

ارائه روابط رگرسیونی ساده و چندگانه برای ارزیابی مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌های رسوبی و آذرآواری با استفاده از آزمایش چکش‌اشمیت

سیامک مرادی^۱، مهرداد امیری^{۲*}، مجتبی رحیمی‌شهید^۲ و سجاد کراری^۴

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران

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

۴- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

نویسنده مسئول: a.mehrdad1372@yahoo.com*

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۳

دریافت: ۱۴۰۰/۵/۲۶

چکیده

در پروژه‌های مهندسی (سدها، تونل‌ها و پایداری شیب) ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌ها بر عملیات ساخت‌وساز تأثیرگذار است. گاهی اوقات انجام آزمون‌های آزمایشگاهی مستقیم سخت، زمان‌گیر و پرهزینه است. به همین دلیل محققان مختلف برای پیش‌بینی خواص مقاومتی سنگ‌ها مانند مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) روابط تجربی را ارائه کرده‌اند. مقاومت فشاری تک‌محوری جزء مهم‌ترین پارامترهای سنگ در مطالعات مکانیک سنگ است. این پارامتر را می‌توان به صورت مستقیم در آزمایشگاه تعیین کرد و یا به صورت غیرمستقیم با روش‌های ارائه شده نظیر آزمایش چکش‌اشمیت تخمین زد. تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری با عدد چکش‌اشمیت بسیار آسان‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر از اندازه‌گیری مستقیم آن است. هدف اصلی این مطالعه تجزیه و تحلیل روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها با سختی اشمیت است. در این پژوهش بر روی ۳ نمونه سنگ شامل ماسه‌سنگ آجاجاری، مارن سازند قم و توف کرج مطالعه انجام شده است. با توجه به اهمیت این موضوع در این پژوهش روابط تجربی جدیدی برای محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها ارائه شده است، که کاربرد آن‌ها نتایج مطلوبی را نشان می‌دهد. برای رسیدن به هدف مورد نظر مناسب‌ترین و معنادارترین روابط بین آزمون سختی اشمیت با مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از روش رگرسیون ساده (SR) و چندگانه (MR) با استفاده از نرم‌افزار Minitab 16 انجام شده است. تحلیل‌های آماری وجود همبستگی قوی بین مقاومت فشاری تک‌محوری، سختی سنگ و دانسیته خشک را در نمونه‌های ماسه‌سنگ، مارن و توف نشان می‌دهند. براساس مطالعه انجام شده رگرسیون چندمتغیره نتایج معتبرتری را ارائه می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: مقاومت فشاری تک‌محوری، چکش اشمیت، ماسه‌سنگ، توف، مارن، رگرسیون

پیشگفتار

مقاومت فشاری تک‌محوری را فراهم می‌سازد (قهرمان و همکاران، ۲۰۰۲). چکش اشمیت اولین بار در اواخر دهه ۱۹۴۰ به عنوان روشی غیر مخرب برای تعیین مقاومت بتن به کار گرفته شد (آیدین و باسو، ۲۰۰۵). برای اولین بار در سال ۱۹۴۸ مهندس سوئسی به نام اشمیت استفاده از چکش اشمیت را پیشنهاد داد. این وسیله در اوایل دهه ۱۹۶۰ در مکانیک سنگ برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ مصالح سنگی استفاده شد (آیدین و باسو، ۲۰۰۵). همچنین برای تعیین مقاومت فشاری سطوح درزه از چکش اشمیت استفاده می‌گردد. برحسب مکانیسم عملکرد و مقدار انرژی حاصل از هر یک از انواع چکش‌ها، دو نوع مختلف از چکش اشمیت وجود

تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ برای کاربردهای مهندسی از جمله سازه‌های زیرزمینی، پایداری شیب و پروژه‌های سد بسیار مهم است. رایج‌ترین پارامترهای مهندسی سنگ عبارت است از مقاومت فشاری تک‌محوری که از نمونه‌های بدون ترک و شکستگی به دست می‌آید، که نیاز به آماده‌سازی نمونه به صورت دقیق و نیاز به دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری هست که در بعضی مواقع وقت‌گیر و پرهزینه است. استفاده از چکش اشمیت یکی از روش‌های غیرمستقیم تعیین مقاومت فشاری سنگ است. استفاده از این وسیله علاوه بر اندازه‌گیری سختی بازگشتی سنگ‌ها امکان دستیابی به

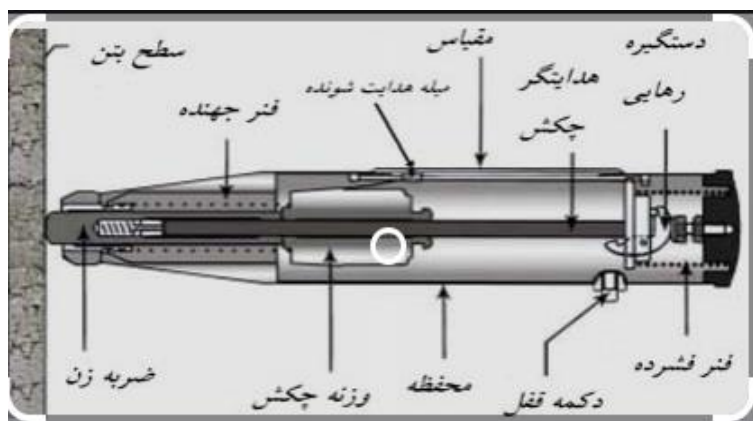
قرارگیری چکش نسبت به سطح به هنگام انجام آزمایش و استفاده از چکش اشمیت است (آیدین و باسو، ۲۰۰۵). اکنون نمونه‌های الکترونی چکش اشمیت که ساخت کشور سوئیس می‌باشد کاربردهای این وسیله را گسترش داده است. نمونه موجود با قابلیت‌های بیشتری می‌تواند با دقت بیشتر مقدار مقاومت سنگ را به‌طور مستقیم تعیین نماید. ضمن اینکه یک خروجی USB نیز بر روی آن تعبیه شده است با ورود اطلاعات به کامپیوتر می‌توان نمودار مقاومت نمونه‌های مختلف را با نرم‌افزار مخصوص رسم نمود (فهمی‌فر و سروش، ۱۳۸۰).

هنگام استفاده از چکش اشمیت بر روی سطوح درزه سنگ، برای هر نمونه حداقل باید ۲۰ قرائت از واجهش اشمیت انجام شود، سپس نیمی از داده‌ها که دارای کمترین مقدار هستند، حذف شده و از بقیه میانگین‌گیری به عمل آید. از آنجا که راستا و نحوه به‌کارگیری چکش اشمیت بر روی عدد بازگشتی مؤثر است. بنابراین باید نتایج با توجه به راستای استفاده از چکش مطابق جدول ۱ تصحیح کردند. برای این منظور، مقادیری که در جدول دارای علامت مثبت هستند به مقدار میانگین عدد بازگشتی اضافه شده و مقادیر دارای علامت منفی از مقدار میانگین کم می‌شود. اگر زاویه قرارگیری چکش نسبت به سطح افق صفر باشد نیازی به تصحیح عدد بازگشتی نیست. همچنین در صورتی که عدد بازگشتی محاسبه شده مضربی از عدد ۱۰ نباشد، باید از درون‌یابی برای محاسبه مقدار تصحیح استفاده کرد (خانلری و فریدونی، ۱۳۹۰).

تاکنون بسیاری از محققان روابطی برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها و همبستگی آن با مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته ارائه کردند. در این مطالعات یک یا چند پارامتر مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج قابل توجهی به‌دست‌آمده است. دیامانتیس و همکاران در سال ۲۰۰۹ از پارامترهایی مانند بار نقطه‌ای و سرعت موج طولی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده کردند و برخی مطالعات تجربی قبلی را توسعه دادند. جمشیدی و همکاران در سال ۲۰۱۶ مطالعه‌ای بر روی تراورتن انجام دادند. هدف از این مطالعه بررسی ارتباط بین سختی اشمیت و سرعت موج طولی با ویژگی‌های مکانیکی (UCS, BTS, I_{SS0}) بوده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سرعت موج طولی و سختی اشمیت برای تخمین خواص مکانیکی قابل اعتماد می‌باشد.

دارد که به نام تیپ L و N معروف هستند. چکش استفاده شده در این پژوهش از نوع L می‌باشد. مطالعات نشان داده است که سختی سنگ‌ها با مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها در ارتباط است در واقع سختی یکی از مفاهیم رایج است که برای توصیف رفتاری سنگ‌ها بکار می‌رود. سختی تابعی از عوامل ذاتی چون نوع کانی‌ها، ابعاد دانه‌ها، چسبندگی مرزی کانی‌ها، مقاومت و رفتار الاستیک و پلاستیک سنگ می‌باشد. ترکیب و اندرکنش این عوامل، تعیین‌کننده سختی یک سنگ است. روش‌های متعددی برای تعیین سختی سنگ پیشنهاد شده است که یکی از این روش‌ها به‌کارگیری وسیله‌ای به نام چکش اشمیت است. که معروف به آزمایش‌های واجهشی یا دینامیکی است. در این دسته از آزمایش‌ها از یک چکش یا وزنه برای ضربه زدن به سطح سنگ استفاده می‌شود و ارتفاع واجهش وزنه مقیاسی برای سنجش سختی است. هرگونه رفتار پلاستیک یا تغییر شکل بر اثر ضربه، انرژی الاستیک واجهش چکش را کاهش می‌دهد. این آزمایش برای تعیین سختی سنگ و بتن با استفاده از چکش اشمیت در صحرا یا آزمایشگاه بکار می‌رود. با استفاده از این سختی می‌توان خصوصیات دیگر سنگ و بتن را مانند مقاومت فشاری آن را تخمین زد. این روش که توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ ISRM به صورت استاندارد درآمده است. در مورد سنگ‌های خیلی نرم یا خیلی سخت دارای محدودیت‌هایی بوده است و نتایج قابل اطمینانی ارائه نمی‌دهد (خانلری و فریدونی، ۱۳۹۰).

چکش اشمیت دارای میله فولادی است که در تماس با سطح سنگ یا سطح درزه قرار داده می‌شود. در داخل چکش وزنه‌ای وجود دارد که مقدار انرژی معینی بر میله فولادی ضربه می‌زند (شکل ۱). در واقع مکانیسم عمل چکش اشمیت استوار بر ضربه زدن میله فولادی بر روی سطح درزه و بازگشت آن و قرائت عدد مربوطه از روی شاخص چکش اشمیت است. مقدار عدد قرائت شده در این آزمایش متناسب با سختی سطحی است که میله فولادی چکش با آن برخورد می‌کند. عدد بازگشتی را می‌توان با منحنی کالیبره موجود بر روی آن به مقاومت فشاری سنگ ارتباط داد. منحنی کالیبره برای مقاومت فشاری در این روش دارای حساسیت بسیار زیادی است و تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله نوع سنگ، وزن واحد حجم، تخلخل، درصد رطوبت، درجه هوازدگی سنگ و امتداد



شکل ۱. نمونه‌ای از چکش اشمیت نوع L

جدول ۱. تصحیح سختی اشمیت برای واجهش‌های غیرافقی (ISRM, 1981)

مقدار تصحیح برای زاویه انحراف				مقدار واجهش
به سمت پایین		به سمت بالا		
-۹۰	-۴۵	+۴۵	+۹۰	
+۳/۲	+۲/۴	-	-	۱۰
+۳/۴	+۲/۵	-۳/۵	-۵/۴	۲۰
+۳/۱	+۲/۳	-۳/۱	-۴/۷	۳۰
+۲/۷	+۲/۰	-۲/۶	-۳/۹	۴۰
+۲/۲	+۱/۶	-۲/۱	-۳/۱	۵۰
+۱/۷	+۱/۳	-۱/۶	-۲/۳	۶۰

بافتی، پترولوژیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ‌های کوارتزیتهی هیمالیا مورد مطالعه قرار گرفت که با استفاده از آنالیزهای رگرسیونی ارتباط بین این ویژگی‌ها تعیین گردید (گوپتا و شرما، ۲۰۱۲). عبدی و خانلری در سال ۱۳۹۸ پژوهشی تحت عنوان تخمین ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از آزمایش سرعت موج و چکش اشمیت انجام دادند. در این پژوهش ارتباط بین ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها از قبیل مقاومت فشاری تک‌محوری با چکش اشمیت مورد بررسی قرار گرفت نتایج آنالیز رگرسیون خطی ساده نشان داد که روابط مستقیم بین عدد سختی اشمیت و مقاومت فشاری تک‌محوری وجود دارد (عبدی و خانلری، ۱۳۹۸) که در جدول ۶ آورده شده است. در سال ۱۴۰۰ قبادی و همکاران مطالعه‌ای بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه‌سنگ‌های سازند قم انجام دادند. در این پژوهش ارتباط بین چکش اشمیت با مقاومت فشاری تک‌محوری بررسی شده است. در مکانیک سنگ کاربرد اصلی چکش اشمیت محاسبه مقادیر مقاومت فشاری و مدول یانگ سنگ است که از نمودارها و روابط تجربی قابل محاسبه است. در این رابطه محققان مختلف روابط

آفموت در سال ۱۹۷۳ رابطه‌ای بین چکش اشمیت و مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ با در نظر گرفتن اثر دانسیته ارائه کرد. همچنین سینگ و همکاران در سال ۱۹۸۳ مطالعه‌ای در مورد سنگ‌های رسوبی انجام دادند و رابطه‌ای بین سختی چکش‌اشمیت و مقاومت فشاری تک‌محوری ارائه نمودند. کارگیل و شکور در سال ۲۰۰۴ با استفاده از آنالیزهای رگرسیونی مقاومت فشاری تک‌محوری ۸ نمونه ماسه‌سنگ از نقاط مختلف آمریکا را با استفاده از دانسیته خشک، شاخص بار نقطه‌ای، چکش اشمیت و آزمایش لوس‌آنجلس تخمین زدند. آن‌ها نشان دادند که مقاومت فشاری تک‌محوری ماسه‌سنگ‌های مورد آزمایش با افزایش دانسیته خشک، شاخص بار نقطه‌ای و عدد سختی اشمیت افزایش یافته اما با افزایش درصد افت وزنی در سایش لوس‌آنجلس کاهش می‌یابد. گوک اوغلو و زورلو در سال ۲۰۰۴ با استفاده از مدل‌های فازی و رگرسیونی به مطالعه ارتباط مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ با شاخص پانچ بلوکی، شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی گری و ک‌های آنکارا پرداخته و روابطی را پیشنهاد کردند. همچنین، در سال ۲۰۱۲ خصوصیات

سازند آغاچاری: ناحیه مورد مطالعه در شرق و جنوب شرق اهواز قرار گرفته است که دربرگیرنده یال شمال شرقی تاقدیس اهواز می‌باشد. این تاقدیس از نوع نامتقارن است که عمدتاً از سنگ‌های متعلق به سازند آغاچاری است. سازند آغاچاری با تناوبی از ماسه‌سنگ، مارن و لای سنگ در مناطق وسیعی از خوزستان و لرستان گسترش دارد. محیط رسوبی در این مناطق بیشتر دریاچه‌ای، خلیج دهانه‌ای و رودخانه‌ای است. سن این سازند میوسن بالایی تا پلیوسن است (آقاناتی، ۱۳۸۳). ماسه‌سنگ ریز تا درشت دانه دارای لایه‌بندی ظریف تا توده‌ای بوده که رنگ خاکستری دارد (قبادی، ۱۳۷۷).

سازند قم: مناطق نمونه‌برداری مارن‌ها در شمال شرق استان همدان و جنوب نوبران، مسیر آزادراه همدان- ساوه قرار دارد. از نظر تقسیم‌بندی زون‌های زمین‌شناسی ایران منطقه مورد مطالعه در زون ایران مرکزی قرار می‌گیرد. سازند زمین‌شناسی موجود در این منطقه شامل سنگ‌های سازند قم با سن الیگوسن است. در شمال شرق همدان و جنوب حجم قابل توجهی از سازند قم را مارن خاکستری سبز روشن تشکیل می‌دهد. در این نواحی مارن‌ها بخش اصلی سازند قم هستند (آقاناتی، ۱۳۸۳).

تجربی را برای محاسبه پارامترهای مذکور ارائه کردند که برخی از مهم‌ترین آن‌ها در جدول ۶ معرفی گردیده است. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری فشاری (UCS) استفاده از رگرسیون چندمتغیره کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است و یا تأثیر این نوع رگرسیون مورد توجه نبوده و صرفاً به ارائه روابط چندمتغیره اکتفا شده است. همچنین تأثیر این نوع روابط تجربی نیز در سنگ‌های مختلف کم‌تر مورد توجه بوده است. لذا در این پژوهش سعی شده رگرسیون چند متغیره مورد توجه قرار گرفته و با روش‌های نوین آماری نتایج ارائه گردد.

زمین‌شناسی مناطق نمونه‌برداری

زمین‌شناسی منطقه

برای رسیدن به اهداف این پژوهش از سه سازند آغاچاری، سازند قم و توف‌های کرج نمونه‌برداری صورت گرفته است که به مختصر به توضیح هر سازند می‌پردازیم. در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی مناطق نمونه‌برداری شده نشان داده شده است.



شکل ۲. موقعیت نمونه‌برداری و انجام آزمایش چکش اشمیت

است. براساس استاندارد ISRM (۱۹۸۱) این سنگ‌ها از مقاومت نسبتاً پایین تا بالا متغیر هستند. در ماسه‌سنگ مقاومت سنگ از ۱۰/۳۸ تا ۱۳۸/۷۲ مگاپاسکال متغیر است. این سنگ‌ها از مقاومت پایین تا بالا متغیرند. در مارن‌ها مقاومت سنگ از ۱۹/۳۴ تا ۷۵ مگاپاسکال متغیر است. این سنگ‌ها از مقاومت پایین تا متوسط متغیرند. در سنگ توف دامنه وزن واحد حجم خشک از ۲/۲۴ تا ۲/۶۵ متغیر است. براساس طبقه‌بندی آنون (۱۹۷۹) این سنگ‌ها در رده متوسط تا بالا قرار می‌گیرند. در ماسه‌سنگ وزن واحد حجم خشک از ۱/۷ تا ۲/۵۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است. ماسه‌سنگ‌ها در رده خیلی پایین تا بالا قرار می‌گیرند. در مان‌ها دامنه وزن واحد حجم خشک از ۱/۹۴ تا ۲/۶۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است. مارن‌ها در رده پایین تا بالا قرار می‌گیرند.

ارزیابی همبستگی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی در شرایط خشک

در این بخش ابتدا براساس مقادیر باقیمانده، داده‌های پرت و خارج از رده شناسایی، جهت انجام تحلیل‌های بعدی از محاسبات حذف گردید. به‌منظور به دست آوردن روابط بین خصوصیات مهندسی در سنگ‌های مختلف، از آنالیز رگرسیون ساده استفاده شده است. آنالیز رگرسیون یک روش ساده و درعین حال کاربردی است که به‌خصوص در مطالعات جدید ژئوتکنیک به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد و نتایج قابل قبولی را نیز به همراه داشته است (چمن‌زاده و همکاران، ۲۰۱۶؛ رحیمی‌شهید و هاشمیان، ۲۰۲۱؛ کرمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ رحیمی‌شهید و همکاران، ۱۴۰۰). در این روش روابط بین دو متغیر تصادفی و دارای توزیع نرمال تعیین می‌گردد. در این آنالیز رگرسیون توابع خطی مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش روابط تخمین زده شده در سطح اطمینان ۹۵ درصد آزمون شده‌اند. برای آنالیز رگرسیون توابع خطی از ضریب تعیین استفاده شده است. ضریب تعیین یکی از شاخص‌های مهم آماری برای ارزیابی مدل‌ها است که هر چه مقدار آن برای یک مدل خاص به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده اعتبار بالای آن مدل است. استفاده از نتایج یک آماره به‌تنهایی نمی‌تواند دقت و اعتبار روابط رگرسیونی را نشان دهد. به همین منظور پس از تعیین روابط رگرسیونی، بررسی میزان دقت، صحت و معناداری این روابط امری ضروری است. در

توف‌های کرج: منطقه تفرش با توجه به تقسیم‌بندی ساختاری ایران در زون ولکانیکی رسوبی پلوتونیک ائرومیه دختر واقع شده است. به دنبال فاز فشارشی پایانی، فاز کششی مهمی در بسیاری از قسمت‌های ایران حکمفرما شد و نتیجه آن ولکانیسم شدید ائوسن بود. ولکانیسم در این منطقه بیشتر انفجاری بوده و واحدهای پیروکلاستیک شامل ایگنیمبریت، لیتیک توف، کریستال توف و توف شیشه‌ای را در منطقه به وجود آورده است.

روش پژوهش

برای انجام این پژوهش بررسی‌های کتابخانه‌ای و جمع‌آوری اطلاعات موجود در رابطه با ماسه‌سنگ‌ها، مارن و توف در نقاط مختلف ایران انجام شده است (شکل ۲). طی بازدیدهای صحرایی، نمونه‌برداری صورت گرفته است. مغزه‌گیری از نمونه‌ها براساس استاندارد (ISRM, 2007) با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۲/۵ انجام شده است. سپس برای تعیین همبستگی تجربی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی، نمونه‌های ماسه‌سنگ و توف مغزه استوانه‌ای و نمونه‌های مارن به صورت مکعبی آماده‌سازی شده است. مقاومت فشاری تک‌محوری توسط دستگاه ELE و براساس استاندارد (ISRM, 2007) و آزمایش وزن واحد حجم خشک براساس استاندارد (ISRM, 2007) انجام شده است. همچنین آزمایش چکش اشمیت (SH) براساس استاندارد (ISRM, 2007) و نوع L انجام شده است. پس از بررسی خصوصیات آماری نمونه‌ها در نرم‌افزار Minitab 19 روابط همبستگی از نوع ساده و چندگانه براساس بهترین برازش بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی برقرار شده است. روابط تجربی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری در شرایط خشک با استفاده از مقادیر چکش اشمیت (SH) و وزن واحد حجم خشک (۷d) براساس مدل رگرسیونی ارائه شده است. با استفاده از تحلیل باقیمانده‌ها و مقایسه با روابط ارائه شده در گذشته، صحت و دقت روابط تجربی پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها شامل وزن واحد حجم خشک (۷d)، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و چکش اشمیت (SH) در جدول ۲ نشان داده شده است. در سنگ توف دامنه مقاومت از ۳۹ تا ۲۰۵ مگاپاسکال متغیر

مهندسی ژئوتکنیک نیز به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (جبین‌پور و همکاران، ۱۳۹۷؛ رحیمی‌شهید و هاشمیان، ۲۰۲۱؛ کرمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ رحیمی‌شهید و همکاران، ۱۴۰۰). بر اساس این تحلیل هر چه میانگین باقیمانده‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد، اعتبار روابط بیشتر است (حسینی‌پاک، ۱۳۸۹). همچنین نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها اعتبار بالای روابط را نشان می‌دهد.

این مطالعه برای تعیین معناداری و صحت روابط از آماره Sig و برای بررسی دقت و اعتبار نتایج روابط از تحلیل باقیمانده‌ها و تعیین میزان همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده استفاده شده است. تحلیل اختلاف مقادیر واقعی و مقادیر تخمینی (باقیمانده‌ها) یکی از روش‌های پرکاربرد برای اعتبارسنجی روابط رگرسیونی و سایر مدل‌سازی‌ها است (حسینی‌پاک، ۱۳۸۹) که در مطالعات

جدول ۲. نتایج آزمون تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه

Lithology	Rebound number	Test	Min	Max	avg	F
توف	۱۷۸۶	UCS(MPa)	۳۹	۲۰۵	۱۲۰	۸۵/۵۳
		SH	۳۰	۵۵	۴۲	-
		Density(gr/cm ³)	۲/۲۴	۲/۶۵	۲/۵	-
ماسه‌سنگ	۱۱۸۵	UCS(MPa)	۱۰/۳۸	۱۳۸/۷۲	۶۲/۳۱	۱۱۲/۱۲
		SH	۱۹	۵۳	۳۷	-
		Density(gr/cm ³)	۱/۷	۲/۵۱	۲/۴	-
مارن	۱۵۳۲	UCS(MPa)	۱۹/۳۴	۷۵	۵۰/۱۵	۴۲/۶۷
		SH	۲/۶	۴۷	۳۶	-
		Density(gr/cm ³)	۱/۹۴	۲/۶۸	۲/۴	-

فشاری تک‌محوری وجود دارد و بنابراین نتایج حاصل از این روابط قابل اعتماد هستند. تغییرات عدد چکش اشमित و وزن واحد حجم خشک نسبت به تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره به‌صورت دوبعدی و سه‌بعدی در شکل ۴ (a و b) نمایش داده شده است که وجود رابطه مستقیم بین این سه ویژگی به وضوح مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۴b در توف‌های با مقاومت کمتر از ۱۰۰ مگاپاسکال مقدار عدد سختی اشमित کمتر از ۵۰ و مقدار وزن واحد حجم خشک سنگ کمتر از ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره با استفاده از عدد چکش اشमित و وزن واحد حجم خشک از رگرسیون دومتغیره استفاده شده است که نتایج آن برای توف در جدول ۳ ارائه شده است (رابطه ۳). بر اساس این جدول، رابطه‌ی پیشنهادی معنادار بوده ($Sig < 0.05$) و ضریب تعیین بالای آن نیز دقت بالای آن را نشان می‌دهد.

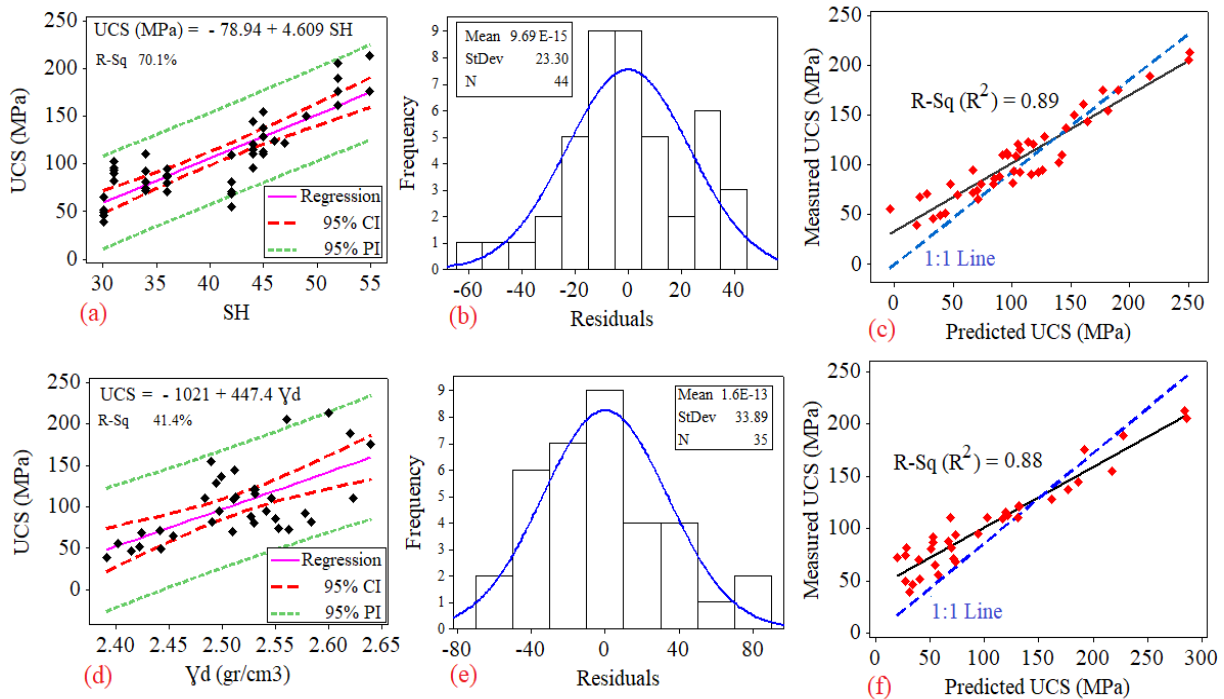
منحنی نرمال باقی‌مانده‌های این رابطه در شکل ۴c قابل مشاهده است. این منحنی نرمال بودن داده‌ها را نشان می‌دهد. همچنین میانگین باقیمانده‌ها نیز به صفر میل می‌کند. در نهایت برای بررسی دقت رابطه ارائه شده مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری واقعی و پیش‌بینی‌شده در شکل ۴d نشان داده شده است. این شکل دقت قابل قبول

منحنی برازش خطی ساده هر رابطه به ترتیب بین مقاومت فشاری تک‌محوری با چکش اشमित (شکل a ۳) و مقاومت فشاری تک‌محوری با وزن واحد حجم خشک (شکل d ۳) توف نشان داده شده است (روابط ۱ و ۲ در جدول ۳). بر اساس جدول ۳، هر دو رابطه در سطح معناداری ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$)، معنادار ($Sig < 0.05$) هستند. دقت روابط نیز بر اساس مقدار ضریب تعیین به‌دست‌آمده بین مقاومت فشاری تک‌محوری با چکش اشमित و وزن واحد حجم خشک به ترتیب $R^2 = 0.88$ و $R^2 = 0.89$ است. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، این روابط از نوع خطی است و اعتبار قابل قبولی را دارا هستند. منحنی نرمال باقی‌مانده‌ها در شکل ۳b، e برای توف ارائه شده است. تحلیل باقیمانده‌های هر دو رابطه، نشان می‌دهد که توزیع باقیمانده‌ها تقریباً نرمال است و میانگین باقیمانده‌ها نیز به صفر میل می‌کند (شکل ۳-b و e). همچنین باقیمانده‌های صفر حداکثر فراوانی را نشان می‌دهند.

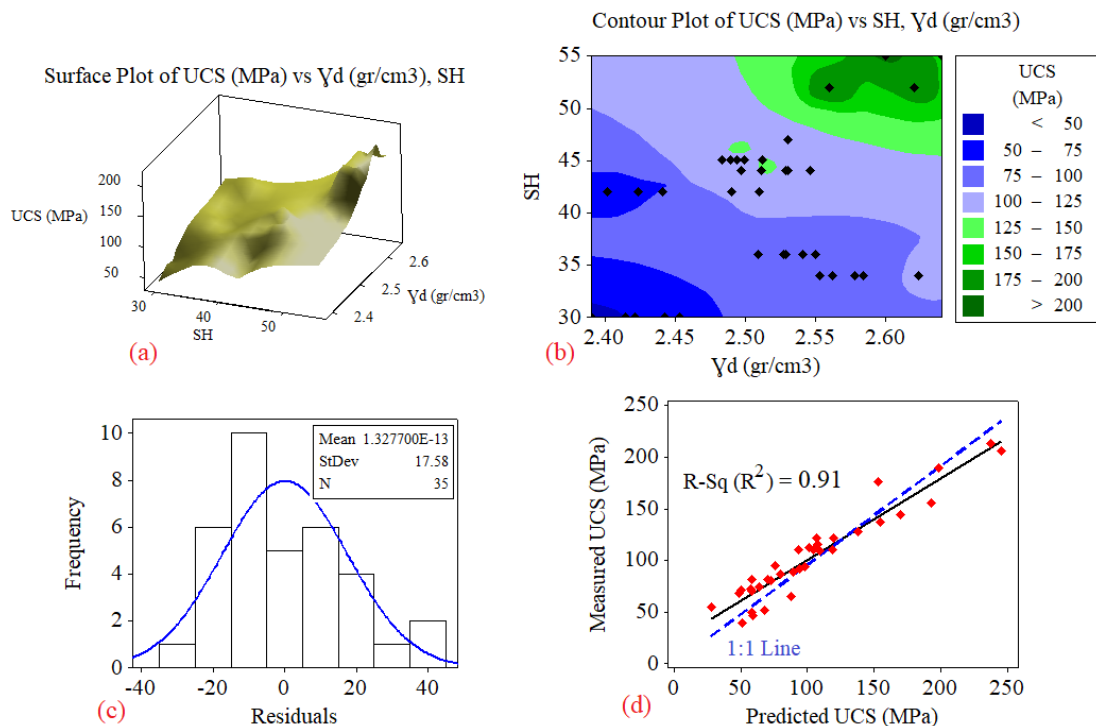
همچنین در شکل ۳c، f همبستگی بین مقدار واقعی و پیش‌بینی‌شده مقاومت فشاری تک‌محوری به کمک روابط به‌دست‌آمده در شکل ۳a، d ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای هر دو رابطه (۱ و ۲)، همبستگی ۸۸ درصد و بالاتر بین مقدار واقعی و پیش‌بینی‌شده مقاومت

ANOVA برای سنگ توف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول نشان داده شده است، بهترین رابطه از نوع دومتغیره و دارای ضریب تعیین ۰/۸۴ است.

($R^2 = 0.91$) رابطه تجربی ارائه شده را تأیید می‌کند. در جدول ۳ بالاترین ضریب تعیین (R^2)، مقدار معناداری روابط ($\text{Sig} < 0.05$) و F آماری براساس نتایج آزمون



شکل ۳. a: رابطه رگرسیون خطی ساده مقاومت فشاری تک‌محوری با چکش اشمیت در توف، b: منحنی توزیع باقیمانده‌های رابطه ۱، c: منحنی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده با استفاده از رابطه ۱، d: رابطه رگرسیون خطی ساده مقاومت فشاری تک‌محوری با وزن واحد حجم خشک، e: منحنی توزیع باقیمانده‌های رابطه ۲ و f: منحنی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده با استفاده از رابطه ۲



شکل ۴. تغییرات عدد چکش اشمیت و وزن واحد حجم خشک نسبت به تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره در توف به صورت a: سه‌بعدی، b: دوبعدی، c: منحنی توزیع باقیمانده‌های رابطه ۳ و d: منحنی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده با استفاده از رابطه ۳

جدول ۳. نتایج تحلیل رگرسیون یک و دو متغیره مقاومت فشاری تک‌محوری در سنگ توف

معادله	F	Sig.	R ²	نوع سنگ	شماره رابطه
UCS = -78.94 + 4.61 SH	۹۸/۶	۰/۰۰	۰/۷۰	توف	۱
UCS = -1021 + 447.4 γ_d	۲۳/۳۳	۰/۰۰	۰/۴۱	توف	۲
UCS = -686 + 4.41 SH + 243 γ_d	۸۵/۵۳	۰/۰۰	۰/۸۴	توف	۳

نوع دو متغیره و دارای ضریب تعیین ۰/۸۹ است. با توجه به شکل ۶b در ماسه‌سنگ‌های با مقاومت کمتر از ۴۰ مگاپاسکال مقدار عدد سختی اشمیت کمتر از ۴۰ و مقدار وزن واحد حجم خشک سنگ کمتر از ۲/۲۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. منحنی برازش خطی ساده هر رابطه به ترتیب بین مقاومت فشاری تک‌محوری با چکش اشمیت (شکل a ۷) و مقاومت فشاری تک‌محوری با وزن واحد حجم خشک (شکل d ۷) مارن نشان داده شده است (روابط ۷ و ۸ در جدول ۵). بر اساس جدول ۵، هر دو رابطه در سطح معناداری ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$)، معنادار ($\text{Sig} < 0.05$) هستند. دقت روابط نیز بر اساس مقدار ضریب تعیین به‌دست‌آمده بین مقاومت فشاری تک‌محوری با چکش اشمیت و وزن واحد حجم خشک به ترتیب $R^2 = 0.68$ و $R^2 = 0.63$ است. همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، این روابط از نوع خطی است و اعتبار قابل قبولی را دارا هستند. منحنی نرمال باقی‌مانده‌ها در شکل ۷ b, e برای مارن ارائه شده است. تحلیل باقیمانده‌های هر دو رابطه، نشان می‌دهد که توزیع باقیمانده‌ها تقریباً نرمال است و میانگین باقیمانده‌ها نیز به صفر میل می‌کند (شکل ۷ - b و e). همچنین باقیمانده‌های صفر حداکثر فراوانی را نشان می‌دهند. همچنین در شکل ۵ c, f همبستگی بین مقدار واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت فشاری تک‌محوری به کمک روابط به‌دست‌آمده در شکل ۵ a, d ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای هر دو رابطه (۴ و ۵)، همبستگی ۹۱ درصد و بالاتر بین مقدار واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت فشاری تک‌محوری وجود دارد و بنابراین نتایج حاصل از این روابط قابل اعتماد هستند. تصویر سه‌بعدی (سارفیس پلات) سطح بدست آمده از رگرسیون چندگانه خطی و منحنی میزان (کنتور دیاگرام) آن به ترتیب در شکل ۶ a, b نشان داده شده است. منحنی نرمال باقی‌مانده در شکل ۶ c قابل مشاهده است. در نهایت برای بررسی دقت رابطه ارائه شده مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری واقعی و پیش‌بینی شده در شکل ۶ d نشان داده شده است. این شکل دقت قابل قبول ($R^2 = 0.925$) رابطه تجربی ارائه شده را تأیید می‌کند. جدول ۴ بالاترین ضریب تعیین (R^2)، مقدار معناداری روابط ($\text{sig} < 0.05$) و F آماری بر اساس نتایج آزمون ANOVA برای ماسه‌سنگ را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، بهترین رابطه از

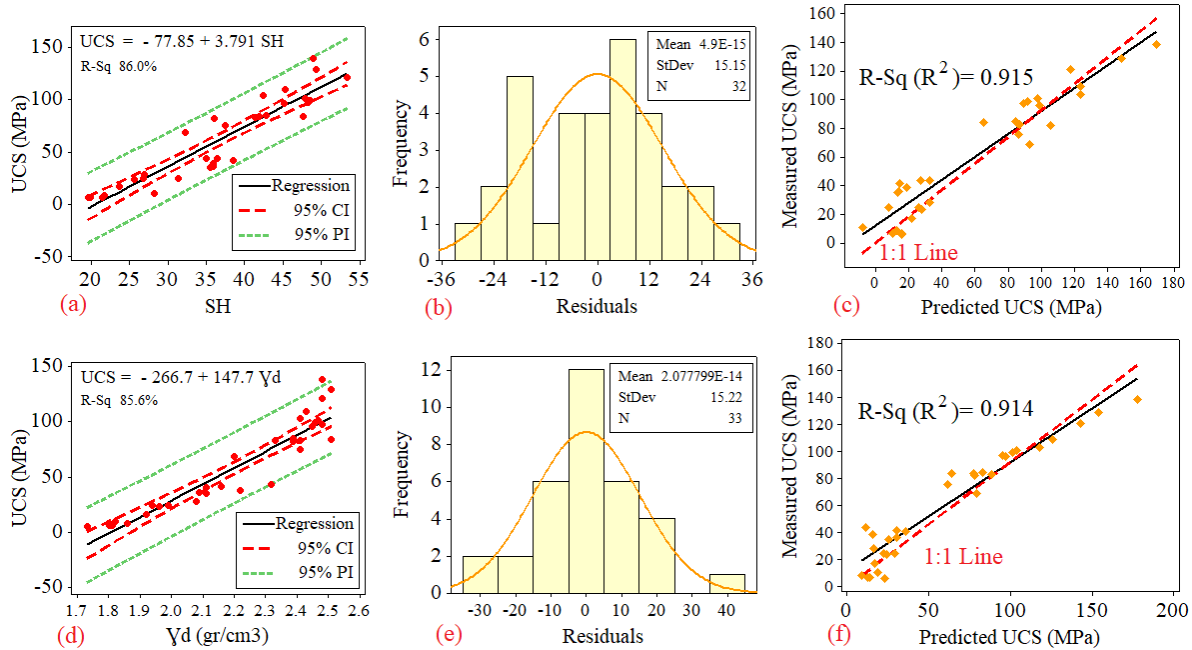
منحنی رگرسیون ساده خطی هر رابطه به ترتیب بین مقاومت فشاری تک‌محوری با چکش اشمیت (شکل a ۵) و مقاومت فشاری تک‌محوری با وزن واحد حجم خشک (شکل d ۵) ماسه‌سنگ‌ها نشان داده شده است. است (روابط ۴ و ۵ در جدول ۴). بر اساس جدول ۴، هر دو رابطه در سطح معناداری ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$)، معنادار ($\text{Sig} < 0.05$) هستند. مقدار ضریب تعیین به‌دست‌آمده بین مقاومت فشاری تک‌محوری با چکش اشمیت و وزن واحد حجم خشک به ترتیب $R^2 = 0.86$ است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، این روابط از نوع خطی است و اعتبار قابل قبولی را دارا هستند.

منحنی نرمال باقی‌مانده‌ها در شکل ۵ b, e برای ماسه‌سنگ ارائه شده است. تحلیل باقیمانده‌های هر دو رابطه، نشان می‌دهد که توزیع باقیمانده‌ها تقریباً نرمال است و میانگین باقیمانده‌ها نیز به صفر میل می‌کند (شکل ۵ - b و e). همچنین باقیمانده‌های صفر حداکثر فراوانی را نشان می‌دهند. همچنین در شکل ۵ c, f همبستگی بین مقدار واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت فشاری تک‌محوری به کمک روابط به‌دست‌آمده در شکل ۵ a, d ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای هر دو رابطه (۴ و ۵)، همبستگی ۹۱ درصد و بالاتر بین مقدار واقعی و پیش‌بینی شده مقاومت فشاری تک‌محوری وجود دارد و بنابراین نتایج حاصل از این روابط قابل اعتماد هستند.

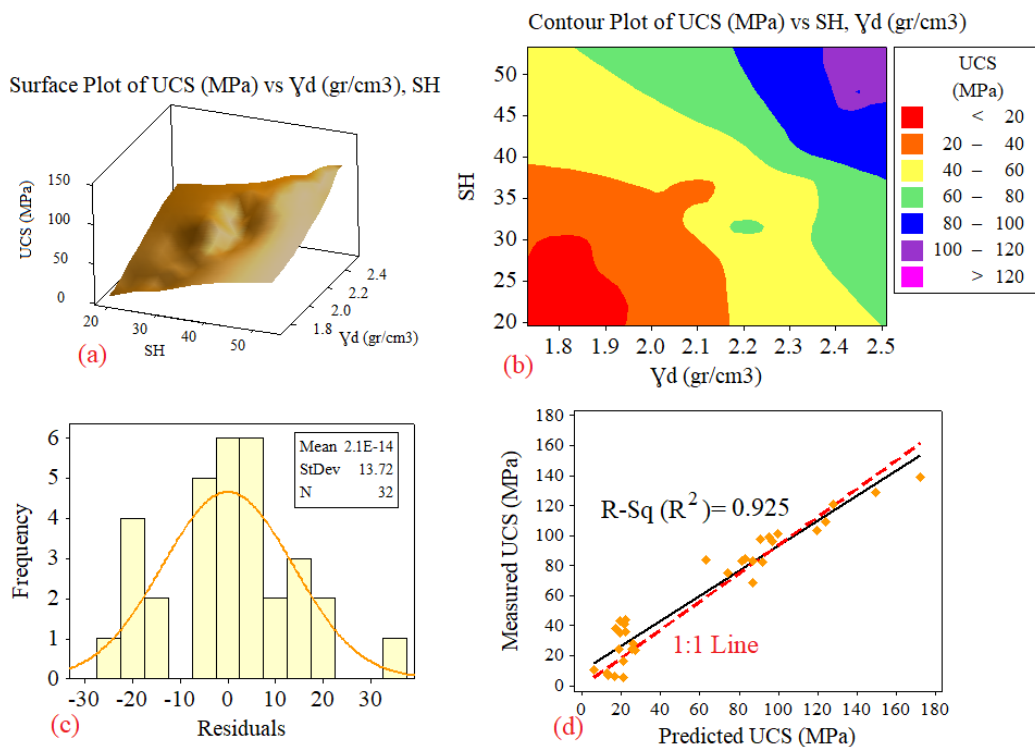
تصویر سه‌بعدی (سارفیس پلات) سطح بدست آمده از رگرسیون چندگانه خطی و منحنی میزان (کنتور دیاگرام) آن به ترتیب در شکل ۶ a, b نشان داده شده است. منحنی نرمال باقی‌مانده در شکل ۶ c قابل مشاهده است. در نهایت برای بررسی دقت رابطه ارائه شده مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری واقعی و پیش‌بینی شده در شکل ۶ d نشان داده شده است. این شکل دقت قابل قبول ($R^2 = 0.925$) رابطه تجربی ارائه شده را تأیید می‌کند. جدول ۴ بالاترین ضریب تعیین (R^2)، مقدار معناداری روابط ($\text{sig} < 0.05$) و F آماری بر اساس نتایج آزمون ANOVA برای ماسه‌سنگ را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، بهترین رابطه از

متغیره و دارای ضریب تعیین ۰/۸۹۱ است. با توجه به شکل ۸b در مارن‌های با مقاومت کمتر از ۵۰ مگاپاسکال مقدار عدد سختی اشمیت کمتر از ۴۵ و مقدار وزن واحد حجم خشک سنگ کمتر از ۲/۷۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

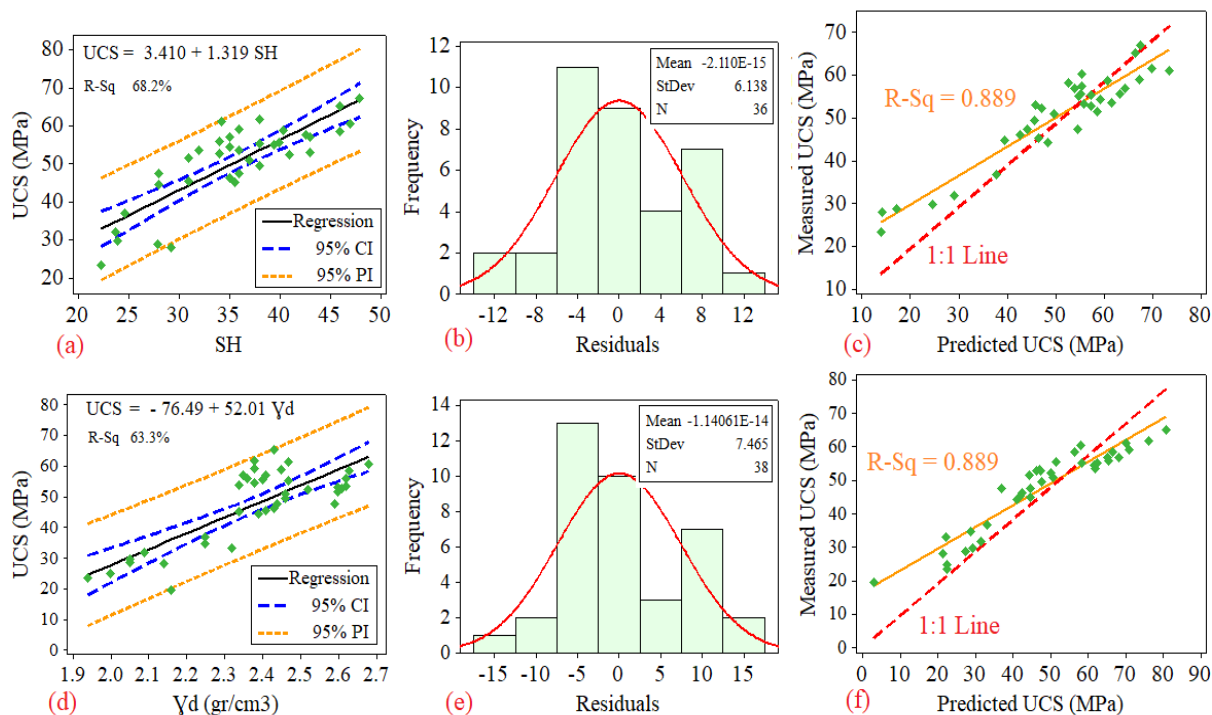
شده را تأیید می‌کند. جدول ۵ بالاترین ضریب تعیین (R^2)، مقدار معناداری روابط (Sig < 0.05) و F آماری بر اساس نتایج آزمون ANOVA برای ماسه‌سنگ را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است، بهترین رابطه از نوع دو



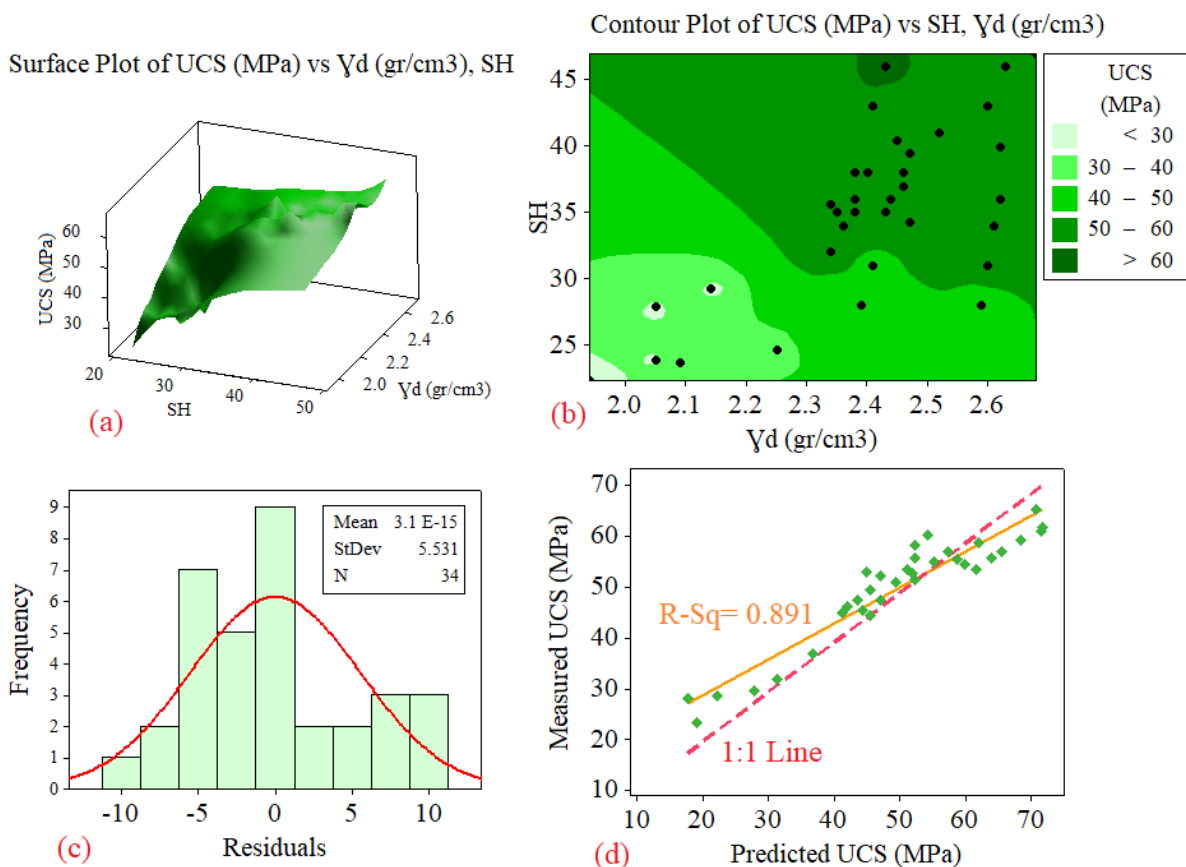
شکل ۵. a: رابطه رگرسیون خطی ساده مقاومت فشاری تک‌محوری با چکش اشمیت در ماسه‌سنگ، b: منحنی توزیع باقیمانده‌های رابطه ۴، c: منحنی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی با استفاده از رابطه ۴، d: رابطه رگرسیون خطی ساده مقاومت فشاری تک‌محوری با وزن واحد حجم خشک، e: منحنی توزیع باقیمانده‌های رابطه ۵ و f: منحنی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی با استفاده از رابطه ۵



شکل ۶. تغییرات عدد چکش اشمیت و وزن واحد حجم خشک نسبت به تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره در ماسه‌سنگ به صورت a: سه‌بعدی، b: دوبعدی، c: منحنی توزیع باقیمانده‌های رابطه ۶ و d: منحنی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده‌ی با استفاده از رابطه ۶



شکل ۷. **a:** رابطه رگرسیون خطی ساده مقاومت فشاری تک‌محوری با چکش اشمیت در مارن، **b:** منحنی توزیع باقیمانده‌های رابطه ۷، **c:** منحنی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده با استفاده از رابطه ۷، **d:** رابطه رگرسیون خطی ساده مقاومت فشاری تک‌محوری با وزن واحد حجم خشک، **e:** منحنی توزیع باقیمانده‌های رابطه ۸ و **f:** منحنی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده با استفاده از رابطه ۸



شکل ۸. تغییرات عدد چکش اشمیت و وزن واحد حجم خشک نسبت به تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره در مارن به صورت **a:** سه بعدی، **b:** دوبعدی، **c:** منحنی توزیع باقیمانده‌های رابطه ۹ و **d:** منحنی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده با استفاده از رابطه ۹

جدول ۴. نتایج تحلیل رگرسیون یک و دو متغیره مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) در ماسه‌سنگ

معادله	F	Sig.	R ²	نوع سنگ	شماره رابطه
UCS = -77.85 + 3.79 SH	۱۸۴/۷۱	۰/۰۰	۰/۸۶	ماسه‌سنگ	۴
UCS = -266.7 + 147.7 γ_d	۱۸۳/۶۸	۰/۰۰	۰/۸۶	ماسه‌سنگ	۵
UCS = -175 + 2.05 SH + 72.6 γ_d	۱۱۲/۱۲	۰/۰۰	۰/۸۹	ماسه‌سنگ	۶

جدول ۵. نتایج تحلیل رگرسیون یک و دو متغیره مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) در سنگ مارن

معادله	F	Sig.	R ²	نوع سنگ	شماره رابطه
UCS = 3.41 + 1.32 SH	۷۲/۷۶	۰/۰۰	۰/۶۸	مارن	۷
UCS = -76.49 + 52.01 γ_d	۶۲/۰۳	۰/۰۰	۰/۶۳	مارن	۸
UCS = -37.5 + 0.866 SH + 23.6 γ_d	۴۲/۶۷	۰/۰۰	۰/۷۳	مارن	۹

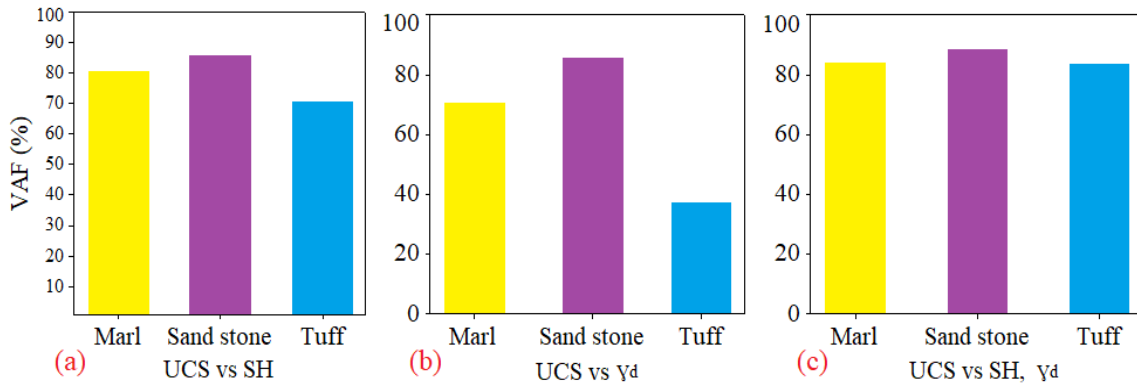
توف، ماسه‌سنگ و مارن صورت گرفته است. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در ماسه‌سنگ میزان ضریب تعیین به‌دست‌آمده از تمام روابط، رابطه قابل‌قبول‌تر و بهتری را نشان می‌دهد. همچنین بر اساس شکل ۱۰ در تمام سنگ‌ها، استفاده از رگرسیون چندمتغیره نتایج قابل‌تکتری حاصل می‌شود. یکی از روش‌های نشان دادن دقت نتایج حاصل از آزمایش‌ها، شبیه‌سازها و روابط آماری، استفاده از نمودارهای فاصله اطمینان^۱ است. در این نمودارها میزان انحراف معیار هر متغیر به‌صورت خطوطی در بالا و پایین هر نمودار ترسیم می‌شود، که بر اساس آن می‌توان در مورد برابر بودن یا تفاوت میانگین گروه‌ها یا متغیرها قضاوت کرد و محدوده هر پارامتر را اندازه‌گیری کرد. در شکل ۱۱ این نوع نمودارها (در سطح معناداری ۹۵ درصد) برای روابط ارائه شده در این مطالعه، نمایش داده شده است. در ماسه‌سنگ، میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده با میانگین مقادیر واقعی مقاومت فشاری تک‌محوری در تمامی روابط رگرسیونی، تقریباً برابر است و اختلاف ناچیزی را نشان می‌دهد. همچنین در این سنگ اختلاف انحراف معیار مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی مقاومت فشاری تک‌محوری، اندک است. درحالی‌که در مارن و توف، بین میانگین و بازه انحراف معیار مقادیر پیش‌بینی‌شده و مقادیر واقعی مقاومت فشاری تک‌محوری اختلاف بیشتری به چشم می‌خورد. با این وجود در هر یک از سنگ‌ها، مقادیر پیش‌بینی‌شده با استفاده از رگرسیون چندمتغیره در قیاس با رگرسیون ساده، اختلاف کمتری را نشان می‌دهند (شکل ۱۱).

رابطه ۱۰

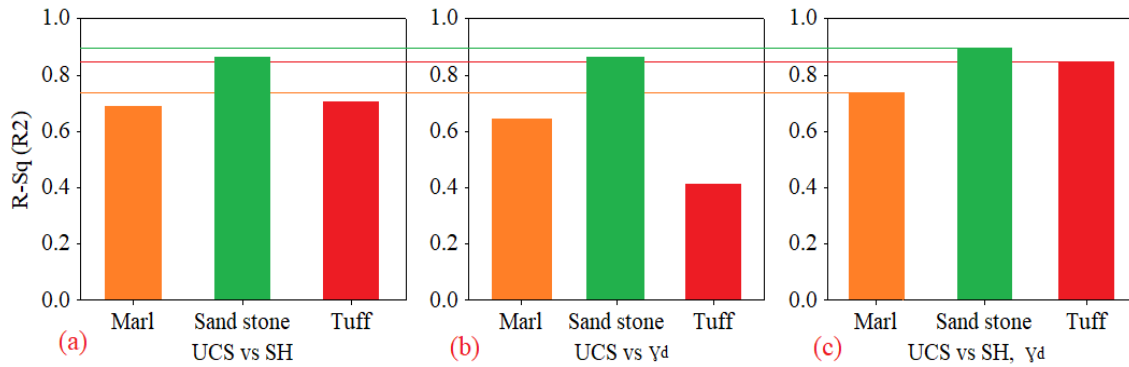
$$VAF = [1 - (\text{var}(y - y') / \text{var}(y))] \times 100$$

در ادامه به مقایسه روابط رگرسیونی به‌دست‌آمده در یک سنگ خاص پرداخته شده است. همچنین سعی شده مقایسه‌ای بین روابط رگرسیونی بین سه نوع سنگ مورد مطالعه پرداخته شود. بدین منظور از دو شاخص ارزیابی عملکرد مختلف شامل مقدار VAF و ضریب تعیین استفاده شده است. مقدار VAF برای تعیین قابلیت اعتماد و میزان خطای روش‌ها و مدل‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چه مقدار این شاخص برای یک مدل خاص به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت و اعتبار بیشتر آن است. مقدار VAF به کمک رابطه ۱۰ محاسبه و در شکل ۹ نشان داده شده است. در این معادله‌ها، γ مقادیر اندازه‌گیری شده، γ' مقادیر پیش‌بینی‌شده و N تعداد داده‌ها است (هکینگ، ۱۹۷۶). در شکل ۹ مقدار VAF برای تعیین قابلیت اعتماد و میزان خطای روابط رگرسیونی‌های ارائه شده در این مطالعه، مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس شکل ۹، در توف‌ها پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از روابط رگرسیونی ارائه شده نسبت به دو سنگ دیگر، دقت کمتری را نشان می‌دهد، درحالی‌که برای ماسه‌سنگ عکس این حالت دیده می‌شود. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در تمام سنگ‌های مورد بررسی، استفاده از رگرسیون چندمتغیره، نتایج معتبرتری نسبت به رگرسیون ساده ارائه می‌دهد که این افزایش اعتبار نتایج در توف و مارن محسوس‌تر است (شکل ۹). بنابراین در این دو نوع سنگ‌ها توصیه می‌شود برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری از رگرسیون چند متغیره استفاده شود. در شکل ۱۰ مقایسه‌ای از نظر ضریب تعیین روابط به‌دست‌آمده در این پژوهش در سه نوع سنگ

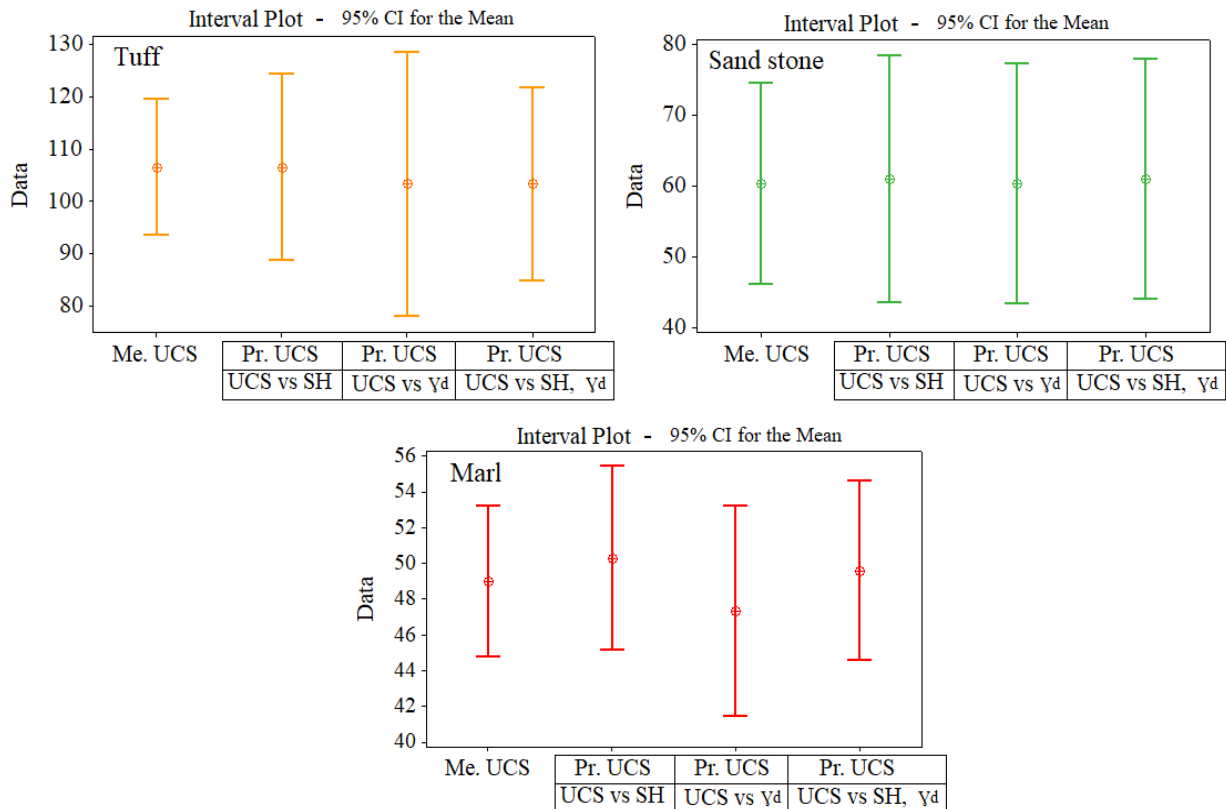
^۱ CI=Confidence Interval



شکل ۹. مقدار VAF برای تعیین قابلیت اعتماد و میزان خطای روابط رگرسیونی مختلف



شکل ۱۰. مقایسه ضریب تعیین روابط به‌دست‌آمده در این پژوهش در سه نوع سنگ توف، ماسه‌سنگ و مارن



شکل ۱۱. نمودارهای فاصله اطمینان (در سطح معناداری ۹۵ درصد) برای روابط ارائه شده در این مطالعه

جدول ۶. روابط تجربی ارائه شده توسط محققین مختلف برای محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوری

ردیف	محققین	روابط مقاومت فشاری	(R ²)	نوع سنگ
۱	دبیر (۱۹۶۰)	$\sigma_a = 6.9 \times 10^{0.16+0.0078(H_s \times \gamma_a)}$	۰/۸۹	هر سه تیپ سنگ
۲	بارتون و کوبی (۱۹۷۷)	$\log JCS = 0.00088 \gamma_a R + 1.01$	-	-
۳	آفموت (۱۹۷۳)	$JCS = 0.33 \times (\gamma_a \times R)^{1.35}$	-	-
۴	کیدبینزکی (۱۹۸۰)	$\sigma_a = 0.52 \times e^{(0.05H_s + \gamma_a)}$	-	-
۵	ISRM (1981)	$\log \sigma_c = 0.00014 \gamma_a H_s + 3.16$	-	-
۶	هرمی و دیمارکو (۱۹۸۵)	$0.994R - 0.383 = \sigma_c$	۰/۷۰	۱۰ نوع سنگ مختلف
۷	کارگیل و شاکور (۱۹۹۰)	$\log \sigma_c = 0.043 \gamma_a H_s + 1.2$	۰/۸۶	ماسه‌سنگ
۸	قهرمان (۲۰۰۱)	$\sigma_c = 6.97 \times e^{(0.014 \times \gamma_a H_s)}$	۰/۷۸	مارن، ماسه‌سنگ، کربنات
۹	مورالس و همکاران (۲۰۰۴)	$\sigma_c = e^{(0.053H_s + 1.332)}$	۰/۸۸	آهک، ماسه‌سنگ، مارن، سیلتستون
۱۰	یاسر و اردوغان (۲۰۰۴)	$4 \times 10^{-6} R^{4.2917} = \sigma_c$	۰/۸۰	آهک، مارن، ماسه‌سنگ، بازالت
۱۱	دینسر و همکاران (۲۰۰۴)	$2.75 R - 35.83 = \sigma_c$	۰/۹۵	بازالت، آندزیت و توف
۱۲	شلی و همکاران (۲۰۰۷)	$3.201 R - 46.59 = \sigma_c$	۰/۵۸	دولومیت و آهک
۱۳	کیلیک و تیمن (۲۰۰۸)	$0.0137 R^{2.2721} = \sigma_c$	۰/۹۷	۱۹ نوع سنگ مختلف
۱۴	جمشیدی و همکاران (۲۰۱۶)	$UCS = 78.59 \ln(H_r) - 239.2$	۰/۸۱	تراورتن
۱۵	حبیب و همکاران (۲۰۱۷)	$2.855 e^{0.0632 R} = \sigma_c$	۰/۷۵	آهک، ماسه‌سنگ، دولومیت، توف کربناته
۱۶	تیمن (۲۰۲۱)	$0.067 H_r UCS = 2.208 e$	-	-
۱۷	خانلری و فریدونی (۱۳۹۰)	$JCS = 10.070 \times e^{(0.020 \times \gamma_a H_s)}$	۱/۰۰	سنگ‌های سخت
۱۸	قبادی و همکاران (۱۴۰۰)	$UCS = 1.1505 SHV + 10.52$	۰/۸۷	ماسه‌سنگ
۱۹	عبدی و خانلری (۱۳۹۸)	$UCS = 3.615 H_R - 42.57$	۰/۹۱	ماسه‌سنگ
۲۰	در این مطالعه	$UCS = -686 + 4.41 SH + 243 \gamma_d$	۰/۸۴	توف
۲۱	در این مطالعه	$UCS = -175 + 2.05 SH + 72.6 \gamma_d$	۰/۸۹	ماسه‌سنگ
۲۲	در این مطالعه	$UCS = -37.5 + 0.866 SH + 23.6 \gamma_d$	۰/۷۳	مارن

HS: سختی اشمیت، γ_a (gr/cm³): دانسیته خشک، e: عدد نپرین، R: عدد سختی بازگشتی اشمیت، SHV: سختی اشمیت

مقایسه نتایج بدست آمده با مطالعات گذشته

در سال‌های اخیر استفاده از رگرسیون در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی برای برآورد پارامترهای مختلف به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۶ نتایج برخی مطالعات گذشته توسط محققین مختلف ارائه شده است. در رابطه ۷ مقاومت فشاری تک‌محوری ماسه‌سنگ از یک رابطه لگاریتمی دو متغیره با ضریب تعیین ۰/۸۶ بدست آمده است. در حالی که در این مطالعه

رابطه ۲۱ مقاومت فشاری تک‌محوری با یک رابطه خطی دو متغیره با ضریب تعیین ۰/۸۹ بدست آمده، که دقت بیشتر این رابطه را نشان می‌دهد. در رابطه ۱۱ (بازالت، آندزیت و توف) یک رابطه خطی تک متغیره با ضریب تعیین ۰/۹۵ بدست آمده است که در مقایسه با رابطه ۲۰ دقت بیشتری دارد. رابطه ۲۰ (توف) دو متغیره است و ضریب تعیین (۰/۸۴) کمتر اما قابل قبولی دارد. در روابط ۹، ۸ و ۱۰ مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ مارن با دقت

در این مطالعه طبقه‌بندی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری و وزن واحد حجم سنگ‌های مناطق مورد مطالعه با به دست آوردن سختی اشمیت آن‌ها ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در تمام سنگ‌های مورد بررسی، استفاده از رگرسیون چندمتغیره، نتایج معتبرتری نسبت به رگرسیون ساده ارائه می‌دهد.

منابع

- آقاباتی، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- جبین‌پور، ع. ر.، یاراحمدی بافقی، ع. ر.، غلام‌نژاد، ج (۱۳۹۷) مدل‌سازی زمین‌آماری تخریب‌پذیری توده‌سنگ مبتنی بر روش تجربی لابسچر در معدن سه‌چاهون، نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره ۲، شماره ۳، ص ۵۳-۶۹.
- حسنی‌پاک، ع (۱۳۸۹) زمین‌آمار (ژئواستاتستیک)، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم، ۳۱۴ ص.
- خانلری، غ (۱۳۸۸) زمین‌شناسی مهندسی (ویژه دانشجویان عمران)، انتشارات دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، ۳۶۴ ص.
- خانلری، غ.، فریدونی، د (۱۳۹۰) ارائه روابط تجربی به منظور محاسبه مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته سنگ‌های سخت با استفاده از نتایج چکش اشمیت، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۵، شماره ۱، ص ۱۲.
- رحیمی‌شهید، م.، گرمی، م.، لشکری‌پور، غ. ر (۱۴۰۰) استفاده از رگرسیون چندمتغیره برای ارزیابی تراوایی توده‌سنگ‌های ساختگاه سد خرسان ۲ با استفاده از ویژگی‌های سیستم ناپیوستگی، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۶، شماره ۳۱، ص ۳۲-۵۱.
- عبدی، ی.، خانلری، غ. ر (۱۳۹۸) تخمین ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از آزمایش سرعت موج و چکش‌اشمیت. نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۳، شماره ۲۵، ص ۳۳-۴۷.
- فریدونی، د (۱۳۸۷) زمین‌شناسی عمومی و مهندسی، انتشارات خانه ادبیات، ۴۵۰ ص.
- فهمی‌فر، ا.، و سروش، ح (۱۳۸۰) آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول.
- قبادی، م. ح (۱۳۷۷) خطرات زیست‌محیطی در شرق اهواز، اولین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، ص ۸۰۳-۸۱۴.
- قبادی، م. ح.، امیری، م.، رسولی‌فرح، م. ر (۱۴۰۰) مطالعه خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه‌سنگ‌های سازند قم و استفاده از آن‌ها به عنوان منابع قرضه (مطالعه موردی: روستای

قابل قبولی قابل محاسبه است. اما در این مطالعه (رابطه ۲۲) میزان ضریب تعیین (0.73) کمتر از روابط ۸، ۹ و ۱۰ بدست آمده است. در مطالعه حاضر روابط بدست آمده برای ماسه‌سنگ و توف در مقایسه با مارن ضریب تعیین بیشتری دارد. براساس نتایج بدست آمده از تصویر سه‌بعدی و منحنی میزان اشکال ارائه شده، می‌توان طبقه‌بندی جدول ۷ را برای ارزیابی سختی اشمیت به کمک مقاومت فشاری و وزن واحد حجم خشک سنگ‌ها انجام داد. با به دست آوردن مقدار سختی اشمیت می‌توان میزان مقاومت و وزن واحد حجم خشک تقریبی سنگ‌های مورد مطالعه را تخمین زد. باید این نکته را مدنظر قرار داد که این طبقه‌بندی نیاز به مطالعات بیشتر بر روی سازندهای مشابه مناطق دیگر ایران دارد و در حال حاضر می‌توان از آن عنوان تخمینی از مقاومت فشاری و وزن واحد حجم خشک در مناطق مورد مطالعه استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

پس از بررسی و تجزیه و تحلیل داده‌های سنگ‌های مختلف محدوده تغییرات خصوصیات فیزیکی، مکانیکی در شرایط خشک تعیین گردید و بین پارامترها روابط معناداری برقرار و نتایج برحسب بهترین برازش ارائه گردید. این روابط می‌تواند تخمین مناسبی از خصوصیات مهندسی سنگ پیش از آزمایش‌های مورد نیاز برای سنگ بکر ارائه دهد. براساس بهترین برازش‌ها، همبستگی خطی بین مقاومت فشاری تک‌محوری و چکش اشمیت در حالت طبیعی برای سنگ توف حدود ($R^2 = 0.70$)، برای ماسه‌سنگ برابر ($R^2 = 0.86$) و برای سنگ مارن حدود ($R^2 = 0.68$) می‌باشد که با نتایج تحقیقات مشابه (جدول ۶) در این زمینه مطابقت دارد. همچنین میزان همبستگی خطی بین مقاومت فشاری تک‌محوری و وزن واحد حجم خشک برای سنگ توف برابر ($R^2 = 0.41$)، برای ماسه‌سنگ برابر ($R^2 = 0.86$) و برای سنگ مارن حدود ($R^2 = 0.63$) می‌باشد. میزان همبستگی خطی دومتغیره بین مقاومت فشاری تک‌محوری، وزن واحد حجم خشک و چکش اشمیت برای سنگ توف ($R^2 = 0.84$)، برای ماسه‌سنگ برابر ($R^2 = 0.89$) و برای سنگ مارن حدود ($R^2 = 0.73$) می‌باشد. بیشترین اعتبار روابط ارائه شده مربوط به ماسه‌سنگ‌ها با بیش از ۸۰ درصد می‌باشد. هم‌چنین فاصله اطمینان ماسه‌سنگ‌ها دامنه وسیع‌تری از نمونه‌ها را در برمی‌گیرد.

- Hebib, R., Belhai, D. Alloul, B (2017) Estimation of uniaxial compressive strength of North Algeria sedimentary rocks using density, porosity, and Schmidt hardness, Arab. J. Geosci. 10: 383.
- Hudson, J. A., Harrison, J. P (2000) Engineering rock mechanics, an introduction to the principles, Elsevier Science Ltd. pp 458.
- ISRM (1981) Basic geotechnical description of rock masses, International Society of rock mechanics Commission on the classification of rock and masses. Int Rock Mech Min Sci Geomech., 18: 85-110.
- ISRM (1981(b)) Suggested Methods. Rock characterization testing and monitoring, In: Brown ET, (Eds.) Oxford: Pergamon Press.
- ISRM (2007) The Complete ISRM, Suggested Methods for Rock characterization testing and monitoring, International Society of rock mechanics.
- Jamshidi, A., Nikudel, M. R., Khamsehchian, M., Sahamieh, R. Z., Abdi, Y (2016) A correlation between P-wave velocity and Schmidt hardness with mechanical properties of travertine building stones. Arab. J. Geosci., 9 (10): 568.
- Kahraman, S (2001) Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 38: 981-994.
- Kahraman, S., Fener, M., Gunaydin, O (2002) Predicting the Schmidt hammer values of in situ intact rock from core sample values, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 39: 395-399.
- Katz, O., Reches, Z., Roegiers, J. C (2000) Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 37: 723-728.
- Kılıc, A. and Teymen, A (2008) Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. Bull Eng. Geol. Environ., 67: 237-244.
- Kiyoo, M (2007) Experimental Rock Mechanics, Taylor & Francis /Balkema, London, UK pp 380.
- Morales, T., Uribe-Etxebarria, G., Uriarte, J. A., de Valderrama, I. F (2004) Probabilistic slope analysis state of play. Eng. Geol., 71: 343-362.
- 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.
- Shalabi, F. I., Cording, E. J., Al-Hattamleh, O. H (2007). Estimation of rock engineering properties Using hardness tests. Eng. Geol., 90: 138-147.
- Singh, R. N., Hassani, F. P., Elkington, P. A. S (1983) The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations. In: لتگاه، شمال همدان)، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۵، شماره ۲۹، ص ۵۵-۷۰.
- کرمی، م.، رحیمی‌شهید، م.، لشکری‌پور، غ. ر (۱۴۰۰) پیش‌بینی شاخص شکنندگی و تعیین همبستگی تجربی بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک سازند تله‌زنگ در ساختگاه سد هواسان، مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۵، شماره ۳۰، ص ۳۳-۴۶.
- Anon (1996) the description and classification of weathering rocks for engineering purposes. Q J Eng Geol., 28: 207-242.
- Aydin, A., Basu, A (2005) The Schmidt Hammer in rock material characterization, Eng. Geol., 81:1-14.
- Aufmuth, R. E (1973) A systematic determination of engineering criteria for rocks. Bull. Assoc. Eng. Geol., 11: 235-245.
- Buyuksagis, I. S., Goktan, R. M (2007) The effect of Schmidt Hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 44: 299-307.
- Cargill, J. S., Shakoor, A (1990) Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 27: 495-503.
- Chamanzadeh, A., Moshrefy-Far, M. R., Rahimi Shahid, M., Moosavi, S. M (2016) Statistical analysis of the rock masses permeability in Shahid dam site. International Conference on Civil Engineering, Architecture, Urban Management and Environment in the Third Millennium, Rasht, Iran, p.12.
- Diamantis, K., Gartzos, E., 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. Eng. Geol., 108: 199-207.
- Dincer, I., Acar, A., Cobanoglu, I., Uras, Y (2004) Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs. Bull. Eng. Geol. Environ., 63: 141-148.
- Gupta, V., Sharma, R (2012) Relationship between textural, petrophysical and mechanical properties of quartzites: A case study from northwestern Himalaya, Engineering Geology., 135 (136): 1-9.
- Gokceoglu, C., Zorlu, K (2004) A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and themodulus of elasticity of a problematic rock, Engineering Applications of Artificial Intelligence., 17: 61-72.
- Haramy, K. Y., DeMarco, M. J (1985) Use of the Schmidt hammer for rock and coal testing. In: 26th US Symp. On Rock Mechanics, Rapid City, SD., 549-555.

Proc. 24th US Symp. On Rock Mech. Texas A&M Univ. AEG, 599–609.

Teymen, A (2021) Statistical models for estimating the uniaxial compressive strength and elastic modulus of rocks from different hardness test methods, *Heliyon* 7. 15pp.

Yasar, E., Erdogan, Y(2004) Estimation of rock physiomechanical properties using hardness methods, *Eng. Geol.*, 71: 281-288.

Yilmaz, I., Sendir, H (2004) Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas, (Turkey). *Eng. Geol.*, 66: 211-219.

The presentation of simple and multiple regression relationships to the evaluation of uniaxial compressive strength sedimentary and pyroclastic rocks with usage experimental of the Schmidt hammer

S. Moradi¹, M. Amiri^{2*}, M. Rahimi Shahid³ and S. Karrari⁴

1- Dept., of Geology, Faculty of Science, Kharazmi University, Tehran, Iran

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

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

* a.mehrdad1372@yahoo.com

Recieved: 2021/8/17 Accepted: 2021/10/25

Abstract

In engineering projects (dams, tunnels, and slope stability) the strength properties of the rocks affect the construction operations. In some cases, conducting field experiments is difficult, time-consuming, and expensive. Therefore, researchers have introduced practical relationships for predicting strength properties of rocks (e.g. uniaxial compressive strength (UCS)). Uniaxial compressive strength is one of the most important rock parameters in studies of rock mechanics. This parameter can be determined directly in the laboratory or can be estimated through indirect methods like the Schmidt hammer. The estimation of uniaxial compressive strength via the number of Schmidt hammer is easier, faster, and cheaper than a direct measurement. The major purpose of this study is to analyze the relationships between the uniaxial compressive strength of rocks with the Schmidt stiffness. In this research, three samples of rock have been studied including Aghajari sandstone, Qom marly formation, and Karaj tuff. With respect to the importance of this subject in this study, new practical relationships have been presented to calculate uniaxial compressive strength whose application show desired results. In order to achieve this aim, the most appropriate and logical relationships between Schmidt hardness tests with uniaxial compressive strength has been introduced by the regression method. The relationships between uniaxial compressive strength, the Schmidt hammer, and dry density of rock have been evaluated by simple and multiple regression (SR/ MR) techniques using Minitab 19 software. The statistical analyses revealed the existence of powerful correlations between the uniaxial compressive strength, Schmidt hardness features of rocks, and dry density in samples of sandstone, marl, and tuff. According to this study, multivariate regression presents more credible results.

Keywords: Uniaxial Compressive Strength, Schmidt hammer, Sandstone, Tuff, Marl, Regression