مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار و تابستان ۱۳۹۱، جلد پنجم، شماره ۱ و۲، صفحه ۱ تا ۱۶

مطالعه خصوصیات زمین‌شناختی مهندسی گرانیت‌های بروجرد

محمدحسین قبادی [۱*]، محمدرضا رسولی‌فرح [۲]

دریافت مقاله: ۹۰/٤/۱ پذیرش مقاله: ۹۱/۸/۳

چکیده

فراوانی سنگ‌های گرانیتی و استفاده زیاد از آنها به عنوان سنگ نما و مالون، شناخت ویژگی‌های زمین‌شناختی مهندسی این سنگ‌ها را ضروری ساخته است. شناخت تنوع سنگ‌شناختی و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این سنگ‌ها از این جهت که ساختگاه برخی سدها (سدهای شهریار و طرق و پی سازه‌های مسکونی و تجاری را در بعضی از مراکز جمعیتی کشور تشکیل می‌دهند نیز قابل اهمیت می‌باشد. در این پژوهش بر اساس بازدیدهای صحرایی در شمال و شمال‌خاوری بروجرد، رخنمون‌های مناسب توده گرانیتی بروجرد شناسایی شد و نمونه‌برداری از آن ها انجام شد. با مطالعه مقاطع نازک از نمونه‌های تهیه شده از ۷ معدن، خصوصیات کانی‌شناختی، بافت و نام زمین‌شناختی گرانیت‌ها تعیین گردید. با توجه به نتایج حاصله توده گرانیتی بروجرد متشکل از گرانودیوریت، مونزوگرانیت، گرانیت سفید و تونالیت می‌باشد. مطالعات سنگ‌شناختی وجود شکستگی‌های میکروسکوپی ناشی از تکتونیک فعال منطقه را تایید می‌کند. در این پژوهش خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ۲۲٤ نمونه سنگ گرانیت با انجام آزمون‌های استاندارد تعیین شده است. مطابق با رده‌بندی آنون (Anon) وزن واحد حجم گرانیت‌های بروجرد متوسط تا زیاد می‌باشد. میزان جذب آب در اکثر نمونه‌ها کمتر از ۱ درصد است. حداکثر سختی آنها ۵۳ و حداقل ۳۹ می‌باشد. شاخص دوام این سنگ‌ها بعد از ۱۵ سیکل حداقل ۹٦/۳٤ و حداکثر۹۹/۱۹ درصد بوده است. بیشترین و کمترین مقدار مقاومت کششی در حالت خشک ۳/٦ و ۱۲ مگاپاسکال است. بیشترین مقدار مقاومت فشاری سنگ‌ها ۱۲۳ و کمترین مقدار ۵۸ مگاپاسکال می‌باشد. بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری و نسبت مدولی، گرانیت‌های بروجرد طبق رده‌بندی مهندسی سنگ بکر در رده CL و BL قرار می‌گیرند. روابط به دست آمده بین خصوصیات سنگ‌شناختی، فیزیکی و مکانیکی با ضریب همبستگی مناسب می‌تواند برای انجام مطالعات زمین‌شناختی مهندسی پروژه‌های عمرانی و معدنی در ناحیه فوق مورد استفاده قرار بگیرد.

کلید واژه‌ها: *بروجرد، خصوصیات مکانیکی، سنگ‌شناختی، گرانیت، ویژگی‌های فیزیکی*

۱. عضو هیات علمی گروه زمین‌شناسی دانشگاه بوعلی سینا، همدان *amirghobadi@yahoo.com*
۲. کارشناس ارشد آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

شناخت خصوصیات زمین‌شناختی مهندسی سنگ‌ها مستلزم تعیین ویژگی‌های سنگ‌شناختی، فیزیکی و مکانیکی آنهاست. به این منظور مطالعات صحرایی و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی ضروری می‌باشد. در بررسی‌های صحرایی شرایط توده‌های سنگی از نظر بافت، بافته، کانی‌های قابل تشخیص، میزان هوازدگی، نوع ساختارهای تکتونیکی و چگونگی ارتباط رخنمون‌های سنگی و خاکی ناحیه مورد توجه قرار می‌گیرد. در مطالعات آزمایشگاهی با بررسی مقاطع نازک سنگ‌ها، به طور دقیق ترکیب کانی‌شناختی، بافت، نحوه ارتباط دانه‌ها با یکدیگر و نام زمین‌شناختی سنگ تعیین می‌گردد. همچنین شدت هوازدگی و ساختارهای کوچک مقیاس مانند ترک‌های ریز شناسایی می‌شوند. سپس با استفاده از نمونه‌های جمع‌آوری شده خصوصیات فیزیکی مانند تخلخل و خصوصیات مکانیکی مانند مقاومت تعیین می‌گردد.

به منظور شناخت ویژگی‌های زمین‌شناختی مهندسی گرانیت‌ها تاکنون پژوهش‌های زیادی انجام شده است که می‌توان به مطالعه خصوصیات کانی‌شناختی و بافت گرانیت‌های هوازده (Irfan, 1996)، رابطه بین بافت و خصوصیات مکانیکی برای سنگ‌های دو رگه (Raisanen, 2004) ، استفاده از شاخص شکستگی گرانیت‌ها برای تعیین قابلیت معدنکاری سنگ (Sousa, 2007) و رابطه بین خصوصیات بافتی و مکانیکی گرانیت‌ها (Akesson et al.,2001, Merriam, 1970) اشاره کرد. با وجود این پژوهش‌ها، تاکنون مطالعه جامعی به منظور شناخت خصوصیات زمین‌شناختی مهندسی گرانیت‌های ایران انجام نشده است.

توده گرانیتی بروجرد بخش زیادی از پی سازه‌های مسکونی و تجاری را در ناحیه به خود اختصاص داده است. همچنین از این سنگ‌ها به عنوان سنگ‌های نما، مالون و لاشه در کشور استفاده می‌شود. با توجه به کاربرد فراوان این سنگ‌ها و تغییرات در خصوصیات سنگ‌شناختی، فیزیکی و مکانیکی تعیین ویژگی‌های زمین‌شناختی مهندسی آنها اهمیت زیادی پیدا می‌کند. در این پژوهش رخنمون‌های گرانیتی شمال و شمال خاوری بروجرد با هدف شناخت خصوصیات زمین‌شناختی مهندسی آنها مورد مطالعه قرار گرفته است.

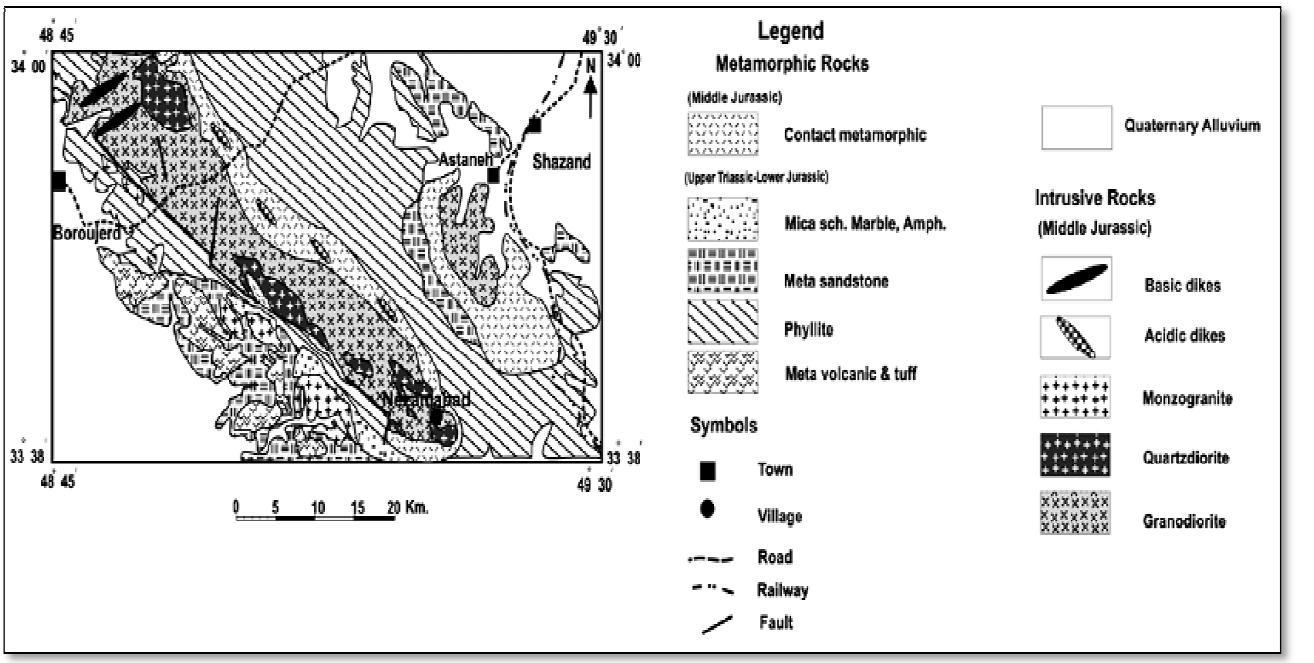
۲. زمین شناسی

توده‌های گرانیتی بروجرد در شمال و شمال شرق بروجرد در ناحیه‌ای با طول جغرافیایی ′۴۵ °۴۸ تا °۴۹ درجه خاوری و عرض جغرافیایی ′۴۵ °۳۳ تا °۳۴ درجه شمالی رخنمون دارند. این مجموعه با چهره خاکستری تیره تا سیاه مناطق و تپه‌های کم‌ارتفاع را تشکیل داده و حدود ۱۵۰ کیلومترمربع وسعت دارد. منطقه شامل یک دگرگونی ناحیه‌ای به عنوان زمینه است که با جای‌گیری توده نفوذی بروجرد، هاله دگرگونی مجاورتی نیز تشکیل شده‌است (شکل۱). در مجموعه گرانیتی بروجرد مونزوگرانیت‌ها، گرانودیوریت‌ها و کوارتزمونزونیت‌ها قابل تفکیک هستند. دایک‌های بازالتی و اسیدی در مجموعه آذرین منطقه قابل مشاهده است. بافت دانه‌ای گرانیت‌ها درشت تا متوسط و در بعضی مناطق توسط دایک‌های اسیدی قطع شده‌اند.

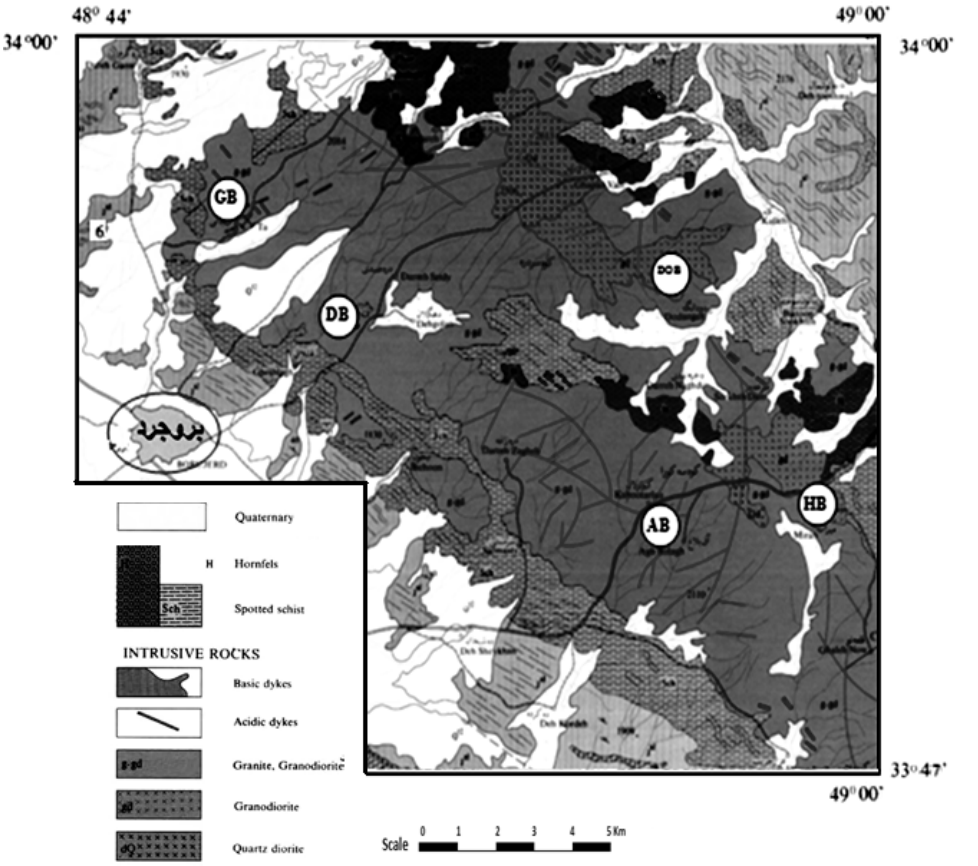
تزریق این توده آذرین علاوه بر ایجاد دگرگونی در نواحی حاشیه‌ای خود، ستیغ‌هایی از سنگ‌های اسیدی هم ایجاد کرده است. بخشی از این ارتفاعات صخره‌ساز را می‌توان در حوالی روستاهای گیجالی، دره صیدی و دهگاه مشاهده نمود. سنگ‌های دگرگونی به صورت میکاشیست، مرمر، آمفیبولیت و فیلیت دیده می‌شوند. توده سنگ‌های دگرگونی با یک مرز گسلی مشخص که در برگیرنده گسل‌های نهاوند، قلعه حاتم و دورود است، به صورت بخشی از روراندگی بزرگ زاگرس از قسمت‌های دیگر جدا می‌باشد(سازمان زمین‌شناختی کشور، ۱۳۷۰).

۳. مواد و روش‌ها

در این تحقیق ضمن بازدید صحرایی از منطقه، رخنمون‌های مناسب توده نفوذی بروجرد در ۷ ایستگاه که اکثراً معادن گرانیت هستند، مشخص شده‌اند (شکل۲).



شکل۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه بروجرد (احمدی خلجی، ۱۳۸٦)



شکل۲. موقعیت ایستگاه‌ها روی نقشه زمین‌شناسی بروجرد با دوایر توخالی نشان داده شده‌است.

(اقتباس از سازمان زمین‌شناختی کشور، ۱۳۷۰)

از ۷ معدن فعال و غیرفعال بلوک‌های سنگی مناسب تهیه گردید و به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه بوعلی سینا منتقل شد. از بلوک‌های سنگی مغزه‌های استوانه‌ای شکل با حداقل طول ۱۳۵ میلی‌متر و قطر X (٥٤ میلی‌متر) تهیه شده برای انجام آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. از مغزه‌های سنگ برای تعیین ویژگی‌های سنگ‌شناختی مقاطع نازک تهیه شد.

در هر ایستگاه با چکش اشمیت نوع N سختی واجهشی سنگ درمحل تعیین گردید. برای انجام مطالعات سنگ‌شناختی، تعداد ١٤ مقطع نازک و برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تعداد ۲۱۰ نمونه طبق استاندارد ISRM(۱۹۸۱) برای ۷ معدن توده گرانیتی بروجرد، تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. آزمون‌های آزمایشگاهی شامل تعیین دانسیته، تخلخل، جذب آب، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت برزیلی و دوام سنگ می‌باشند.

۳-۱. مطالعات سنگ‌شناسی

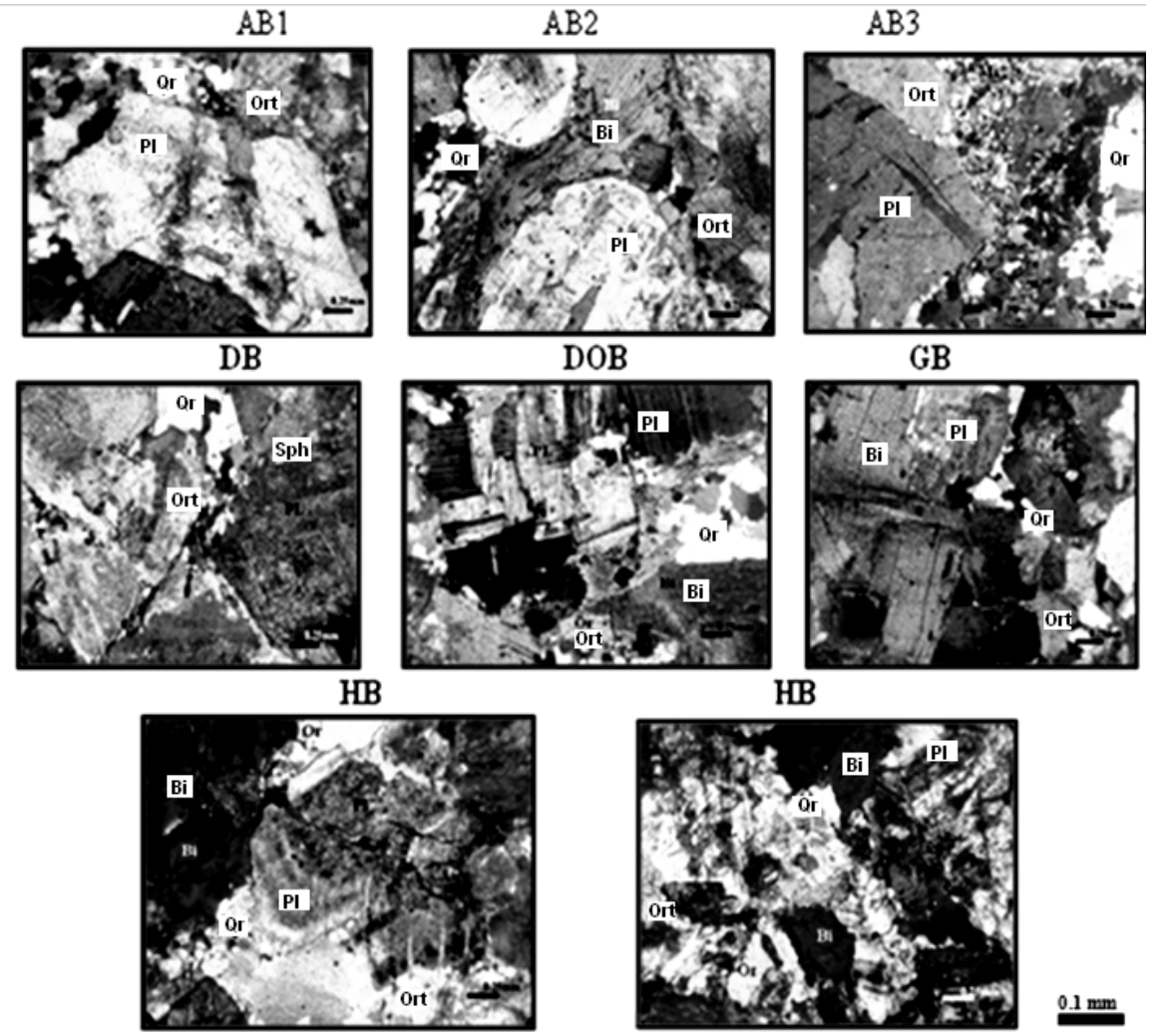
به منظور انجام مطالعات سنگ‌شناختی، در هر ایستگاه تعداد ١٤ مقطع نازک از گرانیت‌های منطقه تهیه شد(شکل۳). با مطالعه مقاطع نازک ، درصد کانی‌ها و بافت گرانیت‌ها مشخص گردید که نتایج مطالعات در جدول۱ نشان داده شده است.

بر اساس ویژگی‌های سنگ‌شناختی، گرانیت‌های بروجرد چهار نوع گرانودیوریت (با بلورهای ریز تا متوسط)، مونزوگرانیت، گرانیت رنگ روشن یا سفید (با بلورهای ریز تا درشت) و تونالیت (با بلورهای دانه متوسط) هستند. کانی‌های اصلی این سنگ‌ها شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، ارتوکلاز و بیوتیت می‌باشند.

اسفن در لوکوگرانیت دهگاه(شکل۳-DB)، آمفیبول در تونالیت هیراب(شکل ۳-HB) و پلاژیوکلاز از نوع آندزین-الیگوکلاز سریسیتی شده، مسکویت، آرژلیت و فلدسپات آلکالن(نوع پرتیت)، همراه با بیوتیت‌های قهوه‌ای فراوان در گرانیت‌های ایستگاه آق‌بلاغ دیده می‌شوند (شکل۳-AB1,AB2,AB3). بافت اصلی شامل مونزوگرانیت‌های پورفیری با پلاژیوکلازهای درشت است. لوکوگرانیت آق‌بلاغ نیز دارای بلورهای درشت و گرانیت اسفن‌دار دهگاه دارای بلورهای ریزدانه می‌باشند. اکثر سنگ‌ها بافت ساب هدرال-گرانولار (دانه‌ای نیمه شکل‌دار) دارند که به صورت جزئی بافت پرتیت (درهم رشدیPL و Or) و زونینگ (تبلور منطقه‌بندی) نیز در آنها دیده می‌شود (شکل۳- HB سمت چپ). نکته قابل توجه اینکه در اکثر مقاطع، خاموشی موجی کوارتز، پلاژیوکلاز، همراه خمیدگی جزئی تا شدید در بیوتیت‌ها دیده می‌شود که نشان دهنده وارد شدن تنش فوق-العاده بر سنگ‌های منطقه است (شکل٤).

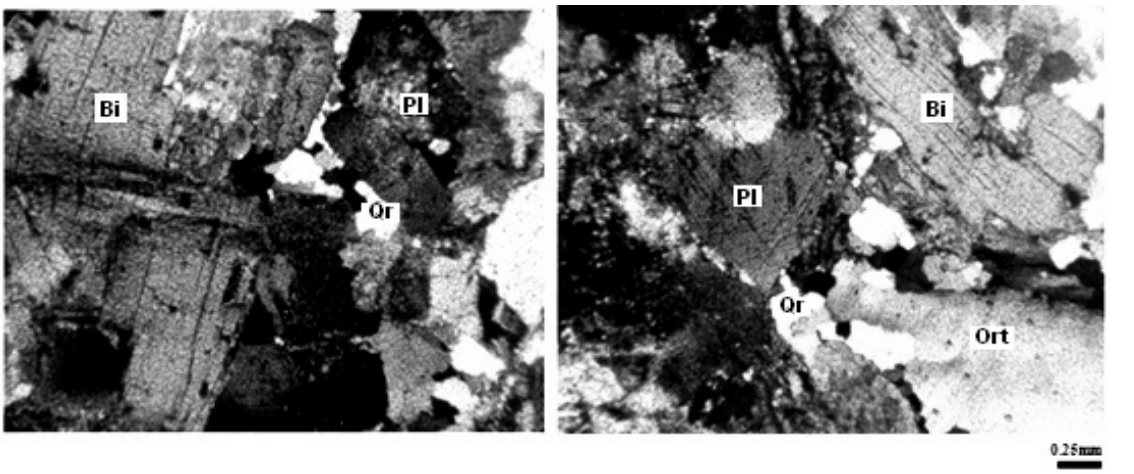
جدول۱. نتایج مطالعات سنگ‌شناختی گرانیت‌ها براساس مطالعه مقاطع نازک

ایستگاه مورد مطالعه		گیجالی (GB)	دهگاه (DB)	هیراب (HB)	دودانگه (DOB)	آق بلاغ (AB1)	آق بلاغ (AB2)	آق بلاغ (AB3)
کانی اصلی	کوارتز(Q)	۳۸	۳٦	۲۳	۳۳	٤٥	٤۲	۳۰
	پلاژیوکلاز(Pl)	۳۱	۳۲	٤٦	۳۰	۲٦	۲۱	٤۸
	ارتوکلاز(Or)	۱۸	۱٦	٥	۱٦	۱٤	۱۸	۲۱
	بیوتیت(Bi)	۱۲	-	۲۲	۲۰	۱٤	۱۹	-
	اسفن(Sph)	-	۱٥	-	-	-	-	-
	هورنبلند(Hor)	-	–	٦	-	–	–	–
بافت سنگ		هم بعد، رشد توأم و رو رشدی(ساب هدرال گرانولار،پرتیت و زونینگ)						
شکل کانی‌ها		نیمه شکل‌دار و در بعضی از سنگ‌ها* بافت متقاطع(اینترگرانولار دیده می‌شود)						
اندازه ذرات		متوسط	ریز	متوسط	ریز تا متوسط	متوسط	متوسط	درشت
نام سنگ		مونزوگرانیت	گرانیت(اسفن دار)	تونالیت	گرانودیوریت	مونزوگرانیت	مونزوگرانیت	لوکوگرانیت



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک گرانیت‌های مورد مطالعه

(Qr:کوارتز، Ort:ارتوز، Pl:پلاژیوکلاز، Bi:بیوتیت و Sph:اسفن)



شکل ٤. تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک گرانیت گیجالی، خمیدگی بلورهای بیوتیت در اثر تنش‌های تکتونیکی

(Qr: کوارتز، Pl: پلاژیوکلاز، Ort: ارتوکلاز، Bi: بیوتیت)

۳-۲. *خصوصیات زمین‌شناختی مهندسی*

به منظور تعیین خصوصیات زمین‌شناختی مهندسی گرانیت‌های بروجرد علاوه بر مشخص شدن خصوصیات سنگ‌شناختی تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مذکور مورد توجه قرار گرفت. این آزمون‌ها با روش‌های استاندارد به شرح ذیل انجام و از نتایج آنها برای تعیین ارتباط ویژگی‌های زمین‌شناختی با پارامترهای مهندسی استفاده گردید.

۳-۲-۱. *خصوصیات فیزیکی*

خصوصیات فیزیکی به وسیله آزمون‌های آزمایشگاهی طبق روش‌های (ISRM,1981) تعیین شده‌اند. این ویژگی‌ها شامل درصد تخلخل(n%)، شاخص پوکی(Iv)، وزن واحد حجم خشک(γ_d)، وزن واحد حجم مرطوب(γ_m)، وزن واحد حجم اشباع(γ_{sat}) و درصد رطوبت طبیعی می‌باشد که نتایج در جدول۲ ارائه شده است. بر این ÷ایه رطوبت نمونه‌ها از ۰/۰٦ تا ۰/۲۵ درصد متغیر می‌باشد. درصد جذب آب یا شاخص پوکی(Iv) نیز در مونزوگرانیت آق‌بلاغ۲ (AB2) با ۰/۹۲ درصد بیشترین مقدار و در گرانودیوریت دودانگه (DOB) با ۰/۱۵ درصد کمترین مقدار را نشان می‌دهد.

جدول۲. مقادیرخصوصیات فیزیکی گرانیت‌های مورد مطالعه (بر اساس استاندارد ISRM,۱۹۸۱)

	نام گرانیت		گیجالی	دهگاه	هیراب	دودانگه	آق بلاغ۱	آق بلاغ۲	آق بلاغ۳
	پارامتر	واحد	رنج	(GB)	(DB)	(HB)	(DOB)	(AB1)	(AB2)	(AB3)
خواص فیزیکی	γ_d	gr / cm^3	حداقل	۲/٦٥٦	۲/٦۲۳	۲/۷۳۳	۲/۷٥٤	۲/٦۳۲	۲/٥۷۹	۲/٦۲۳
			میانگین	**۲/٦٥۷**	**۲/٦۳۲**	**۲/۷۳٤**	**۲/۷٦۱**	**۲/٦٤۲**	**۲/٥۸٦**	**۲/٦۳۷**
			حداکثر	۲/٦٥۸	۲/٦٤٤	۲/۷۳٥	۲/۷٦۹	۲/٦٥۱	۲/٥۹۷	۲/٦٤۷
	γ_m		حداقل	۲/٦٥٦	۲/٦۲٥	۲/۷۳۸	۲/۷٥٦	۲/٦۳٦	۲/٥۸٦	۲/٦۲۷
			میانگین	**۲/٦٦۱**	**۲/٦۳٤**	**۲/۷٤۰**	**۲/۷٦۳**	**۲/٦٤۷**	**۲/٥۹۲**	**۲/٦٤۱**
			حداکثر	۲/٦٦۲	۲/٦٤۷	۲/۷٤۳	۲/۷۷۱	۲/٦٥٦	۲/٦۰۳	۲/٦٥۱
	γ_{sat}		حداقل	۲/٦٦۸	۲/٦۳۸	۲/۷٤۷	۲/۷٥۹	۲/٦٤۷	۲/٥۹۸	۲/٦۳٥
			میانگین	**۲/٦٦۹**	**۲/٦٤٦**	**۲/۷٤۸**	**۲/۷٦٥**	**۲/٦٥۷**	**۲/٦۱۰**	**۲/٦٥۰**
			حداکثر	۲/٦۷۰	۲/٦٥۷	۲/۷٥۰	۲/۷۷۳	۲/٦٦٥	۲/٦۲۰	۲/٦٦۰
	n	٪	حداقل	۱/۱۱۱	۱/۳۰۲	۱/۳۰۷	۲/۳٦٥	۱/۳۹۲	۱/۹۱۰	۱/۲۷٦
			میانگین	**۱/۱٤**	**۱/۳۹٦**	**۱/۳۷۹**	**۰/٤۱٦**	**۱/٥۰٤**	**۲/۳۸۲**	**۱/۲۷٥**
			حداکثر	۱/۱۸٤	۱/٤٦۳	۱/٥۰۱	۰/٤۸۹	۱/٦٥۱	۲/۳۰۸	۱/۳۰۹
	e	----	حداقل	۰/۰۱۱	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۰٤	۰/۰۱٤	۰/۰۱۹	۰/۰۱۳
			میانگین	**۰/۰۱۲**	**۰/۰۱٤**	**۰/۰۱٤**	**۰/۰۰٤**	**۰/۰۱٥**	**۰/۰۲٤**	**۰/۰۱۳**
			حداکثر	۰/۰۱۲	۰/۰۱٥	۰/۰۱٥	۰/۰۰٥	۰/۰۱۷	۰/۰۳۰	۰/۰۱۳
	Iv	٪	حداقل	۰/٤۱۸	۰/٤۹۲	۰/٤۷۸	۰/۱۳۲	۰/٥۲٥	۰/۷٤۰	۰/٤٦۹
			میانگین	**۰/٤۲۹**	**۰/٥۳۱**	**۰/٥۰٤**	**۰/۱٥۱**	**۰/٥٦۹**	**۰/۹۲۱**	**۰/٤۸۳**
			حداکثر	۰/٤٤٦	۰/٥٥۸	۰/٥٤۹	۰/۱۷۷	۰/٦۲٥	۱/۱۳٤	۰/٤۹٥
	G_S	----	حداقل	۲/٦۸۷	۲/٦٦۲	۲/۷۷۰	۲/۷٦۸	۲/٦۷۱	۲/٦۳۰	۲/٦٥۷
			میانگین	**۲/٦۸۸**	**۲/٦٦۹**	**۲/۷۷۲**	**۲/۷۷۳**	**۲/٦۸۳**	**۲/٦٤۹**	**۲/٦۷۱**
			حداکثر	۲/٦۸۹	۲/۲۷۹	۲/۷۷۷	۲/۷۸۰	۲/٦۸۹	۲/٦٥۹	۲/٦۸۲
	ω	٪	حداقل	۰/۱۱٦	۰/۰۸٤	۰/۱۷۱	۰/۰۳٤	**۰/۱٤۹**	۰/۲۱٤	۰/۰۹٤
			میانگین	**۰/۱۳۸**	**۰/۰۹۳**	**۰/۲۲۷**	**۰/۰٦۱**	**۰/۱۷٥**	**۰/۲٥٦**	**۰/۱٤۲**
			حداکثر	۰/۱۲٥	۰/۰۹۸	۰/۲۸۹	۰/۰۷۷	۰/۱۹۱	۰/۲۹۳	۰/۱۷۱

همان‌طور که در جدول۲ مشاهده می‌شود کمترین تخلخل مربوط به گرانیت دودانگه با ۰/٤۱ درصد و بیشترین مقدارتخلخل مربوط به گرانیت آق‌بلاغ (۲) با ۲/۳ درصد است و سایر گرانیت‌ها بیشتر از ۱ درصد تخلخل دارند. بر اساس رده‌بندی تخلخل و دانسیته این سنگ‌ها(Anon, 1979)، گرانیت دودانگه تخلخل خیلی کم و سایرگرانیت‌ها تخلخل کمی دارند. همچنین با توجه به این رده‌بندی گرانیت دودانگه وزن واحد حجم زیاد و بقیه گرانیت‌ها وزن واحد حجم متوسط دارند.

۳-۲-۲. سختی واجهشی سنگ

از حدود ٤۰ سال پیش، بازگشت ارتجاعی حاصل از نیروی فنر چکش اشمیت با نام سختی واجهشی و به عنوان عاملی برای برآورد سریع مقاومت بتن به کار گرفته شد. به مرور پژوهشگران دیگری از این وسیله به طور غیرمستقیم برای پیش‌بینی مقاومت سطوح درزه یا سنگ بکر استفاده کردند(Sachpazis, 1990, Aydin and Oktan, 1992, Katzl et al., 2000). بیشترین کاربرد سختی، برای برآورد غیرمستقیم مقاومت فشاری تک‌محوری پروژه‌های مهندسی کوچک می‌باشد. در این پژوهش نیز با استفاده از چکش اشمیت نوع N سختی گرانیت‌های بروجرد اندازه‌گیری شد. در جدول۳ نتایج سختی واجهشی اشمیت طبق روش استاندارد (ISRM,1981) پس از تصحیح ارائه شده‌است. بر این اساس مونزوگرانیت گیجالی و گرانیت سفید دهگاه با سختی واجهشی نزدیک به ۵۰ در بالاترین رده قرار می‌گیرند و تونالیت هیراب با سختی واجهشی ۳۹ دارای کمترین مقدار است.

۳-۲-۳. شاخص دوام سنگ

در آزمایش دوام و شکفتگی سنگ‌های سخت بخصوص در مواقعی که بعنوان مصالح سنگی در ساخت موج‌شکن‌ها در خطوط ساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به جای استفاده از شاخص دوام مرحله دوم(Id2)، شاخص دوام و شکفتگی سنگ در مرحله پانزدهم آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد (Angeli et al., 2009). از این نظر آزمایش‌های دوام تا مرحله ۱۵ انجام گرفت تا اثرات افزایش میزان هوازدگی و تخلخل بر روی دوام گرانیت‌ها، بهتر مطالعه گردد. در این آزمون شاخص دوام در سیکل دوم از رابطه ۱ مطابق با استاندارد ASTM D 4644 – 87, 1998 محاسبه شده است. برای مراحل بعدی نیز با قرار دادن Id_n به جای Id_2 مقادیر شاخص دوام تا مرحله۱۵ محاسبه گردیده است.

$$Id_2 = \frac{W_f - C}{B - C} \times 100 \qquad (۱)$$

Id_2 : شاخص دوام مرحله دوم (٪)

W_f : جرم خشک اولیه استوانه و نمونه (gr)

C : جرم استوانهٔ مشبک (gr)

B : جرم نهایی خشک استوانه و نمونه (gr) در مرحله دوم

در شکل۵ نمودار مقایسه‌ای شاخص دوام در سیکل ۱، ۵ ، ۱۰ و ۱۵ برای گرانیت‌های منطقه بروجرد ارائه شده است.

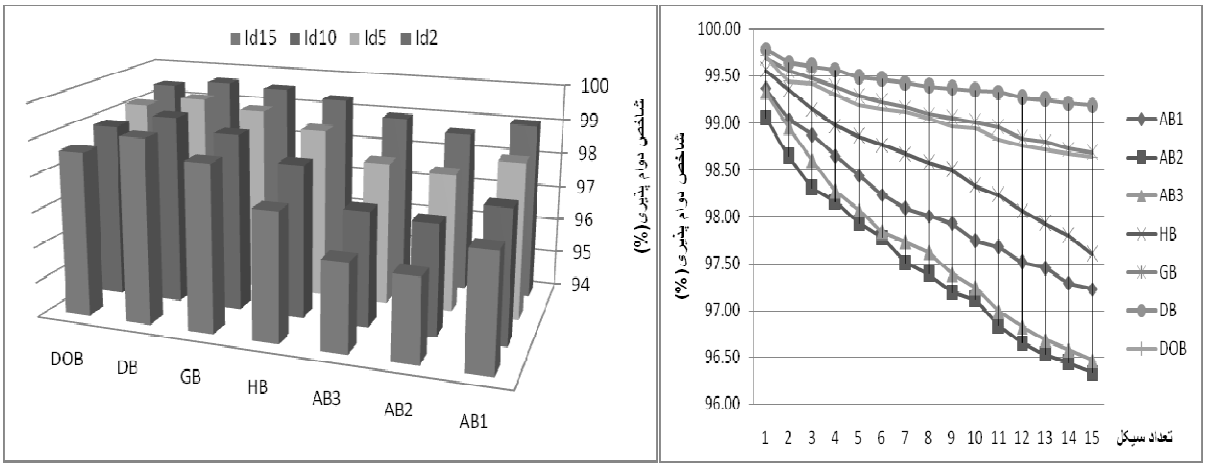
همان‌طور که در شکل۵ ملاحظه می‌شود، گرانودیوریت ایستگاه دهگاه و دودانگه به ترتیب بیشترین شاخص دوام را دارند و مونزوگرانیت آق‌بلاغ۲ با دارا بودن شاخص دوام ۹٦/۳٤ درصد، کمترین شاخص دوام را به خود اختصاص داده است. همچنین اثر افزایش تعداد سیکل‌های آزمایش بر روی اکثر نمونه‌ها از مرحله سوم به بعد چندان محسوس نمی‌باشد و شاخص دوام این سنگ‌ها خطی با افزایش تعداد سیکل‌ها به صورت کاهش می‌یابد(جدول٤).

۳-۲-٤. مقاومت فشاری تک‌محوری

از مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوری می‌باشد. اندازه‌گیری این خصوصیت مکانیکی در تمام پروژه‌های مهندسی که برروی سنگ و یا درون آن اجرا می‌شود، الزامی است.

جدول۳. میانگین مقادیر تعداد ۳۰ آزمون سختی چکش اشمیت بر روی گرانیت‌های بروجرد

سنگ		گیجالی	دهگاه	هیراب	دودانگه	آق بلاغ		
		(GB)	(DB)	(HB)	(DOB)	(AB1)	(AB2)	(AB3)
سختی اشمیت	روش ISRM	٤٩	٥٣	٣٩	٥٠	٤٣	٤٤	٤٦



شکل۵. نتایج آزمون دوام‌پذیری گرانیت‌های مورد مطالعه

جدول٤. نتایج شاخص دوام گرانیت‌های بروجرد(دما:۲۱درجه و آب مصرفی:آب مقطر)

ایستگاه	گیجالی	دهگاه	هیراب	دودانگه		آق بلاغ	
	(GB)	(DB)	(HB)	(DOB)	(AB1)	(AB2)	(AB3)
نوع سنگ	مونزوگرانیت	گرانیت اسفن‌دار	تونالیت	گرانودیوریت	مونزوگرانیت	مونزوگرانیت	لوکوگرانیت
Id۱	۹۹/٦۹	۹۹/۷۸	۹۹/٥٦	۹۹/۷۱	۹۹/۳٦	۹۹/۰٦	۹۹/۳۳
Id۲	۹۹/٥٥	۹۹/٦٤	۹۹/۳٥	۹۹/٥٤	۹۹/۰۳	۹۸/٦٤	۹۸/۹٥
Id۳	۹۹/٤۸	۹۹/٦	۹۹/۱٤	۹۹/٤۲	۹۸/۸۷	۹۸/۳۰	۹۸/٥۹
Id٤	۹۹/۳۸	۹۹/٥٦	۹۸/۹۷	۹۹/۳۰	۹۸/٦٤	۹۸/۱٦	۹۸/۲۷
Id٥	۹۹/۲۸	۹۹/٤۸	۹۸/۸٦	۹۹/۱۹	۹۸/٤٤	۹۷/۹۳	۹۸/۰۷
Id٦	۹۹/۲۲	۹۹/٤٦	۹۸/۷٦	۹۹/۱٥	۹۸/۲۳	۹۸/۷۸	۹۷/۸٤
Id۷	۹۹/۱۷	۹۹/٤۳	۹۸/٦۷	۹۹/۱۱	۹۸/۰۹	۹۷/٥۱	۹۷/۷۳
Id۸	۹۹/۰۹	۹۹/۳۹	۹۸/٥۷	۹۹/۰٥	۹۸/۰۱	۹۷/۳۸	۹۷/٦۲
Id۹	۹۹/۰٥	۹۹/۳۷	۹۷/٤٥	۹۸/۹۹	۹۷/۹۲	۹۷/۱۹	۹۷/۳۹
Id۱۰	۹۹/۰۱	۹۹/۳٥	۹۸/۳۲	۹۸/۹٤	۹۷/۷٤	۹۷/۱۱	۹۷/۲٤
Id۱۱	۹۸/۹٥	۹۹/۳۳	۹۸/۲۳	۹۸/۸۲	۹۷/٦۸	۹٦/۸٤	۹٦/۹۹
Id۱۲	۹۸/۸۳	۹۹/۲۷	۹۸/۰٦	۹۸/۷٦	۹۷/٥۱	۹٦/٦٥	۹٦/۸۳
Id۱۳	۹۸/۸۰	۹۹/۲٥	۹۷/۹۲	۹۸/۷۲	۹۷/٤٥	۹٦/٥۲	۹٦/٦۸
Id۱٤	۹۸/۷۳	۹۹/۲۱	۹۷/۷۹	۹۸/٦۷	۹۷/۲۹	۹٦/٤٤	۹٦/٥۷
Id۱٥	۹۸/٦۸	۹۹/۱۹	۹۷/٦۰	۹۸/٦۳	۹۷/۲۲	۹٦/۳٤	۹٦/٤۷

شاخص دوام هر مرحله(٪)

در این پژوهش ضمن تعیین مقاومت فشاری تک محوری، مدول ارتجاعی نمونه‌های سنگ نیز تعیین شدند. مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های مغزه با قطر NX و با نسبت طول به قطر۲/۵ تا ۳ ، در سه حالت خشک، رطوبت طبیعی و اشباع اندازه‌گیری شده است(جدول۵).

نتایج جدول۵ نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت فشاری تک محوری گرانیت‌های بروجرد در حالت خشک به دست آمده است. همچنین زاویه شکستگی(β) در آزمایش‌ها به ترتیب در شرایط خشک، با رطوبت طبیعی و اشباع کاهش می‌یابد که علت آن وجود سیال در خلل و فرج سنگ است و باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی می‌شود. سنگ‌های مورد آزمایش براساس میزان مقاومت فشاری تک‌محوری در شرایط خشک و مطابق با رده‌بندی مهندسی سنگ بکر دیر و میلر در رده B قرار می‌گیرند.

جدول ۵. مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری گرانیت‌ها برحسب مگاپاسکال (MPa)

نام گرانیت	خشک			طبیعی			اشباع			زاویه β
	حداقل	*میانگین*	*حداکثر*	*حداقل*	*میانگین*	*حداکثر*	*حداقل*	*میانگین*	*حداکثر*	*درجه*
GB	۱۱۰/٤٦	۱۲۲/۹۹	۱۳۱/۷۳	٦۰/٤۸	۱۱۹/۹٦	۱٦۱/۰۸	۹۳/۲۷	۱۰۷/٤۷	۱۲٥/۲۷	۷۲
DB	۸۹/۰٦	۱۰۳/٥	۱۲٤/۷۱	۹۲/٥	۱۰۱/٦٤	۱۰۷/٤٦	٦٤/٦۷	۹٦/۲۲	۱۲۱/۷۲	۷۲
DOB	۱۱۰/۸	۱۲۱/٦۹	۱۳٥/۹٥	۸۸/۱	۹٦/٥۳	۱۰۸/۳٥	٥۷/۲۷	٦٤/۱٦	٦٤/۱۹	٦۷
AB1	۹۱/٥۲	۱۱۱/۳۹	۱٤٥/۷۳	٥۰/۲۱	٥٤/۳٦	٥۷/٦۲	٤۸/۰٦	٥۲/٦۲	٥۷/٥٦	٦٥
AB2	۳۰/٤٤	٦۱/٥۸	٦۲/۳۳	۲۸/۱٤	٥۱/۳۳	۷٤/۸۲	۱۲/۹۲	۱۸/٦۱	۲۹/۳۱	٦۰
AB3	۹۱	۱۰۳/٤٥	۱۱۷/٥	٥٤/۷۹	۷۱/۱۹	۹۰/۷۹	۳٤/۹۷	٤۱/٥۲	٤۷/۱٦	۷۰
HB	٦۳/۲۹	۷۲/۳۲	۷٦/۱	٦۰/۱٤	٥۷/٥۸	۷٥/۳٤	۳۷/۲۲	٤۳/۰٥	٥۳/۱٦	٥۷

جدول ٦. مقادیر ضریب یانگ برحسب (GPa) برای گرانیت‌های بروجرد

نام گرانیت	خشک		طبیعی		اشباع	
	حداقل	*حداکثر*	*حداقل*	*حداکثر*	*حداقل*	*حداکثر*
GB	۱۲	۱۹	۱٤	۲۳	۱۳	۱٥/٥
DB	۸	۱۲	۱۳	۱٤	۳	۱۱/٥
DOB	۱۱	۲۱	۱۱	۱۷	۳/٥	۸
AB1	۸	۲۰	٤	٦/٥	٥	۱۳
AB2	٤	٥	۳	٦	۱	٥
AB3	۱۰	۱۲	٥	۹/٥	۳/٥	۸/٥
HB	۱۰	۱۲	٥	۹/٥	۳/٥	۸/٥

۳-۲-٥. مدول یانگ(مدول الاستیسیته)

برای محاسبه مدول یانگ شیب خط مماس بر منحنی تنش-کرنش در تنشی معادل ٥۰ درصد مقاومت نهایی بر اساس رابطه $\sigma_c = E/\varepsilon$ اندازه‌گیری می‌شود. شکل٦ نمونه‌ای از منحنی‌های تنش- کرنش گرانیت‌های بروجرد را نشان می‌دهد که با استفاده از آنها مدول یانگ گرانیت‌ها تعیین شده‌است (جدول ٦).

پس از تعیین مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ نسبت مدولی(Er) گرانیت‌های بروجرد محاسبه گردید. در جدول۷ مقادیر نسبت مدولی و رده‌بندی مهندسی نمونه‌ها بر اساس استاندارد (۱۹۸۱) ISRM ارائه شده‌است. نسبت مدولی به دست آمده برای گرانیت‌های بروجرد در سه حالت رطوبت خشک، طبیعی و اشباع کمتر از ۲۰۰ است (جدول۷). از این رو اکثر آنها با توجه به رده‌بندی (۱۹۸۱) ISRM در رده مقاومتی بالا قرار می‌گیرند. رطوبت نقش موثری در تنزل رده مهندسی گرانیت‌های منطقه دارد. برای مثال با افزایش رطوبت درتونالیت هیراب که در حالت رطوبت خشک در رده مقاومتی بالا قراردارد در حالت اشباع به رده متوسط نزول می‌کند.

جدول۷. مقادیر نسبت مدولی(Er) و رده مهندسی گرانیت‌های بروجرد

نام ایستگاه	رطوبت خشک		رطوبت طبیعی		رطوبت اشباع	
	Er	ISRM	Er	ISRM	Er	ISRM
GB	۱٤٦	بالا	۱۵۷	بالا	۱۳۵/۵	بالا
DB	۹۵	بالا	۱۳٤	بالا	۸۹	بالا
DOB	۱۲٤	بالا	۱۳٤	بالا	۹٦	بالا
AB1	۱۰۲	بالا	۹۰	متوسط	۱٤۸	متوسط
AB2	۸۳	متوسط	۸۰	متوسط	۲۰۱/۵	پائین
AB3	۱٦۵	بالا	۱۳۲	بالا	۱٤٦	متوسط
HB	۱۵۲	بالا	۱۳۱/۵	متوسط	۱۳۹	متوسط

۳-۲-٦. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

مقاومت کششی غیرمستقیم با آزمایش برزیلی اندازه گیری شد. با اعمال فشار قطری به نمونه‌های استوانه‌ای سنگ، تنش کششی در امتداد عمود بر محور بارگذاری گسترش یافته و زمانی که این فشار از مقاومت کششی سنگ بیشتر شود نمونه دچار گسیختگی می‌شود. در مجموع ۱۰۵ آزمایش در شرایط اشباع، رطوبت طبیعی و خشک بر روی نمونه‌های مغزه انجام شد، جدول۸ میزان مقاومت کششی سنگ برای حالت رطوبت طبیعی، خشک و اشباع را نشان می‌دهد.

جدول۸. نتایج حاصل از آزمون‌های برزیلی

ایستگاه	نوع گرانیت	مقاومت کششی غیرمستقیم یا آزمون برزیلی(σ_t)MPa								
		خشک			رطوبت طبیعی			اشباع		
		حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل
GB	مونزوگرانیت	۱۱	۱۰/۳	۱۰	۱۰/۵	۹/۹	۹/٤	۸/۳	۷/۳	٦/٤
DB	گرانیت اسفن دار	۱۰	۹/۷	۸/٦	۱۰/۰۵	۸/۳	۷/۳	۹	۷/۲	٤/۹
DOB	گرانودیوریت	۱۲	۱۱/۲	۸/۸	۱۱/٦	۹/۸	۸/۲	۹/۳	۸/۳	۷/۲
AB1	مونزوگرانیت	٦	۵/٦	۵/٤	۵/٤	٤/۳	۳/۵	٤/۸	۳/۹	۳/۵
AB2	مونزوگرانیت	٤	۳/۸	۳/٦	۳/۷	۳/۵	۳	۳	۲/۸	۲/۵
AB3	لوکوگرانیت	۷	٦/۲	۵/۹	٦/۹	٦	۵/۵	۵	٤/۳	۳/۹
HB	تونالیت	٦	۵/۹	۵/٦	۵/۸	۵/۲	۵/۲	۵/٦	٤/٦	۳/۸

مقاومت کششی غیرمسقیم حاصله نیز مانند مقاومت فشاری تک‌محوری با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار مقاومت کششی در حالت خشک ۱۲ مگاپاسکال مربوط به گرانودیوریت دودانگه (DOB) است. کمترین مقدار مقاومت کششی در حالت خشک ۳/٦ مگاپاسکال و مربوط به مونزوگرانیت آق‌بلاغ ۲ (AB2) می‌باشد.

٤. نتایج

خصوصیات زمین‌شناختی مهندسی‌سنگ، شامل شناخت ویژگی‌های سنگ‌شناختی، فیزیکی و مکانیکی است. با آگاهی از ویژگی‌های مذکور می‌توان با برقراری ارتباط بین آنها روابط مناسبی به دست آورد. با داشتن چنین روابطی در هزینه آزمایش‌های مربوط به ارزیابی خصوصیات زمین‌شناختی مهندسی صرفه‌جویی خواهد شد. این موضوع زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که درون یا بر روی چنین توده سنگ‌هایی پروژه‌های عمرانی یا معدنی اجرا شود.

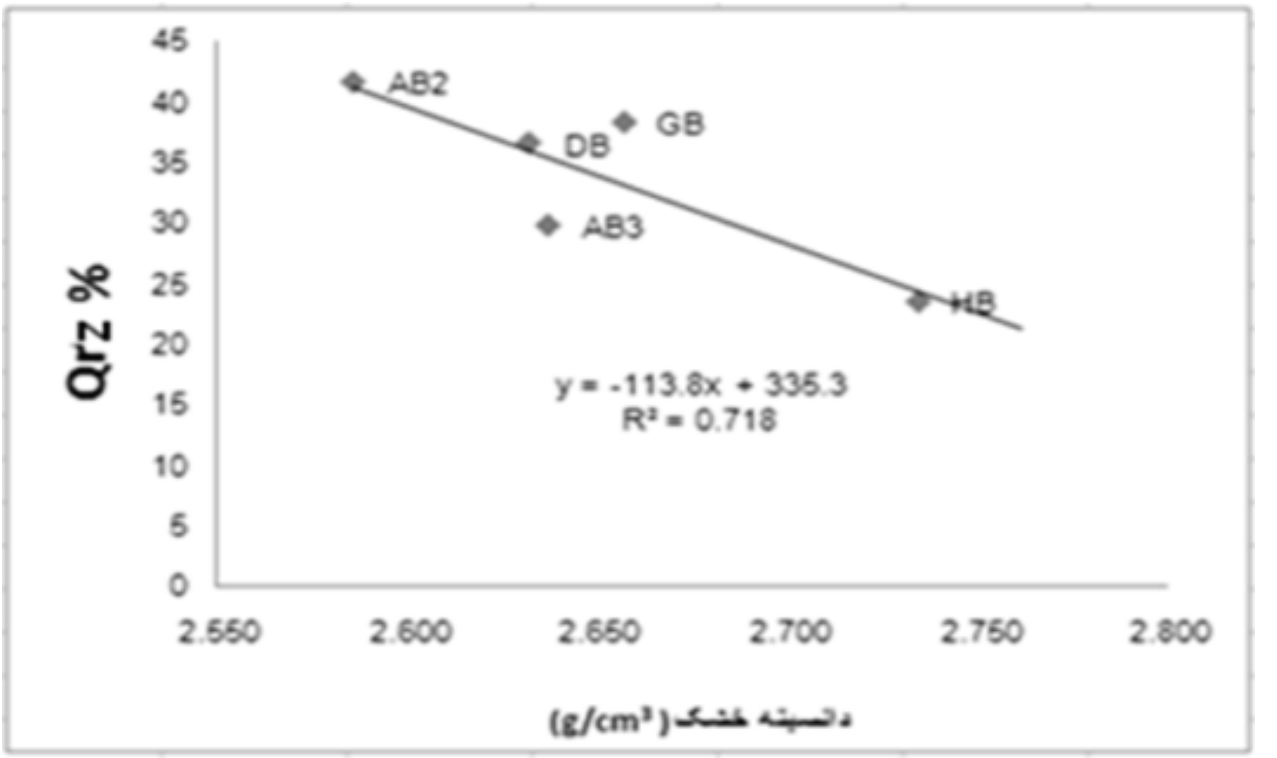
با توجه به مطالعات سنگ‌شناختی در سنگ‌های گرانیتی، نوع و درصد کانی‌ها تأثیر زیادی بر روی خصوصیات فیزیکی سنگ دارد. وزن واحد حجم گرانیت‌ها با کانی‌های اصلی رابطه مشخصی نشان می‌دهد. با کاهش درصد کانی‌های کوارتز و ارتوکلاز وزن واحد حجم خشک گرانیت‌ها افزایش پیدا می‌کند (شکل٦)، این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش درصد کانی‌های دارای وزن واحد حجم بیشتر مانند بیوتیت و پلاژیوکلازهای کلسیم‌دار در نمونه‌های مورد مطالعه باشد.

مقدار جذب آب گرانیت‌ها با قراردادن به مدت یک ساعت در آب، کمتر از ۱ درصد است که با توجه به ترکیب کانی‌شناختی و بافت سنگ‌های مذکور، مقادیر به دست آمده قابل انتظار است. با افزایش کانی‌های کوارتز و ارتوکلاز، جذب آب

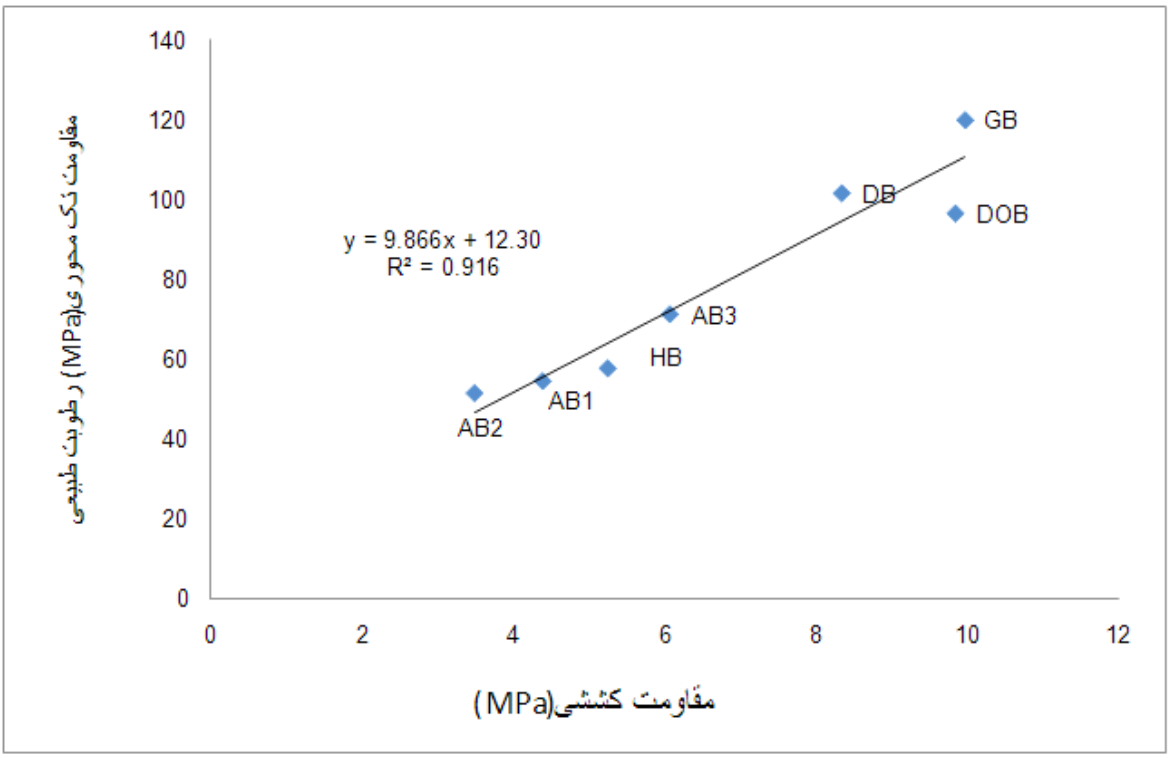
کاهش می‌یابد. در حالی که با افزایش کانی بیوتیت، میزان جذب آب افزایش پیدا می‌کند.

اندازه ذرات کانی‌ها نیز بر روی ویژگی‌های فیزیکی تأثیرگذار است. با کاهش اندازه کانی‌ها مقدار دانسیته افزایش و در مقابل مقدار تخلخل و جذب آب کاهش می‌یابد که نتایج حاصله با نتایج به دست آمده توسط محققین دیگر همخوانی دارد (Onodera and Asoka Kumara, 1981). درشت بودن اندازه ذرات باعث افزایش سطوح ضعف و تمرکز تنش در مرز بین دانه‌ها می‌شود. ذرات درشت، سطح تماس کمتری با یکدیگر داشته و درجه درهم قفل‌شدگی کمتری دارند. بنابراین سنگ، دانسیته کمتر، تخلخل و جذب آب بیشتری خواهد داشت. گرانیت دهگاه با ریزترین اندازه کانی‌ها، دارای تخلخل پایین و دانسیته بالایی است(جدول۲). بنابراین می‌توان با استفاده از مطالعات میکروسکوپی و تعیین درصد کانی‌های تشکیل دهنده و نیز بافت سنگ‌های گرانیتی، خصوصیات فیزیکی این سنگ‌ها را ارزیابی نمود.

در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی برای برآورد سریع خصوصیات مکانیکی سنگ‌های یک پروژه، تعیین ارتباط مقاومت فشاری تک‌محوری با مقاومت کششی غیرمستقیم یا برزیلی، کمک موثری به کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی خواهد بود. از این رو بررسی انجام شده نشان می‌دهد که مقاومت فشاری تک‌محوری با مقاومت برزیلی رابطه مستقیم دارد و با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد. در شکل۷ ارتباط این دو پارامتر در سه حالت خشک، مرطوب و اشباع ارائه شده است. بهترین هم‌پوشانی بین مقاومت فشاری(UCS) و کششی(TCS) گرانیت‌های بروجرد در حالت رطوبت طبیعی با مقدار $R^2 = 0.916$ برقرار است.



شکل٦. رابطه وزن واحد حجم با درصد کانی‌های سنگ‌های گرانیتی



شکل ۷. افزایش مقاومت فشاری تک محوری گرانیت‌ها متناسب با افزایش مقاومت کشش برزیلی

جدول۱۰. روابط حاصل از بررسی خصوصیات زمین‌شناختی مهندسی توده گرانیتی بروجرد

ردیف	پارامتر مورد بررسی	معادلات	حالت رطوبت	ضریب تعیین(R^2)	تعداد(n)
۱	مقاومت فشاری تک‌محوری با کوارتز	$UCS = 4.08\ Qr - 26.46$	خشک	۰/۷۲	۵
۲	مقاومت فشاری تک‌محوری با دانسیته	$UCS = 912.9\gamma_d - 2301$	خشک	۰/۹۹	۵
۳	مقاومت فشاری تک‌محوری با جذب آب	$UCS = -84.47\ Iv + 147$	اشباع	۰/۷۹	٦
٤	ارتباط مقاومت فشاری تک‌محوری با شاخص دوام ۲	$UCS = 64.21\ Id\ 2 - 6288$	طبیعی	۰/۸۳	٦
٥	ارتباط مقاومت فشاری تک‌محوری با شاخص دوام۱۵	$UCS = 24.22\ Id\ 15 - 2292$	طبیعی	۰/۷٤	٦
٦	مقاومت فشاری تک‌محوری با سختی اشمیت	$UCS = 0.0001\ (SHV)^{2.974}$	طبیعی	۰/۷۷	۷
۷	مقاومت فشاری تک‌محوری با نسبت مدولی	$UCS = 0.858\ Er - 21.55$	طبیعی	۰/۷٤	٦
۸	مقاومت فشاری تک‌محوری با مقاومت برزیلی	$UCS = 9.87\ TCS + 12.30$	طبیعی	۰/۹۲	۷
۹	مقاومت برزیلی با تخلخل	$TCS = -4.03\ n + 12.64$	خشک	۰/۹۲	۵
۱۰	مقاومت برزیلی با دانسیته	$TCS = 42.46\ \gamma_d - 105.3$	خشک	۰/۷٤	۵
۱۱	سختی سنگ با تخلخل	$SHV = 3.5\ n + 51.36$	طبیعی	۰/۷۰	۵
۱۲	سختی سنگ با جذب آب	$SHV = -9.1\ Iv + 51.24$	طبیعی	۰/۷۱	۵
۱۳	سختی سنگ با درصد رطوبت	$SHV = -76.34\ \omega + 57.35$	طبیعی	۰/۸۵	٦
۱٤	دانسیته با تخلخل	$n = -10.14\ \gamma_d + 28.26$	خشک	۰/۸۷	٦
۱۵	دانسیته با جذب آب	$Iv = -3.96\ \gamma_d + 11.02$	خشک	۰/۸۸	٦

در جدول۱۰ معادلات و ضرایب همبستگی بین خصوصیات زمین‌شناختی مهندسی توده گرانیتی بروجرد ارائه شده است. ارتباط بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی این توده گرانیتی دارای ضرایب همبستگی مناسبی است. بیشترین همبستگی در مرتبه اول با مقدار ضریب تعیین ۰/۹۹ بین مقاومت فشاری تک‌محوری با وزن واحد حجم(دانسیته) خشک و در مرحله دوم با ضریب تعیین ۰/۹۲ بین مقاومت برزیلی و تخلخل برقرار است. به‌جز رابطه مقاومت فشاری تک‌محوری و سختی واجهشی سنگ که به صورت نمایی برقرار است، سایر روابط دارای ارتباط خطی با یکدیگر هستند.

۵. بحث و نتیجه گیری

شناخت خصوصیات زمین‌شناختی مهندسی سنگ نیازمند مطالعه ویژگی‌های سنگ‌شناختی، فیریکی و مکانیکی سنگ‌ها است. بر اساس مطالعه مقاطع نازک سنگ، گرانیت‌های بروجرد به انواع گرانودیوریت، مونزوگرانیت، گرانیت اسفن‌دار (سفید) و تونالیت تقسیم‌بندی می‌شوند. کانی‌های اصلی تشکیل دهنده این سنگ‌ها به ترتیب فراوانی پلاژیوکلازها، کوارتز، ارتوکلاز و بیوتیت هستند که اکثرا بافت ساب هدرال گرانولار را تشکیل می‌دهند.

ترکیب کانی‌شناختی و بافت سنگ با خصوصیات فیزیکی سنگ رابطه مشخصی دارد. ارتباط این دو ویژگی می‌تواند به پیش‌بینی نحوه پیشرفت هوازدگی در سنگ کمک کند. در رخنمون‌های گرانیتی بروجرد، پیشرفت هوازدگی روند یکسانی ندارد. در بخشی از توده گرانیتی شدت هوازدگی بیشتر است. این موضوع با فراوانی کانی‌های دارای وزن واحد حجم بیشتر مانند بیوتیت و پلاژیوکلازها رابطه مشخص دارد. با افزایش کانی‌های مذکور شدت هوازدگی گرانیت‌ها افزایش پیدا می‌کند. زیرا بیوتیت‌ها حاوی عناصر آهن و منیزیم می‌باشند و پلاژیوکلازها نیز کلسیم‌دار هستند. به همین دلیل شاخص دوام‌پذیری مرحله دوم گرانیت دهگاه با ۹۹/٦٤ درصد و گرانیت دودانگه با ۹۹/۵۵ درصد بالاترین مقدار را دارند در حالی‌که مونزوگرانیت آق‌بلاغ۲ با دارا بودن شاخص دوام ۹٦/۳٤ درصد کمترین شاخص دوام را به خود اختصاص داده است (جدول۳).

تخلخل کم و خیلی کم گرانیت‌ها ناشی از تبلور و تراکم کانی‌های تشکیل دهنده و هوازدگی کم این سنگ‌ها است. در مطالعه مقاطع نازک نیز هیچ گونه تخلخلی در بین کانی‌های تشکیل دهنده دیده نمی‌شود. ولی هوازدگی بعضی از بلورهای درشت بیوتیت و پلاژیوکلاز، تخلخل ریز ایجاد کرده است. به این دلیل مونزوگرانیت آق‌بلاغ۲، ۲/۳۸ درصد تخلخل دارد (جدول۱). این تخلخل اولیه نیست و ناشی از هوازدگی کانی فرومنیزین (بیوتیت) و پلاژیوکلازهای کلسیم‌دار است.

اندازه ذرات کانی‌ها نیز بر روی ویژگی‌های فیزیکی تأثیرگذار است. با کاهش اندازه کانی‌ها، وزن واحد حجم افزایش و در مقابل مقدار تخلخل و جذب آب کاهش می‌یابد. بنابراین سنگ دارای دانسیته بالا، تخلخل و جذب آب کمتری خواهد داشت. بر اساس مطالعه مقاطع نازک سنگ، کانی‌های تشکیل دهنده گرانودیوریت دودانگه، ریز تا متوسط دانه هستند و دانسیته بالا و تخلخل پایینی دارد (جدول۲). مونزوگرانیت آق بلاغ ۲ با داشتن کانی‌هایی در اندازه متوسط، تخلخل بیشتر و دانسیته کمتری دارد.

نقش درصد کوارتز و اندازه دانه‌ها و رابطه آن با مقاومت تراکم تک‌محوری در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است. در این ارتباط گرانیت گیجالی و گرانیت دهگاه با هم قابل مقایسه می‌باشند. با توجه به مطالعه مقاطع نازک سنگ، از نظر اندازه کانی‌ها، گرانیت گیجالی (GB) دانه متوسط و گرانیت دهگاه (DB) دانه‌ریز می‌باشد(جدول۱). مقدار کوارتز در گرانیت گیجالی ۳۸ درصد و در گرانیت دهگاه ۳٦ درصد است (جدول۱). مقاومت تراکمی تک‌محوری در گرانیت گیجالی ۱۲۳ مگاپاسکال ولی برای گرانیت دهگاه ۱۲۱ مگاپاسکال می‌باشد(جدول ۵). با توجه به نقش اندازه دانه و درصد کوارتز در تغییر مقاومت تراکم تک‌محوری سنگ، همان‌طور که دیده می‌شود گرانیت دهگاه با وجود ریزدانه

بودن به دلیل داشتن درصد کوارتز کمتر مقاومت تراکم تک‌محوری کمتری نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان بیان کرد که افزایش درصد کوارتز بیشتر از کاهش اندازه دانه به بالارفتن مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ کمک می‌کند.

ارتباط خصوصیات سنگ‌شناختی، ویژگی‌های فیزیکی و خصوصیات مکانیکی در گرانیت‌های آق‌بلاغ قابل توجه است. گرانیت آق بلاغ۱ (AB1) و آق بلاغ ۲ (AB2) هر دو از نظر اندازه ذرات متوسط دانه هستند. درصد کوارتز در گرانیت‌های آق‌بلاغ ۱ و ۲ به ترتیب ٤٥ و ٤٢ درصد است(جدول۱). درصد تخلخل در گرانیت‌های آق‌بلاغ ۱ و۲ به ترتیب ۱/۵ و ۲/۳ درصد است(جدول۲). مقاومت تراکمی تک‌محوری گرانیت‌های آق‌بلاغ ۱ و ۲ نیز به ترتیب ۱۱۱ و۵۸ مگاپاسکال می‌باشد (جدول۵). همان‌طور که ملاحظه می‌شود نقش ویژگی سنگ‌شناختی یعنی افزایش درصد کوارتز و نقش خصوصیت فیزیکی یعنی کاهش تخلخل در افزایش مقاومت تراکم تک‌محوری آق‌بلاغ ۲ مشخص می‌باشد.

رابطه بین خصوصیات سنگ‌شناختی، ویژگی‌های فیزیکی و خصوصیات مکانیکی در گرانیت‌های گیجالی و هیراب نیز قابل توجه است. میزان تخلخل در گرانیت‌های گیجالی (GB) و هیراب (HB) به ترتیب ۱/۱٤ و ۱/۳۸ درصد (جدول۲)، مقدار بیوتیت در گرانیت‌های گیجالی (GB) و هیراب (HB) به ترتیب ۱۲ و ۲۳ درصد(جدول۱)، عدد سختی واجهشی اشمیت در گرانیت‌های گیجالی (GB) و هیراب (HB) به ترتیب ۵۱ و ٤۳ می باشد (جدول۳). میزان مقاومت تراکم تک‌محوری در گرانیت‌های گیجالی (GB) و هیراب (HB) به ترتیب ۱۲۳ و ۷۲ مگاپاسکال است(جدول۵). دلیل کاهش مقاومت و سختی در گرانیت هیراب به درصد تخلخل بیشتر و درصد کانی‌های صفحه‌ای (بیوتیت) زیادتر مربوط می‌شود.

نقش سنگ‌شناختی (افزایش کوارتز) در افزایش مقاومت تراکم تک‌محوری درگرانیت‌های هیراب (HB) و دو دانگه (DOB) نیز قابل توجه است. مقدارکوارتز و ارتوکلاز در گرانیت هیراب ۲۳ درصد و درگرانیت دودانگه ۳۳ درصد می‌باشد (جدول ۱). مقاومت تراکم تک‌محوری در گرانیت هیراب کمتر از گرانیت دودانگه است (جدول ۵). این موضوع مربوط به درصد بیشتر کوارتز در گرانیت دودانگه است.

نتیجه گیری

گسترش سنگ‌های گرانیتی در بخش وسیعی از کشور از جمله در شمال و شمال خاوری بروجرد و بهره‌برداری از آنها به عنوان مصالح سنگی در راه‌سازی، ساخت موج شکن و ... ، مطالعه خصوصیات زمین‌شناختی مهندسی این سنگ‌ها را ضروری ساخته است. ارائه چنین خصوصیاتی اطلاعات مناسبی را به منظور بهره‌برداری بهینه در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان محلی قرار می‌دهد.

۱. بر اساس ویژگی‌های سنگ‌شناختی، توده‌های گرانیتی بروجرد متشکل از چهار نوع گرانودیوریت، مونزوگرانیت، گرانیت رنگ روشن(سفید) و تونالیت است.
۲. درصد کانی کوارتز مهم‌ترین عامل کانی‌شناختی تأثیرگذار بر روی خصوصیات مکانیکی از جمله مقاومت این سنگ‌ها است. با افزایش درصد کوارتز مقاومت تراکم تک‌محوری گرانیت‌ها افزایش پیدا می‌کند. وجود کانی ارتوکلاز نیز بعد از کوارتز یکی از عوامل اصلی افزایش مقاومت سنگ است.
۳. افزایش درصد کانی‌های پلاژیوکلاز و بیوتیت فرآیند هوازدگی گرانیت‌ها راتشدید می‌کند. در بررسی‌های صحرایی تونالیت هیراب به ترتیب با ٤٦ درصد پلاژیوکلاز و ۲۲ درصد بیوتیت جزء نمونه‌هایی است که کمترین مقاومت را در مقابل هوازدگی نشان می‌دهد. بنابراین ترکیب کانی‌شناختی یکی از عوامل اصلی بوده و شاخص مناسبی برای سنجش مقاومت سنگ در مقابل عوامل هوازدگی محسوب می‌شود.
٤. گرانیت‌های بروجرد با داشتن تخلخل اولیه بین ۰/٤۲ تا ۲/۳۸ درصد در رده سنگ‌های دارای تخلخل کم تا خیلی کم قرار می‌گیرند. بالابودن تخلخل در برخی از نمونه‌ها به دلیل وجود شکستگی و آلتراسیون کانی‌های تشکیل دهنده این سنگ‌ها است. گرانیت‌های هیراب و آق‌بلاغ۲ بالاترین

تخلخل، کمترین دانسیته و در نتیجه بیشترین جذب آب را دارا هستند (جدول ۲).

۵. بر اساس نتایج آزمایش دوام‌پذیری که در ۱۵ سیکل انجام شده است، سنگ‌های گرانیتی بروجرد طبق رده‌بندی گمبل و بر اساس شاخص مرحله دوم (Id2) در رده خیلی مقاوم و طبق رده بندی فرانکلین و چاندارا، بر اساس شاخص مرحله اول (Id1) در رده شدیداً مقاوم قرار می‌گیرند. همچنین اثر افزایش تعداد سیکل‌های آزمایش روی اکثر نمونه‌ها از مرحله سوم به بعد چندان محسوس نمی‌باشد و شاخص دوام این سنگ‌ها به صورت خطی با افزایش تعداد سیکل‌ها کاهش می‌یابد.

٦. بهترین ارتباط میان خصوصیات فیزیکی با ویژگی‌های مکانیکی بین مقاومت فشاری تک‌محوری و دانسیته برقرار است. سایر روابط نیز همپوشانی خوبی دارند. گرانودیوریت دودانگه و مونزوگرانیت گیجالی به ترتیب بالاترین مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری، بیشترین مقاومت کششی برزیلی و سختی واجهشی اشمیت را به خود اختصاص داده‌اند.

۷. بر اساس رده‌بندی مهندسی سنگ بکر، گرانیت گیجالی در رده BL و سایر گرانیت‌ها در رده CL قرار می‌گیرند. پایین بودن رده مهندسی گرانیت‌های بروجرد از رده قابل انتظار(یعنی رده BH مطابق با دیر و میلر) ناشی از هوازدگی سنگ‌های منطقه است.

منابع

احمدی خلجی، ا.، ١٣٨٦. پترولوژی و ژئوشیمی توده‌های گرانودیوریتی بروجرد(غرب ایران)، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۳۳، شماره۱، صفحه ۱-١٤.

سازمان زمین‌شناختی کشور، ۷۰ ۱۳. نقشه زمین‌شناختی ۱:۱۰۰۰۰۰ بروجرد.

رسولی فرح، م.، ۱۳۸۹. مطالعه خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی گرانیت‌های شمال و شمال خاوری بروجرد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا.

Akesson, U., Lindqvist, J.E., Go¨ransson, M., Stigh, J. 2001. Relationship between texture and mechanical properties of granites, central Sweden, by use of image-analysing technique. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 60: 277–284.

American Society for Testing Materials, 1998. Annual Book of ASTM Standard, vol.09.08 and 04.04.

Angeli M., Hebert, R., Menendez, B., David, C., Bigas, J.P., 2010. Influence of temperature and salt concentration on the salt weathering of a sedimentary stone with sodium sulphate. Engineering Geology, 115(3-4): 193–199.

Anon, 1979. Classficatoin of rocks and soils for engineering geological mapping. part 1- Rocks and soils material. Bulltin of Engineering Geology and the Environment, 19: 71-364.

Ayday, C.G., Oktan, R.M. 1992. Correlations between L and N-type Schmidt hammer rebound values obtained during field-testing. In: Hudson J.A. (Ed.), International ISRM Symposium on Rock Characterization. Chester. pp. 47–50.

I˙rfan, T.Y., 1996. Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong. Quaterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 29: 5–35.

ISRM, 1981b. Rock Characterization Testing and Monitoring, Suggested Method. Brown E.T. (Ed.), Oxford: Pergamon Press., London, 221p.

Katz, O., Reches, Z., Roegiers, J., 2000. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37: 723–728.

Merriam, R., Rieke, H.H., Kim, Y.C., 1970. Tensile strength related to mineralogy and texture of some granitic rocks. Engineering Geology, 4: 155–160.

Onodera, T.F., Asoka Kumara, H.M., 1980. Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 22: 173–177.

Ra¨isa¨nen, M., 2004. Relationships between texture and mechanical properties of hybrid rocks from the Jaala–Iitti complex, southeastern Finland. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74: 197–211.

Sachpazis, C.I., 1990. Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 42: 75–83.

Sousa, L.M.O., 2007. Granite fracture index to check suitability of granite outcrops for quarrying. Engineering Geology, 92: 146–159.

Zhang L, 2005. Engineering Properties of Rocks, Vol. 4., 1-290. Elsevier Publ., Amsterdam.