

بررسی ارتباط بین ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی سنگ‌های آذرین متبلور با کمینه‌سازی بافتی به کمک آنالیز تصویری

علی همتی^۱، محمد غفوری^{۱*}، حسن مومیوند^۲، غلامرضا لشکری پور^۱

(۱) گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(۲) گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۰۶، پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۹

چکیده

مشخصات پتروگرافیکی همچون بافت، کانی‌شناسی و ریزساختار، اثری بنیادی بر ویژگی‌های فیزیکی و کیفی مصالح دارد. بسیاری از معیارهای طبقه‌بندی بنیادی یا انتخاب کیفی مصالح برای کاربردهای صنعتی بر مبنای ویژگی‌های بافتی-کانی‌شناسی و شیمیایی تعیین می‌شوند. آگاهی از اهمیت و درک ارتباط متقابل انواع مؤلفه‌های بافتی، کانی‌شناسی و شیمی بلورها می‌تواند در پیشگویی رفتارهای کمی و کیفی مصالح مؤثر واقع شود. در این پژوهش، پتروگرافیکی بافتی ۱۵ نوع سنگ آذرین متبلور با تنوع گسترده بافتی-کانی‌شناسی به‌روش آنالیز تصویری مقاطع میکروسکوپی کمینه‌سازی و بانک داده‌ای مشتمل بر مشخصات بافتی-کانی‌شناسی حدود ۱۸۰۰۰ کانی ایجاد شد. هم‌زمان نقشه توزیع کانی‌شناسی تهیه و در کنار پتروگرافی توصیفی برای تحلیل روابط بافتی-کانی‌شناسی به کار گرفته شد. میانگین حسابی مؤلفه‌های طبقه‌بندی شده اندازه‌سنجی، شکل‌سنجی و ارتباط بین دانه‌ای در سطوح مختلف دانه‌ای و فازی (کانی‌شناسی) تعیین و ارتباط بین مؤلفه‌های بافتی با کانی‌شناسی و شیمی بلورها و نیز ارتباط بینایی بین انواع مؤلفه‌های بافتی با تحلیل‌های رگرسیونی خطی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان‌داد اندازه (در اقسام مختلف طول، مساحت و محیط) مهم‌ترین مؤلفه بافتی سنگ‌های متبلور است که با ویژگی‌های بافتی و ماهیتی (کانی‌شناسی و شیمی) بلورها در ارتباط است. به‌علاوه بررسی توزیع آماری ویژگی‌های بافتی بلورها نشان‌داد به دلیل توزیع نامتقارن و غیرنرمال توزیع اندازه بلورها، برآورد اندازه متوسط به‌روش میانگین حسابی اغلب با خطای غیرقابل‌اجتناب تمایل به‌ریزدانه همراه است؛ درحالی‌که ویژگی‌های بافتی و کیفی سنگ‌ها با فراوانی محتوای حجمی دانه‌درشت و دانه‌متوسط کنترل می‌شود. برای تعدیل این خطا، قطر میانگین مساحت-موزون مستخرج از منحنی‌های توزیع تجمعی برای تعیین میانگین اندازه دانه (بلورها) مصالح متبلور به‌ویژه با تنوع گسترده در اندازه دانه پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: کمینه‌سازی بافتی، آنالیز تصویری، قطر میانگین مساحت-موزون، سنگ‌های آذرین متبلور، معادن گرانت شمال‌غرب ایران

مقدمه

شکل، مورفولوژی سطح، نوع تماس و توزیع اندازه دانه‌ها توصیف می‌شود. امروزه مشخص شده است که ویژگی‌های

ویژگی‌های بافتی مصالح توسط مؤلفه‌هایی همچون اندازه،

ارتباط بین بلورها در این سنگ‌ها متأثر می‌شود. از این رو، برخی پژوهشگران تلاش کردند تا ویژگی‌های شکلی و بافتی دانه‌ها را با برخی تقریب‌ها و شیوه‌های نیمه‌خودکار همچون مدل‌های هندسه جزئی^۳ (Ehrlich and Weinberg, 1970)، شبیه‌سازی‌های عددی (Ross et al., 2001) و روش‌های سنجش تصویری (DeVasto et al., 2012; Hussain et al., 2011; Mermillod-Blondin et al., 2017) تسریع بخشند. به مرور شیوه‌های جدیدی از تصویرنگاری میکروسکوپی مصالح با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای رایانه‌ای ابداع شد (Bryon, 1995; DeVasto et al., 2012; Knight et al., 2002; Mermillod-Blondin et al., 2011; Wong, 1998). با وجود توسعه شیوه‌های گوناگون نیمه‌خودکار و موفقیت‌های حاصل در تسهیل و تسریع استخراج ویژگی‌های بافتی سنگ‌هایی با بافت و کانی‌شناسی ساده، تا به حال، این شیوه‌ها در مواجهه با بافت‌های پیچیده و حاوی کانی‌های درهم رشد کرده سنگ‌های آذرین متبلور از کارایی لازم برخوردار نبوده‌اند. مشکل دیگر بررسی‌های بافتی، تطابق ضعیف مؤلفه‌های بافتی برای مفاهیم کانی‌شناسی به‌ویژه در مورد سنگ‌های متبلور است. به‌عنوان مثال میانگین اندازه دانه، شاخصی بافتی است که از روی میانگین حسابی کل یا میانگین فراوانی در دسته‌جات اندازه‌ای تعیین می‌شود (Kekec et al., 2006). این در حالی است که در سنگ‌های متبلور با تنوع گسترده اندازه و کانی‌شناسی، اهمیت دانه‌های با اندازه‌های مختلف برای محاسبه میانگین اندازه یکسان نیست. به عقیده نلساند و جنسن (Nålsund and Jensen, 2013)، در محاسبه میانگین اندازه دانه‌ها اهمیتی مضاعف برای دانه‌های خیلی درشت لازم است؛ چون این دانه‌ها مرز دانه بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند که استحکام و کیفیت سنگ را پایین می‌آورند. بنابراین در محاسبه میانگین باید وزن بیشتری به آنها داد. به عقیده لن و همکاران (Lan et al., 2010)، تنوع کانی‌شناسی و اندازه، هر دو از عوامل افزایش ناهمگونی سنگ‌ها هستند که می‌توانند بر رفتارهای

بافتی مصالح نقشی مهم در کنترل رفتارهای فیزیکومکانیکی کیفی سنگ‌ها (Jensen et al., 2010; Ündül, 2016; Yılmaz et al., 2013)؛ خاک‌ها (Arya et al., 1999)، بتن (Bentz et al., 1999) و مصالح آلیاژی (Dunlop et al., 2003) بازی می‌کنند. اثرات برخی از ویژگی‌های بافتی مصالح همچون اندازه (Brace, 1961; Sun et al., 2017)، شکل (Cox and Budhu, 2008)، ویژگی‌های سطح دانه‌ها (Diepenbroek et al., 1992)، توزیع اندازه دانه‌ها^۱ (Gurkan Ozgurel and Vipulanandan, 2005) و درهم‌قفلی بین دانه‌ها (Hoek, 1965) بر روی رفتارهای فیزیکومکانیکی مصالح سنگی همواره مورد تأکید بوده است. از طرف دیگر، لوکت و همکاران (Locat et al., 1984) نشان دادند که ویژگی‌های بافتی مصالح به‌طور ذاتی توسط کانی‌شناسی و شیمی مصالح کنترل می‌شود. هم‌زمان با این پژوهش‌ها، پژوهشگران پترولوژیست نیز تلاش‌هایی را برای برقراری ارتباط بین ویژگی‌های بافتی با تحولات تبلور سنگ‌های متبلور ارائه دادند (Cashman and Marsh, 1988). امروزه تقریباً ثابت شده است که ویژگی‌های بافتی با تاریخچه تحولات ژنتیکی انواع سنگ‌های رسوبی (Pettijohn et al., 1973)، دگرگونی (Higgins, 2006) و آذرین (Heilbronner, 2000) در ارتباط است.

شروع بررسی‌های کلاسیک مربوط به ویژگی‌های بافتی سنگ‌ها و کانی‌ها توسط فنیاک (Feniak, 1944) رقم خورد. گام‌های نخستین استخراج اندازه‌گیری‌های سه‌بعدی از سطح دوبعدی مقاطع توسط سالتیکوف (Saltikov, 1967) برداشته شد. به‌طور کلی بررسی‌های بافتی با کمینه‌سازی ویژگی‌های هندسی و شکلی ذرات تشکیل‌دهنده مصالح در مقاطع میکروسکوپی انجام می‌شود. زمان‌بر بودن و استخراج ساختار سه‌بعدی^۲ از اندازه‌گیری‌های دوبعدی دو مشکل جدی در کمینه‌سازی بافتی سنگ‌های آذرین متبلور است که از تنوع شکل و پیچیدگی

1. Crystal size distribution (CSD)
2. Stereology
3. Fractional geometry

به کار گرفته شد. بررسی‌های بافتی، بخش گسترده و بسیار وقت گیر این مطالعه را تشکیل می‌دهد که به کمینه‌سازی و استخراج مشخصات بافتی سنگ‌های مورد بررسی منجر شد. کمینه‌سازی بافتی با بلورمرزنگاری تصویری مقاطع میکروسکوپی شروع و با پردازش‌های بعدی توسط نرم‌افزارهای گرافیکی و GIS تکمیل شد. در کنار خروجی کمینه‌سازی شده بافتی، بررسی‌های پتروگرافی توصیفی مقاطع میکروسکوپی نیز برای تکمیل و تدقیق مطالعات بافتی به کار گرفته شد. به‌علاوه ترکیب شیمیایی عناصر اصلی نمونه‌ها نیز به روش XRF در آزمایشگاه مجاز کانسارن بینالود تهران تعیین شد (جدول ۱).

آنالیز تصویری

خواص نوری کانی‌ها مبنای بررسی‌های پتروگرافی به کمک میکروسکوپ پلاریزان است. در بررسی‌های پتروگرافی میکروسکوپی برای بررسی غالب ویژگی‌های نوری که به شناسایی و تشخیص مرز کانی‌ها منجر می‌شود، چرخاندن میز میکروسکوپ و دخول و خروج مکرر فیلتر پلاریزان ضروری است. در تبدیل مطالعات مستقیم میکروسکوپی به مطالعات غیرمستقیم تصویری، مهم‌ترین مشکل، خلق ایده‌ای است که عملکرد چرخش میز میکروسکوپ پلاریزان را بازسازی کند. منطقی‌ترین ایده برای جبران این نقیصه، تهیه تصاویر مختلف مقاطع میکروسکوپی در زوایای مختلف نور پلاریزان است. دو شیوه رایج برای جبران این نقیصه در بررسی پتروگرافی به روش آنالیز تصویری توسط پژوهشگران مختلف مرسوم بوده است: شیوه نخست تصویر برداری با ثابت نگه‌داشتن راستای فیلترهای آنالیزور و پلاریزور و چرخاندن مقطع میکروسکوپی (میز میکروسکوپی) در جهت‌های گوناگون است (Gokceoglu et al., 2012). دومین راه کار، تصویربرداری با ثابت نگه‌داشتن میز میکروسکوپ و چرخاندن هم‌زمان و یکسان آنالیزور و پلاریزور در راستاهای متفاوت است (Fueten, 1997; Goodchild and Fueten, 1998). در این پژوهش، با تهیه سه لایه تصویری در دو زاویه مکمل نور پلاریزه به‌عنوان روشی جامع و کاربردی برای تهیه تصاویر موردنیاز بررسی‌های تصویرنگاری، شناسایی و

فیزیکومکانیکی سنگ‌ها اثر بگذارند. طبق نظر اوانس و نپیرمان (Evans and Napier-Munn, 2013) روش‌های رایج تعیین میانگین اندازه دانه اغلب با خطاهای اجتناب‌ناپذیر زیادی همراه هستند و با افزایش اندازه دانه، ضریب خطا بیشتر می‌شود. به‌عقیده لیند کوست و همکاران (Lindqvist et al., 2007) ارزیابی‌های بافتی ساختاری آن‌گونه که در علوم متالورژی قابل استفاده است، در سنگ‌ها به دلیل پیچیدگی‌های ساختاری و تغییرات گسترده ارتباط دانه‌های مختلف به‌سادگی قابل استفاده نیستند.

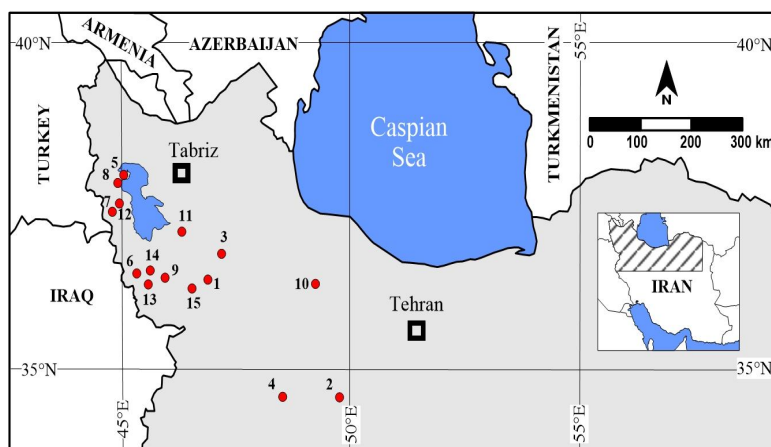
با توجه به مشکلات خاص تعیین ویژگی‌های بافتی و روابط پیچیده حاکم بر انواع مؤلفه‌های هندسی بافتی به‌ویژه در سنگ‌های متبلور، در این پژوهش سعی شده است با کمینه‌سازی انواع مؤلفه‌های بافتی طبقه‌بندی شده (مؤلفه‌های بافتی اندازه‌سنجی، شکل‌سنجی و ارتباط بین‌دانه‌ای)، ارتباط بین انواع مختلف مؤلفه‌های بافتی با همدیگر و با ویژگی‌های کانی‌شناسی و شیمیایی در سطوح مختلف دانه‌ای و فازی (کانی‌شناسی) به روش آنالیز رگرسیون خطی بررسی و روابط با اهمیت‌تر آماری با جزئیات بیشتر مورد تحلیل و تفسیر قرار گیرد. به‌علاوه برخی راه کارهای جدید برای بهبود مشکلات رایج اجتناب‌ناپذیر در تعیین اندازه میانگین بلورها ارائه شده است.

روش مطالعه

انجام این پژوهش بر روی ۱۵ نمونه از سنگ‌های آذرین متبلور با تنوع وسیع بافتی و کانی‌شناسی انجام شد. برای تهیه نمونه‌های تا حد امکان تازه، سالم و بدون هوازدگی، جهت بررسی‌های بهینه بافتی و پتروگرافیکی، جمع‌آوری نمونه‌ها از کارخانجات گرانیت‌بری شمال غرب کشور جمع‌آوری شد. بر اساس اطلاعات شناسه مکانی، تمام نمونه‌ها متعلق به معادن سنگ گرانیت مناطق شمال غرب کشور هستند (شکل ۱). برای شروع بررسی از هر نمونه سنگ، دو مقطع میکروسکوپی نور گذر تهیه شد؛ اما در عمل یکی از مقاطع میکروسکوپی که نماینده بهتری از بافت و کانی‌شناسی بود، برای بررسی‌های کمینه‌سازی بافتی انتخاب و نمونه دوم برای تکمیل پتروگرافیکی توصیفی

تصویربرداری با نور پلاریزان؛ اما با اختلاف زاویه تصویربرداری ۴۵ درجه نسبت به راستای دو تصویر اول و دوم (شکل ۲-A، B و C).

مرزنگاری کانی‌ها استفاده شده است. این سه لایه تصویری عبارتند از: ۱- لایه اول تصویربرداری با نور معمولی در یک راستای معین و ثابت، ۲- لایه دوم تصویربرداری با نور پلاریزان در همان راستای تصویربرداری لایه اول و ۳- لایه سوم



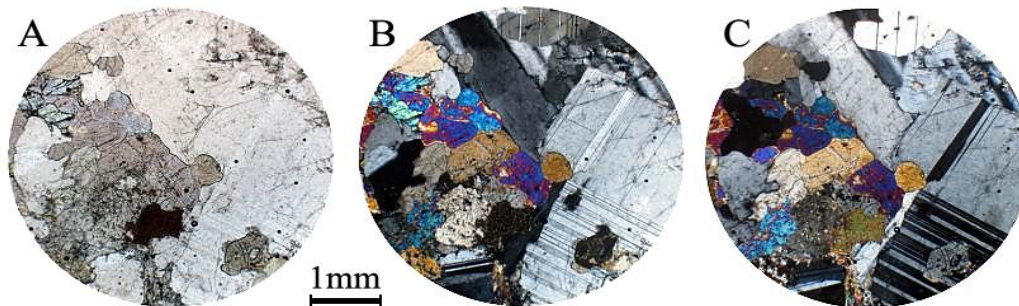
شکل ۱. شناسه مکانی نمونه‌های مورد استفاده در این بررسی در گستره بین استان‌های شمال غربی کشور

Fig. 1. Local identification of samples used in this study within the scope of the NW provinces of Iran

جدول ۱. ترکیب شیمیایی نمونه سنگ‌های مورد استفاده در این پژوهش به روش XRF

Table 1. Chemical composition of the rock samples used in this study by mean of XRF

Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	L.O.I
AFSH	65.44	0.37	14.32	4.28	0.03	2.43	3.35	4.5	2.91	0.18	2.19
ARAK	58.84	0.78	14.02	8.3	0.13	4.07	6.68	2.18	2.1	0.16	2.74
DOLF	59.99	0.49	17.11	4.55	0.04	1.31	4.7	4.39	6	0.26	1.16
EKBT	70.53	0.38	13.8	3.63	0.03	0.71	1.34	3.01	5.18	0.11	1.28
GBG	54.41	1.26	12.57	10.77	0.11	6.38	7.24	2.5	2.06	0.23	2.47
GLT	49.08	0.92	16.31	6.69	0.1	5.14	15.14	2.78	BDL	0.09	3.75
GOLM	72.64	0.23	13.22	2.24	0.01	0.42	1.53	4.06	4.3	0.06	1.29
GOSH	73.1	0.17	12.32	2.88	BDL	0.17	0.7	3.37	5.7	0.03	1.56
KHAL	74.33	0.2	11.96	3.19	0.01	0.37	1.69	3.36	3.65	0.05	1.19
KHOR	63.57	0.52	15.27	4.63	0.09	0.99	2.78	3.73	6.76	0.24	1.42
MARG	58.13	0.49	17.5	4.97	0.04	2.43	4.62	4.58	5.34	0.31	1.59
NARI	76.01	0.11	12.29	1.83	BDL	0.22	0.66	3.93	4.69	0.01	0.25
PIRB	62.49	0.36	16.3	5.17	0.07	0.28	2.35	7.15	4.5	0.09	1.24
PIRG	62.6	0.34	14.55	6.9	0.13	0.19	3.19	5.95	4.36	0.06	1.73
SAGZ	59.98	0.78	14.23	6.17	0.05	2.79	5.54	4.96	3.07	0.42	2.01
Mean	64.08	0.49	14.38	5.08	0.06	1.86	4.10	4.03	4.33	0.15	1.72
St.D	7.86	0.32	1.79	2.39	0.04	1.98	3.69	1.32	1.43	0.12	0.82
CV	12.27	64.35	12.46	47.09	66.75	106.65	90.01	32.68	33.08	76.96	47.83



شکل ۲. سه لایه تصویری قابل انطباق از یک میدان دید میکروسکوپی، A: تصویر در نور معمولی، B: همان تصویر در نور پلاریزان و C: تصویر در نور پلاریزان اما با ۴۵ درجه چرخش میز میکروسکوپ در جهت عقربه‌های ساعت نسبت به دو تصویر پیشین

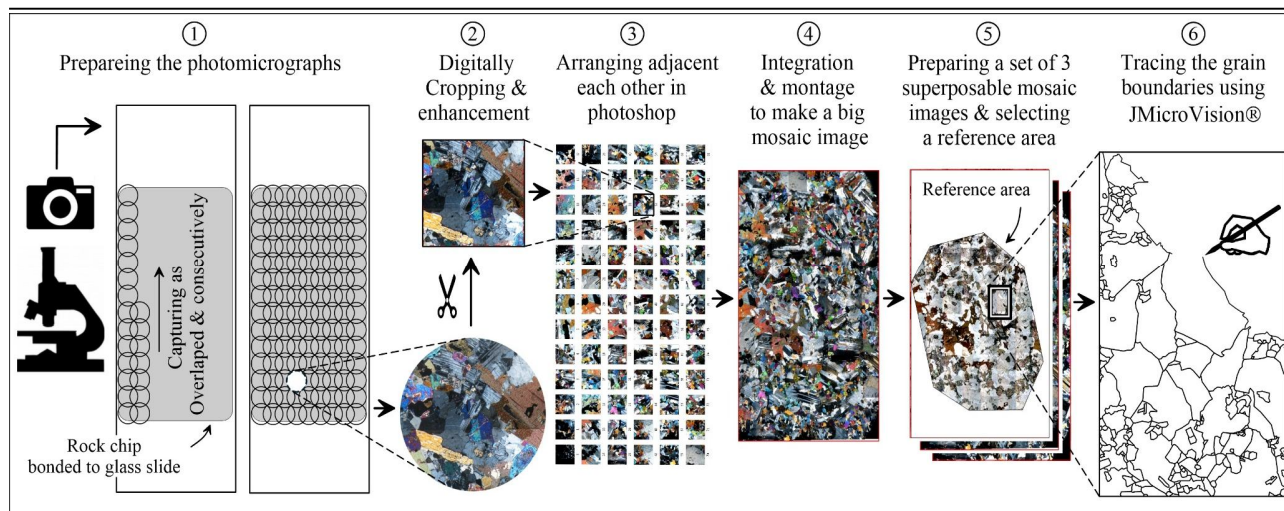
Fig. 2. Three superposable photomicrographs of a same microscopic view field acquired in the different optical condition of polarized microscopy, A: image under PPL, B: image under XPL, and C: image under XPL with the difference by a 45° clockwise rotation of the stage to the two earlier images

تصاویر موزائیکی یکپارچه به‌همدیگر ملحق شدند. با توجه به لزوم ایجاد تصاویری با دقت بالا، عملیات پردازش و الحاق تصاویر دیجیتالی در محیط فتوشاپ به‌طور بصری انجام شد. در مجموع، تعداد ۵۴۰۰ قطعه عکس دیجیتال با صرف وقت و زحمت فراوان برای تهیه ۱۵ مجموعه سه‌تایی تصاویر موزائیک از ۱۵ نوع سنگ آذرین مورد بررسی تهیه و مورد پردازش قرار گرفت تا به‌عنوان تصاویر پایه برای آنالیز تصویری بافت و کانی‌شناسی به کار گرفته شوند. شکل ۳، نمودار شماتیک مراحل تصویربرداری میکروسکوپی پیوسته از سطح مقاطع میکروسکوپی تا اجرای عملیات بلورمرزنگاری بر روی لایه تصاویر موزائیک قابل انطباق را نشان می‌دهد.

یکی از ویژگی‌های مشترک تمام پژوهش‌های پیشین انجام‌شده، انتخاب چندین بخش محدود از سطح مقاطع میکروسکوپی به‌عنوان انتخاب نمونه از جامعه برای بررسی‌های پتروگرافی و بافتی است. در این پژوهش، برای نخستین بار مطالعات بر اساس مرزنگاری دستی بخش پیوسته بزرگی از تصاویر سطح مقاطع میکروسکوپی (ناحیه مرجع) که نماینده ویژگی‌های بافتی کانی‌شناسی نمونه است، انجام شد. این ترجیح در تقلیل خطاهای ناشی از توزیع ناهمگون بافتی-کانی‌شناسی می‌تواند نقشی مؤثر داشته باشد.

عملیات تصویربرداری به‌صورت جاروبی پیوسته از کل سطح مقاطع میکروسکوپی و به کمک دوربین دیجیتالی نصب‌شده بر روی میکروسکوپ پلاریزان المپوس مدل BX60F5 انجام شد. برای داشتن رویه‌ای ثابت در شناسایی انواع کانی‌های ریز و درشت برای تمام مراحل تصویربرداری، درشت‌نمایی کلی میکروسکوپ، ۴۰ برابر میکروسکوپ و درجه تفکیک دوربین، ۱۶۰۰×۱۲۰۰ پیکسل از نوع تصاویر RGB انتخاب شد. در چنین شرایطی میدان عکس‌برداری کامل هر تصویر، دایره‌ای به قطر ۴/۵ میلی‌متر روی سطح مقاطع میکروسکوپی بود؛ اما به دلیل نبود انطباق و اتصال کامل تصاویر دایره‌ای در کنار هم، کلیه تصاویر با هم‌پوشانی جانبی ۳۰ درصد در هر دو راستای طولی و عرضی تهیه شدند. برای پوشش کامل سطح مفید هر مقطع میکروسکوپی استاندارد (۲۴×۴۶ میلی‌متر)، تعداد ۱۲۰ قطعه عکس دیجیتال تهیه شد. سپس با برش دیجیتالی حاشیه‌های غیرمفید تصاویر دایروی توسط نرم‌افزارهای ویرایش گروهی تصاویر^۱، هر تصویر به شکل مربعی با ابعاد میدانی ۳/۱۲۵ میلی‌متر و با ابعاد کیفی ۱۰۰۰×۱۰۰۰ پیکسل نهایی شد. تصاویر مربعی اخیر پس از فرایندهای دیجیتالی افزایش کیفیت و وضوح، متناسب با همان موقعیت تصویربرداری پیاپی در مقاطع اصلی، به کمک نرم‌افزار فتوشاپ در کنار هم مرتب‌شده و پس از تصحیح برخی کج و کولگی‌های حاشیه‌ای برای ایجاد

1. Batch image processing software



شکل ۳. نمودار شماتیک از تصویربرداری میکروسکوپی پیوسته تا اجرای بلورمرزنگاری بر روی لایه تصاویر موزائیک قابل انطباق

Fig. 3. Schematic diagram from continuous microscopy imaging to performing the crystal boundary tracing on the big superposable mosaic image layers

قابل انطباق در شناسایی و ترسیم مرز کانی‌ها، جابه‌جایی پیوسته^۲ بین لایه‌های تصویری پس‌زمینه ضروری است. این عملکرد، معادل عملیات چرخش میز میکروسکوپ و دخول و خروج پیوسته فیلتر پلاریزان در بررسی‌های مستقیم میکروسکوپی بوده و ابهامات مرزی ناشی از خواص نوری کانی‌ها به‌ویژه کانی‌های همسان‌گرد و کدر را برطرف می‌کند. دقت اندازه‌گیری‌های تصویری در شناسایی و ترسیم مرز کانی‌ها در مقیاس طولی ۰/۰۴ میلی‌متر (۲۰ پیکسل) و در مقیاس دوبرعده‌ی ۰/۰۲ میلی‌متر مربع بوده است. برای پرهیز از پیمایش مضاعف مرز کانی‌ها که ضمن افزایش حجم عملیات ترسیمی، امکان تولید خطاهای ترسیمی را نیز افزایش می‌دهد، عملیات مرزنگاری کانی‌ها به‌جای ترسیم توسط چندضلعی‌های بسته^۳، توسط خطوط باز^۴ انجام شد. برای انجام محاسبات هندسی دیجیتالی همچون مساحت، طول‌شدگی، گردشگی و ...، گرافیک‌های ترسیمی یادشده لازم است به شکل چندضلعی‌های بسته تبدیل شوند. نرم‌افزار JMicroVision ترسیمات گرافیکی را با فرمت برداری SVGZ^۵ ذخیره می‌کند. فایل‌های گرافیکی

بلورمرزنگاری و تهیه بانک اطلاعات رقومی بافتی

عملیات شناسایی و ترسیم مرز کانی‌ها با بارگذاری سه لایه تصویر موزائیک از هر مقطع در محیط نرم‌افزاری JMicroVision انجام شد. از قابلیت‌های این نرم‌افزار امکان ایجاد عوارض ترسیمی از نوع نقطه، خط و چندضلعی بر روی تصاویر گرافیکی و ایجاد بانک اطلاعاتی محدود از برخی محاسبات هندسی است. با توجه به وفور و فراوانی کانی‌های موجود در مقاطع و تصاویر موزائیک مربوطه، ابتدا با بررسی‌های اولیه بصری ناحیه‌ای از تصاویر موزائیک که نماینده واقعی از بافت، اندازه و کانی‌شناسی کل سطح مقطع میکروسکوپی بود به‌عنوان منطقه مرجع^۱ برای عملیات مرزنگاری و کمینه‌سازی بافتی کانی‌شناسی انتخاب شد. اندازه این ناحیه بسته به بافت، اندازه و یکنواختی دانه‌ها متفاوت بوده و بین ۶/۵ تا ۵۵ درصد (جدول ۲) از کل سطح مقطع میکروسکوپی را دربر می‌گرفت. مرزنگاری کانی‌ها با ترسیم دستی مرز کانی‌ها روی تصاویر موزائیک پس‌زمینه و به کمک نرم‌افزار JMicroVision انجام شد. برای استفاده از اطلاعات تلفیقی هر سه لایه تصویری

1. Reference area
2. Continuous shifting
3. Polygons

4. Polylines
5. Compressed Scalable Vector Graphics

مقیاس بین فایل‌های گرافیکی اولیه تا فایل‌های خروجی نهایی پیش از محاسبات رقومی‌سازی ضروری است. حاصل این کارهای زمان‌بر تولید بانک اطلاعات هندسی بافتی ۱۷۸۴۳ عدد کانی مربوط به ۱۵ نمونه سنگ بود که به‌روش بصری- کامپیوتری رقومی‌سازی شد.

ذخیره‌شده در فرمت SVGZ پس از تبدیل به شکل تبدیلات داده‌ای DXF^۱ توسط نرم‌افزار ArcMap10 بازخوانی شد و ضمن تبدیل خطوط باز به چندضلعی‌های بسته، محاسبات موردنیاز دوبعدی توسط ابزارهای اصلی و الحاقیه‌های^۲ این نرم‌افزار انجام شد. با توجه به اینکه فرایند تبدیل خطوط باز به چندضلعی‌های بسته بدون حفظ مقیاس است؛ لذا محاسبه تغییر

جدول ۲. مشخصات آماری بلورمرزنگاری در مقاطع سنگ‌های مورد پژوهش

Table 2. Statistical characteristics of crystal boundary tracing of the studied rocks' thin sections

Samples	Reference Area		Tracing Minerals.
	(mm ²)	(%)	No.
AFSH	199.17	36.6	884
ARAK	130.49	26.4	1190
DOLF	200.64	37.1	781
EKBT	471.53	86.7	1844
GBG	30.80	6.5	579
GLT	226.31	37.3	1081
GOLM	164.21	28.5	1800
GOSH	129.20	24.2	1426
KHAL	277.65	54.9	1802
KHOR	204.88	45.4	1021
MARG	160.90	30.2	617
NARI	158.33	32.2	1346
PIRB	334.18	62.3	821
PIRG	205.56	38.2	895
SAGZ	144.78	28.7	1756
SUM	3038.63		17842

سنگ‌های مورد بررسی به‌کار گرفته شد. در جدول ۳ تعریف‌ها و جزئیات انواع عوامل هندسی بافتی مورد استفاده در این پژوهش خلاصه شده است. در شکل ۴ نیز برخی مفاهیم شکلی مرتبط با عوامل هندسی بافتی مورد بررسی، مصور شده است.

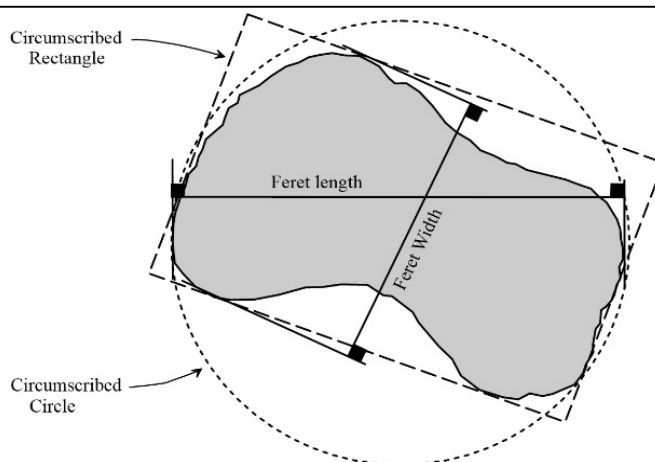
مؤلفه‌های هندسی بافتی مورد بررسی

برای بررسی ویژگی‌های بافتی مرتبط با اندازه، ابعاد، ریخت‌شناسی و ارتباط بین کانی‌ها، علاوه بر انواع مختلف عامل‌های هندسی بافتی موجود در منابع برخی عوامل بافتی جدید، تعریف و برای کمیته‌سازی ویژگی‌های هندسی بافتی

جدول ۳. مهم‌ترین مؤلفه‌های کانی‌شناسی و هندسی بافتی مورد استفاده در این پژوهش

Table 3. Most important mineralogical and geometric textural parameters used in this study

Syb.	Parameter	Description	Formula	Reference
Min	Mineralogy	The percentage of the occupied area by a specific mineral on the measured reference area	$Min = \frac{\sum A_i}{A}$	
L	Length	The longest perpendicular distance between the two parallel lines tangent on either side of an object	Pixel count in GIS	(Feret, 1931)
A	Area	The geometric surface of an object	Pixel count in GIS	
P	Perimeter	The boundary length of an object	Pixel count in GIS	
El _n	Elongation	The length-to-width ratio of the smallest rectangle surrounding the object	$AR = \frac{L_R}{W_R}$	(Schneiderhöhn, 1954)
C	Circularity	The ratio of object area to the area of a circle with the same perimeter	$C = \frac{4\pi A}{P^2}$	(Cox, 1927)
R _{nd}	Roundness	The square of the ratio of the object equivalent diameter to the object length	$Rnd = \left(\frac{D_E}{L}\right)^2 = \frac{4A}{\pi L^2}$	(Cox and Budhu, 2008)
R _{gh}	Roughness	The ratio of the object perimeter to the perimeter of the smallest circumscribed rectangle enclosing the object	$Rgh = \frac{P}{P_{CR}}$	Introduce in this study
R _{ug}	Rugosity	The ratio of the object perimeter to the perimeter of the smallest circumscribed circle enclosing the object	$Rug = \frac{P}{P_{CC}}$	Introduce in this study
R _{cc}	Rectangularity	The ratio of the object area to the area of the smallest circumscribed rectangle enclosing the object	$Rec = \frac{A}{A_{CR}}$	Introduce in this study
CP _c	Compactness	The ratio of the object squared perimeter to the object area	$CP_c = \frac{A}{A_{CC}}$	(Cole, 1964)
t	Grain Size Homogeneity	The evaluation of grains homogeneity with respect to their size distribution	$t = \frac{A_{ave}}{\sqrt{\sum (A_i - A_{ave})^2}}$	(Dreyer, 1973)
H	Heterogeneity Index	The evaluation of grains heterogeneity with respect to their size and mineralogy distribution	$H.I = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{r_i}{R_a} - 1\right)^2}$, $R_a = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot r_i$	(Peng et al., 2017)
g	Interlocking Coefficient	The evaluation of grains interlocking with respect to their perimeter and area ratio	$g = \frac{1}{n} \sum \frac{P}{\sqrt{A}}$	(Dreyer, 1973)
TC	Texture Coefficient	The evaluation of grains interrelations with respect to the share of elongated and equidimensional grains and the mean orientation of grains	$TC = AW \left[\left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \cdot \frac{1}{SF_0} \right) + \left(\frac{N_1}{N_0 + N_1} \cdot AR_1 \cdot AF_1 \right) \right]$	(Howarth and Rowlands, 1987)



شکل ۴. نمایش مفاهیم طول و عرض فریت، دایره و مستطیل محاطی

Fig. 4. Illustration of the geometric shapes concepts of Feret length and width, Circumscribed circle and rectangle

و نتایج در جدول ۵ خلاصه شده است. با توجه به اینکه مؤلفه‌های ارتباط‌دانه‌ای ویژگی‌های مجموع دانه‌ها را به صورت یکجا و بدون دخالت نوع کانی‌ها ارزیابی می‌کنند، برای این نوع مؤلفه‌های بافتی محاسبه میانگین فازی بی‌معنا بوده و برای این گروه از مؤلفه‌های بافتی، میانگین فازی محاسبه نشده است.

کانی‌شناسی مبتنی بر تصویرنگاری

اولین گام در استفاده از بانک داده‌های هندسی بافتی، تهیه نقشه کانی‌شناسی و طبقه‌بندی سنگ‌های مورد بررسی بر اساس توزیع مساحت پوششی هر کانی در سطح مقاطع میکروسکوپی است. بدین منظور، هم‌زمان با عملیات مرزنگاری چندضلعی کانی‌ها، شناسایی کانی‌های مرزنگاری شده نیز از روی ویژگی‌های نوری آنها در لایه‌های تصویری انجام و در بانک داده مربوطه ثبت می‌شد. در مواردی که شناسایی کانی‌ها به دلیل اندازه کوچک یا سطح زنگار آنها مقدور نبود، از شناسایی‌های مستقیم پتروگرافی به کمک میکروسکوپ پلاریزان نیز استفاده می‌شد. در نهایت با استخراج مجموع مساحت پوششی هر نوع کانی، ترکیب کانی‌شناسی سنگ‌های مورد بررسی به روش توزیع سطح کانی‌شناسی تعیین شد. (جدول ۶).

بسط فازی مؤلفه‌های بافتی

در جدول ۴، میانگین حسابی مؤلفه‌های هندسی بافتی برای کل کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌های مورد بررسی محاسبه و خلاصه شده است. در سرسطرهای سمت چپ این جدول مؤلفه‌های بافتی مورد بررسی بر اساس نوع سنجش رفتاری هر مؤلفه در یکی از سه گروه مؤلفه‌های اندازه‌سنجی^۱ (طول، مساحت و محیط)، شکل‌سنجی^۲ (طول‌شدگی، دایرویت، گردیت، زبری سطح، چروکیدگی، مستطیل‌گونی و تراکم) و ارتباط بین‌دانه‌ای^۳ (یکنواختی اندازه، شاخص ناهمگونی، درهم‌قلمی و ضریب بافتی^۴) طبقه‌بندی شده‌اند. با توجه به ویژگی‌های آماری محاسبه شده در ستون‌های راست جدول ۳، مشخص می‌شود که مؤلفه‌های اندازه‌سنجی طول، مساحت و محیط، همچنین ناهمگونی و یکنواختی اندازه دانه از دامنه تغییرات بالایی برخوردار هستند؛ در حالی که مؤلفه‌های شکل‌سنجی و ریخت‌شناسی سطح تغییرات مختصری نسبت به میانگین نشان می‌دهند. برای درک نقش ویژگی‌های بافتی مرتبط با کانی‌های مختلف، میانگین مؤلفه‌های بافتی به صورت فازی برای سه کانی اصلی سنگ‌ساز (کوارتز، آلکالی‌فلدسپار و پلاژیوکلاز) و نیز کانی‌های مافیک (در اینجا به غیر از سه کانی اصلی، بقیه کانی‌ها مافیک تعریف شده‌اند) به طور مجزا محاسبه

1. Size metric parameters
2. Shape metric parameters

3. Grain interaction parameters
4. Texture Coefficient

جدول ۴. میانگین حسابی کل (دانه‌ای) مؤلفه‌های هندسی بافتی سنگ‌های مورد بررسی

Table 4. The total (grain) arithmetic mean of the studied rocks' geometric textural parameters

Textural Parameter			AFSH	ARAK	DOLF	EKBT	GBG	GLT	GOLM	GOSH	KHAL	KHOR	MARG	NARI	PIRB	PIRG	SAGZ	Ave	St.D	CV (%)	
Type	Symbol	Unit																			
Size metric parameters	L	mm	0.48	0.38	0.54	0.51	0.3	0.55	0.35	0.3	0.32	0.42	0.6	0.35	0.66	0.49	0.33	0.44	0.12	26.67	
	A	mm ²	0.23	0.11	0.27	0.26	0.05	0.21	0.09	0.09	0.15	0.20	0.26	0.12	0.41	0.23	0.08	0.18	0.1	52.07	
	P	mm	1.51	1.2	1.7	1.66	0.93	1.78	1.13	0.98	1.0	1.35	1.97	1.05	2.05	1.53	1.02	1.39	0.38	27.33	
Shape metric parameters	Eln	-	1.78	1.77	1.78	1.85	1.67	1.66	1.76	1.59	1.84	1.76	1.67	1.72	1.76	1.74	1.67	1.73	0.07	4.05	
	C	-	0.59	0.57	0.6	0.56	0.59	0.61	0.58	0.61	0.6	0.6	0.6	0.59	0.58	0.59	0.6	0.59	0.01	2.26	
	Rec	-	0.65	0.64	0.66	0.63	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64	0.66	0.66	0.55	0.66	0.65	0.65	0.64	0.03	4.16	
	Rnd	-	0.49	0.48	0.52	0.47	0.5	0.51	0.49	0.18	0.48	0.5	0.52	0.45	0.49	0.5	0.51	0.47	0.08	17.83	
	Rgh	-	0.9	0.91	0.94	0.91	0.91	0.9	0.91	0.9	0.89	0.9	0.93	0.84	0.91	0.91	0.9	0.9	0.02	2.41	
	Rug	-	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.89	0.85	0.87	0.91	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.01	1.43
	CP _C	-	0.44	0.44	0.44	0.42	0.45	0.46	0.44	0.47	0.43	0.45	0.46	0.44	0.44	0.45	0.46	0.45	0.01	3.08	
Grain interaction parameters	t	-	.005	.007	.003	.003	.020	.008	.007	.004	.004	.006	.016	.008	.010	.009	.008	.01	.005	58.18	
	H.I	-	1.18	2.17	1.93	1.51	5.58	2.38	2.56	5.24	1.07	1.52	1.39	3.57	2.04	2.23	4.25	2.57	1.43	55.73	
	G	-	4.81	4.9	4.94	5.01	4.82	4.74	4.86	4.73	4.77	4.79	4.88	4.77	4.85	4.85	4.76	4.83	0.08	1.64	
	TC	-	1.86	1.92	1.87	1.98	1.73	1.74	1.88	1.70	1.88	1.84	1.80	1.82	1.81	1.75	1.75	1.82	0.08	4.31	

جدول ۵. میانگین فازی مؤلفه‌های هندسی بافتی فازهای کانی‌شناسی کوارتز، پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار و کانی‌های مافیک

Table 5. The phasic mean of the geometric textural parameters for the mineralogical phases of quartz, plagioclase, alkali-feldspar and mafic minerals

Mineral Phase	Textural Parameter	AFSH	ARAK	DOLF	EKBT	GBG	GLT	GOLM	GOSH	KHAL	KHOR	MARG	NARI	PIRB	PIRG	SAGZ	Ave	St.D	CV (%)
Quartz phase	L	0.40	0.33	-	0.38	0.21	-	0.44	0.24	0.23	0.34	-	0.30	-	0.20	0.23	0.30	0.08	0.28
	A	0.15	0.06	-	0.09	0.02	-	0.14	0.06	0.09	0.05	-	0.09	-	0.02	0.03	0.07	0.05	0.62
	P	1.30	1.05	-	1.13	0.62	-	1.56	0.75	0.67	0.95	-	0.91	-	0.54	0.67	0.92	0.32	0.34
	Eln	1.68	1.71	-	1.74	1.70	-	1.78	1.57	1.84	2.01	-	1.70	-	1.80	1.68	1.75	0.11	0.06
	C	0.59	0.55	-	0.58	0.55	-	0.53	0.65	0.61	0.54	-	0.60	-	0.63	0.60	0.58	0.04	0.06
	Rec	0.63	0.61	-	0.63	0.60	-	0.61	0.66	0.65	0.61	-	0.56	-	0.65	0.64	0.62	0.03	0.05
	Rnd	0.49	0.48	-	0.49	0.46	-	0.46	0.14	0.48	0.42	-	0.46	-	0.49	0.49	0.44	0.10	0.23
	Rgh	0.90	0.91	-	0.90	0.91	-	0.94	0.88	0.88	0.89	-	0.83	-	0.87	0.88	0.89	0.03	0.03
	Rug	0.88	0.89	-	0.87	0.86	-	0.91	0.87	0.83	0.84	-	0.87	-	0.83	0.85	0.86	0.02	0.03
	CP _C	0.44	0.43	-	0.43	0.40	-	0.42	0.48	0.43	0.38	-	0.45	-	0.44	0.44	0.43	0.03	0.06
Plagioclase phase	L	0.58	0.42	0.58	0.37	0.36	0.62	0.27	0.23	0.44	0.35	0.74	0.54	-	0.21	0.48	0.44	0.16	0.35
	A	0.27	0.13	0.27	0.08	0.09	0.26	0.04	0.03	0.25	0.12	0.33	0.17	-	0.02	0.17	0.16	0.10	0.65
	P	1.76	1.26	1.70	1.02	1.13	1.92	0.75	0.66	1.35	1.02	2.14	1.56	-	0.57	1.52	1.31	0.48	0.37
	Eln	1.72	1.80	1.85	1.80	1.57	1.67	1.77	1.70	1.70	1.67	1.87	1.62	-	1.80	1.59	1.72	0.09	0.06
	C	0.61	0.60	0.63	0.67	0.61	0.60	0.62	0.65	0.62	0.67	0.59	0.60	-	0.68	0.62	0.63	0.03	0.05
	Rec	0.67	0.67	0.70	0.70	0.66	0.65	0.69	0.69	0.67	0.71	0.68	0.55	-	0.73	0.68	0.67	0.04	0.06
	Rnd	0.51	0.49	0.50	0.53	0.54	0.51	0.49	0.06	0.51	0.55	0.48	0.47	-	0.52	0.55	0.48	0.12	0.25
	Rgh	0.90	0.90	0.90	0.87	0.91	0.90	0.89	0.88	0.89	0.88	0.91	0.84	-	0.87	0.91	0.89	0.02	0.02
	Rug	0.87	0.87	0.85	0.84	0.89	0.88	0.85	0.85	0.86	0.85	0.86	0.89	-	0.82	0.89	0.86	0.02	0.03
	CP _C	0.46	0.45	0.45	0.47	0.48	0.46	0.45	0.47	0.46	0.49	0.44	0.46	-	0.46	0.49	0.46	0.01	0.03
Alkali-Feldspar phase	L	0.69	0.39	0.59	0.78	0.32	-	0.52	0.38	0.58	0.74	0.94	0.48	0.73	0.69	0.29	0.58	0.19	0.33
	A	1.10	0.07	0.33	0.75	0.06	-	0.21	0.14	0.41	0.66	0.49	0.22	0.48	0.40	0.05	0.38	0.30	0.79
	P	2.97	1.15	1.98	2.92	1.01	-	1.87	1.33	2.01	2.71	3.35	1.51	2.24	2.16	0.86	2.01	0.78	0.39
	Eln	1.57	1.78	1.73	1.79	1.57	-	1.62	1.59	1.72	1.67	1.69	1.72	1.71	1.65	1.57	1.67	0.08	0.05
	C	0.59	0.56	0.53	0.55	0.57	-	0.56	0.56	0.55	0.58	0.52	0.56	0.59	0.58	0.63	0.57	0.03	0.05
	Rec	0.64	0.62	0.61	0.63	0.63	-	0.63	0.63	0.62	0.66	0.62	0.54	0.66	0.65	0.65	0.63	0.03	0.05
	Rnd	0.51	0.45	0.46	0.48	0.50	-	0.50	0.28	0.48	0.51	0.48	0.44	0.50	0.50	0.52	0.47	0.06	0.13
	Rgh	0.93	0.90	0.94	0.94	0.92	-	0.94	0.93	0.92	0.94	0.98	0.85	0.91	0.92	0.88	0.92	0.03	0.03
	Rug	0.92	0.87	0.91	0.91	0.90	-	0.93	0.92	0.90	0.92	0.96	0.88	0.88	0.90	0.88	0.90	0.02	0.03
	CP _C	0.47	0.42	0.42	0.43	0.45	-	0.45	0.45	0.43	0.46	0.43	0.43	0.45	0.46	0.48	0.44	0.02	0.04
Mafic minerals phases	L	0.50	0.38	0.65	0.55	0.32	0.50	0.45	0.55	0.38	0.64	0.67	0.53	0.56	0.50	0.43	0.51	0.10	0.20
	A	0.08	0.16	0.13	0.13	0.05	0.16	0.03	0.08	0.07	0.12	0.18	0.08	0.15	0.11	0.08	0.11	0.04	0.40
	P	1.40	1.42	2.06	1.64	1.00	1.71	1.27	1.95	1.07	2.03	2.41	1.48	1.88	1.62	1.41	1.62	0.39	0.24
	Eln	2.72	1.93	3.93	2.21	1.93	1.68	4.41	3.94	2.21	3.38	3.25	2.70	2.85	2.75	2.56	2.83	0.81	0.29
	C	0.73	0.59	1.60	0.54	0.67	0.64	1.67	1.57	0.56	1.37	1.38	0.64	0.80	0.84	0.79	0.96	0.42	0.44
	Rec	0.85	0.68	1.64	0.65	0.73	0.67	1.73	1.65	0.63	1.47	1.45	0.68	0.90	0.94	0.90	1.04	0.42	0.40
	Rnd	0.56	0.51	1.35	0.44	0.56	0.53	1.40	0.28	0.43	1.20	1.22	0.48	0.66	0.71	0.67	0.73	0.37	0.50
	Rgh	1.17	1.00	2.12	1.00	1.01	0.92	2.33	2.29	0.93	1.96	1.95	1.13	1.33	1.37	1.30	1.45	0.52	0.36
	Rug	1.09	0.96	2.08	0.93	0.98	0.91	2.26	2.26	0.86	1.94	1.94	1.11	1.27	1.32	1.25	1.41	0.53	0.37
	CP _C	0.51	0.46	1.17	0.40	0.50	0.48	1.23	1.19	0.38	1.07	1.07	0.47	0.60	0.64	0.60	0.72	0.32	0.45

جدول ۶. ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های مورد بررسی بر مبنای سطح پوشش کانی‌ها در تصاویر مقاطع میکروسکوپی. علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Qz: کوارتز، Plg: پلاژیوکلاز، Kfs: آلکالی‌فلدسپار، Foid: فلدسپاتوئیدها، Bt: بیوتیت، Ms: مسکویت، Amp: آمفیبول، Px: پیروکسن، Ol: الیون، Ep: اپیدوت، Ap: آپاتیت، Tur: تورمالین، Spn: اسفن، opq: کانی‌های تیره، Ser: سریسیت، Chl: کلریت).

Table 6. Mineralogical composition of the studied samples based on the covered surface area of the minerals in the microscopic thin sections. Abbreviations according to Whitney and Evans (2010) (Qz: Quartz, Plg: Plagioclase, Kfs: Alkali-feldspar, Foid: Feldspathoid minerals, Bt: Biotite, Ms: Muscovite, Amp: Amphibole, Px: Pyroxene, Ol: Olivine, Ep: Epidote, Ap: Apatite, Tur: Tourmaline, Spn: Sphene, Opq: Opaque Minerals, Ser: Sericite, Chl: Chlorite).

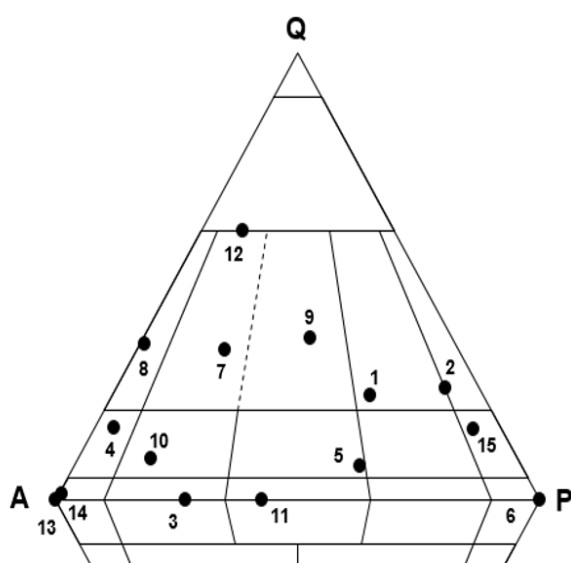
Samples	Major minerals (%)				Minor and secondary minerals (%)											
	Qz	Kfs	Plg	Foid	Bt	Ms	Amp	Px	Ol	Ep	Ap	Tur	Spn	opq	Ser	Chl
AFSH	21.9	22.0	50.1	-	2.1	-	3.2	-	-	-	-	-	0.4	0.1	-	-
ARAK	17.9	5.0	48.7	-	22.7	-	5.2	-	-	-	0.1	-	-	-	-	0.2
DOLF	-	69.2	25.3	-	1.2	-	0.3	1.3	-	-	0.1	-	-	0.8	-	1.7
EKBT	14.1	70.2	3.5	-	7.0	3.8	-	-	-	-	-	0.7	-	0.1	0.4	-
GBG	3.7	17.0	29.8	-	13.2	-	-	35.2	-	-	-	-	-	1.0	-	-
GLT	-	-	64.7	-	14.1	-	-	16.5	3.1	-	-	-	-	1.0	-	0.5
GOLM	32.6	46.8	17.7	-	0.4	-	-	-	-	-	-	-	0.2	0.3	-	1.9
GOSH	33.9	62.3	0.9	-	1.6	-	0.1	-	-	-	-	-	0.1	0.9	0.2	-
KHAL	34.4	28.0	32.9	-	4.0	-	-	-	-	0.3	-	-	-	0.1	0.3	-
KHOR	8.6	71.0	14.2	-	1.5	-	2.6	-	-	-	-	0.6	0.1	1.3	-	-
MARG	-	50.4	37.2	0.2	3.2	-	4.7	-	-	-	0.3	-	0.1	1.7	0.1	1.1
NARI	58.5	30.6	8.4	-	1.9	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-
PIRB	-	95.4	-	-	0.3	-	0.7	1.6	-	-	0.1	-	-	1.9	-	-
PIRG	1.1	90.1	0.5	-	3.1	-	3.8	0.7	-	-	0.1	-	-	0.7	-	-
SAGZ	13.3	4.9	66.2	-	5.3	-	8.4	-	-	-	0.2	-	0.3	0.9	-	0.2

سنگ‌های آذرین درونی از گرانیت و سینیت گرفته تا دیوریت و گابرو را دربرمی‌گیرند. برای بالابردن دقت کار در طبقه‌بندی مودال نمونه‌ها به‌جای روش رایج شمارش نقطه‌ای^۲ از کانی‌شناسی تصویری دوبعدی استفاده شده است.

سپس نمونه‌ها بر مبنای درصد نسبی کانی‌های اصلی، به‌روش پیشنهادی اتحادیه بین‌المللی علوم زمین^۱ (Streckeisen, 1976) طبقه‌بندی شدند (شکل ۵). دید اجمالی از موقعیت نمونه‌ها در نمودار طبقه‌بندی بالا گویای این موضوع است که ترکیب سنگ‌های مورد بررسی خیلی گسترده بوده و انواع متنوعی از

1. IUGS

2. Point counting method



Samples	Classification (Streckeisen, 1976)
1	AFSH Granodiorite
2	ARAK Tonalite
3	DOLF Syenite
4	EKBT Quartz Alkali Feldspar Syenite
5	GBG Quartz Monzonite
6	GLT Gabbro
7	GOLM Syenogranite
8	GOSH Alkali Feldspar Granite
9	KHAL Monzogranite
10	KHOR Quartz Syenite
11	MARG Fooid-Bearing Monzonite
12	NARI Quartz Rich Granitoid
13	PIRB Fooid-Bearing Alkali Feldspar Syenite
14	PIRG Alkali Feldspar Syenite
15	SAGZ Quartz Anorthosite

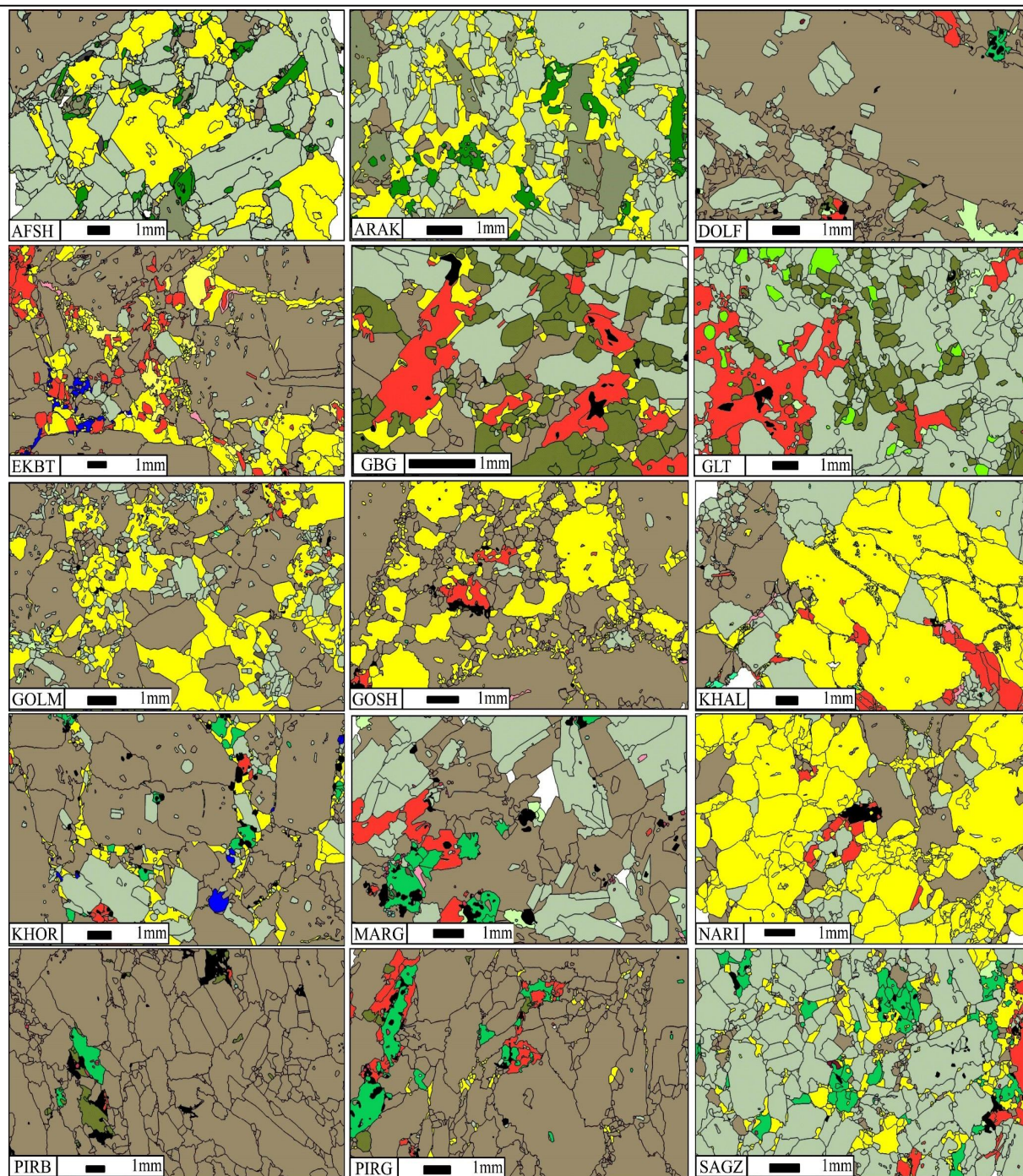
شکل ۵. طبقه‌بندی نمونه‌های مورد بررسی به روش پیشنهادی اتحادیه بین‌المللی علوم زمین

Fig. 5. Classification of the samples based on the International Union of Geological Sciences

گرفته‌اند. با وجود اینکه در برخی گزارش‌ها منشأ کوارتزهای ریز احاطه‌کننده کوارتزهای درشت زمین‌ساختی و استرس بیان شده است (Fazeli et al., 2017)؛ اما بررسی ویژگی‌های نوری و ویژگی‌های مورفولوژی بافتی هر دو نوع کوارتزهای ریز و درشت بیانگر منشأ ماگمایی اولیه این کوارتزهاست. به‌علاوه با آنکه آثار خفیف آلتراسیون سریستی در مرکز برخی آلکالی‌فلدسپارها و کلریتی‌شدن در پیرامون برخی بیوتیت‌ها مشاهده می‌شود؛ ولی ویژگی‌های بافتی کانی‌های مستعد آلتراسیون به‌ویژه حضور درشت‌بلورهای شکل‌دار بیوتیت (Ayati and Mahdevari, 2010) بیانگر این است که فرایندهای آلتراسیونی مؤثر همچون محلول‌های هیدروترمالی در تغییر کانی‌شناسی سنگ‌های مورد بررسی دخالت نداشته‌اند. با توجه به اینکه هدف این پژوهش تأکید بر جنبه‌های بافتی و مورفولوژیکی کانی‌هاست؛ لذا پتروگرافی نمونه‌های مورد بررسی بدون جزئیات و در حد ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی مشاهده‌ای، در جدول ۷ خلاصه شده است.

پتروگرافی و نقشه توزیع کانی‌شناسی

برای درک و تشریح پتروگرافی سنگ‌های مورد بررسی، علاوه بر بررسی‌های مستقیم مقاطع میکروسکوپی از نقشه‌های توزیع کانی‌شناسی بافتی^۱ نیز استفاده شد. این نقشه‌ها به کمک فایل‌های شکلی بلورهای مرزنگاری‌شده در محیط GIS تهیه شدند (شکل ۶). استفاده از این نقشه‌ها در کنار بررسی‌های پتروگرافی میکروسکوپی، دید سریع و جامعی از ساختار توزیع نوع، اندازه و جهت یافتگی توزیع کانی‌شناسی ارائه می‌دهد که می‌تواند در تحلیل‌های پتروگرافیکی و کانی‌شناسی مورد استفاده قرار گیرد. به‌عنوان مثال، کانی کوارتز که با رنگ زرد در نقشه کانی‌شناسی (شکل ۶) مشخص شده، در نمونه‌های مختلف از مورفولوژی متفاوت و متمایزی برخوردار است. از جمله اینکه در نمونه AFSH، کانی‌های کوارتز همانند فلدسپارها درشت و نیمه‌شکل‌دار هستند، یا در نمونه غنی از کوارتز KHAL، کوارتزها در دو اندازه متفاوت درشت و بسیار ریز دیده می‌شوند. ولی توزیع اندازه‌های کوارتز همگن نبوده و کوارتزهای بسیار ریز در مرز کوارتزهای درشت‌بلور قرار



شکل ۶. قسمت‌هایی از نقشه‌های توزیع کانی‌شناسی بافتی نمونه‌های مورد بررسی
Fig. 6. Parts of the textural mineral distribution maps of the samples

جدول ۷. خلاصه پتروگرافی توصیفی نمونه‌های مورد بررسی

Table 7. A brief petrographic description of the studied samples

AFSH	Kfs: anhedral to subhedral, small to coarse (up to 10 mm), occasionally with perthitic texture, Plg: subhedral and sub-rectangular (up to 5mm length), mostly with concentric stained zoning bands, Qtz: anhedral, fine to coarse, filled in intergrain spaces, Myrmekite texture in some case, Bt: light green, associated with Chl and ferromagnesium stains. Totally: homogeneous texture by Qtz and Fds Dist, a slight alteration in some crystals.
ARAK	Kfs: infrequent and anhedral, scattered among Plg crystals, rarely shows Carlsbad twins, Plg: subhedral, relatively coarse (up to 3mm), associated with polysynthetic twins, Qtz: anhedral, filled in intergrain spaces, Bt: brownish to dark red, platy form, larger than other minerals (up to 5mm), Pyx: moderate size with fair scattering, Poikilitic texture by small Plg. Totally: fresh, without significant alteration and relatively homogeneous granular texture by the distribution of Fds and Qtz.
DOLF	Kfs: size medium to coarse, porphyric rectangular crystals mainly are albite with perthitic texture and Carlsbad twins, Plg: subhedral, moderate size (up to 4mm), containing inclusions of some fine Kfs, Bt: lathy form, associated with radial Chl and Opq minerals, Pyx: mainly OPx. Totally: sub-porphyric, seriate texture due to scattering of coarse Kfs in the fine matrix of Plg. and Kfs.
EKBT	Kfs: commonly mega-porphyric (up to 30mm), sub-rectangular, showing perthitic texture and contact twins, Plg: subhedral, mainly fine, small than 1mm, Qtz: fine, anhedral, filled in intergrain spaces. Totally: heterogeneous in size, fine crystals of Plg, Qtz, Ms and Bt interplaced among the lathy porphyric Kfs, alteration in parts around the Kfs microcracks.
GBG	Kfs: subhedral and fine grain in size, Plg: subhedral fine and larger than Kfs, Qtz: fine, anhedral filled in intergrain spaces, Bt: reddish brown, subhedral and elongated, Pyx: OPx and OPx both are coarse grain. Totally: relatively seriate texture in the aspect of crystal type and size, fresh, without significant alteration equigranular texture by the distribution of Fds, Pyx, and Bt.
GLT	Lack of Qtz and Kfs, Plg: subhedral with transverse cleavages and zoning bands, vary from fine to coarse, Bt: reddish brown, subhedral and large, filled in the intergrain spaces of Plg, OPx, Bt, and sometimes olivine crystals. Totally: seriate texture by scattering of both small and large crystals, fresh, without significant alteration.
GOLM	Kfs: coarse and anhedral, foggy in parts due to alteration, occasionally associated with perthitic texture, Plg: some are coarse (up to 1.5 mm) and subhedral, the smaller is euhedral (rectangular) with inclusion of Kfs and Qtz, Qtz: fine and coarse, filled in intergrain spaces, Chl, more with origin of Bt alteration Totally: relatively homogeneous texture by fairly scattering of Qtz and Fds, alteration is significant mainly in Kfs.
GOSH	Kfs: coarse and subhedral (up to 4 mm) with perthitic texture in sometimes, slightly alteration, occurrence of systematic microcracks perpendicular and/or oblique to the crystal long axes traced by staining, Plg: infrequent and anhedral, Qtz: vary from fine to coarse (up to 4 mm), the fines formed between the coarse Fds. Bt: infrequent and associated with Opq and Sph, Totally: relatively homogeneous by fairly scattering of Qtz and Fds.
KHAL	Kfs: anhedral and coarse (up to 4 mm), mostly with perthitic texture and Carlsbad twins, Plg: anhedral and coarse (up to 4 mm), show alteration staining and concentric zoning, Qtz: vary from fine (<1mm) to coarse (up to 4 mm), the fine crystals formed between the coarse Qtz. Bt: subhedral and elongated, predominantly strained among the coarse Qtz. Totally: coarse grain and heterogeneous texture by localization of Qtz, Plg and Kfs, moderately alteration in Plg, the existence of parallel intra-grain microcracks in coarse Qtz.
KHOR	Kfs: subhedral, semi-rectangular and coarse (up to 8 mm), mostly show Carlsbad twins staining, the existence of systematic microcracks perpendicular to the crystals long axes, Plg: subhedral and semi-rectangular show polysynthetic twins, Qtz: fine, filled in the intergrain spaces of other crystals. Totally: heterogeneous and sub porphyric by coarse lathy Kfs scattered among the other fine crystals, slightly alteration in Kfs.
MARG	Lack of Qtz, Kfs: subhedral, semi-rectangular and coarse (up to 7 mm), partly stained, Plg: smaller than Kfs, have transverse cleavage microcracks without alteration, Amp: scattered associated with Opq minerals, Bt: colored (red and brown), far-flung scattering. Totally: homogeneous texture by fairly distribution of Kfs and Plg mainly.
NARI	Kfs: anhedral to subhedral, fine to coarse (up to 10mm), mostly with the inclusion of albite, predominantly with perthitic texture and Carlsbad twins, Plg: subhedral and semi-rectangular (up to 5mm), mostly with zoning bands and polysynthetic twins traced by staining, Qtz: anhedral, fine to coarse, filled in intergrain spaces. Myrmekite texture in some case, including of systematic microcracks in some case, Bt: subhedral, coarse, light green, associated with Chl and ferromagnesium stains, Totally: relatively homogeneous texture in the aspect of crystal type and size, fresh, without significant alteration.
PIRB	Present a little amount of Foid (0.03%), Kfs: predominant mineral, subhedral, semi-rectangular, coarse (up to 10mm length), slightly orientated, Perthitic texture, mostly with systematic microcracks perpendicular to the crystals long axes, show irregular ragged boundaries may cause high interlocking, Amp: elongated, case concentration among the coarse Kfs, Totally: coarse grain and relatively homogeneous texture, preferably orientation visible in the coarse Kfs, slightly alteration around the Kfs. Wide spreading Kfs without Qtz and Plg.
PIRG	The Qtz amount is little (~1%), Kfs: predominant mineral, subhedral and coarse (up to 6mm), Mesoperthite are common, mostly with systematic microcracks perpendicular to the crystals long axes, Plg: infrequent and fine which trapped by coarse Kfs, Amp: elongated, sometimes concentrated among the coarse Kfs, associated with Bt and Pyx, Totally: coarse grain and relatively homogeneous texture, inconspicuous orientation, apparent interlocking due to Kfs irregular ragged boundaries, slightly alteration in Kfs.

بحث و بررسی

برای بررسی ارتباط بین انواع ویژگی‌های هندسی بافتی با ویژگی‌های شیمیایی و کانی‌شناسی و نیز ارتباط بین ویژگی‌های بافتی مختلف با هم، از آنالیز همبستگی خطی (روش پیرسون) بین زوج متغیرها استفاده شد. برای این منظور ارتباط بین زوج متغیرهای گوناگون به شکل جدول همبستگی متقابل^۱ تهیه شد؛ اما به دلیل وفور متغیرهای گوناگون بافتی، کانی‌شناسی و شیمیایی در سطوح تحلیل دانه‌ای و فازی، جدول ماتریسی به دست آمده بسیار بزرگ بوده (۷۰×۷۰) و لذا در این پژوهش امکان نمایش و بررسی تمام ضرایب همبستگی جدول یادشده مقدور نبود. پس تنها آن عده از همبستگی‌ها که ارتباط آنها قوی و با اهمیت بوده و از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار بودند، با ترسیم بر روی نمودارهای پراکنش تصادفی مورد بررسی قرار گرفتند و معادله ارتباط خطی بین متغیرهای متقابل و ضریب رگرسیون خط برازش به روش کمترین مربعات^۲ (R^2) تعیین شد.

ارتباط کانی‌شناسی و شیمی بلورها

ارتباط ترکیب شیمیایی با کانی‌شناسی از دیرباز مورد توجه بوده

و ابداع کانی‌شناسی نورم بر مبنای ترکیب شیمیایی تحت شرایط ویژه ترمودینامیکی بر این اساس شکل گرفته است؛ اما روابط بین کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی با ویژگی‌های بافتی و به خصوص مورفولوژیکی کانی‌ها کمتر مورد توجه بوده است. نتایج همبستگی بین ترکیب شیمیایی با فازهای کانی‌شناسی اصلی در جدول ۸ خلاصه شده است. بر اساس این نتایج محتوای کانی‌های مافیک با مقدار تیتان و آهن و منیزیم همبستگی مستقیم و با مقدار سدیم و پتاسیم و میزان سیلیس همبستگی منفی نشان می‌دهد. همچنین ارتباطی مستقیم و خطی بین مقدار کوارتز با سیلیس و نیز بین فلدسپارهای آلکالن با مقادیر سدیم و پتاسیم برقرار است؛ اما شیب دو ارتباط اخیر مشابه نیست و روند افزایش کوارتز با سیلیس در مقایسه با روند افزایش فلدسپارها با عناصر قلیایی و قلیایی خاکی کندتر است (شکل ۷-A و B). احتمالاً دلیل این امر این است که سیلیس در ساختار تمام کانی‌های سیلیکاته حضور دارد و توسط عمده کانی‌ها مصرف می‌شود؛ درحالی‌که عناصر قلیایی و قلیایی خاکی به‌طور عمده در ساختار فلدسپارها حضور پیدا می‌کنند.

جدول ۸. همبستگی محتوای کانی‌های اصلی با شیمی کانی‌ها در سنگ‌های مورد بررسی

Table 8. Correlation of the main mineral content with the minerals chemistry in the studied samples

	Qz%	Kfs%	Plg%	Maf%
SiO ₂	<u>0.82</u>	0.28	-0.57	<u>-0.73</u>
TiO ₂	-0.58	-0.52	0.58	<u>0.93</u>
Al ₂ O ₃	<u>-0.76</u>	0.27	0.20	-0.01
FeO _t	-0.63	-0.31	0.38	<u>0.87</u>
MnO	-0.54	-0.06	0.01	0.61
MgO	-0.41	<u>-0.70</u>	0.70	<u>0.94</u>
CaO	-0.53	-0.56	<u>0.71</u>	<u>0.76</u>
Na ₂ O	-0.25	0.60	-0.31	-0.52
K ₂ O	-0.06	<u>0.73</u>	-0.59	-0.65
P ₂ O ₅	-0.51	-0.23	0.55	0.25
L.O.I	-0.49	-0.57	0.69	<u>0.76</u>
Na ₂ O+K ₂ O	-0.05	<u>0.85</u>	-0.65	<u>-0.78</u>

1. Matrix correlation
2. Least squares

ارتباط ویژگی‌های بافتی با شیمی بلورها

در جدول ۹، همبستگی‌های با اهمیت (بالای ۷۰ درصد) بین ترکیب شیمیایی با مؤلفه‌های هندسی بافتی خلاصه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، ترکیب شیمیایی با برخی مؤلفه‌های بافتی، همبستگی‌های با اهمیتی نشان می‌دهد. از این موارد می‌توان به ارتباط مستقیم مقدار اکسیدهای آلومینیم با برخی عوامل اندازه‌سنجی (طول، محیط و مساحت) بلورها اشاره کرد (شکل ۸-۸، B و C). در بررسی‌های فازی نیز معلوم می‌شود درشتی اندازه بلورهای کوارتز با مقدار اکسید منگنز رابطه‌ای معکوس نشان می‌دهد؛ درحالی‌که درشتی اندازه کانی‌های

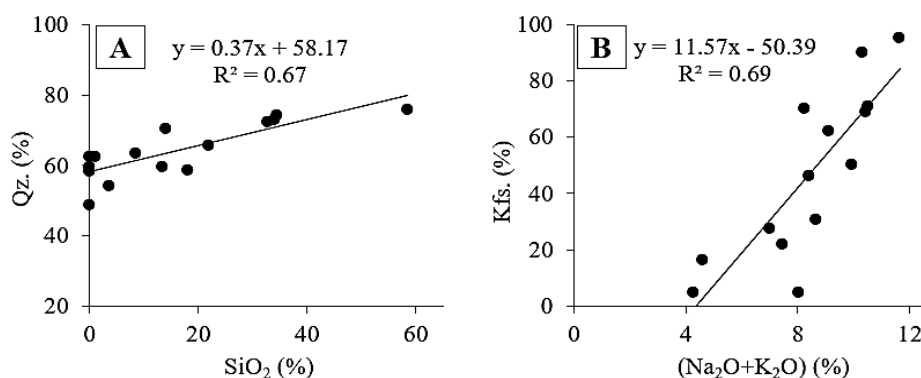
مافیک ارتباطی مستقیم با مقادیر اکسیدهای آلومینیم و پتاسیم نشان می‌دهد (شکل ۹-۹، A، B و C). در مورد ارتباط معکوس مقدار اکسید منگنز با اندازه کوارتز می‌توان چنین استنباط کرد که منگنز همراه با اکسیدهای آهن از اجزای کانی‌های مافیک هستند که اغلب در مراحل اولیه ماگمایی مصرف می‌شوند. از طرفی در شرایطی که کانی‌های مافیک تشکیل می‌شوند، سیلیس آزاد کم بوده و کوارتزهای تشکیل شده اغلب ریزبلور هستند؛ درحالی‌که در مراحل تشکیل کوارتزهای درشت‌بلور، منگنز اغلب مصرف شده و مقدار آن بسیار پایین آمده است.

جدول ۹. همبستگی‌های متقابل با اهمیت بین ویژگی‌های هندسی و شیمی کانی‌ها

Table 9. Significant matrix correlations between the geometric properties and the chemistry of minerals

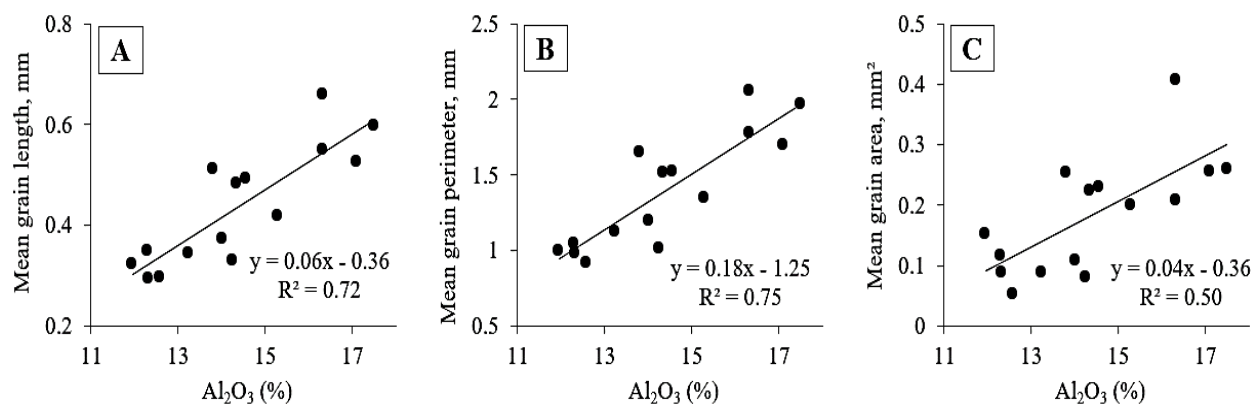
	L_all	A_all	P_all	A_Qz	L_Maf	A_Maf	P_Maf
SiO ₂	-0.39	-0.16	-0.40	0.61	0.04	-0.53	-0.19
TiO ₂	-0.04	-0.24	-0.04	-0.56	-0.40	0.17	-0.20
Al ₂ O ₃	<u>0.85</u>	<u>0.71</u>	<u>0.87</u>	-0.14	0.65	<u>0.79</u>	<u>0.74</u>
FeO _t	0.02	-0.13	0.01	-0.67	-0.45	0.21	-0.21
MnO	0.00	-0.09	-0.01	<u>-0.74</u>	-0.20	0.32	0.01
MgO	-0.08	-0.31	-0.06	-0.35	-0.46	0.16	-0.26
CaO	0.21	-0.04	0.23	-0.50	-0.21	0.40	-0.02
Na ₂ O	0.53	0.62	0.48	-0.05	0.37	0.09	0.32
K ₂ O	0.34	0.41	0.38	0.05	<u>0.88</u>	0.30	<u>0.77</u>
P ₂ O ₅	0.08	-0.04	0.10	-0.38	0.12	0.22	0.22
L.O.I	0.07	-0.14	0.10	-0.31	-0.38	0.27	-0.15
Na ₂ O+K ₂ O	0.34	0.51	0.32	0.01	0.69	0.05	0.56

Textural abbreviations: L_all: length, all grains; A_all: area, all grains; P_all: perimeter, all grains; A_Qz: area, Qz phase; L_Maf: length, mafic minerals phases; A_Maf: area, mafic minerals phases; P_Maf: perimeter, mafic minerals phases



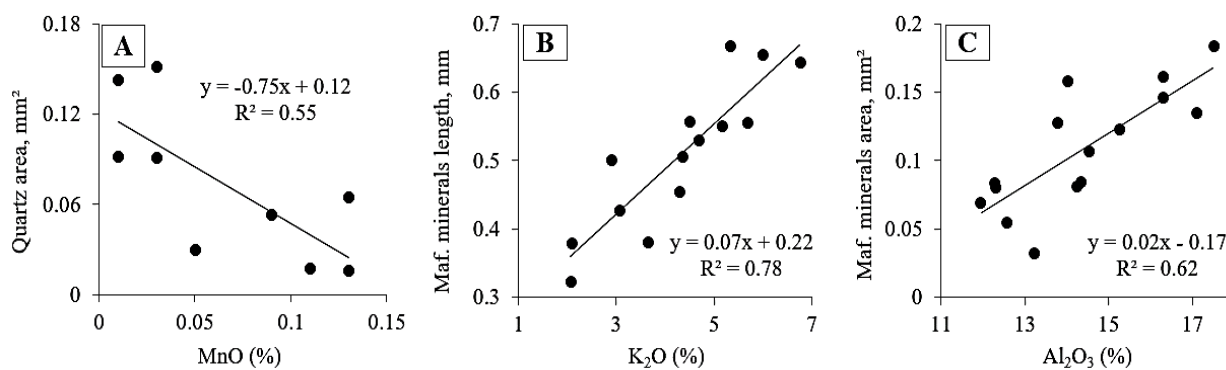
شکل ۷. ارتباط بین A: محتوای کوارتز و B: محتوای آلکالی‌فلدسپار به ترتیب با مقادیر سیلیس و عناصر قلیایی

Fig. 7. Relationship between the A: content of quartz, and B: content of alkali-feldspar with the silica and alkaline elements, respectively



شکل ۸. ارتباط مثبت بین A: میانگین طول، B: میانگین محیط و C: میانگین مساحت بلورها در با میزان اکسید آلومینیم

Fig. 8. The positive relationship between the A: mean length, B: mean perimeter, and C: mean area with the amount of aluminum oxide



شکل ۹. ارتباط بین A: میانگین مساحت کوارتز، B: میانگین طول کانی‌های مافیک و C: میانگین مساحت کانی‌های مافیک به ترتیب با مقادیر اکسیدهای منگنز، پتاسیم و آلومینیم

Fig. 9. Relationship between the A: mean area of quartz, B: mean length of mafic minerals, and C: mean area of mafic minerals with the amounts of manganese, potassium and aluminum oxides, respectively

ارتباط ویژگی‌های بافتی با کانی‌شناسی

کانی‌شناسی مهم‌ترین عامل بافتی است که علاوه بر رفتارهای فیزیکی و شیمیایی، ویژگی‌های شیمیایی مصالح را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. برخی از پژوهشگران معتقدند کانی‌شناسی همانند اندازه از عوامل ناهمگونی مصالح طبیعی است که پیشگویی رفتارهای مصالح را پیچیده‌تر می‌کند (Hamdi et al., 2015). بنابراین در بررسی انواع عامل‌های بافتی مؤثر بر رفتارهای فیزیکی و شیمیایی مصالح کانی‌شناسی نیز در کنار سایر عوامل هندسی مورفولوژیکی باید مورد بررسی قرار گیرد. برای بررسی نقش ترکیب کانی‌شناسی روی اندازه هندسی بلورها، منحنی تغییرات اندازه میانگین و بیشینه بلورها به‌طور هم‌زمان با ستون‌های درصد نسبی کانی‌های مختلف در یک نمودار مشترک ترسیم شد (شکل ۱۰). روند یکسان خیز و نشست تغییرات نمودارهای خطی، ارتباط آشکار بین دو مؤلفه اندازه‌ای دانه (میانگین و بیشینه) را نشان می‌دهد. با وجود نبود ارتباطی معنادار بین محتوای (درصد) فازهای کانی‌شناسی اصلی به‌صورت مستقل با منحنی‌های تغییرات اندازه میانگین و بیشینه در نمودار اخیر (شکل ۱۰)، ارتباطی منطقی بین میانگین و بیشینه اندازه کل دانه‌ها با درصد نسبی مجموع فلدسپارها قابل درک است (شکل ۱۱-A و B) که احتمالاً به تبلور درشت‌بلورهای اغلب شکل‌دار فلدسپارها در سنگ‌های آذرین متبلور مربوط می‌شود.

در بررسی سایر روابط با اهمیت بین ویژگی‌های بافتی با کانی‌شناسی، همبستگی عوامل شکل‌سنجی مرتبط به مورفولوژی و زبری سطح دانه‌ها قابل توجه است. طبق این نتایج، با افزایش محتوای فلدسپار پتاسیم میزان چروکیدگی^۱ پلاژیوکلاز کاهش و دایرویت^۲ آنها افزایش می‌یابد (شکل ۱۲-A و B). برعکس، با افزایش مقدار نسبی (محتوای) پلاژیوکلاز، بلورهای پلاژیوکلاز چروکیده‌تر شده و دایرویت آنها کاهش می‌یابد (شکل ۱۳-A و B). برای توضیح این پدیده دو مسئله را باید در نظر گرفت: ۱- چروکیدگی یا زبری سطح فلدسپارها با شکل‌داری آنها ارتباط مستقیم دارد و ۲- افزایش

نسبی فلدسپارها با درشت‌شدن اندازه آنها اغلب هم‌زمان صورت می‌گیرد. بنابراین این احتمال وجود دارد که با افزایش محتوای آلکالی فلدسپارها و درشت‌تر شدن آنها، بخش‌هایی از مناطق تیز و گوشه‌های پلاژیوکلازهای اولیه دچار ذوب مجدد و خوردگی می‌شوند. بنابراین میزان چروکیدگی پلاژیوکلاز کاهش و دایرویت آنها افزایش می‌یابد. در نقطه مقابل وقتی محیط و زمان برای تشکیل و درشت‌تر شدن پلاژیوکلازها مناسب است، پلاژیوکلازها به‌صورت خودشکل و منظم رشد می‌کنند؛ لذا از شکل‌داری کافی برخوردار می‌شوند. به همین علت تحت این شرایط دایرویت آنها پایین و چروکیدگی آنها بالاست. طبق نتایج این پژوهش، بین محتوای آلکالی فلدسپار با پلاژیوکلاز سنگ‌های آذرین متبلور رابطه‌ای معکوس وجود دارد و با شروع و تشکیل آلکالی فلدسپارها مقدار نسبی پلاژیوکلازها آرام کم می‌شود (شکل ۱۴). این روند در بررسی نقشه کانی‌شناسی ارائه‌شده از نمونه‌ها (شکل ۶) نیز قابل تأیید است. نتایج ارتباطات معنادار بین عوامل هندسی و کانی‌شناسی این پژوهش در شرایطی حاصل شده است که سنگ‌های مورد استفاده این پژوهش از تنوع وسیع بافتی کانی‌شناسی برخوردارند؛ درحالی‌که در بررسی منابع، توافق اندکی در امکان برقراری ارتباط بین ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی وجود دارد و بسیاری از پژوهشگران اذعان دارند که در سنگ‌هایی با ساختار پیچیده و تغییرات گسترده بافتی کانی‌شناسی، امکان برقراری ارتباط بین متغیرهای بافتی و کانی‌شناسی مشکل است (Ehrlich and Weinberg, 1970; Lindqvist et al., 2007).

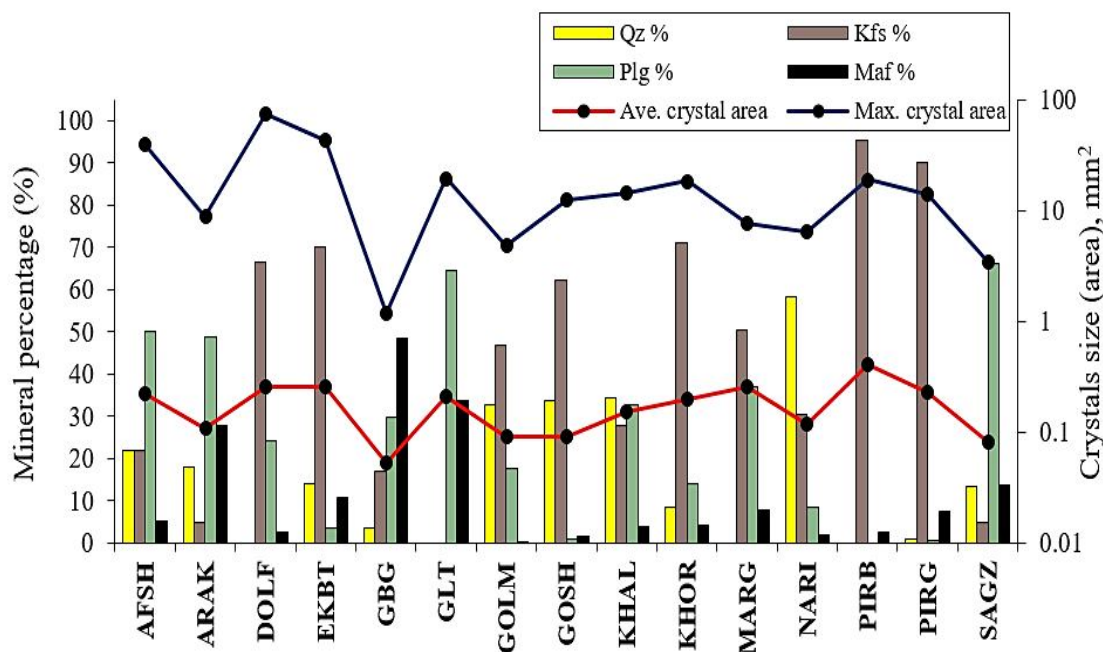
ارتباط داخلی بین ویژگی‌های بافتی مختلف

در جدول ۱۰، ارتباط متقابل بین انواع مؤلفه‌های بافتی با همدیگر در سطح تحلیل دانه‌ای خلاصه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، قوی‌ترین همبستگی‌ها مربوط به ارتباط بین مؤلفه‌های اندازه‌سنجی طول، محیط و مساحت است. در بیشتر بررسی‌های بافتی پتروگرافی، متغیر طول اولین و رایج‌ترین متغیر اندازه‌سنجی است که به‌دلیل سادگی و سهولت، بیش از سایر متغیرهای

1. Rugosity
2. Circularity

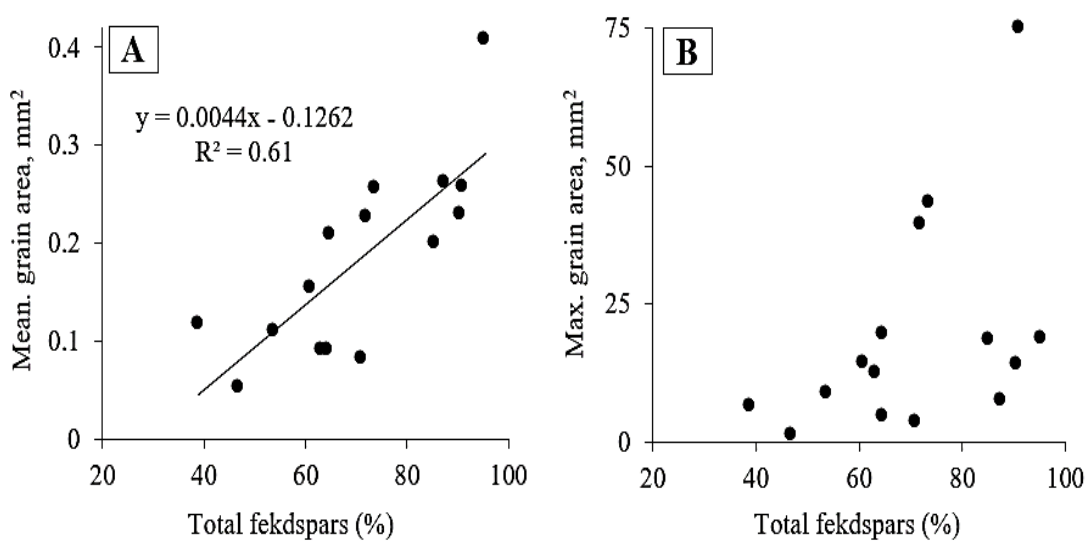
ویژگی‌های اندازه‌سنجی همچون مساحت و محیط به دلیل زمان‌بر بودن، کمتر مورد توجه بوده است.

اندازه‌سنجی مورد محاسبه و بررسی قرار گرفته است (Brace, 1961; Singh, 1988; Sun et al., 2017). اما بررسی سایر



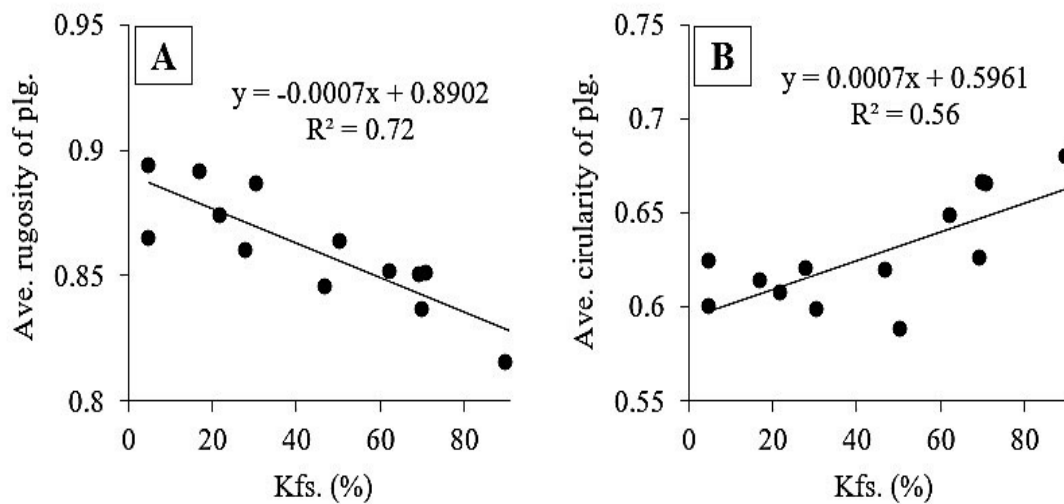
شکل ۱۰. تغییرات اندازه میانگین و بیشینه بلورها در ارتباط با درصد نسبی کانی‌های اصلی

Fig. 10. Variation of the mean and maximum crystals size in relation with the relative percentages of the main minerals



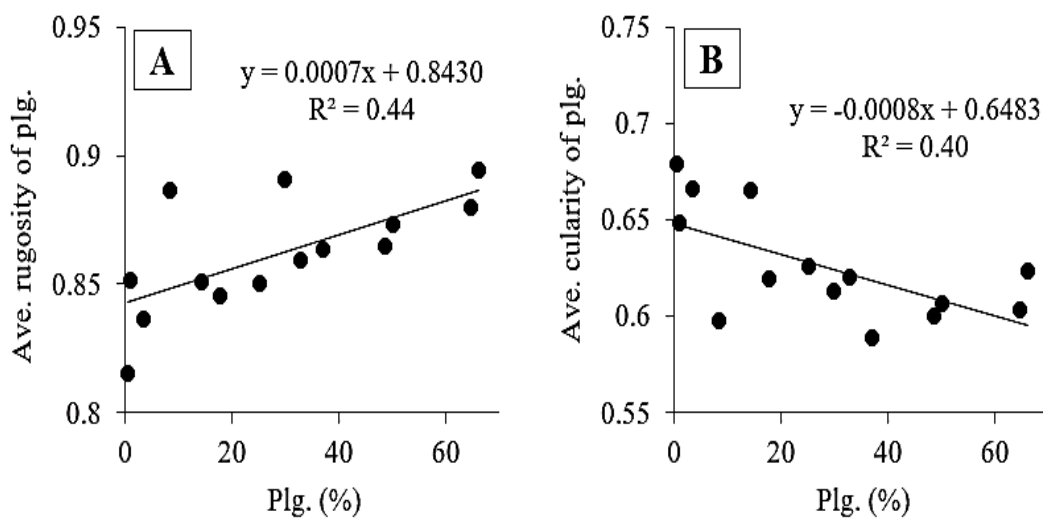
شکل ۱۱. ارتباط بین A: میانگین مساحت و B: بیشینه مساحت بلورها با درصد فلدسپارها

Fig. 11. Relationship between the A: mean area, and B: maximum area of the crystals with the percentages of feldspars



شکل ۱۲. ارتباط بین A: چروکیدگی و B: دایرویت پلاژیوکلازها با محتوای آلکالی‌فلدسپارها

Fig. 12. Relationship between the A: rugosity, and B: circularity of the plagioclases with the content of alkali-feldspars



شکل ۱۳. روند تغییرات A: چروکیدگی و B: دایرویت پلاژیوکلازها با افزایش محتوای آنها

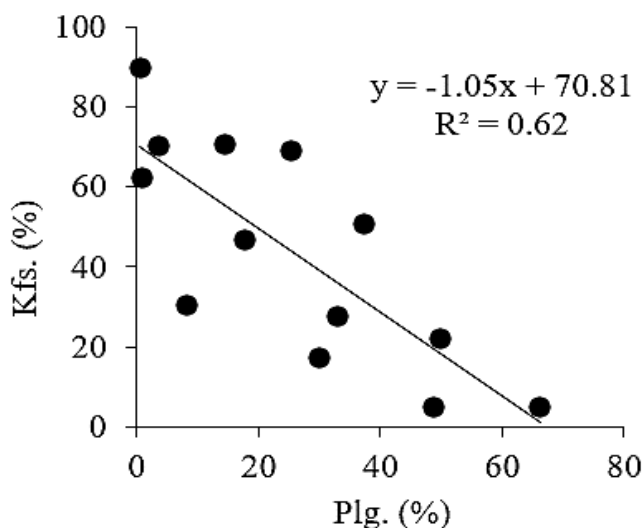
Fig. 13. The variation trend of the A: rugosity, and B: circularity of the plagioclases with increasing their content

دانه است. به همین علت است که دانه‌های با مساحت یکسان اما شکل متفاوت، می‌توانند محیط‌های متفاوتی داشته باشند. ارتباط قوی‌تر طول با محیط نسبت به مساحت از آنجا ناشی می‌شود که در سنگ‌های آذرین متبلور دانه‌های ریز اغلب هم‌بعد بوده و میزان کج و کولگی‌های سطح آنها کم است. با بهینه‌شدن

بررسی همبستگی متقابل مؤلفه‌های اندازه‌سنجی طول، محیط و مساحت نشان می‌دهد با وجود ارتباط قوی بین این سه مؤلفه در سنگ‌های آذرین متبلور، طول نسبت به مساحت، برآورد مناسبی برای محیط است (شکل ۱۵-A، B و C). درحالی‌که محیط از شکل دانه متأثر می‌شود؛ اما مساحت نمودی از اندازه و بزرگی

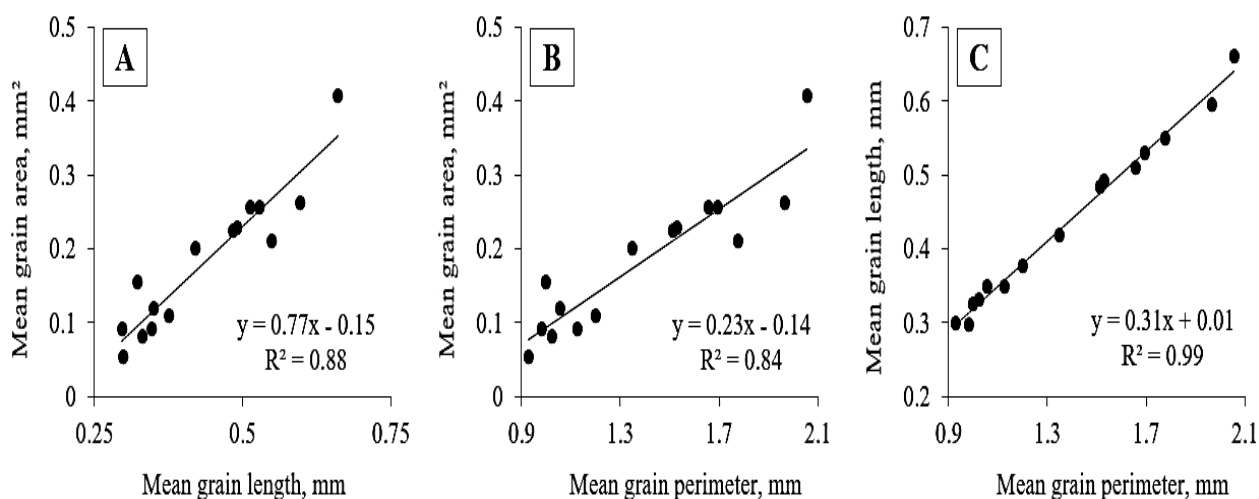
علاوه بر افزایش طول بلورها محیط آنها نیز با شدت بیشتری بزرگ می‌شود. از سوی دیگر، این امر هم‌زمان به افزایش طولیل شدگی و درهم‌قفلگی بین بلوری منجر می‌شود.

شرایط برای رشد بلورها و با امکان درشت‌تر شدن اندازه بلورها، نسبت ابعادی شکل بلورها به شکل اصلی بلورها^۱ که اغلب طولیل شده هستند، میل می‌کند؛ بنابراین با درشت‌تر شدن اندازه



شکل ۱۴. ارتباط بین محتوای آلکالی‌فلدسپار با پلاژیوکلاز در سنگ‌های مورد بررسی

Fig. 14. Relationship between the content of plagioclase and alkali-feldspar in the studied samples



شکل ۱۵. ارتباط بین مؤلفه‌های اندازه سنجی A: طول با مساحت، B: محیط با مساحت و C: محیط با طول در سنگ‌های مورد بررسی

Fig. 15. Relationship between the size-metric parameters of A: length with area, B: perimeter with area, and C: perimeter with length in the studied rocks

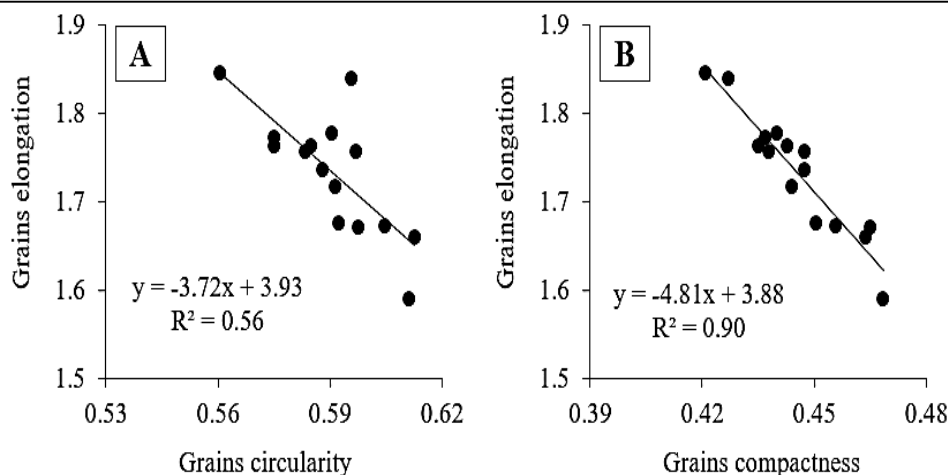
جدول ۱۰. همبستگی متقابل مؤلفه‌های بافتی مختلف با همدیگر

Table 10. Matrix correlations of the different textural parameters with each other

	L	A	P	Eln	C	Rec	Rnd	Rgh	Rug	CPc	TC	H.I	t	G
L	1													
A	0.94	1												
P	0.99	0.92	1											
Eln	0.18	0.35	0.15	1										
C	-0.24	-0.30	-0.22	-0.75	1									
Rec	0.27	0.23	0.31	-0.06	0.14	1								
Rnd	0.39	0.29	0.36	0.44	-0.29	0.11	1							
Rgh	0.44	0.36	0.49	0.06	-0.27	0.86	0.16	1						
Rug	0.37	0.14	0.42	-0.59	0.05	0.29	-0.12	0.54	1					
CPc	0.00	-0.17	0.03	-0.95	0.82	0.20	-0.31	0.03	0.60	1				
TC	0.16	0.24	0.17	0.88	-0.82	-0.12	0.32	0.12	-0.33	-0.86	1			
H.I	-0.60	-0.65	-0.59	-0.72	0.40	-0.20	-0.48	-0.24	0.24	0.50	-0.68	1		
t	0.04	-0.12	0.03	-0.41	0.20	0.10	0.34	0.15	0.46	0.42	-0.45	0.39	1	
G	0.45	0.43	0.47	0.57	-0.91	0.09	0.31	0.54	0.27	-0.59	0.71	-0.44	-0.08	1

را به‌عنوان طول‌شدگی مؤثر بر رفتارهای بافتی و مقاومتی سنگ‌ها در محاسبه ضریب بافتی به کار بردند. با مراجعه به نتایج میانگین کل متغیرهای بافتی (جدول ۳) ملاحظه می‌شود میانگین طول‌شدگی در مجموعه سنگ‌های مورد بررسی $1/73$ و تغییرات آن نسبت به متوسط داده‌ها جزئی است ($St.D=0.07$). با این حال، این سطح متوسط طول‌شدگی علاوه بر دایرویت و تراکم، با ضریب بافتی نیز ارتباط قابل توجهی نشان می‌دهد. این بدین معنی است که آستانه طول‌شدگی مؤثر بر رفتارهای بافتی در سنگ‌های آذرین متبلور پایین‌تر از نسبت ابعادی ۲ است و احتمالاً در آستانه طول‌شدگی کنترل‌کننده رفتارهای بافتی مصالح، لازم است تجدیدنظری صورت گیرد.

در میان همبستگی بین متغیرهای شکل‌سنجی گوناگون ارتباط منفی طول‌شدگی با دایرویت و تراکم قابل توجه است (شکل ۱۶). طول‌شدگی عاملی است که نسبت بعد بزرگ به بعد کوچک شکل را ارزیابی می‌کند. در این پژوهش طول‌شدگی از نسبت طول به عرض کوچک‌ترین مستطیل محاطی محاسبه شده است. این شیوه محاسبه، مفهوم طول‌شدگی را دقیق‌تر از نسبت طول به عرض فریت نشان می‌دهد. به‌طور منطقی با افزایش طول‌شدگی در مجموعه‌ای از کانی‌های متمرکز (نه پراکنده) میزان جهت‌وارگی^۱ افزایش یافته و ناهمسانی افزایش می‌یابد. هوراث و رولند (Howarth and Rowlands, 1987) در پژوهش خود نسبت ابعادی ۲ و بیشتر



شکل ۱۶. ارتباط طولیل شدگی با A: دایرویت و B: تراکم بلورها در سنگ‌های مورد بررسی

Fig. 16. Relationship between the elongation with the circularity A: and compactness B: of crystals in the studied rocks

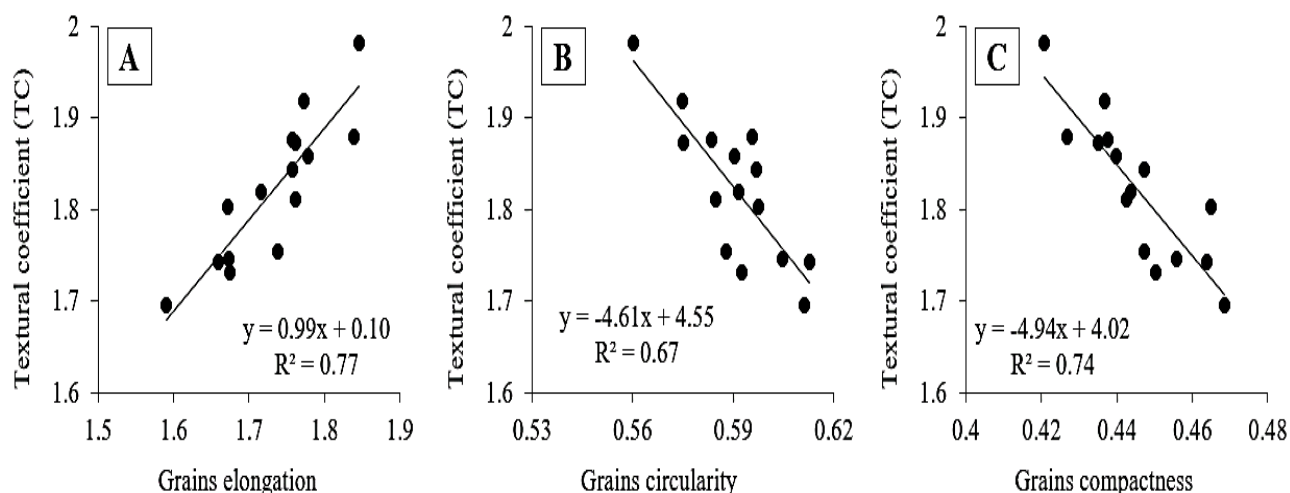
بافتی ممکن است در مورد سنگ‌های کم کوارتز پاسخ‌گو باشد اما در سنگ‌هایی با بافت غنی از کوارتز به دلیل پراکنده شدن دانه‌های بی‌شکل کوارتز در فضاها نامنظم بین سایر متشکله‌های اسکلتی، به دلیل اینکه در هم‌رشدی و درهم‌قفل‌ی دانه‌ها را پایین می‌آورد، چندان پاسخ‌گو نیست. محاسبات تفصیلی تعیین ضریب بافتی سنگ‌ها توسط هوراث و رولند (Howarth and Rowlands, 1987) تشریح شده است. در این پژوهش، ضریب بافتی حدود ۱۸۰۰۰ عدد کانی مورد بررسی تعیین شد و نقش آن در ارتباط با سایر مؤلفه‌های بافتی مورد بررسی قرار گرفت. بر طبق این نتایج ضریب بافتی با طولیل شدگی ارتباط تنگاتنگی نشان می‌دهد و در عمل انعکاس مستقیمی از طولیل شدگی است. به علاوه ضریب بافتی با دو ضریب دیگر دایرویت و تراکم نیز همبستگی بالایی نشان می‌دهد. (شکل ۱۷-A، B و C).

درهم‌قفل‌ی هم جزو عوامل با اهمیت در بررسی‌های بافتی به‌شمار می‌رود. درهم‌قفل‌ی عاملی است که اغلب برای بیان درجه درگیری و اصطکاک بین دانه‌ها در سنگ‌های متبلور (آذرین و مرمرها) برای ارزیابی هم‌رشدی بلورها به‌ویژه در کاربردهای مهندسی مطرح می‌شود. نخستین بار هوک (Hoek, 1965) از این واژه

از همبستگی‌های با اهمیت ارتباط داخلی بین مؤلفه‌های بافتی، همبستگی بین متغیرهای ارتباط‌دانه‌ای است. متغیرهای ارتباط‌دانه‌ای ارتباط بین دانه‌ها با یکدیگر و زمینه را با دخالت کلیه عوامل درگیر بین دانه‌ها ارزیابی می‌کنند. محاسبه و استخراج این مؤلفه‌های ارتباط‌دانه‌ای اغلب مشکل بوده و فرمول‌هایی که تاکنون در این زمینه ارائه شده‌اند، معمولاً ارزیابی دقیقی از بافت‌سنجی ارائه نمی‌کنند. شاید یکی از دلایل این موضوع این باشد که ارتباط بین دانه‌ها با ساختار سه‌بعدی مصالح در ارتباط است؛ در حالی که روابط موجود بر اساس تجسم تصویری^۱ بافت از مقاطع میکروسکوپی دوبعدی استخراج و ارائه شده‌اند. در بین انواع مؤلفه ارزیابی ارتباط بین دانه‌ها، ضریب بافتی رایج‌تر از بقیه است. این ضریب نخستین بار توسط هوراث و رولند (Howarth and Rowlands, 1987) برای پیشگویی ویژگی‌های بافتی در ارتباط با میزان خوردگی مته حفاری پیشنهاد شد؛ اما بعدها برای ارزیابی سایر ویژگی‌های بافتی از جمله استحکام سنگ‌ها نیز به کار گرفته شد. البته اهمیت این ضریب به‌عنوان شاخصی کاربردی برای ارزیابی بافتی سنگ‌ها توسط برخی پژوهشگران مورد تردید است. طبق پژوهش طغرل و ظریف (Tuğrul and Zarif, 1999)، ضریب

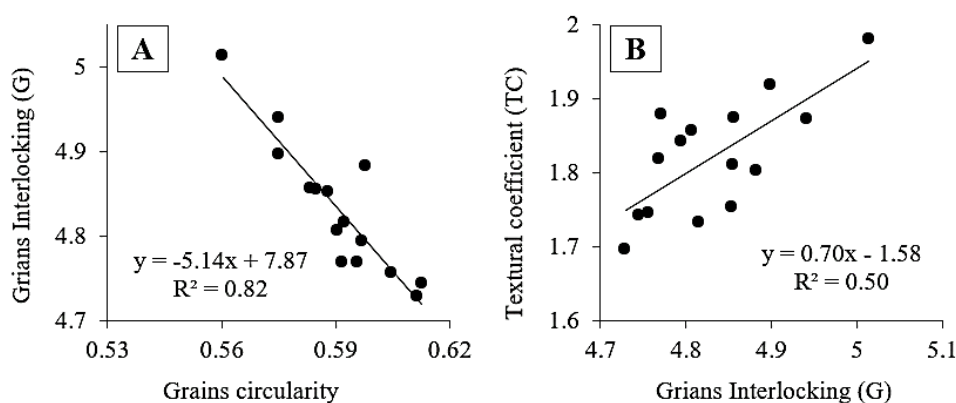
نقش خود را نشان می‌دهد. بر طبق جدول نتایج همبستگی داخلی بین مؤلفه‌های بافتی درهم‌قفل‌ی تنگاتنگ؛ اما معکوس با دایرویت نشان می‌دهد و با ضریب بافتی ارتباطی ضعیف؛ اما مستقیم نشان می‌دهد (شکل ۱۸-A و B).

برای توجیه علت استحکام بالای سنگ‌های گرانیتی استفاده کرد. به نظر هوراث و رولند (Howarth and Rowlands, 1987)، در گرانیت‌ها اهمیت درهم‌قفل‌ی دانه‌های کوارتز خیلی مهم‌تر از محتوای کوارتز است. طبق نظر یلماز و همکاران (Yılmaz et al., 2013) درهم‌قفل‌ی بیش از هر چیز در جریان استحکام فشاری



شکل ۱۷. ارتباط بین A: طول‌شدگی، B: دایرویت و C: تراکم بلورها با ضریب بافتی

Fig. 17. Relationship between the A: elongation, B: circularity, and C: compactness of the grains with the Texture Coefficient (TC)



شکل ۱۸. ارتباط بین A: دایرویت و B: ضریب بافتی با درهم‌قفل‌ی بین‌دانه‌ای

Fig. 18. Relationship between the A: circularity and B: Texture Coefficient with the intergranular interlocking

شده است. درریبر (Dreyer, 1973) نسبت ساده میانگین به واریانس را برای کمیته‌سازی یکنواختی اندازه (مساحت) دانه (t)

در این پژوهش، از هر دو ضریب یکنواختی اندازه دانه و شاخص ناهمگونی برای بررسی میزان ناهمگونی بلورها استفاده

در ترسیم نمودار به‌جای قطر واقعی از قطر معادل مساحت (Petruk, 1986) طبق ضریب تبدیل فرمول ۳ استفاده شده است.

چنان‌که نمودار بالا مشاهده می‌شود، با وجود دامنه گسترده اندازه (۱۰ تا ۱۰۰۰۰ میکرون)، تراکمی شدید در بخش ریزدانه به‌ویژه در کوچک‌تر از ۱۰۰۰ میکرون (یک میلی‌متر) توزیع اندازه قطر مشاهده می‌شود (شیب نزدیک به قائم منحنی‌ها). حاکمیت روند یادشده در تمام سنگ‌های مورد بررسی اهمیت تراکم تعدد دانه‌ریز در ساختار سنگ‌های آذرین متبلور را آشکار می‌کند.

(۳)

$$E.D = \sqrt{4A/\pi}$$

برای بررسی رفتار کانی‌های مختلف در روند توزیع اندازه، نمودارهای ستونی فراوانی تعداد کانی‌های مختلف در گروه‌های اندازه‌ای مختلف استخراج و ترسیم شده است (شکل ۲۰). با توجه به دامنه گسترده توزیع اندازه، دسته‌بندی^۲ حسابی یا لگاریتمی معمولی برای ترسیم نمودارهای بالا چندان رضایت‌بخش نبوده و به ادغام و استتار برخی اندازه‌ها منجر می‌شد. بدین منظور برای دسته‌بندی اندازه (مساحت) نمودارهای ستونی فراوانی (محور افقی) از مربع مقیاس سای (Ψ²) با ضریب هم‌ارزی فرمول ۴ استفاده شده است:

(۴)

$$\psi^2 = \text{Log}_2 A_{(mm^2)}$$

با افزایش تعداد گروه‌ها در نمودارهای توزیع فراوانی، چگالی توزیع اندازه به‌نحو مطلوب‌تری آشکار می‌شود. بر این اساس، با مرور کلی نمودارهای شکل ۲۰، یک روند توزیع شبه‌نرمال با چولگی^۳ مثبت (تراکم ریزدانه) در غالب نمودارهای بالا به چشم می‌آید.

استفاده کرد (جدول ۲)؛ در حالی که پنگ و همکاران (Peng et al., 2017) در محاسبه ناهمگونی علاوه‌بر اندازه، از درصد حجمی کانی‌های اصلی طبق فرمول ۱ استفاده کرد:

(۱)

$$HI = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{r_i}{R_a} - 1 \right)^2}$$

که در آن R_a متوسط اندازه کل دانه‌ها و r_i میانگین اندازه هر یک از چهار کانی اصلی کوارتز، آلکالی‌فلدسپار، پلاژیوکلاز و بیوتیت و HI شاخص ناهمگونی کل است. متوسط اندازه کل دانه‌ها نیز از حاصل ضرب میانگین اندازه هر کانی (r_i) در ارزش حجمی (ω_i) آن کانی به شرح فرمول ۲ تعیین می‌شود:

(۲)

$$R_a = \sum_{i=1}^m \omega_i . r_i$$

طبق نتایج جدول ۹، شاخص ناهمگونی ارتباط معکوس معناداری با طولیل‌شدگی نشان می‌دهد که از نظر منطقی قابل قبول نیست؛ چون با افزایش طولیل‌شدگی ناهمگونی افزایش می‌یابد. دلیل این امر می‌تواند ناشی از این موضوع باشد که طولیل‌شدگی از کل بلورهای تشکیل‌دهنده محاسبه شده است؛ در حالی که شاخص ناهمگونی فقط از روی محاسبات کانی‌های اصلی (کوارتز و فلدسپارها) تعیین می‌شود و کانی‌های مافیک به‌ویژه بیوتیت که اغلب طولیل‌شدگی بالا و مؤثر در بافت سنگ دارند، در محاسبه شاخص ناهمگونی استفاده نشده‌اند. این تناقض به روشنی نقش کانی‌های مافیک در بالارفتن طولیل‌شدگی کلی سنگ‌ها را آشکار می‌کند.

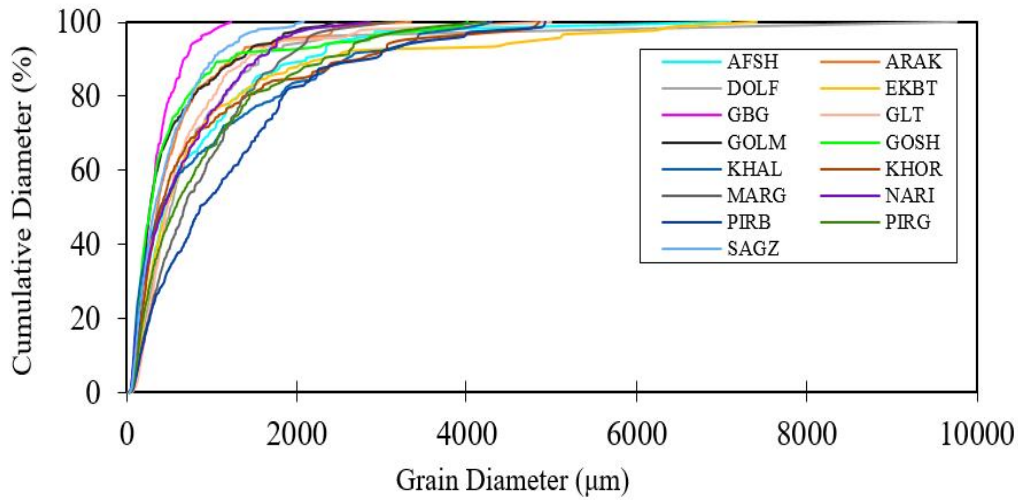
توزیع اندازه و نوع کانی‌ها

نمودار شکل ۱۹، توزیع فراوانی تجمعی^۱ قطر متوسط بلورهای تشکیل‌دهنده در سنگ‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. با توجه به مبنای اندازه‌گیری‌های بافتی میکروسکوپی به مساحت،

1. Cumulative frequency distribution

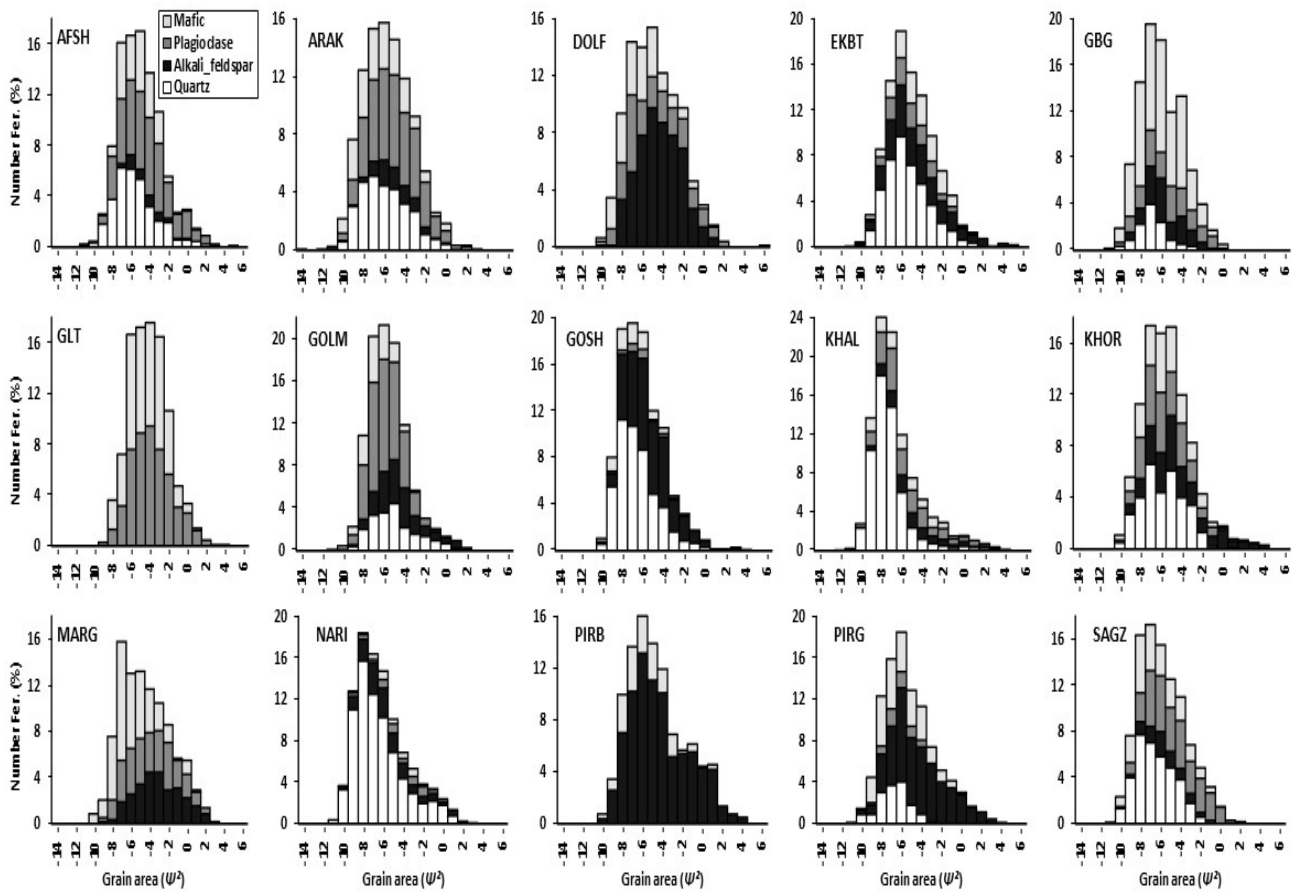
2. Bins

3. Skewness



شکل ۱۹. توزیع فراوانی تجمعی قطر متوسط بلورهای تشکیل دهنده سنگ‌های مورد بررسی

Fig. 19. Cumulative frequency distribution of the crystals mean diameter of the studied rocks



شکل ۲۰. توزیع فراوانی تعداد کانی‌های اصلی در خوشه‌های اندازه‌های گوناگون

Fig. 20. Number frequency distribution of the main minerals in the various size (area) bins

نمی‌کند و فراوانی توزیع تعداد بلورها چوله به راست (تراکم ریزدانه) است. در نقطه مقابل روند توزیع حجمی اندازه (مساحت) سنگ‌های مورد بررسی از توزیع‌هایی با فراوانی درشت‌دانه همچون توزیع پرت^۴ پیروی می‌کنند.

میانگین موزون اندازه

میانگین اندازه دانه بیشتر از آنکه به‌عنوان یک عامل توصیفی برای بیان ویژگی‌های آماری اندازه به کار رود، به‌عنوان شاخصی برای تحلیل‌های بافتی و کیفی مصالح و سنگ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. روند نامتقارن توزیع تعداد و محتوای اندازه دانه در سنگ‌های مورد بررسی نشان‌داد که محاسبه میانگین اندازه دانه به‌روش میانگین حسابی که بیشترین اعتبار آن در داده‌هایی با توزیع نرمال مورد تأیید است، نمی‌تواند از دقت و اعتبار کافی برای اندازه‌سنجی بافتی سنگ‌های آذرین متبلور برخوردار باشد. به عبارت ساده‌تر، در محاسبه میانگین اندازه دانه به‌روش حسابی چون تعداد بلورهای ریزدانه بسیار فراوان‌تر از درشت‌دانه است، میانگین محاسبه‌شده به‌سمت ریزدانه متمایل می‌شود؛ حال آنکه ویژگی‌های بافتی و کیفی سنگ به‌دلیل حاکمیت محتوای دانه‌درشت در کنترل اجزای متوسط و درشت‌دانه است. به عقیده اوانس و نیپرمان (Evans and Napier-Munn, 2013) روش‌های رایج تعیین اندازه میانگین دانه مصالح سنگی اغلب با خطاهای اجتناب‌ناپذیر زیادی همراه است. وی همچنین نشان‌داد میزان این خطا در مصالح دانه درشت که از ضریب تغییرات اندازه بالایی برخوردارند، بیش از مصالح دانه‌ریز است. طبق نظر نلساند و جنسن (Nålsund and Jensen, 2013) اهمیت دانه‌هایی با اندازه‌های متفاوت در محاسبه میانگین یکسان نیست. بنابراین در محاسبه میانگین اندازه دانه‌ها یک تفاوت برای دانه‌های خیلی درشت لازم است؛ زیرا دانه‌های درشت مرز دانه بزرگ‌تری ایجاد می‌کنند و بنابراین در محاسبه میانگین باید وزن بیشتری به آنها داد. یک شیوه ساده برای کاهش خطای ناشی از توزیع نامتقارن محتوای اندازه در محاسبه میانگین اندازه دانه

با بررسی دقیق‌تر روی توزیع تعداد کانی‌های مختلف این نمودارها (رنگ‌های متفاوت نمودارهای ستونی) چنین برمی‌آید که ظاهراً تراکم توزیع ریزدانه در مورد کانی کوارتز عمومیت داشته و در تمام نمونه‌های کوارتزار چولگی مثبت بارزتر از بقیه نمونه‌هاست. در شکل ۲۱، توزیع فراوانی موزون (سهام نسبی) اندازه (مساحت) بلورها (به تفکیک کانی‌های اصلی) در همان دسته‌بندی اندازه‌های شکل ۲۰ مشاهده می‌شود. با دقت و مقایسه این نمودار با نمودار شکل ۲۰ استنباط می‌شود که سهم نسبی توزیع اندازه کاملاً متضاد با سهم نسبی توزیع تعداد است! در نمودارهای توزیع موزون اندازه (مساحت) چولگی منفی (تراکم دانه‌درشت) شدیدی حاکم است! وقتی بررسی‌های بالا را به کانی‌های مختلف تعمیم می‌دهیم، مشخص می‌شود که تراکم موزون دانه‌درشت نه تنها در کوارتز بلکه تقریباً در سایر کانی‌های اصلی هم وجود دارد. عمومیت یافتن این چولگی منفی سهم درشت‌بلورها در توزیع موزون جرمی و حجمی بلورهای سنگ‌های آذرین متبلور را آشکار می‌کند. به عبارت بهتر، با وجود اینکه بلورهای درشت از نظر تعداد بسیار کمتر از بلورهای ریز هستند؛ ولی همین تعداد کم بیشترین حجم سنگ را به‌خود اختصاص می‌دهند. در مقابل با اینکه تعداد بلورهای ریز خیلی فراوان است، تنها حجم محدودی از سنگ را به‌خود اختصاص می‌دهند.

بررسی نیکویی برازش توزیع فراوانی تعداد مؤلفه‌های مساحت و محیط با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف^۱ (Davis and Sampson, 1986) نشان می‌دهد که روند توزیع تعداد این نوع داده‌های اندازه‌ای نرمال نبوده و از توزیع‌های با تراکم فراوانی ریز دانه پیروی می‌کنند. (جدول ۱۱). این نتایج در توافق با نظر دوارت و همکاران (Duarte et al., 2005) است که توزیع اندازه (طول) در سنگ‌های آذرین را با توزیع ویبل^۲ سازگار می‌داند. به عقیده ورنون (Vernon, 2004)، هرچند اندازه بلورها در حین تبلور از مذاب توسط نسبت نرخ هسته‌بندی^۳ (n) و نرخ رشد (g) کنترل می‌شود؛ اما نرخ رشد نسبت به دما از تابع نرمال پیروی

1. Kolmogorov-Smirnov test

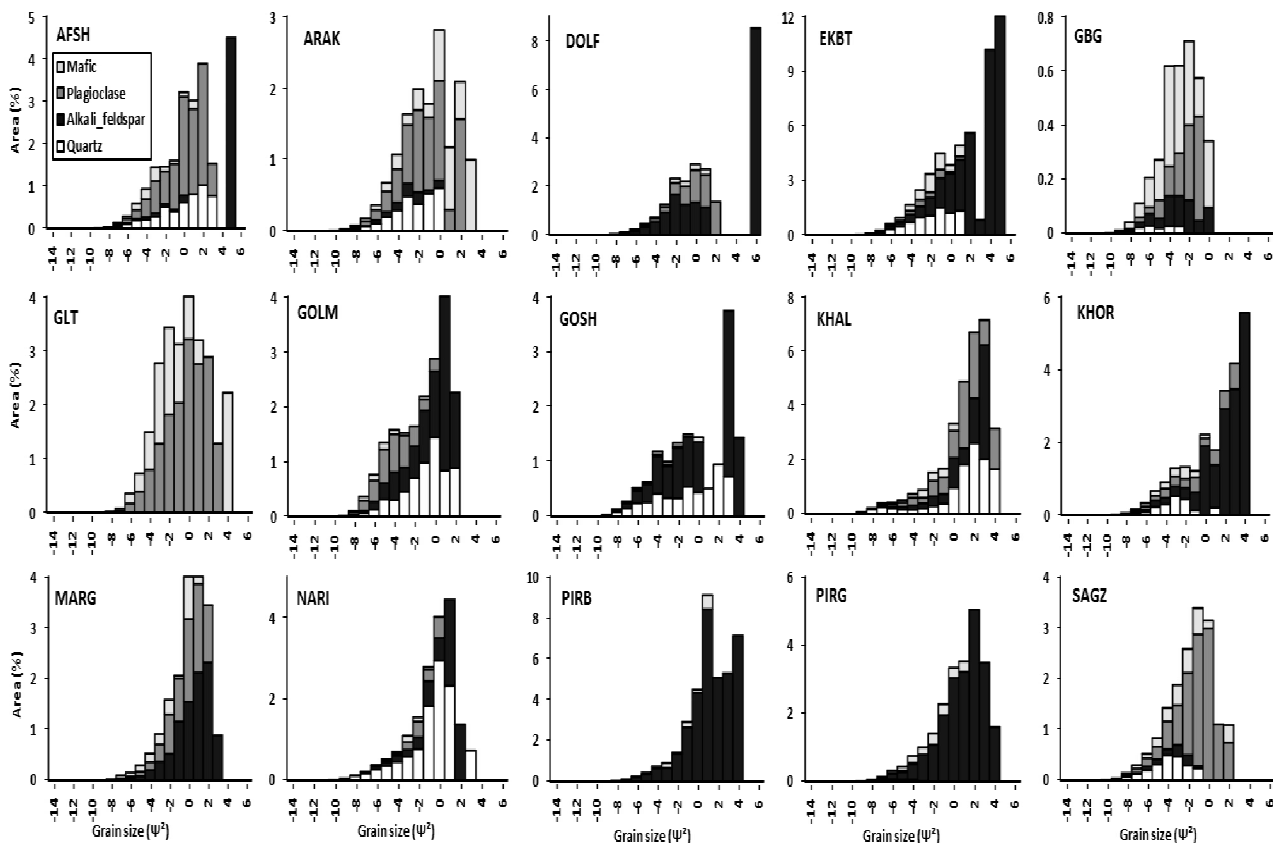
2. Weibull

3. Nucleation rate

4. Pert Beta Distribution

فرمول ۳ از مقادیر مساحت برآورد شده است. در بررسی‌های پتروگرافی، اندازه دانه‌ها از نرخ نسبی توزیع مساحت در مقاطع میکروسکوپی تعیین می‌شود؛ بنابراین میانگین موزون مورد استفاده برای تحلیل‌های پتروگرافی حتی اگر اندازه‌ها به قطر هم تبدیل شده باشند مبتنی بر نرخ نسبی مساحت است و لذا قطر میانگین مورد استخراج از این منحنی‌ها، قطر میانگین مساحت-موزون^۳ خواهد بود. چنان‌که نمودار نشان می‌دهد روند توزیع اندازه قطر بلور سنگ‌های آذرین متبلور در مقیاس لگاریتمی روندی تدریجی دارد؛ هرچند شیب این توزیع برای سنگ‌های مختلف اندکی متفاوت است.

سنگ‌های متبلور، استفاده از میانگین موزون^۱ اندازه دانه است. میانگین موزون اندازه به‌طور گسترده‌ای برای تعیین اندازه دانه‌های منفصل در رسوب‌شناسی و مهندسی عمران به کار گرفته می‌شود. در این شیوه پس از ترسیم منحنی توزیع درصد تجمعی اندازه دانه، میانگین (D_{50}) یا اندازه موزون مربوط به هر سهم توزیع به راحتی از نمودارهای بالا استخراج می‌شود (شکل ۲۲). به علاوه از روی شکل و شیب (D_{60}/D_{10}) منحنی می‌توان روند توزیع اندازه‌های مختلف دانه‌ها را به سرعت مشاهده کرد. در شکل ۲۲ منحنی‌های توزیع تجمعی^۲ قطر بلورهای تشکیل سنگ‌های مورد بررسی به صورت متحد در یک نمودار آمده است. داده‌های قطر مورد استفاده برای ترسیم این نمودار توسط



شکل ۲۱. توزیع فراوانی مساحت-موزون کانی‌های اصلی در خوشه‌های اندازه‌ای گوناگون

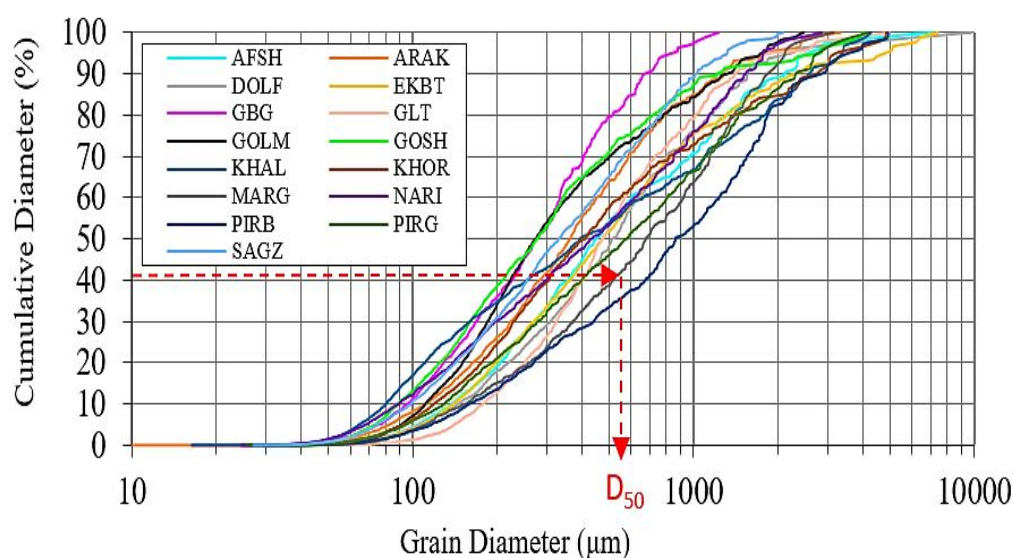
Fig. 21. The area-weighted frequency distribution of the main minerals in the various size (area) bins

1. Weighted mean
2. Cumulative distribution
3. Area-weighted mean diameter

جدول ۱۱. بهترین مدل‌های برازش توزیع داده‌های اندازه (مساحت و محیط) بر مبنای آزمون (K-S)

Table 11. Best fit models of size (area and perimeter) data distribution based on the (K-S) test

Sample	Area Dist. Pattern	Length Dist. Pattern
AFSH	Phased Bi-Exponential	Wakeby
ARAK	Gen. Pareto	Inv. Gaussian (3P)
DOLF	Gen. Logistic	Inv. Gaussian (3P)
EKBT	Phased Bi-Exponential	Wakeby
GLT	Frechet	Wakeby
GOLM	Phased Bi-Exponential	Gen. Logistic
GOSH	Gen. Extreme Value	Wakeby
GBG	Dagum	Wakeby
KHAL	Wakeby	Burr
KHOR	Gen. Extreme Value	Log-Pearson 3D
MARG	Pareto (2Kind)	Dagum
NARI	Gen. Logistic	Dagum (4P)
PIRB	Dagum	Dagum (4P)
PIRG	Phased Bi-Exponential	Dagum
SAGZ	Wakeby	Pearson Type 5

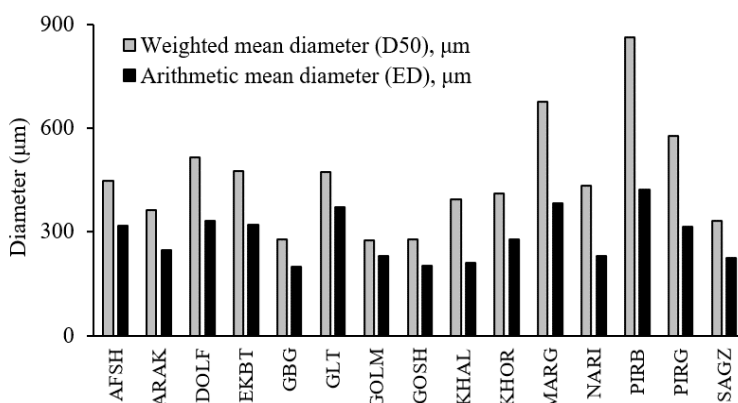


شکل ۲۲. نمودار توزیع تجمعی قطر دانه‌ها (بلورها) و شیوه استخراج قطر میانگین مساحت-موزون (D_{50})

Fig. 22. Graph of cumulative distribution of the grains (crystals) diameters and the extraction of area-weighted mean diameter (D_{50})

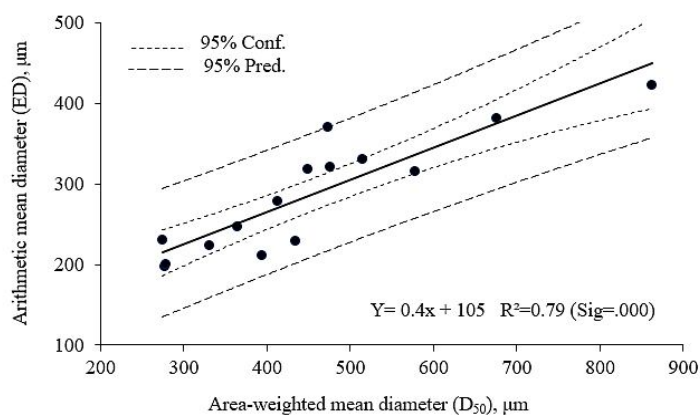
تعیین شد. این نمودار و معادله حاکم نشان می‌دهد که برآورد پایین‌تر میانگین اندازه دانه به روش حسابی جدی‌تر از آن است که مورد چشم‌پوشی قرار گیرد. بنابراین با جایگزینی شیوه میانگین موزون به جای شیوه سنتی میانگین حسابی دقت برآورد میانگین اندازه دانه در مصالح متبلور با توزیع گسترده و نامتعادل اندازه احتمالاً تا حد زیادی بهبود خواهد یافت. بدیهی است عمومیت یافتن استفاده از میانگین موزون به عنوان شیوه‌ای با دقت و کارآمدی بیشتر، نیازمند پژوهش‌های بیشتر پژوهشگران در این زمینه است.

در شکل ۲۳، میانگین موزون قطر^۱ (D_{50}) استخراج شده از نمودارهای توزیع تجمعی در مجاورت میانگین حسابی قطر معادل^۲ (ED) سنگ‌های مورد بررسی در نمودار ستونی ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود در تمام نمونه‌ها برآورد میانگین حسابی کمتر از میانگین موزون است. این نمودار به سادگی برآورد کمتر از واقع میانگین به روش حسابی برای تعیین قطر متوسط سنگ‌های آذرین متبلور را آشکار می‌سازد. با توجه به روند یکنواخت تغییرات میانگین موزون و حسابی قطر، در نمودار شکل ۲۴ ضمن ترسیم پراکنش معادل دو دسته داده نسبت به هم، معادله ارتباط خطی بین میانگین موزون و حسابی



شکل ۲۳. نمودار ستونی مقایسه تغییرات میانگین موزون (D_{50}) و میانگین حسابی (ED) قطر در سنگ‌های مورد بررسی

Fig. 23. Bar graph of the comparison of the weighted mean (D_{50}) and the arithmetic mean (ED) diameter in the studied rocks.



شکل ۲۴. ارتباط بین قطر میانگین موزون (D_{50}) و قطر میانگین حسابی (ED) در سنگ‌های مورد بررسی

Fig. 24. Relationship between the weighted mean diameter (D_{50}) and arithmetic mean diameter (ED) in the studied rocks.

1. Weighted mean diameter
2. Arithmetic mean diameter

نتیجه‌گیری

ویژگی‌های هندسی بافتی ۱۵ نوع سنگ آذرین متبلور با تنوع گسترده بافتی-کانی‌شناسی به‌روش آنالیز تصویر مقاطع میکروسکوپی کمینه‌سازی و بانک داده بزرگی از مشخصات بافتی-کانی‌شناسی حدود ۱۸۰۰۰ کانی مختلف تهیه شد. میانگین آماری اقسام مختلفی از مؤلفه‌های بافتی شامل مؤلفه‌های اندازه‌سنجی (طول، مساحت و محیط)، شکل‌سنجی (طول‌شدگی، دایرویت، گردیت، زبری سطح، چروکیدگی سطح، مستطیل‌گونی و تراکم) و ارتباط بین‌دانه‌ای (یکنواختی اندازه، شاخص ناهمگونی، درهم‌قفل‌ی و ضریب‌بافتی) در دو سطح تحلیل دانه‌ای و فازی (برای فازهای کانی‌شناسی کوارتز، آلکالی‌فلدسپار، پلاژیوکلاز و کانی‌های مافیک) توسط بانک داده‌های بافتی محاسبه شد. هم‌زمان نقشه توزیع کانی‌شناسی با مصورسازی داده‌های هندسی رقمی شده توسط GIS برای تکمیل بررسی‌های پتروگرافیکی ایجاد شد. آنگاه ارتباط بین انواع مؤلفه‌های بافتی با ویژگی‌های کانی‌شناسی و شیمی بلورها و نیز ارتباط بینایی مؤلفه‌های بافتی با تحلیل‌های رگرسیونی خطی مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج پژوهش مشخص شد اندازه، مهم‌ترین عامل بافتی در سنگ‌های متبلور است که با

کانی‌شناسی و ویژگی‌های شیمیایی بلورها ارتباط قابل‌توجهی نشان می‌دهد. همچنین بررسی‌های توزیع آماری اندازه بلورها نشان‌داد فراوانی توزیع اندازه از نظر آماری نامتقارن و غیرنرمال بوده و در تمام نمونه‌ها چولگی توزیع فراوانی (تعداد) مثبت است؛ اما چولگی توزیع مساحت-موزون اندازه به شدت منفی است. بنابراین تعیین میانگین به‌روش حسابی نمی‌تواند ارزیابی صحیحی از معدل آماری اندازه باشد و میانگین حسابی محاسبه‌شده با خطای تمایل به ریزدانه همراه می‌شود؛ درحالی‌که ویژگی‌های بافتی و کیفی سنگ تحت کنترل محتوای دانه‌درشت و دانه‌متوسط است. برای تعدیل این خطا تعیین میانگین مساحت-موزون اندازه (قطر) استخراج‌شده از منحنی‌های توزیع تجمعی اندازه برای تعیین معدل آماری اندازه در سنگ‌هایی با تنوع گسترده اندازه دانه پیشنهاد شد. همچنین در بررسی ارتباط داخلی بین انواع مؤلفه‌های بافتی نشان‌داد طول‌شدگی (نسبت ابعادی) با ویژگی‌های شکلی و ارتباط بین‌دانه‌ای همبستگی قابل‌توجهی دارد و با توجه به سادگی و سرعت محاسبه آن احتمالاً جایگزینی مناسب برای ضریب بافتی رایجی باشد که با محاسبات بسیار پیچیده و وقت‌گیر تعیین می‌شود.

References

- Arya, L.M., Leij, F.J., Shouse, P.J. and van Genuchten, M.T., 1999. Relationship between the hydraulic conductivity function and the particle-size distribution. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5): 1063–1070.
- Ayati, F. and Mahdevari, S., 2010. Comparison of chemistry of igneous and hydrothermal biotite in igneous rocks of Sakht-Hesar Mountain. *Journal of Economic Geology*, 1(1): 117–134. (in Persian with English abstract)
- Bentz, D.P., Garboczi, E.J., Haecker, C.J. and Jensen, O.M., 1999. Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 29(10): 1663–1671.
- Brace, W.F., 1961. Dependence of fracture strength of rocks on grain size. 4th Symposium on Rock Mechanics, Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA.
- Bryon, D.N., 1995. The Interpretation of Granitic Textures from Serial Thin Sectioning, Image Analysis and Three-Dimensional Reconstruction. *Mineralogical Magazine*, 59(395): 203–211.
- Cashman, K.V. and Marsh, B.D., 1988. Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization II: Makaopuhi Lava Lake. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99(3): 292–305.
- Cole, J.P., 1964. Study of major and minor civil divisions in political geography. 20th

- International Geographical Congress, Sheffield, UK.
- Cox, E.P., 1927. A method of assigning numerical and percentage values to the degree of roundness of sand grains. *Journal of Paleontology*, 1(3): 179–183.
- Cox, M.R. and Budhu, M., 2008. A practical approach to grain shape quantification. *Engineering Geology*, 96(1–2): 1–16.
- Davis, J.C. and Sampson, R.J., 1986. *Statistics and data analysis in geology*, John Wiley & Sons, Ltd, New York, 656 pp.
- DeVasto, M.A., Czeck, D.M. and Bhattacharyya, P., 2012. Using image analysis and ArcGIS® to improve automatic grain boundary detection and quantify geological images. *Computers & Geosciences*, 49: 38–45.
- Diepenbroek, M., Bartholomä, A., and Ibbeken, H., 1992. How round is round? A new approach to the topic “roundness” by Fourier grain shape analysis. *Sedimentology*, 39(3): 11–422.
- Dreyer, W., 1973. *The Science of Rock Mechanics. Part I. The strength properties of rocks*, Series on rock and soil mechanics. Trans Tech Publications, Ohio, USA, 501 pp.
- Duarte, M.T., Liu, H., Kou, S.Q., Lindqvist, P.A. and Miskovsky, K., 2005. Microstructural Modeling Approach Applied to Rock Material. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 14(1): 104–111.
- Dunlop, G., Bettles, C.J., Griffiths, J.R., Venkatesan, K., Zheng, L. and Qian, M., 2003. The Effect of Grain Size on the Mechanical Properties of AM-SC1. 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications, Shenyang, China.
- Ehrlich, R. and Weinberg, B., 1970. An exact method for characterization of grain shape. *Journal of Sedimentary Petrology*, 40(1): 205–212.
- Evans, C.L. and Napier-Munn, T.J., 2013. Estimating error in measurements of mineral grain size distribution. *Minerals Engineering*, 52: 198–203.
- Fazeli, B., Khalili, M., Beavers, R., Mansouri-Esfahani, M. and Loghmani-Dastjerdi, Z., 2017. Petrology of Oligocene Ghaleh Yaghmesh granitoids in the west of Yazd province. *Journal of Economic Geology*, 8(2): 473–491. (in Persian with English abstract)
- Feniak, M.W., 1944. Grain sizes and shapes of various minerals in igneous rocks. *American Mineralogist*, 29(11–12): 415–421.
- Feret, L.R., 1931. *La Grosseur Des Grains Des Matières Pulvérulentes (The Size of Powdery Material Grains)*. International Association of Assay Materials Conferenc, Zurich, Switzerland.
- Fueten, F., 1997. A computer-controlled rotating polarizer stage for the petrographic microscope. *Computers & Geosciences*, 23(2):203–208.
- Gokceoglu, C., Yesiloglu-Gultekin, N., Keceli, A.S., Sezer, E.A., Can, A.B. and Bayhan, H., 2012. An Experimental Study on the Min-Image Production for Determination of Mineral Percentages. EGU General Assembly Conference, Vienna, Austria.
- Goodchild, I. and Fueten, F., 1998. Edge detection in petrographic images using the rotating polarizer stage. *Computers & Geosciences*, 24(8): 745–751.
- Gurkan Ozgurel, H. and Vipulanandan, C., 2005. Effect of Grain Size and Distribution on Permeability and Mechanical Behavior of Acrylamide Grouted Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12): 1457–1465.
- Hamdi, P., Stead, D. and Elmo, D., 2015. Characterizing the influence of stress-induced microcracks on the laboratory strength and fracture development in brittle rocks using a finite-discrete element method-micro discrete fracture network FDEM- μ DFN approach. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(6): 609–625.
- Heilbronner, R., 2000. Automatic grain boundary detection and grain size analysis using polarization micrographs or orientation images. *Journal of Structural Geology*, 22(7): 969–981.
- Higgins, M.D., 2006. *Quantitative textural measurements in igneous and metamorphic petrology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 276 pp.
- Hoek, E., 1965. *Rock Fracture under Static Stress Conditions*. Ph.D. Thesis, University of Cape Town, Cape Town, South Africa, 270 pp.
- Howarth, D.F. and Rowlands, J.C., 1987. Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength

- properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20(1): 57–85.
- Hussain, M., Minhas, N.R., Saad, B. and Nair, A., 2017. Rock Texture Characterization from Automated Petrographic Analysis. SPE Middle East Oil & Gas Conference, Society of Petroleum Engineers, Manama, Bahrain.
- Jensen, L.R.D., Friis, H., Fundal, E., Moller, P. and Jespersen, M., 2010. Analysis of limestone micromechanical properties by optical microscopy. *Engineering Geology*, 110(3–4): 43–50.
- Kecec, B., Unal, M. and Sensogut, C., 2006. Effect of the textural properties of rocks on their crushing and grinding features. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, 13(5): 385–392.
- Knight, P.D., Klassen, R.A. and Hunt, P., 2002. Mineralogy of fine-grained sediment by energy-dispersive spectrometry (EDS) image analysis—a methodology. *Environmental Geology*, 42(1): 32–40.
- Lan, H., Martin, C.D. and Hu, B., 2010. Effect of heterogeneity of brittle rock on micromechanical extensile behavior during compression loading. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B1): 1–14
- Lindqvist, J.E., Åkesson, U. and Malaga, K., 2007. Microstructure and functional properties of rock materials. *Materials Characterization*, 58(11-12): 1183–1188.
- Locat, J., Lefebvre, G. and Ballivy, G., 1984. Mineralogy, chemistry, and physical properties interrelationships of some sensitive clays from Eastern Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 21(3): 530–540.
- Mermillod-Blondin, R., Benzaazoua, M., Kongolo, M., de Donato, P., Bussière, B. and Marion, P., 2011. Development and Calibration of a Quantitative, Automated Mineralogical Assessment Method Based on SEM-EDS and Image Analysis: Application for Fine Tailings. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10(12): 1111–1130.
- Nålsund, R. and Jensen, V., 2013. Influence of mineral grain size, grain size distribution and micro-cracks on rocks' mechanical strength. 14th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Helsingør, Denmark.
- Peng, J., Wong, L.N.Y. and Teh, C.I., 2017. Influence of grain size heterogeneity on strength and microcracking behavior of crystalline rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(2): 1054–1073.
- Petruk, W., 1986. Image analysis: an overview of developments, CANMET Report 86-4E. Canada Centre for Mineral and Energy Technology, Ottawa, Canada.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. and Siever, R., 1973. *Sand and Sandstone*. Springer-Verlag, New York, 618 pp.
- Ross, B.J., Fueten, F. and Yashkir, D.Y., 2001. Automatic mineral identification using genetic programming. *Machine Vision and Applications*, 13(2): 61–69.
- Saltikov, S.A., 1967. The determination of the size distribution of particles in an opaque material from a measurement of the size distribution of their sections. 2th International Congress for Stereology, Chicago, USA.
- Schneiderhöhn, P., 1954. Eine vergleichende Studie über Methoden zur quantitativen Bestimmung von Abrundung und Form an Sandkörnern (Im Hinblick auf die Verwendbarkeit an Dünnschliffen.). *Heidelberger Beiträge zur Mineralogie und Petrographie*, 4(1): 172–191.
- Singh, S.K., 1988. Relationship among fatigue strength, mean grain size and compressive strength of a rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 21(4): 271–276.
- Streckeisen, A., 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12(1): 1–33.
- Sun, W., Wang, L. and Wang, Y., 2017. Mechanical properties of rock materials with related to mineralogical characteristics and grain size through experimental investigation: a comprehensive review. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(3): 322–328.
- Tuğrul, A. and Zarif, I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51(4): 303–317.
- Ündül, Ö., 2016. Assessment of mineralogical and petrographic factors affecting petro-physical properties, strength and cracking processes of volcanic rocks. *Engineering Geology*, 210: 10–22

- Vernon, R.H., 2004. A practical guide to rock microstructure. Cambridge university press, Sydney, 606 pp.
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. American Mineralogist, 95(1): 185–187.
- Wong, W.X., 1998. Binary Image Segmentation of Aggregates Based On Polygonal Approximation and Classification of Concavities. Pattern Recognition, 31(10): 1503–1524.
- Yılmaz, N.G., Mete Göktaş, R., Gaşan, H. and Nuri Çelik, O., 2013. Particle Size Distribution and Shape Characterization of the Chips Produced During Granite Machining in Relation to Process Forces and Specific Energy. Particulate Science and Technology, 1(3): 277–286.



Relationship between Textural and Mineralogical Properties of Crystalline Igneous Rocks Using Textural Quantification by Image Analysis

Ali Hemmati¹, Mohammad Ghafoori^{1*}, Hassan Moomivand² and Gholam Reza Lashkaripour¹

1) Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2) Mining department, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

Submitted: Jan. 26, 2018

Accepted: July 10, 2018

Keywords: *Textural quantification, Image analysis, Area-weighted mean diameter, Crystalline igneous rocks, Granite quarries of NW Iran*

Introduction

The mineralogical and textural characteristics of rock materials have an important influence on physico-mechanical properties. The effects of some textural characteristics like grain size (Brace, 1961), grain shape (Cox and Budhu, 2008), grain surface (Diepenbroek et al., 1992), grain size distribution (Gurkan Ozgurel and Vipulanandan, 2005), and grains interlocking (Hoek, 1965) on physico-mechanical behavior of rock materials has always been emphasized. On the other hand, it has been found that textural properties are originally controlled by the mineralogy and chemistry of rock materials (Locat et al., 1984). Knowing the textural, mineralogical and chemical properties of rock materials and understanding the governing relationships can help us predict the quantitative and qualitative behavior of rock materials. The aim of this study is to investigate the interrelationships among the various textural properties besides the relationship between the textural characteristics and the mineralogy and chemical composition.

Materials and methods

Fifteen crystalline igneous rock samples including a wide variety of rock types and grain size were collected from the granite quarries of NW Iran (Fig. 1) and the thin sections of the samples were prepared for quantification of the textural characteristic by image acquisition analysis under

a polarized microscope. A total of 360 digital photomicrographs of each thin section were taken from the entire surface area of the thin section in three steps of natural light (PPL), polarizing light (XPL), and polarized light by a 45° rotation of the stage (Fig. 2). After preprocessing of distortion and skewness, the images were joined by Adobe Photoshop software to make the integrated mosaic image layers. The grain boundary tracing was carried out by drawing the grain outline through the interface of the adjacent grains via the three mosaic image layers on the background using the JMicroVision software (schematic diagram in Fig. 3). Simultaneously, identification and documentation of the mineral grains (crystals) were conducted by utilizing the optical properties of the minerals occurring in image layers. Overall, about 18,000 mineral grains were traced from the thin sections of fifteen samples. The accomplished graphic files after some of the file-format conversions were loaded by the ArcMap program to extract the main geometric textural properties like length, width, area, perimeter, circularity, and some related geometric concepts (Fig. 4) which were used to calculate advanced textural parameters such as roughness, rugosity, etc. Simultaneously, the mineralogy composition of the samples was obtained from the covered area of minerals in thin sections and used for classification of the samples according to the IUGS system (Fig. 5). In addition, textural mineral distribution map (TMDM) of the samples

*Corresponding authors Email: ghafoori@um.ac.ir

(Fig 6) were prepared and used to do petrographic textural studies of the samples.

Discussion

The results of correlations revealed that "size" is the most important textural parameter, which shows a notable relationship with mineralogy and chemical composition of the studied rock samples. Moreover, the result exhibited that the number frequency graphs of the grains (crystals) size distribution are asymmetric and non-normal that show negative (right) skewness. Consequently, arithmetic average cannot be an acceptable statistical mean to determine the average of the grain size due to the fine-grains tendency error, whereas textural and qualitative properties of rock are mainly controlled by the coarse and moderate grains content. Thus, the area-weighted mean diameter extracted from the cumulative distribution curves, (Fig 22) was suggested instead of the common arithmetic average to determine the mean grains size of the crystallized rock material. In addition, it was found that the elongation (aspect ratio) of the grains shows a good correlation with most of the shape-metric and grains-interrelation parameter. Thus, it should be considered as an efficient textural index to evaluate the grains interrelationships rather than the common texture coefficient (TC) index because of the simplicity and rapidity of its calculation.

Results and Conclusions

The statistical mean of the geometric textural parameters besides the total constituent grains were determined for the main minerals phases (quartz, plagioclase, alkali-feldspar) and mafic minerals (here all the other minerals). Therefore, correlation analyses were conducted among the various non-phasic and phasic textural variable as well as the chemical and mineralogical composition. The analysis was carried out through

classification of textural parameters into three main groups of size-metric (diameter, area and perimeter), shape-metric (elongation, circularity, rectangularity, roundness, roughness, rugosity and compactness) and grain-interaction (size homogeneity, heterogeneity index, interlocking index and Texture Coefficient) parameters with respect to the nature of parameters' demands. Considering abundance of the evaluating textural variable, at first, the matrix correlations among the various textural, mineralogical and chemical variables were calculated and the significant correlations were interpreted via linear regression analyses and graphical illustrations.

References

- Brace, W.F., 1961. Dependence of fracture strength of rocks on grain size. 4th Symposium on Rock Mechanics, Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA.
- Cox, M.R. and Budhu, M., 2008. A practical approach to grain shape quantification. *Engineering Geology*, 96(1–2): 1–16.
- Diepenbroek, M., Bartholomä, A., and Ibbeken, H., 1992. How round is round? A new approach to the topic "roundness" by Fourier grain shape analysis. *Sedimentology*, 39(3): 11–422.
- Gurkan Ozgurel, H. and Vipulanandan, C., 2005. Effect of Grain Size and Distribution on Permeability and Mechanical Behavior of Acrylamide Grouted Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12): 1457–1465.
- Hoek, E., 1965. Rock Fracture under Static Stress Conditions. Ph.D. Thesis, University of Cape Town, Cape Town, South Africa, 270 pp.
- Locat, J., Lefebvre, G. and Ballivy, G., 1984. Mineralogy, chemistry, and physical properties interrelationships of some sensitive clays from Eastern Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 21(3): 530–540.