = 2.065 + K$	گوکتان و یلمازگانز (۲۰۰۵)

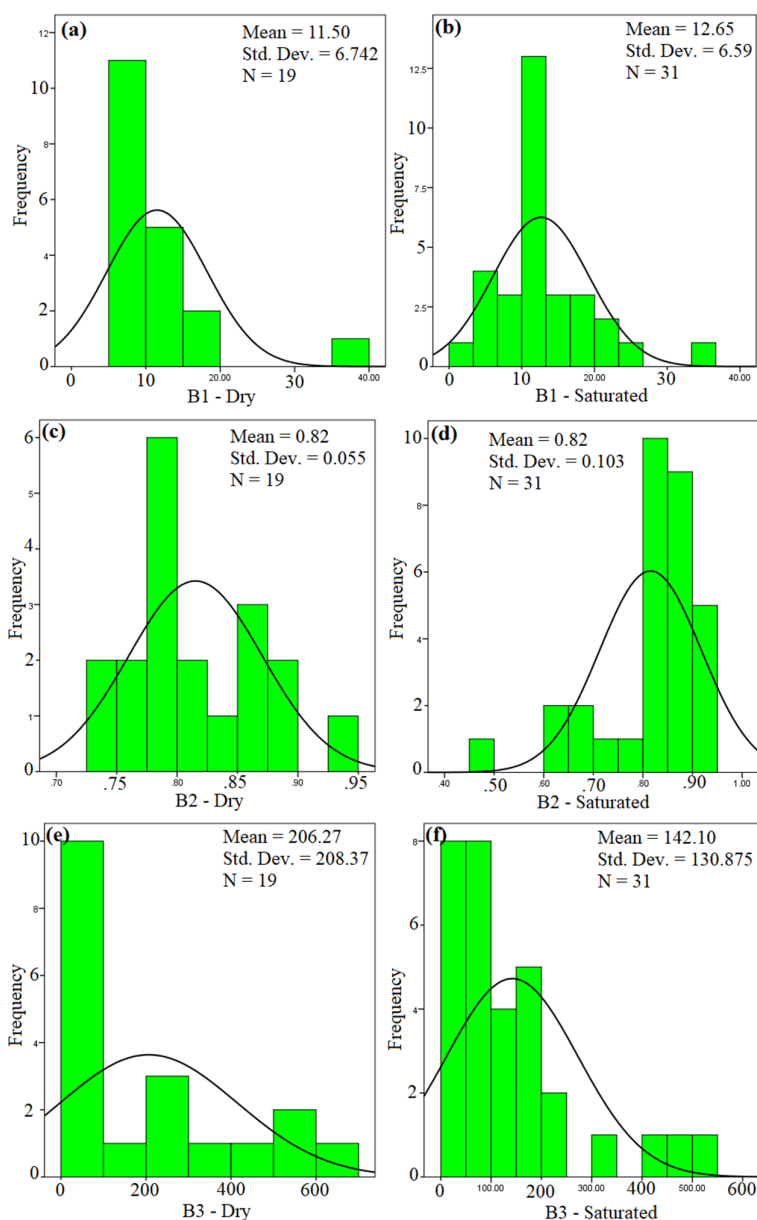
نمونه‌ها در هر دو شرایط خشک و اشباع به ترتیب (BI=5.82)، (BI=5.74)، سنگ‌آهک تله‌زنگ در رده شکنندگی کم طبقه‌بندی گردید.

در جدول (۴) نمونه‌ای از طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقادیر شاخص شکنندگی ارائه شده است (هوک، ۱۹۸۳). بر این اساس با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده شکنندگی

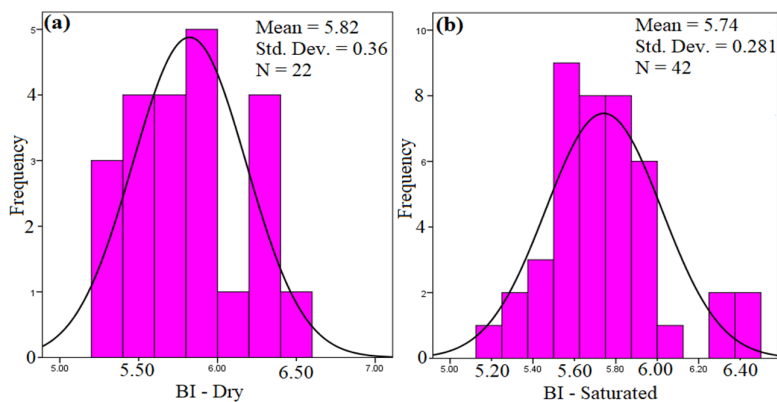
جدول ۴. طبقه‌بندی سنگ بر اساس مقادیر شاخص شکنندگی (هوک، ۱۹۸۳)

طبقه‌بندی شکنندگی	شاخص شکنندگی
خیلی شکننده	BI > 25
شکننده	15 < BI < 25
شکنندگی متوسط	10 < BI < 15
کمی شکننده	BI < 10





شکل ۶. هیستوگرام فراوانی و منحنی نرمال ضرایب شکنندگی B1، B2 و B3 در شرایط خشک و اشباع



شکل ۷. هیستوگرام فراوانی و منحنی نرمال شاخص شکنندگی BI در شرایط a. خشک b. اشباع

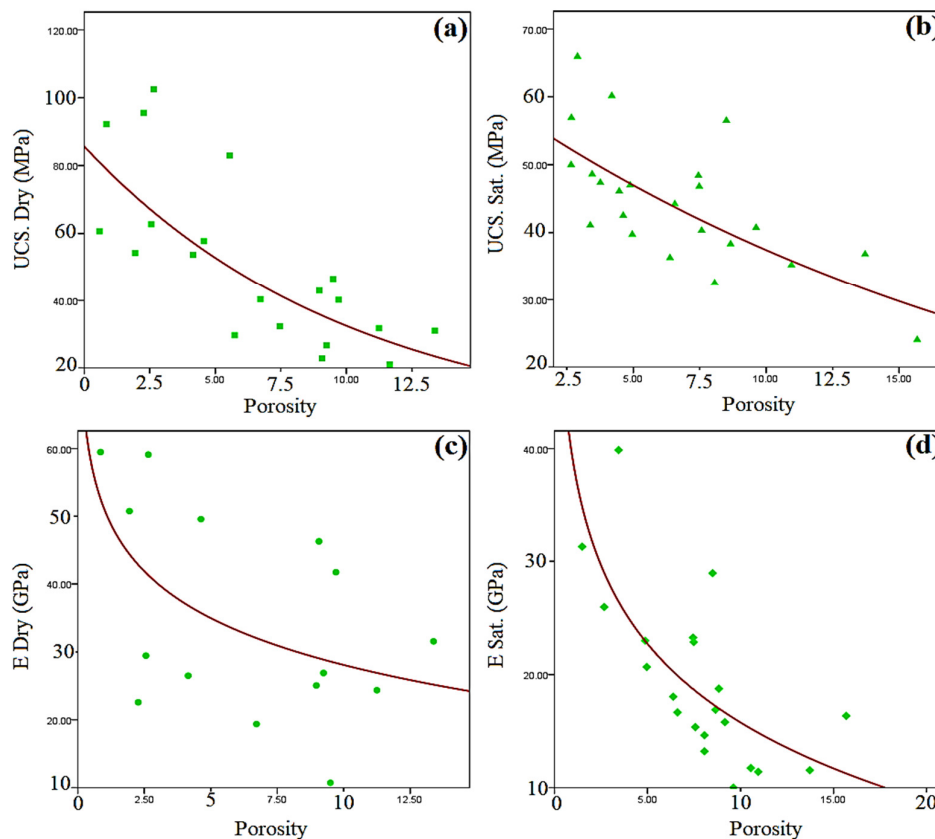
## ۵- روابط آماری

## ارزیابی همبستگی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی

## در شرایط خشک و اشباع

در این بخش ابتدا بر اساس مقادیر باقیمانده‌های هر رابطه، داده‌های پرت و خارج از رده شناسایی و جهت انجام تحلیل‌های بعدی از محاسبات حذف گردید. برای تعیین همبستگی بین پارامترها با استفاده از آنالیز رگرسیون، معادلات بهترین خط برازش داده‌ها در محدوده اطمینان ۹۵ درصد تعیین شد. در جدول‌های (۵) و (۶) روابط معنادار بر اساس نتایج آزمون ANOVA و با بالاترین ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و کمترین میزان خطای استاندارد<sup>۱</sup>

ارائه شده است. همچنین منحنی برازش هر رابطه نیز در شکل‌های (۸) و (۹) نمایش داده شده است. بر این اساس رابطه‌ی بین تخلخل و مقاومت فشاری تک‌محوره در شرایط خشک و اشباع از نوع نمایی ارزیابی شد و در شرایط خشک این رابطه از اعتبار و صحت بالاتری برخوردار است ( $R^2=0.61$ ). نتایج مشابهی نیز توسط محققین دیگر گزارش شده است (واسارهللی، ۲۰۰۵؛ ترک و واسارهللی، ۲۰۱۰). بررسی رابطه بین تخلخل و مدول یانگ استاتیکی در شرایط خشک و اشباع نشان می‌دهد که این رابطه از نوع لگاریتمی و در شرایط خشک همبستگی کمتری را نشان می‌دهد ( $R^2=0.28$ ).



شکل ۸. روابط همبستگی a. مقاومت فشاری تک‌محوره خشک با تخلخل b. مقاومت فشاری تک‌محوره اشباع با تخلخل c. مدول یانگ خشک با تخلخل d. مدول یانگ اشباع با تخلخل

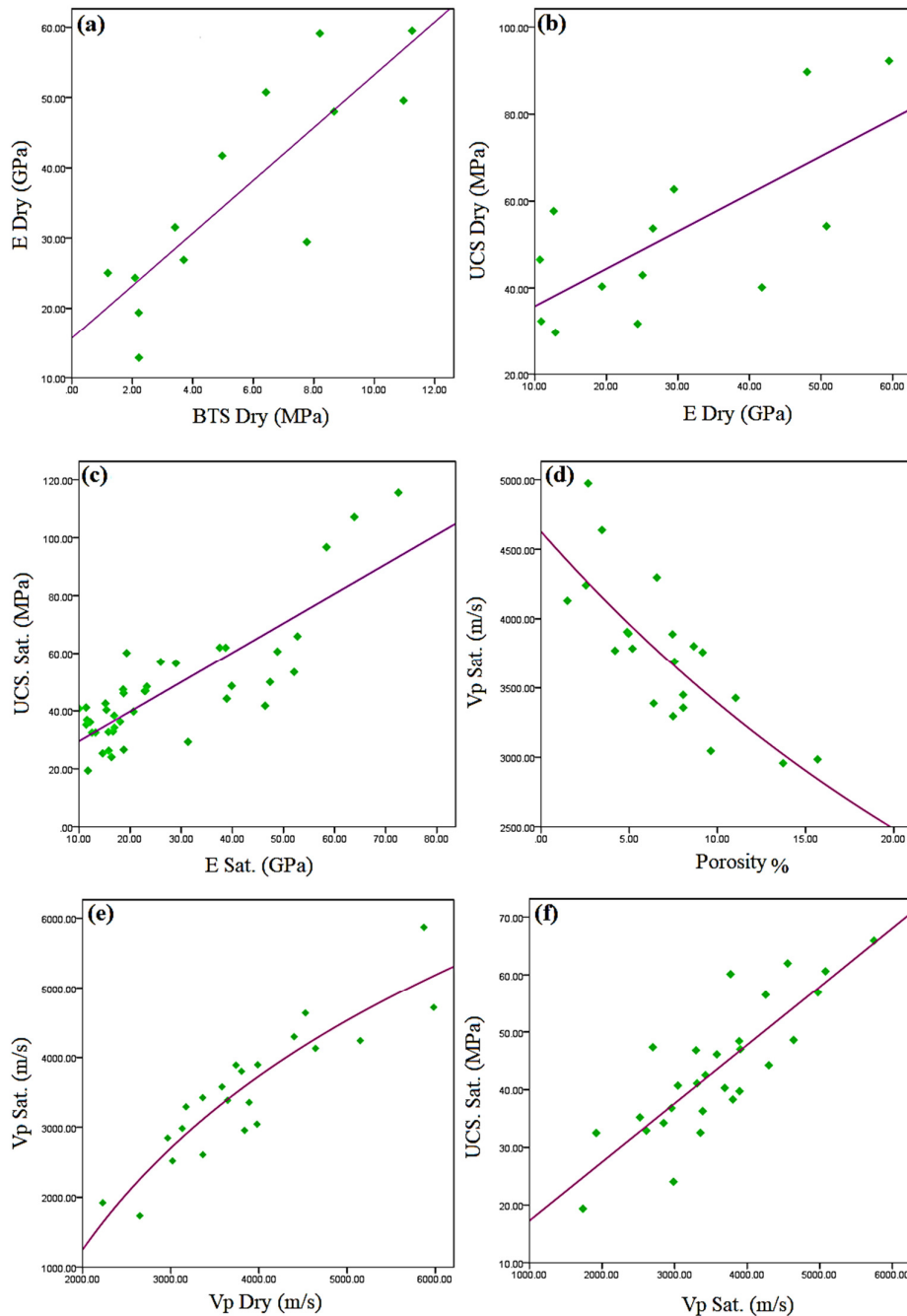
از آنجایی که آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) سنگ یکی از آزمایش‌های دشوار و پرهزینه است. تخمین مقاومت فشاری با استفاده از پارامتر سرعت موج فشاری ( $V_p$ ) روشی نسبتاً دقیق‌تر نسبت به سایر پارامترها ارزیابی

همچنین بین برخی از پارامترها در هر دو شرایط خشک و اشباع میزان همبستگی زیادی ( $R^2=0.82$ ) برقرار است. بین مدول‌های استاتیکی  $E_s$  و مقاومت کششی برزیلین (BTS) در شرایط خشک رابطه خطی ( $R^2=0.72$ ) وجود دارد.

<sup>1</sup> Std. Error of the estimate

اشباع، سرعت موج فشاری اشباع با تخلخل، سرعت موج فشاری اشباع با سرعت موج فشاری خشک، مقاومت فشاری تک‌محوره اشباع با سرعت موج فشاری اشباع نشان داده شده است.

شده است که میزان همبستگی ارزیابی در شرایط اشباع است. در شکل (۹) منحنی‌های همبستگی بین پارامترهای مدول‌یانگ خشک با مقاومت کششی برزیلی خشک، مقاومت فشاری تک‌محوری خشک و مدول‌یانگ خشک، مقاومت فشاری تک‌محوری اشباع و مدول‌یانگ



شکل ۹. همبستگی بین **a**. مدول یانگ خشک با مقاومت کششی برزیلی خشک **b**. مقاومت فشاری تک‌محوری خشک و مدول یانگ خشک **c**. مقاومت فشاری تک‌محوری اشباع و مدول یانگ اشباع **d**. سرعت موج فشاری اشباع با تخلخل **e**. سرعت موج فشاری اشباع با سرعت موج فشاری خشک **f**. مقاومت فشاری تک‌محوره اشباع با سرعت موج فشاری اشباع

جدول ۵. روابط تجربی بین ویژگی‌های استاتیکی با تخلخل

معادله	خطای استاندارد تخمین	R square (R <sup>2</sup> )	ANOVA نتایج آزمون	
			F	Sig.
$UCS_{Dry} = 85.672e^{-0.097n}$	۰/۳۰۵	۰/۶۱	۲۸/۷۲	۰/۰۰
$UCS_{Sat} = 59e^{-0.046n}$	۰/۱۵۶	۰/۵۲	۲۲/۸۴	۰/۰۰
$E_{Dry} = 51 - 9.955 \text{ Log}(n)$	۱۳/۲۶۵	۰/۲۸	۵/۱۷	۰/۰۴
$E_{Sat} = 38.84 - 10.025 \text{ Log}(n)$	۵/۲۸۵	۰/۵۲	۲۱/۳۰	۰/۰۰

جدول ۶. روابط متقابل بین ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و استاتیکی در شرایط (خشک و اشباع)

معادله	خطای استاندارد تخمین	R square (R <sup>2</sup> )	ANOVA نتایج آزمون	
			F	Sig.
$E_{Dry} = 3.76 \text{ BTS}_{Dry} + 15.68$	۸/۶۱	۰/۷۲	۲۷/۷۴	۰/۰۰۰
$UCS_{Dry} = 0.86 E_{Dry} + 27.161$	۱۴/۹۴	۰/۴۹	۱۰/۸۵	۰/۰۰۷
$UCS_{sat} = 1.02 E_{sat} + 19.3$	۱۱/۸۲	۰/۶۷	۸۱/۸۹	۰/۰۰۰
$V_{p-sat} = 4627.21e^{-0.031n}$	۰/۰۸	۰/۶۵	۳۶/۰۷	۰/۰۰۰
$V_{p-sat} = 3583.53 \text{ Log } V_{p-dry} - 25988.27$	۴۱۲/۷۸	۰/۸۲	۹۱/۶۵	۰/۰۰۰
$UCS_{Sat} = 0.01 V_{p-sat} + 7.13$	۶/۵۲	۰/۶۸	۵۶/۰۵	۰/۰۰۰

سطح معناداری ۹۵ درصد استفاده شد. بدین منظور رابطه-ی بین BI با UCS، BTS و Vp در شرایط اشباع مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا وجود همبستگی بین BI با سایر پارامترها بررسی شد. با توجه به جدول (۸)، برای UCS، BTS و Vp و عرض از مبدأ (Sig<α) است و وجود هر چهار مقدار در معادله ضروری است. بر اساس جدول (۸) با توجه به بالا بودن مقدار β، UCS<sub>sat</sub> بیش‌ترین تأثیر را در برآورد BI در مدل دارد. بر اساس جدول (۹) مدل پیشنهادی معنادار بوده (F=206 و Sig<0.05) و ضریب همبستگی بالایی (R<sup>2</sup>=0.96) را نشان می‌دهد. همچنین این جدول نشان می‌دهد که برای تمام پارامترها (VIF: Variance Inflation Factor) کم‌تر از ۱۰ است و درستی مدل از این نظر تأیید می‌شود. همچنین برای تمامی پارامترها مقدار ویژه<sup>۱</sup> بسیار کم‌تر از ۳۰ است (جدول 10). تحلیل باقیمانده‌ها یکی از روش‌های پرکاربرد به منظور ارزیابی روش‌های تخمین است که امروزه در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد (لشکری پور و همکاران، ۲۰۱۸؛ جبین پور و همکاران، ۲۰۱۸؛ رحیمی شهید و هاشمیان، ۲۰۲۱). در ادامه جهت بررسی درستی رابطه ارائه‌شده به تحلیل باقیمانده‌ها پرداخته می‌شود. نمودار هیستوگرام باقیمانده‌ها تقریباً نرمال بودن باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۱۲). در انتها جهت

#### ارتباط بین ضرایب شکنندگی با سرعت موج فشاری (Vp)

بین سرعت موج فشاری (Vp) و شاخص شکنندگی BI رابطه‌ی خطی با ضریب تعیین (R<sup>2</sup>= 0.78) در شرایط اشباع برقرار است (جدول ۷ و شکل ۱۰). همچنین در جدول (۷) و شکل (۱۱) رابطه بین Vp با پارامترهای شکنندگی BI و B3 در شرایط اشباع نشان داده شده است. همان‌طور که می‌توان مشاهده کرد که بیشترین ضریب همبستگی مربوط به ضریب B3 با (R<sup>2</sup>=۶۷) و از نوع معادله خطی است. به‌طور کلی، افزایش مقاومت سنگ منجر به همبستگی بالاتری بین سرعت موج و ضرایب شکنندگی و شاخص شکنندگی می‌شود (آلتینداگ، ۲۰۱۰).

#### پیش‌بینی شاخص شکنندگی (BI) با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه

گاهی دو یا چند متغیر تأثیر عمده‌ای روی متغیر وابسته دارند. در این وضعیت از رگرسیون چندگانه جهت پیش-بینی متغیر وابسته استفاده می‌شود. در رگرسیون چندگانه نیز فرض خطی بودن متغیرها برقرار است. لذا در این پژوهش جهت بررسی تأثیر چند پارامتر در محاسبه شاخص شکنندگی (BI) و ارائه‌ی رابطه‌ای دقیق‌تر و با ضریب همبستگی بالاتر، از رگرسیون خطی چندگانه با

<sup>1</sup> Eigenvalue

بر پایه‌ی تحلیل‌های صورت گرفته رابطه‌ی بین BI با UCS، BTS و Vp در شرایط اشباع در رابطه (۵) نشان داده شده است.

$$BI = 0.011 UCS_{sat} + 3.411 * 10^{-5} V_{p-sat} - 0.01 BTS_{sat} + 5.132 \quad (5)$$

که در آن، BI شاخص شکنندگی (kN/mm) UCS<sub>sat</sub>، مقاومت فشاری تک‌محوره اشباع برحسب (MPa) BTS<sub>sat</sub>، مقاومت کششی برزیلین اشباع برحسب (MPa) V<sub>p-sat</sub> و سرعت موج فشاری اشباع برحسب (m/s) است.

بررسی نرمال بودن مقادیر باقیمانده‌ها از آزمون کمولوگروف - اسمیرنو استفاده شد (جدول ۱۱). فرض‌های (۱ و ۲) این آزمون به‌صورت ذیل است:

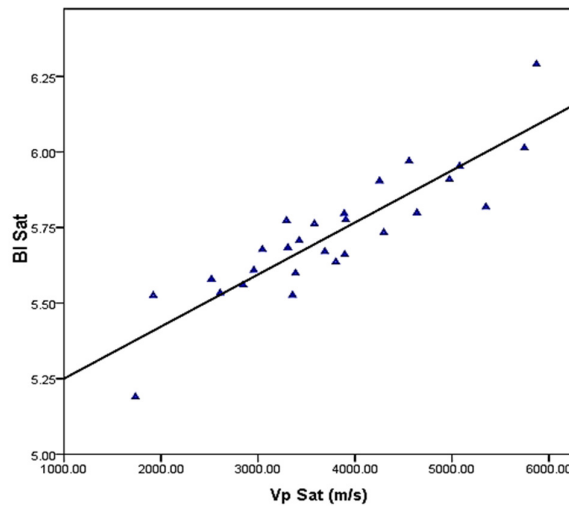
H0: جامعه دارای توزیع نرمال است. ۱

H1: RH0 ۲

مطابق جدول (11) برای هر دو آزمون:

Sig= 0.138, α= 0.05 → Sig>α ۳

بنابراین فرض صفر تأیید می‌شود و توزیع باقی‌مانده‌ها نرمال است.



شکل ۱۰. منحنی رابطه بین Vp با BI در شرایط اشباع

جدول ۷. ارتباط بین ضرایب و شاخص شکنندگی با Vp

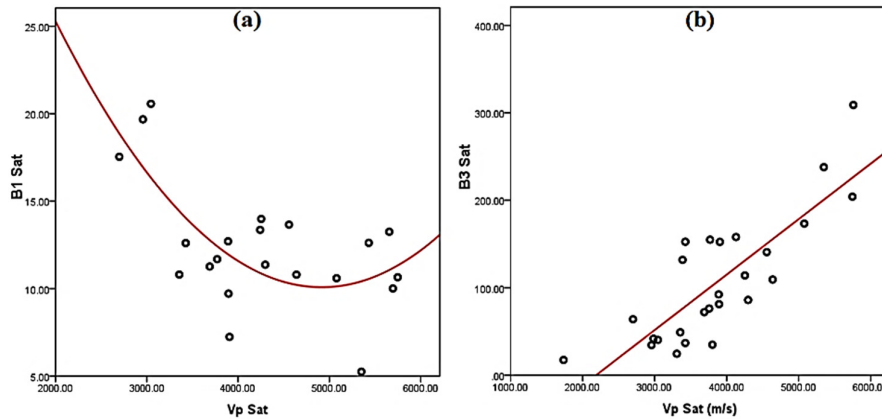
معادله	خطای استاندارد تخمین	R square (R <sup>2</sup> )	نتایج آزمون ANOVA	
			F	Sig.
$BI_{sat} = 1.7 * 10^{-4} V_{p-sat} + 5.078$	۰/۰۷	۰/۷۸	۹۲/۰۹	۰/۰۰۰
$B1_{sat} = 53.32 - 0.0176 V_{p-sat} + 1.79 * 10^{-6} V_{p-sat}^2$	۲/۷۷	۰/۴۶	۷/۷۵	۰/۰۰۴
$B3_{sat} = 0.0634 V_{p-sat} - 138.806$	۴۲/۳۰	۰/۶۷	۴۸/۷۹	۰/۰۰۰

جدول ۸. ضرایب معادله: Beta statistic, T-test, Tolerance and VIF برای مدل

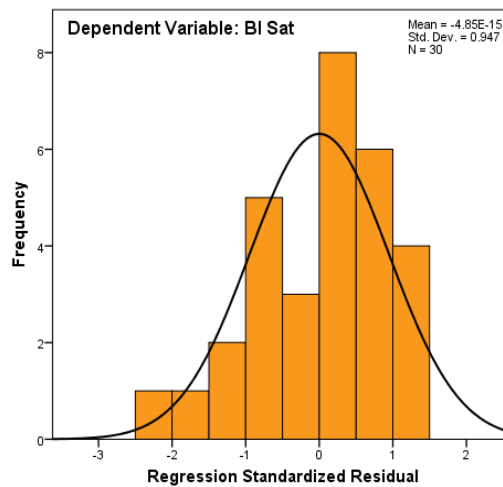
مدل	ضرایب استاندارد نشده		ضرایب استاندارد شده	T-test	Sig.	آماره‌های هم‌خطی		
	B	Std. Error				Beta	Tolerance	VIF
۱	مقدار ثابت	۵/۱۳	۰/۰۴	۱۰۳/۷۰	۰/۰۰			
	UCS <sub>sat</sub>	۰/۰۱۱	۰/۰۰۱	۲۰/۴۲	۰/۰۰	۰/۷۰	۱/۴۱	
	BTS <sub>sat</sub>	-۰/۰۱	۰/۰۰۵	-۰/۱۰	-۲/۰۳	۰/۰۴	۰/۶۲	۱/۶۱
	V <sub>p,sat</sub>	۳/۴۱E-۵	۰/۰۰	۰/۱۱	۲/۲۵	۰/۰۳	۰/۵۵	۱/۷۹

جدول ۹. خلاصه مدل: ضریب همبستگی، Durbin-Watson statistic و نتایج ANOVA

مدل	R	R Square	تعدیل شده R Square	ضرایب استاندارد شده	Durbin-Watson	نتایج ANOVA	
						F	Sig.
۱	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۵۵	۰/۰۵۶	۲/۰۰۱	۲۰۶	۰/۰۰



شکل ۱۱. منحنی رابطه بین B1 و B3 با Vp در شرایط اشباع



شکل ۱۲. هیستوگرام نرمال بودن باقیمانده‌ها

جدول ۱۰. مقادیر ویژه و شاخص شرایط مدل

مدل	ابعاد	مقدار ویژه	شاخص وضعیت	نسبت واریانس			
				مقدار ثابت	UCS <sub>Sat</sub>	BTS <sub>Sat</sub>	V <sub>p-sat</sub>
۱	۱	۳/۷۶	۱	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰
	۲	۰/۱۳	۵/۳۸	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۷۶	۰/۰۱
	۳	۰/۰۸	۶/۵۵	۰/۱۰	۰/۹۰	۰/۰۳	۰/۰۲
	۴	۰/۰۱	۱۵	۰/۸۲	۰/۰۷	۰/۲۰	۰/۹۷

متغیر وابسته: BI

جدول ۱۱. نتایج آزمون Kolmogorov-Smirnov

یک نمونه‌ای		باقیمانده‌های استاندارد شده
N		۳۰
پارامترهای نرمال	میانگین	۰/۰۷
	انحراف معیار	۰/۸۵
Most Extreme Differences	مطلق	۰/۱۴
	مثبت	۰/۱۰
	منفی	-۰/۱۴۰
Test Statistic		۰/۱۴۰
Asymp. Sig. (2-tailed)		۰/۱۳۸

## ۶- بحث

دیگر تأیید شده است (آترنی و همکاران ۲۰۰۶؛ آندریانی و والش، ۲۰۱۰). همچنین روابط مختلف بین خواص فیزیکی و مکانیکی از طریق رگرسیون ساده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به این منظور علاوه بر معادله خطی، معادلات توانی، نمایی و لگاریتمی نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج برحسب بهترین برازش ارائه شد. بر اساس نتایج رابطه معکوس و نمایی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و تخلخل در هر دو شرایط خشک و اشباع برقرار است که با نتایج مطالعات دیگر در این زمینه منطبق است (جدول ۱۲). مطابق انتظار رابطه‌ی معکوسی بین مدول یانگ و تخلخل در شرایط اشباع وجود دارد و این در حالی است که بین این دو پارامتر در شرایط خشک رابطه معناداری برقرار نیست؛ در این زمینه نیز روابط مشابهی توسط سایر محققین بین این دو پارامتر ارائه شده است (جدول ۱۲). مطالعات نجارزاده و همکاران (۱۳۹۵) نشان داد مدول یانگ با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد و مقدار ضریب تعیین ( $R^2=0.87$ ) برای همبستگی بین آن‌ها ارائه شد. به‌منظور برآورد پارامترهای مختلف فیزیکی، مکانیکی و استاتیکی در شرایط (خشک و اشباع) بسیاری از پژوهشگران روابطی را ارائه کرده‌اند که برای نمونه می‌توان به (ساجپاسیز، ۱۹۹۰)، (سوسا و همکاران، ۲۰۰۵)، (کهرمان، ۲۰۰۷)، (عبدلالی و همکاران، ۲۰۱۳)، (کاراکول و یولوسای، ۲۰۱۳)، (واسانلی و همکاران، ۲۰۱۵)، (صالحین، ۲۰۱۷)، (لشکری‌پور و همکاران، ۲۰۱۸) و (قبادی و همکاران، ۱۳۹۹) اشاره نمود. به منظور ارزیابی صحت و دقت روابط ارائه شده در این پژوهش با روابط گذشته مقایسه شد (جدول ۱۳).

یاگیز (۲۰۰۹) یک معادله چندمتغیره خطی برای پیش‌بینی شاخص شکنندگی با سه پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی برزیلین و وزن مخصوص سنگ معرفی کرد و بیان داشت که این رابطه برای شرایطی که دسترسی به انجام آزمایش نظیر آزمایش نفوذ پانچ وجود ندارد، مفید است (جدول ۱۴). در این مطالعه نیز برای بررسی نقش پارامترهای مختلف در تعیین شاخص شکنندگی از معادله چندمتغیره خطی استفاده شد. پس از بررسی معادله‌های مختلف، بهترین معادله به دست آمد. بر این اساس تعیین شاخص شکنندگی با استفاده از مقاومت فشاری تک‌محوره اشباع، سرعت موج فشاری اشباع و مقاومت کششی برزیلین اشباع، نتایج بسیار مطمئنی را

بر طبق نتایج حاصل از بررسی آمار توصیفی نمونه‌های سنگی آهک تله‌زنگ در جدول (۲)، طیف گسترده‌ای از تخلخل ۰/۵۸ تا ۱۸/۸۸ درصد در نمونه‌ها مشاهده شد؛ که بر اساس معیار رده‌بندی سنگ (آنون، ۱۹۷۹) در رده سنگ‌های متوسط طبقه‌بندی گردید. همچنین مطابق با نتایج ارائه شده مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، بر اساس رده‌بندی (دیر و میلر، ۱۹۶۶) و (ISRM 1981) سنگ‌آهک تله‌زنگ در رده مقاومتی متوسط (C) و بر اساس رده‌بندی سنگ (گامبل، ۱۹۷۱) بر پایه نتایج آزمایش دوام سیکل دوم ( $Id_2$ ) در رده سنگ‌های خیلی مقاوم طبقه‌بندی گردید. مطالعات این پژوهش نشان می‌دهد، علی‌رغم تفاوت فراوان مشاهده شده بین تخلخل‌ها، اختلاف چگالی حداکثر در شرایط خشک و اشباع کم ارزیابی شده است. به نظر می‌رسد شرایط زمین‌شناسی حاکم بر تشکیل سنگ رسوبی آهک تله‌زنگ و ناهمگنی لیتولوژی شامل انواع سنگ آهک بلورین، مارنی و ماسه‌ای در این سازند، از دلایل افزایش تغییرات تخلخل باشد و این در حالی است که با افزایش تخلخل در نمونه‌ها اختلاف بین حداکثر دانسیته خشک و اشباع کم و محسوس ارزیابی شده است. در مطالعات مشابه نیز برای ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌آهک برای سازند آسماری که توسط اجل لوثیان و همکاران (۱۳۹۰) در ساخت‌گاه سد خرسان ۱ و ۲ انجام شد. حداکثر دانسیته خشک و اشباع برای سنگ‌آهک ۲/۷۴ و ۲/۷۲ برای تغییرات تخلخل حداقل ۰/۲ تا حداکثر ۲۰/۹۴ درصد ارزیابی شده است؛ که نتایج این پژوهش نیز با آن مطابقت دارد. همچنین از آنجایی که مقاومت فشاری سنگ‌آهک به عوامل مختلفی همچون تخلخل، بافت سنگ، اندازه و درجه کریستالی شدن، رخ سه جهتی کلسیت، ریزترک‌ها و تنوع لیتولوژی بستگی دارد. نتایج مقادیر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته سنگ‌آهک تله‌زنگ نیز در محدوده کم و زیاد ارزیابی شده است که با سایر مطالعات مشابه در این زمینه مطابقت دارد. نتایج بررسی آماری نمونه‌ها نشان می‌دهد، میانگین مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) و مدول یانگ (Es) در شرایط خشک بالاتر از شرایط اشباع است. تأثیر اشباع بر روی نمونه‌های سنگ‌آهک تله‌زنگ، مقاومت فشاری تک‌محوره را با ۸ مگا پاسکال یا (۱۴.۹٪) کاهش داد. کاهش مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) در شرایط اشباع نیز توسط محققان

پارامترهای مختلف تنها پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره به‌طور مستقیم در تعیین شاخص شکنندگی نقش دارد درحالی‌که در رابطه ارائه شده در این مطالعه سایر پارامترها نیز به‌صورت مستقیم در تعیین شاخص شکنندگی مؤثر هستند.

ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که در تعیین مقدار شکنندگی، مقاومت فشاری تک‌محوره بیش‌ترین تأثیر را دارد. این نتایج توسط مطالعات لشکری‌پور و همکاران (۲۰۱۸) تأیید شده است (جدول ۱۴). در رابطه گوکتان و یلمازگانز (۲۰۰۵) برای تعیین شاخص شکنندگی، از میان

جدول ۱۲. مقایسه روابط تجربی بین ویژگی‌های استاتیکی با تخلخل در این مطالعه با مطالعات پیشین

متغیرها	معادله	R square (R <sup>2</sup> )	منابع
UCS <sub>Dry</sub> & n	$UCS_{Dry} = 85.672e^{-0.097n}$	۰/۶۱	مطالعه حاضر
	$UCS_{Dry} = 1.4e^{-0.164n}$	۰/۹۳	ارگولر و الوسای (۲۰۰۹)
	$UCS_{Dry} = -0.134n^2 - 2.52n + 67.5$	۰/۸۹	لشکری پور و همکاران (۲۰۱۸)
UCS <sub>Sat</sub> & n	$UCS_{Sat} = 59e^{-0.046n}$	۰/۵۲	مطالعه حاضر
	$UCS_{Sat} = 79e^{-0.155n}$	۰/۶۵	لشکری پور و همکاران (۲۰۱۸)
	$UCS_{sat} = 204.8 * n^{(-1.121)}$	۰/۸۴	ارگولر و الوسای (۲۰۰۹)
E <sub>Dry</sub> & n	$E_{Dry} = 51 - 9.955 \text{ Log}(n)$	۰/۲۸	مطالعه حاضر
	$E_{Dry} = 33 e^{(-0.16n)}$	۰/۵۹	لشکری پور و همکاران (۲۰۱۸)
	$E_{Dry} = 57.30 e^{(-0.466n)}$	۰/۸۰	لیو و همکاران (۲۰۱۷)
E <sub>Sat</sub> & n	$E_{Sat} = 38.84 - 10.025 \text{ Log}(n)$	۰/۵۲	مطالعه حاضر
	$E_{Sat} = 21 e^{(-0.1n)}$	۰/۵۸	لشکری پور و همکاران (۲۰۱۸)

جدول ۱۳. مقایسه روابط متقابل بین ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و استاتیکی در شرایط (خشک و اشباع) در این مطالعه با مطالعات پیشین

متغیرها	معادله	R square (R <sup>2</sup> )	Reference
E <sub>Dry</sub> & BTS <sub>Dry</sub>	$E_{Dry} = 3.76 \text{ BTS}_{Dry} + 15.68$	۰/۷۱	مطالعه حاضر
	$E_{Dry} = -0.02 \text{ BTS}_{Dry}^2 + 4.59 \text{ BTS}_{Dry} + 7.47$	۰/۷۵	لشکری‌پور و همکاران (۲۰۱۸)
UCS <sub>Dry</sub> & E <sub>Dry</sub>	$UCS_{Dry} = 0.86 E_{Dry} + 27.161$	۰/۴۹	مطالعه حاضر
	$UCS_{Dry} = 4.77 E_{Dry}^{0.81}$	۰/۶۵	لشکری‌پور و همکاران (۲۰۱۸)
	$UCS_{Dry} = 10.301 E_{Dry} - 4.249$	۰/۷۸	صالحین (۲۰۱۷)
UCS <sub>Sat</sub> & E <sub>Sat</sub>	$UCS_{sat} = 1.02 E_{sat} + 19.3$	۰/۶۷	مطالعه حاضر
	$UCS_{sat} = 1.56 E_{sat} - 1.95$	۰/۸۳	لشکری‌پور و همکاران (۲۰۱۸)
	$UCS_{sat} = 2.66E_{sat} - 11.94$	۰/۸۱	ساجپاسیز (۱۹۹۰)
V <sub>p-sat</sub> & n	$V_{p-sat} = 4627.21e^{-0.031 n}$	۰/۶۵	مطالعه حاضر
	$V_{p-sat} = -0.0224n + 4.4$	۰/۹۴	عبدالالی و همکاران (۲۰۱۳)
	$V_{p-sat} = 4.08 n^{-0.42}$	۰/۷۹	سوسا و همکاران (۲۰۰۵)
V <sub>p-sat</sub> & V <sub>p-dry</sub>	$V_{p-sat} = 3583.53 \text{ Log } V_{p-dry} - 25988.27$	۰/۸۲	مطالعه حاضر
	$V_{p-sat} = 0.94 V_{p-dry} + 2.10$	۰/۷۴	کهرمان (۲۰۰۷)
	$V_{p-sat} = 0.804 V_{p-dry} + 352.64$	۰/۸۶	واسانلی و همکاران (۲۰۱۵)
UCS <sub>Sat</sub> & V <sub>p-sat</sub>	$UCS_{Sat} = 0.01 V_{p-sat} + 7.13$	۰/۶۸	مطالعه حاضر
	$UCS_{sat} = 3.774 (V_{p-sat})^{1.71}$	۰/۷۲	کاراکول و الوسای (۲۰۱۳)
	$UCS_{Sat} = 107.66 V_{p-sat} + 503.83$	۰/۹۱	قیادی و همکاران (۱۳۹۹)

جدول ۱۴. مقایسه روابط چندمتغیره محاسبه شاخص شکنندگی در این مطالعه با مطالعات پیشین

معادله	R square (R <sup>2</sup> )	منابع
$BI = 0.011 UCS_{sat} + 3.411 * 10^{-5} V_{p-sat} - 0.01 BTS_{sat} + 5.132$	۰/۹۶	مطالعه حاضر
$BI = 0.009 UCS_{Dry} + 2.59 V_{p-Dry} + 0.349 BTS_{Dry} + 4.95$	۰/۸۹	لشکری‌پور و همکاران (۲۰۱۸)
$BI = 0.198 UCS + 0.913 \rho - 2.174 BTS - 3.807$	۰/۸۸	یاگیز (۲۰۰۹)



## ۷- نتیجه‌گیری

پس از بررسی و تجزیه و تحلیل داده‌های سنگ‌آهک تله زنگ در ساختگاه سد هواسان، محدوده تغییرات خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و دینامیکی آن‌ها در شرایط خشک و اشباع تعیین گردید و بین برخی از پارامترها روابط خطی، توانی، نمایی و لگاریتمی از طریق رگرسیون ساده برقرار شد و نتایج برحسب بهترین برازش ارائه شد. همچنین معادله تجربی برای پیش‌بینی مقادیر شاخص شکنندگی (BI)، بر اساس رگرسیون چندگانه نیز ارزیابی شد و صحت و دقت روابط ارائه‌شده با روابط گذشته مطابقت داده شد. این روابط می‌توانند تخمین مناسبی از خصوصیات مهندسی سنگ پیش از آزمایش‌های مورد نیاز برای سنگ بکر ارائه دهند. با این تخمین می‌توان ضمن قضاوت مهندسی مناسب، هزینه‌ها و تعداد آزمایش‌های موردنیاز برای شناسایی سنگ بکر را کاهش داد. نتایج بررسی تحلیل آماری نمونه‌های سنگی در این پژوهش به شرح زیر است.

۱. بر اساس بهترین برازش‌ها، همبستگی معکوس از نوع معادله نمایی بین مقاومت فشاری تک‌محوره و تخلخل نمونه‌ها در شرایط خشک ( $R^2=0.61$ ) و در شرایط اشباع ( $R^2=0.52$ ) برقرار است؛ که با نتایج تحقیقات مشابه در این زمینه مطابقت دارد. همچنین میزان همبستگی معکوس از نوع معادله لگاریتمی بین مدول یانگ و تخلخل در شرایط خشک ( $R^2=0.28$ ) و در شرایط اشباع ( $R^2=0.52$ ) ارزیابی شده است که نتایج نشان می‌دهد بین این دو پارامتر در شرایط خشک رابطه معناداری وجود ندارد. در این زمینه روابط مشابهی نیز توسط سایر محققین بین این دو پارامتر برقرار شده است.

۲. بر اساس روابط تجربی به‌دست‌آمده، میزان همبستگی بین مدول‌های استاتیکی Es و مقاومت کششی برزیلی (BTS) در شرایط خشک با ضریب همبستگی ( $R^2=0.72$ ) و بین مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) و مدول الاستیسته (Esat) همبستگی ( $R^2=0.67$ ) در شرایط اشباع ارزیابی شده است. همچنین میزان همبستگی ارزیابی شده بین مقاومت فشاری و سرعت موج فشاری (Vp) در شرایط اشباع ( $R^2=0.68$ ) تعیین گردید؛ که تخمین با این روش نسبت به سایر روش‌ها به‌عنوان روشی نسبتاً دقیق‌تر ارزیابی شد.

۳. بر طبق نتایج حاصل از بررسی آمار توصیفی نمونه‌های سنگی آهک تله‌زنگ طیف گسترده‌ای از تخلخل ۰/۵۸ تا ۱۸/۸۸ درصد در نمونه‌ها مشاهده شد؛ که بر اساس معیار رده‌بندی سنگ آنون (۱۹۷۹) در رده متوسط طبقه‌بندی گردید.

۴. علی‌رغم تفاوت فراوان مشاهده شده بین تخلخل‌ها، اختلاف چگالی حداکثر در شرایط خشک و اشباع کم ارزیابی شده است. به نظر می‌رسد شرایط زمین‌شناسی حاکم بر تشکیل سنگ رسوبی آهک تله‌زنگ و ناهمگنی لیتولوژی شامل انواع سنگ‌آهک بلورین، مارنی و ماسه‌ای در این سازند، از دلایل افزایش تغییرات تخلخل باشد و این درحالی‌که است که با افزایش تخلخل در نمونه‌ها اختلاف بین حداکثر دانسیته خشک و اشباع کم و محسوس ارزیابی شده است.

۵. میانگین مقادیر آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده نمونه‌ها شامل مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، مدول یانگ (Es) و خصوصیات دینامیکی (Vp و Vs) در شرایط خشک بیش‌تر از شرایط اشباع ارزیابی شده است. همچنین نتایج بررسی‌ها نشان داد تأثیر شرایط اشباع بر نمونه‌های سنگ‌آهک تله‌زنگ، مقاومت فشاری تک‌محوره را با ۸ مگا پاسکال یا (۱۴/۹٪) کاهش می‌دهد.

۶. بر اساس رده‌بندی سنگ دیر و میلر (۱۹۶۶) و ISRM ۱۹۸۱ سنگ‌آهک تله‌زنگ در رده مقاومتی متوسط (رده C) طبقه‌بندی می‌گردد. همچنین بر پایه نتایج آزمایش دوام سیکل دوم ( $Id_2$ ) و بر اساس رده‌بندی سنگ گامبل (۱۹۷۱) در رده خیلی مقاوم طبقه‌بندی گردید.

۷. مقادیر پیش‌بینی‌شده شاخص شکنندگی سنگ‌آهک تله زنگ در شرایط خشک برابر ( $BI=5.82$ ) و در شرایط اشباع ( $BI=5.74$ ) است که بر اساس طبقه‌بندی هوک (۱۹۸۳)، در رده سنگ‌های با شکنندگی کم طبقه‌بندی شد.

۸. با توجه به مقادیر شاخص شکنندگی (BI)، این‌گونه می‌توان اظهار نمود تنوع لیتولوژی شامل سنگ‌آهک‌های مارنی و ماسه‌ای و وجود کانی‌های رسی در نمونه‌های سنگی سبب شده است میزان شکنندگی ارزیابی شده در محدوده کم تخمین زده شود.

۹. در ارزیابی روابط همبستگی بین سرعت موج فشاری Vp با پارامترهای شکنندگی B1 و B3 در شرایط اشباع می‌توان مشاهده کرد که به بیش‌ترین ضریب همبستگی ( $R^2=0.67$ ) مربوط به ضریب B3 است.

نجاززاده، ح.، کاظمی، م.، قاسم‌العسکری، م. ک (۱۳۹۵) تأثیر تخلخل بر مدول‌های کشسان در ناحیه مخزنی میدان پارس جنوبی، مجله پژوهش نفت، دوره ۲۶، شماره ۸۶، ص ۶۷-۷۸.

Abdelaali, R., Abderrahim, B., Mohamed, B., Yves, G., Abderrahim, S., Mimoun, H., Jamal, S (2013) Prediction of porosity and density of calcarenite rocks from P-wave velocity measurements. IJG. <https://doi.org/10.4236/ijg.2013.49124>, 2013.

Abdulraheem, A., Ahmed, M., Vantala, A., Parvez, T (2009) Prediction of rock mechanical parameters for hydrocarbon reservoirs using different artificial intelligence techniques. In: SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium. Society of Petroleum Engineers.

Alemdag, S., Gurocak, Z., Gokceoglu, C (2015) A simple regression based approach to estimate deformation modulus of rock masses. J. Afr. Earth Sci. 110: 75-80.

Altindag, R (2002) The evaluation of rock brittleness concept on rotary blasthole drills. J. South Afr. Inst. Min. Metall., 102: 61-66

Altindag, R (2010) Reply to the discussion by Yagiz on "assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency" by Altindag, rock mechanics and rock engineering. Rock Mech. Rock Eng. 43 (3): 375-376. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0057-x>.

Altindag, R., Guney, A (2010) Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. SRE, 5 (16): 2107-2118.

Andriani, G. F., Walsh, N (2010) Petrophysical and mechanical properties of soft and porous building rocks used in Apulian monuments (south Italy). Geol. Soc, 333(1): 129-141. <https://doi.org/10.1144/SP333.13>.

ASTM D2845 (2017) Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock.

ASTM D3967 (1996) Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. Annual Book of ASTM Standards, 3 (1): 14.02

ASTM D4543 (2008) Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances.

ASTM D4644 (2016) Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Other Similar Weak Rocks.

ASTM D7012 (2014) Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures.

Atzeni, C., Sanna, U., Spanu, N (2006) Some mechanisms of microstructure weakening in

۱۰. بر اساس تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه، بین شاخص شکنندگی BI با سایر پارامترهای UCS، BTS و Vp همبستگی قابل توجهی ( $R^2=0.96$ ) در شرایط اشباع برقرار است. در تعیین شاخص شکنندگی نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) بیش‌ترین تأثیر را دارد.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از داوران محترم و سردبیر و هیات تحریریه مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

### منابع

اجل‌لوئیان، ر.، محمدی، م (۱۳۹۰) ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی سنگ‌های آهکی سازند آسماری در ساختگاه سدهای خرسان ۱ و ۲، نشریه‌ی زمین‌شناسی مهندسی، شماره ۱، ص ۱۰۵۹-۱۰۷۶.

آقاناتی، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۸۷ ص.

عبدی، ی (۱۳۹۹) کاربرد آنالیز رگرسیون چندمتغیره برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از خصوصیات پتروگرافی، مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۴، شماره ۲۷، ص ۱۴۷-۱۵۷.

قبادی، م. ح.، 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.

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

قبادی، م. ح.، محسنی، ح.، احمدی، س (۱۳۹۸) برآورد مقاومت فشاری و کششی سنگ‌های کربناته با استفاده از آزمایش بار نقطه‌ای و همبستگی آن‌ها با ارزش ضربه‌ای سنگدانه (مطالعه موردی: سنگ‌های کربناته جاده کرمانشاه - ایلام)، مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۳، شماره ۲۵، ص ۱-۱۶.

کراری، س. م.، حیدری، م.، خادمی حمیدی، ج.، شریفی تشنیزی، ا (۱۳۹۹) ارزیابی شاخص‌های شکنندگی سنگ‌ها برای تخمین مدول چقرمگی، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، دوره ۱۳، شماره ۳، ص ۵۱-۶۵.

- Kahraman, S (2007) The correlations between the saturated and dry P-wave velocity of rocks. *Ultrasonic*, 46 (4): 341-348.
- Kahraman, S., Toraman, O. Y., Cayirli, S (2017) Predicting the strength and brittleness of rocks from a crushability index. *Bull. Eng. Geol. Envir* 1e7. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1012-9>.
- Karakul, H (2016) Investigation of saturation effect on the relationship between compressive strength and Schmidt hammer rebound. *Bull. Eng. Geol. Envir* 1e10. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0883-5>
- 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., & Ghafoori, 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.
- Liu, J. S., Li, H. B., Zhang, G. K., & Deng, J (2017) Correlations among Physical and Mechanical Parameters of Rocks. *Applied Mechanics and Materials*, 865: 366-372.
- Maleki, M. R (2011) Study of the Engineering Geological Problems of the Havasan Dam, with Emphasis on Clay-Filled Joints in the Right Abutment. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44(6): 695-710. [doi:10.1007/s00603-011-0165-2](https://doi.org/10.1007/s00603-011-0165-2).
- Meng, F., Zhou, H., Zhang, C., Xu, R., Lu, J (2015) Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress-strain curves. *Rock Mech. Rock Eng*, 48 (5): 1787-1805.
- Ozfirat, M. K., Yenice, H., Simsir, F., Yeral, O (2016) A new approach to rock brittleness and its usability at prediction of drillability. *J. Afr. Earth Sci.* 119: 94-101.
- Ozturk, H., Altinpinar, M (2017) The estimation of uniaxial compressive strength conversion factor of trona and interbeds from point load tests and numerical modeling. *J. Afr. Earth Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.04.015>
- 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.
- Sachpazis, C. I (1990) Correlating Schmidt hammer rebound number with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. *Bull Int Assoc Eng Geol*, 42: 75-83.
- high-porous calcareous stones. *Mater. Struct*, 39 (5): 525-531.
- Ceryan, N (2014) Application of support vector machines and relevance vector machines in predicting uniaxial compressive strength of volcanic rocks. *J. Afr. Earth Sci*, 100: 634-644. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.08.006>
- Chang, C., Zoback, M. D., Khaksar, A (2006) Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *J. Pet. Sci. Eng.* 51 (3): 223-237. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.01.003>
- Deer, D. U. and Miller, R. P (1966) Engineering classification and index properties for intact rock, Tech, Rept No., AFWL-TR-65-116 Air force weapons labs, Kirtland Air Force Base, New Mexico.
- Erguler, Z. A., Ulusay, R (2009) Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 46 (2): 355-370.
- Ghafoori, M., Rastegarnia, A., Lashkaripour, G. R (2018) Estimation of static parameters based on dynamical and physical properties in limestone rocks. *J. Afr. Earth Sci.* <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.09.008>
- Ghobadi, M. H., Naseri, F (2016) Rock Brittleness Prediction Using Geomechanical Properties of Hamekasi Limestone: Regression and Artificial Neural Networks Analysis, *JGoepe*, 1: 19-33.
- 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.
- Gong, Q. M., Zhao, J (2007) Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite. *Tunn. Undergr. Sp. Tech*, 22: 317-324.
- Hoek, E (1983) Strength of jointed rock masses. *Geotechnique*, 3: 187-223
- Hunka, V. & Das. B (1974) Brittleness determination of rocks by different methods", *Int. J. Rock Mech.*
- Ince, I., Fener, M (2016) A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated pyroclastic rocks due to freeze-thaw cycle. *J. Afr. Earth Sci*, 120: 134-140. [doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.013](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.013)
- Jabinpour, A., Yarahmadi Bafghi, A., Gholamnejad, J (2018) Geostatistical modelling of rock mass cavability based on laubscher approach in Sechahoon Mine, *Journal of Mineral Resources Engineering (JMRE)*, 3(2): 53-69.
- Kahraman, S. and Altindag, R (2004) a brittleness index to estimate fracture toughness. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41: 343-348.

- Salehin, S (2017) Investigation into engineering parameters of marls from Seydoon dam in Iran. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9: 912-923.
- Sousa, L. M. O., Del Rio, L. M. S., Calleja, L., Argandona, VGR D., Rey, A (2005) Influence of microfractures and porosity on the physic mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Eng Geol*, 77: 153-168.
- Török, A., Vasarhelyi, B (2010) The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Eng. Geol*, 115 (3): 237-245.
- Vasanelli, E., Colangiuli, D., Calia, A., Sileo, M., Aiello, M. A (2015) Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone. *Ultrasonic*, 60: 33-40.
- Vasarhelyi, B (2005) Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the Miocene limestone. *Rock Mech. Rock Eng*, 38 (1): 69-76.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., Alves, C. A. S., Pamplona, J (2008) Ultrasonic evaluation.
- 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.
- Xia, Y. J., Li, L. C., Tang, C. A., Li, X. Y., Ma, S., Li, M (2017) A new method to evaluate rock mass brittleness based on stress-strain curves of class I. *Rock Mech. Rock Eng*. 1-17.
- Yagiz, S (2006) An investigation on the relationship between rock strength and brittleness. In: 59th Geological Congress of Turkey. MTA General Directory, Ankara, Turkey, p. 352.
- Yagiz, S (2009) Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunn. Undergr. Sp. Tech*, 24 (1): 66-74.
- Yagiz, S., Gokceoglu, C (2010) Application of fuzzy inference system and nonlinear regression models for predicting rock brittleness. *Expert Syst. Appl*. 37 (3).
- Yetkin, M. E., Ozf rat, M. K., Yenice, H., S, ims, ir, F., Kahraman, B (2016) Examining the relation between rock mass cuttability index and rock drilling properties. *J. Afr. Earth Sci*, 124: 151-158.

## Prediction of brittleness index and determination of experimental correlation between physical and mechanical properties of limestone of TaleZang Formation in Hawasan dam basement

M. Karami<sup>1\*</sup>, M. Rahimi Shahid<sup>2</sup> and G. R. Lashkaripour<sup>3</sup>

1, 2- Ph. D. student. Engineering of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

3- Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

\* Geotechnical47@gmail.com

Received: 2020/10/31 Accepted: 2021/3/6

### Abstract

Determination of brittleness and geomechanical parameters, especially uniaxial compressive strength (UCS) and Young's modulus (ES), is required for designing and various applications of rock engineering. Evaluation of these parameters is a time-consuming, tedious and costly process requiring the preparation of suitable rock cores, therefore, experimental correlations are being used to predict the properties of rocks. In this study, to predict brittleness and determining the experimental correlation between physical and mechanical parameters of Talezang limestone formation, 74 rock core samples obtaining from 10 geotechnical boreholes with a depth of 70 m in the basement of Hawasan dam in dry and saturated conditions were used. After analyzing the descriptive statistics of the samples in SPSS 25 software, simple regression correlation relationships were approached based on the best fit between physical and mechanical parameters and according to multiple regression model, an experimental equation with coefficient of determination ( $R^2 = 96$ ) was applied to predict brittleness index of Talezang limestone. Finally, the obtained experimental equation based on the values of uniaxial compressive strength (UCS), Brazilian tensile strength (BTS) and compressive wave velocity ( $V_p$ ) and statistical relationships between physical and mechanical parameters for determining the brittleness index (BI) in saturated conditions was compared with previous relationships in the literature. The results show that the accuracy of the statistical relationships presented is consistent with previous relationships.

**Keywords:** Brittleness, Geomechanical parameters, Statistical relationships, Talezang formation, Hawasan Dam.