

ارتباط خواص کانی شناسی و بافتی میکروسکوپی با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های گابرو و دیوریت نطنز

مسعود ترکان^۱، محمدرضا ایران‌نژادی^{۲*}، علیرضا باغبانان^۳

دریافت مقاله: ۹۲/۰۶/۰۶ پذیرش مقاله: ۹۳/۰۳/۰۷

چکیده

خصوصیات میکروسکوپی و ژئومکانیکی سنگ‌های ساختمانی آذرین شامل مواردی از جمله میزان دگرسانی، وجود ریزدرزه‌ها، مقاومت نهایی، تخلخل، میزان کانی‌های مضر و ... می‌باشد. براساس پژوهش‌های قبلی، تخلخل در سنگ‌های آذرین به شدت بر روی مقاومت نهایی نمونه‌ی سنگی تأثیرگذار بوده و آن را کاهش می‌دهد. در این تحقیق یک نمونه سنگ گابرویی و یک نمونه سنگ دیوریتی متعلق به یکی از معادن سنگ ساختمانی غرب نطنز انتخاب شدند و مورد بررسی‌های میکروسکوپی و ژئومکانیکی قرار گرفتند. با توجه به مطالعات مقاطع نازک سنگ میزان دگرسانی، وجود ریزدرزه‌ها و کانی‌های مضر مؤثر بر روی استحکام سنگ‌های ساختمانی برآورد گردید. سپس آزمایش‌های ژئومکانیکی مانند تعیین چگالی، تخلخل، شاخص دوام، آزمون کشش برزیلی و مقاومت سه محوره مطابق استانداردهای ISRM انجام شد. داده‌های حاصل با مقادیر استاندارد تطبیق داده شد و پس از آن رابطه‌ی کیفی بین مقاومت و خواص میکروسکوپی مشاهده شد که بیانگر اهمیت مطالعات میکروسکوپی سنگ‌های ساختمانی می‌باشد. از رابطه‌ی به دست آمده می‌توان در مراحل اکتشاف، استخراج و فرآوری سنگ‌های ساختمانی بهره جست و از صرف هزینه‌های گزاف، تخریب محیط‌زیست و منابع ملی که پیامد حذف این مطالعات می‌باشد، جلوگیری به عمل آورد.

کلید واژه‌ها: خصوصیات میکروسکوپی، ویژگی‌های ژئومکانیکی، دگرسانی، سنگ ساختمانی، گابرو، دیوریت

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان Masoud.Torkan@mi.iut.ac.ir

۲. استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان Mohiran@cc.iut.ac.ir

۳. دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان Bagh110@cc.iut.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

گابرو و دیوریت جزو آن دسته از سنگ‌های ساختمانی هستند که به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سنگ‌ها به دلیل استحکام و مقاومت آن در برابر هوازدگی، برای سنگ نما، کف، پله و دیواره تونل استفاده می‌شوند. این دسته از سنگ‌ها دارای رنگ‌های خاکستری مایل به سبز، بژ و گاهی سیاه می‌باشند (عطایی، ۱۳۸۷). سنگ‌های مختلفی که به عنوان سنگ تزئینی انتخاب می‌شوند، در مجموع باید از نظر بعضی مشخصه‌ها دارای حداقل‌هایی باشند. مهم‌ترین مشخصه‌های مطلوب یک سنگ ساختمانی دیوریت - گابرو عبارتند از:

۱- عدم وجود آثار ناشی از پدیده دگرسانی، ۲- عدم وجود عوارض زمین‌شناسی مانند درزه و شکاف، ۳- داشتن قابلیت برش، ساب و صیقل، ۴- داشتن سختی ۵ تا ۶ طبق جدول موهس، ۵- داشتن جذابیت از نظر زیبایی رنگ و تباین رنگ‌ها، ۶- داشتن تخلخل $0/2 - 1/4$ درصد و ضریب جذب آب $0/3 - 0/8$ درصد برای دیوریت و $0/1$ تا $0/3$ درصد برای گابرو، ۷- داشتن مقاومت اصطکاکی فشاری حداقل $100 - 350$ مگاپاسکال و کششی مناسب بین ۱۰ تا ۴۰ درصد مقاومت فشاری، ۸- داشتن دوام بالا نسبت به آتش‌سوزی، یخبندان، عوامل جوی و ... ۹- کوپ دهی و ذخیره مناسب معدن (عطایی، ۱۳۸۷؛ بخشعلی بختیاری و همکاران، ۱۳۸۱)

در بسیاری از معادن سنگ ساختمانی فقط بر روی تعدادی از موارد یاد شده تکیه می‌گردد، در صورتی که مورد اول و دوم از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در دوام سنگ می‌باشند. با توجه به احتمال دگرسانی سنگ‌ها، لازم است از چند نمونه شاخص آنها مقطع نازک تهیه گردیده و عملکرد دگرسانی در زیر میکروسکوپ توسط سنگ‌شناس مورد بررسی قرار گیرد. درزه‌های میکروسکوپی در سنگ‌های آذرین کریستالیزه شده، از جمله گابرو و دیوریت عامل عمده کاهش مقاومت این نوع سنگ‌ها هستند. مطالعات متعددی به منظور یافتن ارتباط بین پارامترهای میکروسکوپی و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های ساختمانی و نما انجام و گزارش شده است (عطایی،

۱۳۸۷؛ بخشعلی بختیاری و همکاران، ۱۳۸۱؛ نبیان و همکاران، ۱۳۷۰).

مطالعات انجام شده شامل دسته‌بندی‌های متفاوتی از ارتباط خواص میکروسکوپی و ژئومکانیکی سنگ‌ها می‌باشد. از این قبیل مطالعات می‌توان به ارتباط اندازه دانه‌بندی (Akesson et al., 2003)، ترکیب کانی‌شناسی (Hajiabdolmajid and Kaiser., 2003; Eberhardt et al., 1999)، مقادیر هوازدگی (Wong et al., 2006)، ترک‌خوردگی‌ها و ریزدرزه‌های موجود در سنگ (Tham et al., 2002; Seo, Sousa et al., 2005)، و ارتباط آنها با خواص ژئومکانیکی سنگ‌های گرانیتی اشاره کرد. در بررسی‌های انجام شده، ارتباط معناداری بین اندازه دانه‌بندی و شکنندگی نسبی برقرار است، به طوری که در دانه‌بندی‌های بزرگتر ترک‌ها به راحتی گسترده می‌شوند (Gunes Yilmaz et al., 2009). همچنین در ترکیب کانی‌شناسی نسبت مقدار کوارتز به فلدسپات بر روی مقدار مقاومت مکانیکی سنگ‌های گرانیتی تأثیر به‌سزایی می‌گذارد (Gunes Yilmaz et al., 2009, Sousa et al., 2005). بررسی توزیع دانه‌بندی بر میزان چقرمگی شکست نیز توسط امرالهی و همکاران (۲۰۱۱) بررسی شده است (Amrollahi et al., 2011). این مطالعات حاکی از اهمیت بررسی‌های سنگ‌شناسی میکروسکوپی در کنار مطالعات تجربی دیگر می‌باشد. بررسی‌های انجام شده تعیین کیفیت یک سنگ ساختمانی را، وابسته به عوامل متعددی نشان می‌دهد.

هدف این تحقیق استفاده از مطالعه مقاطع میکروسکوپی به عنوان یک روش کارآمد، کاربردی و ارزان قیمت جهت تعیین درجه دگرسانی و میزان ناپیوستگی‌های میکروسکوپی (ریز درزه‌ها) در معادن سنگ ساختمانی مقایسه آن با نتایج حاصل از آزمایش‌های تعیین مقاومت و دگرشکل‌پذیری سنگ‌ها می‌باشد که در مطالعات قبلی به آن پرداخته نشده است. این مطالعه سعی دارد رابطه‌ای کیفی بین پارامترهای یاد شده برقرار نماید که می‌تواند در مراحل مختلف اکتشاف، استخراج و فرآوری سنگ‌های ساختمانی باعث کاهش هزینه‌ها و در نهایت تشخیص مناطق پر پتانسیل برای ایجاد یک معدن سنگ

فلدسپات پلاژیوکلاز با محتوای آنورتیت بیش از ۵۰٪ و نیز وجود مقدار زیاد کانی پیروکسن، جنس نمونه Az_1 گابرو تشخیص داده شد. در نمونه Az_2 با توجه فراوانی کانی فلدسپات، مقادیر کم کانی پیروکسن و نسبت کمتر از پنج درصدی کانی کوارتز نسبت به سایر کانی‌های روشن، جنس این نمونه دیوریت تشخیص داده شد. سنگ‌های مذکور دارای بافت‌های ساب‌هدرال گرانولار، گرانولار تا انترگرانولار می‌باشند. مقادیر حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱. درصد کانی‌های موجود در نمونه‌ها

درصد کانی‌های موجود (%)		کانی
Az_2	Az_1	
۴/۲۵	۳۱/۵	کلینوپيروكسن (CPx)
۵۸	۶۱	فلدسپات (Plag)
۴/۷۵	۵/۵	اوپک (Op)
۲	<۲	کلریت (Chl)
۴/۷۵	-	کوارتز (Qz)
۵/۵	-	بیوتیت (Bio)
۲۰	-	آمفیبول (Amph)
۰/۷۵	-	آپاتیت (Ap)

در ادامه بررسی‌های انجام شده، مقدار دگرسانی کانی‌های موجود در سنگ‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفتند. نوع کانی حاصل از دگرسانی و مقدار آن در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۲. مقادیر دگرسانی سنگ‌ها

نوع دگرسانی		درصد دگرسانی (%)
Az_1	کلریتی	
Az_1	۲	
Az_2	۲	

در نمونه Az_1 تبدیل کانی پیروکسن به کلریت عامل دگرسانی سنگ می‌باشد. در نمونه سنگ Az_2 آمفیبول بیشتر به کلریت تجزیه شده است و عامل دگرسانی سنگ می‌باشد. همچنین متوسط اندازه کانی‌های دو نمونه نیز اندازه‌گیری و در جدول ۳ آورده شده است. اندازه‌های برآورد شده در جدول ۳ و شکل‌های ۱ و ۲ ریزدانه بودن این سنگ‌ها را نشان می‌دهد.

ساختمانی استفاده شود. در این پژوهش ابتدا با باز دیده‌ها و برداشت‌های صحرایی از معادن مختلف، تعداد ۶ عدد کوپ سنگی با ابعاد ۰/۵×۰/۵×۰/۷۵ متر، سنگ انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شد. سپس بررسی میکروسکوپی با تهیه مقاطع نازک و ارزیابی مکانیکی با تهیه نمونه‌های استاندارد انجام گردید. مقایسه نتایج حاصل، اهمیت بررسی‌های میکروسکوپی را پیش از انجام آزمایش‌های مکانیکی نشان می‌دهد.

۲. بررسی‌های آزمایشگاهی

۲-۱. برداشت صحرایی

برای انجام این مطالعه، تعداد زیادی نمونه سنگ از دو جبهه‌کار متفاوت در یکی از معادن فعال سنگ ساختمانی غرب نظنز (غرب روستای اوره) برای بررسی‌های میکروسکوپی و مکانیکی انتخاب شد. این سنگ‌ها برای مصارف ساختمانی و تزئینی در سنگ‌بری‌های شهرک صنعتی محمودآباد اصفهان برش و صیقل داده می‌شوند. این نمونه‌ها Az_1 و Az_2 نام‌گذاری شده‌اند. سنگ‌های انتخابی به صورت بلوک‌های نسبتاً بزرگی تهیه شد، تا بتوان تمام نمونه‌های لازم را برای آزمایش‌های مختلف تهیه کرد. جنس نمونه‌های برداشت شده در دید ماکروسکوپی اولیه گابرو تا دیوریت تشخیص داده شد. توده‌ی مورد بررسی به صورت یک استوک از سنگ‌های بازیگ و حد واسط با رنگ تیره می‌باشد که در درون گرانیتهای روشن نفوذ کرده است. کل توده‌های آذرین نفوذی مربوط به ماگماتیسم در زون ارومیه- دختر و با سن الیگوسن می‌باشد (هنرمند و همکاران، ۱۳۸۹).

۲-۲. مطالعات پتروگرافی بر روی نمونه‌های Az_1 و Az_2

از بقایای مغزه‌های آماده شده برای آزمایش‌های مکانیکی تعداد ۶ مقطع نازک برای هر نمونه تهیه شد، به نحوی که نیمی از مقاطع در راستای محور مغزه و نیمی دیگر در راستای عمود بر محور مغزه باشد. در بررسی مقاطع، جهت یافتگی خاصی در نمونه‌ها مشاهده نشد. در ادامه با توجه به وجود کانی‌های

شده، در جدول ۴ آورده شده است. با وجود مقادیر نسبتاً یکسان چگالی خشک و شاخص دوام برای دو نمونه، میزان تخلخل در نمونه‌ی Az_1 تقریباً دو برابر نمونه‌ی Az_2 است.

جدول ۴. مقادیر خواص فیزیکی برای نمونه مورد آزمایش

نمونه	چگالی خشک ρ_b (gr/cm ³)	تخلخل n (%)	میزان جذب آب (%)	شاخص دوام Id (%)
Az_1	۲/۸۶۹	۱/۳۴	۰/۱۳۶	۹۹/۴
Az_2	۲/۸۱۶	۰/۷۱	۰/۰۷۲	۹۹/۶

۲-۲. امواج صوتی

برای تعیین اندیس کیفیت سنگ از روش پالس التراسونیک استفاده شده است. در این روش با استفاده از نمونه‌های آماده شده برای آزمایش‌های تعیین مقاومت سه‌محوره (استوانه‌ای) مقادیر سرعت در هر نمونه اندازه‌گیری شده است. هر سنگ دارای سرعت ایده‌آلی می‌باشد که این مقدار مرجع برای هر نمونه، مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شاخص کیفیت سنگ با استفاده از رابطه‌ی ۱ در جدول ۵ ارائه شده است (فهیمی فر و همکاران، ۱۳۸۰).

$$IQ\% = \frac{v}{v^*} \times 100 \quad (1)$$

که در آن

v : برابر با سرعت اندازه‌گیری شده (m/s)

v^* : برابر با سرعت ایده آل (m/s)

IQ: شاخص کیفیت سنگ (%)

در انتها رده‌ی هر سنگ با توجه به مقدار شاخص کیفیت هر سنگ آورده شده است؛ که نمونه Az_1 در رده‌ای با گسستگی متوسط و نمونه Az_2 در رده‌ای با گسستگی کم قرار می‌گیرد.

جدول ۵. مقادیر آزمایش امواج صوتی

نمونه	v (m/s)	v^* (m/s)	IQ (%)	رده‌بندی سنگ
Az_1	۵۴۴۶	۷۰۰۰	۷۷/۸	گسستگی متوسط
Az_2	۶۱۳۳	۶۷۰۰	۹۱/۵	گسستگی کم

در بررسی‌های میکروسکوپی، رگچه‌هایی در مقاطع نازک در هر دو نمونه مشاهده شد. رگچه‌های موجود در نمونه Az_1 با کانی کلریت و در نمونه Az_2 با کانی‌های کوارتز و بیوتیت پر شده‌اند. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب تصاویر مربوط به بررسی میکروسکوپی نمونه‌های Az_1 و Az_2 را نشان می‌دهد (شکل‌های ۱-الف و ج و ۲-الف و ج در نور طبیعی و شکل‌های ۱-ب و د و ۲-ب و د در نور پلاریزه). خطوط رسم شده در تصاویر مربوط به نور طبیعی مکان رگچه‌ها و حدودی از اطراف آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳. متوسط اندازه کانی‌ها

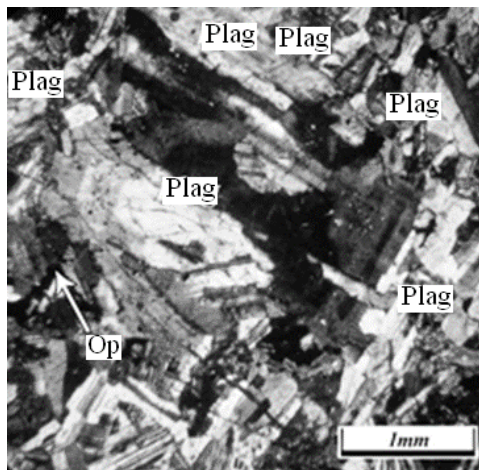
کانی	اندازه کانی‌های موجود (mm)	
	Az_1	Az_2
کلینوپروکسن (CPx)	۰/۵۰	۰/۷۰
فلدسپات (Plag)	۰/۹۳	۰/۹۲
اوپک (Op)	۰/۲۲	۰/۳۱
کلریت (Chl)	۰/۵۰	۰/۳۸
کوارتز (Qz)	-	۰/۲۷
بیوتیت (Bio)	-	۰/۶۴
آمفیبول (Amph)	-	۰/۹۴
آپاتیت (Ap)	-	۰/۳۲

با توجه به بررسی‌های میکروسکوپی و شکل‌های ۱ و ۲ این نتیجه حاصل می‌شود که چگالی دسته درزه‌ها در نمونه Az_1 به مراتب بیشتر از نمونه‌ی Az_2 می‌باشد.

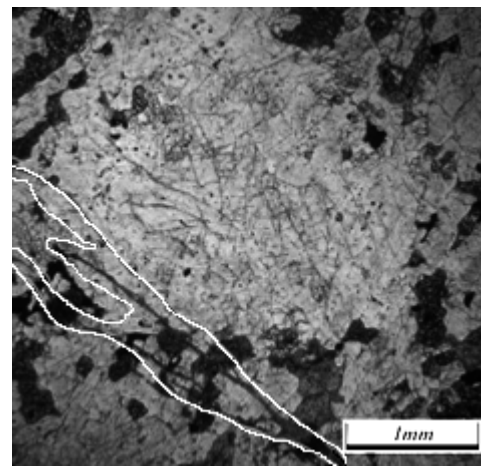
۲-۳. آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی

۲-۳-۱. تعیین خواص فیزیکی

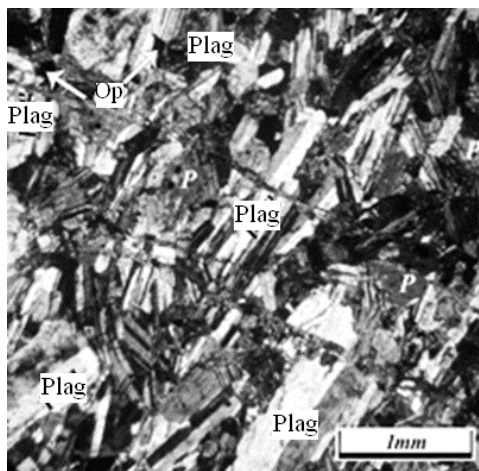
برای به دست آوردن چگالی خشک، تخلخل، میزان جذب آب و شاخص دوام از دستورالعمل ISRM در سال ۱۹۷۲ پیروی شده است (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰). نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش به شکل کلوخه‌ای از باقیمانده‌های مغزه‌های تهیه شده سنگ‌های Az_1 و Az_2 به دست آمده‌اند. میانگین مقادیر موجود برای ۳ مرتبه تکرار آزمایش‌های ذکر



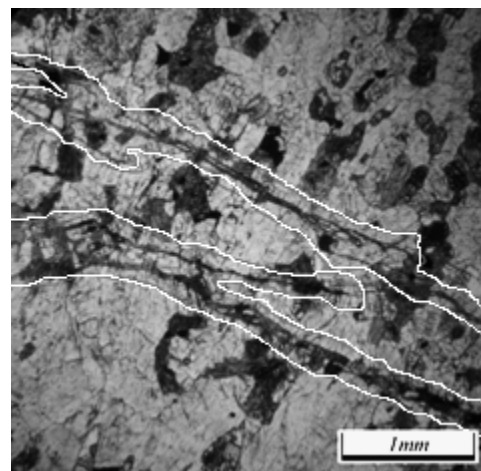
(ب)



(الف)

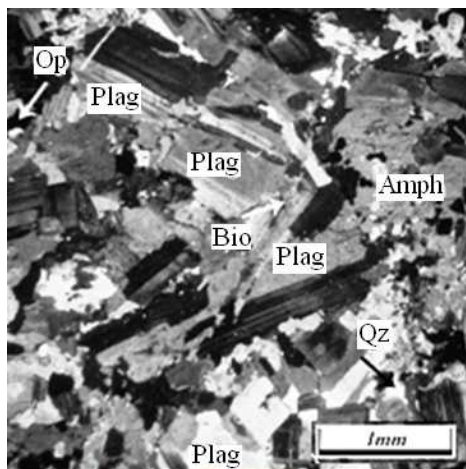


(د)

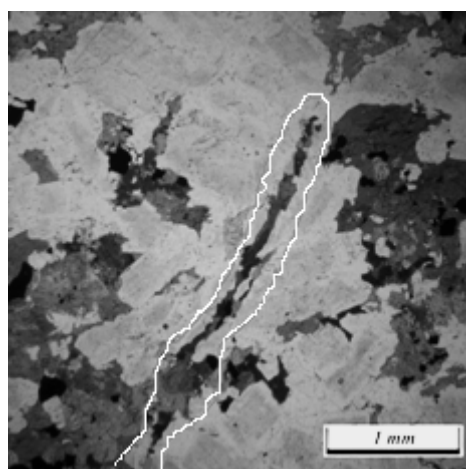


(ج)

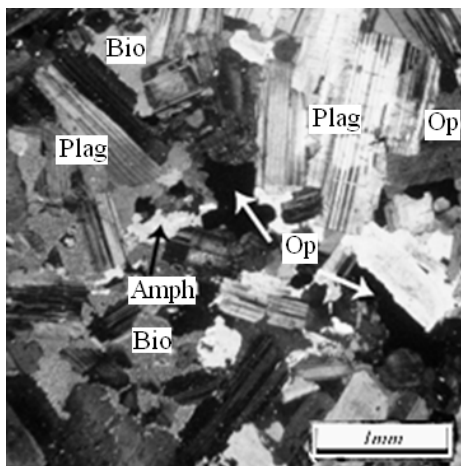
شکل ۱. تصاویر مقاطع میکروسکوپی سنگ گابرویی AZ_۱ (الف و ج) تصویر در نور طبیعی (خطوط ترسیم شده موقعیت رگچه‌ها و مقداری از اطراف آنها را نشان می‌دهد)، رگچه‌ها توسط بلورهای کوچک کلریت و مقداری کمی بیوتیت پر شده‌اند، (ب و د) تصویر در نور پلاریزه. (فلدسپات (Plag) و اوپک (Op)).



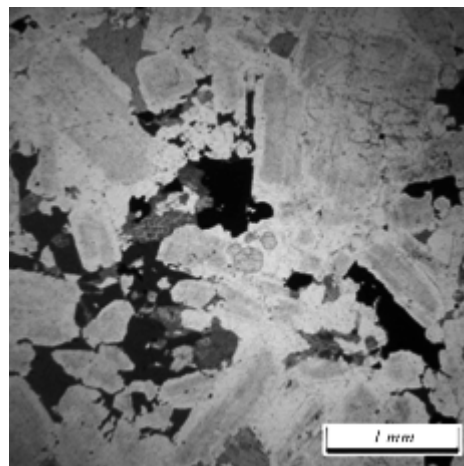
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲. تصاویر مقاطع میکروسکوپی سنگ دیوریتی Az_7 . (الف و ج) تصویر در نور طبیعی (خطوط ترسیم شده موقعیت رگچه‌ها و مقداری از اطراف آنها را نشان می‌دهد)، رگچه‌ها توسط بلورهای کوچک بیوتیت و مقداری کمی کلریت پر شده‌اند، (ب و د) تصویر در نور پلاریزه. (فلدسپات (Plag)، اوپک (Op)، کلریت (Chl)، کوارتز (Qz)، بیوتیت (Bio)، آمفیبول (Amph)).

جدول ۶. مقادیر تنش جانبی و محوری در لحظه شکست

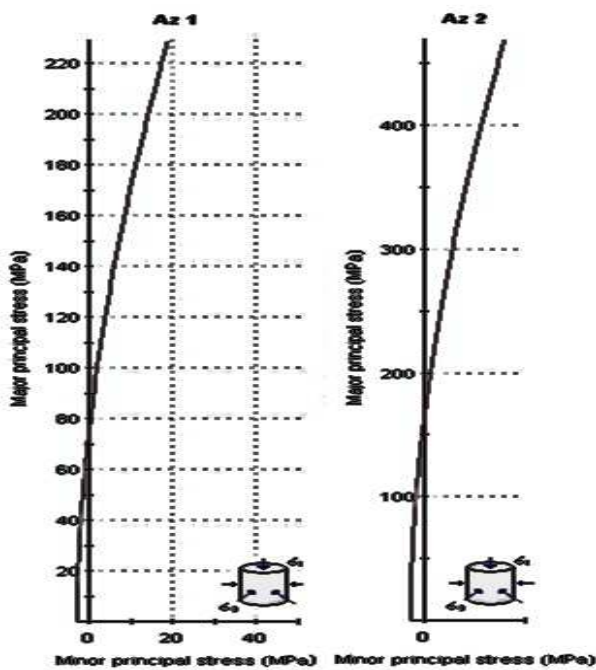
حداکثر مقاومت محوری (MPa)		تنش جانبی (MPa)	
Az_7	Az_1	Az_7	Az_1
۱۵۷/۲۷	-	۰	-
۲۴۴/۶۴	۹۶/۱۱	۴	۲
۲۷۰/۸۵	۱۴۸/۵۳	۶	۴
۳۲۷/۶۵	۲۲۲/۸	۱۰	۸

با استفاده از مقادیر جدول ۶ و نرم‌افزار Rocklab، نمودار تنش قائم- مقاومت برشی ($\tau - \sigma$) و پوش موهر- کلمب و نمودار حداکثر مقاومت محوری- تنش جانبی ($\sigma_1 - \sigma_2$) برای هر نمونه رسم و در شکل ۳ و ۴ نمایش داده شده است. نتایج ارایه شده در جدول ۷ داده‌های به دست آمده از این نرم‌افزار می‌باشد. مقادیر چسبندگی، مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی تک محوره در این جدول برای نمونه Az_7 در حدود دو برابر نمونه Az_1 می‌باشد. تنها زاویه‌ی اصطکاک به دست آمده برای دو سنگ مشابه یکدیگر می‌باشد.

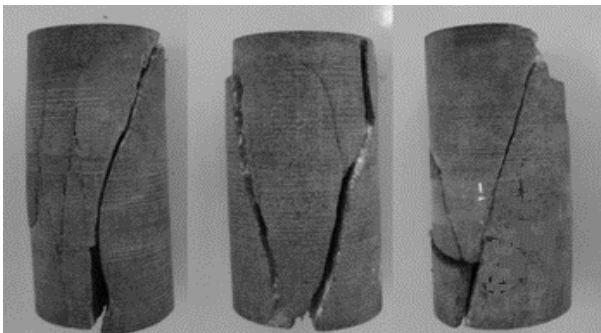
شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب تعدادی از نمونه‌های Az_1 و Az_7 را پس از انجام آزمایش سه محوره در تنش‌های جانبی ذکر شده در جدول ۶ نشان می‌دهد. نحوه‌ی شکست در نمونه‌ها به صورت صفحه‌ای بوده و اغلب نمونه‌ها در مقاومت‌های محوری بالا و زوایای شکست بالا (در حدود ۷۵ درجه) دچار گسیختگی شده‌اند.

۳-۲. آزمایش مقاومت فشاری سه محوره

این آزمایش عبارت است از اعمال فشار محوری همزمان با اعمال فشارهای جانبی متقارن محوری بر نمونه استوانه‌ای شکل از سنگ. نمونه‌ها بر اساس پیشنهاد ۱۹۷۸ کمیسیون استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) تهیه شده است. مراحل انجام آزمایش‌های سه محوره مطابق دستورالعمل انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ اجرا شده است (ISRM, 1978). آزمایش با استفاده از دستگاه آزمایش سه‌محوره ELE ساخت کشور انگلستان و سلول هوک و در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شده است. نمونه‌های سنگ به قطر ۵۴/۴ میلی‌متر گونه‌ای که دو سطح انتهایی آنها، به طور مساوی و کاملاً صیقلی تهیه شده‌اند (ISRM, 1978). آزمایش سه محوره برای هر یک از نمونه‌های Az_7 و Az_1 ، بر روی ۱۲ نمونه‌ی استوانه‌ای تهیه شده انجام و مقادیر به دست آمده به صورت میانگینی از تنش‌های جانبی و حداکثر مقاومت محوری در جدول ۶ آورده شده است. تنش‌های جانبی اعمال شده به غیر از تنش جانبی ۴ مگاپاسکال، متفاوت بوده و در همین تنش جانبی دارای مقاومت محوری متفاوتی می‌باشد.



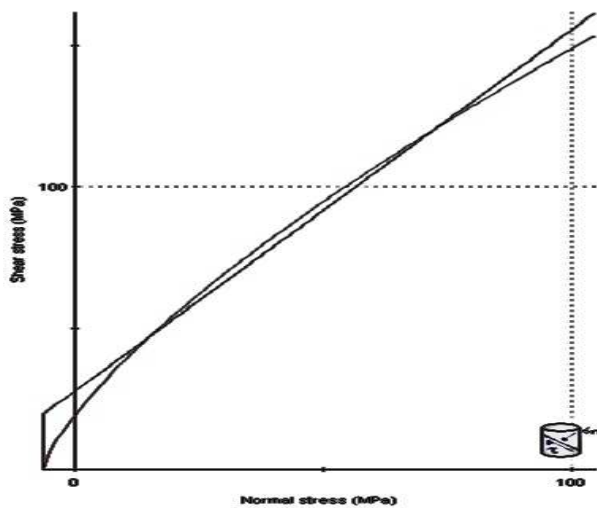
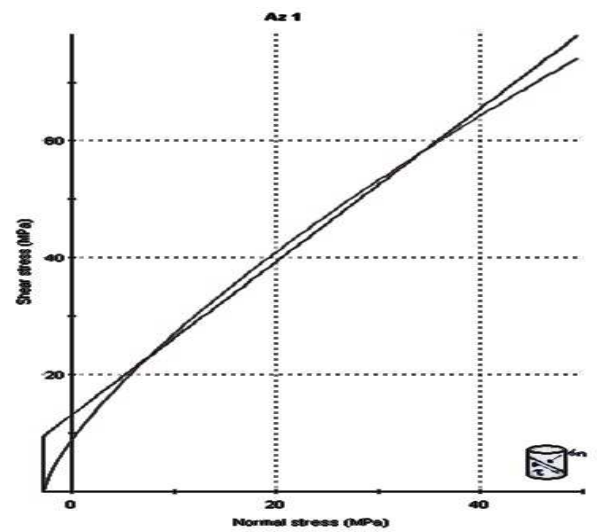
شکل ۴. نمودارهای حداکثر مقاومت محوری- تنش جانبی ترسیم شده با استفاده از نرم‌افزار Rocklab برای دو نمونه Az_1 و Az_2



شکل ۵. نمونه‌های گابروی Az_1 بعد از آزمایش سه محوره



شکل ۶. نمونه‌های دیوریتی Az_2 بعد از آزمایش سه محوره



شکل ۳. نمودارهای ترسیم شده تنش قائم- مقاومت برشی $(\tau - \sigma)$ و پوش موهر- کلمب با استفاده از نرم افزار Rocklab برای دو نمونه Az_1 و Az_2

جدول ۷. مقادیر پارامترهای مکانیکی حاصل از نرم‌افزار

Rocklab		پارامتر
نمونه		
Az_2	Az_1	
۵۱/۹۹	۵۲/۶۶	زاویه اصطکاک داخلی φ
۲۷/۸۹۹	۱۳/۱۳۸	چسبندگی C(MPa)
۱۵۹/۵۶۹	۷۵/۵۱۹	مقاومت فشاری تک محوره σ_c (MPa)
۶/۳۸۳	۲/۷۹۷	مقاومت کششی تک محوره σ_t (MPa)

قرار می‌گیرد. برای نمونه AZ_2 چگالی در دامنه اما تخلخل آن بیش از میزان موجود می‌باشد، که این موضوع با توجه به اینکه تخلخل در سنگ‌های آذرین نقش به‌سزایی ایفا می‌کند حایز اهمیت می‌باشد.

با توجه به داده‌های موجود در جدول ۵، نمونه سنگ AZ_1 در رده‌بندی گسستگی متوسط و AZ_2 در رده‌بندی با گسستگی کم قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج مطالعات میکروسکوپی نمونه AZ_1 دارای چگالی دسته درزه‌ی بالاتری نسبت به نمونه‌ی AZ_2 می‌باشد که این امر به خوبی در رده‌بندی امواج صوتی مشهود می‌باشد.

با توجه به مقادیر حاصل از آزمایش سه‌محوره (جدول ۷) نمونه AZ_2 در بازه‌ی ذکر شده برای سنگ دیوریت قرار می‌گیرد، ولی نمونه AZ_1 مقدار بسیار کمتری از دامنه گزارش شده را نشان می‌دهد، مقاومت کششی حاصل از آزمایش برزیلی (جدول ۸) و مقادیر به دست آمده از آزمایش سه‌محوره (جدول ۷) نتایج معتبری را برای مقاومت کششی ارائه می‌کند. مقادیر حاصل از نرم‌افزار Rocklab و جدول ۷ هر دو نمونه خارج از مقادیر گزارش شده می‌باشد اما نمونه AZ_2 مقدار نزدیک‌تری به مقادیر گزارش شده دارا می‌باشد.

با توجه به مطالعات انجام شده، علت اختلاف مشهود در مقادیر مقاومت فشاری و کششی دو سنگ را می‌توان به دو علت وجود چگالی بیشتر ریز درزه‌ها و میزان دگرسانی بیشتر در نمونه AZ_1 نسبت به نمونه AZ_2 عنوان نمود.

جدول ۹. مقادیر استاندارد برای دو نمونه سنگ مورد بررسی (Akai, 1980)

نوع سنگ		پارامتر
دیوریت	گابرو	
۲/۸۰ - ۳/۰۰	۲/۷۲ - ۳/۰۰	چگالی خشک ρ_b (gr/cm ³)
۰/۱۰ - ۰/۵۰	۱ - ۳/۵۷	تخلخل (n%)
۴۵۰۰ - ۶۷۰۰	۴۵۰۰ - ۷۰۰۰	سرعت امواج طولی (m/s)
۱۰۰ - ۳۵۰	۱۵۰ - ۲۵۰	مقاومت فشاری (MPa)
۷ - ۳۰	۷ - ۳۰	مقاومت کششی (MPa)

۲-۴. آزمایش تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم - آزمایش برزیلی

این آزمایش طبق استاندارد ISRM (1978) انجام شده است. مقادیر حاصل نیز با استفاده از رابطه‌ی ۲ به صورت میانگین برای ۳ نمونه با ضخامت ۲۷ میلی‌متر با قطر ۵۴ میلی‌متر، برای دو نمونه‌ی AZ_1 و AZ_2 در جدول ۸ ارائه شده است. مقادیر مقاومت کششی در مقایسه با جدول ۷ بسیار بالاتر است و نمونه AZ_2 نسبت به AZ_1 مقاومت کششی بیشتری از خود نشان می‌دهد.

جدول ۸. مقاومت‌های کششی بدست آمده از آزمایش‌های برزیلی (همه‌ی مقادیر حاصل میانگین‌گیری از نتایج اجرای سه آزمایش مشابه می‌باشند)

نمونه	مقاومت کششی σ_t (Brazilian) (MPa)
AZ_1	۹/۱۰۱
AZ_2	۱۵/۵۱۳

۳. بحث

دو نمونه‌ی انتخاب شده گابرو و دیوریت از نظر شکل ظاهری فاقد درزه و هوازدگی می‌باشند. ولی در بررسی خواص مینرالوژیکی سنگ‌ها، نمونه AZ_1 وجود دگرسانی پیروکسن به کلریت، وجود ریزدرزه‌ها و رگچه‌هایی با پرشدگی کلریت را در مقطع نازک نشان می‌دهد (شکل ۲). در مقطع نازک نمونه AZ_2 دگرسانی کانی‌های موجود، به خصوص کانی فلدسپات به کلریت و وجود رگچه‌هایی با پرشدگی کلریت و بیوتیت قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۳).

در بررسی‌های انجام شده محققان، مقادیر متفاوتی از چگالی، تخلخل، سرعت امواج طولی، مقاومت فشاری و کششی برای نمونه‌های سنگ بکر گابرو و دیوریتی گزارش شده است که بعضی از این مقادیر در جدول ۹ ذکر گردیده‌اند.

با توجه به مقایسه مقادیر به دست آمده در بخش آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی و مقادیر گزارش شده برای نمونه AZ_1 چگالی و تخلخل در دامنه استاندارد درج شده در جدول ۹

برای مثال نمونه AZ_2 اگرچه دارای مقاومت مطلوب با استاندارد بوده ولی از لحاظ میکروسکوپی دارای ریزدرزه و دگرسانی می‌باشد که با توجه به موارد استفاده این سنگ، سنگ زودتر از طول عمر واقعی مستهلک شده و کارایی اولیه را نخواهد داشت.

۳- نمونه سنگ AZ_2 با وجود تخلخل بیشتری که نسبت به نمونه سنگ AZ_1 دارا می‌باشد، اما مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد که این خود دلیلی بر تأثیر مقدار دگرسانی و چگالی ریزدرزه‌های بیشتر سنگ AZ_1 نسبت به AZ_2 در مقاومت نهایی‌شان می‌باشد و در نهایت اهمیت مطالعات میکروسکوپی را در بررسی داده‌های ژئومکانیکی نشان می‌دهد.

۴- چنانچه در ابتدای مراحل اکتشاف سنگ‌های ساختمانی از مطالعات میکروسکوپی استفاده شود، می‌توان از صرف هزینه‌های گزاف آزمایش‌های ژئومکانیکی، باز کردن جبهه کارهایی با سنگ‌های نامرغوب و در انتها، از تخریب محیط‌زیست و منابع ملی جلوگیری به عمل آورد.

مطالعات میکروسکوپی در ابتدای اکتشاف سنگ‌های ساختمانی و تطبیق آن با آزمایش‌های ژئومکانیکی باعث جلوگیری از صرف هزینه‌های گزاف برای باز کردن جبهه کار، استخراج و فرآوری سنگ ساختمانی می‌شود. در این روش می‌توان معدن سنگ ساختمانی را از نظر دگرسانی، ریز درزه‌ها، نوع کانی‌های مضر و ... درجه‌بندی و زون‌بندی کرده، که در آخر منجر به کاهش ضایعات و سهولت در استخراج و بالا بردن کیفیت فرآوری سنگ شود. همچنین با انجام این روش می‌توان، در حفظ محیط‌زیست و سرمایه‌های ملی در بخش‌های کلان جلوگیری کرده که در انتها از تولید سنگ نامرغوب و نارضایتی مشتری و پیامدهای جانبی آن پیشگیری خواهد شد.

پیشنهاد می‌شود برای آنکه بتوان رابطه‌ی منطقی و کمی بین مطالعات میکروسکوپی و خواص ژئومکانیکی به دست آورد، بررسی‌ها و آزمایش‌های بیشتری در مورد تمامی سنگ‌های ساختمانی انجام شود.

۴. نتیجه‌گیری

بر اساس داده‌های حاصل از مطالعات میکروسکوپی و ژئومکانیکی و تطبیق آن با داده‌های موجود برای دو نمونه سنگ گابرویی (AZ_1) و دیوریتی (AZ_2) نتایج زیر حاصل گردید:

۱- در بررسی‌ها و مطالعات میکروسکوپی مقدار دگرسانی و وجود ریزدرزه‌ها نشان دهنده‌ی اهمیت این مطالعات و نقش آن‌ها در بررسی سنگ‌های ساختمانی بوده و توجه به شکل ظاهری سنگ‌ها برای درجه‌بندی و نوع استفاده آنها کافی نیست.

۲- در آنالیز داده‌های ژئومکانیک و تطبیق آن با مقادیر استاندارد، هماهنگی با داده‌های میکروسکوپی ضروری است،

منابع

- بخشعلی بختباری، س؛ میرزایی علویجه، ح؛ ۱۳۸۱، راهنمای انتخاب سنگ ساختمانی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، چاپ سوم، ۵۶ صفحه.
- عطایی، م، ۱۳۸۷، استخراج سنگ‌های ساختمانی، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، چاپ اول، ۲۸۶ صفحه.
- فهیمی‌فر، ا، سروش، ح، ۱۳۸۰، "آزمایشگاه مکانیک سنگ مبانی نظری و استانداردها"، جلد اول، شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری و مرکز نشر پرفسور حسایی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۷۴۰ صفحه.

- نیان، ا، فرهادیان، م. ب، برادران، م، حمیدی انارکی، غ. ر، ۱۳۷۰، سنگ‌های تزئینی و نما، وزارت معادن و فلزات، معاونت اکتشافی و معدنی، چاپ اول، ۲۱۳ صفحه.
- هنرمند، م.، مویذ، م.، جهانگیری، ا.، احمدیان، ج.، بهادران، ن.، پاییز ۱۳۸۹، بررسی ویژگی‌های ژئوشیمیایی مجموعه‌ی نفوذی نطنز، شمال اصفهان، مجله پترولوژی، سال اول، شماره سوم، صفحه ۶۵-۸۸.
- Akai B. S, 1980, Properties of Rock Materials for Engineering Aggregates, University of New South Wales, 274 p.
- Akesson, U, Stigh, J, Lindqvist JE, Go`ransson, M, 2003, the influence of foliation on the fragility of granitic rocks, image analysis and quantitative microscopy, *Engineering Geology*, 68: p 275-288.
- Amrollahi, H, Baghbanan, A, Hashemolhosseini, H, 25 June 2011, Measuring fracture toughness of crystalline marbles under modes I and II and mixed mode I-II loading conditions using CCNBD and HCCD specimens, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 48, p 1123-1134.
- Eberhardt E, Stimpson B, Stead D, 1999, the influence of mineralogy on the initiation of micro fractures in granite. In: In: Proceedings of the 9th International congress on rock mechanics. Rotterdam, A.A. Balkema, p 1007-10.
- Gunes Yilmaz,N, Karaca, Z, Goktan, R.M., Akal,C, January 2009, Relative brittleness characterization of some selected granitic building stones, Influence of mineral grain size, *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 1, Pages 370-375
- Hajiabdolmajid,V, Kaiser,P, 2003, Brittleness of rock and stability Assessment in hard rock tunneling, *Tunnel Underground Space Technol*,18, p 35-48.
- ISRM, 1978, Suggested Methods for Determining Sound Velocity, *International Journal of Rock Mechanic and Mining Science and Geomechanical Abstract*. Vol. 15, pp. 53-58.
- ISRM, 1978, Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression, *International Journal of Rock Mechanic and Mining Science and Geomechanical Abstract* Vol.15.pp.47-51.
- ISRM, 1985, Point Load Test Method, *International Journal of Rock Mechanic and Mining Science and Geomechanical Abstract*, Volume 22; No. 2; pp. 51-60.
- Seo, YS, Jeong, GC, Kim, JS, Ichikawa, Y, 2002, Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression. *Engineering Geology*, 63:259-75.
- Sousa, LMO; Rio, LMS; Calleja, L; Argandona ,VGR; Rey, AR., 2005, Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites, *Engineering Geology*, 77, p.153-68.
- Tham, LG, Li, L, Tsui, Y, Lee, PKK, 2003 A replica method for observing microcracks on rock surfaces. *Int J Rock Mech Min Science Geomechanical Abstract*, 40: p785-94.
- Wong, RHC, Lin, P, Tang CA., 2006, Experimental and numerical study on splitting failure of brittle solids containing single pore under uniaxial compression. *Mech Mater*, 38: p 142-59.