

برآورد خصوصیات مکانیکی گرانیتوئید کوهسنگی مشهد

بر مبنای محاسبه ضریب بافت

سعید علیقلی^{۱*}؛ غلامرضا لشکری پور^۲؛ محمد غفوری^۳؛ مرتضی رزم‌آرا^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد (s_aligholi@yahoo.com)

۲- استاد گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد (dashkaripour@um.ac.ir)

۳- استاد گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد (ghafoori@um.ac.ir)

۴- دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد (razmaramorteza@gmail.com)

چکیده

بر اساس آنالیز تصاویر میکروسکوپی بدست آمده از مقاطع نازک گرانیتوئید کوهسنگی مشهد با نرم‌افزار JMicroVision و روش نیمه‌اتوماتیک بسط‌یافته، ضریب بافت این توده گرانیتوئیدی ۱/۹۱۵۲ بدست آمد. بر مبنای ضریب بافت محاسبه‌شده و روابط تجربی موجود، خصوصیات مکانیکی (مقاومت، حفرپذیری) این گرانیتوئید برآورد گردید. همچنین شاخص بار نقطه‌ای $IS_{(50)}$ این سنگ بر اساس آزمون بار نقطه‌ای برابر با ۶/۱۴ مگاپاسکال بدست آمد. بر اساس روابط تجربی موجود بین مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) با شاخص بار نقطه‌ای و ضریب بافت، اعتبار سنجی برآورد خصوصیات مقاومتی سنگ بر مبنای ضریب بافت صورت گرفت. مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه سنگ‌های مورد مطالعه با استفاده از ضریب بافت، حدود $11/65 \leq UCS \leq 145/57$ مگاپاسکال برآورد گردید، که تطابق قابل ملاحظه‌ای با نتیجه بدست آمده بر مبنای آزمون بار نقطه‌ای، یعنی ۱۴۷/۳۵ مگاپاسکال دارد.

کلمات کلیدی: JMicroVision؛ ضریب بافت؛ شاخص بار نقطه‌ای؛ مکانیک سنگ؛ گرانیتوئید کوهسنگی مشهد

۱- مقدمه

بررسی خصوصیات بافتی سنگ که بر اساس آنالیز روابط بین بلورها، توزیع اندازه ذرات و شکل دانه‌ها صورت می‌گیرد و اطلاعاتی را از سیر تبلور، چگونگی تشکیل سنگ و همچنین خواص مکانیکی آن در اختیار قرار می‌دهد، در مطالعات پتروگرافیکی (سنگ نگاری) و مکانیک سنگ همواره از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. امروزه اهمیت آنالیز دقیق مقاطع نازک در گرایش‌های مختلف زمین‌شناسی از جمله پترولوژی، زمین‌شناسی اقتصادی، رسوب‌شناسی، زمین‌شناسی ساختمانی و زمین‌شناسی مهندسی به خوبی مشخص شده است (برای نمونه؛ Boorman et al., 2004; Keulen et al., 2007 و Piochi et al., 2008).

خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ، بستگی بسیار زیادی با خصوصیات بافتی آن (اندازه دانه‌ها، شکل دانه‌ها، جهت‌یافتگی دانه‌ها و غیره) دارد. (Williams et al., 1982)، بافت را به عنوان درجه تبلور، دانه‌بندی و آرایش یا رابطه هندسی بین اجزای سازنده سنگ تعریف کردند. (Howarth and Rowlands, 1987)، پارامتر ضریب بافت را ارائه کردند. در دو دهه اخیر مطالعاتی به منظور برقراری ارتباط بین خصوصیات بافتی و ضریب بافت با خصوصیات مکانیکی سنگ صورت گرفته است (برای نمونه؛ Akesson et al., 2001; Jeng et al., 2004 و Tandon and Gupta, 2013). در چند سال اخیر و با گسترش فن‌آوری‌های مرتبط، از جمله تجهیز میکروسکپ‌ها به دوربین‌های دیجیتال، توسعه علم پردازش تصاویر و ابداع الگوریتم‌های مرتبط با آن در زمینه

تحلیل بافت و رنگ تصاویر دیجیتال، بسط برنامه‌های کامپیوتری در زمینه آنالیز و تحلیل اجزای تصویر، مطالعات زیادی در زمینه آنالیز تصاویر میکروسکوپی سنگ‌ها، به صورت اتوماتیک و نیمه‌اتوماتیک انجام شده است (برای نمونه؛ Młynarczuk et al., 2013 و Russ, 2002; Sutherland, 2007). به دلیل آنکه روش‌های اتوماتیک نیاز به شناسایی مرز دانه‌ها دارند و از طرف دیگر کانی‌ها در سنگ نیز همواره دارای ادخال، رخ، شکستگی و همچنین خصوصیات بافتی نظیر ماکل و خاموشی موجی هستند، تکنیک‌های شناسایی لبه مبتنی بر تن تصاویر خاکستری و یا مبتنی بر خصوصیات بافتی، قادر به تفکیک مرز کانی‌ها از یکدیگر نمی‌باشند. اما، در مطالعات مربوط به بررسی خصوصیات بافتی سنگ‌ها مرز دانه‌ها باید با دقت بالایی از یکدیگر تفکیک شوند، تا بتوان خصوصیات هندسی کانی‌های تشکیل دهنده سنگ را مورد بررسی قرار داد و بر مبنای آن خصوصیات بافتی آن را بررسی کرد.

هدف از این مقاله، معرفی یک روش کاربردی با دقت و سرعت بالا جهت تجزیه و تحلیل‌های بافتی مقاطع نازک سنگ می‌باشد که آنالیزهای مربوط به اندازه و شکل کانی‌ها را انجام دهد. با استفاده از روش ارائه شده می‌توان به برآورد خصوصیات مکانیکی سنگ بر اساس ویژگی‌های بافتی دست یافت.

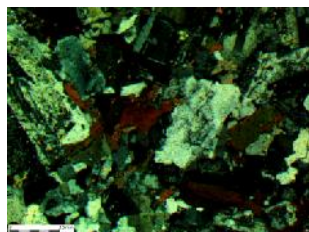
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه نمونه‌ها و مقاطع معرف

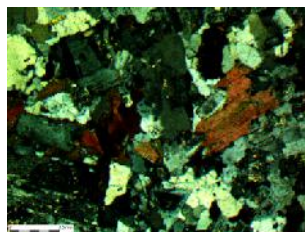
یکی از مراحل بسیار مهم در تهیه آنالیزهای مربوط به سنگ شناسی تهیه نمونه‌های معرف می‌باشد. در انجام آنالیزهای میکرومتریک نیز خطاهای مربوط به نمونه‌برداری از سنگی که مقطع نازک از آن تهیه شده است، نتایج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این مطالعه از ۳ نقطه توده گرانیتوئیدی کوهسنگی که در بخش جنوبی مشهد قرار دارد، نمونه برداری صورت گرفت. نمونه برداری از نقاطی صورت گرفت که دارای همگنی و یکنواختی کافی بودند. سعی شده است، همگنی هم در کانی‌های تشکیل دهنده و هم در اندازه آنها وجود داشته باشد، البته به طوری که بخش همگن، معرف کل توده سنگی مورد مطالعه باشد. سپس مقاطع نازک از این نمونه‌ها تهیه شد.

۲-۲- تهیه تصاویر

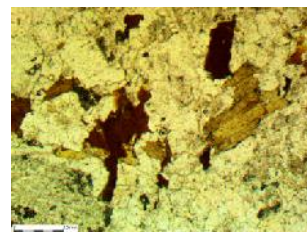
به منظور آنالیز مقاطع نازک، ابتدا توسط یک دوربین دیجیتال نصب شده بر روی میکروسکپ تصاویر تهیه شدند. به منظور جلوگیری از خطا در تشخیص مرز بین دانه‌های تشکیل دهنده سنگ، از هر بخش مورد مطالعه، سه تصویر تهیه شد (شکل ۱). که شامل: الف) تصویر در حالت نور قطبیده موازی (PPL)؛ ب) تصویر در حالت نور قطبیده متقاطع (XPL)؛ و ج) تصویر در حالت نور قطبیده متقاطع پس از ۴۵° چرخش هستند.



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۱- تصاویر مقطع نازک گرانیتوئید کوهسنگی مشهد (مقطع شماره ۱): الف) در حالت PPL؛ ب) در حالت XPL؛ پ) در حالت XPL پس از ۴۵° چرخش.

۳-۲- آنالیز تصاویر

از بین تصاویر بدست آمده برای هر مقطع، تصویری که دارای مرزهای مشخص تری بود، انتخاب شده و جهت تجزیه و تحلیل وارد محیط نرم افزار JMicroVision شد. سپس مقیاس تصویر با مقیاس میکروسکپ هماهنگ گردید و پس از مشخص شدن مرز دانه‌ها به صورت دستی و با دقت بالا (اشکال ۲-ب، ۲-ث، ۲-ج)، دانه‌ها به صورت پلی‌گون‌های مجزا در آمدند (اشکال ۲-پ، ۲-ج، ۲-خ). با توجه به شکل و اندازه پلی‌گون‌ها اطلاعاتی نظیر مساحت، محیط، طول، عرض و غیره برای هر دانه به دست آمد. نرم افزار JMicroVision برای هر یک از اشیای موجود در تصویر (در اینجا کانی‌ها) بیش از چهل توصیف‌گر هندسی را محاسبه می‌کند. که موارد مهم آن در زمینه محاسبه ضریب بافت در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول، مقادیر این توصیف-گرها به صورت میانگین ارائه شده‌اند.

در جدول ۱ مشاهده می‌شود که اطلاعات حاصل از تحلیل مقاطع نازک سنگ مورد مطالعه، کاملاً نزدیک به هم بوده و دقت بالای روش ارائه شده را نمایش می‌دهد، همچنین این نزدیکی و پیوستگی نشان‌دهنده آن است که توده مورد مطالعه همگنی بسیار مناسبی در بافت و توزیع اندازه ذرات دارد.

۴-۲- ضریب بافت

هوارک و رولندز (Howarth and Rowlands, 1987)، پارامتر ضریب بافت^۱ (TC) را ارائه کردند، که بر مبنای چهار ویژگی بافتی (کرویت، طولیل‌شدگی، جهت‌یافتگی و درجه تراکم دانه‌ها) بافت سنگ را ارزیابی می‌کند. ضریب بافت بر اساس رابطه (۱-۲) محاسبه می‌شود:

$$TC = AW \times \left[\left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \times \frac{1}{FF_0} \right) + \left(\frac{N_1}{N_0 + N_1} \right) \times AR_1 \times AF_1 \right] \quad (1-2)$$

که در آن

AW: وزن مربوط به چگالی تراکمی دانه‌هاست؛

N_0 : تعداد دانه‌هایی که نسبت طول به عرض آنها کمتر از ۲ است؛

N_1 : تعداد دانه‌هایی که نسبت طول به عرض آنها بیشتر از ۲ است؛

FF_0 : میانگین حسابی فاکتور شکل تمام دانه‌های N_0 است، که به صورت $\frac{4 \cdot \pi \cdot Area}{Perimeter^2}$ محاسبه می‌شود (Area: مساحت، Perimeter: محیط)؛

AR_1 : میانگین حسابی نسبت طول به عرض دانه‌های N_1 است؛ و

AF_1 : فاکتور زاویه است، که کیفیت جهت‌یافتگی دانه‌ها را تعیین می‌کند. برای تمام دانه‌های N_1 با استفاده از رابطه (۲-۲) محاسبه می‌شود.

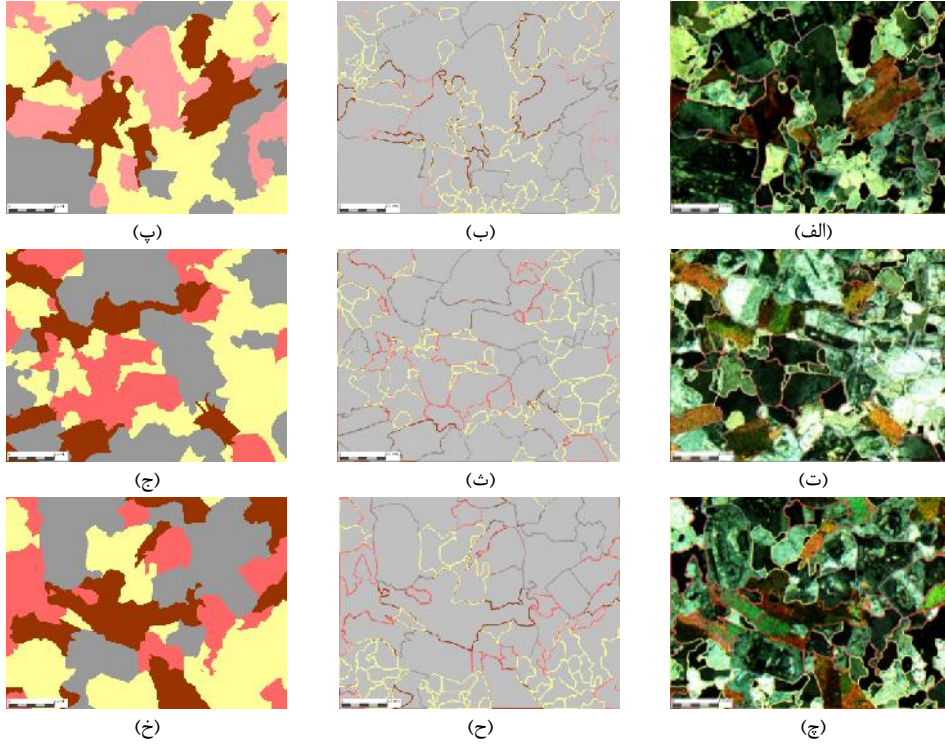
$$AF_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i}{\sqrt{(N-1)/2}} \right) \times i \quad (2-2)$$

که در آن

N : تعداد کل دانه‌های دارای کشیدگی ($N_1 = N$)؛

^۱ Texture Coefficient

Xi: تعداد اختلافات زاویه‌ای در هر کلاس؛ و
i: فاکتور وزن‌دهی و شماره کلاس است.



شکل ۲- تصاویر آنالیز شده از مقاطع نازک سنگ گرانیتوئید کوهسنگی مشهد الف- پ: مقطع شماره ۱؛ ت- ج) مقطع شماره ۲؛ چ- مقطع شماره ۳. تصاویر الف، ت، ج) تصاویر ورودی به محیط نرم‌افزار JMicroVision که مرز دانه‌ها در آن مشخص شده است. تصاویر ب، ث، ح) تصاویر نشان دهنده مرز دانه‌ها با یکدیگر. تصاویر پ، ج، خ) توزیع کانی‌های مختلف که به صورت پلی‌گون‌هایی با رنگ‌های مجزا نشان داده شده است.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به اندازه و شکل دانه‌های آنالیز شده از مقاطع نازک گرانیتوئید کوهسنگی مشهد.

شماره مقطع	مساحت (mm ²)	محیط (mm)	طول (mm)	عرض (mm)	دایره معادل قطر (mm)	کمترین قطر (mm)	بیشترین قطر (mm)
۱	۰/۰۸۸۷	۱/۴۱۹۲	۰/۴۵۲۴	۰/۲۶۷۰	۰/۲۸۶۵	۰/۲۵۴۶	۰/۴۶۲۰
۲	۰/۰۶۶۹	۱/۱۶۳۱	۰/۳۹۱۷	۰/۲۳۴۳	۰/۲۵۲۷	۰/۲۲۲۷	۰/۳۹۸۵
۳	۰/۰۸۸۳	۱/۴۵۰۷	۰/۴۶۵۳	۰/۲۹۱۷	۰/۳۰۰۱	۰/۲۷۶۳	۰/۴۷۶۱
مجموع (میانگین)	۰/۰۸۱۳	۱/۳۴۴۳	۰/۴۳۶۵	۰/۲۶۴۳	۰/۲۷۹۸	۰/۲۵۱۲	۰/۴۴۵۶

محاسبه فاکتور زاویه بر اساس یک سیستم طبقه‌بندی می‌باشد که در آن به هر رده، وزنی تعلق می‌گیرد. این طبقه‌بندی بر اساس اختلاف زاویه حاده (S) بین هر دانه با دیگر دانه‌ها (صفر تا ۹۰°) بوده و این مقادیر به ۹ رده تقسیم می‌شوند. بنابراین در یک گروه N دانه‌ای، تعداد اختلاف زاویه بر اساس رابطه (۲-۳) محاسبه می‌شود:

$$(N-1) + (N-2) + \dots + 2 + 1 = \frac{N(N-1)}{2} \quad (2-3)$$

پارامتر (AW) در رابطه (۱-۲)، وزن چگالی تراکمی دانه‌ها می‌باشد که وزن مربوط به مساحت دانه‌ها نسبت به مساحت کل تصویر مورد مطالعه است. این بخش، در مطالعه ماسه‌سنگ‌ها که دارای زمینه ماتریکس) هستند اهمیت بسیار زیادی دارد اما در نمونه مورد مطالعه، مقدار آن یک بوده و باعث کاهش در مقدار ضریب بافت نمی‌شود.

۲-۵- شاخص بار نقطه‌ای [IS₍₅₀₎]

آزمایش بار نقطه‌ای بر اساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1985) بر روی گرانیتوئید کوهسنگی انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- محاسبه ضریب بافت گرانیتوئید کوهسنگی مشهد

برای محاسبه ضریب بافت یک کد متلب^۱ نوشته شد. بر اساس رابطه (۱-۲) و نتایج بدست‌آمده برای بخش‌های مختلف این رابطه، مقدار ضریب بافت این نمونه سنگ برابر با ۱/۹۱۵۲ می‌باشد، مقادیر N_0 ، N_1 ، FF_0 ، AR_1 و AF_1 به ترتیب برابر با ۱، ۱۷۷، ۸۹، ۰/۵۵۲۵، ۲/۵۴۱۲ و ۰/۸۳۶۱ بدست آمد.

۳-۲- محاسبه شاخص بار نقطه‌ای [IS₍₅₀₎] گرانیتوئید کوهسنگی مشهد

مقدار مقاومت بار نقطه‌ای این نمونه بر اساس آزمایشات صورت گرفته بر روی ۸ نمونه، و پس از حذف بیشترین و کمترین مقدار بدست‌آمده، برابر با ۶/۱۴ مگاپاسکال بدست آمد (جدول ۲). سپس براساس شاخص مقاومت بار نقطه‌ای [IS₍₅₀₎]، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) این نمونه بر اساس رابطه ارائه شده توسط (ASTM D5731, 2001) که مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ را ۲۴ برابر شاخص مقاومت بار نقطه‌ای فرض نموده است، محاسبه و برابر با ۱۴۷/۳۵ مگاپاسکال تخمین زده شد.

۳-۳- بر آورد خصوصیات مکانیکی گرانیتوئید کوهسنگی مشهد بر مبنای میان ضریب بافت

(Howarth and Rowlands, 1987)، خواص مکانیکی (مقاومت و حفرپذیری)، ۱۱ سنگ مختلف (آذرین، مرمر و ماسه‌سنگ) را بر اساس نتایج آزمایشگاهی و برجا تعیین کرده و نشان دادند که این ویژگی‌ها به طور آماری تطابق بسیار بالایی با ضریب بافت این سنگ‌ها دارند. بر اساس مطالعات آنها، ضریب بافت به خوبی نمایانگر مقاومت ریزساختارهای یک سنگ در مقابل گسترش درز و شکاف‌ها در سنگ می‌باشد. ضرایب همبستگی (R^2) و روابط ارائه‌شده مربوط به مطالعات آنها در جدول ۳ خلاصه شده است. با استفاده از این روابط، خصوصیات مکانیکی مربوط به گرانیتوئید کوهسنگی مشهد بر اساس ضریب بافت بدست‌آمده برای این سنگ، محاسبه شد. نتایج حاصل همراه با اختلاف مجاز^۲ مربوطه، بر اساس ضرایب همبستگی ارائه شده توسط (Howarth and Rowlands, 1987) و با استفاده از رابطه ($\pm 1 - R^2$) در جدول ۳ ارائه شده است. مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ مورد مطالعه با استفاده از ضریب بافت و روابط ارائه‌شده در جدول ۳ حدود ۱۱/۶۵ $\bar{\sigma}_c$ مگاپاسکال تخمین زده شد، که تطابق قابل ملاحظه‌ای با نتیجه بدست آمده بر مبنای آزمون بار نقطه‌ای، یعنی ۱۴۷/۳۵ مگاپاسکال دارد.

^۱ MATLAB

^۲ tolerance

جدول ۲- نتایج آزمایش بار نقطه‌ای گرانیتوئید کوهسنگی مشهد.

شماره	نوع آزمایش	عرض (mm)	عمق (mm)	بار گسیختگی (KN)	شاخص بار نقطه‌ای (MPa)	توضیحات	
۱	محوری	۶۴	۴۳/۵	۲۲/۳۶۶۸	۶/۸۲۵۶	بیشترین مقدار (X)	
۲	محوری	۶۴	۴۲/۱	۱۶/۸۷۳۲	۵/۲۸۱۴	کمترین مقدار (X)	
۳	محوری	۶۴	۳۷/۵	۱۸/۳۴۶۶	۶/۲۴۷۱	✓	
۴	محوری	۶۴	۳۹/۹	۱۷/۴۶۱۸	۵/۶۹۷۸	✓	
۵	محوری	۶۴	۳۷/۸	۱۹/۸۱۶۲	۶/۷۴۲۷	✓	
۶	محوری	۶۴	۴۱/۵	۱۸/۸۳۵۲	۵/۹۶۱۴	✓	
۷	محوری	۶۴	۳۷/۶	۱۹/۰۳۱۴	۶/۵۰۲۳	✓	
۸	محوری	۶۴	۳۷/۷	۱۶/۶۷۷	۵/۶۸۶۲	✓	
		شاخص بار نقطه‌ای					۶/۱۳۹۶ (MPa)
		مقاومت فشاری تک محوری					۱۴۷/۳۴۹۹ (MPa)

جدول ۴- روابط میان ضریب بافت و خصوصیات مکانیکی سنگ‌های مختلف (Howarth and Rowlands, 1987)، و محاسبه این خصوصیات برای گرانیتوئید کوهسنگی مشهد.

نوع سنگ	جهت مقطع نسبت به جهت یافتگی نمونه	خواص مکانیکی مقایسه شده با ضریب بافت	رابطه $(Y = a + bx)$	ضریب همبستگی	محاسبه خواص مکانیکی گرانیتوئید کوهسنگی مشهد
ماسه‌سنگ و مرمریت	تصادفی	نرخ حفاری دورانی (با مته ۳۱/۸ میلیمتری)	۵۰۰/۳۹	-۳۵۷/۸۷	۰/۵۶
	عمود	میلیمتر بر دقیقه	۳۰۶/۰۷	-۱۶۶/۷۲	۰/۸
	موازی	میلیمتر بر دقیقه	۲۸۱/۶۷	-۱۳۵/۱۴	۰/۷۹
	تصادفی	نرخ حفاری ضربه‌ای (با ابزار ۳۷/۷ میلیمتری)	۴۹۳/۴۲	-۳۴۱/۸۵	۰/۶۵
	عمود	میلیمتر بر دقیقه	۲۹۷/۲۹	-۱۴۹/۳۳	۰/۸۳
	موازی	میلیمتر بر دقیقه	۲۷۵/۰۱	-۱۲۰/۶۶	۰/۸۱
	تصادفی	نرخ حفاری ضربه‌ای (با ابزار ۲۹ میلیمتری)	۱۱۲۸/۱۶	-۷۷۱/۸۸	۰/۹۹
	عمود	میلیمتر بر دقیقه	۶۸۲/۳۸	-۳۰۹/۷۷	۰/۹۳
	موازی	میلیمتر بر دقیقه	۶۳۸/۰۵	-۲۵۳/۰۵	۰/۹۶
آذرین و مرمریت	تصادفی	نرخ حفاری ضربه‌ای (با ابزار ۲۹ میلیمتری)	۲۶۳/۳۲	-۳۶/۳۶	۰/۷۲
تمام سنگ‌ها	تصادفی	UCS خشک MPa	-۵۵/۱۴	۱۰۴/۸	۰/۹۲
		UCS اشباع MPa	-۵۶/۴۸	۹۶/۴۴	۰/۹۱
		آزمون برزیلی خشک MPa	-۳/۳۹	۷/۳	۰/۸۱
		آزمون برزیلی اشباع MPa	-۴/۱۳	۶/۵۱	۰/۸۹
		Es خشک GPa	-۵/۱۳	۳۱/۲	۰/۶۴
		Es اشباع GPa	-۵/۱۳	۳۱/۲	۰/۶۴
Y : خصوصیت مکانیکی؛ X : ضریب بافت؛ UCS: مقاومت فشاری تک محوری؛ Es: مدول مماسی یا ننگ؛ MPa: مگا پاسکال؛ GPa: گیگا پاسکال. X : داده‌ها جهت انجام محاسبات مناسب نیست.					

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، خصوصیات مکانیکی گرانیتوئید کوهسنگی مشهد، بر مبنای ضریب بافت به دست آمده از تجزیه و تحلیل تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک این سنگ به شیوه نیمه اتوماتیک برآورد گردید. بر اساس ویژگی‌های بافتی توده مورد مطالعه، ضریب بافت این توده برابر با $1/9152$ تعیین شد. بر مبنای ضریب بافت بدست آمده خصوصیات مقاومتی و حفرپذیری این سنگ تخمین زده شد. مقاومت بدست آمده از آنالیز مقاطع نازک توده گرانیتوئیدی کوهسنگی مشهد، با نتایج بدست آمده از آزمایش بار نقطه‌ای مطابقت بسیار خوبی نشان داد. نتایج حاصل، این سنگ را در گروه سنگ‌های مقاوم قرار می‌دهد. به علت تنوع پتروگرافیکی و پیچیدگی ساختاری، رفتار مهندسی توده‌های سنگی در گرانیتوئیدها در محدوده گسترده‌ای جای می‌گیرد، اما بر مبنای نتایج به دست آمده در این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که کمی سازی بافت میکروسکوپی و روش نیمه اتوماتیک یک شیوه مناسب به منظور برآورد خصوصیات مکانیکی سنگ‌های گرانیتوئیدی می‌باشد.

References:

- Akesson, U., Lindqvist, J. E., Göransson, M. and Stigh, J., 2001, Relationship between texture and mechanical properties of granites, central Sweden, by use of image-analysing techniques, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol:60, p: 277–284.
- ASTM D5731, 2001, Standard test method for determination of the point load strength index of rock. *American Society for Testing Materials*, Philadelphia.
- Boorman, S., Boudreau, A. E., Kruger, F.J., 2004, The lower zone–critical zone transition of the Bushveld complex: a quantitative textural study, *Journal of Petrology*, Vol: 45, p: 1209–1235.
- Howarth, D.F., Rowlands, J.C., 1987, Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol: 20, p: 57–85.
- ISRM, 1985, Suggested Methods for Determining Point Load Strength, International Society for Rock Mechanics Commission on Testing Methods, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. and Geomechanical Abstr*, Vol: 22, No: 2, p. 51–60.
- Jeng, F.S., Weng, M.C., Lin, M.L., Huang, T.H., 2004, Influence of petrographic parameters on geotechnical properties of Tertiary sandstone from Taiwan, *Engineering Geology*, Vol: 73, p: 71–91.
- Keulen, N., Heilbronner, R., Stuntz, H., Boullier, A.M., Ito, H., 2007, Grain size distribution of fault rocks: a comparison between experimentally and naturally deformed granitoids, *Journal of Structural Geology*, Vol: 29, p: 1282–1300.
- Młynarczuk, M., Górszczyk, A., Ipek, B., 2013, The application of pattern recognition in the automatic classification of microscopic rock images, *Computers and Geosciences*, Vol: 60, p: 126–133.
- Piochi, M., Polacci, M., De Astis, G., Zanetti, A., Mangiacapra, A., Vannucci, R., Giordano, D., 2008, Texture and composition of pumices and scoriae from the Campi Flegrei caldera (Italy): implications on the dynamic of explosive eruptions, *Geochemistry, Geophysics and Geosystems*, Vol: 9.
- Russ, J.C., 2002, *Computer Assisted Microscopy: the Measurement and Analysis of Images*, Plenum Press, New York.
- Sutherland, D.N., 2007, Estimation of mineral grain size using automated mineralogy, *Minerals Engineering*, Vol: 20, p: 452–460.

- Tandon, S. R., Gupta, V., 2013, The control of mineral constituents and textural characteristics on the petrophysical & mechanical (PM) properties of different rocks of the Himalaya, *Engineering Geology*, Vol: 153, p: 125–143.
- Williams, H., Turner, F. J., and Gilbert, C. M., 1982, *Petrography: An introduction to the study of rocks in thin sections*, San Francisco: W. H. Freeman.