



مقاله پژوهشی

رابطه خصوصیات مکانیکی با مقدار درصد کوارتز و فلدسپات سنگ های رسوبی

پوریا حیدریان^۱، محمدرضا آصف^{۱*}، جعفر خادمی حمیدی^۲، مهدی تلخابلو^۱

۱- گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: اسفند ۱۴۰۱، پذیرش: تیر ۱۴۰۲)

چکیده

خصوصیات مقاومتی سنگ بکر تابع ترکیب کانی شناسی و بافت سنگ است اما خصوصیات مقاومتی توده سنگ را می توان از طریق تحلیل ویژگی های سنگ بکر و ناپیوستگی ها به دست آورد. ویژگی های بافتی سنگ ها بر خواص پتروفیزیکی و مکانیکی آن ها تأثیر می گذارد. برخی از ارتباطات کمی بین خصوصیات پتروگرافی سنگ و خواص مکانیکی یافت شده است. این پارامترها تا حد زیادی پایداری توده سنگ را کنترل می کنند؛ بنابراین، ارزیابی رفتارهای آنی و بلندمدت سنگ بر اساس برهم کنش بین پارامترهای مختلف بافت سنگ، خواص پتروفیزیکی و مکانیکی برای بسیاری از سازه های ژئومهندسی مهم است. در این تحقیق رابطه بین خصوصیات مکانیکی و ترکیب کانی شناسی تعدادی از سنگ های رسوبی که از نقاط مختلف کشور برداشت شده اند با انجام آزمایش های مقاومت تراکمی و کششی بر روی نمونه سنگ های جمع آوری شده، در آزمایشگاه تعیین شده است. سپس با روش XRD ترکیب کانی شناسی آنها مشخص گردید و با استفاده از روش های آماری از جمله رگرسیون خطی و چند متغیره رابطه بین خصوصیات مقاومتی با ترکیب کانی شناسی نمونه سنگ ها تعیین شده است. نتایج به دست آمده در این تحقیق بیانگر رفتارهای متفاوتی از کانی های سازنده سنگ در برابر خصوصیات مکانیکی است. به طوری که کانی های غالب در نمونه سنگ ها بر روی خصوصیات مکانیکی آنها تأثیر زیادی خواهند داشت و کنترل کننده خصوصیات مکانیکی سنگ ها هستند.

کلمات کلیدی

ترکیب کانی شناسی، مقاومت مکانیکی، مقاومت تراکمی تک محوری، مقاومت کششی برزیلی، چکش اشمیت، تحلیل

رگرسیون

*عهده دار مکاتبات: asef@khu.ac.ir

DOI:10.22034/ANM.2023.19846.1592

۱- مقدمه

خواص مکانیکی یک سنگ تا حد زیادی به خصوصیات پتروگرافی یا بافت آن بستگی دارد. برخی از ارتباطات کمی بین خصوصیات پتروگرافی سنگ و خواص مکانیکی یافت شده است؛ بنابراین، اگر به هر دلیل مغزه‌های حفاری با کیفیت مناسب برای انجام آزمایش‌های مکانیک سنگ در دسترس نباشند، تخمین رفتار مکانیکی سنگ بر اساس بافت و کانی‌های موجود به‌عنوان یک مرجع و چارچوب مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً فرض می‌شود که ویژگی‌های مقاومتی موادی مانند بتن یا ماسه‌سنگ که متشکل از مجموعه‌ای از قطعات هستند، با استحکام مواد تشکیل‌دهنده، ماهیت و میزان چسبندگی یا سیمان شدگی آن‌ها تعیین می‌شوند. مقاومت توده سنگ تابع خصوصیات (مصالح) سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها است. خصوصیات مقاومتی سنگ بکر تابع ترکیب کانی‌شناسی و بافت سنگ است اما خصوصیات مقاومتی توده سنگ را می‌توان از طریق تحلیل ویژگی‌های سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها به دست آورد. خصوصیات بافتی اثرگذار بر مقاومت سنگ و حفر پذیرگی عبارتند از: ۱- اندازه دانه ۲- شکل دانه ۳- درجه قفل‌شدگی ۴- تخلخل ۵- جهت‌یابی دانه‌ها و ۶- ماهیت مرزهای دانه [۱]. بافت سنگ^۱ به‌صورت درجه بلورین شدگی، اندازه دانه، گرد شدگی و یا فابریک یا رابطه هندسی مواد تشکیل‌دهنده سنگ تعریف می‌شود. در واقع منظور از بافت، کمی کردن پارامترهایی از قبیل شکل دانه، جهت‌یابی، درجه قفل‌شدگی^۲ دانه‌ها و نسبت بین ماتریکس و دانه است [۱].

خواص مکانیکی سنگ‌ها به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر خواص کانی‌شناسی آن‌ها است. قوی‌ترین سنگ‌ها عموماً سنگ‌هایی هستند که دارای سیمانی سیلیسی هستند، پس‌از آن کلسیت و کانی‌های آهنی (مانند هماتیت و کرومیت)، در حالی که سنگ‌هایی که دارای سیمانی از جنس رس و فیلسیلیکات (سیلیکات‌های ورقه‌ای) می‌باشند، ضعیف هستند. محققان اخیراً توجه فزاینده‌ای را به استفاده از روش‌های شبیه‌سازی برای پیش‌بینی رفتار سنگ با ترکیب کانی‌شناسی مختلف معطوف کرده‌اند. چندین نویسنده ارتباط بین ترکیب کانی‌شناسی و خواص ژئومکانیکی انواع سنگ‌های مختلف را بررسی کرده‌اند.

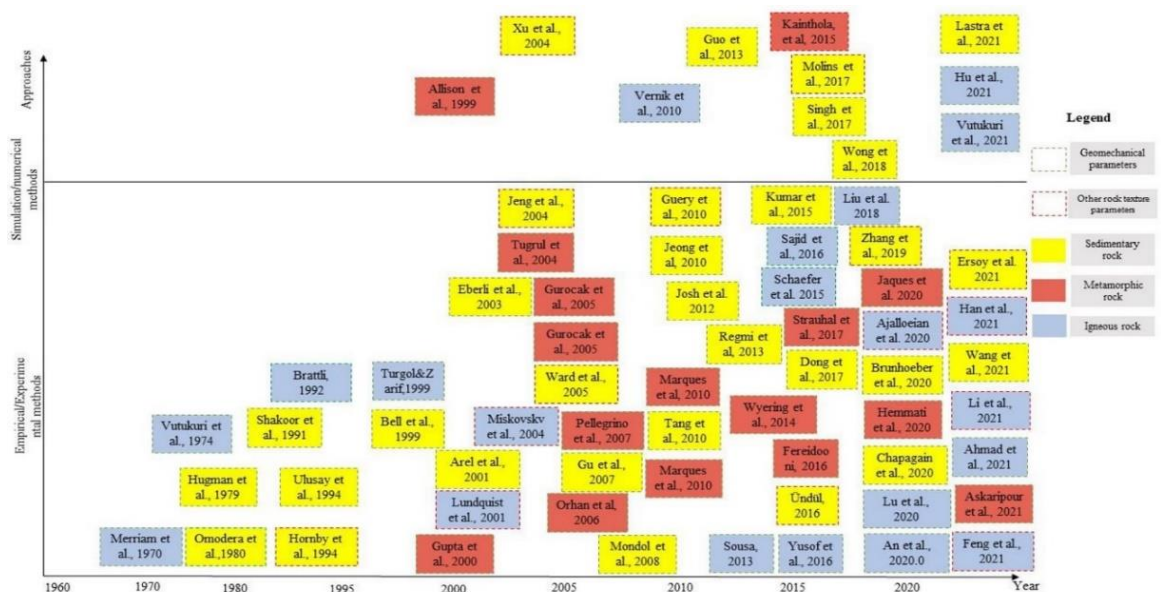
شکل ۱ در یک نمودار روش‌های تجربی و عددی شبیه‌سازی‌های مورد استفاده برای ارزیابی اثرات کانی‌شناسی و پارامترهای بافتی بر پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌ها بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۱ را نشان می‌دهد. این نمودار نشان‌دهنده مطالعات سنگ‌های رسوبی (جعبه زرد)، سنگ آذرین (جعبه آبی) و سنگ دگرگونی (جعبه قرمز) است. خط‌چین‌های قرمز و سبز نشان‌دهنده ماهیت مطالعه است، یعنی اینکه آیا تمرکز قابل‌توجهی بر روی خواص مکانیکی یا بافت سنگ دارد یا خیر.

در زمینه خصوصیات بافتی، رابطه و تأثیر آن‌ها بر خصوصیات مکانیکی و حفر پذیرگی سنگ‌ها تحقیقات زیادی انجام شده است. مریام و ریک^۳ [۲]. رابطه بین مقاومت کششی و درصد کوارتز را بررسی و به‌وضوح بیان کردند. درصد بیشتر کوارتز باعث افزایش مقاومت سنگ می‌شود و در مقابل آن افزایش درصد فلدسپات‌ها باعث کاهش مقاومت سنگ می‌شود. ایرفان و دیرمن (۱۹۷۸) یک شاخص میکرو پتروگرافی را با پارامترهای مقاومتی سنگ مطابقت دادند اما به دلیل ماهیت سنگ‌ها نمی‌توانند همیشه با یکدیگر تطابق داشته باشند [۲]. شکور و بونلی^۴ [۳] اثرات ویژگی‌های پتروگرافی ماسه‌سنگ‌ها بر روی خواص مکانیکی سنگ‌ها را بررسی کردند و گزارش کردند که ماسه‌سنگ‌هایی با چگالی بالا، درصد جذب کم، تخلخل کم و درصد بالایی از تماس‌های مضرش دارای مقادیر بالایی از مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته هستند. طغرل و ظریف [۴] در مطالعه خود به تحلیل مندرز و همکاران^۵ (۱۹۶۶) [۵] اشاره کردند. این تحلیل در مورد بافت و ریزساختارهای گرانیته همراه با ترکیب کانی‌شناسی است. آن‌ها مشخص کردند که مشخصه پتروگرافی همبستگی خوبی با خواص مکانیکی دارد. اثر اندازه دانه بر روی مقاومت را بررسی کردند و نشان دادند که یک رابطه لگاریتمی معکوس بین اندازه دانه و مقاومت سنگ وجود دارد، همان‌گونه که قبلاً ابرهارت^۶ (۱۹۹۹) [۶] آن را پیشنهاد داده بود. چاتری و مخاپای^۷ [۷] یک سری معادلات پیشنهاد کردند تا خواص پتروفیزیکی را به خواص ژئومکانیکی سنگ مرتبط کنند. اوزلرک و همکاران [۸] تماکارا و همکاران [۹] روابط بسیاری از خصوصیات پتروگرافی سنگ‌ها با خواص ژئومکانیکی آن‌ها را مطالعه کردند. این نمونه‌ها ماسه‌سنگ از دامنه‌های هیمالیا بودند. اوندل و اثر [۱۰] نشان دادند که فنوکریست‌ها (درشت‌بلورها)

شکست مقاومتی خصوصاً وقتی که بحث سایش مطرح باشد و سنگ تحت تنش برشی قرار گیرد، در صورتی که سنگ فاقد هرگونه ریز درزه و باند بین‌دانه‌ای ضعیف باشد، دانه‌ها و کانی‌هایی مثل کوارتز مستقیماً درگیر می‌شوند و شکست از محل تماس کانی‌ها و کریستال‌ها شروع می‌شود، در غیر این صورت به نظر می‌رسد مقاومت عمدتاً تابع دانه‌بندی و باند بین‌دانه‌ای باشد.

مطالعه حاضر در درجه اول بر ارتباط خواص مقاومت کششی غیرمستقیم انواع مختلف سنگ‌های رسوبی با متغیرهای کمی پتروگرافی آن‌ها متمرکز است. باین‌حال، مقاومت فشاری تک‌محوری نیز در تحلیل‌ها گنجانده شده است؛ زیرا از ویژگی‌های مقاومتی است که در هنگام ارائه مشخصات توده سنگ‌ها بر آن تأکید می‌شود. همچنین مقاومت تراکمی تک‌محوری ماده سنگ یکی از مهم‌ترین پارامترهای موردنیاز برای تحلیل‌های مهندسی در پروژه‌های عمرانی و معدنی است. این پارامتر یکی از پارامترهای اصلی در تعیین شرایط برش پذیری سنگ‌ها است و در مدل‌های مختلفی که برای پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفر تونل توسعه یافته‌اند یکی از پارامترهای ورودی اصلی است. این پارامتر را می‌توان از راه‌های مختلفی به دست آورد که از جمله می‌توان به آزمون چکش اشمیت، آزمون بار نقطه‌ای و غیره اشاره کرد؛ اما این روش‌ها علیرغم سادگی، از دقت کافی برخوردار نمی‌باشند و برای تعیین این پارامتر بهترین راه آزمون استاندارد مقاومت فشاری تک‌محوری است (ASTM D 2938-95).

و ماتریس سنگ به‌عنوان عوامل اصلی مؤثر بر انتشار ترک در نظر گرفته می‌شوند. افزایش درصد فنوکریست منجر به افزایش کرنش شعاعی و افزایش نسبت پواسون می‌شود. ترک‌ها تمایل دارند به موازات بار اعمال‌شده با افزایش درصد ماتریس سنگ (درصد فنوکریست کم) هم‌راستا شوند. افزایش ماتریس سنگ، نسبت پواسون را در مقایسه با نمونه‌هایی با درصد فنوکریست بالا کاهش می‌دهد. یوسف و زبیدی [۱۱] رابطه بین خواص ژئومکانیکی سنگ و نسبت کوارتز به فلدسپات (Q/F) را موردبررسی قرار دادند و نشان دادند که یک رابطه مستقیم بین مقاومت تراکمی و کششی سنگ‌های گرانیتی با نسبت کوارتز به فلدسپات وجود دارد. همچنین عده‌ای دیگر از محققین هستند که نتایج تحقیقات آن‌ها با موارد بالا متناقض است از جمله آلبر و قهرمان [۱۲] که علت آن هم ممکن است متفاوت بودن منشأ سنگ‌ها باشد. باوجوداینکه مطالعات و بررسی‌های زیادی در رابطه با همبستگی ویژگی‌های پتروگرافی و خواص مکانیکی سنگ‌ها انجام‌شده است، هنوز تأثیر ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافت بر خواص مهندسی به‌خوبی شناسایی نشده است. این به این دلیل است که سنگ‌های مختلف دارای کانی‌ها و ناپیوستگی‌های متفاوتی هستند به‌نحوی که هیچ ویژگی کانی‌شناسی خاصی وجود ندارد که بتوان آن را برای تعیین مقاومت سنگ‌ها برای سه نوع سنگ آذرین، رسوبی و دگرگونی بیان کرد. هدف از این مطالعه کمی کردن روابط بین خصوصیات پتروگرافی و خواص مکانیکی تعدادی از سنگ‌های رسوبی است. البته در



شکل ۱: کارهای اصلی انجام‌شده بر روی اثرات ترکیب کانی‌شناسی بر خصوصیات ژئومکانیکی سنگ [۲۷].

۲-۱- مقاومت تراکمی تک‌محوری

بر اساس استانداردهای این آزمون (ASTM D2938-95)، مقاومت تراکمی تک‌محوری بر روی مغزه‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۲/۵ انجام می‌گیرد. مقاومت تراکمی تک‌محوری (UCS) نمونه‌ها از طریق تقسیم حداکثر بار اعمالی بر نمونه به سطح مقطع اولیه نمونه محاسبه می‌شود (رابطه ۱).

$$\sigma_c = F/A \quad (1)$$

در اینجا F نیروی اعمالی در لحظه شکست نمونه، A سطح مقطع نمونه است.

۲-۲ مقاومت کششی غیرمستقیم برزیلی (BTS)

از میان روش‌های مختلفی که برای تعیین مقاومت کششی پیشنهاد شده است، روش برزیلی از همه روش‌های موجود ساده‌تر بوده و به‌عنوان روشی مطمئن برای تعیین مقاومت کششی سنگ رایج است. این آزمایش توسط ISRM، ASTM D3967 استاندارد شده است. آزمایش مقاومت کششی برزیلی بر روی مغزه‌های نمونه سنگ به قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر یک انجام می‌گیرد. بار کششی اعمالی بر نمونه به‌صورت پیوسته در یک نرخ ثابت ۲۰۰ (N/s) اعمال می‌شود و این اعمال تنش تا لحظه‌ای که ۵ میلی‌متر جابه‌جایی در نمونه ایجاد شود و شکستگی در نمونه رخ دهد ادامه می‌یابد. در این آزمایش هنگامی که نمونه تحت تأثیر تنش محوری قرار می‌گیرد، میدان تنش کششی در امتداد قطر نمونه گسترش یافته و ترک قطری در داخل آن در نتیجه کشش ایجاد و توسعه می‌یابد. حداکثر بار (P) برحسب کیلو نیوتن در لحظه شکست ثبت شده و مقاومت کششی برزیلی (BTS) نمونه از طریق تقسیم حداکثر بار اعمالی بر نمونه، به سطح مقطع اولیه نمونه محاسبه می‌شود.

$$\delta_t = \frac{2P}{\pi dt} \quad (2)$$

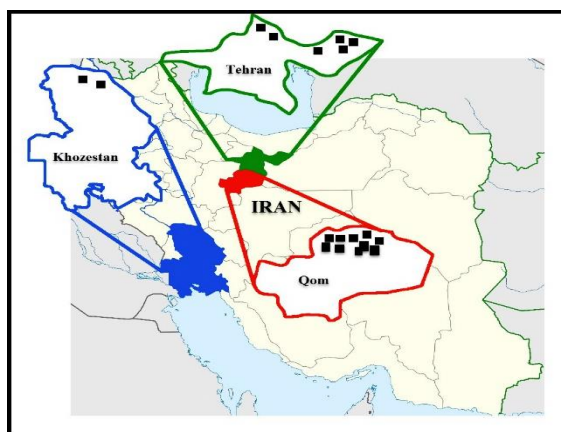
که در آن t ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر و d قطر نمونه برحسب میلی‌متر است.

۲-۳ چکش اشمیت

این ابزار برای ارزیابی اولیه مقاومت تراکمی تک‌محوری و مدول الاستیسیته مصالح سنگی کاربرد گسترده‌ای پیدا

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق ابتدا با انجام آزمایش‌های مکانیکی مقاومت تراکمی تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌ها تعیین شد. سپس به‌منظور تعیین ترکیب کانی‌شناسی، نمونه‌ها به آزمایشگاه XRD منتقل شده و درصد کانی‌های موجود در هر نمونه تعیین شده است. رابطه بین ترکیب کانی‌شناسی سنگ و خصوصیات مکانیکی با کمک روش‌های آماری تعیین می‌شود. برای اینکه نتایج این پژوهش بتواند به‌صورت کاربردی و عملیاتی در پروژه‌های اجرایی کشور مورد استفاده قرار گیرد، تعداد ۱۸ نمونه سنگ از طرح‌های فعال راه‌آهن و تونل‌های احداثی در استان‌های تهران، قم و خوزستان انتخاب و جمع‌آوری شدند که در شکل ۲ موقعیت این مناطق نشان داده شده است. در جدول ۱ نام نمونه‌ها، سازند مربوطه، محل نمونه‌گیری و علائم اختصاری آن‌ها آورده شده است.



شکل ۲: محل جمع‌آوری نمونه‌ها.

جدول ۱: نام سنگ، سازند و نشانه آن‌ها

ردیف	نام سنگ	نام سازند	محل نمونه‌گیری	نشانه
۱	ماسه‌سنگ بالایی قرمز	قرمز بالایی	قم	GH-UP
۲	گل‌سنگ	گور پی	خوزستان	GO-2 و GO-3
۳	ماسه‌سنگ	لالون	تهران	LA-4 تا LA-1
۴	ماسه‌سنگ	هزار دره	تهران	MH-1
۶	ماسه‌سنگ بالایی قرمز	قرمز بالایی ۲	قم	BH1 - BH10

درصد هوازدهگی بیشتر باشد، میزان کاهش بیشتر خواهد بود. افزایش درصد رطوبت سنگ باعث کاهش غیرخطی عدد بازگشت (R) می‌شود [۱۳]. در جدول ۲ نتایج خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

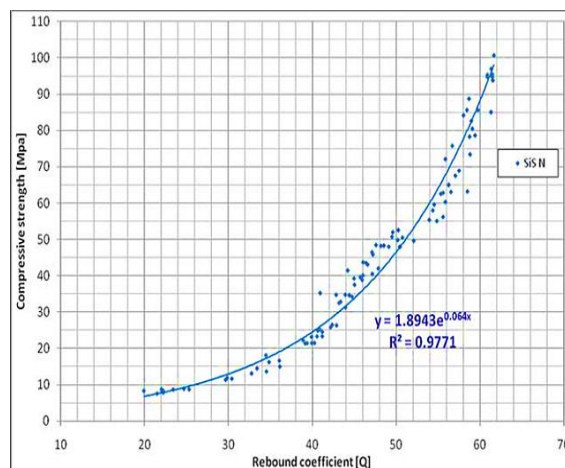
جدول ۲: خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها

نام نمونه	σ_c (MPa)	E (MPa)	نسبت پوآسون	σ_t (MPa)	Schmidt (R)
GH-UP	۲۷٫۶۰	۲۹۳۰	۰٫۲۹	۱٫۶	۴۰
GO-3	۱۰٫۴۰	-	۰٫۳۱	۱٫۷۵	۲۰
GO-2	۱۲٫۱۴	-	۰٫۳۳	۲٫۵۳	> ۲۰
MH-1	۱۷٫۱۸	۲۱۸۳	۰٫۳	۱٫۶۲	۳۸
CA	۲۸	۹۷۴۰	۰٫۳۱	۱٫۵۱	۴۱
LA-1	۳۲٫۲۵	۱۵۱۴۵	۰٫۲۸	۲٫۱۳	۴۵
LA-2	۶۲٫۵۶	۱۷۷۱۰	۰٫۲۷	۵٫۷۷	۵۵
LA3	۶۱	۹۸۵۰	۰٫۳	۸٫۲۴	۵۳
LA4	۴۲	۸۵۴۰	۰٫۳۲	۵٫۶	۴۶
BH1	۱۷٫۶۰	۹۹۲۴	۰٫۳	۱٫۳۵	۲۸
BH3	۲۵٫۲۰	۱۲۱۸۷	۰٫۲۹	۱٫۸۴	۳۶
BH4	۲۳	۸۵۰۰	۰٫۳۱	۳٫۴	۲۶
BH5	۳۳	۸۸۷۰	۰٫۳	۴٫۴۶	۳۷
BH6	۳۹	۱۰۲۰۰	۰٫۳	۵٫۳۸	۳۸
BH7	۳۱	۹۳۵۰	۰٫۳۱	۳٫۶	۴۰
BH8	۴۵	۱۰۴۷۰	۰٫۳	۵٫۷	۵۰
BH9	۱۸	۷۴۲۰	۰٫۳۲	۳٫۲	۳۴
BH10	۴۸	۱۰۶۸۰	۰٫۲۹	۶٫۴۰	۵۱

۲-۴- درصد کانی‌های موجود در سنگ‌ها

پراش پرتو ایکس^۹ (XRD) روشی برای آنالیز و شناسایی عمومی کانی‌ها و شناسایی تخصصی کانی‌های رسی است که اطلاعاتی در مورد ترکیب، نوع و محتوای کانی رسی به دست می‌دهد. برای آنالیز، هر نمونه ابتدا به صورت پودر بسیار ریز درآمده و در معرض بمباران پرتوهای اشعه ایکس با طول موج ۰٫۱-۱۰۰ آنگستروم قرار داده می‌شود. به منظور تعیین دقیق درصد کانی‌های موجود در نمونه سنگ‌های مورد بررسی در این تحقیق، نمونه‌ها به آزمایشگاه مینرالوگرافی سازمان زمین‌شناسی کشور منتقل شده و آزمایش XRD بر روی آن‌ها انجام شد که نتایج آن شامل نوع و درصد کانی‌های موجود در جدول ۳ ارائه شده است.

کرد [۱۳]. انواع استاندارد چکش اشमित عبارت‌اند از نوع L و نوع N که برای سطح‌های مختلفی از انرژی ساخته شده‌اند به طوری که نوع L انرژی که آزاد می‌کند ۰٫۷۳۵ نیوتن متر (ژول) و نوع N ۲٫۲۰۷ نیوتن متر (ژول) است. مزیت چکش‌های با سطح انرژی بالاتر در آن است که برای سطوح ناهمسانگردی (مانند حالتی که دانه‌های درشت در زمینه ریز قرار دارند) باعث می‌شود که میزان پراکندگی مقادیر بازگشت چکش (R) کاهش پیدا کند به عبارت دیگر میزان خطا برای مصالح ناهمسانگرد کاهش می‌یابد [۱۳]. عدد بازگشت چکش (R) به عنوان شاخصی از سختی سطح سنگ در نظر گرفته می‌شود هرچه استقامت سنگ بیشتر باشد، میزان برگشت ضربه نیز بیشتر می‌شود. حداکثر مقدار برگشت ثبت شده با استفاده از نمودارها و با در نظر گرفتن وزن واحد حجم سنگ، قابل تبدیل به مقاومت تراکمی برحسب مگا پاسکال است (شکل ۳). هان و فنگ [۱۴] به صورت تحلیلی^۸ نشان دادند که بر روی سنگ‌های ضعیف همگن ($UCS < 10 \text{ MPa}$) هیچ گونه بازگشتی رخ نخواهد داد که علت آن هم پلاستیسیته قوی آن‌ها است، در حالی که بر روی سنگ‌های بسیار قوی ($UCS > 300 \text{ MPa}$) مقادیر افزایش نرخ بازگشت (R) آرام‌تر است [۱۳].



شکل ۳: نمودار تعیین مقاومت تراکمی تک‌محوری از آزمون چکش اشमित (نوع N) [۱۳].

عوامل مختلفی در تعیین میزان صحت نتایج آزمون چکش اشमित نقش دارند از جمله: نوع چکش، نرمال کردن عدد برگشت چکش، ابعاد نمونه، هموار بودن سطح سنگ، درصد هوازدهگی و درصد رطوبت و زاویه اعمال ضربه بر سطح سنگ. تحقیقات نشان می‌دهد که مقدار کمی هوازدهگی قادر به کاهش عدد بازگشت چکش است و هر چه

کوارتز (Q)	۱۵	
BH4	۴۳	فلدسپات (F)
	۲۲	کانی رسی (CL)
	۲۰	سایر کانی‌ها
	۳۰	کوارتز (Q)
BH5	۲۸	پلاژیوکلاز (F)
	۲۲	کانی رسی (CL)
	۲۰	سایر کانی‌ها
	۵۱	کوارتز (Q)
BH6	۱۹	ارتوکلاز (F)
	۱۷	آنالیسم (An)
	۱۳	سایر کانی‌ها
	۵۷	کوارتز (Q)
BH7	۳۰	فلدسپار (F)
	۸	کلسیت (Ca)
	۵	سایر کانی‌ها
	۵۵	کوارتز (Q)
BH8	۱۵	پلاژیوکلاز (F)
	۱۴	کانی رسی (CL)
	۱۶	کلسیت (Ca)
	۲۵	کوارتز (Q)
BH9	۵۰	فلدسپات (F)
	۱۵	کانی رسی (CL)
	۱۰	سایر کانی‌ها
	۷۰	کوارتز (Q)
BH10	۵	فلدسپار (F)
	۱۲	کلسیت (Ca)
	۱۳	سایر کانی‌ها

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارتباط بین درصد کوارتز با مقاومت مکانیکی سنگ

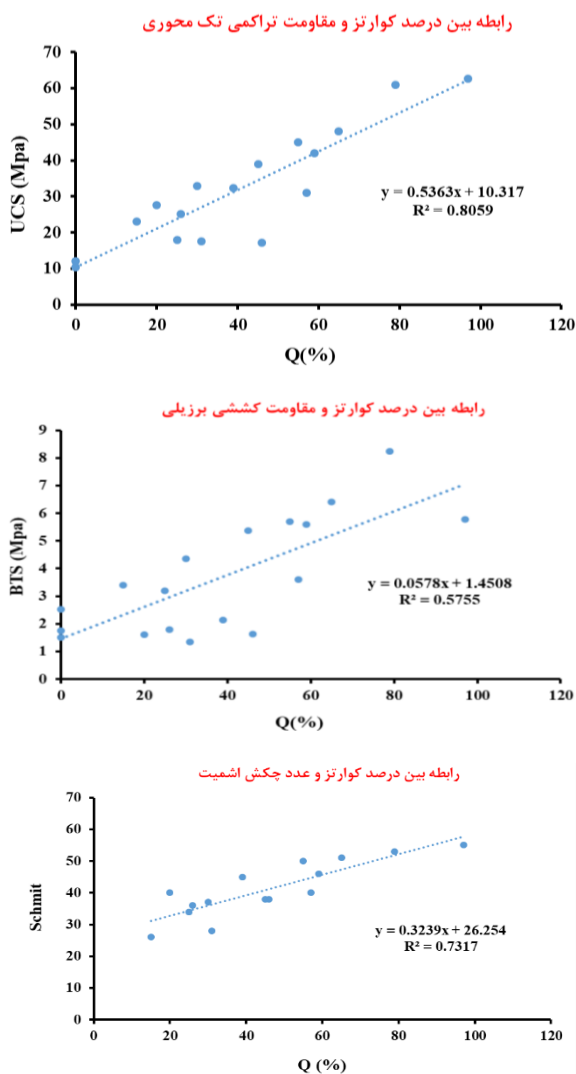
کانی کوارتز یکی از مهم‌ترین کانی‌های سازنده سنگ‌ها است که تأثیر آن در مقاومت سنگ توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. به علت ترکیب‌های شیمیایی مختلف، ساختار مولکولی، پیوند شیمیایی و کانی‌سازی متنوع در سنگ‌ها در طبیعت ملاحظه می‌شود؛ که همین تنوع موجب تفاوت در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها می‌شود. به عبارت دیگر سنگ‌ها با کانی‌های مختلف دارای رفتار مکانیکی متفاوتی هستند [۱۵]. دو ویژگی مهم کوارتز که کنترل‌کننده رفتار آن است عبارت‌اند از پیوند

جدول ۳: ترکیب کانی‌شناسی و درصد تشکیل‌دهنده آن‌ها بر

اساس نتایج آزمایش XRD

نام نمونه	کانی‌های موجود در هر نمونه	درصد کانی‌ها	Q/F
GH-UP	کوارتز (Q)	۲۰	۰٫۵۵
	پلاژیوکلاز (F)	۳۶	
	کلسیت (Ca)	۱۷	
	کانی رسی (CL)	۲۴	
GO3	آنالیسم (An)	۳	۰٫۰۰
	پلاژیوکلاز (F)	۴۶	
	کلسیت (Ca)	۵۲	
	کانی رسی (CL)	۱	
LA2	سانیدین (Sn)	۱	۴۸٫۵
	کوارتز (Q)	۹۷	
	فلدسپات (Or)	۲	
	کلسیت (Ca)	۱	
MH1	کوارتز (Q)	۴۶	۰٫۸۵۲
	فلدسپات (F)	۵۴	
	کوارتز (Q)	۳۹	
	پلاژیوکلاز (F)	۵۵	
LA1	کلسیت (Ca)	۵	۰٫۷۰۹
	آنالیسم (An)	۱	
	کوارتز (Q)	۳۱	
	پلاژیوکلاز (F)	۳۰	
BH1	کلسیت (Ca)	۲۱	۱٫۰۲۳
	کانی رسی (CL)	۱۸	
	پلاژیوکلاز (F)	۴۸	
	کلسیت (Ca)	۴۲	
GO2	کانی رسی (CL)	۲	۰٫۰۰
	سانیدین (Sn)	۸	
	کوارتز (Q)	۲۶	
	پلاژیوکلاز (F)	۳۸	
BH3	کلسیت (Ca)	۱۷	۰٫۶۸۴
	کانی رسی (CL)	۱۹	
	کلسیت (Ca)	۹۶	
	اپک (OP)	۴	
LA3	کوارتز (Q)	۷۹	۱۹٫۷۵
	فلدسپار (F)	۴	
	کانی رسی (CL)	۹	
	اپک (OP)	۸	
LA4	کوارتز (Q)	۵۹	۴٫۵۳
	فلدسپار (F)	۱۰	
	کانی رسی (CL)	۲۴	
	سایر کانی‌ها	۷	

عدد چکش اشमित می‌شود که علت آن می‌تواند سختی بالای کانی کوارتز باشد که افزایش درصد آن در سنگ سبب افزایش مقاومت کلی سنگ خواهد شد. نتایج این تحقیق بیانگر وجود یک رابطه خطی مستقیم با ضریب تطابق خوب بین این دو پارامتر است (شکل ۴).



شکل ۴: رابطه بین درصد کوارتز و مقاومت تراکمی تک محوری، کششی و عدد چکش اشमित نمونه سنگ‌ها

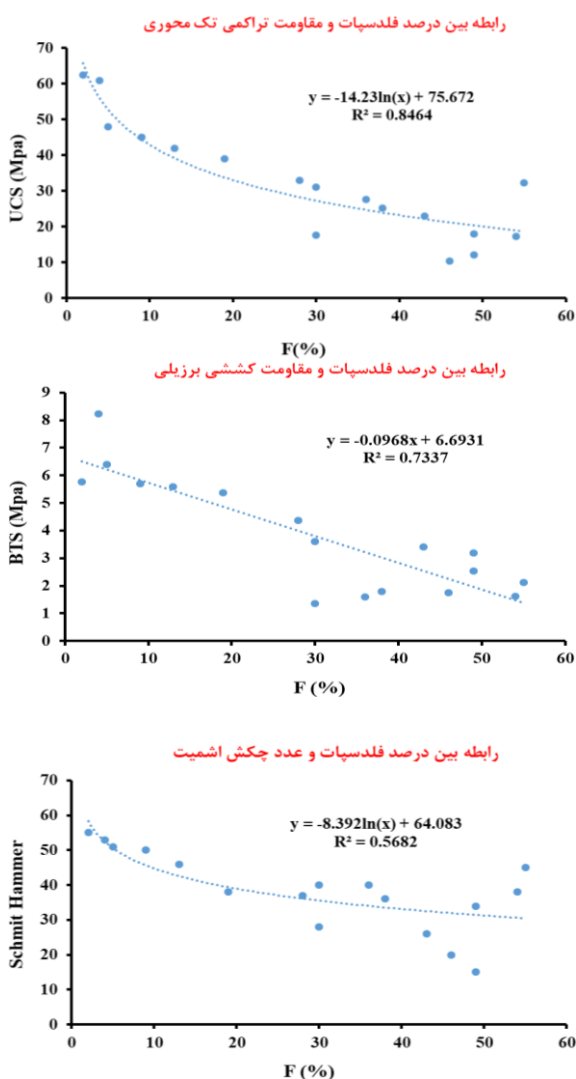
۳-۲- ارتباط بین درصد فلدسپات و خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها

رابطه بین درصد فلدسپات‌های موجود در نمونه سنگ‌ها با خصوصیات مکانیکی آن‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقاومت تراکمی رابطه لگاریتمی معکوس با درصد فلدسپات موجود در سنگ‌ها با ضریب تطابق خوب دارد ($R^2 = 0.84$). رابطه بین این دو پارامتر توسط محققین مختلف از جمله تریاکی و دیکمن

قوی کووالانسی در ساختمان مولکولی و خاصیت شکنندگی. مشاهدات تجربی گزارش شده در مورد کوارتز مطالب بسیار پیچیده و متناقضی را مطرح می‌کنند. تعدادی از مطالعات به‌عنوان مثال ساجید و آریف [۱۶]، طغرل و ظریف [۴]، گلتکین^{۱۰} و همکاران [۱۷] پیشنهاد کرده‌اند که با افزایش درصد کوارتز، استحکام گرانیته افزایش می‌یابد. برخی دیگر ادعا کرده‌اند که کوارتز به دلیل شکنندگی بیشتر، تأثیر منفی بر استحکام گرانیته دارد [۱۸و۲]. با این حال، چندین مطالعه هیچ ارتباط معناداری بین محتوای کوارتز و خصوصیات مقاومتی پیدا نکردند [۹-۱۹-۲۰-۲۳]. در شکل ۴ ارتباط بین درصد کوارتز با خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌ها نشان داده شده است. در مورد رابطه بین درصد کوارتز موجود در سنگ و مقاومت تراکمی رابطه خطی مستقیم با ضریب تطابق قوی وجود دارد که علت آن وجود پیوند قوی کووالانسی در ساختمان مولکولی آن است که وجود این نوع پیوند مانع از تشکیل نقاط ضعف ساختاری (همانند کلیواژ) در کوارتز می‌شود. بنابراین باعث افزایش مقاومت تراکمی شده است. نتایج به‌دست آمده در این تحقیق با نتایج ساجید و همکاران [۱۶]، طغرل و ظریف [۴]، گلتکین و همکاران [۱۷] همخوانی دارد، اما از دیدگاه باربور (۱۹۷۹)^{۱۱} [۲۱] درجه قفل‌شدگی ذرات کوارتز تأثیر خیلی بیشتری نسبت به درصد کوارتز موجود در سنگ‌ها بر خصوصیات مکانیکی آن‌ها دارد [۲۲]. رابطه بین مقاومت کششی برزیلی و درصد کوارتز موجود در نمونه سنگ‌ها با نتایج به‌دست آمده توسط مریام و ریک [۲] تناقض دارد، به طوری که در این تحقیق رابطه مستقیم بین درصد کوارتز و مقاومت کششی سنگ‌ها ملاحظه شده است اما در تحقیقات مریام و ریک [۲] رابطه معکوس بین آن‌ها گزارش شده است. عده‌ای دیگر از محققین مانند همتی و همکاران [۲۲] و پریکریل^{۱۲} [۶] هیچ‌گونه ارتباطی بین درصد کوارتز و مقاومت کششی پیدا نکردند. علت متناقض بودن نتایج محققان در این زمینه می‌تواند به دلیل منشأ متفاوت سنگ‌ها باشد. بر اساس نتایج به‌دست آمده در این تحقیق مشخص می‌شود برای سنگ‌هایی با تعداد کانی محدود، درصد کوارتز یک پارامتر شاخص برای تعیین خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها است. همچنین وجود خاصیت شکنندگی کوارتز باعث کاهش مقاومت کششی می‌شود، چراکه شکنندگی تأثیر منفی در مقاومت کششی دارد. افزایش درصد کوارتز باعث افزایش

۳-۳- ارتباط بین نسبت کوارتز به فلدسپات (Q/F) با مقاومت تراکمی تک‌محوری

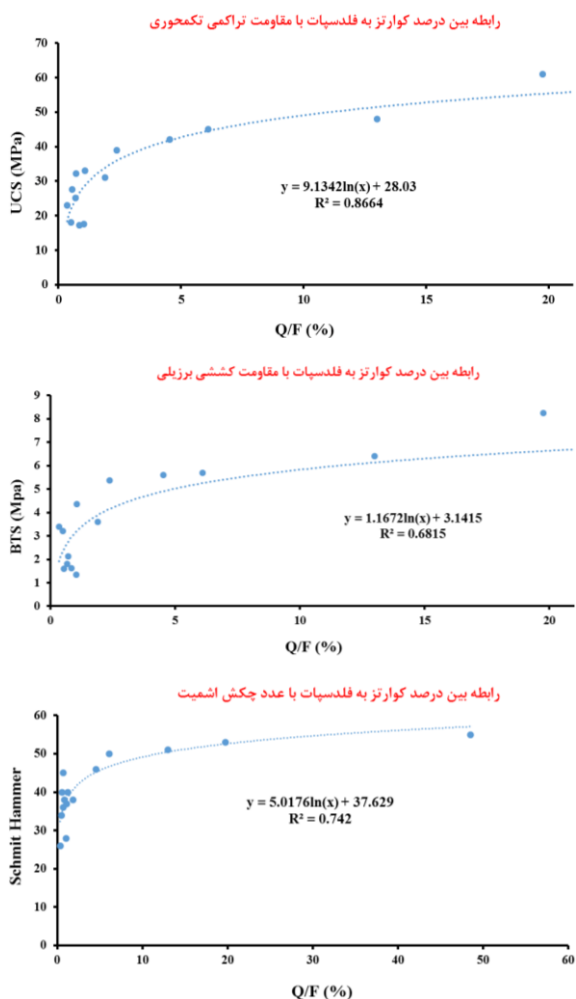
تحلیل نسبت فاز برای اولین بار توسط طغرل و ظریف [۴]، برای بررسی رابطه بین نسبت محتوای کانی و خصوصیات مقاومتی استفاده شد. محققان نشان دادند که نسبت کوارتز به فلدسپات (QFR) می‌تواند با مقاومت فشاری و کششی گرانیب همبستگی مثبت داشته باشد. چندین نتیجه مثبت حاجی عبدالمجید و کایسر [۲۵]، منفی، سوسا و همکاران [۲۶] و بدون تأثیر ایلماز و همکاران [۲۷] و همتی و همکاران [۲۲] در رابطه با فرضیه رابطه بین QFR و استحکام گرانیب گزارش شده است. این تناقض ظاهری به احتمال زیاد به دلیل ترکیب کانی‌شناسی متفاوت نمونه‌های مورد مطالعه بوده است.



شکل ۵: رابطه بین درصد فلدسپات و خصوصیات مکانیکی نمونه سنگ‌ها

[۲۳]، طغرل و ظریف [۴]، اوندل و اثر [۱۰] و یوسف و زبیدی [۱۰] بررسی شده است که داده‌های به‌دست‌آمده در این تحقیق با آن‌ها همخوانی خوبی دارد اما با نتایج تحقیقات همتی و همکاران [۲۲] تناقض دارد و آن‌ها رابطه مستقیم بین درصد فلدسپات موجود در سنگ و مقاومت تراکمی آن‌ها را نشان دادند. علت کاهش مقاومت تراکمی با افزایش درصد فلدسپات می‌تواند به دلیل حضور کلیواژ و ریزترک‌ها در فلدسپات‌ها باشد [۱۱]. از نظر طغرل و ظریف [۴] ریزترک‌ها در فلدسپات‌ها به صورت بین‌بلوری و یا در مرز بلورها رخ می‌دهد. مقدار ریزترک‌ها با افزایش هوازدگی بیشتر می‌شود؛ بنابراین بر روی رفتار سنگ تأثیر می‌گذارند. نوع کانی فلدسپات هم بر روی رفتار سنگ اثرگذار است، به طوری که افزایش فلدسپات‌های کالکوسیک (پلاژیوکلازها) نسبت به فلدسپات‌های آلکان (ارتوکلازها)، تأثیر منفی بیشتری بر روی رفتار مکانیکی سنگ‌ها دارد که علت آن افزایش ریزترک‌ها (به‌عنوان نقاط ضعف ساختاری) در پلاژیوکلازها است.

در مورد رابطه بین درصد فلدسپات و مقاومت کششی همان‌گونه که مشاهده می‌شود ارتباط بین آن‌ها معکوس با ضریب تطابق قوی است که این نتایج با تحقیقات صورت گرفته توسط تریاکی و دیکم [۲۳]، طغرل و ظریف [۴]، یوسف و زبیدی [۱۱] و همتی و همکاران [۲۲] همخوانی خوبی دارد. همانند مقاومت تراکمی تک‌محوری، دلیل کاهش مقاومت کششی با افزایش درصد فلدسپات، حضور کلیواژ و ریزترک در فلدسپات‌ها است که به‌عنوان نقاط ضعف ساختاری شناخته می‌شوند [۱۱]. بین درصد فلدسپات و عدد چکش اشمیت رابطه لگاریتمی معکوس وجود دارد. به‌عبارت‌دیگر افزایش درصد فلدسپات باعث کاهش عدد چکش اشمیت می‌شود که علت آن می‌تواند به دلیل وجود پیوند ضعیف در امتداد سطوح کلیواژ و همچنین آلتراسیون فلدسپات‌ها باشد که سبب کاهش مقاومت سنگ‌ها می‌شود؛ بنابراین بین درصد فلدسپات و عدد چکش اشمیت رابطه معکوس وجود دارد. این نتایج با تحقیقات براتلی [۲۴] تناقض دارد که علت آن می‌تواند به نوع سنگ‌های مورد بررسی در ارتباط باشد، به طوری که در تحقیقات براتلی [۲۴] سنگ‌های آذرین مورد ارزیابی قرار گرفتند ولی در این پژوهش سنگ‌های رسوبی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۶: رابطه بین نسبت کوارتز به فلدسپات (Q/F) با خصوصیات مکانیکی نمونه سنگ‌ها

۴- تحلیل رگرسیون

یکی از روش‌های آماری مناسب برای تحلیل داده‌ها در این تحقیق تحلیل رگرسیون می‌تواند باشد. این روش تحلیل ارتباط یک فرآیند آماری برای تخمین روابط بین متغیرها است. خصوصاً کمک می‌کند در فهم اینکه چگونه مقدار متغیر وابسته با تغییر هر کدام از متغیرهای مستقل و با ثابت بودن دیگر متغیرهای مستقل تغییر می‌کند.

معادلات رگرسیون همراه با نتایج مطالعات آماری در جدول ۴ نشان داده شده است. روش آنالیز رگرسیون مورد استفاده در این تحقیق روش حداقل مربع هست. برای صحت سنجی نتایج مدل رگرسیون، آزمون‌های صحت سنجی t و F انجام شده است. آزمون آماری F یک شاخص برای ضریب تطابق است و در طی آن مشخص می‌شود که نتایج با R^2 بالا به صورت شاخص آماری می‌باشند یا خیر، اگر مقدار F مشاهده‌ای بزرگ‌تر از مقدار F بحرانی باشد که

از نظر سنگ‌شناسی، این احتمال وجود دارد که تمامی نمونه‌های مورد استفاده در تحقیقات برخی از محققین از جمله طغرل و ظریف [۴] درصد کوارتز آن‌ها از ۱۰ تا ۳۳ درصد متغیر بوده باشد، در حالی که ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های برخی دیگر از محققین ممکن است شامل انواع مختلف کانی‌ها بوده و درصد کوارتز آن‌ها به نسبت متنوع‌تر باشد. رابطه بین نسبت کوارتز به فلدسپات (Q/F) با مقاومت تراکمی تک‌محوری در این پژوهش در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود رابطه لگاریتمی مستقیم با ضریب تطابق قوی ($R^2=0.81$) بین این دو پارامتر وجود دارد. این ضریب تطابق اندکی بهتر از مقدار گزارش شده توسط طغرل و ظریف [۴] ($R^2=0.79$) و بسیار بهتر از عدد به دست آمده توسط یوسف و زبیدی [۱۱] ($R^2=0.31$) است، اگرچه هر دو مورد از نظر روند کلی همخوانی خوبی با نتایج به دست آمده در این پژوهش دارند. مقبولیت نسبت کوارتز به فلدسپات (Q/F) اساساً توسط حداقل درصد کوارتز موجود در سنگ‌ها محدود می‌شود و بهترین نتایج برای سنگ‌های غنی از کوارتز به دست می‌آید. [۲۲] ارتباط بین نسبت کوارتز به فلدسپات (Q/F) با مقاومت کششی برزیلی (BTS) همانند مقاومت تراکمی به صورت لگاریتمی مستقیم است. این رابطه با نتایج به دست آمده توسط یوسف و زبیدی [۱۱] همخوانی ندارد چراکه آن‌ها هیچ‌گونه ارتباطی بین این دو پارامتر پیدا نکردند اما با نتایج طغرل و ظریف [۴] و همتی و همکاران [۲۲] همخوانی بسیار خوبی دارد به طوری که آن‌ها نیز یک رابطه مستقیم با ضریب تطابق قوی بین این دو پارامتر نشان دادند. علت تفاوت ضرایب تطابق برای خصوصیت‌های مختلف مقاومتی (مقاومت تراکمی و کششی) می‌تواند به این دلیل باشد که انواع مختلف فلدسپات‌ها در مقاومت سنگ که با مکانیسم‌های مختلف شکست مواجه می‌شوند با یکدیگر یکسان نمی‌باشند و رفتار مقاومتی متفاوتی از خود نشان می‌دهند بنابراین با توجه به نوع هر فلدسپاتی که در سنگ‌ها غالب است رفتارهایی متفاوت و بالطبع نتایج متفاوتی به دست خواهد آمد. در خصوص نسبت کوارتز به فلدسپات با عدد چکش اشمیت هم یک رابطه مستقیم بین آن‌ها دیده می‌شود. سایر پارامترهای از جمله تخلخل [۲۸] و ریزترکها [۲۹] هم می‌توانند بر مقاومت فشاری سنگ [۳۰] و مقاومت در برابر سایش [۳۱] تاثیرگذار باشند [۳۲].

مربعات نیز نامیده می‌شود که به‌طور کلی می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

در این رابطه Y متغیر وابسته و X_1 و X_2 تا X_n بیانگر متغیرهای مستقل و β_0 ، β_1 و β_2 نشانگر ضرایب رگرسیون هستند و میزان خطا را نشان می‌دهد. به‌منظور تعیین ارتباط بین ترکیب کانی‌شناسی با خصوصیات مکانیکی موردنظر سنگ‌ها تحلیل رگرسیون چند متغیره انجام شد که نتایج آن در جدول ۵ نشان داده شده است. بر اساس نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره مشخص می‌شود که مقاومت تراکمی تک‌محوری وابستگی بیشتری به درصد کوارتز در ترکیب سنگ دارد و بعد از آن درصد فلدسپات دارای تأثیر بیشتری بر مقاومت تراکمی نمونه‌ها است. در مقابل، نسبت کوارتز به فلدسپات دارای تأثیر کمتری است. برای مقاومت کششی سنگ‌ها درصد فلدسپات‌ها دارای تأثیر بیشتری است که دلیل آن هم وجود ریزترک‌ها و کلیواژها است که پیوندهای اتمی در امتداد این سطوح ضعف قوی نیست. به همین دلیل در مقابل نیروهای کششی به راحتی دچار گسیختگی می‌شوند. در نتیجه مقدار مقاومت کششی کاهش می‌یابد. در بین کانی‌های سازنده سنگ‌های رسوبی آواری، کوارتز دارای بیشترین تأثیر بر روی مقادیر چکش اشمیت است. سپس درصد فلدسپات دارای اهمیت و تأثیر بیشتری بر روی مقادیر چکش اشمیت خواهد بود، علت آن می‌تواند آلتراسیون فلدسپات‌ها و وجود سطوح ضعف فراوان (کلیواژها) در ساختمان آن‌ها باشد. آستانه معنی‌دار بودن (شاخص F) تحلیل رگرسیون چند متغیره در این تحلیل از مقدار حدی آن (۰/۵۰) بسیار کمتر است؛ بنابراین روابط به‌دست‌آمده از نظر آماری فوق‌العاده معنادار می‌باشند.

از طریق جداول آماری معروف تعیین می‌شود، در این حالت فرضیه خنثی (null) رد می‌شود که این بدان معنا است که ضریب تطابق به‌دست‌آمده بین پارامترهای کانی‌شناسی و مکانیکی، سنگ‌ها به‌صورت شاخص می‌باشند. در بین ضرایب تطابق به‌دست‌آمده بیشترین مقدار مربوط به رابطه بین مقاومت تراکمی با درصد کوارتز به فلدسپات (۰/۸۶) و درصد فلدسپات موجود در سنگ‌ها (۰/۸۴) است. دقت ثابت‌ها در تمام معادلات از طریق آزمون t تعیین می‌شوند که در آن هر دو متغیر دارای توزیع نرمال می‌باشند و مشاهدات به‌صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. در آزمون t مقدار t مشاهده‌ای با مقدار t بحرانی که از طریق جداول مربوطه تعیین می‌شوند مقایسه می‌گردد. اگر مقدار t مشاهده‌ای بزرگ‌تر از مقدار t بحرانی باشد فرضیه خنثی (null) رد می‌شود که این بدان معنا است که ثابت‌های معادله به‌صورت یک شاخص آماری می‌باشند.

۴-۱- رگرسیون چند متغیره ارتباط بین خصوصیات کانی‌شناسی و مقاومت مکانیکی سنگ‌ها

یکی از روش‌های مرسوم در تحلیل چند متغیره، تکنیک رگرسیون چند متغیره (چندگانه) است. بر اساس تحلیل رگرسیونی، یک رابطه خطی بین متغیر پاسخ (متغیر وابسته) با یک یا چند متغیر توصیفی (متغیر مستقل) برقرار می‌شود. در رگرسیون خطی چندگانه، پارامترهای یک مدل خطی به کمک یک تابع هدف و مقدار متغیره‌ها، برآورد می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر آنالیز رگرسیون چند متغیره روشی برای پیش‌بینی رابطه خطی بین یک متغیر وابسته و دو یا چند متغیر مستقل با یک رابطه ریاضی است؛ بنابراین مدل رگرسیون چند متغیره گاهی اوقات به‌عنوان مدل حداقل

جدول ۴: نتایج آزمون F و t برای پارامترهای موردبررسی

معادله	R^2	df	مقدار F مشاهده‌ای	مقدار F بحرانی	مقدار t مشاهده‌ای	مقدار t بحرانی
UCS=0.5363(Q)+10.317	۰/۸	۱۶	۲/۲۸	۲/۹۶	۱/۱۸	۲/۰۵۹
BTS=0.0578(Q)+1.4508	۰/۵۸	۱۷	۱۷۲/۳۳	۲/۲۸	۵/۳۵	۲/۱۰
Schmit= 0.3239(Q)+26.254	۰/۷۳	۱۴	۴/۳۵	۲/۳۲	۱/۱۴	۲/۰۹
UCS=-14.23ln(F)+75.672	۰/۸۴	۱۶	۱/۴۳	۲/۲۸	-۰/۳۱	۲/۰۴
BTS=-0.0968ln(F)+6.6931	۰/۷۳	۱۶	۷۷/۶۵	۲/۲۸	۵/۸۸	۲/۱۲
Scmit= -8.392ln(F)+64.083	۰/۵۷	۱۶	۲/۷۵	۲/۲۸	-۱/۶۴	۲/۰۵
UCS=9.1342(Q/F)+28.03	۰/۸۶	۱۴	۰/۶۹	۰/۴۱	-۵/۱۱	۲/۰۳
BTS=1.1672(Q/F)+3.1415	۰/۶۸	۱۴۶	۳۹/۷۸	۲/۳۸	۰/۹۳	۲/۱۴
Schmit=5.0176(Q/F)+37.629	۰/۷۴	۱۴	۱/۳۵	۲/۳۲	۷/۳۲	۲/۰۴

جدول ۵: نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره

معادله	R ²	F شاخص
UCS = 29.24 - 0.346(F) + 0.3(Q) + 0.14(Q/F)	۰٫۸۹	۰٫۱۰۰۰۰۵
BTS = 3.14 - 0.04(F) + 0.05(Q) - 0.02(Q/F)	۰٫۶۷	۰٫۱۰۰۰۰۹
Schmit = 33.6 - 0.21(F) + 0.31(Q) - 0.17 (Q/F)	۰٫۷۶	۰٫۱۰۰۰۱

۵- نتیجه‌گیری

سنگ‌ها متشکل از کانی‌های مختلف هستند که بر اساس منشأ متغیر می‌باشند. ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌ها نقش بسزایی در رفتار مکانیکی و مهندسی آن‌ها دارد. با توجه به انجام آزمایش‌های مکانیکی و ترکیب کانی‌شناسی گروهی از سنگ‌های رسوبی و تحلیل رگرسیون نتایج در این پژوهش، به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

- رابطه بین درصد کوارتز با خصوصیات مکانیکی نمونه سنگ‌ها به صورت مستقیم است و در بین آن‌ها مقدار ضریب تطابق به دست آمده برای مقاومت تراکمی بیشتر از سایر خصوصیات مکانیکی است ($R^2=0.8$). علت آن پیوند کووالانسی قوی در ساختمان مولکولی کوارتز است که مانع از ایجاد سطوح ضعیف در ساختمان آن‌ها می‌شود.

- فلدسپات‌ها به دلیل پیوند ضعیف بین سطوح کلیواژ، وجود ریزترک‌ها و همچنین تأثیر آلتراسیون بر روی آن‌ها بیشترین تأثیر منفی را بر مقاومت کششی سنگ‌ها دارند و باعث کاهش آن می‌شوند. تأثیر منفی درصد فلدسپات بر روی عدد چکش اشمیت به دلیل ماهیت عملکردی آن و عدم تأثیر پیوند بین بلوری ذرات تشکیل دهنده سنگ کمتر است؛ بنابراین تغییرات درصد فلدسپات تأثیر زیادی بر روی عدد چکش اشمیت نخواهد داشت.

- نسبت کوارتز به فلدسپات (Q/F) دارای تأثیر بیشتری بر روی مقاومت تراکمی نسبت به مقاومت کششی است. به عبارت دیگر ضریب تطابق آن‌ها بیشتر از سایر پارامترهای مورد بررسی است ($R^2=0.86$). در صورت افزایش درصد فلدسپات‌های کالکوسدیک یا پلاژیوکلازها نسبت به پلاژیوکلازهای آلکالن در توده سنگ رفتار آن‌ها هم ممکن است تغییر نماید و اثر بیشتری بر روی مقاومت کششی سنگ‌ها نسبت به مقاومت تراکمی نشان بدهد.

- بر اساس نتایج آزمایش XRD، در بین کانی‌های موجود در سنگ‌های رسوبی درصد فراوانی کوارتز و فلدسپات موجود در نمونه‌ها نسبت به سایر کانی‌های سازنده بیشتر است؛ بنابراین آن‌ها دارای اهمیت بیشتری در

تعیین رفتار مکانیکی نمونه سنگ‌ها می‌باشند. با توجه به نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره و شاخص‌های آماری به دست آمده می‌توان گفت که در این نوع از سنگ‌های رسوبی کانی کوارتز و فلدسپات تأثیر بیشتری بر روی خصوصیات مکانیکی آن‌ها دارند.

- پیشنهاد می‌شود به منظور توسعه روابط تجربی موجود و از بین بردن تناقض‌های موجود در بین نتایج محققین مختلف و همچنین برای تأیید تأثیر ویژگی‌های کانی‌شناسی بر خواص مکانیکی سنگ‌های مختلف، باید تعداد زیادی آزمایش تجربی روی انواع مختلف سنگ از منشأهای گوناگون انجام شود.

تقدیر و تشکر

در پایان لازم است از کارکنان محترم آزمایشگاه‌های دانشگاه تربیت مدرس، خوارزمی و سازمان زمین‌شناسی کشور بابت همکاری‌های لازم جهت انجام آزمایش‌های این تحقیق کمال تشکر و تقدیر را داشته باشیم.

مراجع

- [1] D. F. Howarth and J. C. Rowlands, "Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 57-85, 1987, doi: 10.1007/BF01019511.
- [2] K. Y. Merriam, R. Rieke, H.H., "TENSILE STRENGTH RELATED TO MINERALOGY AND TEXTURE OF SOME GRANITIC ROCKS," *Eng. Geol.*, vol. 47, no. 4, pp. 155-160, 1970, doi: 10.1016/0379-6779(92)90376-T.
- [3] A. SHAKOOR and R. E. BONELLI, "Relationship Between Petrographic Characteristics, Engineering Index Properties, and Mechanical Properties of Selected Sandstones," *Environmental & Engineering Geoscience*, vol. xxviii, no. 1, pp. 55-71, 1991, doi: 10.2113/gseegeosci.xxviii.1.55.
- [4] A. Tuğrul and I. H. Zarif, "Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey," *Eng. Geol.*, vol. 51, no. 4, pp. 303-317, 1999, doi: 10.1016/S0013-7952(98)00071-4.

- central Greece. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 73, 1273-1292.
- [19] Gupta, A. S., & Rao, K. S. (2000). Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering geology*, 56(3-4), 257-274.
- [20] Prikryl, R. (2006). Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: limitations and possible source of misinterpretations. *Engineering Geology*, 87(3-4), 149-162.
- [21] Barbour, T. G., & Ko, H. Y. (1979, June). Relationship of mechanical, index, and mineralogic properties of coal measure rock. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-79). ARMA.
- [22] Hemmati, A., Ghafoori, M., Moomivand, H., & Lashkaripour, G. R. (2020). The effect of mineralogy and textural characteristics on the strength of crystalline igneous rocks using image-based textural quantification. *Engineering Geology*, 266, 105467.
- [23] Tiryaki, B., & Dikmen, A. C. (2006). Effects of rock properties on specific cutting energy in linear cutting of sandstones by picks. *Rock mechanics and rock engineering*, 39, 89-120.
- [24] Brattli, B. (1994). The influence of cataclasis on abrasion resistance of granitic rocks used as road surface aggregates. *Engineering geology*, 37(2), 149-159.
- [25] Hajiabdolmajid, V., & Kaiser, P. (2003). Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling. *Tunnelling and underground space technology*, 18(1), 35-48.
- [26] Sousa, L. M. (2013). The influence of the characteristics of quartz and mineral deterioration on the strength of granitic dimensional stones. *Environmental earth sciences*, 69, 1333-1346.
- [27] Yılmaz, N. G., Goktan, R. M., & Kibici, Y. (2011). Relations between some quantitative petrographic characteristics and mechanical strength properties of granitic building stones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(3), 506-513.
- [28] Lazemi, H., & Eskandari, M. (2012). Determination of Relation Between Uniaxial Compressive Strength with Point Load Index, Unit Weight and Porosity by Using Artificial Neural Network. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 2(3), 70-75. (In Persian).
- [29] Beheshti, S. H., Yarahmadi Bafghi, A., Ghorbani, A., & Rezvanianzadeh, M. R. (2022). Relationship between physical and mechanical properties of jointed rocks in Central Iran (Bafgh Block). *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 12(31), 1-13. (In Persian).
- [30] Ghaedi Faramoushjan, S., Jalalifar, H., & Kolahchi, R. (2022). Experimental analysis of SiO₂ and CNT nanoparticles effects on the compressive strength of the concrete. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 12(31), 64-59. (In Persian).
- [5] Mendes, F. M., Aires-Barros, L., & Rodrigues, F. P. (1966, September). The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock masses. In *ISRM Congress* (pp. ISRM-1CONGRESS). ISRM.
- [6] Eberhardt, E., Stead, D., & Stimpson, B. (1999). Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(3), 361-380.
- [7] Chatterjee, R., & Mukhopadhyay, M. (2002). Petrophysical and geomechanical properties of rocks from the oilfields of the Krishna-Godavari and Cauvery Basins, India. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61, 169-178.
- [8] Özlürk, A., C., Nasuf, E. & Bilgin, N. (2004). The assessment of rock cutability, and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 104(7), 397-402.
- [9] Tamrakar, N. K., Yokota, S., & Shrestha, S. D. (2007). Relationships among mechanical, physical and petrographic properties of Siwalik sandstones, Central Nepal Sub-Himalayas. *Engineering Geology*, 90(3-4), 105-123.
- [10] Ündül, Ö., & Er, S. (2017). Investigating the effects of micro-texture and geo-mechanical properties on the abrasiveness of volcanic rocks. *Engineering Geology*, 229, 85-94.
- [11] Yusof, N. Q. A. M., & Zabidi, H. (2016). Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of granitic rock from Hulu Langat, Selangor. *Procedia Chemistry*, 19, 975-980.
- [12] Alber, M., & Kahraman, S. A. İ. R. (2009). Predicting the uniaxial compressive strength and elastic modulus of a fault breccia from texture coefficient. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42(1), 117.
- [13] Aydin, A., & Basu, A. (2005). The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering geology*, 81(1), 1-14.
- [14] Han, Y., Li, X., & Feng, Y. (2020). A new approach to evaluate rock drillability of polycrystalline diamond compact bits using scratch test data. *Energy Exploration & Exploitation*, 38(4), 884-904.
- [15] Meng, Z., & Pan, J. (2007). Correlation between petrographic characteristics and failure duration in clastic rocks. *Engineering geology*, 89(3-4), 258-265.
- [16] Sajid, M., & Arif, M. (2015). Reliance of physico-mechanical properties on petrographic characteristics: consequences from the study of Utlá granites, north-west Pakistan. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74, 1321-1330.
- [17] Yesiloglu-Gultekin, N. U. R. G. Ü. L., Sezer, E. A., Gokceoglu, C., & Bayhan, H. (2013). An application of adaptive neuro fuzzy inference system for estimating the uniaxial compressive strength of certain granitic rocks from their mineral contents. *Expert Systems with Applications*, 40(3), 921-928.
- [18] Diamantis, K., Gartzos, E., & Migiros, G. (2014). Influence of petrographic characteristics on physico-mechanical properties of ultrabasic rocks from

[31] Asadi Aghbolaghi, N., & Shafiei, A. (2020). Simulation of Water Jet Cutting for Granite by Using Smoothed Particle Hydrodynamics. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 10(23), 53-63. (In Persian).

[32] Mohammadi, R., Samimi Namin, F., & Khademi Hamidi, J. (2019). Numerical analysis of disc cutter forces in linear rock cutting procedure using finite element method. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 9(20), 53-66. 10.29252/ANM.2019.8036.1275. (In Persian).

-
- 1 Rock Texture
 - 2 Inter locking
 - 3 Merriam, R., Rieke . H.H
 - 4 Shakoor and Bonelli
 - 5 endes et al
 - 6 Eberhardt et.al.
 - 7 Chatterjee and Mukhopadhyay
 - 8 Theoretically
 - 9 X-Ray Diffraction
 - 10 Gultekin et.al
 - 11 Barbour et al
 - 12 Pfikryl