

آنالیز مقطع نازک سنگ و کاربرد آن در مهندسی سنگ (مطالعه موردی: گرانیتوئید کوهسنگی مشهد)

سعید علیقلی

دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

غلامرضا لشکری پور

استاد گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

محمد غفوری

استاد گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مرتضی رزم آرا

دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۴/۵/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۴

lashkaripour@um.ac.ir

چکیده

با استفاده از کمی سازی بافت میکروسکوپی بر مبنای آنالیز تصویر و آزمون مقاومت بار نقطه‌ای، نمونه‌هایی از گرانیتوئید کوهسنگی مشهد مورد بررسی قرار گرفت. خصوصیات شیمیایی، فیزیکی (برآورد شکل، اندازه ذرات)، پتروگرافیکی (مشخصات بافتی، آنالیز مدال، طبقه‌بندی)، کانی‌شناسی و مکانیکی (مقاومت، حفرپذیری، ساینده‌گری) این گرانیتوئید که در بخش جنوبی مشهد قرار دارد، با استفاده از روش نیمه اتوماتیک توسعه یافته بررسی شد. پتروگرافی تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک با به کارگیری نرم افزار JMicroVision انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که ترکیب این توده گرانیتی شامل ارتوکلاز (۲۰/۵۵٪)، الیگوکلاز (۳۱/۹۵٪)، کوارتز بتا (۲۹/۷۱٪) و بیوتیت (۱۷/۷۹٪) می‌باشد. 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 کاربردی برای آنالیز خصوصیات مکانیکی و آنالیزهای شیمیایی سنگ‌های گرانیتوئیدی می‌باشد.

کلمات کلیدی: JMicroVision، پتروگرافی، آنالیز مدال، گرانیتوئید کوهسنگی مشهد، مقاومت بار نقطه‌ای

مقدمه

انجام می‌گرفت، روش مساحتی از جمله روش‌های اولیه بود که توسط یک مساحت‌سنج (پلانیمتر) انجام می‌گردید. روش خطی با ابداع میکرومترهای ثبت-کننده ساده‌تر شد. روش نقطه‌ای نیز با استفاده از یک میز مکانیکی mechanical stage و یک نقطه‌شمار به محاسبه درصد اجزای تشکیل‌دهنده سنگ می‌پردازد. روش نقطه‌ای سرعت بیشتری از روش‌های قبلی دارد. خطاهای همراه با روش نقطه‌شماری نیز مورد بررسی قرار گرفته است (Neilson and Brockman, 1977). در اغلب موارد به اندازه‌گیری ۵۰ الی ۲۰۰ دانه برای توصیف مناسب یک مقطع نازک سنگ به روش نقطه‌ای نیاز است (Middleton et al., 1985).

روش‌های متداول علاوه بر اینکه بسیار زمان‌بر هستند، خطاهای انسانی نیز در آنها موثر است. البته به منظور تعیین درصد اجزای تشکیل‌دهنده مقاطع نازک، چارت‌های مقایسه‌ای وجود دارند (مانند، Williams et al., 1982)، که نسبت به روش‌های فوق، دقت پایینی داشته ولی از سرعت بالاتری برخوردارند و برای مقاصدی که دقت بسیار زیادی نیاز ندارند (مانند نامگذاری تقریبی سنگ) می‌توانند مناسب باشند. در چند سال اخیر و با گسترش فن‌آوری‌های مرتبط، از جمله تجهیز میکروسکوپ‌ها به دوربین‌های دیجیتال، توسعه علم پردازش تصاویر و ابداع الگوریتم‌های مرتبط با آن در زمینه تحلیل بافت و رنگ تصاویر دیجیتال،

در مطالعات پتروگرافیکی (سنگ نگاری) همواره دو مسئله از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. ۱) تعیین نام سنگ با توجه به در صد کانی‌های تشکیل-دهنده (آنالیز مدال) که منجر به طبقه‌بندی و نامگذاری سنگ می‌شود. ۲) 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. 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؛ Akesson et al., 2001; Boorman et al., 2004; Jeng et al., 2004; Keulen et al., 2007; Piochi et al., 2008؛ زمانیان و همکاران، ۱۳۹۱ و سمیعی و همکاران، ۱۳۹۳).

جهت دستیابی به دقت و صحت لازم در مطالعات سنگ نگاری، همواره داده‌های کمی مورد نیاز است. در حال حاضر سه نوع اندازه‌گیری کمی مقاطع میکروسکوپی رایج است که به صورت مساحتی، خطی و نقطه‌ای می‌باشند. پیش از گسترش تکنولوژی در زمینه‌های مرتبط با تهیه، پردازش و آنالیز تصاویر میکروسکوپی، اندازه‌گیری‌های کمی با استفاده از ابزارهای بسیار ساده مکانیکی

آنالیزهای شیمیایی و مکانیکی گرانیتوئید کوهسنگی مشهد با استفاده از مقاطع نازک این سنگ صورت گرفته است.

روش

تهیه مقاطع معرف (Representative)

به طور کلی خطاهای آنالیزهای میکرومتریک که ممکن است نتایج را تحت تاثیر قرار دهند، در دو گروه جای می‌گیرند: (۱) خطاهای ناشی از اشتباهات در فرآیند اندازه‌گیری و شناسایی صحیح مقطع نازک مورد مطالعه، (۲) خطاهای مربوط به نمونه‌برداری از سنگی که مقطع نازک از آن تهیه شده است.

معمولاً برای یک آنالیز صحیح باید حدود ۱۰۰ دانه (کانی) از هر یک از مقاطع نازک تهیه شده از توده، مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. علاوه بر این، نمونه‌برداری باید از جاهایی صورت گیرد که اجزای سازنده سنگ همگنی مناسبی داشته باشند و در یک توده حداقل از دو نقطه با همگنی مناسب، نمونه برداری مناسب صورت گیرد. همگنی هم در کانی‌های تشکیل‌دهنده و هم در اندازه آنها باید وجود داشته باشد، البته به طوری که بخش همگن، معرف کل توده سنگی مورد مطالعه باشد. اگر توده دارای تغییرات زیادی در کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ و اندازه آنها باشد، طبیعی است که توده باید به بخش‌های مختلفی تفکیک شود و هر بخش به طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. سپس با توجه به اندازه دانه‌های سنگ، مقاطع نازک تهیه شود. به عبارت دیگر، برای سنگ‌های ریز تا متوسط دانه، از مقاطع استاندارد (۱۹*۲۵/۴ میلی‌متر) و برای سنگ‌های متوسط تا درشت‌دانه از مقاطع نازک بزرگ‌تر استفاده شود. در سنگ‌هایی که ناهمسانگرد بوده و دارای جهت یافتگی و یا لایه‌بندی هستند، بهتر است از هر نمونه ۳ مقطع نازک، در دو جهت عمود و موازی با سطوح جهت‌یافته و همچنین یک جهت تصادفی تهیه شود.

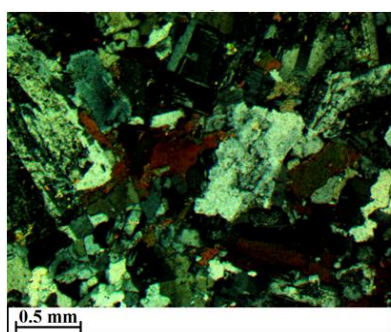
چگونگی تهیه تصاویر

به منظور آنالیز مقاطع نازک، ابتدا توسط دوربین دیجیتال نصب شده بر روی میکروسکوپ تصاویر تهیه می‌شوند. به منظور جلوگیری از خطا در تشخیص کانی‌ها، از هر بخش مورد مطالعه از مقطع، سه تصویر تهیه می‌شود (شکل ۱). این تصاویر شامل: الف) تصویر در حالت نور قطبیده موازی (PPL)، ب) تصویر در حالت نور قطبیده متقاطع (XPL)، ج) تصویر در حالت نور قطبیده متقاطع پس از ۴۵° چرخش.

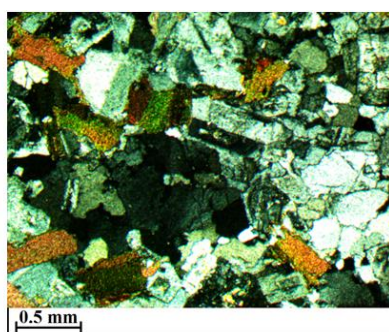
بسط برنامه‌های کامپیوتری در زمینه آنالیز و تحلیل اجزای تصویر، مطالعات زیادی در زمینه آنالیز تصاویر میکروسکوپی سنگ‌ها، به صورت اتوماتیک و نیمه‌اتوماتیک انجام شده است. (برای نمونه؛ Goodchild and Fueten, 1998; Russ, 2002; Green, 2005; Sutherland, 2007 و Mlynarczuk et al., 2013). استفاده از این برنامه‌ها و نرم‌افزارها همراه با تصاویر دیجیتال تهیه‌شده از مقاطع نازک، اندازه‌گیری دقیق ذرات و ویژگی‌های قابل مشاهده در یک مقطع نازک و همچنین پارامترهای کمی مانند مساحت، طول، عرض، فاصله بین ویژگی‌های مورد مطالعه، کرویت، توزیع اندازه و طبقه‌بندی این ویژگی‌ها را ممکن می‌سازد (Reedy, 2006).

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. همچنین این روش‌ها تنها دانه‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهند و در مورد درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده اطلاعاتی را در اختیار قرار نمی‌دهند و نیاز به پردازش‌های بعدی جهت محاسبه درصد اجزای تشکیل‌دهنده دارند. البته در زمینه شناسایی کانی‌ها به صورت اتوماتیک نیز تلاش‌هایی صورت گرفته است (Thompson et al., 2001; Ross et al., 2001). اما از آنجا که در مقاطع سنگ، کانی‌ها با توجه به زاویه برش آنها نسبت به محورهای نوری، رنگ‌های تداخلی مختلفی را نشان می‌دهند و یا اگر دارای دگرسانی باشند خصوصیات رنگی و بافتی آنها تغییرات اساسی می‌یابند، تاکنون روش کاربردی و بی نقصی در این مورد ارائه نشده است.

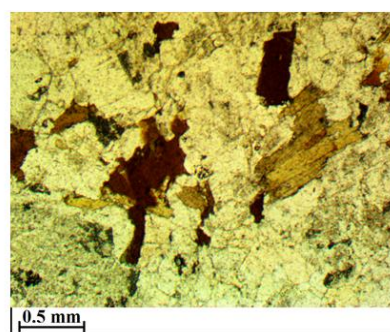
هدف از این مقاله، معرفی یک روش کاربردی با دقت و سرعت بالا جهت تجزیه و تحلیل‌های پتروگرافیکی مقاطع نازک سنگ می‌باشد که هم درصد اجزای تشکیل‌دهنده نمونه را در اختیار قرار می‌دهد و هم آنالیزهای مربوط به اندازه و شکل کانی‌ها را انجام دهد. با استفاده از روش ارائه شده می‌توان با یک برآورد معتبر و قابل اطمینان به خصوصیات مکانیکی، فیزیکی و حتی آنالیزهای شیمیایی سنگ بر اساس ویژگی‌های بافتی و آنالیز مدال آن دست یافت که یک دید پایه از توده‌های سنگی در اختیار قرار می‌دهد. به منظور آشنایی بیشتر با روش ارائه‌شده و کاربردهای آن،



(پ)



(ب)



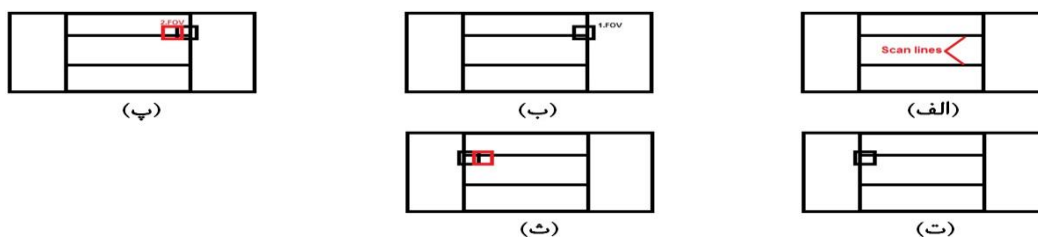
(الف)

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

مکانیکی صورت گیرد (شکل ۲- پ). ج) سپس این کار تا انتهای خط روبش ادامه یابد، به صورتی که هر تصویر با بخشی از تصویر پیش از خود هم‌پوشانی داشته باشد؛ د) سپس مقطع طوری جابجا می‌شود که خط روبش در بخش بالایی میدان دید دوربین قرار گیرد. در این موقعیت، تصویر بعدی گرفته می‌شود (شکل ۲- ت). و) پس از آن، مقطع به سمت انتهای دیگر خط روبش (محل شروع تصویربرداری) جابجا و تصویر بعدی گرفته می‌شود، به طوری که بخشی از این تصویر با تصویر قبلی هم‌پوشانی داشته باشد (شکل ۲- ث). ی) این کار تا انتهای خط روبش (محل شروع تصویربرداری) ادامه می‌یابد، به صورتی که هر تصویر با بخشی از تصویر پیش از خود هم‌پوشانی داشته باشد. در مرحله بعد، این سری از تصاویر با استفاده از نرم‌افزارهای گرافیکی (همچون فتوشاپ Photoshop) به یکدیگر متصل و یک تصویر واحد و مناسب برای تجزیه و تحلیل به وجود می‌آید (شکل ۳).

این عملیات برای خط روبش دیگر نیز انجام می‌شود. سنگ‌های متوسط تا دانه‌درشت (با میانگین دانه بین سه تا هفت میلیمتر): تنها تفاوت این گروه با گروه دوم این است که برای این سنگ‌ها حداقل باید چهار خط روبش در نظر گرفته شود.

سنگ‌های درشت‌دانه و پگماتیته: برای این سنگ‌ها باید از مقاطع بزرگ غیرمعمول استفاده و تعداد خطوط روبش نیز با توجه به اندازه آنها در نظر گرفته شود. همچنین در این سنگ‌ها بهتر است خطوط روبش طوری انتخاب شوند که دانه‌ها به صورت طولی بر روی آنها قرار گیرند و کل دانه در تصویر قرار گیرد و یا اینکه تعداد بیشتری خطوط روبش نزدیک به هم به طوری که با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند، در نظر گرفته شود و آنها را به طور عرضی نیز به هم متصل کرد.



شکل ۲. الف) خطوط روبش انتخاب شده در مقطع نازک جهت تصویربرداری برای سنگ‌هایی با متوسط اندازه ذرات بین یک تا سه میلیمتر؛ ب) اولین میدان دید (FOV) در انتهای سمت راست خط روبش (خط روبش انتخاب شده در بخش پایینی آن مشخص است)؛ پ) دومین میدان دید در انتهای سمت راست که با میدان دید اول هم‌پوشانی دارد. ت) اولین میدان دید در انتهای سمت چپ خط روبش (خط روبش انتخاب شده در بخش بالایی آن مشخص است)؛ ث) دومین میدان دید در انتهای سمت چپ خط روبش، که با میدان دید قبلی هم‌پوشانی دارد.

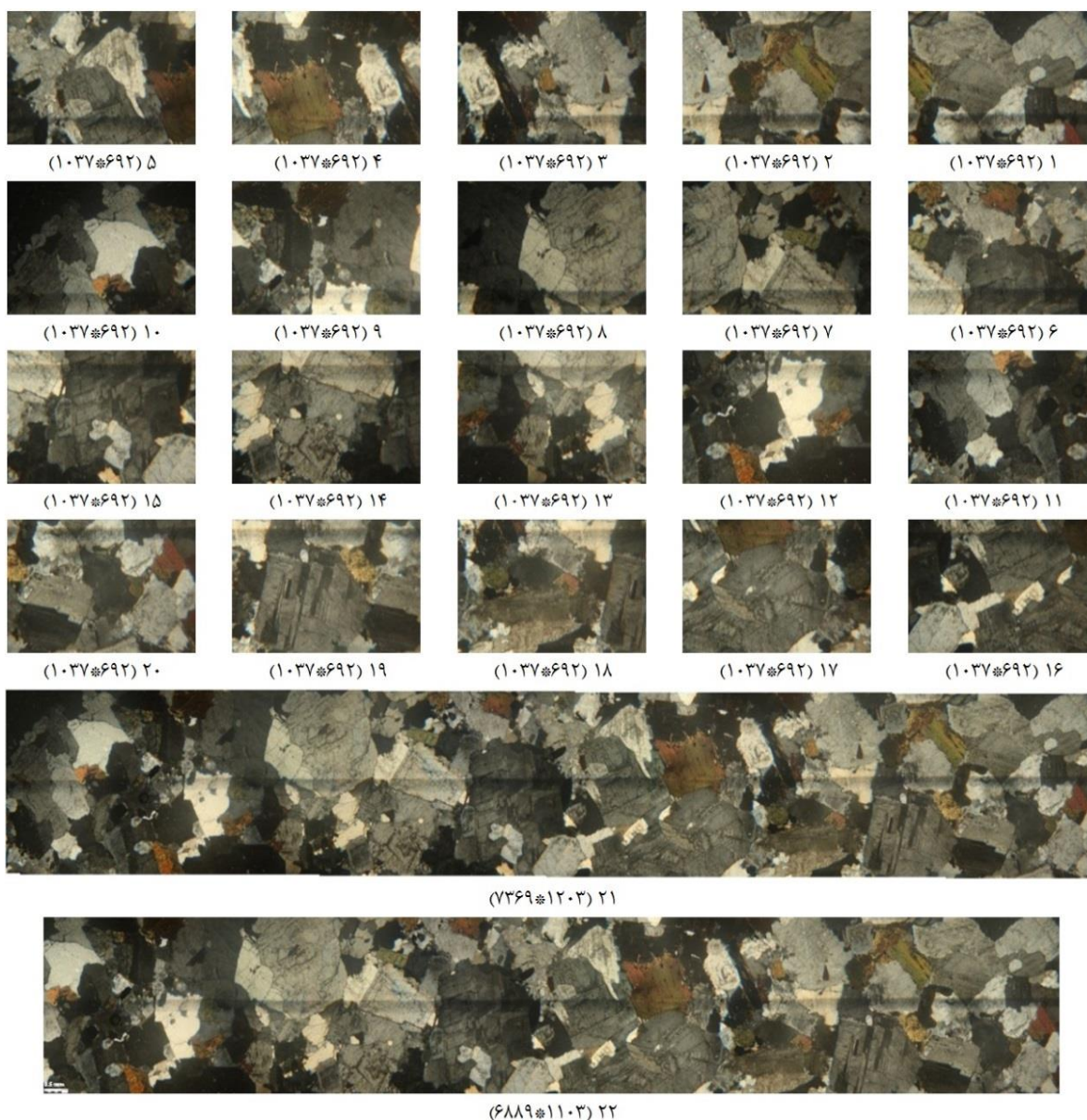
تجزیه و تحلیل

تصاویر بدست آمده، جهت تجزیه و تحلیل وارد محیط نرم‌افزار JMicroVision می‌شوند. در این روش پس از ورود تصویر به نرم‌افزار (اشکال ۴- الف، ت- ۴، ج)، ابتدا مقیاس تصویر با مقیاس میکروسکپ هماهنگ می‌شود. پس از مشخص شدن مرز دانه‌ها به صورت دستی و با دقت بالا (اشکال ۴- ب، ث، ۴- ج)، دانه‌ها به صورت پلی‌گون‌های مجزا در می‌آیند (اشکال ۴- پ، ج، ۴- خ). سپس به تعداد کانی‌های موجود در سنگ، رده‌های class تعریف و این پلی‌گون‌ها با توجه به نوع کانی مربوطه در این رده‌ها قرار می‌گیرند (جدول ۱). سپس با توجه به درصد کانی‌های

در تصویربرداری از مقاطع، با توجه به اندازه ذرات سنگ و مساحت میدان دید دوربین (با توجه به عدسی شیئی مورد استفاده)، یک تقسیم‌بندی مناسب باید صورت گیرد. در این روش، برای عدسی شیئی با بزرگنمایی ۴۰ برابر (4X) و با مساحت میدان دید دوربین که حدود ۷ میلیمتر مربع بوده است، تقسیم‌بندی زیر صورت گرفته است تا از هر مقطع تعداد دانه‌های کافی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند:

- سنگ‌های ریزدانه (با میانگین اندازه دانه کمتر از یک میلیمتر): برای این گروه از سنگ‌ها، مقاطع در اندازه استاندارد تهیه می‌شوند. با توجه به همگنی نمونه، از یک تا پنج ناحیه‌ی مقطع نازک مورد مطالعه یعنی بالا (سمت راست و سمت چپ)، مرکزی و پایین (سمت راست و سمت چپ)، تصاویر تهیه و آنالیز می‌شوند.

- سنگ‌های ریز تا متوسط دانه (با میانگین اندازه دانه یک تا سه میلیمتر): برای این سنگ‌ها باید دو خط از هر مقطع، یکی در بخش پایینی و یکی در بخش بالایی مقطع، جاروب شوند. برای این کار ابتدا دو خط روبش scan line مناسب در بخش‌های پایینی و بالایی مقطع در نظر گرفته می‌شود (شکل ۲- الف). سپس، این دو خط با یک مداد بر روی مقطع نمایش داده می‌شوند. در مرحله بعد، تصویربرداری به صورت زیر انجام می‌شود: الف) میدان دید دوربین بر روی یکی از دو انتهای خط روبش قرار می‌گیرد، به صورتی که خط روبش در بخش پایینی میدان دید دوربین قرار گیرد. در این موقعیت، تصویر اول گرفته می‌شود (شکل ۲- ب). ب) سپس مقطع به سمت انتهای دیگر خط روبش جابجا و تصویر دوم گرفته می‌شود (به طوری که بخشی از تصویر دوم با تصویر اول هم‌پوشانی داشته باشد). بهتر است به منظور افزایش دقت و سرعت، جابجایی مقطع به کمک یک میز

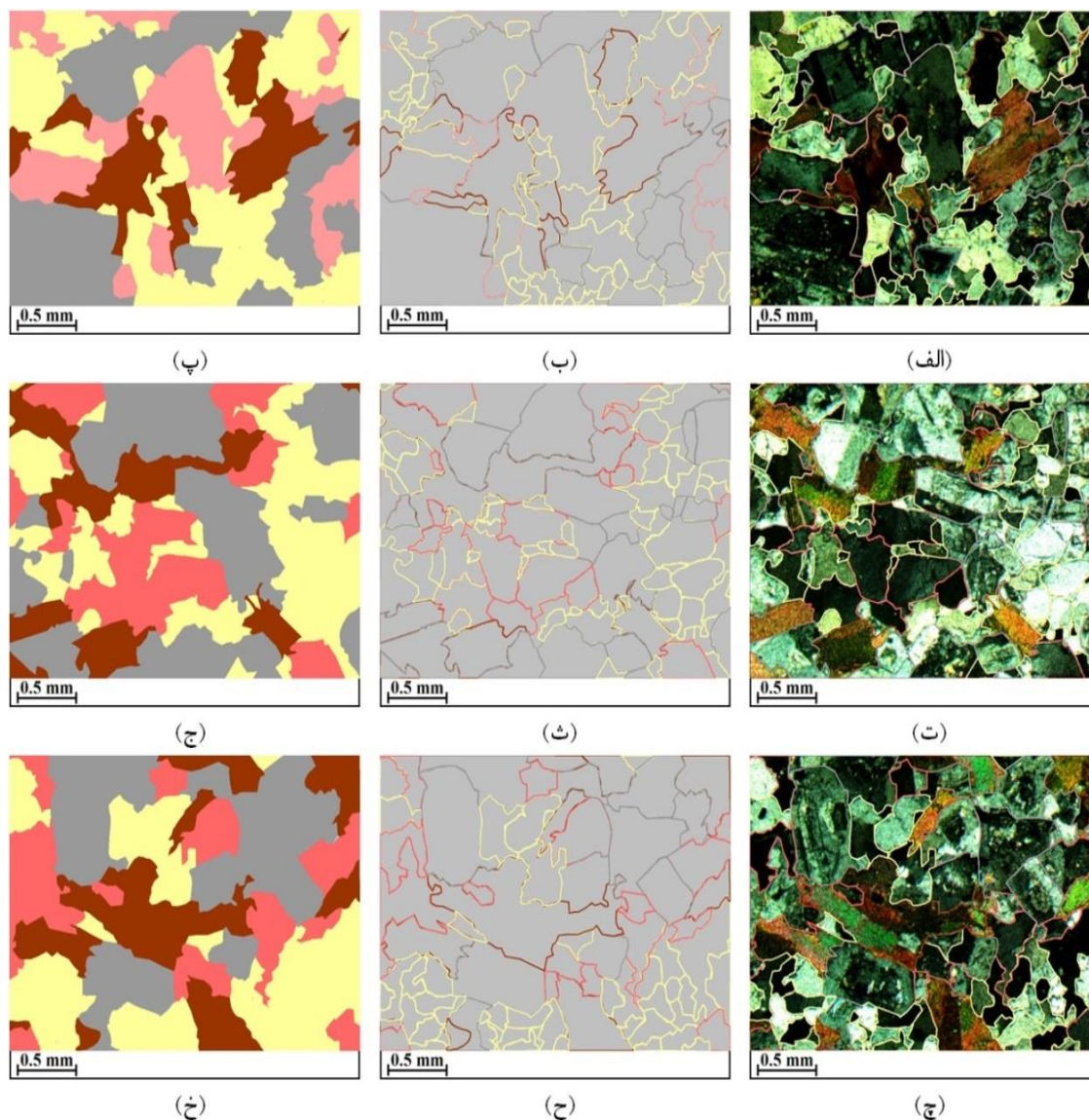


شکل ۳. تصاویر تهیه شده از مقطع نازک توده گرانیتوئیدی تکاب با متوسط اندازه ذرات بین یک تا سه میلیمتر در حالت XPL. تصاویر ۱-۲۰) میدان دید دوربین در بخش‌های مختلف مقطع نازک که خط روبش انتخاب شده در آنها مشخص است؛ تصویر ۲۱) تصویر واحد به وجود آمده از تصاویر ۱-۲۰؛ تصویر ۲۲) بخش انتخاب شده از تصویر ۲۱ به منظور انجام تجزیه و تحلیل مقطع نازک. اندازه (سایز) هر تصویر در کنار آن به نمایش در آمده است؛ طول خط روبش به نمایش در آمده (در تصویر ۲۲) ۳۰ میلیمتر، و بزرگمایی میکروسکپ ۲۵ برابر می‌باشد.

و توزیع اندازه ذرات دارد. البته در مورد تعیین آنالیز مدال این سنگ که اطلاعات مربوط به آن در (جدول ۱) آمده است، نتایج مقاطع مختلف، اندکی با یکدیگر تفاوت دارند. علت این امر آن است که دانه‌های مختلف یک کانی خاص در سنگ، اغلب تمایل دارند به صورت موضعی به طور خوشه‌ای و یا تجمعات گلومروپورفیری تشکیل شوند. با توجه به روش ارائه شده و با دقت در تهیه تصاویر مناسب از مقاطع با توجه به اندازه دانه‌ها و همگنی آنها، این امر مشکلی را به وجود نمی‌آورد.

نرم‌افزار JMicroVision برای هر یک از اشیای موجود در تصویر (در اینجا کانی‌ها) بیش از چهار توصیف‌گر هندسی را محاسبه می‌کند. که موارد مهم آن در زمینه تحلیل مقاطع نازک سنگ در (جدول ۲) ارائه شده است. در این جدول، مقادیر این توصیف‌گرها به صورت میانگین ارائه شده‌اند.

در (جدول ۲) 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 ترکیب کانی شناسی



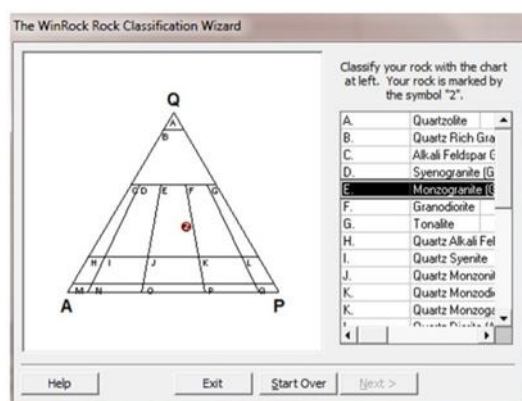
شکل ۴. تصاویر بخش‌های مرکزی آنالیز شده از مقاطع نازک سنگ گرانیتوئید کوهسنگی مشهد الف- پ: بخش مرکزی مقطع شماره ۱؛ ت- ج) بخش مرکزی مقطع شماره ۲؛ چ- خ) بخش مرکزی مقطع شماره ۳. تصاویر الف، ت، چ) تصاویر ورودی به محیط نرم‌افزار JMicroVision که مرز دانه‌ها در آن مشخص شده است. تصاویر ب، ث، ح) تصاویر نشان دهنده مرز دانه‌ها با یکدیگر. تصاویر پ، ج، خ) توزیع کانی‌های مختلف که به صورت پلی‌گون‌هایی با رنگ‌های مجزا نشان داده شده است.

جدول ۱. دانه‌های آنالیز شده از مقاطع نازک سنگ گرانیتوئید کوهسنگی مشهد

مجموع	بخش مرکزی مقطع شماره ۳		بخش مرکزی مقطع شماره ۲		بخش مرکزی مقطع شماره ۱		کانی
	تعداد دانه	درصد (%)	تعداد دانه	درصد (%)	تعداد دانه	درصد (%)	
۴۵	۱۶	۳۵/۵۵	۱۷	۳۰/۴۲	۱۲	۲۲/۱۴	ارتوکلاز (Or)
۲۶	۱۰	۱۷/۷۹	۶	۱۵/۹۶	۱۰	۱۵/۹۳	بیوتیت (Bt)
۴۴	۱۱	۳۱/۹۵	۲۲	۳۵/۱۳	۱۱	۳۰/۵۰	پلاژیوکلاز (Pl)
۱۵۱	۴۳	۲۹/۷۱	۶۱	۲۸/۴۹	۴۷	۳۱/۴۴	کوارتز (Qtz)
۲۶۶	مجموع دانه‌های آنالیز شده						

جدول ۲. اطلاعات مربوط به اندازه و شکل دانه‌های آنالیز شده از مقاطع نازک گرانیتوئید کوهسنگی مشهد.

بخش/شماره مقطع	مساحت (mm ²)	محیط (mm)	چفت یافتی (بدون بعد)	طول (mm)	عرض (mm)	دایره معادل قطر (mm)	کشیدگی (بدون بعد)	کمترین قطر (mm)	بیشترین قطر (mm)
مرکزی/۱	۰/۰۸۸۷	۱/۴۱۹۲	۸۶/۰۳	۰/۴۵۲۴	۰/۲۶۷۰	۰/۲۸۶۵	۰/۶۰۳۶	۰/۲۵۴۶	۰/۴۶۲۰
مرکزی/۲	۰/۰۶۶۹	۱/۱۶۳۱	۹۴/۷۵	۰/۳۹۱۷	۰/۲۳۴۳	۰/۲۵۲۷	۰/۶۰۲۵	۰/۲۲۲۷	۰/۳۹۸۵
مرکزی/۳	۰/۰۸۸۳	۱/۴۵۰۷	۸۷/۰۳	۰/۴۶۵۳	۰/۲۹۱۷	۰/۳۰۰۱	۰/۶۴۱۸	۰/۲۷۶۳	۰/۴۷۶۱
مجموع (میانگین)	۰/۰۸۱۳	۱/۳۴۴۳	۸۹/۲۷	۰/۴۳۶۵	۰/۲۶۴۳	۰/۲۷۹۸	۰/۶۱۶۰	۰/۲۵۱۲	۰/۴۴۵۶



شکل ۵. نامگذاری گرانیتوئید کوهسنگی مشهد بر اساس دیاگرام اشتريکایزن و با استفاده از نرم‌افزار WinRock

برخی از کاربردهای روش ارائه شده

تعیین آنالیز شیمیایی سنگ بر اساس آنالیز مدال

آنالیزهای شیمیایی سنگ‌ها، گران و زمان‌بر بوده و در عین حال برای طیف گسترده‌ای از تحقیقات ضروری هستند. برای اولین بار ترکیب شیمیایی گرانیت و کوارتزیت را با استفاده از مد آنها محاسبه شد (Whitten, 1953)، همچنین مقایسه‌ای بین ترکیب شیمیایی تعیین شده یک گرانیت و یک نوریت با روش‌های شیمیایی و اپتیکی انجام شد، که نتایج بدست آمده بسیار نزدیک به یکدیگر بود (Friedman, 1960). فردمن نتیجه گرفت ترکیب سنگ‌هایی که از کانی‌های مجزا تشکیل شده‌اند، می‌تواند با اندازه‌گیری‌های اپتیکی بدست آید و اجزای اصلی می‌تواند با یک میکروسکوپ پتروگرافی تعیین شوند. این نتایج می‌تواند برای مقاصد بسیاری معتبر باشند. البته هیچگاه مقاطع نازک، دقتی در حد آنالیزهای شیمیایی ندارند اما برای مراحل مطالعاتی مقدماتی و بدست آوردن یک دید کلی از رخنمون‌های مورد مطالعه می‌توانند مفید واقع شوند و هزینه‌های طرح‌های مطالعاتی و اکتشافی را در حد قابل توجهی کاهش دهند.

آنالیز شیمیایی به روش پتروگرافیکی شامل ۳ مرحله است: (۱) شناسایی کانی‌های موجود و اختصاص فرمولی به هر یک از آنها بر پایه داده‌های اپتیکی؛ (۲) تعیین فراوانی نسبی هر کانی؛ (۳) محاسبه درصد وزنی ترکیبات شیمیایی. در مرحله سوم محاسبه ترکیب شیمیایی از آنالیز مدال با تبدیل مقادیر مدال به درصد وزنی بر اساس وزن مخصوص کانی‌های موجود صورت می‌گیرد. سپس بر اساس مدهای بدست آمده و نیز وزن مخصوص، درصد وزنی هر یک از کانی‌ها مشخص می‌شود. در این مطالعه، مقادیر وزن مخصوص کانی‌ها با استفاده از راهنمای وزن مخصوص کانی‌ها (Mursky and Thompson, 1957) مشخص گردید (جدول ۳). فرض شد فلدسپارهای پتاسیک تشکیل‌دهنده سنگ ارتوکلاز بوده و فاقد (Na_2O) هستند. ترکیب پلاژیوکلازهای توده گرانیتوئیدی کوهسنگی مشهد با توجه به کانی‌های موجود در سنگ و سری واکنشی باوون، و همچنین خصوصیات اپتیکی پلاژیوکلازها مانند نوع ماکل، زاویه خاموشی و مشاهده منطقه‌بندی به عنوان الیگوکلاز (Ab %۷۵ و An %۲۵) تخمین زده شد. برای بیوتیت‌ها ترکیب شیمیایی میانگین که توسط (Wahlstrom, 1950) ارائه شده است، استفاده گردید.

شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس آنالیز مدال ارائه شده است. نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده توسط ولی زاده و کریم پور (۱۳۷۴) مربوط به گرانودیوریت‌های مشهد (جدول ۷)، تطابق بسیار خوبی نشان داد.

جدول ۴. وزن مولی اکسیدهای اصلی سنگ

عنصر	وزن مولی	اکسید	وزن مولی
آلمینیوم	۲۶/۹۸۱۵	SiO ₂	۶۰/۰۸۴۳
آهن	۵۵/۸۴۵	Al ₂ O ₃	۱۰۱/۹۶۱۲
اکسیژن	۱۵/۹۹۹۴	Fe ₂ O ₃	۱۵۹/۶۸۸۲
پتاسیم	۳۹/۰۹۸۳	FeO	۷۱/۸۴۴۴
سدیم	۲۲/۹۸۹۷	MnO	۷۰/۹۳۷۴
سیلیس	۲۸/۰۸۵۵	MgO	۴۰/۳۰۴۴
کلسیم	۴۰/۰۷۸	CaO	۵۶/۰۷۴۴
منگنز	۵۴/۹۳۸	Na ₂ O	۶۱/۹۷۸۸
منیزیم	۲۴/۳۰۵	K ₂ O	۹۴/۱۹۶
هیدروژن	۱/۰۰۷۹	H ₂ O	۱۸/۰۱۵۲

وزن مولی اکسیدها بر اساس (جدول ۴) محاسبه شد. فرمول کانی‌های موجود در سنگ و تجزیه آنها به اکسیدهای اصلی و نیز درصد وزنی این اکسیدها، در (جدول ۵) نشان داده شده است. در (جدول ۶) آنالیز

جدول ۳. درصد وزنی کانی‌های تشکیل دهنده گرانیتوئید کوهسنگی مشهد

کانی	مد	وزن مخصوص	مد * وزن مخصوص	درصد وزنی (%)
ارتوکلاز	۲۰/۵۵	۲/۵۷	۵۲/۸۱۳۵	۱۹/۵۹۶۷
بیوتیت	۱۷/۷۹	۳	۵۳/۳۷۰۰	۱۹/۸۰۳۱
پلاژیوکلاز (آلبیت ۰/۷۵ - آنورتیت ۰/۲۵)	۳۱/۹۵	۲/۶۴۷۵	۸۴/۵۸۷۶	۳۱/۳۸۶۶
کوارتز	۲۹/۷۱	۲/۶۵	۷۸/۷۳۱۵	۲۹/۲۱۳۶

تعیین خصوصیات مکانیکی (خواص مقاومتی و حفر پذیری)

سنگ بر اساس ضریب بافت

سنگ که درصدهای متفاوتی از کانی‌های مختلف، اجزای اصلی آن را تشکیل می‌دهند یک ماده ناهمگن و به ندرت همگن می‌باشد. خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ، بستگی بسیار زیادی با کانی‌های تشکیل دهنده و خصوصیات بافتی آن (اندازه دانه‌ها، شکل دانه‌ها، جهت‌یافتگی دانه‌ها و غیره) دارد (Tandon and Gupta, 2013). مطالعات زیادی، رابطه بین خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ با درصد کانی‌های تشکیل دهنده و ویژگی‌های بافتی آن را بررسی کرده‌اند (برای نمونه؛ West, 1986; Akesson et al., 2001; Jeng et al., 2004; Zorlu et al., 2008 و Tandon and Gupta, 2013).

محاسبه ضریب بافت

بعضی از محققین بافت را به عنوان درجه تبلور، دانه‌بندی و آرایش یا رابطه هندسی بین اجزای سازنده سنگ تعریف کردند. (Williams et al., 1982)، (Howarth and Rowlands, 1987)، پارامتر ضریب بافت Texture Coefficient (TC) را ارائه کردند، که بر مبنای چهار ویژگی بافتی (کرویت، طولیل‌شدگی، جهت‌یافتگی و درجه تراکم دانه‌ها) بافت سنگ را ارزیابی می‌کند. در دو دهه اخیر مطالعاتی به منظور برقراری ارتباط بین ضریب بافت با خصوصیات مکانیکی سنگ صورت گرفته است (برای نمونه؛ Brosch et al., 2000; Tandon and Akesson et al., 2001; Jeng et al., 2004 و Gupta, 2013).

ضریب بافت بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود. رابطه (۱):

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

که در آن

AW: وزن مربوط به چگالی تراکمی دانه‌هاست؛

N₀: تعداد دانه‌هایی که نسبت طول به عرض آنها کمتر از ۲ است؛

N₁: تعداد دانه‌هایی که نسبت طول به عرض آنها بیشتر از ۲ است؛

FF₀: میانگین حسابی فاکتور شکل تمام دانه‌های N₀ است، که به صورت

$$FF_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot Area}{Perimeter^2}$$

محاسبه می‌شود (Area: مساحت، Perimeter: محیط)؛

AR₁: میانگین حسابی نسبت طول به عرض دانه‌های N₁ است؛ و

AF₁: فاکتور زاویه است، که کیفیت جهت‌یافتگی دانه‌ها را تعیین می‌کند.

AF₁ برای تمام دانه‌های N₁ با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

رابطه (۲):

$$AF_1 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^9 \left(\frac{Xi}{N(N-1)/2} \right)$$

که در آن

N: تعداد کل دانه‌های دارای کشیدگی (N₁ = N)؛

Xi: تعداد اختلافات زاویه‌ای در هر کلاس؛ و

i: فاکتور وزن دهی و شماره کلاس است.

جدول ۵. درصد وزنی اکسیدها در گرانیتوئید کوهسنگی مشهد.

کانی	فرمول شیمیایی	تجزیه به اکسیدها	وزن مولی اکسیدها	درصد وزنی اکسیدها در کانی (%)	درصد وزنی اکسیدها در سنگ (%)
ارتوکلاز	$KAlSi_3O_8$	K_2O	۹۴/۱۹۶	K_2O ۱۶/۹۲۱۵	۳/۳۱۶۱
		Al_2O_3	۱۰۱/۹۶۱۲	Al_2O_3 ۱۸/۳۱۶۵	۳/۵۸۹۴
		$6SiO_2$	۳۶۰/۵۰۵۸	SiO_2 ۶۴/۷۶۱۹	۱۲/۶۹۱۲
پلاژیوکلاز (الیگوکلاز)	$NaAlSi_3O_8$	Na_2O	۶۱/۹۷۸۸	Na_2O ۸/۷۳۰۴	۲/۷۴۰۲
		Al_2O_3	۱۰۱/۹۶۱۲	CaO ۵/۲۶۶۱	۱/۶۵۲۸
	$CaAl_2Si_2O_8$	$6SiO_2$	۳۶۰/۵۰۵۸	Al_2O_3 ۲۳/۹۳۷۳	۷/۵۱۳۱
		CaO	۵۶/۰۷۷۴	SiO_2 ۶۲/۰۶۶۱	۱۹/۴۸۰۴
میکا	$K_2Mg_6(OH)_4Si_6Al_2O_{20}$	K_2O	۹۴/۱۹۶	K_2O ۱۰/۲۱۶۰ MgO ۱۲/۰۲۰۸ FeO ۲۱/۴۲۷۷ Al_2O_3 ۱۶/۵۸۷۳ SiO_2 ۳۵/۸۴۰۴ H_2O ۳/۹۰۷۷	K_2O ۲/۰۲۳۱ MgO ۲/۳۸۰۵ FeO ۴/۲۴۳۴ Al_2O_3 ۲/۲۸۴۸ SiO_2 ۷/۰۹۷۵ H_2O ۰/۷۷۳۸
		$6MgO$	۲۴۱/۸۲۶۴		
		Al_2O_3	۱۰۱/۹۶۱۲		
		$6SiO_2$	۳۶۰/۵۰۵۸		
		$2H_2O$	۳۶/۰۳۰۴		
		$2Al_2O_3$	۲۰۳/۹۲۲۴		
	$K_2Mg_5Al(OH)_4Si_5Al_3O_{20}$	K_2O	۹۴/۱۹۶	K_2O ۱۰/۲۱۶۰ MgO ۱۲/۰۲۰۸ FeO ۲۱/۴۲۷۷ Al_2O_3 ۱۶/۵۸۷۳ SiO_2 ۳۵/۸۴۰۴ H_2O ۳/۹۰۷۷	K_2O ۲/۰۲۳۱ MgO ۲/۳۸۰۵ FeO ۴/۲۴۳۴ Al_2O_3 ۲/۲۸۴۸ SiO_2 ۷/۰۹۷۵ H_2O ۰/۷۷۳۸
		$5MgO$	۲۰۱/۵۲۲		
		$5SiO_2$	۳۰۰/۴۲۱۵		
		$2H_2O$	۳۶/۰۳۰۴		
		$2Al_2O_3$	۲۰۳/۹۲۲۴		
		$5SiO_2$	۳۰۰/۴۲۱۵		
$K_2Fe_5Al(OH)_4Si_5Al_3O_{20}$	K_2O	۹۴/۱۹۶	K_2O ۱۰/۲۱۶۰ MgO ۱۲/۰۲۰۸ FeO ۲۱/۴۲۷۷ Al_2O_3 ۱۶/۵۸۷۳ SiO_2 ۳۵/۸۴۰۴ H_2O ۳/۹۰۷۷	K_2O ۲/۰۲۳۱ MgO ۲/۳۸۰۵ FeO ۴/۲۴۳۴ Al_2O_3 ۲/۲۸۴۸ SiO_2 ۷/۰۹۷۵ H_2O ۰/۷۷۳۸	
	$5FeO$	۳۵۹/۲۲۲			
	$2Al_2O_3$	۲۰۳/۹۲۲۴			
	$5SiO_2$	۳۰۰/۴۲۱۵			
	$2H_2O$	۳۶/۰۳۰۴			
	$2Al_2O_3$	۲۰۳/۹۲۲۴			
$K_2Fe_6(OH)_4Si_6Al_2O_{20}$	K_2O	۹۴/۱۹۶	K_2O ۱۰/۲۱۶۰ MgO ۱۲/۰۲۰۸ FeO ۲۱/۴۲۷۷ Al_2O_3 ۱۶/۵۸۷۳ SiO_2 ۳۵/۸۴۰۴ H_2O ۳/۹۰۷۷	K_2O ۲/۰۲۳۱ MgO ۲/۳۸۰۵ FeO ۴/۲۴۳۴ Al_2O_3 ۲/۲۸۴۸ SiO_2 ۷/۰۹۷۵ H_2O ۰/۷۷۳۸	
	$6FeO$	۴۳۱/۰۶۶۴			
	Al_2O_3	۱۰۱/۹۶۱۲			
	$6SiO_2$	۳۶۰/۵۰۵۸			
	$2H_2O$	۳۶/۰۳۰۴			
	Al_2O_3	۱۰۱/۹۶۱۲			
کوارتز	SiO_2	SiO_2	۶۰/۰۸۴۳	SiO_2 ۱۰۰	۲۹/۲۱۳۶

جدول ۶. آنالیز شیمیایی گرانیتوئید کوهسنگی مشهد (به روش پتروگرافی)

آنالیز شیمیایی (روش پتروگرافی)	
اکسید	درصد (%)
SiO_2	۶۸/۴۸۲۸
Al_2O_3	۱۴/۳۸۷۳
FeO	۴/۲۴۳۴
MgO	۲/۳۸۰۵
CaO	۱/۶۵۲۸
Na_2O	۲/۷۴۰۲
K_2O	۵/۳۳۹۲
H_2O	۰/۷۷۳۸

جدول ۷. آنالیز شیمیایی گرانودیوریت‌های مشهد (ولی زاده و کریم پور، ۱۳۷۴).

Rock Type	VK (وکیل آباد و کوهسنگی گرانودیوریت)						
Sample No.	T-1	T-2	S-1	S-2	X-1	V-1	V-2
Oxides%							
SiO ₂	۶۵/۲۴	۶۴/۷۴	۶۴/۸۳	۶۳/۷۰	۶۳/۹۷	۵۹/۳۲	۵۸/۱۶
TiO ₂	۰/۵۷	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۶۲	۰/۷۶
Al ₂ O ₃	۱۵/۳۹	۱۶/۴۲	۱۵/۹۶	۱۶/۸۵	۱۷/۶۱	۱۵/۵۹	۱۸/۱۴
Fe ₂ O ₃	۱/۸۵	۱/۱۶	۱/۱۸	۱/۲۰	۱/۴۰	۱/۵۹	۱/۸۶
FeO	۴/۴۱	۳/۹۵	۳/۹۶	۳/۹۶	۳/۶۹	۴/۷۷	۵/۵۸
MnO	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۶
MgO	۱/۸۹	۱/۷۹	۱/۸۵	۱/۷۱	۱/۳۲	۲/۶۰	۲/۳۲
CaO	۳/۸۴	۴/۲۸	۳/۷۸	۴/۱۸	۴/۷۷	۵/۶۹	۶/۱۳
Na ₂ O	۲/۴۱	۳/۰	۲/۸۴	۳/۰۳	۲/۷۵	۲/۴۸	۲/۷۱
K ₂ O	۳/۰۵	۲/۶۹	۲/۹۲	۲/۵۶	۲/۸۱	۲/۶۲	۲/۷۶
P ₂ O ₅	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۲۲
H ₂ O(+)	۱/۲۶	۱/۲	۱/۶۸	۱/۱۴	۱/۱۸	۱/۳۴	۱/۴
H ₂ O(-)	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۱۵
Total	۱۰۰/۲۱	۱۰۰/۱۴	۹۹/۹۳	۹۹/۵۹	۹۹/۹۹	۹۹/۱۲	۱۰۰/۳

(صفر تا ۹۰°) بوده و این مقادیر به ۹ رده تقسیم می‌شوند (جدول ۸). بنابراین در یک گروه N دانه‌ای، تعداد اختلاف زاویه بر اساس رابطه (۳-۴) بدست می‌آید:

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

به منظور اجتناب از خطا در مقادیر محاسبه شده در رابطه فوق، حداقل تعداد دانه‌های (N)، بایستی در محدوده بین ۳۰ - ۵۰ دانه قرار داشته باشند. برای محاسبه این مقادیر و همچنین طبقه‌بندی آنها و به طور کلی محاسبه ضریب بافت یک کد متلب MATLAB نوشته شد. نتایج بدست‌آمده در (جدول ۸) ارائه شده است. مقدار بدست‌آمده برای فاکتور زاویه ۰/۸۳۶۱ می‌باشد. این مقدار برای دانه‌هایی که به صورت کاملاً تصادفی در سنگ قرار داشته باشند ۱ و برای دانه‌های کاملاً موازی ۰/۲ می‌باشد (Howarth and Rowlands, 1987). بنابراین، دانه‌های موجود در گرانیت کوهسنگی با توجه به نتایج بدست‌آمده جهت‌یافتگی نشان نمی‌دهند.

برای محاسبه نسبت طول به عرض در این رابطه، از بیشترین کمترین قطر فرت استفاده می‌شود. قطر فرت فاصله عمودی بین دو سطح مماس بر سطوح خارجی دانه است که در زوایای صفر تا ۱۸۰° محاسبه می‌شود. در این مطالعه، برای هر دانه، قطرهای فرت با فواصل یک درجه‌ای بدست آمد، سپس بیشترین و کمترین آنها جهت محاسبه نسبت طول به عرض دانه مورد استفاده قرار گرفت. همچنین زاویه بین محور افقی و محور اصلی بیضی معادل با دانه، به عنوان جهت‌یافتگی در نظر گرفته شد. همانطور که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود، به منظور منطقی‌تر شدن مقادیر بدست‌آمده برای فاکتور شکل، کشیدگی و جهت‌یافتگی، عدد ۲ به عنوان مرزی برای کشیدگی (نسبت طول به عرض) دانه‌ها در نظر گرفته شده است. برای محاسبه فاکتور شکل از دانه‌های N₀ استفاده می‌شود که نسبت طول به عرض آنها کمتر از ۲ می‌باشد، در حالی که برای محاسبه نسبت طول به عرض دانه‌ها (AR₁) و همچنین محاسبه فاکتور زاویه از دانه‌های N₁ استفاده می‌شود که کشیده هستند و نسبت طول به عرض آنها از ۲ بیشتر است. در این مطالعه، از مجموع ۲۶۶ دانه بررسی شده، ۱۷۷ دانه N₀ و ۸۹ دانه N₁ هستند. 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 (β) بین هر دانه با دیگر دانه‌ها

جدول ۸. محاسبه فاکتور زاویه مونزوگرنایت کوهسنگی.

شماره	محدوده کلاس (β)	وزن	تعداد اختلافات زاویه	فاکتور زاویه
۱	$\theta \leq 10^\circ$	۱	۸۴۴	۰/۲۱۵۵
۲	$10^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$	۲	۵۴۳	۰/۲۷۷۳
۳	$20^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$	۳	۴۱۷	۰/۳۱۹۵
۴	$30^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$	۴	۴۴۵	۰/۴۵۴۵
۵	$40^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$	۵	۴۰۶	۰/۵۱۸۴
۶	$50^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$	۶	۲۸۴	۰/۴۳۵۱
۷	$60^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$	۷	۳۷۵	۰/۶۷۰۳
۸	$70^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$	۸	۳۶۷	۰/۷۴۹۷
۹	$80^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$	۹	۲۳۵	۰/۵۴۰۱
مجموع اختلافات زاویه			۳۹۱۶	$AF_1 = 0/8361$

و روابط ارائه شده مربوط به مطالعات آنها در (جدول ۱۰) خلاصه شده است. با استفاده از این روابط، خصوصیات مکانیکی مربوط به گرانیتوئید کوهسنگی مشهد بر اساس ضریب بافت بدست آمده برای این سنگ، محاسبه شد. نتایج حاصل همراه با اختلاف مجاز $tolerance$ مربوطه، بر اساس ضرایب همبستگی ارائه شده توسط (Howarth and Rowlands, 1987) و با استفاده از رابطه $(R^2 - 1) \pm 1$ در جدول ۱۰ ارائه شده است. مقاومت فشاری تک محوری سنگ مورد مطالعه با استفاده از ضریب بافت و روابط ارائه شده در (جدول ۱۰) حدود $11/65 \pm 145/57$ مگاپاسکال تخمین زده شد، که تطابق قابل ملاحظه‌ای با نتیجه بدست آمده بر مبنای آزمون بار نقطه‌ای، یعنی $147/35$ مگاپاسکال دارد.

تعیین سایندهی سنگ

از آنجا که خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ علاوه بر خصوصیات بافتی، بستگی بسیار زیادی با کانی‌های تشکیل دهنده آن دارد، در این بخش اهمیت ترکیب کانی شناسی سنگ در پتانسیل سایندهی آن بررسی می‌شود. سایندهی یکی از پارامترهای بسیار مهم و تاثیرگذار در هزینه و زمان تمام شده پروژه‌های حفاری می‌باشد. بنابراین قبل از شروع عملیات حفاری، برآورد پتانسیل سایندهی مصالح خاکی و سنگی، به منظور تعیین خصوصیات ابزار برشی و قطعات ماشین حفاری، امری ضروری و سودمند می‌باشد، زیرا منجر به کاهش زمان و هزینه تمام شده در پروژه‌های حفاری خواهد شد. تاکنون چندین روش شناخته شده برای ارزیابی پتانسیل سایندهی مصالح سنگی ارائه شده است که از جمله آنها می‌توان به عدد سختی ویکرز سنگ (VHNR)، شاخص سایندهی سنگ (RAI)، شاخص سایش سرشار (CAI) و اندیس سایش سرشته (BWI) اشاره نمود (لشکری پور و همکاران، ۱۳۹۲). در میان روش‌های فوق، عدد سختی ویکرز سنگ (VHNR) با استفاده از ترکیب کانی شناسی سنگ قابل برآورد است و نیازی به آزمون‌های خاص سایندهی ندارد.

پارامتر (AW) در رابطه (۱)، 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. بر اساس رابطه (۱) و نتایج بدست آمده برای بخش‌های مختلف این رابطه، مقدار ضریب بافت این نمونه سنگ برابر با $1/9152$ می‌باشد، مقادیر AR_1, FF_0, N_1, N_0, AW و AF_1 به ترتیب برابر با $1, 177, 89, 5525, 0/5412, 2/5412$ و $0/8361$ بدست آمد.

محاسبه پارامترهای مقاومتی

آزمایش بار نقطه‌ای بر اساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1985) بر روی گرانیتوئید کوهسنگی انجام شد. مقدار مقاومت بار نقطه‌ای این نمونه بر اساس آزمایشات صورت گرفته بر روی ۸ نمونه، و پس از حذف بیشترین و کمترین مقدار بدست آمده، برابر با $6/14$ مگاپاسکال بدست آمد (جدول ۹). سپس براساس شاخص مقاومت بار نقطه‌ای $[IS(50)]$ ، مقاومت فشاری تک محوری (UCS) این نمونه بر اساس رابطه ارائه شده توسط (ASTM D5731, 2001) که مقاومت فشاری تک محوری سنگ را 24 برابر شاخص مقاومت بار نقطه‌ای فرض نموده است، محاسبه و برابر با $147/35$ مگاپاسکال تخمین زده شد.

بررسی روابط تجربی ارائه شده میان ضریب بافت و

خصوصیات مکانیکی

خواص مکانیکی (مقاومت و حفرپذیری)، ۱۱ سنگ مختلف (آذرین، مرمر و ماسه‌سنگ) بر اساس نتایج آزمایشگاهی و برجا (Howarth and Rowlands, 1987) تعیین 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)

جدول ۹. 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	۱۶/۸۷۲۲	۵/۲۸۱۴	کمترین مقدار (X)
۳	محوری	۶۴	۳۷/۵	۱۸/۲۴۶۶	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 ۱۰. 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
ماسه سنگ و مرمیت	تصادفی	نرخ حفاری دورانی (با مت ۳۱/۸ میلیمتری)	۵۰۰/۳۹	-۳۵۷/۱۷	۰/۵۶
	عمود	میلیمتر بر دقیقه	۳۰۶/۰۷	-۱۶۶/۷۲	۰/۸
	موازی	نرخ حفاری ضربه‌ای (با ابزار ۳۷/۷ میلیمتری)	۲۸۱/۶۷	-۱۳۵/۱۴	۰/۷۹
	تصادفی	میلیمتر بر دقیقه	۴۹۳/۴۲	-۳۴۱/۸۵	۰/۶۵
	عمود	میلیمتر بر دقیقه	۲۹۷/۲۹	-۱۴۹/۳۳	۰/۸۳
	موازی	نرخ حفاری ضربه‌ای (با ابزار ۲۹ میلیمتری)	۲۷۵/۰۱	-۱۲۰/۶۶	۰/۸۱
آدرین و مرمیت	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	نرخ حفاری ضربه‌ای (با ابزار ۲۹ میلیمتری)	۶۳۸/۰۵	-۲۵۳/۰۵	۰/۹۶
تمام سنگ‌ها	تصادفی	نرخ حفاری ضربه‌ای (با ابزار ۲۹ میلیمتری)	۲۶۳/۳۲	-۳۶/۳۶	۰/۷۲
		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
Y: خصوصیت مکانیکی؛ X: ضریب بافت؛ UCS: مقاومت فشاری تک محوری؛ ES: مدول مماسی یانگ؛ MPa: مگا پاسکال؛ GPa: گیگا پاسکال. X: داده‌ها جهت انجام محاسبات مناسب نیست.					

عدد سختی ویکرز سنگ (VHNR)

در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، عدد سختی ویکرز (VHN) به عنوان معیاری برای سنجش درجه ساینده‌گی کانی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از ترکیب اعداد سختی مربوط به کانی‌های مختلف و با توجه به درصد هر کانی در ترکیب کانی‌شناسی سنگ، عدد سختی مربوط به سنگ (VHNR) بدست می‌آید. به منظور روشن‌شدن بیشتر موضوع، اعداد سختی مربوط به کانی‌های مختلف در (جدول ۱۱) ارائه شده است (Bruland, 1998). در (جدول ۱۲) نیز محاسبه عدد سختی (VHNR) برای گرانیتوئید کوهسنگی مشهد ارائه شده است.

اندیس سایش سرشار (CAI)

آزمون سرشار در اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی به منظور پیش‌بینی سایش کاتر cutter ماشین‌های حفاری تونل توسعه یافت. مقدار اندیس

سایش سرشار بین صفر تا ۷ متغیر است. رابطه (۴) میان اندیس سایش سرشار (CAI) و عدد سختی ویکرز سنگ (VHNR)، برای سنگ‌های فاقد هوازدگی و به ازای $CAI > 0.7$ برقرار است (Lislerud, 1997).

$$CAI = VHNR/14 \quad \text{رابطه (۴):}$$

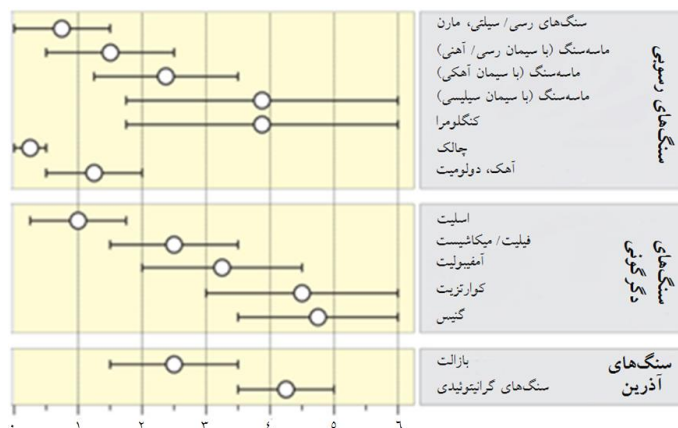
در (شکل ۶) دامنه‌ای از مقادیر اندیس سایش سرشار برای سنگ‌های مختلف نشان داده شده است (Plinninger and Restner, 2008). بر اساس رابطه فوق، می‌توان اندیس سایش سرشار را برای گرانیتوئید کوهسنگی مشهد حدود ۵/۱ تخمین زد. مقدار اندیس سایش سرشار بدست‌آمده برای این سنگ با بازه مربوط به سنگ‌های گرانیتوئیدی (۵ - ۳/۵) در (شکل ۶) تطابق نسبتاً خوبی دارد و می‌توان این توده نفوذی را در گروه سنگ‌های دارای ساینده‌گی بالا قرار داد.

جدول ۱۲. محاسبه عدد سختی ویکرز گرانیتوئید کوهسنگی مشهد

کانی	مقدار در سنگ (%)	سختی کانی (VHN)	نسبت از سختی کل
کوارتز	۲۹/۷۱	۱۰۶۰	۳۱۴/۹۲۶
پلاژیوکلاز	۳۱/۹۵	۸۰۰	۲۵۵/۶
ارتوکلاز	۲۰/۵۵	۷۳۰	۱۵۰/۰۱۵
بیوتیت	۱۷/۷۹	۱۱۰	۱۹/۵۶۹
عدد سختی VHNR			۷۴۰/۱۱

جدول ۱۱. مقادیر سختی VHN برای برخی از کانی‌ها (Bruland, 1998)

کانی	عدد VHN (Kg/mm ²)	کانی	عدد VHN (Kg/mm ²)
کروندوم	۲۳۰۰	پیروتیت	۳۱۰
کوارتز	۱۰۶۰	فلوئوریت	۲۶۵
گارنت	۱۰۶۰	پنتلانیدیت	۲۲۰
هماتیت	۹۲۵	اسفالریت	۲۰۰
پیریت	۸۰۰	کلکوپیریت	۱۹۵
پلاژیوکلاز	۸۰۰	سریانتینیت	۱۷۵
دیوپسید	۸۰۰	انیدریت	۱۶۰
مگنتیت	۷۳۰	کلسیت	۱۲۵
ارتوکلاز	۷۳۰	بیوتیت	۱۱۰
اوژیت	۶۴۰	گالن	۸۵
ایلمنیت	۶۲۵	کلکوسیت	۶۵
ارتوپروکسن	۶۰۰	کلریت	۵۰
هورنبلند (آمفیبول)	۶۰۰	ژیپس	۵۰
کرومیت	۶۰۰	تالک	۲۰
آپاتیت	۵۵۰	هالیت	۱۷
دولومیت	۳۶۵	سیلویت	۱۰



شکل ۶. مقادیر اندیس سایش سرشار برای سنگ‌های مختلف (اقتباس از: Plinninger and Restner, 2008).

نتیجه‌گیری

در این روش، نحوه آنالیز تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک سنگ به شیوه نیمه‌اتوماتیک ارائه شد. به منظور نشان‌دادن کارایی این روش و اطلاعات کاربردی که از آن حاصل می‌شود، مقاطع نازک گرانیتوئید کوهسنگی مشهد مورد تحلیل قرار گرفت که نتایج حاصل به قرار زیر می‌باشند:

- بر اساس آنالیز مدال نمونه‌های مورد مطالعه، گرانیتوئید کوهسنگی مشهد حاوی ۲۰/۵۵٪ ارتوکلاز، ۱۷/۷۹٪ بیوتیت، ۳۱/۹۵٪ پلاژیوکلاز و ۲۹/۷۱٪ کوارتز می‌باشد که در گروه مونوزوگرانیت و در مرز گرانودیوریت‌ها جای می‌گیرد. می‌توان این سنگ را یک بیوتیت مونوزوگرانیت نامید.
- بر اساس آنالیز مدال بدست‌آمده، آنالیز شیمیایی نمونه تعیین شد.

منابع

- سمعی، س.، کریم پور، م.ح.، حیدریان شهری، م.ح.، سانتوز، ژ.ف.، قادری، م.، ۱۳۹۳، سنگ نگاری، ویژگی‌های ژئوشیمی، ایزوتوپ‌های استرانسیوم و نئودیمیم و منشأ توده‌های گرانیتوئیدی منطقه اکتشافی خونیک، جنوب بیرجند، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۲، ص ۶۳-۷۹.
- زمانیان، ح.، دولت‌شاهی، س. و زارعی سهامیه، ر.، ۱۳۹۱، زمین شناسی اقتصادی کانسار آهن چنار علیا با تکیه بر بررسی میان‌بارهای سیال، شمال‌غرب همدان، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۵، ص ۹-۱۹.
- لشکری پور، غ.ر.، غفوری، م.، علیقلی، س. و طریقی ازلی، ص.، ۱۳۹۲، ارزیابی پتانسیل ساینده‌های آیتامیر و نیزار در مقاطع مختلف رسوبی، هشتمین همایش انجمن زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ولی‌زاده، م. و کریم‌پور، م.ح.، ۱۳۷۴، منشأ و موقعیت تکتونیکی گرانیت‌های جنوب مشهد، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۲۱، شماره ۱.
- 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.
- Baykan N. A., Yilmaz, N., 2010, Mineral identification using color spaces and artificial neural networks, *Computers and Geosciences*, Vol:36, No:1, p: 91-97.
- 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.
- Brosch, F.J., Schachner, K., Blumel, M., Fasching, A., Fritz, H., 2000, Preliminary investigation results on fabrics and related physical properties of an anisotropic gneiss, *Journal of Structural Geology*, Vol:22, p: 1773-1787.
- Bruland, A., 1998, Hard rock tunnel boring, Drillability test methods, Project report 13A-98, NTNU Trondheim.
- Friedman M. G., 1960, Chemical analyses of rocks with the petrographic microscope, *American Mineralogist*, Vol:45, p: 69-78.

- Goodchild, J.S. and Fueten, F., 1998, Edge detection in petrographic images using the rotating polarizer stage, *Computers & Geosciences*, Vol:24, p: 745-751.
- Green, D.I., 2005, Digital combination photography: a technique for producing improved images of microscopic minerals, *Australian Journal of Mineralogy*, Vol:11, No:1, p: 13-24.
- 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.
- Lislerud A., 1997, Principles of Mechanical Excavation, Posiva 97-12. Posiva OY, Finland. ISBN 951-652-037-5. ISSN 1239-3096.
- Middleton, A., Freestone, I.C., and Leese, M. N., 1985, Textural analysis of ceramic thin sections: Evaluation of grain sampling procedures, *Archaeometry*, Vol:27, No:1, p. 64-74.
- Młynarczuk, M., Górszczyk, A., Ślipek, B., 2013, The application of pattern recognition in the automatic classification of microscopic rock images, *Computers and Geosciences*, Vol:60, p: 126-133.
- Mursky, G. A. and Thompson, R. M., 1957, A specific gravity index for minerals, *Canadian Mineralogist*, Vol:6, No:2, p: 273-287.
- Neilson, M. J., and Brockman, G. F., 1977, The error associated with point-counting, *American Mineralogist*, Vol:62, p: 1238-1244.
- 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.
- Plinninger, R. J. and Restner, U., 2008, Abrasiveness Testing, Quo Vadis? – A Commented Overview of Abrasiveness Testing Methods, *Geomechanics and Tunneling*, Vol:1, No:1, p: 61-70.
- Reedy, C. L., 2006, Review of Digital Image Analysis of Petrographic Thin Sections in Conservation Research, *Journal of the American Institute for Conservation*, Vol:45, No:2, p: 127-146.
- Ross, B. J., Fueten, F., Yashkir, D. Y., 2001, Automatic mineral identification using genetic programming, *Machine Vision and Applications*, Vol:13, p: 61-69.
- Russ, J.C., 2002, *Computer Assisted Microscopy: the Measurement and Analysis of Images*, Plenum Press, New York.
- Streckeisen, A. L., 1976, To each plutonic rock its proper name, *Earth Science*, Rev:12, p: 12-33.
- Whitten, E. H. T., 1953, Modal and Chemical Analyses in Regional Studies, *Geology Magazine*, Vol: 90, p: 337-344.
- 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.
- Thompson, S., Fueten, F., Bockus, D., 2001, Mineral identification using artificial neural networks and the rotating polarizer stage, *Computers & Geosciences*, Vol:27, No:9, p: 1081-1089.
- Wahlstrom, E. E. 1950, *Igneous minerals and rocks*, John Wiley and Sons, New York.
- West, G., 1986, A relation between abrasiveness and quartz content for some coal measure sediments, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol:4, p: 73-78.
- 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.
- Zorlu, K., Gokceoglu, C., Ocakoglu, F., Nefeslioglu, H.A., Acikalin, S., 2008, Prediction of uniaxial compressive strength of sandstone using petrography-based models, *Engineering Geology*, Vol:96, p: 141-158.