

ارتباط بین ویژگی های هندسی بافتی کانی ها با مقاومت فشاری و کششی سنگهای آذرین متبلور

علی همتی^{1*}، محمد غفوری²، غلامرضا لشگری پور³، حسن مومیوند⁴

1- دانشجوی زمین شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد و کارشناس بخش زمین شناسی دانشگاه ارومیه

2 و 3- استاد بخش زمین شناسی دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد

4- استادیار بخش معدن دانشکده فنی دانشگاه ارومیه

a.hemati@urmia.ac.ir

چکیده

اندازه گیری های هندسی و کمینه سازی ویژگی های بافتی برای برقراری رابطه با ویژگی های مهندسی در چند دهه اخیر مورد علاقه محققین بوده است. با توجه به ابعاد ریز و حجم بسیار زیاد کانی در یک مقطع میکروسکوپی تمامی مطالعات پیشین بر مبنای نمونه برداری سیستماتیک یا تصادفی از برخی نقاط مقاطع میکروسکوپی استوار بوده است. علاوه بر این بیشتر مطالعات بر روی گروه خاصی از سنگها مثلا گرانیت ها یا ماسه سنگها محدود بوده است.

در این تحقیق برای اولین بار مطالعات بر مبنای تصویر برداری کامل از کل سطح مقاطع میکروسکوپی استوار گردید. مضافا اینکه تقریبا دامنه وسیعی از سنگهای آذرین بلورین از گرانیت تا دیوریت و گابرو در ۱۵ تپ متفاوت بطور گروهی مورد ارزیابی واقع گردیدند.

نتایج مطالعات برغم تنوع وسیع سنگ شناسی و توزیع ابعادی حدود هزار برابر قابل توجه بود. هیچ رابطه آشکاری بین نسبت کانی های تشکیل دهنده یا نسبت اندازه میانگین کوارتز بر اندازه میانگین پلاژیوکلاز بدون توجه به نوع و تپ سنگ آذرین مورد بررسی ارتباط خوبی با ویژگی های مقاومتی برقرار نمود. درجه این همبستگی در دامنه کانی شناسی بزرگتر از ۰/۱ میلیمتر مربع به ۶۱٪ بالغ می گردد. با توجه به تنوع بسیار وسیع اندازه کانی ها و تپ سنگ شناسی رابطه فوق قابل اهمیت است.

بررسی آماری ابعاد کانی شناسی سنگهای مورد مطالعه توزیع تقریبا متقارن کانی شناسی در پیرامون قطر یک میلیمتر را نشان داد. این یافته بدین معناست که قطر ۱ میلیمتر احتمالا قطر شاخص در ساختار کانی شناسی سنگهای آذرین متبلور باشد بنابراین هدایت بررسی های کانی شناسی در پیرامون قطر ۱ میلیمتر احتمالا نتایج مثبتی در ارزیابی خصوصیات مهندسی یا پتروگرافی این سنگها خواهد داشت.

کلمات کلیدی: سنگهای آذرین متبلور، ویژگی های هندسی، اندازه کانی شناسی، ویژگی های مهندسی

1- مقدمه

ارزیابی خواص مهندسی سنگها حدالمقدور بایستی توسط نمونه مغزه سالم تهیه شده از سنگها صورت گیرد. زمان و هزینه تهیه نمونه مغزه های استاندارد از سنگهای آذرین بلورین بویژه گرانیت ها بدلیل سختی بالا حداقل ۱۰ تا ۲۰ برابر سنگهای آهکی است. از سوی دیگر در بسیاری موارد بدلایلی چون هوازگی سطحی، بافت درشت یا جهتدار و توزیع ناهمگن کانی شناسی نمونه مغزه اخذ شده نماینده واقعی توده سنگ نمی باشد. بدین لحاظ برخی محققین درصدد ارزیابی ویژگی های مهندسی این سنگها از روی خصوصیات بافتی و کانی شناسی یا شیمیایی می باشند.

گام های اولیه بررسی ارتباط بین پارامتر های بافتی کانی شناسی با ویژگی های مقاومتی توسط مطالعات میکروسکوپی نوری توسط خان (۱۹۶۵) و دآندریا و همکاران (۱۹۶۵) برداشته شد. در طول سالیان بعد و همزمان با ساخت و توسعه انواع

میکروسکوپهای پیشرفته تر نور پلاریزه ، میکروسکوپهای فلورسانس ، میکروسکوپهای الکترونی و میکروسکوپهای اسکن الکترونی (SEM) و غیره، محققین جدید با بهره گیری از تجهیزات و میکروسکوپهای پیشرفته تر مطالعات فوق را پیگیری و بکمک نرم افزار های آنالیز تصویری داده های اخذ شده را با سرعت و دقت بیشتری پردازش و توسعه دادند. در قدیمی ترین مطالعه صورت گرفته توسط مریام و همکاران (۱۹۷۰) رابطه معکوسی بین استحکام کششی انواعی از گرانتیت های کالیفرنیا با میزان کوارتز گزارش گردید. بعدها انودریا و کامورا (۱۹۸۰) گزارش نمودند که در سنگهای آذرین با افزایش اندازه دانه ها مقاومت بطور موثری کاهش می یابد. گانسالوس و کالهو (۱۹۸۴) در بررسی خود روی سنگهای رسوبی بالا رفتن مقاومت فشاری با میزان کوارتز را با همبستگی بالایی نشان دادند. رابطه مشابهی توسط شکور و همکاران (۱۹۹۱) بین مقاومت فشاری تک محوری و درصد دانه های کوارتز برای ماسه سنگهای مورد مطالعه گزارش گردید. براتلی (۱۹۹۲) نشان داد در سنگهای آذرین رابطه افزایش مقاومت با کاهش اندازه اصلی دانه ها در دانه های زیر یک میلیمتر خیلی قوی تر است. طغرل و ظریف (۱۹۹۹) در یک مطالعه گسترده بر روی ۱۹ تیپ سنگ گرانتیتی از نقاط مختلف ترکیه گزارش نمودند که مقاومت گرانتیت ها با افزایش میزان کوارتز بالا و با افزایش میانگین اندازه دانه کاهش می یابد. به نظر نامبردگان تغییرات میزان کوارتز و فلدسپار مهمترین فاکتور متاثر کننده ویژگی های مکانیکی است. درحالی که زورلو و همکاران (۲۰۰۴) در بررسی های پتروگرافی خود روی ماسه سنگها هیچ رابطه معنی داری بین مقاومت فشاری تک محوری با پارامتر شکل دانه پیدا نکردند پریکریل (۲۰۰۶) با مطالعه نمونه های سنگهای بلورین آذرین و دگرگونی برداشت شده از معادن سنگ تزئینی فعال که ترکیب تقریباً مشابه و در حد کوارتز مونزونیتی داشتند با بهره گیری از آنالیز تصویری نشان داد بجز اندازه دانه هیچ یک از ضرایب فابریکی همبستگی نزدیکی با ویژگی های مکانیکی سنگها ندارند. پومونیس و همکاران (۲۰۰۷) با مطالعه روی نمونه های دلریت و ترکتولیتی تاکید نمودند که ترکیب کانی شناسی یکی از مهمترین فاکتور های کنترل کننده ویژگی های فیزیکی مکانیکی سنگ است. آنها همچنین نشان دادند که میزان پلاژیوکلاز در ویژگی های مکانیکی نمونه های مورد مطالعه تاثیر منفی دارد.

نتایج متفاوت و بعضاً ضد و نقیض ارائه شده در بررسی های صورت گرفته برای کشف روابط بین ویژگی های مقاومتی با ویژگی های بافتی بیانگر این حقیقت است که پارامترهای فابریکی رفتار پیچیده و متداخلی با سایر ویژگی های فابریکی سنگ دارند لذا بررسی اثر پارامتر های مستقل با نادیده انگاشتن اثرات سایر پارامتر ها نتایج معنی داری نخواهد داشت. علاوه بر این با توجه به تنوع وسیع کانی شناسی و بافتی در سنگ های بلورین، دسته بندی محدودتر این سنگها برای کشف روابط بافتی - مهندسی را ضروری می سازد.

2-آزمون های ژئومکانیکی

بمنظور کاهش اثرات ثانویه بافتی چون آلتراسیون و تنش های تکنونیک و انتخاب نمونه های سالم، نمونه سنگهای لازم این پژوهش از معادن سنگهای تزئینی شمالغرب کشور جمع آوری گردیدند. بدین ترتیب ابتدا حدود ۴۰ نمونه سنگ آذرین بلورین با اشکال نسبتاً هندسی و به وزن تقریبی هر کدام حدود ۵۰ کیلوگرم جمع آوری گردید در مراحل بعد با بررسی دقیق تر نمونه ها و حذف نمونه های با کیفیت پایین مجموعاً ۱۵ نوع مختلف از سنگهایی بلورین آذرین برای مراحل مختلف پژوهش انتخاب گردید. متعاقباً مراحل زیر برای کلیه نمونه های انتخابی بانجام رسید:

(۱) حفاری و اخذ حداقل ۳ نمونه مغزه طولی با قطر NG از هر تیپ سنگی

(۲) تهیه حداقل ۳ نمونه مغزه استاندارد طولی با نسبت طول به عرض حداقل ۲ برای انجام آزمون تک محوری فشاری

۳) تهیه حداقل ۵ نمونه مغزه استاندارد با ارتفاع حداقل ۳ سانتی متر برای انجام آزمون کششی برزیلی
۴) تعیین مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی بر روی ۵۰ نمونه مغزه فشارشی و ۵۰ نمونه مغزه کششی
تمام مراحل آماده سازی و تهیه نمونه مغزه ها برای آزمون های فشاری و کششی مطابق با توصیه های ASTM و ISRM 1981 و 2002 صورت گرفته است. در جدول شماره ۱ نتایج آزمون های ژئوتکنیکی انجام یافته خلاصه گردیده است.

جدول ۱: نتایج آزمون های ژئوتکنیکی انجام یافته روی 15 تیپ سنگ مورد بررسی

نمونه	مقاومت فشاری تک محوری (Mps)			مقاومت کششی (Mps)		
	Ave	Max	Min	Ave	Max	Min
AFSH	102.69	114.55	80.17	8.54	10.31	7.17
ARAK	126.08	133.25	118.50	12.47	13.61	10.21
DOLF	85.03	100.08	64.11	6.65	6.80	6.42
EKBT	86.28	92.10	75.45	6.76	7.84	5.55
GBG	114.02	151.12	89.29	12.23	13.41	10.94
GLT	133.86	154.58	96.32	12.59	14.84	10.06
GOLM	190.05	214.24	169.58	32.87	39.10	29.30
GOSH	152.09	152.09	152.09	30.30	30.30	30.30
KHAL	122.17	137.99	106.00	21.45	24.80	16.70
KHOR	98.47	125.50	82.81	8.99	10.26	7.86
MARG	122.79	124.01	121.39	9.11	10.64	7.90
NARI	79.57	90.67	68.54	9.79	12.38	8.09
PIRB	115.14	131.13	101.99	7.69	8.83	6.40
PIRG	133.77	144.22	113.03	9.09	13.06	5.88
SAGZ	83.57	106.39	65.75	7.83	8.85	6.94

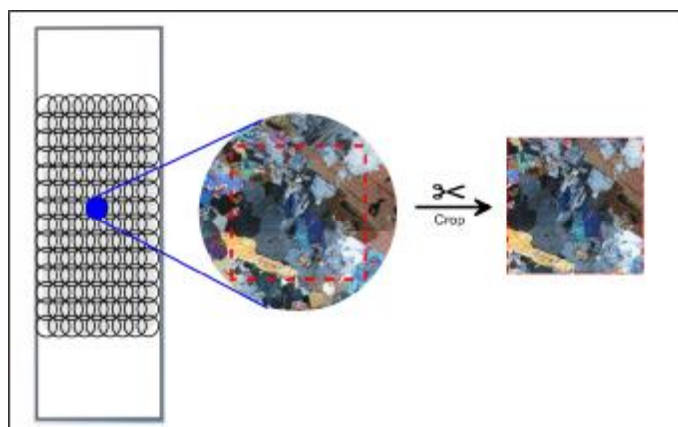
3- پتروگرافی و آنالیز تصویری

یکی از ویژگی های مشترک تمام مطالعات پیشین صورت گرفته بررسی بافتی کانی شناسی مقاطع میکروسکوپی بصورت نمونه برداری منظم یا تصادفی بوده است. در این تحقیق برای اولین بار مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از ۱۵ تیپ سنگ آذرین بلورین بطور کامل و سیستماتیک تصویربرداری و پارامتر های هندسی بافتی بر مبنای اندازه گیری های هندسی کل مقطع میکروسکوپی استخراج گردید. با این روش برخی خطاهای ناشی از اندازه گیری نمونه برداری سیستماتیک شبکه ای یا تصادفی که در سنگهای با بافت های ناهمگن بسیار بالاست حذف و روابط بر مبنای مشاهدات و کنترل بصری کل مقاطع میکروسکوپی و انتخاب مساحت بزرگی از مقطع که نماینده تمام مقطع میکروسکوپی و سنگ مربوطه می باشد صورت گرفت. برای انجام آنالیز تصویر از هر نمونه سنگی حداقل ۲ مقطع میکروسکوپی نازک نورگذری در راستای عمود بر طول مغزه ها تهیه گردید. آنگاه کلیه مقاطع توسط میکروسکوپ پلاریزان مطالعه و کانی شناسی مودال هر نمونه سنگی تعیین گردید.

علاوه بر این مراحل زیر برای بررسی های پتروگرافیکی و کمینه سازی ویژگی های هندسی بافتی بانجام رسید:

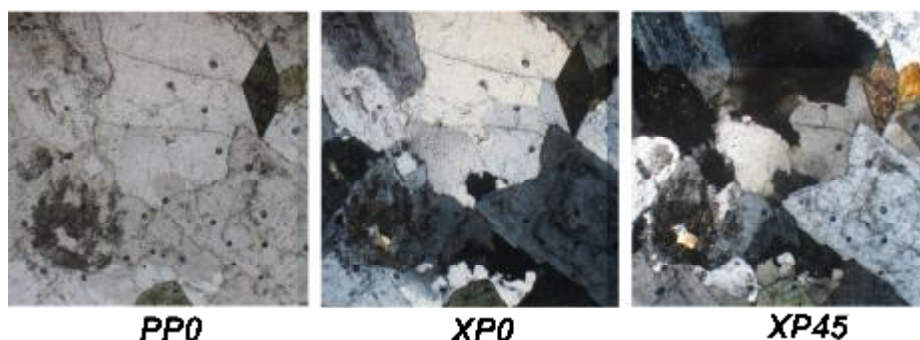
۱) تصویر برداری موزائیکی و پردازش تصاویر: عکس برداری از تک تک مقاطع میکروسکوپی بصورت موزائیک پی در پی با همپوشانی چهار طرفی ۳۰٪ با عدسی شیئی (۴×) و بزرگنمایی کلی ۴۰ برابر صورت گرفت. برای تهیه یک پوشش کامل از هر مقطع ۱۲۰ قطعه عکسی تهیه گردید برای شناسائی دقیق و حذف اثرات خاموشی کانی ها تصویر برداری موزائیکی هر

مقطع در سه لایه صورت پذیرفت: لایه اول موزائیک تصاویر با نور معمولی، لایه دوم موزائیک تصاویر با فیلتر پلاریزان. لایه سوم موزائیک تصاویر با فیلتر پلاریزان اما با چرخش زاویه ای ۴۵ درجه نسبت به لایه دوم صورت گرفت. تهیه سه لایه تصویری موزائیک هر هر مقطع بمنظور بالا بردن دقت شناسایی کانی ها و مرز آنها و حذف اثرات ناشی از خاموشی یا کانی های اوپیک و ایزوتروپ صورت گرفت. بدین ترتیب برای هر مقطع میکروسکوپی ۳۶۰ قطعه عکس تهیه گردید. بنابراین مجموع قطعات عکس برای حداقل ۱۵ مقطع میکروسکوپی و ۱۵ تیپ سنگی مختلف به ۵۴۰۰ قطعه بالغ گردید. درجه تفکیک افقی و قائم هر تصویر 180 dpi و ابعاد هر تصویر ۱۲۰۰ × ۱۶۰۰ پیکسل انتخاب گردید. میدان دید کامل هر تصویر با توجه به بزرگنمایی بکار رفته دایره ای به قطر ۴/۵ میلیمتر می باشد اما بدلیل عدم انطباق کامل تصاویر دایره ای در کنار هم، تصویر برداری از هر طرف با حداقل ۳۰٪ همپوشی صورت پذیرفت و لذا میدان دید موثر هر تصویر در حالت چهارگوش هم بعد قابل انطباق به ۳/۱۲۵ و یا بطور خلاصه به ۳ میلی متر محدود گردید. شکل ۱ مراحل تصویر برداری موزائیکی و آماده سازی یک قطعه عکسی را نشان می دهد



شکل 1) تصویر برداری موزائیکی و آماده سازی یک قطعه عکسی مستقل برای تهیه موزائیک تصاویر

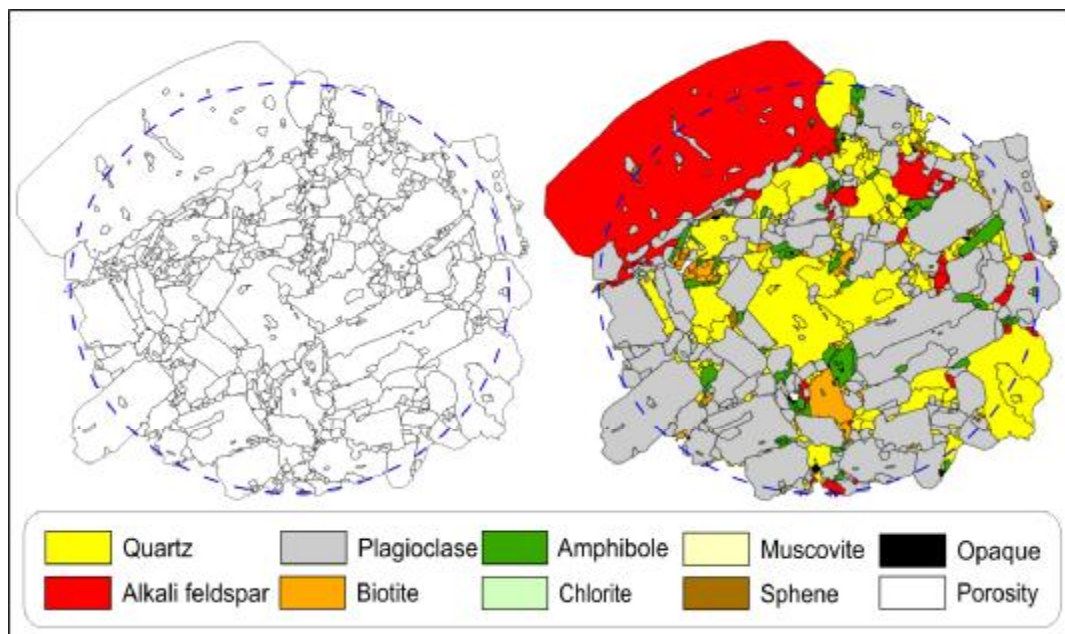
۲) چسباندن قطعه تصاویر و تهیه تصاویر موزائیک: تصاویر تهیه شده از هر مقطع در محیط نرم افزاری فتوشاپ در کنار هم انطباق و با چسباندن آنها بهم با توجه به همپوشی های پیرامونی و حذف برخی اعوجاجات تصویری، هر هر مقطع سه تصویر موزائیکی با ابعاد حدود ۱۰۰۰۰ × ۱۲۰۰۰ پیکسل با همان درجه تفکیک اولیه ایجاد گردید. شکل (۲) سه لایه تصویر تهیه شده از یک میدان دید یک مقطع میکروسکوپی را نشان می دهد.



شکل 2) سه لایه تصویر تهیه شده از یک قطعه عکسی: لایه PP0 تصویر با نور معمولی، لایه XP0 تصویر منطبق بر لایه اول اما با فیلتر پلاریزان و لایه XP45 هم تصاویر منطبق بر لایه اول و با فیلتر پلاریزان اما با چرخش زاویه ای 45 درجه نسبت به لایه دوم.

۳) **آنالیز تصویری، شناسایی و ترسیم مرز کانی:** پس از بارگذاری سه لایه موزائیک تصویری هر مقطع میکروسکوپی در محیط نرم افزاری JMicroVision با توجه به مشاهدات بصری بخشی از تصاویر موزائیک که بافت نسبتاً یکنواختی داشت و نماینده توزیع اندازه و تنوع کانی شناسی تمام سطح مقطع میکروسکوپی بود برای مطالعه، شمارش و ترسیم مرز کانی ها انتخاب گردید. انتخاب این منطقه نقش بسزایی در نتیجه محاسبات هندسی و آماری دارد بنابراین در انتخاب این ناحیه ضمن بررسی بصری کانی شناسی و بافت کل سه لایه موزائیک تصاویر مقطع، از مقاطع دیگر تهیه شده از همان تیپ سنگی و بررسی های میکروسکوپی استفاده گردید. دقت آنالیز تصویری برای شناسایی و ترسیم مرز کانی ها در محیط نرم افزاری JMicroVision ۲۰ پیکسل طولی یا ۰/۰۴ میلی متر و در حالت دوبعدی ۰/۰۰۲ میلی متر مربع بوده انجام گرفت.

۴) **کانی شناسی تصویری و انجام محاسبات هندسی:** با توجه به اینکه نرم افزار JMicroVision قابلیت تولید فایل های با قابلیت محاسباتی مثل DXF یا shp را ندارد و لایه گرافیکی ترسیمی با فرمت Scalable Vector Graphics (SVG) ذخیره می شود برای ویرایش نهایی تصاویر و تولید فایل های تصویری با قابلیت داده پردازش توسط محیط نرم افزاری ArcMap 10 از نرم افزار های تبدیلی Adobe Illustrator CS6 و Xara Photo & Graphic Designer و Surfer 10 کمک گرفته شد. آنگاه با بارگذاری فایل های گرافیکی تصویری GIS نسبت به محاسبه پارامتر های هندسی چون مساحت، محیط، طول و عرض، گرد شدگی، طولیل شدگی و غیره اقدام گردید. حاصل این کار های بسیار وقت گیر شناسایی، مرز بندی و تهیه نقشه کانی شناسی بالغ بر ۱۷۸۴۳ عدد کانی برای ۱۵ تیپ سنگی است که در آن هر کانی علاوه بر مشخصات گرافیکی و تصویری دارای جدول داده ای مربوط به اندازه گیری های هندسی است (شکل ۳). در شکل ۳ نقشه کانی شناسی گرافیکی یکی از نمونه ها و در جدول ۲ مشخصات آماری اندازه گیری های هندسی مربوط به ۱۵ تیپ سنگی نشان داده شده است.



شکل 3): نمایی از نقشه کانی شناسی گرافیکی یکی از نمونه ها (AFSH). سمت چپ مرز بندی اولیه کانی ها و سمت راست نقشه کانی شناسی کانی ها به تفکیک رنگ می باشد.

جدول 2: مشخصات آماری اندازه گیری های هندسی مربوط به 15 تپ سنگی مورد بررسی

Sample	Thin.sec. eff. area (mm)	Meas. area (mm)	Meas. area (%)	Mineral count	M.area (mean)	M.area (min)	M.area (max)	M.area (variance)	M.area (S.Dev)	M.area (skew)	M.area (kurtosis)
AFSH	544.09	199.17	36.61%	884	0.23	0.000715	39.59	2.111	1.453	23.02	612.95
ARAK	494.56	130.49	26.39%	1190	0.11	0.000080	8.77	0.184	0.429	11.76	182.81
DOLF	561.80	200.64	35.71%	780	0.26	0.001255	74.85	7.311	2.704	27.03	746.17
EKBT	544.08	471.53	86.67%	1844	0.26	0.000602	43.12	3.130	1.769	16.58	318.79
GBG	477.32	30.80	6.45%	579	0.05	0.000686	1.18	0.012	0.111	5.18	36.17
GLT	607.43	226.31	37.26%	1081	0.21	0.001871	19.56	0.663	0.814	16.05	333.52
GOLM	575.73	164.21	28.52%	1800	0.09	0.000679	4.79	0.105	0.324	8.19	83.00
GOSH	532.82	129.20	24.25%	1426	0.09	0.000825	12.62	0.358	0.598	15.80	282.56
KHAL	505.71	277.65	54.90%	1802	0.15	0.000210	14.44	0.739	0.860	10.12	122.79
KHOR	451.60	204.88	45.37%	1021	0.20	0.000744	18.49	1.223	1.106	11.57	160.01
MARG	532.25	160.90	30.23%	617	0.26	0.000835	7.77	0.443	0.666	5.34	39.67
NARI	492.25	158.33	32.16%	1347	0.12	0.000472	6.43	0.164	0.405	7.39	76.35
PIRB	536.13	334.18	62.33%	821	0.41	0.000779	19.02	2.060	1.435	8.07	83.46
PIRG	537.75	205.56	38.23%	895	0.23	0.000512	14.01	0.799	0.894	8.51	94.65
SAGZ	504.66	144.78	28.69%	1756	0.08	0.000577	3.40	0.054	0.233	7.30	73.92

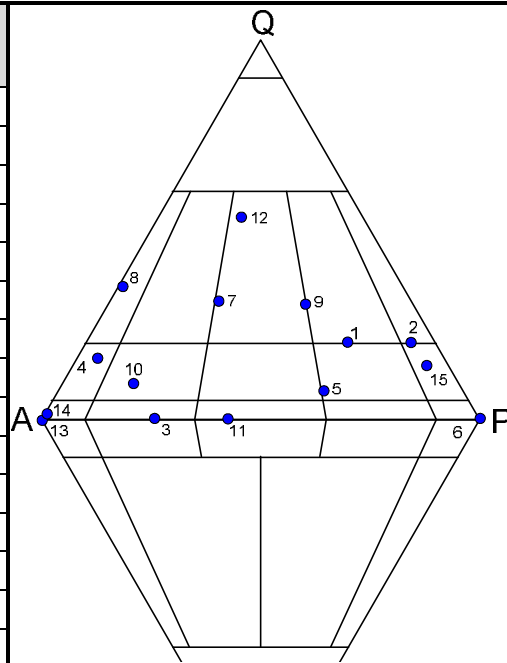
نتایج محاسبات دوبعدی مساحت دربرگیرنده کانی ها در درجه اول برای تعیین کانی شناسی ترجیحی و تعیین نام تپ های سنگی بکار گرفته شد. در جدول ۳ درصد کانی های تشکیل دهنده هر سنگ بر اساس اندازه گیری های مساحی سطح کانی ها و نیز در جدول ۴ نامگذاری علمی تپ های سنگی مورد آزمون بر روش پیشنهادی انجمن بین المللی علوم زمین (IUGS) بر روی نمودار اشتراک ایزن آورده شده است. همانگونه که در دیاگرام مربوطه مشاهده میشود نمونه های مورد آزمایش تقریباً رنج تمام سنگهای آذرین درونی را در بر می گیرند.

جدول 3: درصد کانی های تشکیل دهنده هر سنگ بر اساس اندازه گیری های مساحی سطح کانی ها

Sample	درصد کانی های تشکیل دهنده																		
	Q	A	P	F	bi	am	px	ol	cl	ep	ap	tor	mos	sr	sp	zr	op	ca	pro
AFSHG	21.91	22.01	50.08	0.00	2.06	3.24	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.36	0.00	0.15	0.00	0.13
ARAK	17.86	5.01	48.73	0.00	22.73	5.25	0.00	0.00	0.25	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00
DOLF	0.00	69.21	25.25	0.00	1.22	0.32	1.32	0.00	1.68	0.00	0.08	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.81	0.04	0.04
EKBT	14.13	70.22	3.47	0.00	7.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.73	3.83	0.41	0.00	0.00	0.05	0.00	0.13
GBG	3.70	17.00	29.82	0.00	13.23	0.00	35.17	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04	0.00	0.00
GLT	0.00	0.00	64.69	0.00	14.14	0.00	16.48	3.13	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.01	0.00	0.03
GOLM	32.64	46.84	17.68	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	1.88	0.03	0.00	0.00	0.04	0.00	0.21	0.01	0.26	0.01	0.02
GOSH	33.90	62.31	0.87	0.00	1.58	0.08	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.16	0.14	0.04	0.87	0.00	0.00
KHAL	34.38	27.97	32.91	0.00	4.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.34	0.00	0.00	0.00	0.25	0.01	0.00	0.05	0.00	0.04
KHOR	8.59	71.03	14.22	0.00	1.49	2.62	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.61	0.01	0.00	0.06	0.00	1.31	0.00	0.00
MARG	0.00	50.41	37.15	0.16	3.21	4.66	0.00	0.00	1.11	0.00	0.27	0.00	0.00	0.13	0.12	0.00	1.67	0.00	1.11
NARI	58.50	30.58	8.38	0.00	1.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.41	0.00	0.15
PIRB	0.00	95.38	0.00	0.03	0.35	0.68	1.58	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.92	0.00	0.01
PIRG	1.08	90.11	0.52	0.00	3.06	3.76	0.67	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.01
SAGZ	13.28	4.94	66.19	0.00	5.26	8.41	0.00	0.00	0.25	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.27	0.05	0.92	0.05	0.18

جدول 4) درصد کانی های اصلی و نامگذاری علمی تیپ سنگی مورد آزمون بروش پیشنهادی انجمن بین المللی علوم زمین (IUGS) در روی مثلث مضاعف اشتراکایزن (streckeisen 1976)

No	Sample	Lithology	Q	A	P	F
1	AFSHG	Granodiorite	23.3	23.4	53.3	0.0
2	ARAK	Tonalite	24.9	7.0	68.1	0.0
3	DOLF	Syenite	0.0	73.3	26.7	0.0
4	EKBT	Quartz Alkali Feldspar Syenite	16.1	80.0	4.0	0.0
5	GBG	Quartz Monzonite	7.3	33.7	59.0	0.0
6	GLT	Gabbro	0.0	0.0	100.0	0.0
7	GOLM	Syenogranite	33.6	48.2	18.2	0.0
8	GOSH	Alkali Feldspar Granite	34.9	64.2	0.9	0.0
9	KHAL	Monzogranite	36.1	29.4	34.5	0.0
10	KHOR	Quartz Syenite	9.2	75.7	15.2	0.0
11	MARG	Foid-Bearing Monzonite	0.0	57.6	42.4	0.2
12	NARI	Quartz Rich Granitoids	60.0	31.4	8.6	0.0
13	PIRB	Foid-Bearing Alkali Feldspar Syenite	0.0	100.0	0.0	0.0
14	PIRG	Alkali Feldspar Syenite	1.2	98.2	0.6	0.0
15	SAGZ	Quartz Anorthosite	15.7	5.9	78.4	0.0



4- ارزیابی ارتباط ویژگی های مهندسی با اندازه گیری های بافتی

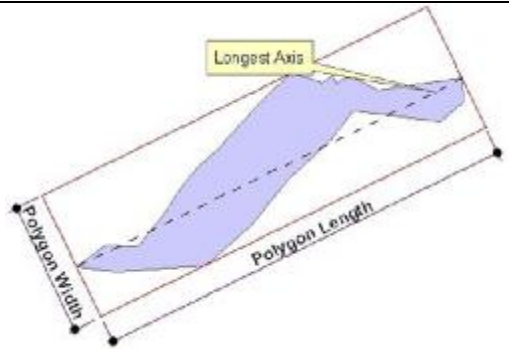
در جدول ۵ برخی از اصلی ترین پارامتر های هندسی بافتی اندازه گیری شده سنگهای مورد مطالعه بر اساس آنالیز تصویری مقاطع میکروسکوپی آورده شده است. علاوه بر این پارامتر های دیگری با استفاده از چهار عملگر اصلی جبری از پارامتر های فوق تعریف و محاسبه گردید. بدلیل کثرت داده ها و پارامتر ها از پلات دو سری داده (X و Y) اجتناب و همبستگی خطی بین ویژگی های مهندسی اصلی (مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی) سنگ های مورد آزمون در برابر پارامتر های هندسی تعریف شده صرفا با استفاده ضریب همبستگی گشتاوری پیرسون (۱۹۱۱) (رابطه ۱) تعیین گردید:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

بررسی درصد کانی های تشکیل دهنده (داده های جدول ۳) و نیز درصد کانی های اصلی (داده های جدول ۴) نشان داد وقتی مجموعه سنگهای آذرین بلورین بطور گروهی بررسی می شوند عملا هیچ رابطه آشکاری بین نسبت کانی شناسی با ویژگی های مقاومتی وجود ندارد. با توجه به کثرت اندازه گیری های هندسی کانی شناسی (۱۷۸۴۳ عدد کانی) تلاش ها برای برقراری روابط بین این اندازه گیری ها با ویژگی های مقاومتی معطوف گردید. بدلیل تنوع بسیار وسیع سنگهای مورد بررسی و متعاقبا دامنه بسیار وسیع مساحت کانی های تشکیل دهنده (بین ۰/۰۰۰۰۸ تا ۷۴/۸۵ میلیمتر مربع) و نسبت ابعادی هزار برابری بین قطر بزرگترین و کوچکترین کانی در مجموعه سنگهای مورد مطالعه برقراری همبستگی بالا دور از انتظار است. بررسی ها نشان داد ویژگی های مقاومتی مجموعه سنگهای مورد مطالعه همبستگی قابل توجهی بین پارامتر های اولیه هندسی چون اندازه (مساحت و

قطر) و ابعاد (طول و عرض) برقرار نمی کنند. بنابراین تلاش ها روی پارامترهای فرعی تعریف شده متمرکز گردید. نتیجه کار وجود همبستگی متوسط بین نسبت اندازه میانگین کوارتز بر اندازه میانگین پلاژیوکلاز (\bar{A}_Q/\bar{A}_P) با مقاومت فشاری تک محوری ($R^2=0.51$) و مقاومت کششی برزیلی ($R^2=0.66$) هویدا کرد (جدول ۵).

جدول 5) برخی از اصلی ترین پارامترهای هندسی بافتی اندازه گیری شده سنگهای مورد مطالعه بر اساس آنالیز تصویری

علامت	پارامتر	توضیح و فرمول	
A	مساحت		
P	محیط		
D_{max}	قطر بزرگ کوچکترین مستطیل محاط کننده		
D_{min}	قطر کوچک کوچکترین مستطیل محاط کننده		
T	تراکم یا پرکنندگی		نسبت مساحت پلیگون به مساحت کوچکترین چهار ضلعی محاط کننده در امتداد اقطار اصلی. هر چه شکل به مربع مستطیل نزدیک باشد آن به ۱ نزدیک می شود
	اندازه (مساحت) متوسط	مساحت متوسط هر کانی در مقطع مورد مطالعه	$\bar{A} = \sum_n \frac{A_i}{n}$
SF	دایروی گونی یا فاکتور شکل	برای دایره ۱ است برای اشکال غیر هم بعد و باریک کمتر از یک است	$SF = \frac{4pA}{P^2}$
E	طولیل شدگی یا نسبت ابعادی	نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک	$E = \frac{D_{max}}{D_{min}}$
G	شاخص درهم قفل شدگی	به نقل از پریکل ۲۰۰۶ ارائه توسط (Dreye 1973)	$g = \frac{1}{n} \sum \frac{P}{\sqrt{A}}$
D	قطر معادل		$D = \sqrt{\frac{4A}{p}}$
C	درجه تراکم	به نقل از پریکل ۲۰۰۶ ارائه توسط (Dreye 1973)	$C = \frac{P^2}{A}$
t	شاخص یکنواختی اندازه	به نقل از پریکل ۲۰۰۶ ارائه توسط (Dreye 1973)	$t = \frac{A_{ave}}{\sqrt{\sum (A_i - A_{ave})^2}}$

بمنظور ارتفاع ضرایب همبستگی مذکور سعی گردید کانی شناسی سنگهای مورد بررسی از نظر اندازه دسته بندی گردد. حاصل این تلاش ها نشان داد که در گروه با دامنه ابعادی بیش از ۰/۱ میلیمتر مربع ضریب همبستگی نسبت اندازه میانگین کوارتز بر پلاژیوکلاز بطور قابل توجهی افزایش و برای مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی به ترتیب به ($R^2=0.61$) و ($R^2=0.74$) ارتقا می یابد. اما در گروه با دامنه ابعادی کمتر از ۰/۱ میلی متر مربع همبستگی فوق تقریباً صفر است.

با توجه به اینکه روابط همبستگی بر اساس اندازه گیری های دوبعدی بنا گردیده اند با فرض همگن بودن توزیع اندازه کانی هادر بعد سوم ابعاد حجمی آنها از رابطه $\bar{V} = (\sqrt{A})^3$ استخراج گردد. آنگاه روابط همبستگی بین ویژگی های مقاومتی با پارامترهای هندسی حجمی برقرار گردید (ستونهای سمت راست جدول ۵). نتایج کار رضایت بخش تر از مرحله قبلی بود ضرایب همبستگی نسبت اندازه میانگین کوارتز بر پلاژیوکلاز در استفاده از کانی های با دامنه ابعادی بیش از ۰/۱ میلیمتر مربع برای مقاومت فشاری تک اندکی افزایش و به ($R^2=0.64$) ارتقا می یابد. اما نتیجه برای برای مقاومت کششی برزیلی رضایت بخش

نیست. ضرایب همبستگی بین ویژگی های مقاومتی برای سایر پارامتر های هندسی چون محیط، قطر معادل، طولیل شدگی و دایروی گونی نیز برقرار گردید. اما بدلیل حضور رنج وسیع سنگها نتایج رضایت بخش نبود.

بررسی توزیع نسبت ابعاد کانی های تشکیل دهنده در گروه سنگهای مورد مطالعه از روی سری داده های تجمعی نشان داد که در گروه سنگهای مورد مطالعه درصد مساحتی با اندازه زیر ۰/۱ و ۱ میلی مترمربع به ترتیب ۱۳/۲ و ۴۵/۹ درصد می باشد (جدول ۶). این بیانگر این موضوع است که قطر کانی شناسی ۱ میلی متر یک اندازه موثر در ساختار کانی شناسی سنگهای آذرین متبلور می باشد.

جدول 5: ضرایب همبستگی برقرار شده بین دو گروه داده های هندسی و مقاومتی در سنگهای بلورین مورد مطالعه

میانگین مساحت اندازه گیری شده کانی ها (mm ²)	ضرایب همبستگی در برابر مقاومت فشاری تک محوری		ضرایب همبستگی در برابر مقاومت کششی برزیلی		میانگین حجم محسبه شده کانی ها (mm ³)	ضرایب همبستگی در برابر مقاومت فشاری تک محوری		ضرایب همبستگی در برابر مقاومت کششی برزیلی	
	A(100%)	Ai (D>0.1)	A(100%)	Ai (D>0.1)		A(100%)	Ai (D>0.1)	A(100%)	Ai (D>0.1)
(total)	0.05	0.05	0.26	0.26	(total)	0.04	0.04	0.24	0.24
(Q)	0.04	0.04	0.19	0.19	(Q)	0.05	0.05	0.17	0.17
(A)	0.08	0.08	0.11	0.11	(A)	0.09	0.09	0.11	0.12
(P)	0.12	0.13	0.09	0.10	(P)	0.08	0.08	0.08	0.08
(A+P)	0.15	0.15	0.30	0.30	(A+P)	0.13	0.13	0.28	0.28
(Q+P)	0.02	0.03	0.05	0.05	(Q+P)	0.02	0.02	0.06	0.07
(Q+A)	0.02	0.02	0.13	0.13	(Q+A)	0.02	0.02	0.16	0.16
(Q+A+P)	0.03	0.04	0.26	0.26	(Q+A+P)	0.03	0.03	0.24	0.24
(Q / P)	0.51	0.61	0.66	0.74	(Q / P)	0.57	0.64	0.66	0.70
(Q / A)	0.07	0.10	0.21	0.21	(Q / A)	0.08	0.11	0.16	0.14
(A / P)	0.04	0.20	0.00	0.32	(A / P)	0.03	0.24	0.01	0.36
(Q / (A+P))	0.39	0.43	0.56	0.56	(Q / (A+P))	0.47	0.48	0.53	0.51
(A / (Q+P))	0.00	0.03	0.03	0.02	(A / (Q+P))	0.01	0.03	0.04	0.02
(P / (Q+A))	0.14	0.13	0.03	0.04	(P / (Q+A))	0.12	0.10	0.03	0.03
(Q / (Q+A+P))	0.22	0.27	0.52	0.55	(Q / (Q+A+P))	0.33	0.38	0.56	0.56
(P / (Q+A+P))	0.15	0.19	0.02	0.05	(P / (Q+A+P))	0.16	0.18	0.03	0.04
(A / (Q+A+P))	0.01	0.00	0.00	0.01	(A / (Q+A+P))	0.01	0.01	0.00	0.00
(Q+A) / (Q+A+P)	0.08	0.12	0.10	0.13	(Q+A) / (Q+A+P)	0.16	0.21	0.15	0.19
(Q+P) / (Q+A+P)	0.00	0.01	0.01	0.00	(Q+P) / (Q+A+P)	0.01	0.02	0.00	0.00
(A+P) / (Q+A+P)	0.28	0.31	0.01	0.02	(A+P) / (Q+A+P)	0.27	0.30	0.01	0.02
(Q+A) / (Q+P)	0.02	0.03	0.02	0.02	(Q+A) / (Q+P)	0.02	0.03	0.02	0.02
(Bi)	0.01	0.01	0.09	0.08	(Bi)	0.00	0.00	0.06	0.05
(Bi+P)	0.11	0.11	0.15	0.14	(Bi+P)	0.06	0.06	0.11	0.10
(Maf)	0.05	0.04	0.22	0.19	(Maf)	0.01	0.01	0.14	0.10
(Maf+P)	0.17	0.18	0.21	0.20	(Maf+P)	0.11	0.10	0.14	0.13
(Maf / Q)	0.01	0.02	0.21	0.05	(Maf / Q)	0.00	0.03	0.15	0.04

جدول 6: توزیع درصد مساحت کوچکتر از سایز تعریف شده به همراه مساحت های میانگین برای هر تیپ سنگی

مساحت تعریف شده	درصد کوچکتر از مساحت موثر تعریف شده در نمونه های مورد بررسی (%)														میانگین		
	AFSHG	ARAK	DOLF	EKBT	GBG	GLT	GOLM	GOSH	KHAL	KHOR	MARG	NARI	PIRB	PIRG	SAGZ	Ave%	VAR
A (mm ²)																	
0.01	0.6	1.5	0.5	0.5	3.7	0.3	1.9	2.4	1.8	0.8	0.5	1.8	0.3	0.7	2.3	1.3	1.0

0.1	9.1	16.9	7.1	8.0	36.3	10.8	22.7	19.6	7.6	9.8	6.6	11.3	4.3	7.5	20.6	13.2	73.1
1	32.7	59.2	36.2	31.7	96.2	54.5	58.0	50.0	25.8	29.2	37.6	48.0	22.3	32.5	74.7	45.9	409.0

5- نتیجه گیری

اندازه گیری های هندسی و کمینه سازی ویژگی های بافتی سنگهای آذرین بلورین در دامنه وسیعی از گرانیته و سینیت تا دیوریت و گابرو نشانگر عدم وجود هر گونه ارتباطی بین نسبت کانی های تشکیل دهنده با مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی است. از سوی دیگر بررسی ابعاد و اندازه کانی های تشکیل دهنده نشان داد که ویژگی های مقاومتی با اندازه کانی های خاص مثل کوارتز یا مجموع آنها مثل مجموع کوارتز و فلدسپار ارتباط قوی ندارند این امر در مورد تمام ویژگی های هندسی همچون مساحت، محیط، قطر معادل، دایروی گونی، طولیل شدگی و غیره صدق می کند.

اما بررسی نسبت اندازه میانگین کانی ها نشان داد که نسبت اندازه میانگین کوارتز بر اندازه میانگین پلاژیوکلاز تنها ویژگی هندسی است که بدون توجه به نوع و تیپ سنگ آذرین بلورین مورد بررسی با ویژگی های مقاومتی ارتباط برقرار می کند. این ارتباط بویژه وقتی دامنه کانی شناسی بزرگتر از ۰/۱ میلیمتر مربع بررسی می گردد بطور محسوسی بالا می رود. هر چند درجه این همبستگی چندان قوی نیست ($R^2=0.61$) اما بدلیل تنوع نوع و اندازه کانی شناسی سنگهای آذرین بلورین قابل توجه است.

همچنین بررسی آماری اندازه کانی شناسی سنگهای مورد آزمون نشان داد که با توجه به توزیع حدود ۴۵/۹ درصد کانی های تشکیل دهنده در دامنه ابعادی زیر قطر یک میلیمتر مربع، قطر ۱ میلیمتر احتمالاً قطر شاخص در ساختار کانی شناسی سنگهای آذرین متبلور باشد. بنابراین تمرکز و هدایت بررسی های کانی شناسی در پیرامون قطر ۱ میلیمتر احتمالاً نتایج مثبتی در ارزیابی خصوصیات مهندسی یا پتروگرافی این سنگها خواهد داشت.

منابع

- ASTM D2938-95. (2002). Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures for testing materials. American Society for Testing Materials.
- Brattli, B. (1992). The influence of geological factors on the mechanical properties of basic igneous rocks used as road surface aggregates. Engineering Geology, 33 (1992) 31-44.
- D'Andrea, D.V. Fischer, R.L. Fogelson, D.E. (1965). Prediction of compressive strength from other rock properties. US Bureau of Mines Rep. Investigation, No. 6702.
- Gunsallus, K. L. and Kulhaw, F. H. (1984). A comparative evaluation of rock strength measures. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 21, 5, 233-248, 1984.
- ISRM Suggested Methods. (1981). Determining uniaxial compressive strength and deformability of rock materials . In: Brown E.T., ISRM Suggested Methods. Pergamon, Oxford.
- Kahn, J.S. (1956). The analysis and distribution of the properties of packing in sand size sediments. Journal of Geology 64, 385-395.
- Merriam, R. Rieke, H. H. Kim, Y. C. (1970). Tensile strength related to mineralogy and texture of some granitic rocks. Engineering Geology, 4 (1970) 155-160.
- Onodera, T.F. and Kumara, H.M. (1980). Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 22, 173-177.
- Pomonis, P. Rigopoulos, I. Tsikouras, B. Hatzipanagiotou, K. (2007). Relationships between petrographic and physico-mechanical properties of basic igneous rocks from the PINDOS ophiolitic complex, NW GREECE. Bulletin of the Geological Society of Greece, 40, 947-958-Proceedings in 11th Int. Conf. Geol. Soc. Greece, Athens, May 2007, 947-958.
- Prikryl, R. (2006). Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: Limitations and possible source of misinterpretations. Engineering Geology, 87 (2006) 149-162.



- Shakoor, A. and Bonelli, R.E. (1991). Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties, and mechanical properties of selected sandstones. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 28 (1), 55±71.
- Tugrul, A. and Zarif, I. H. (1998). The influence of mineralogical textural and chemical characteristics on the durability of selected sandstones in Istanbul, Turkey . *Bull Eng Geol Env*, 57, 185±190.
- Zorlu, K. Ulusay, R. Ocakoglu, F. Gökçeoglu, C. and Sönmez, H. (2004). Predicting intact rock properties of the selected sandstones using petrographic. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 41, 93–98.