تأثیر چگالی و تخلخل بر میزان دقت روابط تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته سنگ‌آهک از سختی واجهشی اشمیت

امین جمشیدی

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

نویسنده مسئول: jamshidi.am@lu.ac.ir *

دریافت: ۹۶/۱۰/۱۵ پذیرش: ۹۷/۳/۳۰

چکیده

در تحقیق حاضر، تاثیر چگالی و تخلخل بر میزان دقت روابط تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته از سختی واجهشی اشمیت بررسی شده است. برای رسیدن به این اهداف، ۱۵ نمونه سنگ‌آهک تهیه و ویژگی‌های فیزیکی (چگالی و تخلخل) و مکانیکی (مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و سختی واجهشی اشمیت) آن‌ها تعیین شده است. در ادامه آنالیزهای رگرسیونی ساده و چند متغیره بر اساس سختی واجهشی اشمیت، چگالی و تخلخل برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته ارائه شده است. روابط ارائه شده بر اساس آزمون‌های آماری مورد بررسی قرار گرفتند که نشان دهنده صحت و دقت مناسب آن‌ها می‌باشد. مقایسه روابط ساده و چند متغیره نشان می‌دهد چگالی و تخلخل نقش مهمی در افزایش میزان دقت تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته از سختی واجهشی اشمیت دارند. هم‌چنین نتایج دلالت بر این دارد هنگامی که سختی واجهشی اشمیت و چگالی به عنوان پارامتر ورودی رابطه رگرسیون استفاده می‌شوند، مقدار ضریب تعیین برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر با ۰/۸۸ و ۰/۸۳ هستند. در حالی که اگر سختی واجهشی اشمیت و تخلخل به عنوان پارامتر ورودی استفاده شوند، مقدار ضریب تعیین برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته به ترتیب برابر با ۰/۹۱ و ۰/۷۴ هستند.

واژه‌های کلیدی: تخلخل، چگالی، سختی واجهشی اشمیت، مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری تک محوری

۱- مقدمه

مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و مدول‌الاستیسته (E) از ویژگی‌های مهم مورد استفاده در طراحی‌های سازه‌های مهندسی مرتبط با سنگ هستند. این ویژگی‌ها نقش اساسی در طراحی و اجرای فعالیت‌های معدنکاری مانند طراحی و پایداری شیب دیواره‌های معدن، ترانشه‌ها، قابلیت حفاری، آتشباری و غیره دارند.

در مراحل مقدماتی اجرای یک پروژه ژئوتکنیکی استفاده از روش‌های غیر مخرب به دلیل ارزان، سریع و غیر مخرب بودن برای ارزیابی اولیه مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته مورد استقبال زیادی قرار گرفته‌اند. آزمایش سختی واجهشی اشمیت یکی از روش‌های متداول است که به دلیل مزیت‌های فوق کاربرد فراوانی در اکثر پروژه‌های ژئوتکنیکی مرتبط با سنگ برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته دارد (دیر و میلر، ۱۹۶۶؛ آفموث، ۱۹۷۳؛ سینگ و همکاران، ۱۹۸۳؛ قهرمان، ۲۰۰۱؛ ایلماز و سندیر، ۲۰۰۲؛ یاشار و اردوغان، ۲۰۰۴؛ کوبان اغلو و کلیک، ۲۰۰۸؛ کیلیک و تیمان، ۲۰۰۸ و برونو و همکاران، ۲۰۱۳). تاکنون تحقیقات زیادی در ارتباط با تخمین ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها به ویژه مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته با استفاده از سختی واجهشی اشمیت انجام شده است. در جدول (۱) تعدادی از مهم‌ترین روابط تجربی بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته با سختی واجهشی اشمیت ارائه شده است.

یاشار و اردوغان (۲۰۰۴) با مطالعه خصوصیات مهندسی انواع مختلفی از سنگ‌ها شامل سنگ‌آهک، ماسه‌سنگ، مرمر، بازالت یک رابطه توانی با ضریب همبستگی ۰/۸۹ بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سختی واجهشی چکش اشمیت مطابق معادله زیر دست یافتند:

$$UCS=4\times10^{-6}(H_R)^{4.2917} \quad (۱)$$

کیلیک و تیمن (۲۰۰۸) گسترده‌ای روی سه گروه اصلی سنگ‌ها یعنی آذرین، رسوبی و دگرگونی به منظور بررسی رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سختی واجهشی اشمیت انجام دادند. این محققین رابطه زیر را بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سختی واجهشی چکش اشمیت با ضریب تعیین ۰/۹۴ ارائه دادند:

$$UCS=0.0137H_R^{2.2721} \quad (۲)$$

کارگیل و شکور (۱۹۹۰) رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سختی واجهشی تعدادی سنگ کربناته را بررسی کردند. این محققین تاثیر چگالی را در این رابطه نیز ارزیابی کردند. بر اساس آنالیزهای صورت گرفته، این محققین یک اربطه خطی مطابق معادله زیر ار بدست آوردند:

$$UCS=1.8\times10^{-2}(H_R\times\rho)+2.9 \quad (۳)$$

که در آن UCS مقاومت فشاری تک‌محوری، H_R سختی واجهشی اشمیت و ρ چگالی سنگ می‌باشد.

رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سختی واجهشی اشمیت برای سنگ ژیپس توسط ایلماز و سندیر (۲۰۰۲) یک معادله نمایی با ضریب همبستگی ۰/۹۸را نشان داد:

$$UCS=e^{(0.818+0.059HR)} \quad (۴)$$

هم‌چنین تعدادی از محققین به بررسی رابطه بین مدول الاستیسیته و سختی واجهشی چکش اشمیت پرداخته‌اند. برای مثال ساچپازیس (۱۹۹۰)، ۳۳ نمونه سنگ کربناته را از دیدگاه خصوصیات مهندسی مورد مطالعه قرار دادند. این محقق با آنالیز نتایج، یک رابطه خطی بین مدول الاستیسیته و سختی واجهشی بدست آوردند. ضریب همبستگی رابطه حاصل برابر با ۰/۸۸ است. این رابطه به صورت زیر است:

$$E=1.94H_R-33.93 \quad (۵)$$

که در آن E مدول الاستیسیته و H_R سختی واجهشی چکش اشمیت است.

زو و همکاران (۱۹۹۰) رابطه بین مدول الاستیسیته و سختی واجهشی چکش اشمیت برای نمونه‌هایی از میکاشیست را مطالعه کرد. این محققین به یک رابطه نمایی با ضریب همبستگی ۰/۹۶ دست یافتند:

$$E=1.77e^{(0.07HR)} \quad (۶)$$

رابطه بین مدول‌الاستیسیته و سختی واجهشی چکش اشمیت برای سنگ ژیپس توسط ایلماز و سندیر (۲۰۰۲) بررسی شد. با انجام آنالیزهای رگرسیونی، این محققین رابطه نمایی زیر با ضریب همبستگی ۰/۹۱ را پیشنهاد دادند:

$$E=e^{(1.146+0.054HR)} \quad (۷)$$

به طور کلی روابطی کـه تـاکنون بـرای تخمـین مقاومـت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته از سختی واجهشی اشمیت ارائه شده‌اند به دو دسته تقسیم مـی‌شـوند: الـف- روابطی که فقط از سختی واجهشی اشمیت برای تخمـین استفاده شده است مانند روابط شماره ۲، ۴ و ب- روابطی که علاوه بر سختی واجهشی اشمیت از چگالی نیـز بـرای تخمین استفاده شده است ماننـد روابـط شـماره ۱، ۳، ۵ (جدول ۱).

با توجه به اینکه تخلخل یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی تأثیر گذار بر مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و سختی واجهشی اشمیت است (آیدین و باسو، ۲۰۰۵; تیریاکی، ۲۰۰۸; دیامانیس و همکاران، ۲۰۰۹) ولی تاکنون در روابط تجربی ارائه شده توسط محققین این ویژگی در اکثر موارد نادیده گرفته شده است (سینگ و همکاران، ۱۹۸۳؛ طغرل و ظریف، ۱۹۹۹ و کاز و همکاران، ۲۰۰۰). علاوه بر این، تاکنون در تحقیقات گذشته روابط آماری چند متغیره که به طور همزمان از چگالی، تخلخل و سختی واجهشی اشمیت برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدل الاستیسیته سنگ‌ها استفاده شود ارائه نشده است.

در تحقیق حاضر با تهیه ۱۵ نمونه سنگ‌آهک و انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مختلف دو هدف اصلی دنبال می‌شود. ابتدا تأثیر چگالی و تخلخل بر میزان دقت تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته از سختی واجهشی اشمیت مورد بررسی قرار می‌گیرد و در ادامه روابط چند متغیره برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته بر اساس چگالی، تخلخل و سختی واجهشی اشمیت ارائه خواهد شد.

جدول ۱. تعدادی از روابط تجربی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته از سختی چکش اشمیت

ضریب تعیین یا ضریب همبستگی	رابطه	شماره رابطه	نوع سنگ	منبع
NA	$UCS = 6.9\times10^{[1.348\log(H_R\times\rho)-1.325]}$	۱	۲۵ نوع سنگ با لیتولوژی‌های مختلف	آفموث (۱۹۷۳)
R=0.72	$UCS = 2\ H_R$	۲	۳۰ نوع سنگ رسوبی	سینگ و همکاران (۱۹۸۳)
R=0.78	$UCS = 6.97e^{0.014\ HR\times\rho}$	۳	۴۸ نوع سنگ مختف	قهرمان (۲۰۰۱)
R^2=0.65	$UCS = 6.59H_R - 212.63$	۴	بتن، سنگ آهک، ماسه سنگ	کوبان اغلو و کلیلک (۲۰۰۸)
NA	$E=6.9\times10^{[1.061\log(HR\times\rho)+1.86]}$	۵	۲۵ نوع سنگ با لیتولوژی‌های مختلف	آفموث (۱۹۷۳)

UCS:مقاومت فشاری تک‌محوری،E: مدول الاستیسیته، H_R:سختی چکش اشمیت،ρ: چگالی،R: ضریب همبستگی، R^2: ضریب تعیین، NA: موجود نمی‌باشد.

۲- مواد و روش پژوهش

برای انجام تحقیق حاضر، طی بازدید از سنگبری‌های استان لرستان، تعدادی بلوک از ۱۵ نمونه سنگ‌آهک تهیه شد و از آن‌ها نمونه‌ها و مغزه‌های لازم برای انجام آزمایش‌های پیش‌بینی شده تهیه گردید. شکل ۱ تعدادی از بلوک‌های تهیه شده را نشان می‌دهد.

در ادامه ویژگی‌های فیزیکی شامل چگالی، تخلخل و ویژگی‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و سختی واجهشی اشمیت نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (۱۹۸۱) و انجمن تست آمریکا (۲۰۰۵) تعیین شده است. سپس با استفاده از آنالیزهای رگرسیون روابط ساده و چند متغیره برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته از سختی واجهشی اشمیت، چگالی و تخلخل معرفی شده است. در پایان صحت‌سنجی روابط ارائه شده با استفاده از آزمون‌های آماری بررسی و مقایسه‌ای بین میزان دقت این روابط در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته با تاکید بر تاثیر چگالی و تخلخل صورت گرفته است.

شکل ۱. تعدادی از بلوک‌های تهیه شده برای آزمایش‌های پیش‌بینی شده

۳- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

برای هر یک از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی شامل چگالی، تخلخل، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته بر اساس استاندارد ۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و مقادیر میانگین هر یک از این ویژگی‌ها در جدول (۲) ارائه شده‌اند. علاوه بر این در طی آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول‌الاستیسیته مماسی نمونه‌ها نیز تعیین شد و نتایج آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

برای تعیین سختی اشمیت، از چکش نوع N با انرژی موثر ۲/۲۰۷ نیوتن متر روی بلوک‌های سنگی استفاده شده است. از هر سنگ آهک ۳ بلوک تهیه و روی هر کدام از آن‌ها مطابق استاندارد انجمن تست آمریکا (۲۰۰۵) ۱۰ ضربه در نقاط با فواصل ۳ سانتی‌متری اعمال شد. برای محاسبه عدد نهایی سختی واجهشی اشمیت از ۱۰ قرائت ثبت شده میانگین گرفته می‌شود. در ادامه قرائت‌هایی که به میزان ۷ واحد از میانگین اختلاف دارند حذف و از قرائت‌های باقی‌مانده دوباره میانگین گرفته می‌شود. این کار تا جایی ادامه پیدا

می‌کند که اختلاف هر قرائت با میانگین حاصل به کمتر از ۷ واحد برسد. در نهایت میانگین حاصل به عنوان عدد نهایی سختی واجهشی اشمیت در نظر گرفته می‌شود.

با توجه طبقه‌بندی آنون (۱۹۷۹) بر اساس چگالی و تخلخل، سنگ‌آهک ۸، ۱۲ و ۱۳ در رده سنگ‌های با چگالی بالا (۲/۷۵-۲/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و سایر نمونه‌ها دارای چگالی متوسط (۲/۵۵-۲/۲۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب) قرار می‌گیرند. بر اساس تخلخل، به جز سنگ‌آهک ۹ که در رده سنگ‌های با تخلخل خیلی پایین (<۱٪) قرار می‌گیرد سایر نمونه‌ها در رده سنگ‌های با تخلخل پایین (۵-۱) و متوسط (۱۵-۵) قرار دارند.

از جدول (۲) مشاهده می‌شود میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته نمونه‌ها به ترتیب بین ۴۷/۴ تا ۸۱/۲ مگاپاسکال و ۹/۱ تا ۱۶/۵ گیگاپاسکال تغییر می‌کند. با توجه به طبقه‌بندی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (۲۰۰۷) بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری، سنگ‌آهک ۹ در رده سنگ‌های با مقاومت پایین (۵۰-۲۵ مگاپاسکال) و سایر نمونه‌ها در رده سنگ‌های با مقاومت متوسط (۱۰۰-۵۰ مگاپاسکال) قرار می‌گیرند. هم‌چنین مقادیر سختی واجهشی اشمیت از حداقل ۳۷ برای سنگ‌آهک ۲ تا حداکثر ۵۰ برای سنگ‌آهک ۸ تغییر می‌کند.

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه

نام و کد سنگ	چگالی (g/cm^3)	تخلخل (٪)	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	سختی چکش اشمیت
سنگ آهک ۱	۲/۵۳	۳/۷	۷۱/۹	۱۴/۵	۴۸
سنگ آهک ۲	۲/۳۸	۵/۴	۵۲/۲	۹/۱	۳۷
سنگ آهک ۳	۲/۴۹	۲/۲	۷۳/۰	۱۵/۰	۴۶
سنگ آهک ۴	۲/۴۴	۴/۲	۶۵/۱	۹/۹	۴۰
سنگ آهک ۵	۲/۴۴	۳/۰	۷۳/۲	۱۲/۱	۴۳
سنگ آهک ۶	۲/۴۷	۳/۶	۶۶/۰	۱۲/۵	۴۶
سنگ آهک ۷	۲/۴۸	۵/۲	۶۰/۰	۱۱/۹	۳۹
سنگ آهک ۸	۲/۶۰	۲/۱	۷۹/۹	۱۶/۵	۵۰
سنگ آهک ۹	۲/۳۴	۶/۷	۴۷/۴	۹/۳	۳۶
سنگ آهک ۱۰	۲/۵۱	۴/۹	۶۵/۳	۱۲/۳	۳۸
سنگ آهک ۱۱	۲/۴۱	۵/۹	۵۷/۰	۱۱/۳	۴۰
سنگ آهک ۱۲	۲/۶۴	۱/۴	۸۱/۲	۱۵/۲	۴۸
سنگ آهک ۱۳	۲/۵۵	۱/۸	۷۶/۲	۱۲/۹	۴۴
سنگ آهک ۱۴	۲/۴۷	۴/۱	۶۹/۶	۱۰/۸	۴۵
سنگ آهک ۱۵	۲/۵۳	۰/۵	۷۷/۳	۱۴/۰	۴۹

۴- آنالیزهای رگرسیون برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته

۴-۱- آنالیز رگرسیون ساده برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته

در این بخش به بررسی رابطه مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته با سختی واجهشی اشمیت، با انجام آنالیزهای رگرسیون ساده پرداخته شده است. در این آنالیزها سعی شده که منحنی بر داده‌ها برازش شود که بیش‌ترین ضریب تعیین را داشته باشد. در شکل‌های (۲) و (۳) رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته با سختی واجهشی اشمیت نشان داده شده است. مطابق رابطه‌های (۸) و (۹)، به ترتیب روابط لگاریتمی و خطی بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته با سختی واجهشی اشمیت با ضرایب تعیین ۰/۷۸ و ۰/۷۲ وجود دارد.

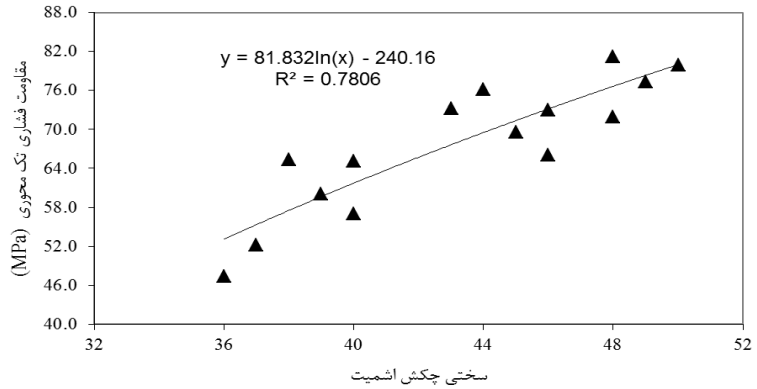
$$\mathbf{UCS} = 81.83 \ln(\mathbf{H_R}) - 240.1 \quad R^2 = 0.78 \qquad (۸)$$

$$\mathbf{E} = 0.407\,\mathbf{H_R} - 5.147 \quad R^2 = 0.72 \qquad (۹)$$

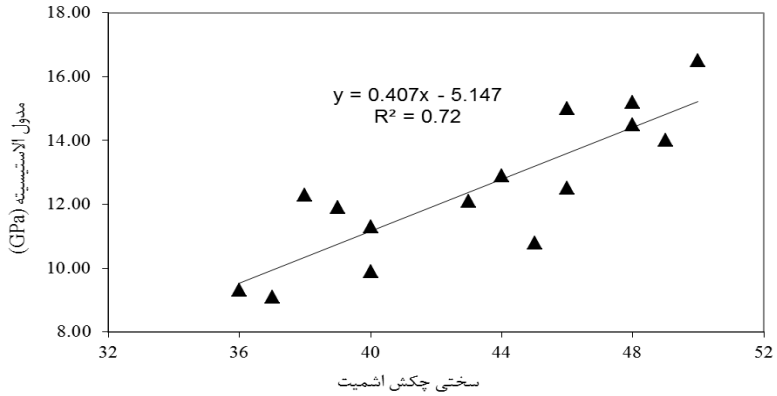
که در آن UCS مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب مگاپاسکال، E مدول‌الاستیسیته بر حسب گیگاپاسکال و H_R سختی واجهشی اشمیت نمونه‌ها می‌باشد.

روابط (۸) و (۹) نشان می‌دهند یک رابطه لگاریتمی با ضریب تعیین ۰/۷۸ بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سختی واجهشی اشمیت و از طرف دیگر یک رابطه خطی بین مدول‌الاستیسیته و سختی واجهشی اشمیت با ضریب تعیین ۰/۷۲ حاصل شده است.

با توجه به روابط فوق و ضرایب تعیین به دست آمده می‌توان گفت همبستگی بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته با سختی چکش تا حدودی قابل قبول است و می‌توان با احتیاط از این روابط برای تخمین و ارزیابی اولیه مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌های مشابه از لحاظ منشا، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی استفاده کرد.



شکل ۲. رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری و سختی چکش‌اشمیت



شکل ۳. رابطه بین مدول‌الاستیسیته و سختی چکش‌اشمیت

۴-۲- آنالیزهای رگرسیون چندمتغیره برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته

در این بخش از تحقیق، از آنالیزهای رگرسیون چندمتغیره برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌ها با استفاده از سختی واجهشی اشمیت، چگالی و تخلخل استفاده شده است. در این آنالیزها، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته به عنوان پارامتر وابسته و سختی واجهشی اشمیت، چگالی و تخلخل به عنوان پارامتر مستقل در نظر گرفته شده‌اند. فرم کلی معادله‌های رگرسیون به صورت زیر است:

$$\mathbf{M} = \alpha_0 + \alpha_1 \mathbf{H_R} + \alpha_2 \boldsymbol{\rho} \qquad (۱۰)$$

$$\mathbf{M} = \alpha_0 + \alpha_1 \mathbf{H_R} + \alpha_2 \mathbf{n} \qquad (۱۱)$$

که در آن‌ها M مقاومت فشاری تک‌محوری یا مدول الاستیسیته، H_R سختی واجهشی اشمیت، ρ چگالی، n تخلخل، α_0 یک ثابت و α_1 و α_2 ضرایب رگرسیون هستند. با استفاده از نرم‌افزار SPSS® v.19 code داده‌های حاصل از جدول (۲) تجزیه و تحلیل و ۴ رابطه رگرسیون برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته به صورت زیر ارائه شده است:

$$\mathbf{UCS} = -140.078 + 1.036\mathbf{H_R} + 65.573\boldsymbol{\rho} \quad R^2 = 0.88 \quad (۱۲)$$

$$\mathbf{UCS} = 60.447 + 0.516\mathbf{H_R} - 4.135\mathbf{n} \quad R^2 = 0.91 \quad (۱۳)$$

$$\mathbf{E} = -33.093 + 0.214\mathbf{H_R} + 14.606\boldsymbol{\rho} \quad R^2 = 0.83 \quad (۱۴)$$

$$\mathbf{E} = 0.420 + 0.305\mathbf{H_R} - 0.307\mathbf{n} \quad R^2 = 0.74 \quad (۱۵)$$

که در آن‌ها UCS مقاومت فشاری تک‌محوری، E مدول الاستیسیته، H_R مقدار سختی واجهشی اشمیت، ρ چگالی و n تخلخل نمونه‌ها هستند.

از این رابطه‌ها مشاهده می‌شود هنگامی که سختی واجهشی اشمیت و چگالی به عنوان پارامتر ورودی رابطه رگرسیون استفاده می‌شوند (رابطه‌های ۱۲ و ۱۴) مقدار ضریب تعیین برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته به ترتیب برابر با ۰/۸۸ و ۰/۸۳ هستند. در حالی که اگر سختی واجهشی اشمیت و تخلخل به عنوان پارامتر ورودی استفاده شوند (رابطه‌های ۱۳ و ۱۵) مقادیر ضریب تعیین برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته به ترتیب برابر با ۰/۹۱ و ۰/۷۴ هستند.

در واقع هنگامی که تخلخل به عنوان پارامتر ورودی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده می‌شود ضریب تعیین بالاتری نسبت به حالتی که چگالی مورد استفاده قرار می‌گیرد دارد. این موضوع نشان‌دهنده بیش‌تر بودن تاثیر تخلخل نسبت به چگالی در دقت تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری است. در رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌شود وقتی که چگالی و سختی واجهشی اشمیت برای تخمین مدول‌الاستیسیته استفاده می‌شوند، ضریب تعیین برابر ۰/۸۳است و در صورتی که تخلخل و سختی واجهشی اشمیت استفاده شوند مقدار ضریب تعیین برابر با ۰/۷۴ خواهد بود. این موضوع نشان‌دهنده بیش‌تر بودن تاثیر چگالی نسبت به تخلخل در میزان دقت تخمین مدول‌الاستیسیته از چکش‌اشمیت می‌باشند. علاوه بر این رابطه‌های (۱۲) تا (۱۵) نشان می‌دهد که ضرایب تعیین برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری بیش‌تر از مدول‌الاستیسیته است.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- صحت‌سنجی روابط ارائه شده در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته

به منظور صحت‌سنجی رابطه‌های (۱۲) تا (۱۵) به دست آمده از آنالیزهای رگرسیون چند متغیره، از مفهوم سطح معنی‌داری (*Sig.*) و آزمون F فیشر (F-ratio) استفاده شده است.

تمامی رابطه‌های آماری به یک مقدار *P-value* یا مقدار احتمال که در بعضی مواقع تحت عنوان سطح معنی‌داری یا .Sig معرفی می‌شود ختم می‌شوند. سطح معنی‌داری اساس پذیرش معنی‌داری آماری نتایج می‌باشد بدین صورت که زمانی به احتمال پائین شانسی بودن نتایج پی می‌بریم که مقدار .*Sig* از مقدار مورد توافق جامع علمی یعنی ۰/۰۵ کوچک‌تر باشد (در این تحقیق سطح خطای ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است، α=۰/۰۵). تنها در صورتی که مقدار .Sig به دست آمده از ۰/۰۵ کوچک‌تر باشد، می‌توانیم به ارائه یک تفسیر علمی از نتایج مبادرت نمائیم. پس زمانی که مقدار .Sig از ۰/۰۵ بزرگ‌تر باشد، آنگاه باید گفت که نتایج در اثر شانس حاصل شده‌اند و لذا نمی‌توان تفسیر علمی از نتایج ارائه داد (حبیب‌پور و صفری، ۱۳۸۸). همانطور که از جدول (۳) مشاهده می‌شود تمامی .Sig محاسبه شده کمتر از ۰/۰۵ (α=۰/۰۵) می‌باشند که نشان‌دهنده معنی‌دار بودن رابطه‌های ارائه شده برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته از لحاظ آماری است.

جدول ۳. نتایج آزمون‌های آماری برای صحت‌سنجی روابط ارائه شده

شماره رابطه	رابطه	ضریب تعیین (R^2)	F-ratio محاسبه شده	F-ratio جدول	*Sig.*
۱۲	$\mathbf{UCS}= -140.078 + 1.036\mathbf{H_R} + 65.573\boldsymbol{\rho}$	۰/۸۸	۴۲/۸۹۰	۳/۸۹	۰/۰۰۰
۱۳	$\mathbf{UCS} = 60.447 + 0.516\,\mathbf{H_R} - 4.135\mathbf{n}$	۰/۹۱	۵۸/۱۸	۳/۸۹	۰/۰۰۰
۱۴	$\mathbf{E}= -33.093 + 0.214\mathbf{H_R} + 14.606\boldsymbol{\rho}$	۰/۸۳	۲۹/۳۵۹	۳/۸۹	۰/۰۰۰
۱۵	$\mathbf{E} = 0.420 + 0.305\,\mathbf{H_R} - 0.307\mathbf{n}$	۰/۷۴	۱۶/۷۱	۳/۸۹	۰/۰۰۰

UCS: مقاومت فشاری تک‌محوری، E: مدول‌الاستیسیته، H_R:سختی چکش‌اشمیت، ρ: چگالی، n: تخلخل، R^2: ضریب تعیین، *Sig.*: سطح معنی‌داری

یکی از مهم‌ترین آزمون‌های آماری برای ارزیابی میزان برازش یک مدل آزمون F فیشر است. این آزمون نشان می‌دهد که آیا متغیرهای مستقل قادرند به خوبی تغییرات متغیر وابسته را تبیین کنند یا خیر. اگر F به دست آمده از رابطه رگرسیون بیش‌تر از F موجود در جدول‌های آماری باشد نشان‌دهنده کارایی و مناسب بودن رابطه رگرسیون در تخمین متغیر وابسته است. لازم به ذکر است F موجود در جدول‌های آماری برای درجه‌های آزادی مختلف متغیرها در کتاب‌های آماری محاسبه و به صورت جدول‌هایی ارائه شده است (مهدوی و طاهرخانی، ۱۳۸۳). همانطور که از جدول (۳) مشاهده می‌شود مقدار F به دست آمده از هر ۴ رابطه به مراتب بزرگ‌تر از F موجود در جدول‌های آماری (با درجه آزادی رگرسیون ۲ و درجه آزادی باقی‌مانده ۱۲) می‌باشد. این موضوع نشان‌دهنده همبستگی و صحت مناسب بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته با سختی واجهشی اشمیت، چگالی و تخلخل می‌باشد.

جدول ۴. مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته تخمین زده شده از روابط شماره‌های ۱ تا ۶

نام و کد سنگ	مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)				مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)			
	مقدار واقعی اندازه‌گیری شده	تخمین زده شده از رابطه (۸)	تخمین زده شده از رابطه (۱۲)	تخمین زده شده از رابطه (۱۳)	مقدار واقعی اندازه‌گیری شده	تخمین زده شده از رابطه (۹)	تخمین زده شده از رابطه (۱۴)	تخمین زده شده از رابطه (۱۵)
سنگ آهک ۱	۷۱/۹	۷۶/۷	۷۵/۵	۷۲/۸	۱۴/۵	۱۴/۴	۱۴/۱	۱۴/۱
سنگ آهک ۲	۵۲/۲	۵۵/۴	۵۴/۳	۵۷/۲	۹/۱	۹/۹	۹/۶	۱۰/۰
سنگ آهک ۳	۷۳/۰	۷۳/۲	۷۰/۹	۶۹/۴	۱۵/۰	۱۳/۶	۱۳/۱	۱۳/۴
سنگ آهک ۴	۶۵/۱	۶۱/۸	۶۱/۴	۶۳/۷	۹/۹	۱۱/۱	۱۱/۱	۱۱/۳
سنگ آهک ۵	۷۳/۲	۷.۶۷	۶۴/۵	۷۴/۰	۱۲/۱	۱۲/۴	۱۱/۷	۱۲/۹
سنگ آهک ۶	۶۶/۰	۷۳/۲	۶۹/۵	۶۹/۱	۱۲/۵	۱۳/۶	۱۲/۸	۱۳/۳
سنگ آهک ۷	۶۰/۰	۵۹/۷	۶۲/۹	۵۹/۱	۱۱/۹	۱۰/۷	۱۱/۵	۱۰/۷
سنگ آهک ۸	۷۹/۹	۸۰/۰	۸۲/۲	۸۴/۰	۱۶/۵	۱۵/۲	۱۵/۶	۱۵/۵
سنگ آهک ۹	۴۷/۴	۵۳/۱	۵۰/۷	۵۱/۳	۹/۳	۹/۵	۸/۸	۹/۳
سنگ آهک ۱۰	۶۵/۳	۵۷/۶	۶۳/۹	۵۹/۷	۱۲/۳	۱۰/۳	۱۱/۷	۱۰/۵
سنگ آهک ۱۱	۵۷/۰	۶۱/۸	۵۹/۴	۵۶/۹	۱۱/۳	۱۱/۱	۱۰/۷	۱۰/۸
سنگ آهک ۱۲	۸۱/۲	۷۶/۷	۸۲/۸	۷۹/۵	۱۵/۲	۱۴/۴	۱۵/۷	۱۴/۶
سنگ آهک ۱۳	۷۶/۲	۶۹/۶	۷۲/۷	۷۴/۲	۱۲/۹	۱۲/۸	۱۳/۶	۱۳/۲
سنگ آهک ۱۴	۶۹/۶	۷۱/۴	۶۸/۵	۶۶/۶	۱۰/۸	۱۳/۲	۱۲/۶	۱۲/۹
سنگ آهک ۱۵	۷۷/۳	۷۸/۴	۷۶/۶	۷۸/۴	۱۴/۰	۱۴/۸	۱۴/۳	۱۴/۸

۵-۲- مقایسه میزان دقت روابط ارائه شده در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته

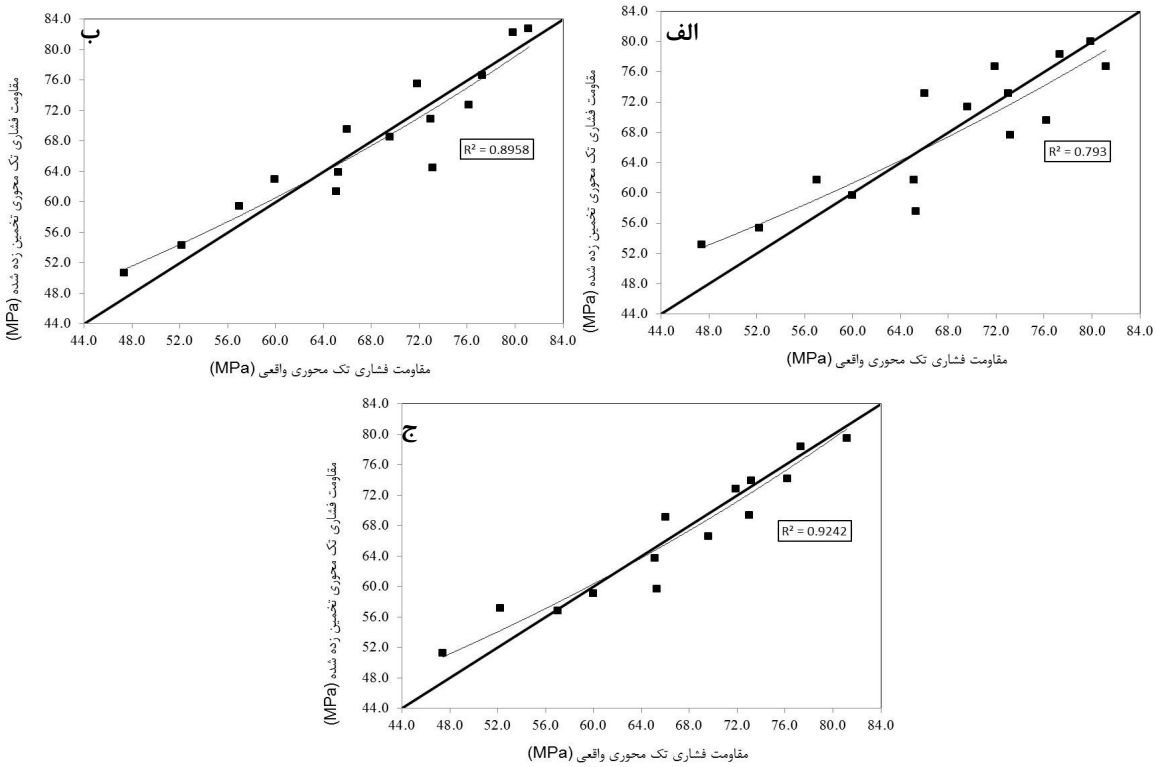
برای مقایسه میزان دقت روابط ارائه شده بر اساس آنالیزهای دو و چند متغیره، مقادیر تخمین زده شده مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته از روابط (۸)، (۹) و (۱۲ تا ۱۵) تعیین و با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده مقایسه و هم‌چنین ضرایب تعیین بین آن‌ها تعیین شده‌اند. در جدول (۴) مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته تخمین زده شده از روابط شماره‌های روابط (۸)، (۹) و (۱۲ تا ۱۵) ارائه شده است.

همانطور که از (شکل ۴- الف) مشاهده می‌شود هنگامی که تنها از سختی واجهشی اشمیت برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده می‌شود ضریب تعیین بین مقدار واقعی مقاومت فشاری تک‌محوری و تخمین زده شده برابر با ۰/۷۹ می‌باشد. در صورتی که اگر سختی واجهشی اشمیت و چگالی به عنوان پارامتر ورودی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده شوند مقدار ضریب تعیین با افزایش قابل‌توجهی برابر با ۰/۹۰و هنگامی که سختی واجهشی اشمیت و تخلخل استفاده شوند ضریب تعیین ۰/۹۱خواهد بود (شکل ۴- ب و۴-ج).

مقدار ضریب تعیین بین مقدار واقعی مدول‌الاستیسیته و تخمین زده شده هنگامی که صرفا از سختی واجهشی اشمیت استفاده می‌شود برابر با ۰/۷۲ می‌باشد (شکل ۵-

الف). این در صورتی است که مقدار ضریب تعیین برای تخلخل به عنوان پارامترهای ورودی برای تخمین مدول الاستیسیته استفاده می‌شوند مقادیر ضریب تعیین به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۷۴ می‌باشد (شکل ۵-ب و ج).

بر اساس این نتایج مشاهده می‌شود آنالیزهای رگرسیون چند متغیره نسبت به آنالیزهای ساده مقادیر ضریب تعیین بالاتری دارند. بنابرین دقت بیش‌تری در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته دارند. افزایش مقدار ضریب تعیین نشان‌دهنده تاثیر مثبت چگالی و تخلخل در دقت تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته می‌باشد. هنگامی که حالاتی که سختی واجهشی اشمیت همراه با چگالی و تخلخل به عنوان پارامتر ورودی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده می‌شود ضریب تعیین بالاتری نسبت به حالتی که چگالی مورد استفاده قرار می‌گیرد، دارد. این نشان‌دهنده بیش‌تر بودن تاثیر تخلخل نسبت به چگالی در دقت تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری است. نظر با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود که دامنه تغییرات تخلخل (۰/۵ تا ۶/۷) کوچک‌تر از دامنه تغییرات چگالی (بین ۲/۳۸ و ۲/۶۴) است. این سبب شده است که تخلخل، تاثیر بیش‌تری نسبت به چگالی در روابط دو متغیره داشته باشد.

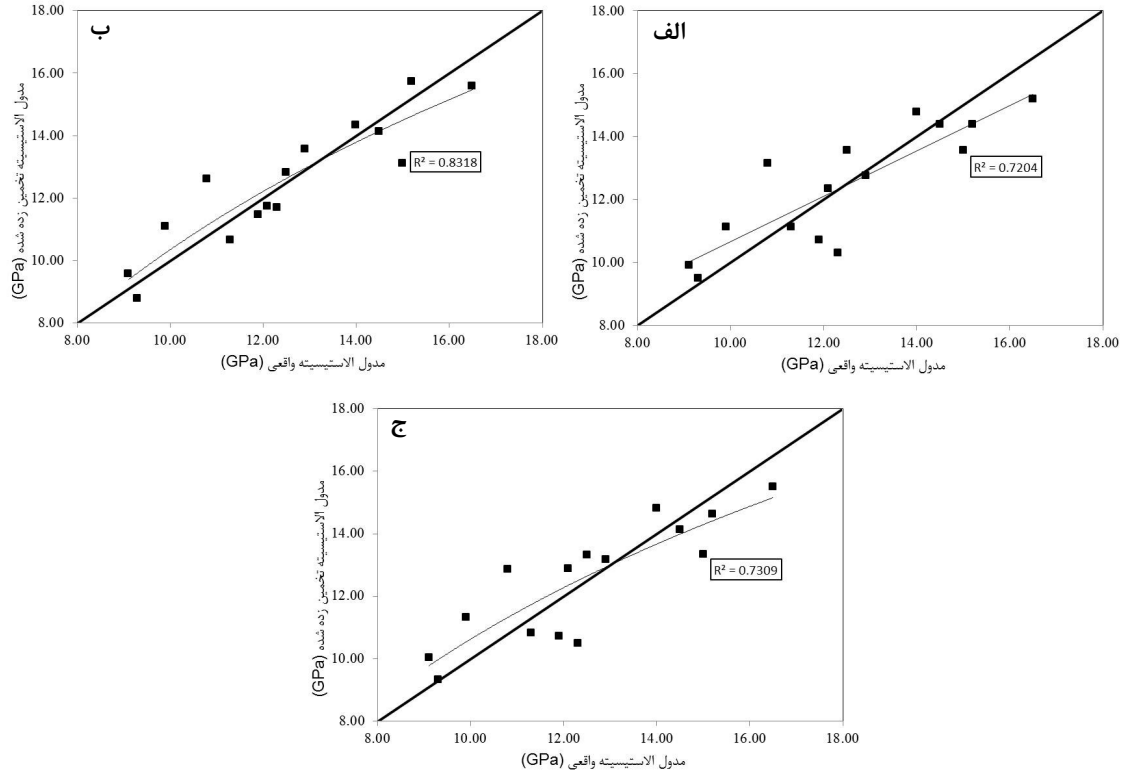


شکل ۴. مقادیر واقعی مقاومت فشاری تک‌محوری در مقابل مقادیر تخمین زده شده از الف) رابطه شماره ۸ ب) رابطه شماره ۱۲ ج) رابطه شماره ۱۳

یکی از روش‌های آماری برای مقایسه و دقت روابط در تخمین یک پارامتر استفاده از خط قطری یا ۱:۱ است. به این منظور در شکل‌های (۴) و (۵) مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته در مقابل مقادیر تخمین زده شده آن‌ها از روابط روابط (۸)، (۹) و (۱۲ تا ۱۵) به صورت شماتیک و با استفاده از خط قطری (۱:۱) نشان داده شده است. هر چه توزیع نقاط به خط قطری نزدیک‌تر باشند یا روی آن قرار گیرند نشان‌دهنده تخمینی دقیق‌تر از مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته با استفاده از روابط ارائه شده است. همانطور که از شکل (۴-ج) مشاهده می‌شود هنگامی که از سختی واجهشی اشمیت و تخلخل به عنوان پارامتر ورودی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده می‌شود نقاط خیلی نزدیک به خط

قطری هستند که نشان‌دهنده دقت بالای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری است. مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده مدول‌الاستیسیته در مقابل مقادیر تخمین زده شده در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. از این شکل مشاهده می‌شود که هر چند استفاده از سختی واجهشی اشمیت به همراه تخلخل (شکل ۵-ج) باعث کاهش پراکندگی داده‌ها و نزدیک‌تر شدن آن‌ها به خط قطری شده است، با این حال پراکندگی داده‌ها در اطراف ۱:۱ هنگامی که از سختی واجهشی اشمیت و چگالی استفاده می‌شود کمتر است (شکل ۵-ب).

بر اساس مقایسه ضرایب تعیین و خط قطری، در مجموع روابط چند متغیره نسبت به روابط ساده دارای دقت بیش‌تری در تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته هستند و می‌توان از آن‌ها برای سنگ‌های با دامنه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مشابه استفاده کرد.



شکل ۵. مقادیر واقعی مدول‌الاستیسیته در مقابل مقادیر تخمین زده شده از الف) رابطه شماره ۹ ب) رابطه شماره ۱۴ ج) رابطه شماره ۱۵

۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با تهیه ۱۵ نمونه سنگ‌آهک از سنگبری‌های استان لرستان، تعدادی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها شامل چگالی، تخلخل، مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول‌الاستیسیته و سختی واجهشی اشمیت آن‌ها مطابق روش‌های استاندارد تعیین شد.

تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از آنالیزهای رگرسیون ساده و چند متغیره نشان داد چگالی و تخلخل نقش مهمی در میزان دقت تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته از سختی واجهشی اشمیت دارند. در واقع استفاده از چگالی و تخلخل به همراه سختی واجهشی اشمیت باعث افزایش در مقدار ضریب تعیین تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته در روابط همبستگی چند متغیره می‌شود.

هنگامی که تخلخل به عنوان پارامتر ورودی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده می‌شود ضریب تعیین بالاتری نسبت به حالتی که چگالی مورد استفاده قرار می‌گیرد، دارد. این موضوع نشان‌دهنده بیش‌تر بودن تاثیر تخلخل نسبت به چگالی در دقت رابطه تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری است. این موضوع به دلیل بزرگ‌تر بودن دامنه تغییرات تخلخل (۰/۵ تا ۶/۷) نسبت به دامنه تغییرات چگالی (بین ۲/۳۸ و ۲/۶۴) باشد. این

سبب شده است که تخلخل تاثیر بیش‌تری نسبت به چگالی در دقت رابطه تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری داشته باشد.

روابط همبستگی چند متغیره ارائه شده با استفاده از مقایسه ضرایب تعیین، آزمون‌های آماری و خطوط قطری (۱:۱) صحت‌سنجی شدند و نتایج نشان داد دارای دقت و صحت مناسب برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته از سختی واجهشی اشمیت، چگالی و تخلخل می‌باشند. این روابط می‌تواند به کاهش هزینه و زمان برای انجام آزمایش‌های پرهزینه، زمان‌بر و هم‌چنین طاقت‌فرسای مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول‌الاستیسیته منجر شود. البته توصیه می‌شود روابط ارائه شده با احتیاط صرفا برای سنگ‌های با دامنه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مشابه برای ارزیابی‌های اولیه کیفیت سنگ‌ها استفاده شوند.

منابع

حبیب‌پور، ک. و صفری، ر (۱۳۸۸) راهنمای جامع کاربرد SPSS در تحقیقات پیمایشی (تحلیل داده‌های کمی). انتشارات لویه متفکران، ۸۶۱ ص.

مهدوی، م. و طاهرخانی، م (۱۳۸۳) کاربرد آمار در جغرافیا. نشر قومس، ۴۳۴ ص.

Anon (1979) Classification of rocks and soils for engineering geological mapping.part 1: Rock and soil materials. Bulletin International Association Engineering Geology, 19: 355–371.

ASTM (D 5873-05) (2005) Standard test method for determination of rock hardness by Rebound Hammer Method.

Aufmuth, R.E (1973) A systematic determination of engineering criteria for rock. Bulletin Association Engineering Geology, 11: 235–245.

Aydin, A., and Basu, A (2005) The Schmidt hammer in rock material characterization. Engineering Geology, 81: 1 –14.

Bruno, G., Vessia, G., and 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.

Cargill, J.S., and Shakoor, A (1990) Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 27: 495-503.

Cobanoglu, I., and Celik, S.B (2008) Estimation of uniaxial compressive strength from point load strength, Schmidt hardness and P-wave velocity. Bulletin Engineering Geology Environmental, 67: 491–498.

Deere, D.U., and Miller, R.P (1966) Engineering classification and index properties for intact rocks. Tech. Report. Air Force Weapons Lab., New Mexico, No., AFNL-TR, p. 65– 116

Diamantis, K., Gartzos, E., and Migiros, G (2009) Study on uniaxial compressive strength point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece. test results and empirical relations. Engineering Geology, 108; 199–207.

ISRM (1981) Rock characterization testing and monitoring. ISRM suggested methods. In: Brown ET (ed), Pergamon Press, Oxford, 211 p.

ISRM (2007) The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. In: Ulusay R, Hudson JA (eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods.

Kahraman, S (2001) Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 38: 981–994.

Katz, O., Reches, Z., and Roegiers, J.C (2000) Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 37: 723–728.

Kilic, A., and Teymen, A (2008) Determination of mechanical properties of rocks using simple Methods. Bulletin Engineering Geology Environmental, 67: 237–244.

Sachpazis, C.I (1990) Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. Bulletin Association Engineering Geology, 42: 75–83.

Tiryaki, B (2008) Predicting intact rock strength for mechanical excavation using multivariate statistics, artificial neural networks, and regression trees: Engineering Geology, 99: 51–60.

Tugrul, A., and Zarif, I. H (1999) Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. Engineering Geology, 51: 303–317.

Singh, R.N., Hassani, F.P., and Elkington, P.A.S (1983) The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations. Proceedings of 24th US symposium on rock mechanics, Texas A& M Univ, AEG, p.599–609.

Xu, S., Grasso, P., and Mahtab, A (1990) Use of Schmidt hammer for estimating mechanical

properties of weak rock. Proc. 6thInternational IAEG Congress, vol. 1.Balkema, Rotterdam, p.511 –519.

Yasar, E., and Erdogan, Y (2004) Estimation of rock physic mechanical properties using hardness methods. Engineering Geology, 71: 281–288.

Yilmaz, I., and Sendir, H (2002) Correlation of Schmidt hammer rebound number with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey). Engineering Geology, 66: 211–219.

Influence of density and porosity on the estimation accuracy of uniaxial compressive strength and elasticity modules from Schmidt rebound number for limestones

A. Jamshidi

Dept., of geology, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad

* jamshidi.am@lu.ac.ir

Recieved: 2018/1/6 Accepted: 2018/6/20

Abstract

In the present study, the effect of density (ρ) and porosity (n) on the accuracy of correlation between uniaxial compressive strength (UCS) and modulus of elasticity (E) with Schmidt rebound hardness (H_R) was investigated. For this purpose, 15 different limestones were selected and their physical (ρ, n) and mechanical (UCS, E, H_R) properties were determined. In the following, simple and multivariable regression analyses based on the H_R, ρ and n for estimating the UCS and E were proposed. The relationships proposed based on the statistical tests have been investigated, which indicates their appropriate accuracy. Comparison of simple and multivariate relationships shows that ρ, n play an important role in increasing the estimation accuracy of UCS and E from H_R. Moreover, the results shows that when H_R and ρ be used as the input parameter in the regression analysis, the value of the determination coefficient for estimating the UCS and E are 0.88 and 0.83, respectively. If H_R and n be used as input parameters, the value of the determination coefficients for estimating the UCS and E are 0.91 and 0.74, respectively.

Keywords: Porosity, Density, Uniaxial Compressive Strength, Modulus of Elasticity, Schmidt hardness rebound