



ارتباط بین ریزساختار با خواص فیزیکی و مهندسی ماسه‌سنگ‌ها، با تأکید بر درصد کانی کوارتز

علی لکی روحانی^{۱*}، مجید بخشی^۲، افشین زهدی^۳

^۱دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۲دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۳استادیار، دانشکده علوم گروه زمین‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۲-۰۹

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۱۹

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۰۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۳-۲۷

کلمات کلیدی:

ماسه‌سنگ

ترکیب کانی‌شناسی

سرعت موج فشاری

درصد تخلخل

مقاومت کششی برزیلی

خلاصه: ترکیب، بافت و ریزساختار سنگ‌ها بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها، مانند وزن مخصوص، سرعت موج فشاری و موج برشی و مقاومت کششی و فشاری آنها مؤثر هستند. یکی از پارامترهای مهم در بخش ریزساختار سنگ‌ها، درصد کانی کوارتز می‌باشد. در این پژوهش، هدف بررسی تأثیر ویژگی‌های کانی‌شناسی ماسه‌سنگ‌ها بالاخص درصد کانی کوارتز بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی سه گروه ماسه‌سنگ با میانگین درصد کوارتز کم (کمتر از ۶۵ درصد)، متوسط (مابین ۶۵ تا ۸۰ درصد) و بالا (بیشتر از ۸۰ درصد) می‌باشد. تعداد ۲۶ نمونه از جنوب استان زنجان جمع‌آوری و طی برنامه‌ی جامعی از آزمون‌های مکانیک سنگی، ویژگی‌های کانی‌شناسی و پارامترهای مهندسی مانند وزن مخصوص خشک، درصد تخلخل، سرعت موج فشاری و آزمایش کششی برزیلی تعیین و ارتباط آنها با استفاده از آنالیز رگرسیون تک متغیره بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب کانی‌شناسی بر روی ویژگی‌های مقاومتی تأثیر گذار بوده و با افزایش درصد کانی کوارتز در نمونه‌ها دو پارامتر فیزیکی وزن مخصوص خشک و سرعت موج فشاری و پارامتر مکانیکی مقاومت کششی برزیلی افزایش می‌یابند. همچنین با توجه به همبستگی مابین پارامترهای فیزیکی می‌توان سرعت موج فشاری را با تقریب مناسبی با استفاده از پارامتر تخلخل برای ماسه‌سنگ‌های مناطق مورد مطالعه پیش‌بینی نمود.

۱- مقدمه

مقاومت سنگ یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که در حوزه مکانیک سنگ ارزیابی می‌گردد [۱]. به منظور طبقه‌بندی سنگ‌ها و طراحی سازه‌ها در درون و یا بیرون توده‌های سنگی، مطالعه خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری سنگ‌ها دارای اهمیت حیاتی می‌باشد [۲]. بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد که ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌ها در ارتباط مستقیم با پارامترهای بافتی آن‌ها است [۳، ۴]. بافت سنگ به صورت "درجه تبلور، اندازه دانه یا دانه‌دانه بودن" و فابریک یا رابطه‌ی هندسی مابین اجزای تشکیل‌دهنده سنگ "تعریف می‌گردد [۵]؛ بنابراین ویژگی‌های بافتی عمدتاً به موارد اندازه دانه،

شکل دانه، درجه‌ی جهت‌گیری دانه، آرایش تراکم، نسبت دانه‌ها، ضریب بافت، کانی‌های تشکیل‌دهنده، نوع ماتریکس، نوع سیمان و درجه سیمان‌شدگی، تخلخل، مرز دانه یا ساختار تماس دانه‌ها و ریزترک‌ها تقسیم‌بندی می‌گردد [۶]. در دهه‌های اخیر محققان بسیاری بر روی ارتباط مابین ویژگی‌های بافتی و مقاومتی سنگ‌ها و تأثیرپذیری خواص مقاومتی از پارامترهای بافتی تمرکز نموده‌اند. بیشتر مطالعات اشاره شده تأثیر ویژگی‌های ریزساختار شامل ترکیب کانی‌شناسی، تخلخل و شکل و اندازه دانه را بر روی مقاومت سنگ بررسی نموده‌اند. به‌عنوان مثال بریس در سال ۱۹۶۱ و یوسوف و زبیدی در سال ۲۰۱۶ دریافتند که مقاومت سنگ با کاهش متوسط اندازه دانه، افزایش می‌یابد [۷، ۸]. مهندس و همکاران در سال ۱۹۶۶ بیان نمودند داده‌های ریزساختاری که با ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها

1 granularity

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rou001@aut.ac.ir



برزیلی می‌گردد [۱۹].

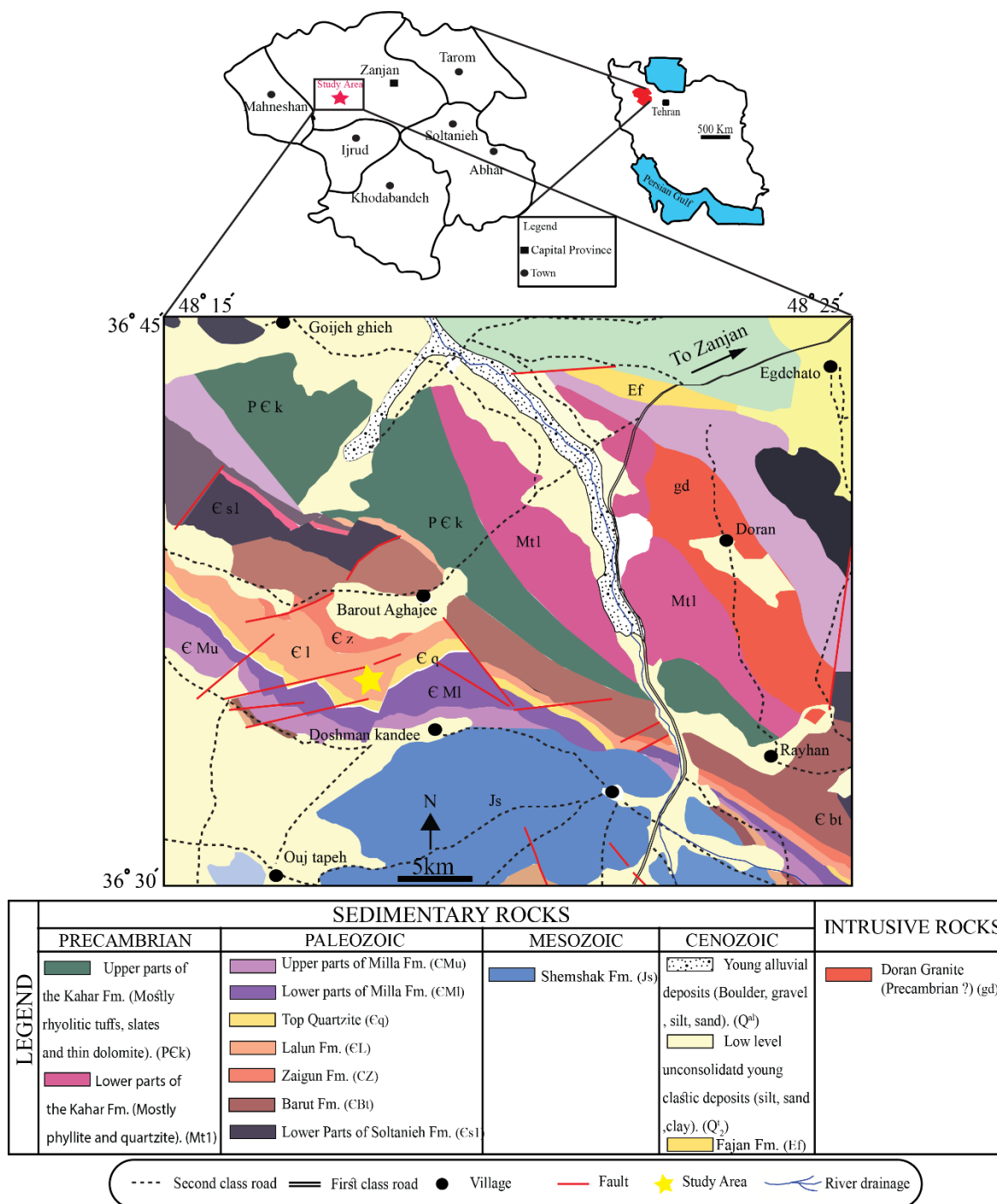
استان زنجان با توجه به وجود سنگ‌های رسوبی و معادن بسیار و حفر انواع فضاهای زیرزمینی باهدف استخراج منابع معدنی همواره با مباحث مکانیک سنگی و پایداری فضاهای زیرزمینی روبرو بوده است. در همین راستا لکی روحانی و همکاران در سال ۱۳۹۷ مطالعاتی را بر روی ویژگی‌های بافتی سنگ‌های دولومیتی سازند سلطانیه در جنوب غرب شهر زنجان انجام داده‌اند و تأثیرپذیری پارامترهای فیزیکی از متوسط اندازه بلورهای تشکیل‌دهنده سنگ‌های دولومیتی را بررسی نموده‌اند [۲۰]. در این پژوهش برای نخستین بار با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی سازندهای لالون، زاگون و واحد ماسه‌سنگی تاپ‌کوارتزیت جنوب استان زنجان و باهدف درک کامل‌تر و دقیق‌تر تأثیر میزان کانی کوارتز بر روی ویژگی‌های مهندسی ماسه‌سنگ‌ها برنامه جامعی از آزمون‌های مکانیک سنگی شامل سه پارامتر فیزیکی (وزن مخصوص خشک، تخلخل، سرعت موج فشاری) و یک پارامتر مکانیکی (مقاومت کششی برزیلی) طراحی گردید و مطالعات دقیق کانی‌شناسی بر روی سه دسته ماسه‌سنگ با میانگین درصد کوارتز پایین، متوسط و بالا انجام پذیرفت همچنین با استفاده از آنالیز رگرسیون تک متغیره همبستگی و ارتباط مابین ویژگی‌های مهندسی ذکر شده با پارامترهای کانی‌شناسی بررسی گردید.

۲- مطالعات زمین‌شناسی و موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شهرستان زنجان، شمال غرب ایران قرار دارد. استان زنجان از جمله مناطقی است که رسوبات تخریبی و آواری متعلق به پالئوزوئیک پیشین نظیر ماسه‌سنگ‌های متعلق به سازندهای لالون، زاگون و واحد ماسه‌سنگی تاپ‌کوارتزیت در آن رخنمون قابل ملاحظه‌ای دارد. بر اساس طبقه‌بندی زمین‌شناسی ساختاری ایران ارائه شده توسط استوکلین^۱ در سال ۱۹۶۸، این منطقه در شمال غرب منطقه ایران مرکزی به‌عنوان قدیمی‌ترین و بزرگ‌ترین حوضه رسوبی ایران واقع شده است. نمونه‌های مورد مطالعه از دو سازند زاگون و لالون و عضو تاپ‌کوارتزیت برداشته شده است. سازند شیلی زاگون عمدتاً از شیل، ماسه‌سنگ ریزدانه و به میزان کمتر سیلت‌سنگ میکادار به رنگ سرخ ارغوانی تشکیل شده است [۲۱]. ضخامت این سازند در برش نمونه ۴۵۳ متر بوده و در دیگر مناطق (نظیر استان

در ارتباط هستند می‌تواند برای طبقه‌بندی کیفی سنگ‌ها مورد استفاده قرار گیرد. آنها با استفاده از آنالیز مودال ریزساختار نمونه‌های گرانیتی اثبات کردند که ویژگی‌های پتروگرافی سنگ همبستگی خوبی با خواص مقاومتی آنها دارد [۹]. در سال ۱۹۶۹ ویلارد و مک ویلیامز تکنیک‌هایی را برای درک هر چه بهتر تأثیرپذیری رفتار مکانیکی سنگ‌ها از ویژگی‌های ریزساختار ارائه نمودند. آنها بیان نمودند که ریزترک‌ها، مرز دانه‌ها، سطوح ضعف (رخ) و صفحات ماکل مقاومت سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد و ممکن است به عنوان صفحات ضعیفی عمل کنند که جهت ترک شکست را کنترل می‌کند [۱۰]. مریام و همکاران در سال ۱۹۷۰ رابطه‌ی مشخصی مابین درصد کانی کوارتز و مقاومت کششی برزیلی در سنگ‌های گرانیتی مورد بررسی یافتند [۱۱]. در سال ۱۹۷۹ هاگمن و فردمن دریافتند که متوسط اندازه دانه در سنگ‌های کربناته و محتوای میکرایت در سنگ آهک همبستگی خطی بالایی با مقاومت نهایی دارد [۱۲]. اونودرا و آسوکا در سال ۱۹۸۰ گزارش نمودند که مقاومت با افزایش متوسط اندازه دانه در سنگ‌های آذرین کاهش می‌یابد. آنها رابطه خطی مابین اندازه دانه و مقاومت تعیین نمودند بدین صورت که کاهش اندازه دانه سبب افزایش مقاومت می‌گردد [۱۳]. تاگول و ظریف در سال ۱۹۹۹ رابطه‌ای مابین ترکیب کانی‌شناسی با مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی در سنگ‌های گرانیتی با استفاده از آنالیز رگرسیون تک متغیره تعیین نمودند. بر اساس این تحقیق کانی فلدسپار سبب کاهش مقاومت و وجود کانی کوارتز سبب بهبود مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی گردید [۱۴]. نتایج متضادی در مورد تأثیر ویژگی‌های کانی‌شناسی بر روی مقاومت سنگ وجود دارد [۱۵]. برخی از محققین [۱۴، ۱۶] از تأثیر مثبت درصد کانی کوارتز بر روی دو پارامتر مهندسی سرعت موج فشاری و مقاومت کششی برزیلی گزارش نمودند. بل در سال ۱۹۷۸ با مطالعه بر روی ماسه‌سنگ Fell در شمال شرق کشور انگلستان بیان نمود که کانی کوارتز تأثیری بر روی مقاومت کششی برزیلی ندارد [۱۷]. در سال ۱۹۹۴ اولوسای و همکاران با بررسی‌های پتروگرافی و مکانیک سنگی که بر روی ماسه‌سنگ Kozlu در شمال کشور ترکیه انجام دادند به این نتیجه رسیدند که درصد کانی کوارتز تأثیری بر روی سرعت موج فشاری ندارد [۱۸]. شکور و بونلی در سال ۱۹۹۱ بیان نمودند که افزایش درصد کانی کوارتز سبب کاهش مقاومت کششی

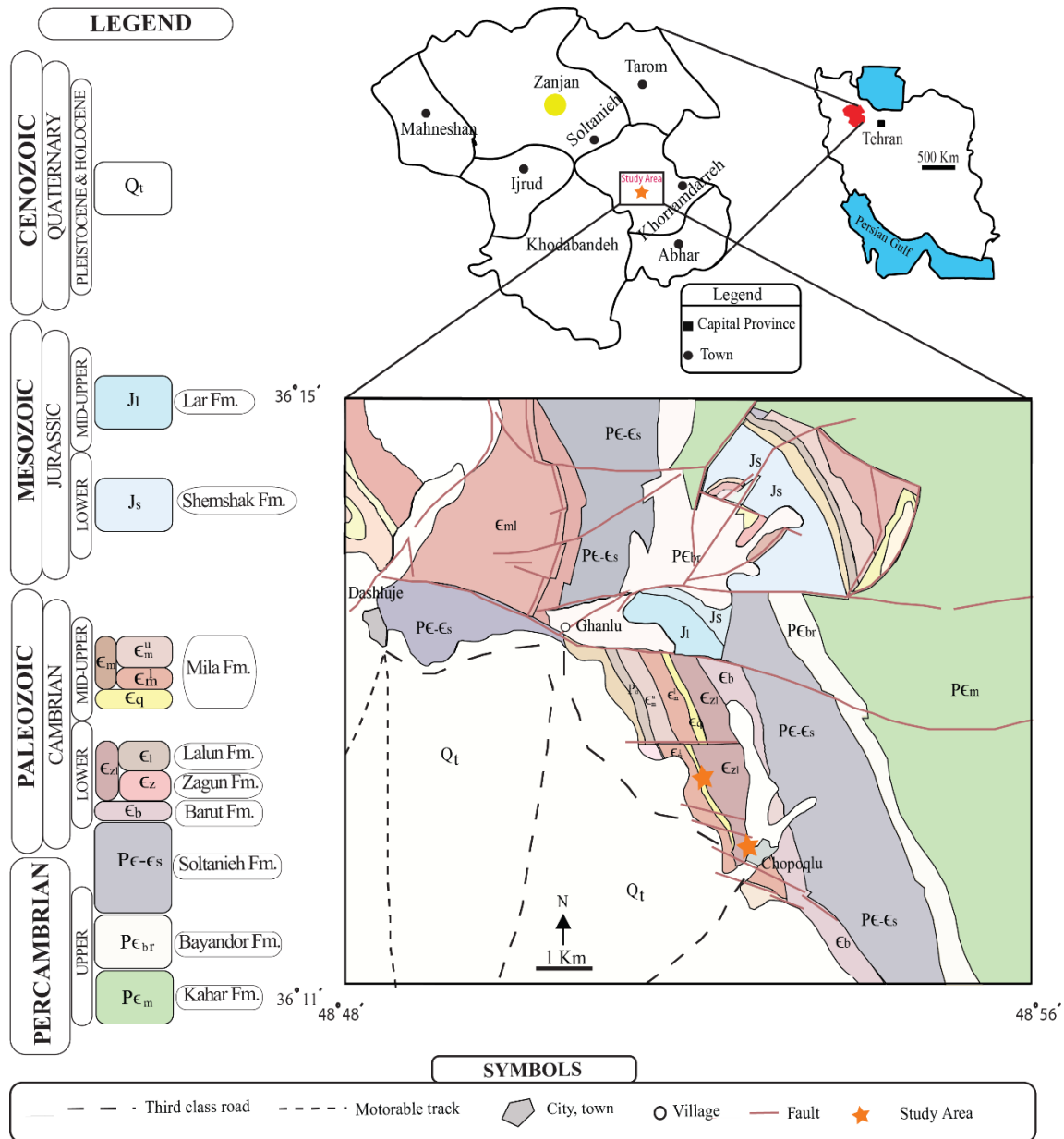
1 Stocklin



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی نمونه‌های برداشت شده از منطقه باروت آغاجی که با ستاره زرد رنگ مشخص شده است [۲۳]
 Fig. 1. The geological map and geographical location of samples taken from the Barut Aghaji area, marked with a yellow star [23]

سازند لالون یکی از گسترده‌ترین سازندهای کامبرین پیشین در ایران بوده که تقریباً در تمام حوضه‌های رسوبی ایران ترکیب سنگ‌شناسی مشابهی دارد و عمدتاً از ماسه‌سنگ آرکوزی متوسط دانه به رنگ سرخ ارغوانی با ضخامتی در حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ متر تشکیل شده است. بر روی این سازند به صورت ناپیوسته واحد سفید رنگی تحت

زنجان) به دلیل تغییر رخساره‌ی جانبی این سازند با ضخامت‌های کمتر مشاهده می‌شود. با توجه به ویژگی‌های سنگ‌شناختی این سازند در یک محیط رودخانه‌ی ماندری تشکیل شده است. این سازند به صورت تدریجی به ماسه‌سنگ‌های سازند لالون تبدیل می‌شود به‌گونه‌ای که گاهی تفکیک این دو سازند از همدیگر مشکل است.



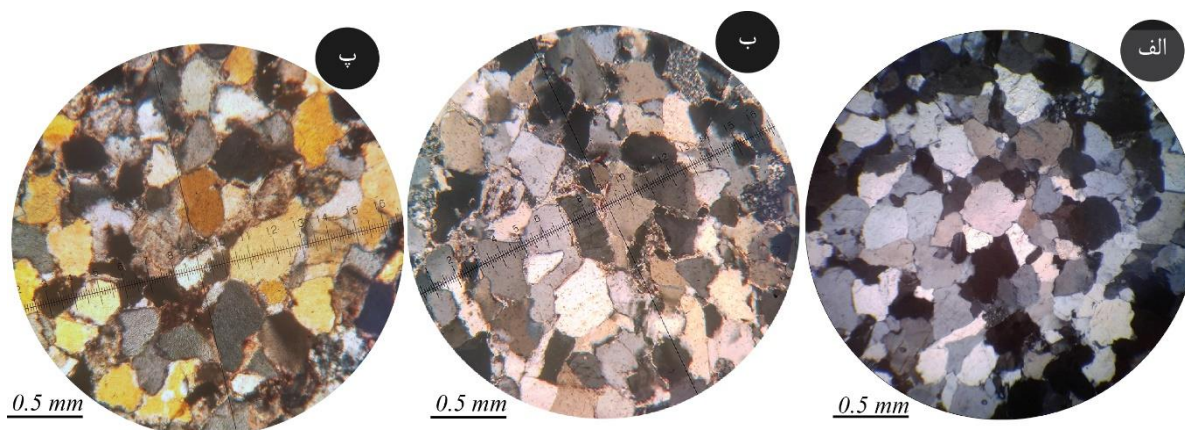
شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی نمونه‌های برداشت شده از منطقه چپقلو (با علامت ستاره مشخص شده‌اند) [۲۲]
 Fig. 2. The geological map and geographical location of samples taken from the Chopoghlu area (marked with a yellow star) [22]

آهکی متعلق به عضو یک سازند میلا رسوب‌گذاری نموده است.

۳- مواد و روش‌ها

۲۶ نمونه ماسه‌سنگی از ۲ سازند زاگون، لالون و واحد ماسه‌سنگی تاپ‌کوارتزیت برداشت گردید. نقاط نمونه‌برداری در اشکال ۱ و ۲ مشخص شده است. برای تهیه نمونه‌های موردنیاز پژوهش حاضر نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خدابنده- سلطانیه [۲۲] و ۱:۱۰۰۰۰۰ استان زنجان [۲۳] موردبررسی قرار گرفته و رخنمون‌های

عنوان کوارتزیت رویی قرار گرفته است که متعلق به قاعده سازند میلا است. کوارتزیت رویی عمدتاً از لایه‌های ماسه‌سنگی کوارتزآرنایتی با ضخامتی تا حدود ۲۰۰ متر در حوضه‌ی رسوبی ایران مرکزی تشکیل شده است. در منطقه مورد مطالعه این عضو ماسه‌سنگی از دو بخش تشکیل شده است که از پایین به بالا شامل: الف) لایه ماسه‌سنگی نازک تا متوسط‌لایه با ضخامت ۲۰ متر، ب) لایه ماسه‌سنگی متوسط تا ضخیم‌لایه دربرگیرنده‌ی ریبیل‌مارک‌های متقارن به ضخامت ۱۰ متر است و در بالای این عضو به صورت ناپیوسته دولومیت‌ها و سنگ‌های



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی برش‌های نازک ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه (الف) نمونه TC4- با درصد کوارتز بالا (ب) نمونه LB14- با درصد کوارتز متوسط (پ) نمونه C5-1- با درصد کوارتز پایین

Fig. 3. Microscopic images of thin sections of sandstones studied, a) TC4 sample- the high percentage of the mineral quartz, b) LB14 sample, the moderate percentage of the mineral quartz, c) C5-1 sample, the low percentage of the mineral quartz

برای انجام این آنالیز، مواد باید به خوبی پودر و همگن شده باشند. اطلاعات به دست آمده از پراش اشعه ایکس بر روی بلورها و کانی‌های تشکیل دهنده سنگ بیانگر نوع کانی‌های تشکیل دهنده سنگ بوده که با مقایسه نمودارهای بدست آمده در این آنالیز با نمودارهای استاندارد کانی‌ها، براحتی می‌توان کانی‌های مختلف بویژه کانی‌های بسیار ریز را که امکان مطالعه آنها در زیر میکروسکوپ‌های معمولی میسر نمی‌باشد، شناسایی نمود [۲۵]. برخی از خواص مهندسی ماسه‌سنگ‌ها مانند (وزن مخصوص خشک، تخلخل، مقاومت کششی برزیلی و سرعت موج فشاری) مطابق استاندارد پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) محاسبه گردید. درصد فراوانی اجزا تشکیل دهنده با روش دانه شماری تقریباً ۳۰۰ دانه به روش گزی-دیکینسون معرفی شده در سال ۱۹۸۴ توسط اینگرسول و همکاران محاسبه و درصد کوارتز، فلدسپار، چرت، میکا، کلسیت و سیمان هر یک از نمونه‌ها تعیین شد [۲۶] و بر اساس نمودار Folk تقسیم‌بندی گردید [۲۷] با استفاده از نرم افزار SPSS 21، رابطه خطی میان متغیرهای کانی‌شناسی و ویژگی‌های مهندسی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۴- نتایج آزمون‌ها

۴-۱- ترکیب کانی شناسی

به منظور انجام مطالعات سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی، تعداد ۲۶ برش نازک از ماسه‌سنگ‌های سازندهای لالون، زاگون و واحد ماسه‌سنگی تاپ کوارتزیت استان زنجان تهیه گردید (شکل ۳). با مطالعه

مناسب انتخاب گردید. در طول چندین بازدید صحرایی ۵۰ نمونه‌ی دستی از بلوک‌های سنگی به ابعاد تقریبی ۴۰×۴۰×۳۰ سانتیمتر مکعب برای بررسی ترکیب سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی آن‌ها برداشت شده و نمونه‌ها از دید هوازدگی و نبود ترک‌های بزرگ مورد بررسی قرار گرفتند. از نمونه‌های دستی برش نازک تهیه شده و سپس به طور کامل با میکروسکوپ پلاریزان بررسی گردید. از ۵۰ مقطع نازک بررسی شده ۲۶ نمونه که از دیدگاه کانی‌شناسی و هوازدگی مناسب بودند انتخاب شده و بلوک‌های مقاطع مورد نظر برای انجام آزمون‌های مکانیک سنگی به دانشگاه زنجان منتقل گردید. از بلوک‌های سنگی مغزه‌های استوانه‌ای شکل براساس استانداردهای پیشنهادی ISRM, 2007 تهیه شده است که برای انجام آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های مهندسی مورد استفاده قرار گرفتند [۲۴]. برای مطالعه ویژگی‌های کانی‌شناسی ماسه‌سنگ‌ها، از امتداد مغزه‌های بدست آمده از بلوک‌های سنگی مجدداً مقطع نازک تهیه شده و با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مورد مطالعه قرار گرفت همچنین برای تعیین ترکیب کانی‌شناسی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه علاوه بر مطالعات پتروگرافی انجام شده سه نمونه به صورت تصادفی انتخاب شده و با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) برای بدست آوردن ترکیب دقیق کانی‌شناسی مورد آنالیز قرار گرفت. XRD یا همان پراش اشعه ایکس^۱ روشی پر کاربرد در بررسی خصوصیات بلورها و تشخیص کانی‌های تشکیل دهنده سنگ است. در این روش از پراش اشعه ایکس بر روی نمونه، جهت بررسی ویژگی‌های نمونه استفاده می‌شود

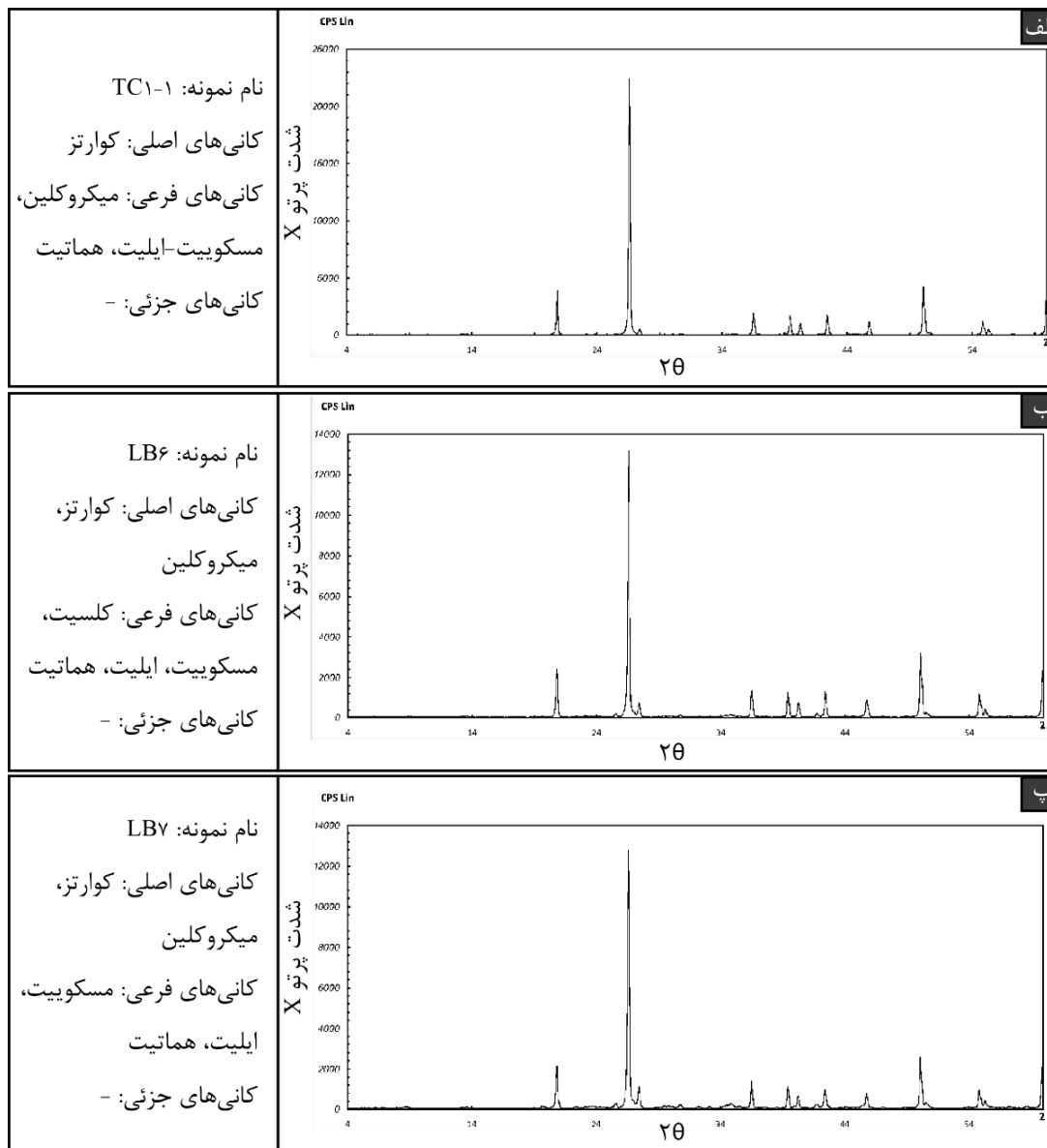
1 X-Ray Diffraction

جدول ۱. نتایج به دست آمده از بررسی سنگ شناسی ماسه سنگ های مورد مطالعه در سه گروه با درصد کوارتز مختلف

Table 1. The results obtained from the lithological study of the studied sandstones in three groups with different quartz percentages

گروه ها	شماره	نام نمونه	کوارتز (%)	فلدسپار (%)	خرده سنگ (%)	کانی سنگین (%)	میکا (%)	سیمان کریاته (٪)	سیمان سیلیسی (٪)	ماتریکس (٪)	فضای خالی (٪)	کانی کدر (٪)
میانگین درصد کوارتز پایین	۱	C5-7	۶۴	۲۴	۵	۰	۱	۰	۰	۴	۰	۴
	۲	C5-5	۷۰	۱۸	۴	۰	۰	۰	۱	۴	۰	۴
	۳	C5-6	۶۱	۲۱	۴	۰	۰	۲	۳	۴	۰	۵
	۴	C5-4	۶۳	۱۸	۴	۰	۱	۰	۴	۴	۰	۶
	۵	C5-2	۶۱	۲۴	۵	۱	۰	۰	۳	۳	۰	۳
	۶	C5-3	۶۲	۱۸	۵	۱	۱	۰	۲	۴	۲	۵
	۷	C5-1	۶۰	۲۳	۵	۰	۰	۰	۲	۵	۱	۴
	۸	C4-1	۷۳	۱۸	۳	۰	۰	۰	۱	۳	۰	۲
	۹	D3-1	۶۵	۲۱	۶	۰	۰	۰	۲	۴	۰	۲
	۱۰	D3-4	۶۲	۲۱	۶	۰	۰	۰	۲	۵	۲	۲
		میانگین	۶۴/۱	۲۰/۶	۴/۷	۰/۲	۰/۳	۰/۲	۲	۳/۹	۰/۵	۳/۵
		انحراف معیار	۴/۲۳	۲/۵۰	۰/۹۵	۰/۴۲	۰/۴۸	۰/۶۳	۱/۱۵	۰/۷۴	۰/۸۵	۱/۴۳
		ماکزیمم	۷۳	۲۴	۶	۱	۱	۲	۴	۵	۲	۶
		مینیمم	۶۰	۱۸	۳	۰	۰	۰	۰	۳	۰	۲
میانگین درصد کوارتز متوسط	۱۱	LB10	۷۱	۱۲	۵	۰	۱	۰	۲	۴	۳	۲
	۱۲	LB15	۷۲	۱۳	۵	۰	۰	۰	۲	۵	۰	۳
	۱۳	LB7	۷۴	۱۲	۴	۰	۱	۰	۲	۴	۰	۳
	۱۴	LB13	۷۱	۱۲	۶	۰	۱	۰	۳	۴	۰	۳
	۱۵	LB11	۷۰	۱۴	۵	۰	۰	۰	۵	۴	۰	۲
	۱۶	LB8	۶۷	۱۵	۶	۰	۰	۰	۵	۵	۰	۲
	۱۷	LB4	۶۶	۱۵	۵	۰	۰	۰	۳	۶	۱	۴
	۱۸	LB6	۶۱	۱۵	۵	۰	۰	۰	۹	۶	۱	۳
	۱۹	LB9	۵۹	۱۷	۷	۰	۰	۰	۷	۷	۰	۳
			میانگین	۶۷/۸۹	۱۳/۸۹	۵/۳۳	۰/۰۰	۰/۳۳	۰/۰۰	۴/۲۲	۵/۰۰	۰/۵۶
		انحراف معیار	۵/۱۱	۱/۷۶	۰/۸۷	۰/۰۰	۰/۵۰	۰/۰۰	۲/۴۹	۱/۱۲	۱/۰۱	۰/۶۷
		ماکزیمم	۷۴	۱۷	۷	۰	۱	۰	۹	۷	۳	۴
		مینیمم	۵۹	۱۲	۴	۰	۰	۰	۲	۴	۰	۲
میانگین درصد کوارتز بالا	۲۰	TC3	۷۶	۱۲	۴	۰	۰	۰	۳	۴	۰	۱
	۲۱	TC4	۷۵	۱۲	۴	۰	۰	۰	۳	۵	۰	۱
	۲۲	TC1	۹۰	۴	۲	۰	۰	۰	۲	۰	۱	۱
	۲۳	TC1-2	۹۲	۴	۱	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۱
	۲۴	TC1-3	۹۰	۵	۱	۰	۰	۰	۱	۲	۰	۱
	۲۵	TC1-4	۹۵	۳	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
	۲۶	TC1-5	۹۳	۴	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰
		میانگین	۸۷/۲۹	۶/۲۹	۲/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۸۶	۱/۷۱	۰/۱۴	۰/۷۱

۰/۴۹	۰/۳۸	۲/۰۶	۰/۹۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۴۱	۳/۹۵	۸/۲۴	انحراف معیار
۱	۱	۵	۳	۰	۰	۰	۴	۱۲	۹۵	ماکزیمم
۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۳	۷۵	مینیمم



شکل ۴. نتایج آنالیز XRD سه نمونه از ۲۶ نمونه مطالعه شده (الف) با درصد کوارتز بالا (ب و پ) با درصد کوارتز متوسط

Fig. 4. XRD analysis results of three samples of the 26 samples studied, a) the high percentage of the mineral quartz, b, and c) the moderate percentage of the mineral quartz,

قرار گرفتند (شکل ۴). مطابق نتایج به دست آمده کانی کوارتز به عنوان کانی اصلی در نمونه‌های مورد بررسی بوده و کانی‌های میکروکلین، مسکویت، کلسیت و دولومیت به عنوان کانی‌های فرعی وجود دارند. براساس مطالعات پتروگرافی، ماسه‌سنگ‌ها عمدتاً از کانی‌های کوارتز و فلدسپار و مقدار ناچیز خرده‌سنگ تشکیل شده‌اند. تغییرات مقدار

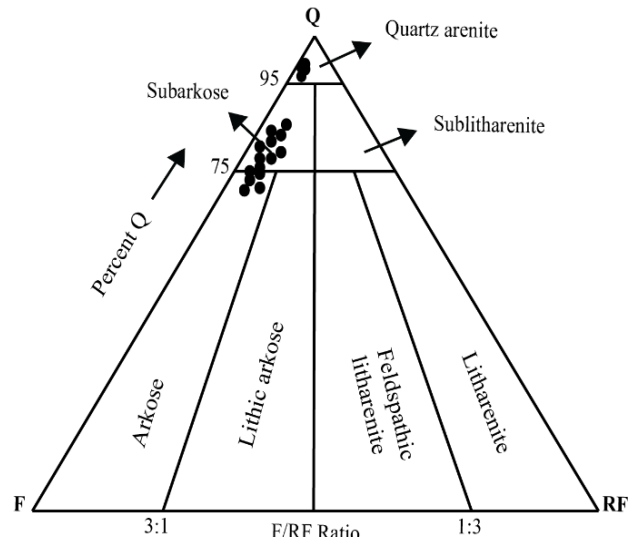
برش‌های نازک درصد کانی‌ها و اجزای تشکیل دهنده‌ی ماسه‌سنگ‌ها شناسایی گردیدند که نتایج به دست آمده در سه گروه براساس افزایش میانگین درصد کانی کوارتز ارائه شده است (جدول ۱). همچنین برای اطمینان از نتایج مطالعات کانی‌شناسی با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان سه نمونه به طور تصادفی انتخاب شده و تحت آنالیز XRD

۲-۴- ویژگی‌های مهندسی

نتایج مربوط به ویژگی‌های مهندسی ماسه‌سنگ‌های مطالعه شده نظیر مقاومت کششی برزیلی، سرعت موج فشاری، چگالی خشک و تخلخل در سه گروه بر اساس افزایش میانگین درصد کانی کوارتز در جدول ۲ نشان داده شده است. تخلخل رابطه‌ی نسبی معکوس مابین دانه‌ها و فضای خالی را نشان می‌دهد و وزن مخصوص خشک اطلاعاتی در مورد ترکیب کانی‌شناسی یا اجزای دانه ارائه می‌دهد [۲۸]. مطابق جدول دامنه تغییرات وزن مخصوص خشک نمونه‌ها ۲/۶۰ - ۲/۶۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد و مقادیر تخلخل از ۰/۷۷ تا ۲/۰۶ درصد متغیر است که نشان می‌دهد نمونه‌های بررسی شده متراکم بوده و تخلخل آنها بسیار ناچیز است. مقاومت کششی برزیلی به طور گسترده در فاز طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی مانند پی‌ها و تونل‌ها استفاده می‌شود [۲۹] مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت کششی برزیلی برای آزمون‌های بررسی شده از ۸/۲ تا ۲۵/۵ مگاپاسکال تغییر می‌کند و مقدار میانگین آن ۱۶/۵۶ مگاپاسکال می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت کششی برزیلی و میانگین ۱۶/۵۶ مگاپاسکال برای ۲۶ آزمون بررسی شده می‌توان چنین استنباط نمود که نمونه‌ها از نظر مقاومت کششی که ضعف مصالح سنگی به شمار می‌آید از شرایط خوبی برخوردار هستند. مقادیر محاسبه‌شده‌ی سرعت موج فشاری مابین ۳/۷۵ - ۵/۲۴ کیلومتر بر ثانیه تغییر می‌کند و مقدار میانگین آن ۴/۶۱ کیلومتر بر ثانیه می‌باشد. سرعت امواج در سنگ متناسب با کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن است [۳۰] و در نمونه‌های مطالعه شده ترکیب کانی‌شناسی یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در تغییرات سرعت موج فشاری نمونه‌های مورد مطالعه می‌باشد.

۵- اثر کانی کوارتز بر روی ویژگی‌های مهندسی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه

برای بررسی تأثیر درصد کانی کوارتز نتایج آزمون‌های مقاومت کششی برزیلی، سرعت موج فشاری و وزن مخصوص خشک مربوط به سه گروه ماسه‌سنگ‌های مطالعه شده با میانگین درصد کوارتز پایین، متوسط و بالا به صورت نمودار جعبه‌ای در شکل ۶ ارائه شده است. در جدول ۴ نیز تحلیل همبستگی خطی به صورت مجزا مابین ویژگی‌های مهندسی و کانی‌های تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه نشان داده شده است تا پارامترهای که بیشترین تأثیر را



شکل ۵. نمودار فولک [۲۷] ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه
Fig. 5. Folk diagram of studied sandstones [27]

کوارتز در نمونه‌های مورد مطالعه به طور کلی از ۵۹٪-۹۵٪، فلدسپار ۳٪-۲۴٪، خرده‌سنگ ۱٪-۷٪، سیمان ۰٪-۹٪، ماتریکس ۰٪-۷٪ درصد می‌باشد. ماسه‌سنگ‌های انتخابی با توجه به رده‌بندی Folk در گروه‌های آرکوز، ساب‌آرکوز و کوارتزآرنایت دسته‌بندی می‌شوند (شکل ۵). تغییرات میزان تخلخل ناچیز و کمتر از ۳ درصد می‌باشد همچنین درصد ماتریکس، میکا و کانی‌های سنگین برای ۲۶ نمونه‌ی مطالعه شده به ترتیب در بازه ۰٪-۷٪، ۰٪-۱٪ و ۰٪-۱٪ تغییر می‌کند. سیمان این ماسه‌سنگ‌ها عمدتاً از نوع سیلیسی بوده و تنها در یکی از نمونه‌ها ۲ درصد سیمان کلسیتی نیز مشاهده شده است. خرده‌سنگ‌های موجود نیز بیشتر از نوع چرت می‌باشند که به میزان میانگین ۴/۰۱ درصد در نمونه‌ها شناسایی شده است. کانی کوارتز موجود در نمونه‌ها عمدتاً از نوع تک‌کریستالی بوده که مقاومت بالاتری نسبت به کوارتزهای چند کریستالی نشان می‌دهند. کوارتزهای چند کریستالی گروه یک نسبت به گروه سه، به‌طور میانگین ۱۰ درصد بیشتر است. خاموشی کانی کوارتز عمدتاً موجی‌شکل بوده و برای گروه یک نسبت به گروه سه میانگین ۱۰ درصد بیشتر است. دگرسانی فلدسپارها در ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه خیلی کم است درصد ماتریکس ثانویه ناچیز در فضای مابین اجزاء و بر روی ذرات ناپایدار تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌ها وجود میکروکلین که مقاومت کمتری نسبت به ارتوکلاز و پلاژیوکلاز در مقابل هوازدگی دارد نشان از سالم بودن نمونه‌های برداشت‌شده از نظر هوازدگی است.

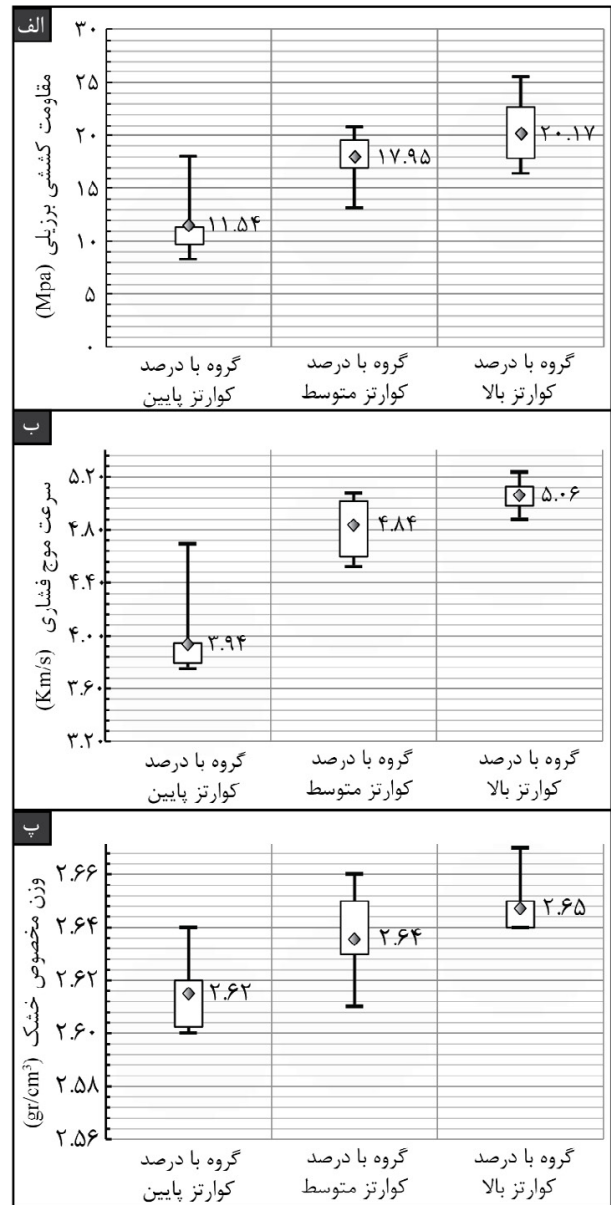
جدول ۲. ویژگی‌های مهندسی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه
Table 2. Engineering properties of the studied sandstones

سرعت موج فشاری (Km/s)	مقاومت کششی برزیلی (Mpa)	ویژگی‌های فیزیکی		شماره نمونه	شماره	گروه
		تخلخل (%)	وزن مخصوص خشک (gr/cm3)			
۳/۸۴	۱۰/۹	۲/۰۶	۲/۶۱	C5-7	۱	میانگین درصد کوارتز پایین
۳/۷۹	۱۰/۵	۱/۹۳	۲/۶۱	C5-5	۲	
۳/۷۵	۹/۶	۱/۹۲	۲/۶۰	C5-6	۳	
۳/۷۸	۹/۱	۱/۹۳	۲/۶۰	C5-4	۴	
۳/۸۶	۱۱	۱/۷۷	۲/۶۲	C5-2	۵	
۳/۹۵	۱۱/۵	۲/۰۶	۲/۶۱	C5-3	۶	
۳/۸۱	۱۱	۲/۰۴	۲/۶۰	C5-1	۷	
۴/۶۹	۸/۲	۱/۴۷	۲/۶۴	C4-1	۸	
۳/۹۳	۱۸	۱/۴۴	۲/۶۲	D3-1	۹	
۳/۹۵	۱۵/۶	۱/۳۵	۲/۶۴	D3-4	۱۰	
۳/۹۴	۱۱/۵۴	۱/۸۰	۲/۶۲	میانگین		
۰/۲۷	۳/۰۰	۰/۲۸	۰/۰۲	انحراف معیار		
۴/۶۹	۱۸	۲/۰۶	۲/۶۴	ماکزیمم		
۳/۷۵	۸/۲	۱/۳۵	۲/۶	مینیمم		
۵/۰۵	۱۸/۶	۰/۹۸	۲/۶۳	LB10	۱۱	میانگین درصد کوارتز متوسط
۴/۵۲	۱۹/۳	۰/۹۸	۲/۶۴	LB15	۱۲	
۴/۵۶	۱۶/۰	۱/۲۶	۲/۶۵	LB7	۱۳	
۵/۰۸	۱۷/۲	۰/۷۷	۲/۶۵	LB13	۱۴	
۴/۹۶	۱۳/۲	۱/۳۵	۲/۶۶	LB11	۱۵	
۵/۰۲	۱۷/۰	۱/۰۰	۲/۶۴	LB8	۱۶	
۴/۶۰	۱۹/۶	۱/۳۴	۲/۶۱	LB4	۱۷	
۴/۸۵	۲۰/۸	۱/۴۰	۲/۶۳	LB6	۱۸	
۴/۸۸	۱۹/۹	۱/۰۸	۲/۶۱	LB9	۱۹	
۴/۸۴	۱۷/۹۶	۱/۱۳	۲/۶۴	میانگین		
۰/۲۲	۲/۳۶	۰/۲۲	۰/۰۲	انحراف معیار		
۵/۰۸	۲۰/۸	۱/۴	۲/۶۶	ماکزیمم		
۴/۵۲	۱۳/۲	۰/۷۷	۲/۶۱	مینیمم		
۵/۲۴	۲۵/۵	۰/۸۳	۲/۶۴	TC3	۲۰	میانگین درصد کوارتز بالا
۵/۱۴	۱۸/۴	۰/۹۴	۲/۶۴	TC4	۲۱	
۵/۰۶	۲۰/۱	۱/۳۵	۲/۶۴	TC11	۲۲	
۵/۰۹	۱۶/۴	۱/۴۶	۲/۶۴	TC12	۲۳	
۴/۹۱	۱۷/۷	۱/۶۰	۲/۶۷	TC13	۲۴	
۵/۱۲	۱۸/۰	۱/۲۳	۲/۶۵	TC14	۲۵	
۴/۸۸	۲۵/۱	۱/۳۷	۲/۶۵	TC15	۲۶	
۵/۰۶	۲۰/۱۷	۱/۲۵	۲/۶۵	میانگین		
۰/۱۳	۳/۶۷	۰/۲۸	۰/۰۱	انحراف معیار		
۵/۲۴	۲۵/۵	۱/۶	۲/۶۷	ماکزیمم		
۴/۸۸	۱۶/۴	۰/۸۳	۲/۶۴	مینیمم		

مقاومت کششی برزیلی با افزایش میانگین درصد کانی کوارتز و کاهش درصد کانی فلدسپار در نمونه‌های مورد مطالعه، افزایش می‌یابد. وجود سطوح ضعف (رخ) و ریزترک در کانی‌های فلدسپار [۱۳] موجود در نمونه‌های مورد آزمایش باعث می‌شود مقاومت کششی برزیلی کاهش یابد. همچنین وجود کانی کوارتز به دلیل مقدار کم سطوح ضعف (رخ) یا عدم وجود آن و پر کردن فضای خالی دیگر ذرات تشکیل دهنده سنگ سبب بهبود خواص مقاومتی می‌گردد. پارامتر فیزیکی سرعت موج فشاری نیز با افزایش میانگین درصد کانی کوارتز، افزایش پیدا کرده است. ترکیب کانی‌شناسی، متوسط اندازه دانه و تخلخل از جمله مهم‌ترین پارامترهایی هستند که بر روی سرعت موج فشاری در نمونه‌های سنگی تأثیر می‌گذارند ولی در نمونه‌های مورد مطالعه درصد تخلخل در بازه ۰/۷۷ تا ۲/۰۶ تغییر می‌کند و از نظر متوسط اندازه دانه نیز در محدوده ماسه‌سنگ با اندازه دانه‌ی متوسط طبقه‌بندی می‌گردند به همین دلیل این دو پارامتر تأثیر مهمی بر روی تغییرات سرعت موج فشاری در نمونه‌های مورد بررسی ندارند. با توجه به اینکه عمده کانی‌های تشکیل دهنده نمونه‌های مورد مطالعه کوارتز و فلدسپار (ارتوکلاز) هستند و سرعت موج فشاری در کانی کوارتز نسبت به کانی فلدسپار (ارتوکلاز) بالاتر است [۳۱] به همین دلیل با افزایش درصد کانی کوارتز در نمونه‌ها، سرعت موج فشاری نیز افزایش یافته است. ویژگی فیزیکی وزن مخصوص خشک با افزایش درصد کانی کوارتز در نمونه‌ها افزایش یافته است (شکل ۶ و ۷). میزان کوارتز بر روی پارامترهای مهندسی وزن مخصوص خشک و تخلخل تأثیر می‌گذارد بدین صورت که کانی‌های کوارتز بی‌بعد فضاهای مابین دانه‌ها را پر می‌کند [۳۲] و با افزایش میانگین درصد کوارتز در گروه‌ها وزن مخصوص خشک افزایش و پیرو آن تخلخل کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد افزایش درصد کانی کوارتز در نمونه‌های بررسی شده سبب بهبود سه پارامتر مهندسی سرعت موج فشاری، مقاومت کششی برزیلی و وزن مخصوص خشک گردیده است.

۶- همبستگی ویژگی‌های مهندسی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه

سه پارامتر فیزیکی (وزن مخصوص خشک، تخلخل، سرعت موج فشاری) و یک پارامتر مکانیکی (مقاومت کششی برزیلی) برای ۲۶ نمونه ماسه‌سنگی برداشت شده محاسبه گردید. در جدول ۳ ضریب



شکل ۶. نمودارهای مربوط به تغییرات ویژگی‌های شاخص ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه نسبت به درصد کانی کوارتز (الف) مقاومت کششی برزیلی (ب) سرعت موج فشاری (پ) وزن مخصوص خشک

Fig. 6. Graphs related to changes in the studied engineering properties of the sandstone in relation to the quartz mineral content (a) Brazilian tensile strength (b) p-wave velocity (c) dry unit weight

برروی خصوصیات مهندسی نمونه‌ها دارند تفکیک و مشخص گردند. همچنین نمودار رابطه‌ی مابین کانی‌های اصلی تشکیل دهنده‌ی نمونه‌ها (کوارتز، فلدسپار و خرده‌سنگ) و مقاومت کششی برزیلی، سرعت موج فشاری و وزن مخصوص خشک در شکل ۷ رسم گردیده است. با توجه به جدول ۴ و نمودارهای رسم شده پارامتر مکانیکی

جدول ۳. ضریب همبستگی خطی مابین ویژگی‌های مهندسی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه

Table 3. The linear correlation coefficient between the engineering and the mineralogical properties of the studied sandstone

سرعت موج فشاری	مقاومت کششی برزیلی	تخلخل	وزن مخصوص خشک	
۱/۰۰	۰/۶۹	-۰/۸۰	۰/۷۲	سرعت موج فشاری
	۱/۰۰	-۰/۷۲	۰/۴۶	مقاومت کششی برزیلی
		۱/۰۰	-۰/۵۹	تخلخل
			۱/۰۰	وزن مخصوص خشک

کوارتز مورد مطالعه دقیق قرار گرفتند و بر اساس آزمون‌ها و مطالعات صورت گرفته نتایج ذیل حاصل گردید:

۱- با توجه به درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی ماسه‌سنگ‌های مطالعه شده و نمودار پیشنهادی (Folk) برای نام‌گذاری ماسه‌سنگ‌ها، نمونه‌های برداشت‌شده از نوع آرکوز، ساب‌آرکوز و کوارتزآرنایت می‌باشند.

۲- ده پارامتر کانی‌شناسی برای ماسه‌سنگ‌های مختلف بررسی شده و تأثیر آن‌ها بر روی خواص مهندسی ماسه‌سنگ‌ها بررسی شد. با توجه به نتایج مطالعات، کانی کوارتز بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ‌های بررسی شده تأثیرگذار بوده و ارتباط معناداری با آن‌ها نشان می‌دهد.

۳- بررسی همبستگی ویژگی‌های مهندسی با پارامترهای پتروگرافی نشان می‌دهد که مشخصه‌های کانی‌شناسی بر روی ویژگی‌های مقاومتی ماسه‌سنگ‌های بررسی شده تأثیرگذار است.

۴- پارامتر مکانیکی مقاومت کششی برزیلی با افزایش میانگین درصد کانی کوارتز در نمونه‌های بررسی شده، افزایش می‌یابد که این نتیجه نشان از بهبود مقاومت کششی ماسه‌سنگ‌ها با افزایش میزان درصد کانی کوارتز در نمونه‌های بررسی شده دارد.

۵- سرعت موج فشاری از جمله پارامترهای فیزیکی است که در ماسه‌سنگ‌های برداشت‌شده مورد بررسی قرار گرفته و با افزایش میانگین درصد کانی کوارتز و کاهش درصد کانی فلدسپار افزایش می‌یابد. کانی فلدسپار به دو نوع اورتوکلاز و پلاژیوکلاز تقسیم‌بندی می‌شود با توجه به اینکه فلدسپار موجود در ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه از نوع اورتوکلاز می‌باشند و سرعت موج فشاری در اورتوکلاز کمتر از کانی کوارتز می‌باشد به همین دلیل سرعت موج فشاری با افزایش

همبستگی (R) بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از آنالیز رگرسیون تک متغیره محاسبه شده است. مطابق جدول مابین پارامترهای سرعت موج فشاری و تخلخل ($R=-0/80$) و سرعت موج فشاری و وزن مخصوص خشک ($R=0/72$) ارتباط معناداری برقرار است همچنین مابین پارامترهای مقاومت کششی برزیلی و تخلخل ضریب همبستگی ($R=-0/72$) وجود دارد. تخلخل در سنگ از جمله پارامترهای مهمی است که چگالی سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد و چگالی در ارتباط مستقیم با پارامتر فیزیکی سرعت موج فشاری [۳۳] و پارامتر مکانیکی مقاومت کششی برزیلی می‌باشد [۳۴]. همان‌طور که انتظار می‌رود تخلخل با وزن مخصوص خشک رابطه عکس نشان داده و با افزایش حفره در ماسه‌سنگ‌ها، چگالی خشک با ضریب همبستگی ($R=-0/59$) کاهش یافته است. در شکل ۸ نمودار نقطه‌ای مربوط به همبستگی داده‌های فیزیکی و مکانیکی تعدادی از پارامترها ترسیم شده و نتایج هر سه گروه با میانگین درصد کوارتز پایین، متوسط و بالا آورده شده است. با توجه به شکل ۶، مابین تخلخل و سرعت موج فشاری رابطه‌ی معنادار با همبستگی ($R=-0/80$) برقرار است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان با استفاده از رابطه‌ی ارائه‌شده سرعت موج فشاری را با استفاده از پارامتر فیزیکی تخلخل با تقریب مناسبی برای ماسه‌سنگ‌های مناطق مورد مطالعه پیش‌بینی نمود و در مطالعات ژئومکانیکی آن منطقه استفاده کرد.

۷- نتیجه‌گیری

۲۶ نمونه‌ی ماسه‌سنگی از سازندهای لالون، زاگون و واحد ماسه‌سنگی تاپ‌کوارتزیت استان زنجان باهدف بررسی تأثیرپذیری چهار ویژگی مهندسی از خواص پتروگرافی به‌خصوص میزان کانی



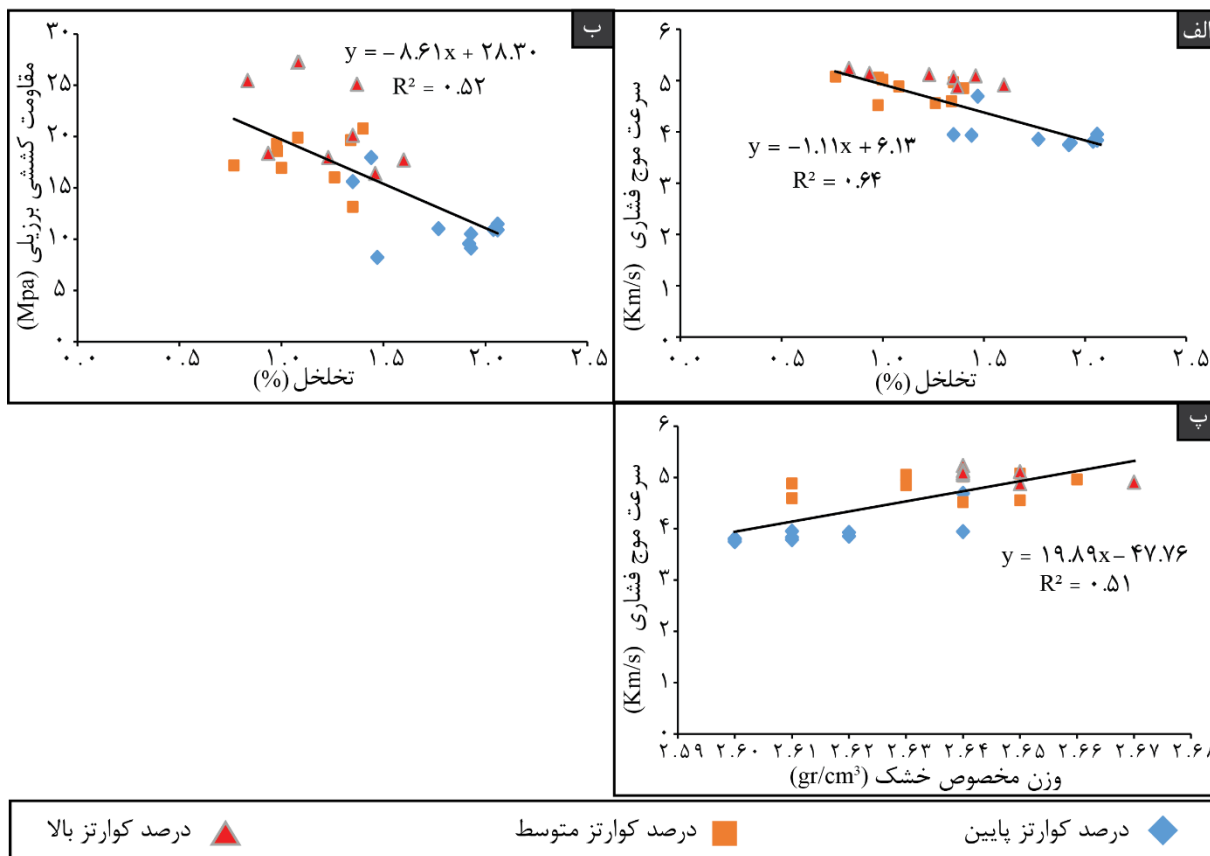
شکل ۷. نمودارهای میله‌ای ارتباط مابین (الف) مقاومت کششی برزیلی، (ب) سرعت موج فشاری و (پ) وزن مخصوص خشک با عمده کانی‌های تشکیل دهنده ۲۶ نمونه‌ی مطالعه شده

Fig. 7. Bar charts for 26 studied samples showing, a) The relationship between the Brazilian tensile strength and the percentage of the minerals, b) The relationship between the p-wave velocity and the percentage of the minerals.

جدول ۴. ضریب همبستگی خطی مابین ویژگی‌های مهندسی و کانی‌شناسی ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه

Table 4. The linear correlation coefficient between the engineering properties of the studied sandstones

ماتریکس	سیمان	خرده سنگ	فلدسپار	کوارتز	
-۰/۲۲	۰/۱۶	-۰/۳۲	-۰/۷۸	۰/۶۱	سرعت موج فشاری
-۰/۰۴	۰/۱۵	-۰/۱۴	-۰/۶۱	۰/۴۴	مقاومت کششی برزیلی
-۰/۴۰	-۰/۱۷	-۰/۴۳	-۰/۷۰	۰/۶۸	وزن مخصوص خشک



شکل ۸. همبستگی خطی مابین پارامترهای مهندسی برای ۶۲ نمونه مطالعه شده، الف) ارتباط بین سرعت موج فشاری و تخلخل، ب) ارتباط بین مقاومت کششی برزیلی و تخلخل، پ) ارتباط بین سرعت موج فشاری و وزن مخصوص خشک

Fig. 8. Linear correlation of engineering parameters for 26 studied samples, a) The relationship between the p-wave velocity and the porosity, b) The relationship between the Brazilian tensile strength and the porosity, c) The relationship between the p-wave velocity and the dry unit weight

۷- دو پارامتر فیزیکی سرعت موج فشاری و تخلخل ارتباط معناداری با ضریب همبستگی ($R = -0.80$) نشان می‌دهند که می‌توان از معادله‌ی به‌دست‌آمده برای پیش‌بینی پارامتر سرعت موج فشاری با استفاده از تخلخل استفاده نمود. لازم به ذکر است که این معادله صرفاً برای ماسه‌سنگ‌های منطقه مورد مطالعه کاربرد داشته و

میانگین درصد کانی کوارتز در نمونه‌ها، افزایش می‌یابد. ۶- با توجه به خاصیت پرکنندگی کانی کوارتز در نمونه‌های مورد مطالعه، میانگین وزن مخصوص خشک سه گروه ماسه‌سنگ‌های ساب‌آرکوز، آرکوز و کوارتزآرنایت با افزایش میانگین درصد کانی کوارتز، افزایش می‌یابد.

قابل تعمیم به کل ماسه‌سنگ‌ها نمی‌باشد.

۸- مراجع

- related to mineralogy and texture of some granitic rocks, *Engineering Geology*, 4(2) (1970) 155-160.
- [12] R.H.H. Hugman, M. Friedman, Effects of texture and composition on mechanical behavior of experimentally deformed carbonate rocks, *AAPG Bulletin*, 63(9) (1979) 1478-1489.
- [13] T. Onodera, H. Asoka Kumara, Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks: *Bulletin of the International Association for Engineering Geology*, v. 22. (1980)
- [14] A. Tuğrul, I. Zarif, Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey, *Engineering geology*, 51(4) (1999)
- [15] K. Zorlu, C. Gokceoglu, F. Ocakoglu, H. Nefeslioglu, S. Acikalin, Prediction of uniaxial compressive strength of sandstones using petrography-based models, *Engineering Geology*, 96(3-4) (2008) 141-158.
- [16] K. Zorlu, R. Ulusay, F. Ocakoglu, C. Gokceoglu, H. Sonmez, Predicting intact rock properties of selected sandstones using petrographic thin-section data, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41 (2004) 93-98
- [17] F. Bell, The physical and mechanical properties of the fell sandstones, Northumberland, England, *Engineering Geology*, 12 (1978) 1-29.
- [18] R. Ulusay, K. Türeli, M. Ider, Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques, *Engineering Geology*, 38(1-2) (1994) 135-157.
- [19] A. SHAKOOR, R.E. BONELLI, Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties, and mechanical properties of selected sandstones, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 28(1) (1991) 55-71.
- [20] A. Lakirouhani, F. Asemi, A. Zohdi, Relationship Between Grain Size and Physical Properties of Dolomites in Order to Geomechanics Study of Dolomite Reservoirs. (2018)
- [21] A. Aghanabati, Geology organization and Mineral
- [1] R. Prikryl, Some microstructural aspects of strength variation in rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(5) (2001) 671-682.
- [2] I. Yilmaz, G. Yuksek, Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, and ANFIS models, *International journal of rock mechanics and mining sciences* (1997), 46(4) (2009) 803-810.
- [3] D. Little, J. Button, P. Jayawickrama, M. Solaimanian, B. Hudson, Quantify shape, angularity and surface texture of aggregates using image analysis and study their effect on performance, Rep. No. 0-1707, 4. (2003)
- [4] C. Ozturk, E. Nasuf, S. Kahraman, Estimation of rock strength from quantitative assessment of rock texture, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114(6) (2014) 471-480.
- [5] H. Williams, F.J. Turner, C.M. Gilbert, *Petrography: An introduction to the study of rocks in thin section*, 1982.
- [6] A. Ersoy, M. Waller, Textural characterisation of rocks, *Engineering geology*, 39(3-4) (1995)
- [7] W.F. Brace, Dependence of fracture strength of rocks on grain size, in: *The 4th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, American Rock Mechanics Association, (1961).
- [8] N. Yusof, H. Zabidi, Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of granitic rock from Hulu Langat, Selangor, *Procedia Chemistry*, 19 (2016) 975-980.
- [9] F.M. Mendes, L. Aires-Barros, F.P. Rodrigues, The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock masses, in: *1st ISRM Congress, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*, (1966).
- [10] R. Willard, J. McWilliams, Microstructural techniques in the study of physical properties of rock, in: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Elsevier, (1969), pp. 1-12.
- [11] R. Merriam, H.H. Rieke III, Y.C. Kim, Tensile strength

- [29] A. Mahdiyar, D.J. Armaghani, A. Marto, M. Nilashi, S. Ismail, Rock tensile strength prediction using empirical and soft computing approaches, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(6) (2019) 4519-4531.
- [30] A. Fahimifar, H. Soroush, *Rock Mechanics Tests: Theoretical aspects and standards, Vol. I, Laboratory tests*, Amirkabir University of Technology, Publishing Center (Tafresh). (2011)
- [31] D. Fourmaintraux, *Characterization of rocks laboratory tests*, La Mécanique des roches appliquée aux ouvrages du génie civil. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris. (1976)
- [32] H. Liu, S. Kou, P.-A. Lindqvist, J.E. Lindqvist, U. Åkesson, *Microscope rock texture characterization and simulation of rock aggregate properties*, *Sveriges Geologiska Undersökning*, (2005).
- [33] P. Singh, A. Tripathy, A. Kainthola, B. Mahanta, V. Singh, T. Singh, *Indirect estimation of compressive and shear strength from simple index tests*, *Engineering with Computers*, 33(1) (2017) 1-11.
- [34] S. Yagiz, *Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test*, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(1) (2009) 66-74.
- exploration of the country *Geology of Iran*, (2004). (In Persian)
- [22] M.A. Naieni, *hodabavde-Soltanieh geological maps, scale 1:100000*, Geology organization and Mineral exploration of the country, (1993). (In Persian)
- [23] A.S. A. Babackhani, *Zanjan geological maps, scale 1:100000*, Geology organization and Mineral exploration of the country, (2004). (In Persian)
- [24] U.R. ISRM, J. Hudson, *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2006-1974*, Kozan, Ankara, (2007)
- [25] B. Lavina, P. Dera, R.T. Downs, *Modern X-ray diffraction methods in mineralogy and geosciences*, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 78(1) (2014) 1-31.
- [26] R.V. Ingersoll, T.F. Bullard, R.L. Ford, J.P. Grimm, J.D. Pickle, S.W. Sares, *The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson point-counting method*, *Journal of Sedimentary Research*, 54(1) (1984) 103-116.
- [27] R. Folk, *Petrology of sedimentary rocks* (pp. 26-27), Austin, Texas: Hemphill. (1980)
- [28] R.E. Goodman, *Introduction to rock mechanics*, Wiley New York, (1989)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Lakirouhani, M. Bakhshi, A. Zohdi, *Relation between microstructure and physical and engineering properties of sandstones, with emphasis on quartz content*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(8) (2020) 2093-2108.

DOI: 10.22060/ceej.2019.15896.6066



