



بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی رادیولاریت‌های چرتی جنوب شهر کرمانشاه

سید داود محمدی*^۱، ناصر مهدی آبادی^۲، بهمن ساعدی^۳

پذیرش مقاله: ۹۵/۰۴/۳۰

دریافت مقاله: ۹۳/۰۹/۳۰

چکیده

شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سازندهای سنگی ایران به عنوان یک ضرورت مطرح است. هدف از این پژوهش شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی رادیولاریت‌های چرتی کرمانشاه که سنگ بستر شهر کرمانشاه را تشکیل داده و در ارتباط با سازه‌های مهندسی متمرکز و خطی فراوانی است، می‌باشد. بدین منظور بر روی این سنگ‌ها آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی شامل، تعیین وزن واحد حجم خشک و اشباع، تخلخل، جذب آب، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی، چکش اشمیت و سرعت موج فشاری انجام گردید. وضعیت تکنیکی و شکنندگی سنگ‌های مورد مطالعه، مغزه‌گیری را با مشکلاتی مواجه نمود، لذا کوشش گردید با بررسی توزیع آماری داده‌ها، اعمال آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و صحت‌سنجی فاصله اطمینان ۹۵٪، ابتدا وضعیت آماری داده‌ها مشخص شده و سپس روابط مناسبی بین نتایج آزمایش‌ها به دست آید. نتایج تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد که داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده، از توزیع نرمال و یا توزیع لوگ نرمال تبعیت کرده و در فاصله اطمینان ۹۵٪ قرار می‌گیرند. ضمناً روابط تجربی به دست آمده، دارای ضریب تعیین بسیار مناسب جهت تخمین غیرمستقیم پارامترهای فیزیکی و مکانیکی می‌باشند.

کلید واژه‌ها: رادیولاریت‌های کرمانشاه، سنگ چرت، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، تحلیل‌های آماری.

۱. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان s_d_mohammadi@yahoo.com

۲. دانشجویان دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۳. دانشجویان دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

شناسی، فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های آهکی سازند ایلام - سروک به این نتیجه رسیدند که همبستگی مناسبی بین خصوصیات فوق‌الذکر این سنگ‌ها وجود دارد. ترابی و همکاران ۲۰۱۴، با مطالعه سنگ آهک آسماری در محل سدهای کارون و خرسان ۳، روابطی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیک با توجه به خصوصیات ذاتی چون تخلخل، چگالی و سرعت موج فشاری ارائه دادند. از آنجا که سنگ بستر شهر کرمانشاه را رادیولاریت‌های چرتی تشکیل می‌دهند و سازه‌های عمرانی متمرکز و خطی مانند ساختمان‌ها، شهرک‌ها، مخازن آب شهر کرمانشاه، بخشی از بزرگراه کربلا و راه آهن کرمانشاه - خسروی، تونل‌های متعدد راه آهن، درون یا بر روی این سازند احداث شده و یا در حال احداث می‌باشند، مطالعه و شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی این سنگ‌ها، دارای اهمیت زیادی است. با توجه به وضعیت تکتونیکی سنگ‌های رادیولاریتی این محدوده و مشکلات نمونه‌گیری برای تعیین ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی آنها، هدف از این پژوهش، ارائه روابط تجربی مناسب و دارای دقت کافی به منظور تخمین غیرمستقیم پارامترهای مهندسی سنگ‌های رادیولاریتی منطقه می‌باشد.

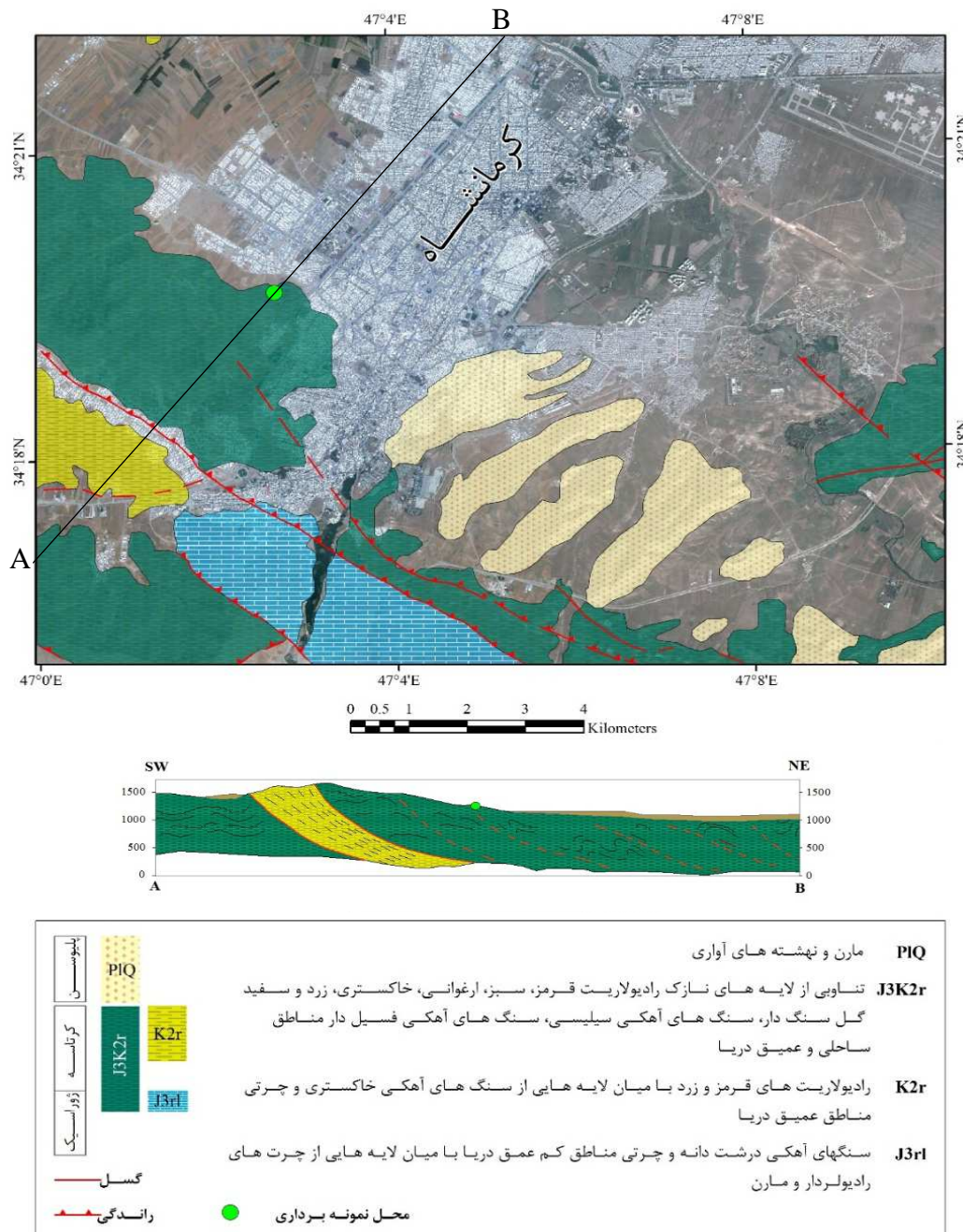
۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی

رادیولاریت‌های کرمانشاه در غرب ایران، با راستای شمال غرب - جنوب شرق در گستره‌ای با پهنای ۳۵ کیلومتر در حد فاصل بین سازند آهکی بیستون در شمال و نهشته‌های زاگرس برجا در جنوب آن، در استان کرمانشاه قرار دارند. در مطالعات زمین‌شناسی ساختمانی توسط محجل و سهندی (۱۳۷۸)، حوضه رادیولاریتی کرمانشاه به‌عنوان جنوبی‌ترین زیرپهنه، در پهنه زمین‌ساختی سنندج - سیرجان معرفی شده است. در موقعیت کنونی، رادیولاریت‌های کرمانشاه توسط دو گسل رانده که شیب آنها به شمال خاور است، در حد فاصل دو زیر پهنه بیستون در شمال و زاگرس بلند در جنوب محدود شده است. رادیولاریت‌ها در کرمانشاه به دو بخش (بخش زیرین دارای آهک بیشتر و در بخش بالایی دارای چرت فراوان‌تر)

در چند دهه اخیر، به منظور شناخت ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی سازندهای ایران، پژوهش‌هایی انجام شده است. در برخی از این مطالعات علاوه بر تعیین خصوصیات پتروگرافی، فیزیکی و مکانیکی، سعی شده است که با روش‌های مختلف از جمله روش‌های رگرسیون‌گیری، فازی و تحلیل‌های آماری بین این خصوصیات روابط بهینه‌ای ارائه گردد. در ادامه به چند مورد از این پژوهش‌ها اشاره می‌گردد. قبادی و همکاران ۱۳۸۸ بین ویژگی‌های فیزیکی و سنگ‌شناسی و خصوصیات مهندسی سنگ آهک سازند آسماری در شمال شرق مسجد سلیمان روابط منطقی برقرار کردند، کیانپور و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از چگالی، تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای شیل‌های سازند شمشک در منطقه سیاه بیشه، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول تغییر شکل‌پذیری آن را برآورد کردند، قبادی و همکاران (۱۳۹۲) خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سازند گچساران را مورد بررسی قرار دادند، در پژوهش مذکور علاوه بر بررسی انحلال‌پذیری ژئیس و تورم مارن این سازند در منطقه رامهرمز، بین پارامترهای مقاومت کششی، درصد تخلخل و شاخص دوام سیکل اول و مقاومت واحدهای سنگی ارتباط معنادار برقرار کردند، آقاملایی و همکاران (۱۳۹۲) سنگ‌های مارنی سازند قرمز بالایی ساختگاه سد صفا در کرمان را مورد مطالعه قرار داده و بین ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی این سنگ‌ها ارتباط برقرار کردند، Heidari et al. (2013)، ماسه‌سنگ‌های همدان را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که برای پیش‌بینی خصوصیات مهندسی این سنگ‌ها، نقش خصوصیات بافتی مهم‌تر از ترکیب کانی‌شناسی است و برای تخمین خصوصیات مهندسی روابط بهینه‌ای پیشنهاد دادند. Bruno et al. (2013) بر اساس آزمایش واجهش چکش اشमित بر روی سنگ‌های کربناته که از نظر مقاومت گستره مناسبی داشته‌اند، یک رابطه تجربی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری این سنگ‌ها و بتون ارائه داده‌اند. قبادی و همکاران (۱۳۹۳) ضمن بررسی خصوصیات سنگ -

از آنجا که بیشترین رخنمون سازند رادیولاریتی کرمانشاه در شهر مربوط به واحد چرتی می‌باشد و بیشتر سازه‌های عمرانی در تقابل با این سازند می‌باشند، جهت مطالعه این واحد انتخاب گردید

تقسیم شده است (محجل و بیرالوند، ۱۳۸۷). سن رادیولاریت‌های کرمانشاه، تریاس تا کرتاسه پسین گزارش شده است. در شکل ۱ شرح واحدهای زمین‌شناسی بر اساس نقشه چهارگوش ۱/۱۰۰۰۰۰ کرمانشاه (کریمی باوندپور، ۱۳۷۸) ارائه شده است.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی، مقطع و محل نمونه‌گیری از سنگ رادیولاریت چرتی واقع در تپه‌های رادیولاریتی جنوب شهر کرمانشاه (بر گرفته از کریمی باوندپور، ۱۳۷۸).

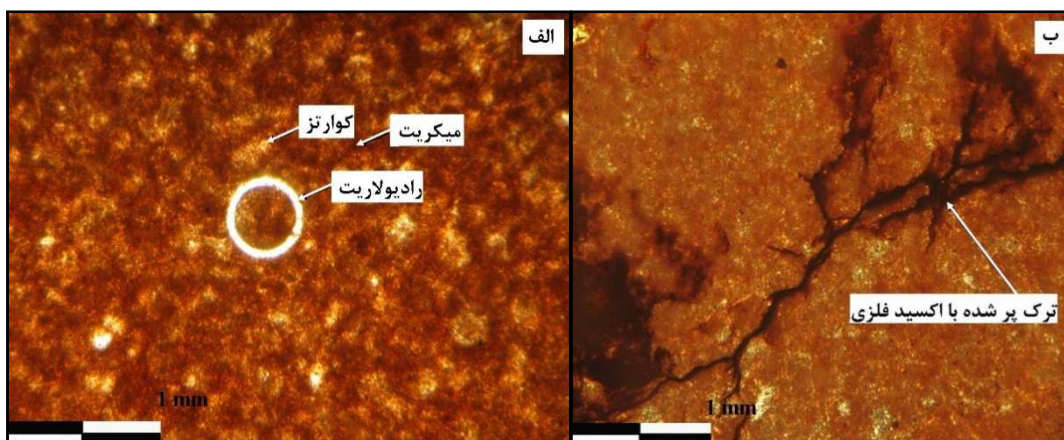
۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. برداشت‌های صحرایی و نمونه‌برداری

در پیمایش‌های صحرایی به‌عمل آمده در رخنمون‌های رادیولاریتی واقع در تپه‌های جنوب شهر کرمانشاه به دلیل لایه‌بندی نازک و هوازدگی سطحی این واحد زمین‌شناسی، بلوک‌های سالم و هوازده یافت نشد. لذا بلوک‌های سنگی، از محل گودبرداری عمیق پی منبع آب واقع در تپه‌های رادیولاریتی جنوب شهر کرمانشاه با مختصات "۴۴° ۰۲' ۴۷۰ طول شرقی و "۳۱° ۱۹' ۳۴۵ عرض شمالی (شکل ۱)، که دارای شرایط بهتری جهت نمونه‌گیری بودند، انتخاب شده و برای مغزه‌گیری به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا منتقل شدند. از بلوک‌های سنگی تعداد ۲۰ مغزه استوانه‌ای جهت انجام آزمایش فشاری تک‌محوری و نمونه‌های دیسکی شکل جهت آزمایش برزلی تهیه گردید.

۳-۲. مطالعات سنگ‌شناسی

از بلوک‌های سنگ رادیولاریت، مقطع نازک تهیه شد و مطالعات سنگ‌شناسی توصیفی به‌وسیله میکروسکوپ پلاریزان بر روی برش‌های نازک صورت پذیرفت. بر اساس این مطالعه، این سنگ دارای بلورهای ریز کلسیت (میکریت) حدود ۵۵ درصد و حدود ۴۰ درصد چرت (کوارتز) میکروکریستالین) است. شکستگی‌های سنگ با اکسیدهای فلزی به‌خصوص هماتیت (اکسید آهن) پر شده و علت رنگ قهوه‌ای نمونه نیز به دلیل هماتیت آن است (شکل ۲). همچنین حدود ۵ درصد، بلورهای درشت و روشن کلسیت در نمونه وجود دارد.



شکل ۲. تصاویر برش نازک از رادیولاریت کرمانشاه (XPL بزرگنمایی ۱۰ برابر؛ الف) قسمت‌های قهوه‌ای آهک و قسمت‌های روشن اغلب کوارتز است ب) شکستگی سنگ با اکسید منگنز و آهن پر شده است.

۳-۳. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

تعیین خواص مهندسی سنگ‌ها، مهم‌ترین بخش در هر پروژه زمین‌شناسی مهندسی می‌باشد. در این پژوهش، جهت اندازه‌گیری خواص فیزیکی و مکانیکی از روش استاندارد پیشنهاد شده توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1981) استفاده شده است. در ادامه به شرح آزمایش‌های انجام شده پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱. ویژگی‌های فیزیکی

هر نوع سنگ با توجه به منشأ و فرآیندهای متداول زمین‌شناسی که در طول زمان بر روی آن رخ داده است، دارای ویژگی‌های خاص به خود است. خواص فیزیکی سنگ‌ها شامل وزن واحد حجم خشک و اشباع، تخلخل و درصد جذب آب می‌باشد. خواص فیزیکی سنگ بکر به بافت و ریز ساختارهای آن بستگی دارد. این ریز ساختارها شامل

حجم خشک و اشباع، تخلخل و درصد جذب آب یا شاخص پوکی می‌باشد، در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس رده‌بندی ارائه شده توسط بل (Bell, 1983)، چگالی خشک رادیولاریت کرمانشاه در رده سنگ‌هایی با چگالی پایین تا متوسط و تخلخل در رده متوسط قرار می‌گیرد.

جدول ۱. توزیع آماری ویژگی‌های فیزیکی رادیولاریت کرمانشاه.

انحراف معیار	میانگین	بیشینه	کمینه	تعداد نمونه	آزمایش
۰/۰۱	۲/۸۸	۲/۲۰	۲/۱۷	۲۰	وزن واحد حجم خشک (grf/cm^3)
۰/۷۲	۱۱/۹۰	۱۴/۰۶	۱۰/۸۱	۲۰	تخلخل (%)
۰/۳۴	۵/۴۷	۶/۴۸	۴/۹۶	۲۰	جذب آب (%)

۳-۲. مقاومت فشاری تک‌محوری

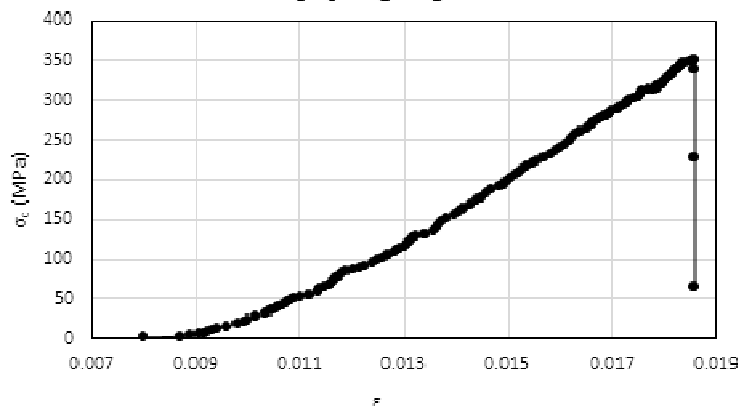
شکننده رفتار می‌کنند. خلاصه نتایج آزمایش فشاری تک‌محوری در جدول (۲) نشان داده شده است.

۳-۳. تعیین مدول الاستیسیته مماسی

بر اساس رابطه $\sigma_c = \frac{E\epsilon}{\epsilon}$ بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول مماسی رابطه مستقیم وجود دارد. با ترسیم منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها (شکل ۳)، مدول مماسی برای ۵۰٪ مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها محاسبه شده است. مقدار میانگین مدول مماسی ۳۰/۵ گیگاپاسکال اندازه‌گیری شده است (جدول ۲).

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) مرسوم‌ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیکی سنگ بکر می‌باشد. این آزمایش به عنوان آزمایش پایه در اکثر پروژه‌های مهندسی انجام می‌شود. مقاومت سنگ بکر و ضریب الاستیسیته به عنوان پارامترهای اصلی حاصل از این آزمایش، در اکثر سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این آزمایش بر روی ۲۰ نمونه استوانه‌ای سنگ رادیولاریت چرتی در شرایط خشک انجام گردیده است. مقادیر میانگین مقاومت حدود ۲۴۵ مگاپاسکال است. به لحاظ مقاومت، این سنگ‌ها در رده مقاومت بالا تا خیلی بالا قرار می‌گیرند (Deer and Miller, 1966) و به صورت مواد بسیار

منحنی تنش-کرنش



شکل ۳. منحنی تنش-کرنش به دست آمده برای یکی از نمونه‌های رادیولاریت چرتی مورد آزمایش.

اندازه‌گیری سختی بازگشتی سنگ‌ها، امکان دست‌یابی به مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته سنگ را مهیا می‌سازد. این آزمایش با استفاده از چکش نوع N (با انرژی برخوردی معادل با ۲/۲۰۷ نیوتن متر) انجام شد. در جدول ۲ میانگین نتایج واجهش چکش اشمیت بر روی سنگ رادیولاریت چرتی ارائه شده است. به هنگام انجام آزمایش، چکش به طور عمود و به سمت پایین نگه داشته شده است (ISRM, 1978).

۳-۳-۶. اندازه‌گیری سرعت موج فشاری

سرعت سیر امواج اولتراسونیک در داخل مصالح جامد بستگی به دانسیته و ویژگی‌های الاستیکی آنها دارد. بنابراین اندازه‌گیری این پارامتر می‌تواند جهت تعیین ویژگی‌های الاستیکی و کیفیت مصالح سنگی به کار رود. این آزمایش امکان به دست آوردن پارامترهای الاستیک را بدون تغییر ساختار داخلی نمونه و با هزینه‌ای کمتر در مقایسه با آزمایش‌های استاتیک فراهم می‌آورد. سرعت عبور امواج فشاری با توجه به زمان‌های گذر موج و فاصله بین پیزوالکتریک‌ها (طول نمونه) به دست می‌آید (فهیمی‌فر و سروش ۱۳۸۰). نتایج سرعت امواج فشاری در سنگ رادیولاریت چرتی در حالت خشک در جدول ۲ ارائه شده است.

۳-۳-۳. محاسبه نسبت مدولی

با داشتن مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول مماسی، نسبت مدولی برای سنگ رادیولاریت چرتی محاسبه گردید. مقادیر نسبت مدولی در دو حالت خشک و اشباع کمتر از ۲۰۰ می‌باشد. بنابراین بر اساس دو عامل مقاومت فشاری تک‌محوری و نسبت مدولی سنگ‌های رادیولاریت چرتی طبق رده‌بندی مهندسی سنگ بکر در رده AL قرار می‌گیرند (Bell, 1983). به عبارت دیگر، نمونه‌های مورد آزمایش دارای مقاومت فشاری تک‌محوری خیلی بالا و نسبت مدولی پایین هستند.

۳-۳-۴. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی)

آزمایش برزیلی به منظور تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های سنگ انجام می‌گیرد. برای به دست آوردن مقاومت کششی غیرمستقیم از نمونه‌های دیسکی شکل با نسبت ضخامت به قطر بین ۰/۵۰ تا ۰/۷۵ استفاده شده است (ASTM D-3967). آزمایش مذکور بر روی ۲۰ نمونه سنگ رادیولاریت چرتی در شرایط خشک انجام شده و خلاصه نتایج آن در جدول (۲) آمده است.

۳-۳-۵. سختی واجهشی اشمیت

استفاده از چکش اشمیت یکی از روش‌های غیرمستقیم تعیین مقاومت فشاری سنگ‌ها است. استفاده از این ابزار علاوه بر

جدول ۲. نتایج ویژگی‌های مکانیکی رادیولاریت‌های چرتی کرمانشاه.

انحراف معیار	میانگین	بیشینه	کمینه	تعداد نمونه	آزمایش
۷۶/۱۵	۲۴۴/۶۹	۳۸۳/۰۴	۹۱/۹۲	۲۰	مقاومت فشاری (MPa)
۱۰/۹۸	۳۰/۳۶	۵۷/۰۷	۱۰/۰۶	۲۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۷/۳۹	۱۹/۸۳	۳۳/۶۲	۵/۳۸	۲۰	مقاومت کششی (MPa)
۱۷۴	۳۶۵۹	۳۹۲۲	۳۳۴۲	۲۰	سرعت موج فشاری (m/s)
۴	۴۸	۵۵	۴۱	۲۰	سختی واجهشی چکش اشمیت

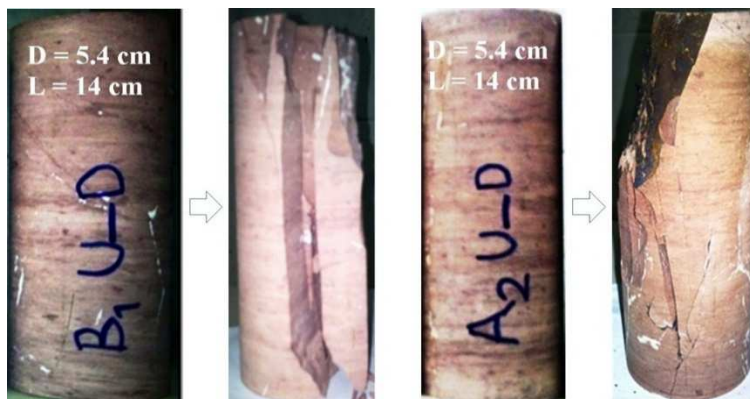
ریزبلور و اکسیدهای فلزی از جمله هماتیت می‌باشند. این رادیولاریت‌ها تحت تأثیر این مواد و در شرایط سطح زمین دارای رفتار شکننده بوده، چنانکه در هنگام آزمایش در مقاومت اوج، به ناگهان نمونه سنگ به حالت انفجاری

۱. بحث

رادیولاریت‌های چرتی سرخ رنگ کرمانشاه دارای لایه‌های نازکی هستند. این سنگ‌ها چنانکه در مطالعات پتروگرافی مشخص شد، دارای مقدار زیادی کلسیت ریزبلور، کوارتز

را پر کرده و همچنین به موازات لایه‌بندی نوعی بافت و ناهمسانگردی ایجاد کرده‌اند (شکل ۴). این ناهمسانگردی در سطح بلوک‌های سطحی هوازده ایجاد جدایش می‌کنند و همراه با ترک‌ها تمامی آزمایش‌های مکانیکی از جمله مقاومت فشاری تک‌محوری را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به گونه‌ای که مقاومت فشاری در گستره‌ای وسیع بین ۱۴۰ تا ۳۵۰ مگاپاسکال متغیر است.

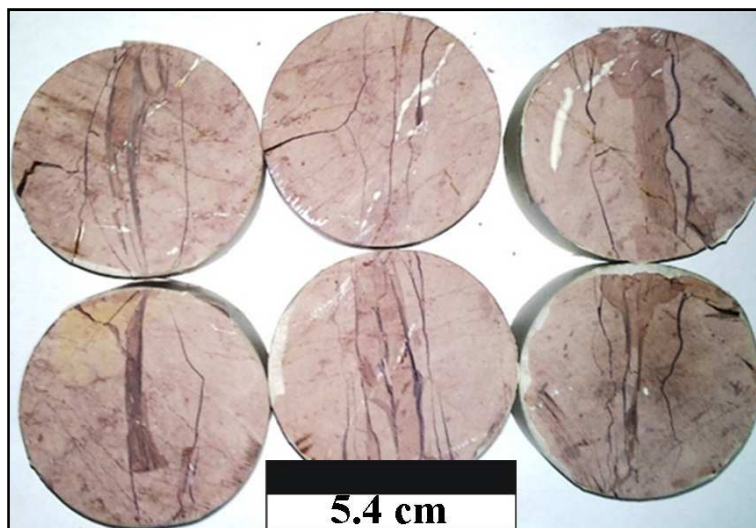
می‌شکند. در نمودار تنش- کرنش همه نمونه‌ها افت ناگهانی مقاومت مشاهده می‌گردد (شکل ۳). این ویژگی سنگ‌های رادیولاریت سبب شده که در اثر فعالیت‌های تکتونیکی منطقه، دچار شکست و ترک‌خوردگی گردند. این ترک‌خوردگی چنانکه در تصویر مقاطع نازک نیز به آن اشاره شد به حدی است، که به‌سختی می‌توان نمونه‌های سالم جهت آزمایش فشاری تک‌محوری تهیه کرد. اکسیدهای فلزی ترک‌های سنگ



شکل ۴. ساختارهایی که در جهت لایه‌بندی (افقی) ناهمسانگردی ایجاد کرده و نیز ریزترک‌های پر شده با اکسیدها فلزی در مغزه‌ها که بر روی آزمایش فشاری تک‌محوری اثر می‌گذارند.

دارد. لازم به ذکر است، مقاومت کششی نمونه‌های سنگ مورد آزمایش کمتر از یک دهم مقاومت فشاری است.

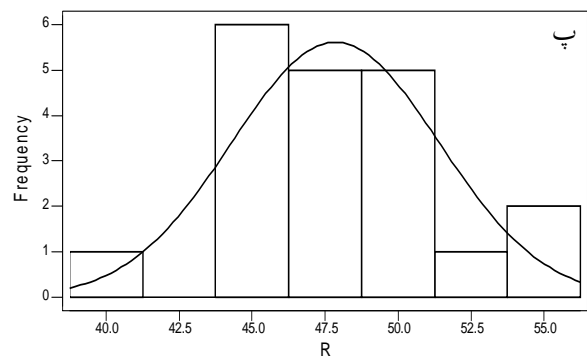
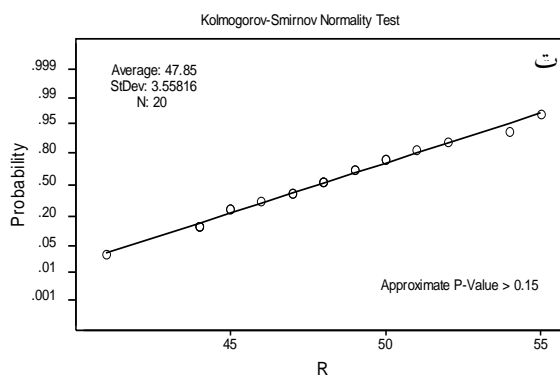
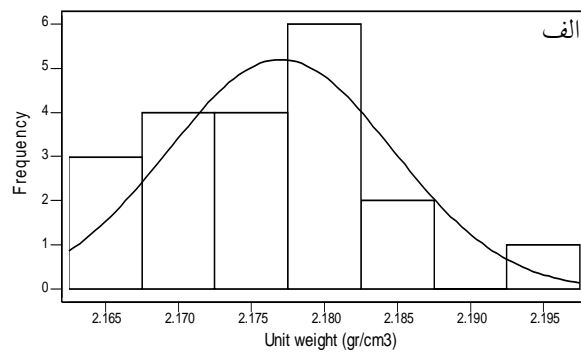
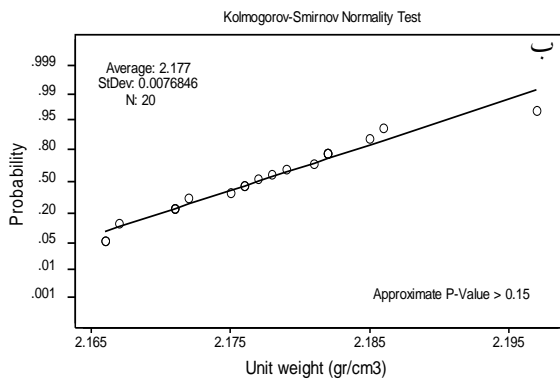
در آزمایش برزیلی، شکستگی سنگ تحت تأثیر ترک‌ها و ناهمسانگردی به صورت چند ترک موازی می‌شکند (شکل ۵). شکست در این آزمایش، حالت ترد و شکننده و انفجاری

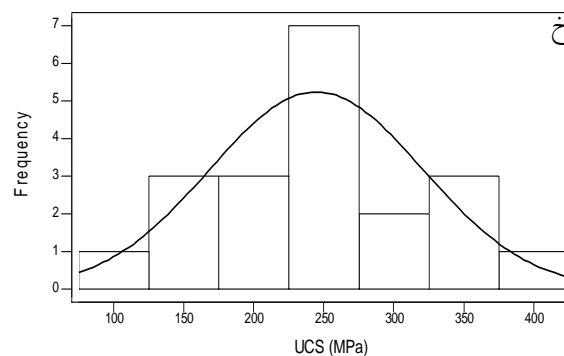
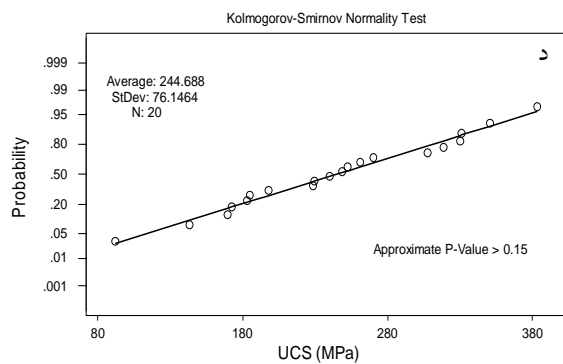
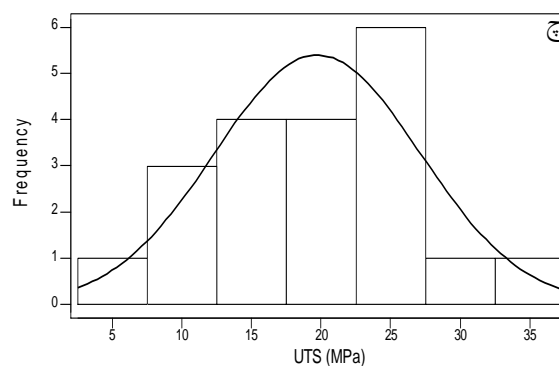
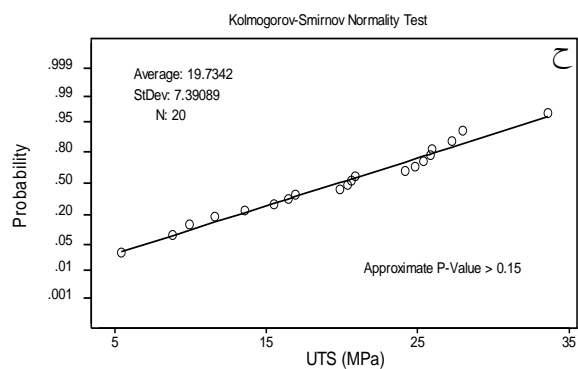
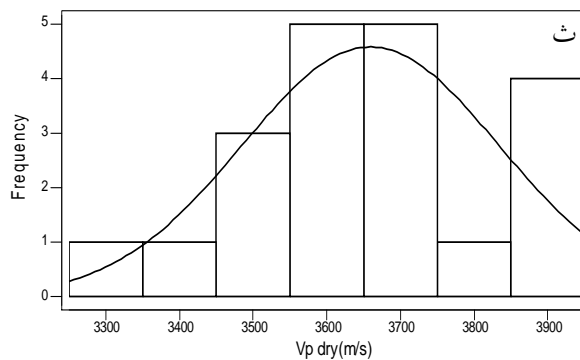
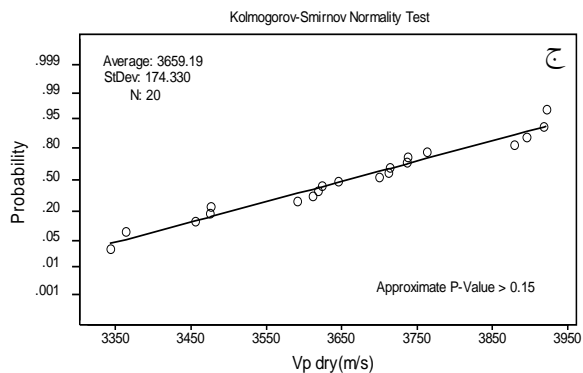


شکل ۵. ترک‌های موازی ایجاد شده طی آزمایش برزیلی بر روی سنگ رادیولاریت چرتی.

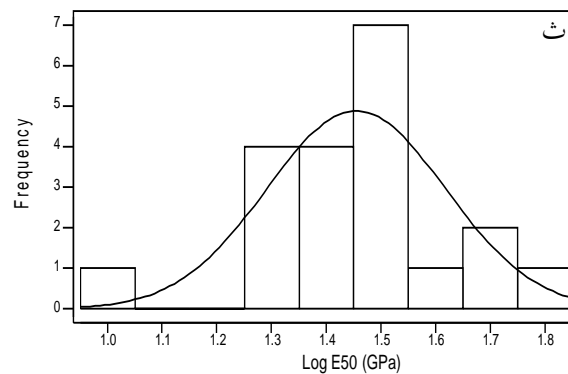
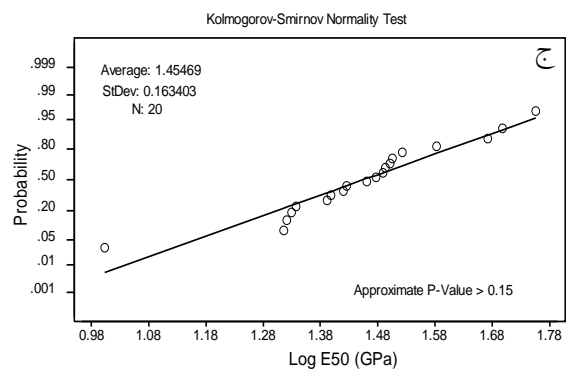
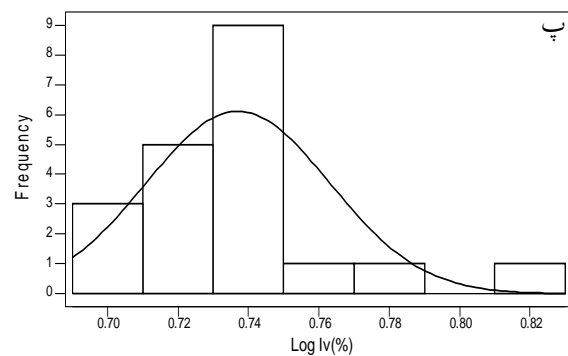
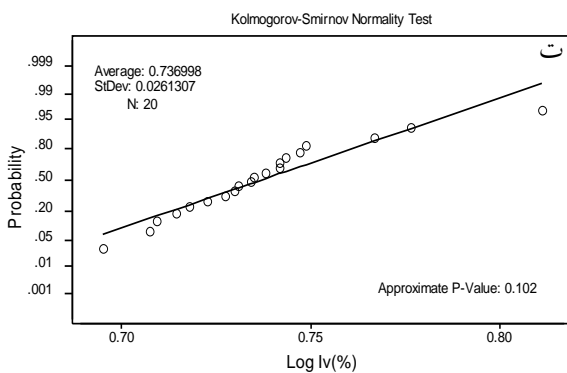
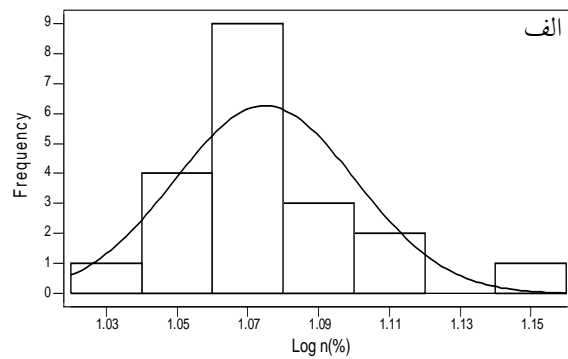
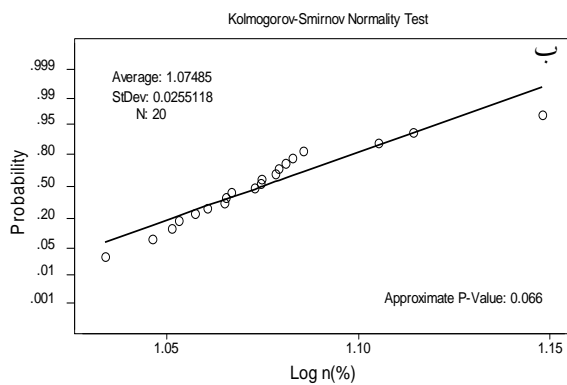
داده‌ها از توزیع لوگ نرمال برخوردار می‌باشند (شکل ۷). توزیع نرمال یک توزیع متقارن یک نمایی است که با استفاده از تئوری احتمالات بر اساس توزیع تصادفی در اطراف یک میانگین استخراج می‌شود. از روی شکل و نحوه توزیع منحنی چگالی فراوانی نسبی و آزمون های نرمال بودن، می‌توان ویژگی‌های جامعه آماری را به دست آورد. با استفاده از نرم‌افزار Minitab هیستوگرام فراوانی و منحنی چگالی فراوانی نسبی داده‌ها ترسیم شده است. تقارن هیستوگرام فراوانی مقادیر P-value در آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (شکل‌های ۶ و ۷) نشان دهنده توزیع نرمال در داده‌های وزن واحد حجم، سختی واجهشی چکش اشمیت، سرعت سیر موج فشاری، مقاومت کششی و مقاومت فشاری و توزیع لوگ نرمال برای داده‌های تخلخل، جذب آب و مدول الاستیسیته است. خلاصه این تحلیل‌های آماری نیز در جدول ۳ آورده شده است.

در ادامه با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، داده‌های استخراج شده برای دو توزیع نرمال و لوگ نرمال بررسی شد (Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1939). آزمون کولموگروف-اسمیرنوف روش ناپارامتری ساده‌ای برای تعیین همگونی اطلاعات تجربی با توزیع‌های آماری منتخب است. در نرم‌افزار Minitab با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف می‌توان توزیع آماری مناسب را برای داده‌های مورد مطالعه پیدا کرد. برای داده‌های وزن واحد حجم، سختی واجهشی چکش اشمیت، سرعت سیر موج فشاری، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت فشاری، سطح معنی‌داری به دست آمده از سطح معنی‌داری مبنا (۰/۰۵) بیشتر است، بنابراین فرض نرمال بودن در فاصله اطمینان ۹۵٪ تأیید می‌شود (شکل ۶). همچنین مقدار P-Value محاسبه شده توسط نرم‌افزار Minitab برای داده‌های تخلخل، جذب آب و مدول الاستیسیته، بزرگتر از ۰/۰۵ به دست آمد و لذا می‌توان گفت





شکل ۶. هیستوگرام فراوانی و منحنی توزیع نرمال برای داده‌های؛ الف) وزن واحد حجم، ب) سختی واجهشی چکش اشمیت، ث) سرعت موج فشاری، ج) مقاومت کششی برزیلی، خ) مقاومت فشاری تک محوری، و نمودار آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای توزیع نرمال در داده‌های؛ ب) وزن واحد حجم، ت) سختی واجهشی چکش اشمیت، ج) سرعت موج فشاری، ح) مقاومت کششی برزیلی، د) مقاومت فشاری تک محوری.



شکل ۷. هیستوگرام فراوانی و منحنی توزیع لوگ نرمال برای داده‌های؛ الف) تخلخل، ب) جذب آب، ث) مدول الاستیسیته، و نمودار آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای توزیع لوگ نرمال در داده‌های؛ ب) تخلخل، ت) جذب آب، ج) مدول الاستیسیته.

پروژه‌های کوچک، روابط دو متغیره بین خواص به دست آمده در آزمایشگاه، با استفاده از روش رگرسیون دو متغیره در نرم‌افزار Minitab مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (شکل ۸).

از آنجاکه انجام آزمون‌های آزمایشگاهی گران و وقت‌گیر هستند و با توجه به اینکه سنگ رادیولاریت به سبب نازک لایه بودن و ویژگی‌های مکانیکی آن به سختی قابل نمونه‌گیری است، جهت استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای

جدول ۳. خلاصه تحلیل‌های آماری توزیع نرمال و لوگ نرمال داده‌های حاصل از پژوهش.

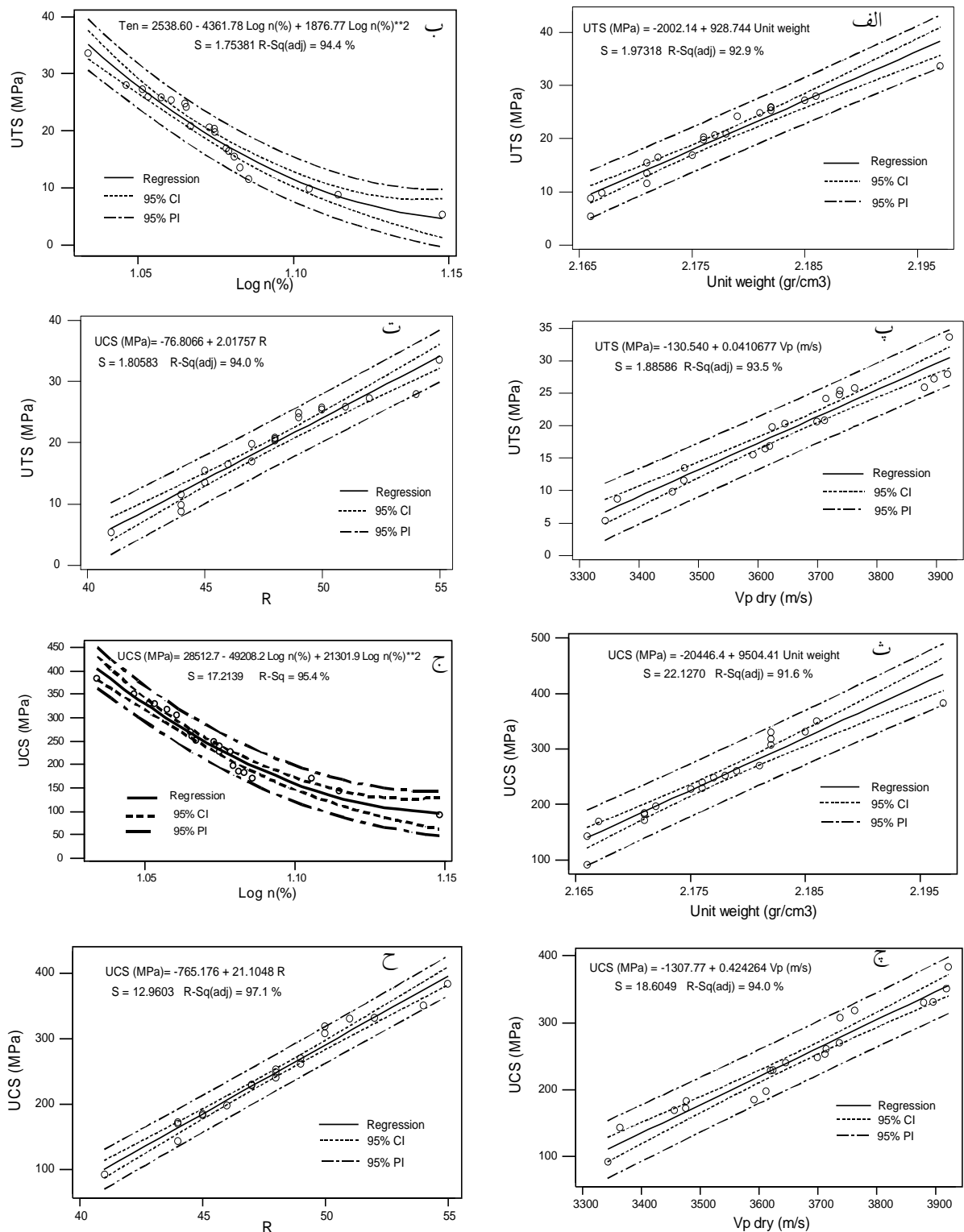
پارامتر فیزیکی یا مکانیکی	شرایط آزمایش	نوع منحنی توزیع آماری	مقدار P-value
وزن واحد حجم	خشک	نرمال	>۰/۱۵
تخلخل	-	لوگ نرمال	۰/۰۶۶
جذب آب	-	لوگ نرمال	۰/۱۰۲
سختی واجهشی چکش اشمیت	خشک	نرمال	>۰/۱۵
سرعت موج فشاری	خشک	نرمال	>۰/۱۵
مقاومت فشاری تک محوری	خشک	نرمال	>۰/۱۵
مقاومت کششی برزیلی	خشک	نرمال	>۰/۱۵
مدول الاستیسیته	خشک	لوگ نرمال	>۰/۱۵

واجهشی چکش اشمیت برخوردار است و تعیین این ویژگی‌ها نیاز به تهیه نمونه با شکل هندسی منظم ندارد و با هزینه کم و به سادگی قابل اندازه‌گیری هستند، این آزمایش‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری باشند که در آن باید از نمونه‌های استوانه‌ای استفاده کرد.

در این مطالعه، روابط مختلفی برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از شاخص‌های فیزیکی و مکانیکی پیشنهاد شده است. برای ارزیابی کارایی هر معادله رگرسیون، ضریب تعیین (R^2)، واریانس اختصاصی (VAF) (رابطه ۱)، انحراف معیار لگاریتمی (β) (رابطه ۲)، جذر متوسط مربع خطاها (RMSE) (رابطه ۳) و خطای متوسط مطلق (MAE) (رابطه ۴) محاسبه شده است. انحراف معیار لگاریتمی (β) و جذر متوسط مربع خطاها (RMSE) بارها برای تخمین اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله مدل و مقادیر واقعی مشاهده شده استفاده شده است. خطای مطلق متوسط (MAE) کمیتی است که نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌ها تا چه حد به خروجی نهایی نزدیک است.

انجام دقیق آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های مکانیکی به خصوص تعیین مقاومت فشاری تک محوری در سنگ‌های رادیولاریتی بسیار مشکل بوده و مستلزم آماده‌سازی دقیق نمونه و در اختیار داشتن دستگاه‌های گران و حساس است. علاوه بر آن، نتایج حاصل وابستگی شدیدی به ابعاد نمونه، نحوه بارگذاری، خطاهای انسانی، عوامل خارجی و غیره دارد. روابط بین کلیه خواص به دست آمده در آزمایشگاه با یکدیگر از روش‌های رگرسیون ساده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بدین منظور علاوه بر معادله خطی، معادلات توانی، نمایی و لگاریتمی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بر حسب بهترین حالت برازش در شکل ۸ و جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از آزمون‌های سرعت سیر موج فشاری، وزن واحد حجم، تخلخل و سختی واجهشی چکش اشمیت، بیشترین همبستگی را با مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کشش برزیلی دارند، به طوری که برای تخمین مقاومت سنگ می‌توان از نتایج این آزمایش‌ها استفاده کرد.

بر اساس نتایج به دست آمده مقاومت فشاری تک‌محوری از همبستگی مناسبی با وزن واحد حجم، تخلخل و سختی



شکل ۸. رابطه بین مقاومت کششی با؛ الف) وزن واحد حجم، ب) تخلخل، پ) سرعت سیر موج فشاری، ت) سختی واجهشی چکش اشمیت و رابطه بین مقاومت فشاری با؛ الف) وزن واحد حجم، ب) تخلخل، پ) سرعت سیر موج فشاری، ت) سختی واجهشی چکش اشمیت.

جدول ۴. روابط دو متغیره بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی.

متغیرها	RMSE	MAE	VAF	β	R ²	معادله رگرسیون
جذب آب - تخلخل	۰/۰۹۵	۰/۰۶۰	۰/۹۱۵	۰/۰۱۶	۰/۹۴۵	Log Iv (%) = 11.3171 (Log n) ² + 25.5557 n + 15.1238
وزن واحد حجم - سختی واجهشی اشمیت	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۹۲۰	۰/۰۰۱	۰/۹۲۶	$\gamma_d (gr/cm^3) = 0.0021 R + 2.0773$
سرعت موج فشاری - وزن واحد حجم	۴۱/۴۲۰	۳۶/۳۱۹	۰/۹۲۳	۰/۰۱۱	۰/۹۲۵	Vp(m/s) = -5379 γ_d^2 + 2366 γ_d - 2597
مقاومت کششی - وزن واحد حجم	۱/۹۷۳	۱/۶۳۰	۰/۹۲۶	۰/۱۳۷	۰/۹۲۹	UTS (MPa) = 928.744 γ_d - 2002.14
مقاومت فشاری تک محوری - وزن واحد حجم	۲۰/۷۸۲	۱۴/۶۴۱	۰/۹۳۲	۰/۱۰۹	۰/۹۱۶	UCS (MPa) = 9504.41 γ_d - 20446.4
تخلخل - سختی واجهشی اشمیت	۰/۲۰۲	۰/۱۵۴	۰/۸۸۰	۰/۰۱۷	۰/۹۱۰	Log n (%) = 0.0004 R ² - 0.0489 R + 2.4077
تخلخل - سرعت موج فشاری	۰/۲۳۲	۰/۱۵۲	۰/۸۴۸	۰/۰۱۹	۰/۸۸۵	Log n (%) = 0.0000001 Vp ² - 0.0012 Vp + 3.5482
مقاومت کششی - تخلخل	۱/۶۱۷	۱/۳۲۳	۰/۹۱۳	۰/۱۰۰	۰/۹۴۴	UTS (MPa) = 1876.77 (Log n) ² - 4361.78 n + 2538.60
مقاومت فشاری تک محوری - تخلخل	۱۵/۸۷۲	۱۳/۴۹۷	۰/۹۱۵	۰/۰۷۷	۰/۹۵۴	UCS (MPa) = 21301.9 (Log n) ² - 49208.2 n + 28512.7
جذب آب - سختی واجهشی اشمیت	۰/۰۹۵	۰/۰۶۰	۰/۹۱۵	۰/۰۱۶	۰/۹۲۲	Log Iv = 0.0071 R + 0.3988
جذب آب - سرعت موج فشاری	۰/۱۲۷	۰/۰۷۲	۰/۹۳۹	۰/۰۲۲	۰/۸۵۳	Log Iv = 0.0000002 Vp ² - 0.0010 Vp + 2.3417
مقاومت کششی - سختی واجهشی اشمیت	۱/۷۱۳	۱/۳۴۷	۰/۹۳۱	۰/۱۰۸	۰/۹۴۰	UTS (MPa) = 2.0176 R - 76.8066
مدول الاستیسیته - سختی واجهشی اشمیت	۱/۱۲۸	۱/۷۳۵	۰/۸۸۷	۰/۱۰۲	۰/۹۲۲	Log E ₅₀ (GPa) = 0.0442 R - 0.6602
مقاومت فشاری تک محوری - سختی واجهشی اشمیت	۱۲/۲۹۵	۹/۱۴۹	۰/۹۷۴	۰/۰۵۴	۰/۹۷۱	UCS (MPa) = 21.1048 R - 765.176
مقاومت کششی - سرعت موج فشاری	۱/۷۸۹	۱/۶۶۵	۰/۹۳۹	۰/۱۰۳	۰/۹۳۵	UTS (MPa) = 0.0411 Vp - 130.540
مقاومت فشاری تک محوری - سرعت موج فشاری	۱۷/۶۵۰	۱۴/۴۸۶	۰/۹۰۲	۰/۰۹۱	۰/۹۴۰	UCS (MPa) = 0.4243 Vp - 1307.77

برای VAF و R2 برابر با یک و برای β ، MAE و RMSE برابر با صفر است. مقادیر به دست آمده برای دو شاخص VAF و R2 بین صفر و یک در نوسان است، بنابراین هر چه این مقادیر به سمت یک میل کنند، مدل پیش‌بینی از کارایی بالاتری برخوردار است. در مقابل، هرچه ارقام به دست آمده برای شاخص‌های MAE و RMSE کمتر باشد، خطای مدل پیش‌بینی کمتر خواهد بود. با توجه به شاخص‌های به دست آمده برای روابط ارائه شده در جدول ۴، پیش‌بینی‌های حاصل دارای تطابق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی و کمترین میزان خطا برای برآورد خصوصیات شاخص سنگ هستند. بر این اساس سختی واجهشی چکش اشمیت به علت تطابق بالاتر و مقدار خطای پایین‌تر، بهترین پارامتر برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری رادیولاریت‌ها می‌باشد.

از آنجا که رگرسیون ساده یک نتیجه نسبی و تقریبی ارائه می‌دهد، لذا در این تحقیق روش‌های تخمین از طریق آنالیز

$$VAF = \left(1 - \left(\frac{\text{var}(A_{imeas} - A_{ipred})}{\text{var}(A_{imeas})} \right) \right) \quad (۱)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{A_{imeas}}{A_{ipred}} \right) \right]^2} \quad (۲)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_{imeas} - A_{ipred}| \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_{imeas} - A_{ipred})^2} \quad (۴)$$

در این روابط Aimeas، i مین جز محاسبه شده و Aipred، i امین جز پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌ها است. جداول (۴و۵) همبستگی بین نتایج حاصل از رگرسیون‌ها را نشان می‌دهد.

از لحاظ نظری، نمایه‌های پیش‌بینی برتر برای مدل‌های آماری

(MAE) برای هر کدام از رابطه ها محاسبه شده است. نتایج به دست آمده از جدول ۵ بیانگر وجود روابط قابل قبول بین متغیرهای مستقل و با مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها است. بیشترین تطابق به ازای دو متغیر مستقل سرعت موج فشاری و سختی واجهشی اشمیت به دست آمده است. در حالی که کمترین میزان خطای برآورد به متغیرهای مستقل وزن واحد حجم و تخلخل تعلق می‌گیرد.

چندمتغیره مورد بررسی قرار گرفته است. این آنالیز با استفاده از دو متغیر مستقل و با تعویض متغیرها مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۵ روابط به دست آمده در بهترین حالت برازش، ارائه شده است. همانند روابط دو متغیره، برای ارزیابی کارایی معادله‌های چندمتغیره، ضریب تعیین (R^2)، واریانس اختصاصی (VAF)، انحراف معیار لگاریتمی (β)، جذر متوسط مربع خطاها (RMSE) و خطای متوسط مطلق

جدول ۵. روابط چندمتغیره بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی با مقاومت فشاری تک‌محوری.

معادله رگرسیون	R^2	B	VAF	MAE	RMSE	متغیرهای مستقل
$UCS (MPa) = -9557.65 + 4070.5 \gamma_d + 0.26Vp$	۰/۹۶	۰/۰۹۸	۰/۹۱۵	۱۴/۸۶۸	۱۷/۲۵۶	وزن واحد حجم - سرعت موج فشاری
$UCS (MPa) = -13033.11 + 6311.7 \gamma_d - 38.9n$	۰/۹۴	۰/۰۶۷	۰/۹۵۳	۱۳/۳۴۳	۱۶/۰۰۳	وزن واحد حجم - تخلخل
$UCS (MPa) = -715.8 + 0.34Vp - 22.9n$	۰/۹۴	۰/۰۸۹	۰/۹۱۱	۱۷/۱۶۰	۱۹/۸۲۶	سرعت موج فشاری - تخلخل
$UCS (MPa) = -926.1 + 0.13Vp + 14R$	۰/۹۶	۰/۱۲۶	۰/۹۷۱	۲۵/۱۹۳	۲۷/۶۷۰	سرعت موج فشاری - سختی واجهشی اشمیت

توزیع آماری داده‌ها مشخص شده و سپس اقدام به برقراری رابطه تجربی نمود.

- بیشترین توزیع نرمال داده‌های به دست آمده مربوط به پارامترهای مکانیکی مانند مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و سرعت موج فشاری می‌باشد.
- بیشترین توزیع لوگ نرمال داده‌های به دست آمده مربوط به پارامترهای فیزیکی مانند جذب آب و تخلخل می‌باشد.
- نتایج حاصل از آزمون‌های سرعت سیر موج فشاری، وزن واحد حجم، تخلخل و سختی واجهشی چکش اشمیت، بیشترین همبستگی را با مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی دارند.
- استفاده از روش‌های رگرسیون چندمتغیره منجر به تخمین بسیار بهتری از مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود، در این حالت بهترین رابطه چند متغیره برازش شده برای نمونه‌ها، معادله درجه دوم با دو متغیر مستقل است.

در مجموع، با توجه به نتایج و برآورد کارایی روابط ارائه شده بر پایه رگرسیون‌های دو و چندمتغیره، مقادیر برآورد شده برای مقاومت فشاری تک‌محوری از کارایی قابل قبولی برخوردار هستند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش متغیرهای مستقل از یک متغیر به دو متغیر، دقت در انجام پیش‌بینی‌ها افزایش و خطای آنها کاهش می‌یابد. این در حالی است که پارامتر سختی واجهشی چکش اشمیت در روابط دو متغیره و در روابط چند متغیره همراه با سرعت موج فشاری دارای بیشترین دقت برای برآورد مقاومت فشاری تک‌محوری است.

۵. نتیجه‌گیری

- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نشان‌دهنده ماهیت شکننده رادیولاریت‌های چرتی کرمانشاه می‌باشد.
- برای مشخص شدن نوع رابطه تجربی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مختلف سنگ‌ها، لازم است ابتدا

- با توجه به میزان اختلاف کم بین مقاومت فشاری تک‌محوری تخمینی و اندازه‌گیری شده در اغلب نمونه‌ها و ضرایب تعیین محاسبه شده، مدل‌های به دست آمده در این تحقیق از کارایی قابل قبولی در تخمین غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری برخوردار هستند.
- مطالعه انجام شده ابزار پیش‌بینی قابل قبولی را برای محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوری رادیولاریت‌ها ارائه می‌دهد. به دلیل کارایی پیش‌بینی خوب، این مدل‌ها می‌توانند برای ارزیابی مهندسی مقدماتی مورد استفاده قرار گیرند.

منابع

- آقاملایی، ا.، لشگری پور، غ.، غفوری، م.، ۱۳۹۲. بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های مارنی سازند قرمز بالایی در محل ساختگاه سد صفا، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد هفتم، شماره ۲، پاییز و زمستان، ۱۷۶۲-۱۷۴۳.
- فهیمی فر، ا.، سروش، ح.، ۱۳۸۰. آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها. جلد اول: آزمون‌های آزمایشگاهی، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک. چاپ اول. تهران. ۷۱۹ ص.
- قبادی، م. ح.، قربانی صابر، ا.، محسنی، ح.، ارومیه‌ای، ع.، ۱۳۹۳. مطالعه خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ آهک سازند ایلام- سروک در شهرستان خرم‌آباد، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، دوره ۸، شماره ۴، زمستان، ۲۴۸۶-۲۴۶۳.
- قبادی، م. ح.، محسنی، ح.، رسولی فرح، م. ر.، ۱۳۸۸. مطالعه خصوصیات زمین‌شناسی سنگ آهک سازند آسماری در شمال شرق مسجد سلیمان، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد دوم، شماره ۱ و ۲، ۸-۱.
- قبادی، م. ح.، محمدیان، م.، محسنی، ح.، کرمی، ر.، ۱۳۹۲. مطالعه خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سازند گچساران در منطقه رامهرمز- مخزن سد جره. مجله زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد ششم، شماره ۳ و ۴، پاییز و زمستان، ۱۶-۱.
- کریمی باوندپور، ع.، ۱۳۷۸. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کرمانشاه. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- کیانپور، م.، سیاری، م.، ارومیه‌ای، ع.، ۱۳۹۰. برآورد مقاومت تراکمی تک‌محوری و مدول تغییر شکل پذیری شیل‌های سازند شمشک با استفاده از الگوریتم منطق فازی، مجله علوم زمین، بهار، سال بیست و یکم، شماره ۸۳، ۱۱۰-۱۰۳.
- محل، م. و بیرالوند، م.، ۱۳۸۷. الگوی چین خوردگی در رادیولاریت‌های کرمانشاه و اهمیت آن در زمین‌ساخت برخوردی در شمال باختر ایران. فصل‌نامه علوم زمین، ۷۵، ۷۵-۸۲.
- محل، م. و سهندی، م. ر.، ۱۳۷۸. تکامل زمین‌ساختی پهنه سندج - سیرجان در نیمه شمال باختر و معرفی زیرپهنه‌های جدید در آن. فصل‌نامه علوم زمین، ۳۱-۳۲، ۴۹-۲۸.
- ASTM., 2004. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens, D 3967-08.
- Bell, F. G., 1983. Fundamentals of Engineering Geology, Butterwoths. UK, 647P.
- Bruno, G., Vessia. G., Bobbo, L., 2013. Statistical method for assessing the uniaxial compressive strength of carbonate rock by Schmidt hammer tests performed on core samples, Rock Mechanics and Rock Engineering, 46: 199-206.
- Deer, D.U., and Miller, R.P., 1966. Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock. Technical Report Number . AFWL-Tr-65-116, Air Force Weapon Laboratory, New Mexico, 308 P.
- Heidari, M., Momeni A.A., Rafiei, B., Khodabakhsh, S., Torabi-Kaveh, M., 2013. Relationship between petrographic characteristics and the engineering properties of Jurassic sandstones, Hamedan, Iran, Rock Mechanics and Rock Engineering, 46: 1091-1101.
- ISRM., 1981. In: Brown, E.T. (Eds), Rock Characterization Testing and Monitoring-ISRM Suggested Methods. Pergamon, New York, 211 p.
- Kolmogorov, A.N., 1933. On the empirical determination of a distribution function. Giornale 1st. Ital. Attuari, 4: 83-91.
- Shalabi, F.I., Cording, E.J., Al-Hattamleh, O.H., 2007. Estimation of rock engineering properties using hardness tests, Engineering Geology, 90: 138-147.

- Smirnov, N.V., 1939. On the estimation of the discrepancy between empirical curves of distribution for two independent samples. *Bulletin of Moscow University*, 2: 3–16.
- Torabi-Kaveh, M., Naseri, F., Saneie, S., Sarshari, B., 2014. Application of artificial neural networks and multivariate statistics to predict UCS and E using physical properties of Asmari limestones, *Arabian Journal of Geosciences*, 8: 2889–2897.