

تعیین شکنندگی گرانیت با استفاده از سختی واجهشی سنگ جهت ارزیابی قابلیت حفاری

محمدحسین قبادی^{۱*}، محمدرضا رسولی فرح^۲

۱- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۲- کارشناس ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

*amirghobadi@yahoo.com

دریافت: ۹۰/۱۱/۸ پذیرش: ۹۱/۵/۱۷

چکیده

استفاده از سختی واجهشی چکش اشمیت برای برآورد مقاومت و شکنندگی سنگ راهکاری مناسب و کم هزینه است. شکنندگی تابعی از مقاومت است که نشان دهنده استحکام سنگ در مقابل تغییر شکل در محدوده الاستیک می باشد. با توجه به این که روش‌های مستقیم برای اندازه‌گیری شکنندگی استاندارد نشده‌اند در این پژوهش با استفاده از سختی واجهشی چکش اشمیت و آزمون‌های مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلی بر روی ۷ نوع سنگ گرانیت منطقه بروجرد، ضمن تعیین مفاهیم شکنندگی B_1, B_2, B_3, B_4 و شاخص شکنندگی (BI) ارتباط این پارامترها با سختی واجهشی سنگ تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهد که در رطوبت طبیعی بین سختی واجهشی، مفاهیم شکنندگی و شاخص شکنندگی سنگ‌ها ارتباطی مستقیم با همپوشانی بالاتر از ۰/۷ برقرار است. گرانیت‌های بروجرد از نظر شاخص شکنندگی در رده ۴ قرار دارند که از نظر توصیفی اکثراً کمی شکننده هستند. بیشترین شاخص شکنندگی در حالت خشک ۴/۹۴ و کمترین آن ۳/۱۳ می باشد. با افزایش رطوبت طبیعی، شکنندگی سنگ‌ها کاهش می یابد. درحالت اشباع حداقل مقدار مفهوم شکنندگی (B_4) برابر با ۵/۲۷ مگاپاسگال است. موزوگرانیت‌ها با B_4 نزدیک به ۲۸ مگاپاسگال بسیار شکننده و از نظر قابلیت حفاری بسیار سخت می باشند.

واژه‌های کلیدی: سختی واجهشی اشمیت، شکنندگی، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلی، گرانیت، بروجرد

مقدمه

[20۰8] پژوهشگران زیادی برای برآورد مقاومت فشاری سنگ‌ها از سختی واجهشی سنگ استفاده کرده‌اند [19]، 25، 20] و روابط مناسبی را برای تعیین پارامترهای مکانیکی سنگ بر حسب یکدیگر ارائه نموده‌اند. گسترش گرانیت‌ها در منطقه بروجرد، ضرورت شناخت خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی توده سنگ‌های نفوذی ایران به منظور تهیه یک بانک اطلاعاتی، وجود معادن فعال گرانیت در ناحیه و استفاده زیاد از گرانیت‌ها به عنوان سنگ نما موجب گردید تا با توجه به تجارب سایر پژوهشگران رابطه سختی واجهشی چکش اشمیت و شکنندگی سنگ‌های گرانیتی توده نفوذی بروجرد تعیین شود. با استفاده از روابط به دست آمده می‌توان قابلیت حفاری سنگ‌های گرانیتی بروجرد را مورد ارزیابی قرارداد.

روش کار

در این پژوهش با انجام بازدیدهای صحرائی هفت معدن گرانیت انتخاب شد (شکل ۱). با مطالعه مقاطع نازک گرانیت‌های این معادن، درصد کانی‌ها و بافت آن‌ها تعیین

برای تعیین ظرفیت باربری، ارزیابی پایداری تونل‌ها، مغارها، فضا‌های زیرزمینی و استخراج سنگ‌های تزئینی شناخت ویژگی‌هایی چون مقاومت و شکنندگی سنگ‌ها ضروری می‌باشد [4]. شکنندگی تابعی از مقاومت است که نشان دهنده استحکام سنگ در مقابل تغییر شکل در محدوده الاستیک است. برای تعیین شکنندگی سنگ‌ها روش استاندارد ارائه نشده است [6]. ولی با روش‌های غیر مستقیم می‌توان برای تعیین شاخص شکنندگی سنگ اقدام کرد [6، 21]. شکنندگی از نسبت مقاومت فشاری تک محوری به مقاومت کششی حاصل می‌گردد. انجام آزمون‌های مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کشش برزیلی مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی می باشد که برای پروژه‌های کوچک مقرون به صرفه نیست. ولی استفاده از چکش اشمیت برای برآورد سریع و کم هزینه مقاومت سنگ بکر و سطح درزه توده سنگ متداول است [10]. این چکش در دو نوع L و N برای تعیین سختی واجهشی سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد

گردد. کانی‌های اصلی، کوارتز، پلاژیوکلاز، ارتوکلاز و بیوتیت می‌باشند. بر اساس خصوصیات کانی‌شناسی و بافت، سنگ‌های مورد مطالعه گرانودیوریت ریزدانه، گرانودیوریت دانه متوسط، مونوزوگرانیت درشت دانه، مونوزوگرانیت دانه متوسط، گرانیت رنگ روشن یا سفید (با بلورهای ریز تا درشت) و تونالیت (با بلورهای دانه متوسط) نام‌گذاری شدند. در مرحله بعد سختی و اجتهشی سنگ‌ها در محل با استفاده از چکش اشمیت نوع N به روش استاندارد تعیین گردید. بلوک‌های سنگی با ابعاد $40 \times 40 \times 50$ سانتی‌متر به آزمایشگاه منتقل و از آن‌ها مغزه‌هایی به قطر ۵۴ میلی‌متر (NX) تهیه شد. پس از تعیین درصد رطوبت و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلی با استفاده از نتایج حاصله ارتباط شکنندگی و سختی گرانیت‌های بروجرد تعیین گردید.

مفاهیم شکنندگی

شکنندگی یکی از ویژگی‌های مهم سنگ است. تاکنون تلاش‌های زیادی برای تعریف شکنندگی انجام شده است اما در بین محققین اتفاق نظر کاملی در خصوص این تعاریف وجود ندارد [6]. شکنندگی را می‌توان به عنوان مقادیر اندک طول شدگی ذرات، جدایش شکستگی (Fracture failure)، نسبت بالاترین مقاومت فشاری به کششی در نظر گرفت [18]. در واقع شکنندگی تابعی از مقاومت است که نشان دهنده استحکام سنگ در مقابل تغییر شکل در محدوده الاستیک می‌باشد. برای این منظور می‌توان از آزمایش پانچ [24] که توسط محققین سوئدی در سال ۱۹۴۳ ارائه گردیده و سال ۲۰۰۳ منتشر شده است [9] استفاده نمود. این آزمایش‌ها هنوز به صورت استاندارد مورد قبول واقع نشده است. بر اساس این روش که در شکل ۲ ارائه شده است و شباهت زیادی به تعیین ارزش ضربه سنگ طبق استاندارد BS دارد ابتدا نمونه سنگ در داخل سنگ‌شکن شکسته شده و مقدار ۵۰۰ گرم از مصالح عبوری از الک ۱۶ میلی‌متر و مانده روی الک ۱۱/۲ میلی‌متر با دانسیته ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب داخل دستگاه ریخته می‌شوند و با چکشی به وزن

کششی (σ_t) سنگ به شرح زیر محاسبه نمود [6]:

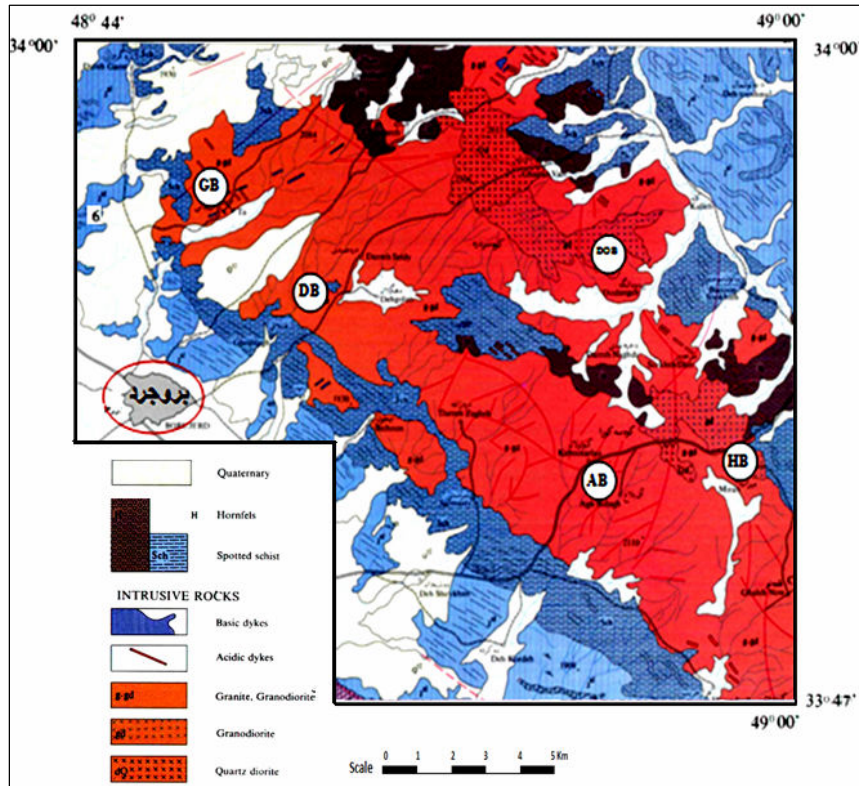
$$B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (1)$$

$$B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (2)$$

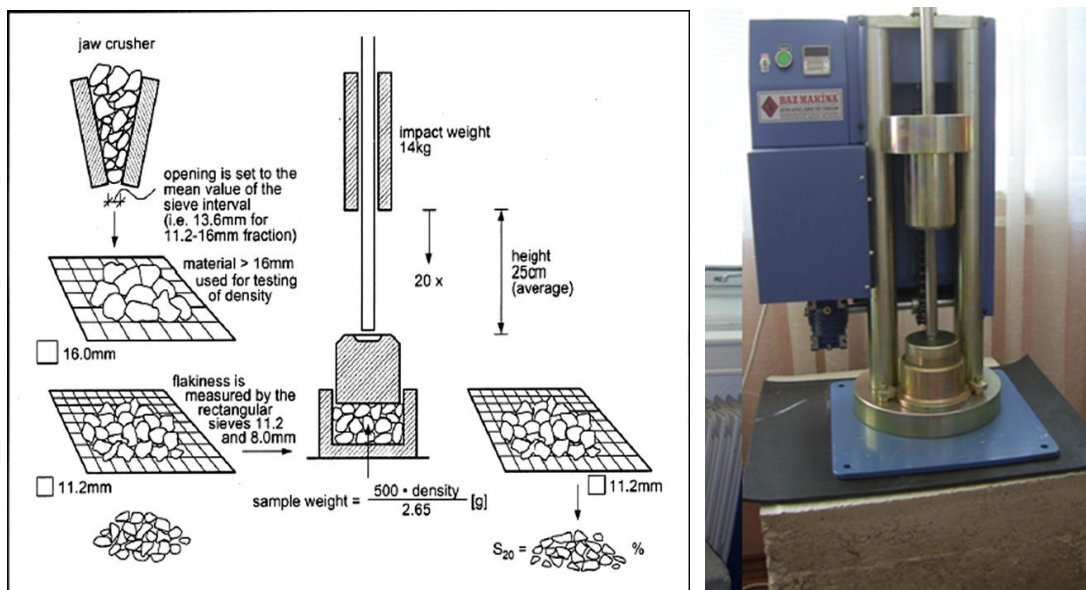
$$B_3 = \frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2} \quad (\text{MPa})^2 \quad (3)$$

$$B_4 = \sqrt{B_3} = \sqrt{\frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2}} \quad (\text{MPa}) \quad (4)$$

در این روابط σ_c مقاومت فشاری تک محوری و σ_t مقاومت کششی برزیلی می‌باشد که هر دو پارامتر بر حسب MPa منظور می‌گردند. همچنین B1، B2، B3 و B4 مفاهیم شکنندگی هستند.



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی بروجرد که موقعیت معادن گرانیب روی نقشه با دایره توخالی نشان داده شده است [اقتباس از منبع ۱].



شکل ۲: دستگاه تعیین شکنندگی سنگ‌ها و مراحل آماده‌سازی و روش انجام آزمایش شکنندگی مستقیم [9]

محاسبه شاخص شکنندگی

برای بیان شاخص شکنندگی از رابطه ۵ استفاده شده است که می‌توان آن را با استفاده از مقاومت فشاری تک محوری (σ_c) سنگ محاسبه کرد [13]:

$$BI = 2.065 + K(\log \sigma_c)^2 \quad (5)$$

در این رابطه BI شاخص شکنندگی، σ_c مقاومت فشاری تک محوری برحسب Kpa و K ضریبی است که مقدار آن از ۰/۱۷۰ تا ۰/۶۵۹ متغیر بوده و بستگی به نوع سنگ دارد [15, 17] مقدار K از جدول ۱ قابل محاسبه است که برای سنگ‌های گروه e مانند گرانیت برابر ۰/۶۵۹ می‌باشد.

آزمایش سختی واجهشی اشمیت

در این پژوهش آزمون سختی واجهشی گرانیت‌ها با استفاده از چکش اشمیت نوع N و مطابق با استاندارد ISRM. 1978 انجام شده است. با این روش ۳۰ برداشت انجام شده و ۱۰ برداشت با کمترین مقدار حذف گردیده و از بقیه داده‌ها میانگین گرفته شده است. نتایج در جدول ۲ ارائه گردیده، همانطور که در جدول مشاهده می‌شود گرانیت دهگاه با سختی ۵۰ در بالاترین رده قرار می‌گیرد و گرانیت هیراب با سختی نزدیک به ۳۹ دارای کمترین مقدار می‌باشد.

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

در این پژوهش روی ۱۰۵ نمونه مغزه استوانه‌ای گرانیت با قطر NX و طبق استاندارد ISRM, 1981 آزمایش مقاومت فشاری تک محوری انجام شد نرخ بارگذاری معادل ۰/۵ مگاپاسگال بر ثانیه و دستگاه مورد استفاده ADR 1500 شرکت ELE انگلستان بوده است. نتایج در جدول ۳ قابل مشاهده است. بر این اساس بیشترین مقدار مقاومت فشاری تک محوری مربوط به گرانیت گیجالی در هر سه حالت خشک، مرطوب و اشباع می‌باشد و کمترین مقدار این پارامتر مربوط به گرانیت آق‌بلاغ ۲ در حالت اشباع معادل ۱۸/۶۱ مگاپاسگال است.

آزمایش مقاومت کششی برزیلی

این آزمون طبق استاندارد ISRM, 1981 برای ۱۰۵ نمونه سنگ با قراردادن فک دستگاه برزیلی حاوی مغزه با قطر NX در زیر دستگاه بارگذاری تک محوری با نسبت قطر به طول ۲ و نرخ بارگذاری ۰/۵ N/s انجام گرفته است (شکل ۲). نتایج در جدول ۴ نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود گرانیت دودانگه در هر سه حالت خشک، مرطوب و اشباع دارای بالاترین مقدار مقاومت کششی می‌باشد در حالی که آق‌بلاغ ۲ در این آزمون نیز با مقدار ۲/۹۸ MPa همچنان کم‌ترین مقاومت کششی را در حالت اشباع دارا می‌باشد.

نتایج

با تعیین مقادیر مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلین طبق روابط ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و با در نظر گرفتن مقدار ۰/۶۵۹ برای k، مقادیر مختلف مفاهیم شکنندگی و شاخص شکنندگی سنگ‌های گرانیتی مورد مطالعه محاسبه شده است (جدول ۵ و ۶).

بر اساس مقدار شاخص شکنندگی (BI) می‌توان طبق تقسیم‌بندی ارائه شده در جدول ۳ رده شکنندگی سنگ‌ها را تعیین نمود [4]. مطابق با طبقه‌بندی افتز [4] این سنگ‌ها از نظر شاخص شکنندگی در رده ۴ قرار دارند که از نظر توصیفی اکثراً کمی شکننده هستند. بیش‌ترین BI مربوط به مونزوگرانیت گیجالی در حالت خشک با مقدار ۴/۹۴ و کمترین آن مربوط به آق‌بلاغ ۲ در حالت اشباع با مقدار ۳/۱۳ می‌باشد. شاخص شکنندگی (BI) و مفاهیم شکنندگی B1، B2، B3 و B4 سنگ با افزایش رطوبت دچار کاهش می‌شوند (جدول ۶).

می‌توان بر اساس مفهوم شکنندگی B4 قابلیت حفاری را در سنگ‌ها تعیین کرد [6]. مطابق با جدول ۷، برای گرانیت آق‌بلاغ ۲ با B4 برابر با ۵/۲۷ مگاپاسگال شکنندگی کم و قابلیت حفاری بسیار آسان است در حالی که برای مونزوگرانیت گیجالی با B4 نزدیک به ۲۸ مگاپاسگال شکنندگی زیاد و قابلیت حفاری بسیار سخت می‌باشد.

به منظور مطالعه رابطه شکنندگی با عدد سختی واجهشی چکش اشمیت، داده‌های حاصل از سختی واجهشی با مقادیر شاخص شکنندگی (BI) و مفاهیم شکنندگی (B1، B2، B3 و B4) موجود در جدول ۵ مقایسه شد. برای بالا

روابط شش یا پنج نوع گرانیت در محاسبات وارد شده‌اند. در مواردی که از ۷ نوع گرانیت استفاده گردیده واژه تمام نمونه‌ها به کار برده شده است.

بردن میزان همپوشانی از روابط نمایی، خطی یا لگاریتمی که دارای بالاترین همپوشانی بین داده هاست، استفاده گردید. برای حصول به رگرسیون مناسب در بعضی از

جدول ۱: رده بندی سنگ‌ها براساس ضریب K [15]

K	نوع ماده	گروه سنگ‌ها
۰/۱۷۰	مواد کربناتی با با رخ بلوری به خوبی توسعه یافته (به عنوان مثال، سنگ آهک، دولومیت و سنگ مرمر)	گروه a
۰/۲۳۱	مواد آریلیتی (به عنوان مثال، گلسنگ، شیل، خاک رس)	گروه b
۰/۲۷۰	مواد آرنایتی با بلورهای قوی و رخ با توسعه ضعیف بلوری (به عنوان مثال، ماسه سنگ و سنگ شنی محتوی کوارتز)	گروه c
۰/۲۷۶	مواد بلوری آذرین پلی مینرال ریز دانه (به عنوان مثال آندزیت، دولریت، دیاباز و ریولیت)	گروه d
۰/۶۵۹	مواد دگرگونی و آذرین پلی مینرال درشت دانه (برای مثال گرانیت، گابرو و گنیس)	گروه e

جدول ۲: مقادیر سختی واجهشی اشمیت

آق بلاغ			دودانگه (DOB)	هیراب (HB)	دهگاه (DB)	گیجالی (GB)	نام ایستگاه سختی اشمیت
(AB3)	(AB2)	(AB1)					
47.5	30	25.4	45.2	40	48	58.5	برداشت ۱
35	40	28.5	48	30	47.5	40.2	برداشت ۲
30	45	30.1	40.5	50	44.2	30	برداشت ۳
40	45	35	50	35	50.3	41.7	برداشت ۴
40.2	40	38	50.8	40	52	39.5	برداشت ۵
41.2	45	42	48	42.5	30	40.7	برداشت ۶
30	50	50.2	50.7	32.4	31.2	40	برداشت ۷
48.2	45	51	48	42.7	49	42	برداشت ۸
40.2	40.2	40.2	42.7	44.6	57.5	38.5	برداشت ۹
40.5	35.2	42.5	30	31.8	48.3	31.4	برداشت ۱۰
44	38.9	32	50	20.2	57.4	42.4	برداشت ۱۱
30.5	30.7	32.5	40.8	38.7	55.1	31	برداشت ۱۲
41.5	40.1	45	30	32.4	35	38	برداشت ۱۳
57.2	48.6	42.7	48	33.4	48	43.8	برداشت ۱۴
50.5	35	25	40.7	34.6	55.6	45.2	برداشت ۱۵
50.5	32.4	40.2	45	20.4	50.1	51.3	برداشت ۱۶
50.5	33	30.6	40	38.5	50.4	58	برداشت ۱۷
52	44	42	40.5	25.5	38	52.7	برداشت ۱۸
47.5	45.7	48	30	40	39	55.6	برداشت ۱۹
48.7	40.9	35.1	50.4	50	52.3	59.2	برداشت ۲۰
46.3	44.4	42.8	58	30.1	55	53	برداشت ۲۱
45.2	40	38	55	35.4	59.7	30.5	برداشت ۲۲
30.5	40.5	30	50	40	58.8	54.4	برداشت ۲۳
40.2	38	35	45	40.2	55	48.2	برداشت ۲۴
55.9	48	42.8	50	37.8	46	55.1	برداشت ۲۵
40.8	38.4	45	45	37.4	31	42	برداشت ۲۶
35.3	45	40	58	35	39.5	58	برداشت ۲۷
30	38	38.9	52	38	40.4	30.1	برداشت ۲۷
38.7	45	47.8	44	34.7	54.2	55.2	برداشت ۲۹
38	45	58	50.4	20.5	51.4	30.4	برداشت ۳۰
46	43	43	49	39	52	49	میانگین

جدول ۳: میانگین مقادیر مقاومت فشاری تک محوری گرانیت‌ها بر حسب مگاپاسکال

نام گرانیت	خشک			طبیعی			اشباع		
	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل	حداکثر	میانگین	حداقل
GB	131.7	123	110.5	161	112	60.5	125.3	107.5	93.3
DB	124.7	103.5	89	107.5	101.6	92.5	121.7	96.2	64.7
DOB	136	121.7	110.8	108.6	96.5	88	64.2	64.1	57.3
AB1	145.7	111.4	91.5	57.6	54.4	50.2	57.6	52.6	48.1
AB2	62.3	58.6	30.4	74.8	51.3	28.1	29.3	18.6	12.9
AB3	117.5	103.5	91	90.8	71.2	54.5	47.2	41.5	35
HB	76.1	72.3	63.3	75.3	57.6	60.1	53.2	43.1	37.2

جدول ۴: میانگین نتایج حاصل از آزمون برزیلین

ایستگاه	نوع گرانیت	مقاومت کششی غیر مستقیم یا آزمون برزیلی (Mpa(σ_t))		
		خشک	طبیعی	اشباع
GB	مونزوگرانیت	10.3	10	14.6
DB	گرانیت اسفندار	9.7	8.3	7.3
DOB	گرانودیوریت	11.2	9.8	8.4
AB1	مونزوگرانیت	5.6	4.4	4.9
AB2	مونزوگرانیت	3.8	3.5	3
AB3	لوکوگرانیت	6.3	6.1	5
HB	تونالیت	6	5.2	4.6

جدول ۵: مقادیر شاخص و مفاهیم شکنندگی سنگ‌های گرانیتی

ایستگاه	نوع گرانیت	BI			B ₁			B ₂			B ₃			B ₄		
		خشک	طبیعی	اشباع	خشک	طبیعی	اشباع	خشک	طبیعی	اشباع	خشک	طبیعی	اشباع	خشک	طبیعی	اشباع
GB	مونزوگرانیت	4.94	4.91	4.78	11.89	12.04	7.38	0.84	0.85	0.76	635.9	597.4	782.4	25.2	24.4	28
DB	گرانیت اسفندار	4.74	4.72	4.66	10.65	12.20	13.25	0.83	0.85	0.86	503	423.3	349.3	22.4	20.6	18.7
DOB	گرانودیوریت	4.93	4.66	4.22	10.85	9.82	7.66	0.83	0.82	0.77	682.7	474.4	268.8	26.1	21.8	16.4
AB1	مونزوگرانیت	4.83	4.05	4.02	19.79	12.41	10.80	0.90	0.85	0.83	313.6	119	128.1	17.7	10.9	11.3
AB2	مونزوگرانیت	4.12	3.99	3.13	15.30	14.75	6.24	0.88	0.87	0.72	112.2	89.3	27.7	10.6	9.5	5.3
AB3	لوکوگرانیت	4.74	4.33	3.79	16.47	11.75	8.39	0.89	0.84	0.79	324.8	215.7	102.8	18	14.7	10.1
HB	تونالیت	4.34	4.11	3.82	12.15	10.99	9.28	0.85	0.83	0.81	215.2	150.9	99.9	14.7	12.3	10

جدول ۶: رده بندی سنگ‌ها براساس شاخص شکنندگی [4]

توصیف	شاخص شکنندگی (BI)	رده سنگ
خیلی شکننده	BI > 25	1
شکننده	15 < BI < 25	2
متوسط شکننده	10 < BI < 15	3
کمی شکننده	BI < 10	4

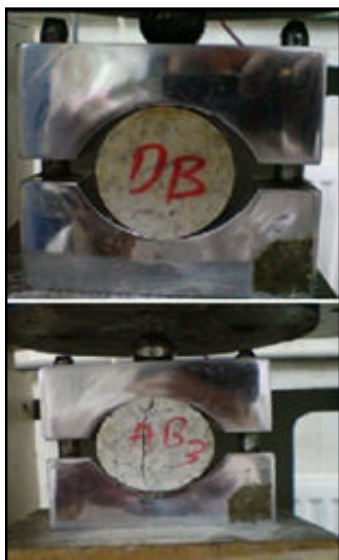
جدول ۷: تعیین قابلیت حفاری سنگ‌ها براساس مفهوم شکنندگی B₄ [6]

قابلیت حفاری	توصیف شکنندگی	مقادیر مفهوم شکنندگی B ₄
خیلی آسان	کمی شکننده	0-10
آسان	متوسط شکننده	10-15
متوسط	شکننده	15-20
سخت	خیلی شکننده	20-25
بسیار سخت	بسیار شکننده	25 <

R^2) بین سختی حاصل از روش ISRM با شاخص شکنندگی در رطوبت خشک، طبیعی و اشباع به ترتیب برابر ۰/۸۱، ۰/۷۲ و ۰/۷۵ به دست آمده است (شکل ۳). همبستگی $R^2=0/81$ برای ۶ نمونه از ۷ نمونه گرانیته مورد آزمایش برقرار است و تمام آن‌ها را شامل نمی‌شود. ولی $R^2=0/72$ نشان دهنده بهترین همبستگی بین سختی حاصل از روش ISRM با شاخص شکنندگی برای تمام نمونه‌ها در رطوبت طبیعی است و با رابطه نمایی γ بیان می‌شود.

$$R^2 = 0.72 \quad (\gamma)$$

$$BI = 2.144 e^{0.015 SRH}$$

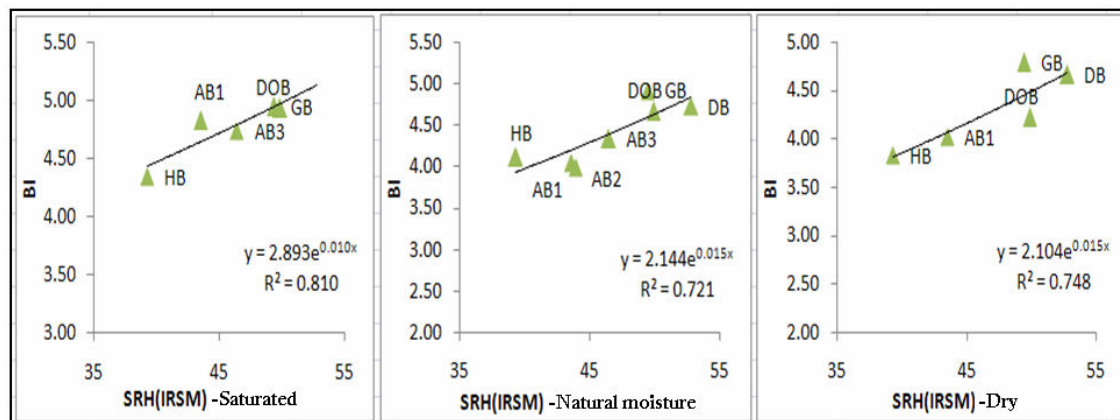


رابطه سختی واجهشی چکش‌اشمیت (SRH) با شاخص شکنندگی (BI)

در بررسی همبستگی بین چکش‌اشمیت (SRH) با شاخص شکنندگی (BI) از روش رگرسیون حداقل مربع استفاده گردید. با این روش، معادله بهترین خط برازش و مربع رگرسیون (R^2) برای تعیین بیش‌ترین همپوشانی بین داده‌ها مورد توجه قرار گرفت (شکل ۳).

همان‌طور که از شکل ۳ مشخص می‌باشد بین سختی واجهشی چکش‌اشمیت (SRH) با شاخص شکنندگی (BI) در رطوبت خشک، طبیعی و اشباع رابطه مناسبی برقرار است. برای ارتباط بین این دو ویژگی رابطه نمایی با روند صعودی بهترین همبستگی را نشان می‌دهد. همبستگی

شکل ۲: جگونگی انجام آزمایش برزیلین



شکل ۳: ارتباط شاخص شکنندگی با میانگین سختی واجهشی چکش‌اشمیت

$$R^2 = 0.72 \quad (10)$$

$$B_3 = 28.76SHV - 1076$$

با افزایش سختی سنگ مفهوم شکنندگی B_4 در حالت رطوبت طبیعی به صورت نمایی افزایش می‌یابد. در این میان بهترین همپوشانی در مرتبه اول مربوط به سختی حاصل از روش ISRM می‌باشد (شکل ۷). این مورد با ضریب همبستگی ۰/۷ برای سختی حاصل از روش ISRM با رابطه ۱۱ نشان داده شده است.

$$(R^2 = 0.70) \quad (11)$$

$$B_4 = 1.148e^{0.057SHV}$$

بررسی ارتباط نسبت مفاهیم شکنندگی با سختی واجهشی چکش اشمیت نشان می‌دهد که نسبت B_1/B_2 با سختی واجهشی سنگ‌ها رابطه مستقیم دارد (شکل ۸).

نسبت‌های دیگر مفاهیم شکنندگی در مقابل سختی سنگ‌های گرانیته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب نسبت مفاهیم شکنندگی B_3/B_1 و B_3/B_2 در مقابل سختی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ بهترین ارتباط بین نسبت مفاهیم شکنندگی B_3/B_1 با سختی واجهشی در رطوبت طبیعی طبق رابطه ۱۲ برقرار است.

$$(R^2 = 0.95) \quad (12)$$

$$\frac{B_3}{B_1} = 6.91SHV - 295.5$$

با افزایش نسبت مفاهیم شکنندگی B_3/B_2 سختی واجهشی سنگ‌های گرانیته به صورت خطی افزایش می‌یابد. در این میان بهترین همپوشانی مربوط به حالت رطوبت طبیعی است که این مطلب با ضریب همبستگی ۰/۷ و رابطه ۱۳ بیان می‌شود (شکل ۱۰).

$$(R^2 = 0.7) \quad (13)$$

$$\frac{B_3}{B_2} = 34.5SRH - 1291$$

با افزایش نسبت مفاهیم شکنندگی B_3/B_2 سختی واجهشی سنگ‌های گرانیته به صورت خطی افزایش می‌یابد. در این میان بهترین همپوشانی مربوط به حالت رطوبت طبیعی است که این مطلب با ضریب همبستگی ۰/۷ و رابطه ۱۳ بیان می‌شود (شکل ۱۰).

$$(R^2 = 0.7) \quad (13)$$

$$\frac{B_3}{B_2} = 34.5SRH - 1291$$

ارتباط سختی چکش اشمیت با مفاهیم شکنندگی

ارتباط بین پارامتر شکنندگی B_1 و عدد سختی اشمیت حاصل از روش ISRM با رابطه ۸ بیان می‌شود. این نتایج از این نظر اهمیت دارد که نشان دهنده یک ارتباط مستقیم بین سختی و مفهوم شکنندگی B_1 سنگ‌های گرانیته می‌باشد. به طوری که با افزایش سختی سنگ‌ها مفهوم شکنندگی B_1 آن‌ها نیز افزایش می‌یابد (شکل ۴). لازم به توضیح است که در شکل ۳ شاخص شکنندگی (BI) با سختی سنگ مقایسه شده ولی در شکل ۴ یکی از مفاهیم شکنندگی یعنی B_1 با SRH مقایسه گردیده است. این دو پارامتر یکسان نبوده و می‌توانند نتایج متفاوتی با SRH نشان دهند. این نتیجه با کار ارائه شده توسط سایر پژوهشگران همخوانی دارد [6].

$$(R^2 = 0.98) \quad (8)$$

$$B_1 = 8.05e^{0.008SRH}$$

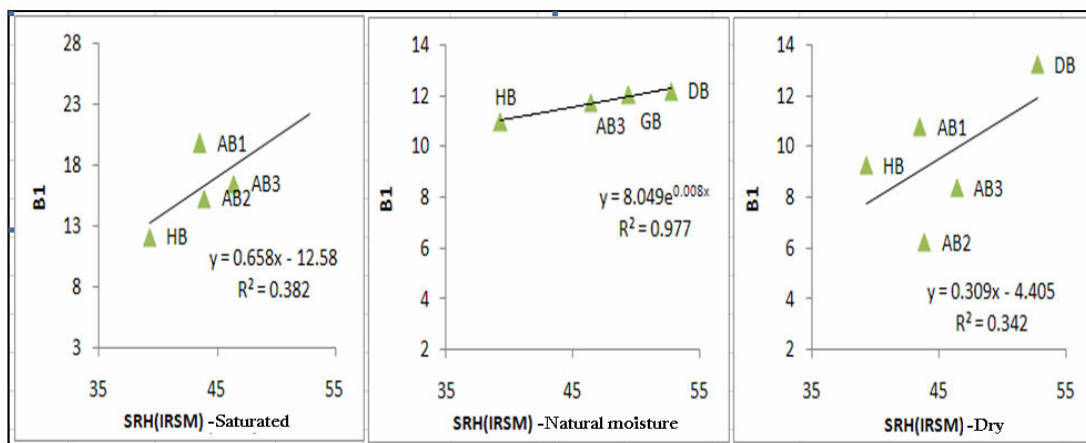
بهترین همپوشانی بین سختی چکش اشمیت با پارامتر شکنندگی B_2 برای حدود ۶۰ درصد نمونه‌های مورد مطالعه در حالت رطوبت طبیعی با رگرسیون نزدیک به ۰/۹۷ دیده می‌شود (شکل ۵). لازم به ذکر است که ۴ نمونه از ۷ نمونه مورد آزمایش چنین رگرسیونی را ارائه داده به این معنا که ۴ تقسیم بر ۷ و ضرب در ۱۰۰ بیان کننده درصد نمونه‌های اثر گذار در همپوشانی بوده که حدود ۶۰ درصد خواهد شد. این ارتباط را می‌توان با رابطه ۹ بیان نمود.

$$R^2 = 0.97 \quad (9)$$

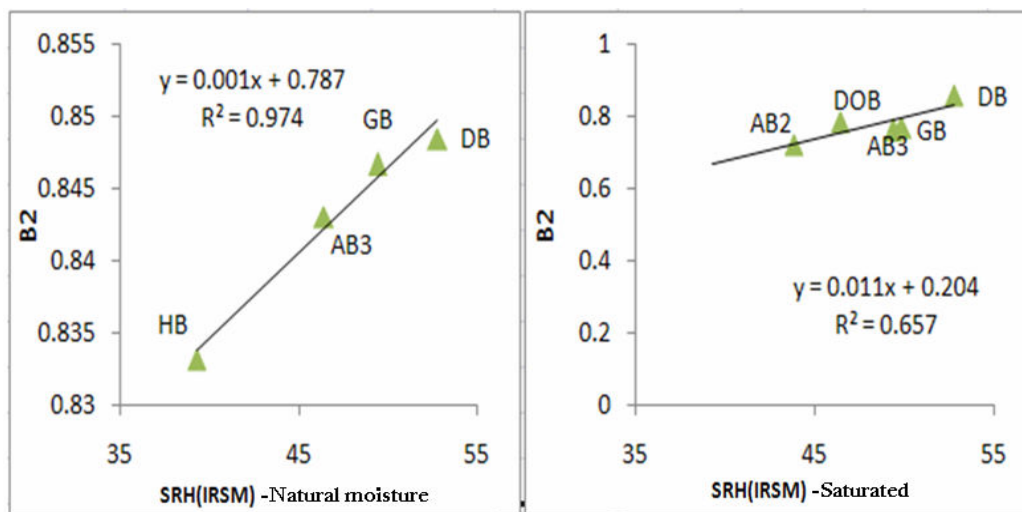
$$B_2 = 0.001SRH + 0.79$$

همان طور که از شکل ۶ مشاهده می‌شود بهترین همبستگی در سه حالت رطوبت طبیعی، خشک و اشباع بین سختی واجهشی اشمیت با مفهوم شکنندگی B_3 سنگ‌های گرانیته مشاهده می‌شود. این ارتباط دارای ضریب همبستگی بیش‌تر از ۰/۷ است (شکل ۶).

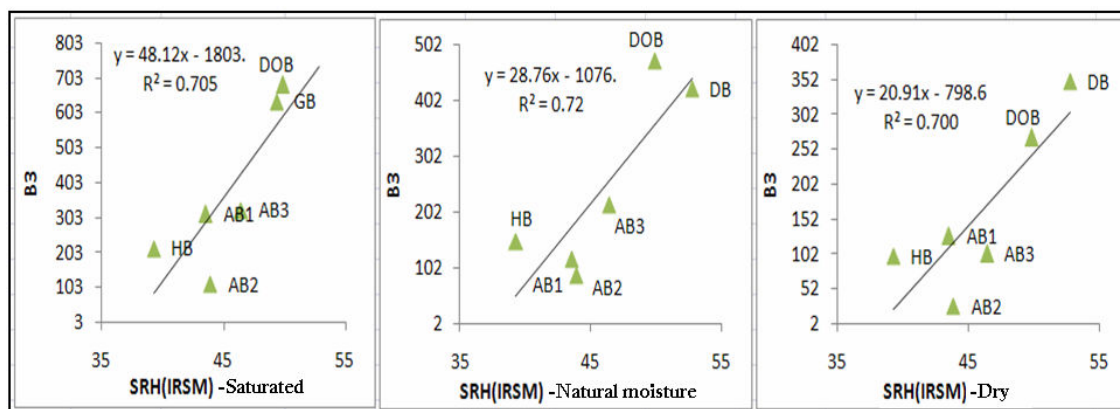
بهترین همبستگی برای ۸۶ درصد نمونه‌ها در حالت رطوبت طبیعی با همپوشانی ۰/۷۲ وجود دارد. این ارتباط بین سختی حاصل از روش ISRM و مفهوم شکنندگی B_3 به صورت خطی با رابطه ۱۰ ارائه شده است.



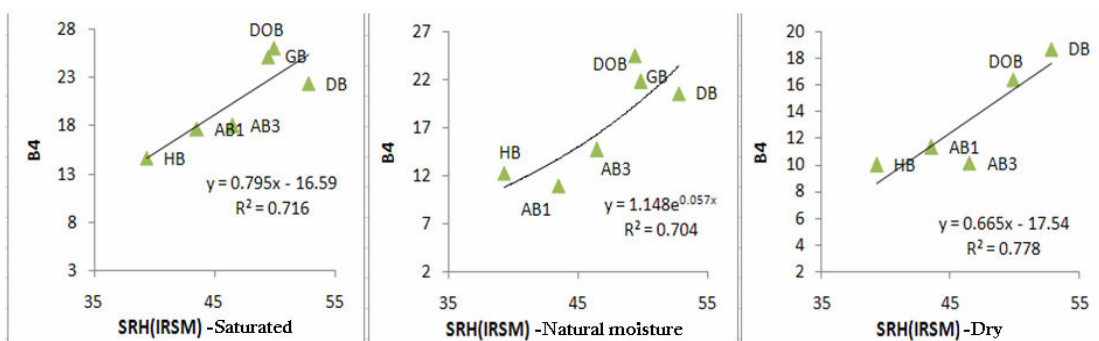
شکل ۴: ارتباط پارامتر شکنندگی B₁ با میانگین سختی چکش اشمیت



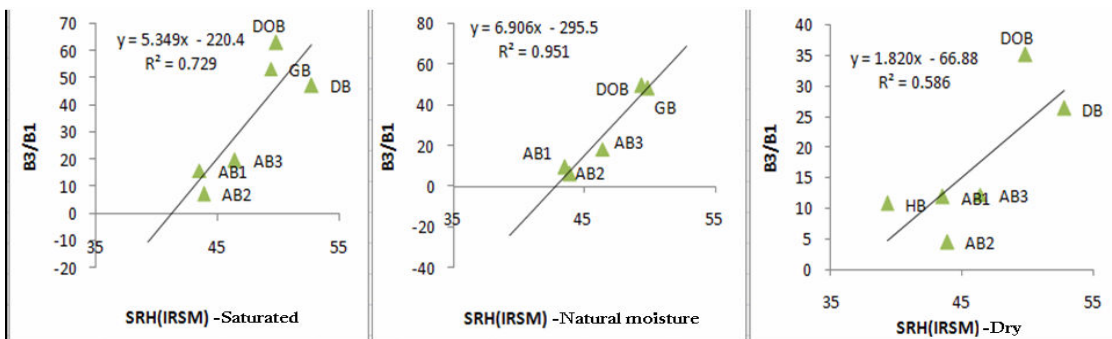
شکل ۵: ارتباط پارامتر شکنندگی B₂ با میانگین سختی چکش اشمیت



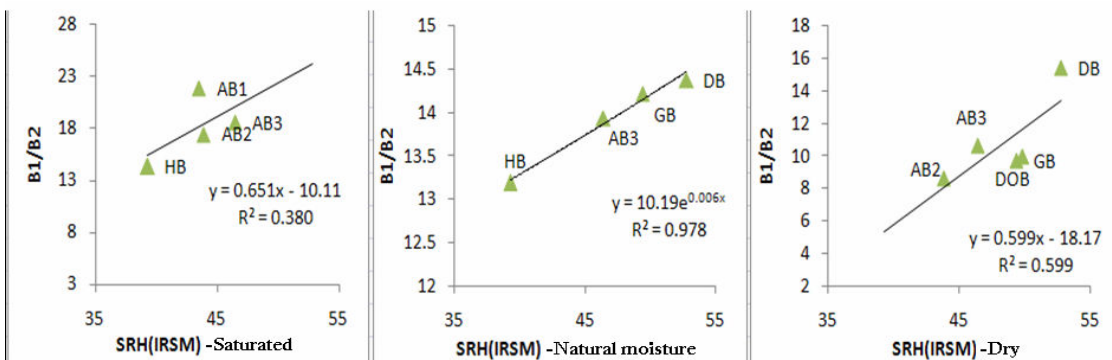
شکل ۶: ارتباط پارامتر شکنندگی B₃ با میانگین سختی چکش اشمیت



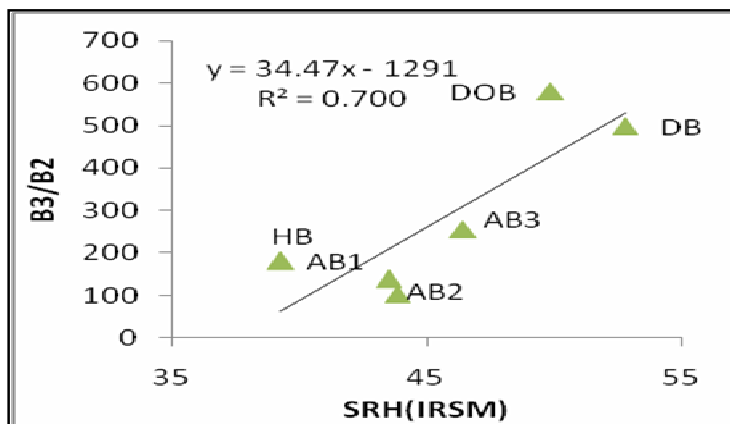
شکل ۷: بالاترین همپوشانی بین پارامتر شکنندگی B_4 با میانگین سختی چکش اشمیت



شکل ۸: ارتباط نسبت مفاهیم شکنندگی B_3/B_1 با میانگین سختی چکش اشمیت



شکل ۹: ارتباط نسبت مفاهیم شکنندگی B_3/B_1 با میانگین سختی واجهشی چکش



شکل ۱۰: بالاترین همپوشانی بین پارامتر شکنندگی B_3/B_2 با میانگین سختی واجهشی چکش اشمیت در رطوبت طبیعی

مقاومت فشاری و کششی گرانیتهای مورد مطالعه دارند، به طوری که گرانیتهای گيجالی با داشتن سختی بالا مقاومت فشاری و کششی بالا و نهایتاً شاخص شکنندگی بالایی نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر به دست آمده برای شاخص شکنندگی، گرانیتهای بروجرد در رده کمی شکننده قرار می‌گیرند. ارتباط مفاهیم شکنندگی B_1 ، B_2 ، B_3 و B_4 با سختی واجهشی در گرانیتهای دهگانه و هیراب قابل توجه است. گرانیتهای دهگانه (DB) و هیراب (HB) از نظر اندازه ذرات هر دو متوسط دانه هستند. گرانیتهای دهگانه (DB) و هیراب (HB) به ترتیب دارای بالاترین و پائین‌ترین سختی هستند (جدول ۲). مقادیر مفاهیم شکنندگی B_1 ، B_2 ، B_3 و B_4 در گرانیتهای دهگانه (DB) برای حالت رطوبت طبیعی به ترتیب ۰/۸۵، ۰/۸۳، ۰/۸۳، ۰/۸۳ و ۰/۸۳ می‌باشند (جدول ۵). مقاومت تراکمی تک محوری گرانیتهای دهگانه (DB) و هیراب (HB) برای حالت رطوبت طبیعی به ترتیب ۱۰۱/۶۴ و ۴۳/۰۵ مگاپاسکال است (جدول ۴). همان‌طور که ملاحظه می‌شود نقش ویژگی مکانیکی یعنی افزایش مقاومت فشاری تک محوری و سختی واجهشی سنگ در افزایش مفاهیم شکنندگی B_1 ، B_2 ، B_3 و B_4 گرانیتهای دهگانه (DB) و هیراب (HB) مشخص می‌باشد. سنگ‌های با مقاومت بالا از سنگ‌های با مقاومت پائین شکننده‌تر هستند. مقایسه مقاومت کششی گرانیتهای شاخص و مفاهیم شکنندگی در رطوبت طبیعی نشان می‌دهد که سنگ دارای مقاومت کششی زیادتر، شکننده‌تر است. این موضوع در مورد گرانیتهای گيجالی صادق است. این گرانیتهای با داشتن مقاومت کششی بالا (حدود ۱۰ مگاپاسکال) از سایر گرانیتهای بروجرد شکننده‌تر است. همخوانی بهتر نتایج آزمایش‌ها با رطوبت طبیعی نسبت به حالت خشک تا حدی با اثرات منفی حضور آب در نمونه‌ها و تاثیر آن بر روی میزان شکنندگی مغایرت دارد. علت می‌تواند ناشی از تداخل بسیار پائین و تراوایی کم گرانیتهای باشد. با توجه به ترکیب کانی‌شناسی عموماً درصد جذب آب در این سنگ‌ها کم است. و این آب اندک می‌تواند حساسیت آن‌ها را در مقابل شکنندگی افزایش دهد و لذا بین نتایج در رطوبت طبیعی هم‌پوشانی بهتری برقرار است.

در جدول ۷ معادلات و ضرایب همبستگی بین شکنندگی و سختی واجهشی چکش اشمیت ارائه شده است. بر این اساس ارتباط بین شکنندگی و سختی واجهشی سنگ‌های گرانیتهای دارای ضرایب همبستگی مناسبی هستند. بیش‌ترین ضریب همبستگی به دست آمده در این بررسی با مقدار ۰/۷۳ بین سختی واجهشی سنگ و شاخص شکنندگی (BI) برای همه نمونه‌ها و در مرحله بعدی با مقدار ۰/۷۲ برای ۸۶ درصد نمونه‌ها بین سختی واجهشی و مفهوم شکنندگی B_3 برقرار است.

بحث

شکنندگی یکی از خصوصیات مکانیکی سنگ‌هاست که می‌تواند تابعی از مقاومت فشاری و کششی سنگ باشد. سختی واجهشی سنگ نیز از دیگر ویژگی‌های سنگ‌هاست که تابعی از استحکام و دوام آن‌ها بوده و می‌توان با استفاده از آن مقاومت و شکنندگی سنگ را برآورد نمود. بر اساس آزمایش سختی واجهشی چکش اشمیت سنگ‌های گرانیتهای با مقادیر سختی واجهشی بالای ۴۰ در رده سنگ‌های سخت قرار می‌گیرند. گرانیتهای دهگانه طبق روش ISRM با سختی واجهشی نزدیک به ۵۳ در بالاترین رده و گرانیتهای هیراب با سختی واجهشی ۳۹/۲۹ در پائین‌ترین رده واقع می‌شوند. مقاومت فشاری تک محوری ارتباط مشخصی با سختی واجهشی سنگ‌های گرانیتهای بروجرد دارد. با افزایش سختی واجهشی سنگ‌ها مقاومت فشاری آنها نیز افزایش می‌یابد. برای مثال گرانیتهای گيجالی و دهگانه با بالاترین سختی واجهشی بیش‌ترین مقدار مقاومت فشاری تک محوری را به ترتیب با مقاومت ۱۲۳ و ۱۰۳/۵ مگاپاسکال به خود اختصاص داده‌اند. مقاومت کششی به دست آمده از آزمون برزیلین ۱۰ درصد مقاومت فشاری تک محوری گرانیتهای هاست و ارتباط مشخصی بین سختی واجهشی و مقاومت کششی این سنگ‌ها برقرار است به طوری که گرانیتهای گيجالی همچنان با داشتن سختی بالا، مقاومت برزیلی نزدیک به ۱۰/۵ مگاپاسکال را نشان می‌دهد. با بررسی مقادیر شاخص شکنندگی ملاحظه می‌شود که بیش‌ترین مقدار BI برای این سنگ‌ها در حالت خشک از ۲/۴۴ تا ۴/۴۴ متغیر می‌باشد که به ترتیب مربوط به گيجالی و آق بلاغ ۲ است. این نتایج نیز هم‌پوشانی خوبی با سختی و

جدول ۷: روابط حاصل از بررسی شکنندگی و سختی واجهشی چکش اشمیت توده گرانیتی بروجرد

پارامتر مورد بررسی	معادلات	حالت رطوبت	ضریب همبستگی
سختی واجهشی با شاخص شکنندگی	$BI = 1.022 e^{0.026 SHV}$	طبیعی	0.70
سختی واجهشی با مفهوم شکنندگی B_3	$B_3 = 0.14 e^{0.153 SHV}$	طبیعی	0.72
سختی واجهشی با مفهوم شکنندگی B_4	$B_4 = 0.375 e^{0.076 SHV}$	طبیعی	0.72
سختی واجهشی با مفاهیم شکنندگی B_3/B_2	$B_3/B_2 = 34.47 SHV - 1291$	طبیعی	0.7

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصله از این پژوهش:

۱- رابطه مناسبی بین سختی واجهشی و مفاهیم شکنندگی گرانیت‌های بروجرد وجود دارد. این ارتباط در حالت رطوبت طبیعی مناسب‌تر است.

۲- بالاترین ضریب همبستگی بین سختی واجهشی اشمیت و شاخص شکنندگی (BI) گرانیت‌های بروجرد ۰/۷۳ است.

۳- برای بیش از ۸۶ درصد نمونه‌ها بین سختی واجهشی اشمیت و پارامتر شکنندگی B_3 و B_4 ضریب همبستگی ۰/۷۲ است.

۴- با توجه به مقادیر شاخص شکنندگی (BI) گرانیت‌های بروجرد در رده کمی شکننده قرار می‌گیرند.

۵- شاخص شکنندگی گرانیت‌ها با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد. این موضوع ناشی کاهش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته باشد.

۶- بالاترین قابلیت حفاری مربوط به گرانیت آق بلاق ۲ و پایین‌ترین قابلیت حفاری مربوط به مونزوگرانیت گیجالی می‌باشد.

۷- سنگ دارای مقاومت کششی بالاتر، شکنندگی بیش تری دارد.

۸- سنگ‌های با سختی واجهشی بالاتر، شکننده‌تر هستند.

۹- بیش‌ترین همپوشانی بین سختی واجهشی با مفاهیم شکنندگی در رطوبت طبیعی وجود دارد لذا می‌توان از سختی واجهشی در محل و با رطوبت طبیعی برای برآورد شکنندگی گرانیت‌ها استفاده نمود.

۱۰- مقایسه سختی واجهشی اشمیت با مفاهیم شکنندگی مفیدتر از مقایسه آن با نسبت مفاهیم شکنندگی می‌باشد.

منابع

- [۱] رسولی‌فرح، م (۱۳۸۹) مطالعه خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی گرانیت‌های شمال و شمال خاوری بروجرد، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، ۱۶۶ص.
- [۲] فهیمی فر، ا. سروش، ح (۱۳۸۰) آزمایش‌های مکانیک سنگ مبانی نظری و استانداردها (جلد اول) آزمونهای آزمایشگاهی نشر شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک و مرکز نشر پرفسور حسابی.
- [۳] نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بروجرد، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- [4] Aftes (2003) Guidelines for characterization of rock masses useful for the design and the construction of underground structures. Tunnels etouvrages Souterrains, Juin; (177). p. 49.
- [5] Altindag R (2000) The role of rock brittleness on the analysis of percussive drilling performance. In: Proceedings the Fifth Turkish National RockMechanism Symposium, Isparta, 2000. p. 105–112.
- [6] Altindag Rasit (2010) Assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency. Rock Mech Rock Eng. 43:361–370.
- [7] ASTM (2001) Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method.
- [8] Ayday C, G. and Oktan RM (1992) Correlations between L and N-type Schmidt hammer rebound values obtained during field-testing. In: Hudson JA, editor.

- Geotechnical Engineering ASCE, vol. 3, no. 6, pp. 730–747.
- [18] Kahraman S. and Altindag R (2004) A brittleness index to estimate fracture toughness. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, 343–348
- [19] Kahraman S., Fener M. and Gunaydin O (2002) predicting the Schmidt hammer values Of in-situ intact rock from core sample values, *international of Rock mechanics & Mining Sciences*, Technical note, 39 pp395-399.
- [20] Katz O, Reches Z, Roegiers JC (2000) Evaluation of mechanical rock properties using a schmidt hammer. 37:723-8.
- [21] Lawn BR, Marshall DB (1979) Hardness, Toughness and Brittleness: An Indentation Analysis. *J. Ceramic. Soc.* 62(78): 347-350.
- [22] Quinn J.B, Quinn G.D (1997) Indentation brittleness of ceramics: a fresh approach, *J. Mat. Sci.*, 132: 4331-4346.
- [23] Singh S. P (1986) Brittleness and the mechanical winning of coal. *Min Sci Technol* 1986;3:173–80.
- [24] Yagiz S (2009) Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24 (2009) 66–74
- [25] Zhang L (2005) “Engineering Properties of Rocks”, Vol. 4, 1-290, Elsevier Publ., Amsterdam.
- International ISRM Symposium on Rock Characterization. Chester. p. 47–50.
- [9] Dahl, F (2003) DRI, BWI, CLI Standards, NTNU, Angleggsdrift, Trondheim, Norway.
- [10] Deere DU, Miller RP (1966) Engineering classifications and index properties of intact rock. Tech. Report No. AFWL-TR 65-116, University of Illinois.
- [11] Evans I. and Pomeroy CD (1966) The strength fracture and workability of coal. Oxford: Pergamon Press; 1966
- [12] Goktan RM (1991) Brittleness and micro-scale rock cutting efficiency. *Min Sci Technol* 1991;13:237–41.
- [13] Goktan, R.M. and Yilmaz Gunes N (2005) A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting efficiency. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 105 (10), 727–734.
- [14] Greco R and Sorriso-Valvo M (2005) Relationships between joint apparent separation, Schmidt hammer rebound value, and distance to faults, in rocky outcrops, Calabria, Southern Italy. *Eng Geol*;78:309–20.
- [15] Hoek, E (1983) Strength of jointed rock masses. *Geotechnique*, vol. 33, no. 3, pp. 187–223.
- [16] ISRM (1978) Suggested Methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. 15:89-98
- [17] Johnstone, I.W (1985) Strength of intact geomechanical materials. *Journal of*