

ارزیابی شاخص شکنندگی S20، خصوصیات مهندسی و پتروگرافی برخی سنگ‌های آذرین معدن سنگ آهن سنگان خواف

علی قاسم‌پور^{۱*}، غلامرضا لشکری‌پور^۲ و محمد غفوری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد،

۲ و ۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

نویسنده مسئول: ghasempouramirarsalan7522@gmail.com*

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۹۹/۱۰/۱۳

دریافت: ۹۹/۳/۱۴

چکیده

شکنندگی یکی از مهم‌ترین خصوصیات مکانیکی سنگ است که در حفاری سازه‌های زیرزمینی مانند حفر تونل کاربرد گسترده‌ای دارد. تاکنون روش‌های زیادی برای برآورد شکنندگی سنگ معرفی گردیده است اما استاندارد برای اندازه‌گیری شکنندگی مطرح نشده است. در این پژوهش بر روی ۱۹ نمونه از برخی سنگ‌های آذرین (گرانیت، گرانودیوریت و داسیت) معدن سنگ آهن سنگان خواف آزمایشات تعیین شکنندگی S20، همراه با خصوصیات پتروگرافی (درصد کانی‌های اصلی)، فیزیکی (چگالی خشک، چگالی اشباع، تخلخل و درصد جذب آب)، مکانیکی (مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای) و دینامیکی (سرعت موج فشاری و برشی) در دو حالت خشک و اشباع انجام شد. تحلیل آماری نتایج نشان می‌دهد که با افزایش آلکالی فلدسپات و کاهش کوارتز و پلاژیوکلاز مقدار شکنندگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین وجود ریزدازه‌ها و رگه‌های کربناتی باعث کاهش مقاومت و افزایش شکنندگی سنگ می‌شود و قابلیت حفارپذیری نمونه‌ها آسان‌تر شده است که این عامل در حالت اشباع تشدید می‌گردد. یک رابطه معکوس بین شکنندگی S20 و شاخص‌های شکنندگی وجود دارد، و با افزایش مقدار شکنندگی S20 مقادیر شاخص‌های شکنندگی کاهش می‌یابد. ارتباط بین شکنندگی S20 با شاخص‌های شکنندگی B3 و B4 دارای بیش‌ترین ضریب تعیین می‌باشد که به عنوان یک نتیجه می‌توان گفت که شکنندگی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه می‌تواند در بیان شکنندگی سنگ‌ها واقع بینانه‌تر باشد.

واژه‌های کلیدی: شکنندگی S20، آلکالی فلدسپات، سنگ آذرین، سنگان خواف

۱- پیشگفتار

شکنندگی یکی از مهم‌ترین خصوصیات مکانیکی سنگ است که در حفاری سازه‌های زیرزمینی مانند حفر تونل به کمک ماشین‌بازویی^۱ و ماشین حفاری تونل تمام مقطع (TBM) اثرگذار است (تورو، ۱۹۹۷). در مهندسی سنگ، شکنندگی اصطلاحی است که معمولاً برای شناسایی ویژگی‌های احتمالی شکست توده سنگ به کار می‌رود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶). تا به امروز، چندین تعریف مختلف برای تعیین کمیت شکنندگی سنگ‌ها ارائه شده است. به عنوان مثال رمزی شکنندگی را به عنوان تخریب چسبندگی داخلی ماده سنگ تعریف کرده است (رمزی، ۱۹۶۷) و هاوول شکنندگی را به عنوان خاصیتی از ماده سنگی که شکست یا گسیختگی در آن بدون تغییر شکل پلاستیک یا مقادیر کم آن رخ می‌دهد

تعریف کرده است (هاوول، ۱۹۶۰) و تاراسوف و پوتوین آن را به عنوان یک روند شکست خود پایدار بیان می‌کنند (تاراسوف و پوتوین، ۲۰۱۳). با این وجود، هنوز تعریف و روش اندازه‌گیری مشخصی برای شکنندگی وجود ندارد. طبق گزارش هوکا و داس (۱۹۷۴) و ژانگ و همکاران (۲۰۱۶)، با افزایش شکنندگی، سنگ‌های شکننده معمولاً ویژگی‌های زیر را نشان می‌دهند: (۱) مقادیر پایین کشیدگی دانه‌ها، (۲) نسبت بالاتر مقاومت فشاری به مقاومت کششی، (۳) سختی بالاتر، (۴) زاویه اصطکاک داخلی بالاتر، (۵) تشکیل ترک در دندانه‌ها، (۶) انعطاف‌پذیری بالاتر ناشی از نسبت الاستیک بزرگ‌تر، (۷) درصد بیش‌تر کانی‌های شکننده مانند کوارتز و حداقل مقدار کانی‌های قبل انعطاف مانند کانی رس، (۸) مقادیر بالای مدول یانگ و مقادیر پایین‌تر نسبت پواسون، (۹)

¹ Roadheader

از سنگ‌های آذرین پیشنهاد کردند یک روند منظم بین چگالی خشک، سرعت موج P، سختی چکش‌اشمیت با مقدار شکنندگی سنگ‌های مورد مطالعه وجود دارد و سنگ‌هایی که دارای سختی متوسط هستند از میزان شکنندگی بالاتری برخوردار هستند (علیقلی و همکاران، ۲۰۱۶). در این تحقیق، تاثیر خصوصیات شاخص و پتروگرافی بر شکنندگی S20 و شاخص‌های شکنندگی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی معدن

معدن سنگ آهن سنگان خواف در فاصله ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر مشهد و ۱۸ کیلومتری شمال شرقی شهر سنگان در استان خراسان رضوی قرار دارد و از نظر موقعیت جغرافیایی بین طول‌های جغرافیایی ۶۰ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۶۰ درجه شرقی و ۴۵ دقیقه و عرض‌های جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۳ دقیقه شمالی در نزدیک مرز افغانستان واقع شده است (شکل ۱). این معدن به دلیل عیار بالای آهن، پایین بودن میزان فسفر و ذخیره فراوان، یکی از مهم‌ترین ذخایر آهن ایران و غرب آسیا به شمار می‌رود. در مطالعاتی که توسط کریم‌پور و همکاران (۱۳۸۱) انجام شده است، گفته شده که معدن سنگ آهن سنگان خواف جزئی از کمربند آتشفشانی-پلوتونیک خواف-کاشمر-بردسکن است که با روند شرقی-غربی در شمال گسل درونه قرار دارد. سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه بیش‌تر شامل سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آذرین است که به طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط و تا حدودی مافیک با سن ترشیاری تشکیل شده که توده‌های گرانیتوئیدی با ترکیبی از گرانیت تا مونزونیت در آن نفوذ کرده‌اند (کریم‌پور، ۲۰۰۶).

۳- مواد و روش پژوهش

۳-۱- خصوصیات پتروگرافی نمونه‌ها

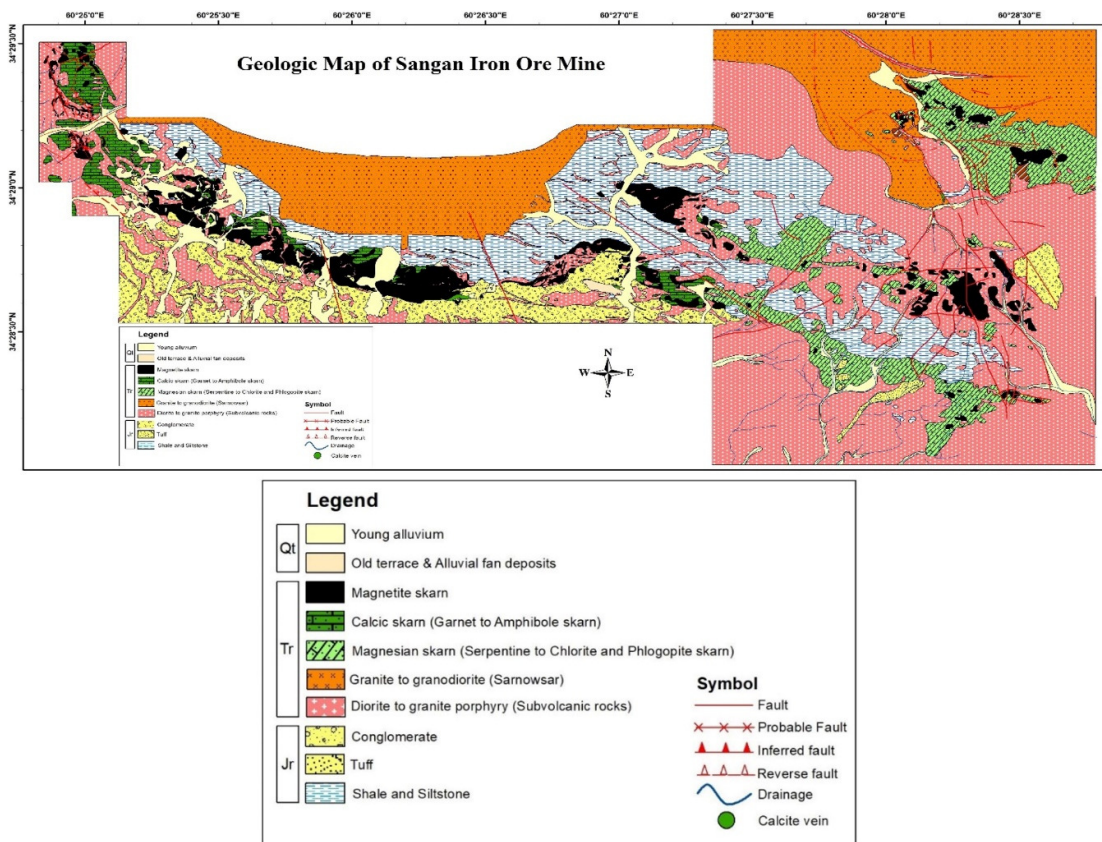
برای تعیین این خواص از هر نمونه سنگ یک مقطع نازک میکروسکوپی تهیه و با استفاده از نرم‌افزار JMicroVision با روش Point counting درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌های مورد مطالعه مشخص شد. جهت نامگذاری سنگ‌های مورد مطالعه با توجه به طبقه‌بندی اشتريکایزن (۱۹۷۴) از نرم‌افزار WinRock استفاده شد. همانگونه که

کاهش زیاد مقاومت با شکست سنگ رخ می‌دهد (هوکا و داس، ۱۹۷۴؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۶).

روش آزمایش شکنندگی (S20) مورد استفاده توسط NTNU/SINTEF، در ابتدا در سوئد توسط مترن و هلمر (۱۹۴۳) ارائه شده است. این آزمایش ابتدا جهت تعیین خواص مقاومتی دلنه‌ها طراحی و انجام شد، اما با ایجاد اصلاحاتی جهت مقاصد مختلف از قبیل تعیین حفرپذیری سنگ توسعه داده شد. برای اندازه‌گیری شکنندگی، عوامل مؤثر دیگری از جمله ترکیب کانی‌شناسی، تنش برجا و پارامترهای مقاومتی باید مورد توجه قرار گیرد (شنگ چي يانگ و همکاران، ۲۰۲۰). شاخص شکنندگی (BI) اصطلاحی است که معمولاً برای تعیین کمیت شکنندگی توده سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد و تا به امروز چندین روش مختلف برای بیان شکنندگی سنگ‌ها و تعیین میزان کمیت شکنندگی پیشنهاد شده است (هوکا و داس، ۱۹۷۴؛ التینداگ، ۲۰۰۲؛ حاجی‌عبدالمجید و همکاران، ۲۰۰۳؛ نیگارد و همکاران، ۲۰۰۶؛ ریکمن و همکاران، ۲۰۰۸؛ یاگیز، ۲۰۰۹؛ هولت و همکاران، ۲۰۱۱؛ جین و همکاران، ۲۰۱۴؛ الف؛ جین و همکاران، ۲۰۱۴؛ ب؛ شنگ چي يانگ و همکاران، ۲۰۲۰). این تعاریف BI عمدتاً براساس رویکردهایی از جمله منحنی تنش- کرنش، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزلی، آزمایش نفوذ، آزمایش چکش‌اشمیت، ترکیب کانی‌شناسی، تخلخل و اندازه دانه و روش‌های ژئوفیزیکی استوار است. با توجه به عدم وجود تعریف و روش‌های اندازه‌گیری استاندارد برای شکنندگی سنگ، دو روش اندازه‌گیری شکنندگی توسط منگ و همکاران (۲۰۱۵) پیشنهاد و مورد استفاده قرار گرفته است که شامل (۱) براساس منحنی تنش-کرنش (۲) براساس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ است. روش اول با استفاده از مقاومت، تغییرشکل و انرژی سنگ محاسبه می‌شود و روش دوم اندازه‌گیری شکنندگی با استفاده از انجام آزمایش‌های مانند آزمایش نفوذ، اندازه‌گیری سختی و تجزیه و تحلیل ترکیب کانی‌شناسی سنگ بدست می‌آید. (صفری و همکاران، ۱۳۹۸) با بررسی عوامل مؤثر بر شکنندگی S20 با استفاده از رگرسیون خطی و غیرخطی به این نتیجه رسیدن که خصوصیات سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی تاثیر بسزایی در شکنندگی سنگ دارد و همچنین علیقلی و همکاران با بررسی شکنندگی تعدادی

فلدسپات، کانی‌های فرعی بیوتیت، مسکویت و آمفیبول می‌باشند.

در جدول (۱) مشاهده می‌شود کانی‌های اصلی تشکیل دهنده نمونه‌ها کوارتز، پلاژیوکلاز و آلکالی



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی معدن سنگ آهن سنگان خواف (گل محمدی و همکاران، ۱۳۹۲)

سنگ متناسب با این سرعت در کانی‌های تشکیل‌دهنده آن می‌باشد. البته در صورتی که تاثیر عواملی نظیر اندازه و جهت‌گیری دانه‌ها در نظر گرفته نشود (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰). از عوامل تاثیرگذار بر سرعت موج در سنگ‌ها می‌توان به درصد رطوبت، درجه حرارت، نوع کانی‌ها، بافت، ساخت، چگالی، تخلخل، اندازه و شکل بلورها، درجه اشباع، ناهمسانگردی، خواص درزه‌ها (زبری، شیب و امتداد، مواد پرکننده و آب) و تنش‌های وارده بر سنگ اشاره نمود (انگلدن و پلامپ، ۱۹۸۴). برای انجام آزمایش سرعت موج نمونه‌های مورد مطالعه، بعد آماده-سازی نمونه‌ها ابتدا دستگاه کالیبره شد و به جهت حصول به شرایط یکسان برای مقایسه نتایج سرعت موج در حالت اشباع و خشک، مغزه‌های تهیه شده ابتدا در شرایط استاندارد اشباع شدند و سرعت موج در آن‌ها در حالت اشباع و بر اساس (ISRM, 1987) تعیین گردید. (شکل ۲).

۲-۲-۳- آزمایش‌های تعیین خصوصیات مهندسی

۳-۲-۱- تعیین خواص فیزیکی

خصوصیات فیزیکی اندازه‌گیری شده شامل چگالی خشک و اشباع، تخلخل و درصد جذب آب می‌باشد برای تعیین چگالی نمونه‌های مورد آزمایش ابتدا نمونه‌ها استوانه‌ای با قطر ۴۷/۶ و ۶۳/۴ را در دستگاه خلاء بر اساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 2007) به مدت ۲ ساعت اشباع شد. تعیین ویژگی‌های فیزیکی هر یک از نمونه‌های سنگ (گرانیت، گرانودیوریت و داسیت) در جدول (۲) ارائه شده است.

۳-۲-۲- تعیین خواص دینامیکی

برای تعیین پارامترهای دینامیکی سنگ‌ها مانند مدول الاستیسیته و نسبت پواسون آزمایش سرعت موج انجام می‌گیرد (انگلدن و پلامپ، ۱۹۸۴). سرعت موج فشاری در

جدول ۱. نتایج مطالعات پتروگرافی نمونه‌های مورد مطالعه

نام سنگ	O	Mu	Am	Bt	Afs	Pl	Qz	کد سنگ
مونزگرانیت	۶/۱			۸/۲	۲۳/۶	۲۸/۷	۳۳/۴	Gr1
مونزگرانیت	۲/۳۷		۵/۶		۲۵/۷	۳۲/۲	۳۴/۱۳	Gr2
مونزگرانیت	۵/۱			۷/۲۸	۱۷/۴	۳۲/۱	۳۸/۱۲	Gr3
مونزگرانیت	۳/۴				۲۴/۳	۳۲/۲	۴۰/۱	Gr4
بیوتیت مونزگرانیت	۶/۵			۹/۸۱	۲۴/۱۳	۳۰/۲	۲۹/۳۶	Gr5
مونزگرانیت	۲/۳	۳/۲		۴/۱	۲۳/۹	۲۸/۶	۳۵	Gr6
مونزگرانیت	۶/۶۴		۳/۶		۲۸/۴	۳۱/۱۶	۳۰/۲	Gr7
سینوگرانیت	۶/۸		۳/۲	۴/۳	۴۱/۲	۲۴/۱	۲۰/۴	Gr8
گرانودیوریت	۴/۴			۲/۲	۱۴/۱	۴۶/۲	۳۳/۱	Grd1
گرانودیوریت	۵/۱	۳/۶۲			۱۶/۱	۳۵/۴	۳۹/۷۸	Grd2
بیوتیت گرانودیوریت	۴/۱۴			۱۱/۶۳	۱۶/۲۳	۳۲/۴	۳۵/۶	Grd3
گرانودیوریت	۲/۶			۴/۲	۱۵/۴	۳۶/۵	۴۱/۳	Grd4
داسیت	۲/۵			۶/۱	۱۷/۹۲	۵۰/۲	۲۳/۲۸	D1
داسیت	۳/۰۳			۳/۴۳	۱۹/۹	۴۲/۵	۳۱/۱۴	D2
داسیت	۳/۳				۱۶/۴	۳۹/۱	۴۱/۲	D3
داسیت	۴/۳۸			۷/۱۲	۱۵/۲	۳۹/۲	۳۴/۱	D4
داسیت	۷/۶۹				۲۲/۸۴	۴۳/۸۱	۲۵/۶۶	D5
داسیت	۳	۳/۵			۱۷/۲	۴۸/۱	۲۸/۲	D6
داسیت	۶/۷۳				۲۱/۴۱	۴۱/۵۶	۳۰/۳	D7

Qz کوارتز - Pl پلاژیوکلاز - Afs الکالی فلدسپات - Bt بیوتیت - Am آمفیبول - Mu مسکوویت - O کانی های فرعی

جدول ۲. نتایج آزمایش خصوصیات فیزیکی بر روی نمونه‌های مورد مطالعه

کد سنگ	چگالی خشک (gr/cm ³)	چگالی اشباع (gr/cm ³)	تخلخل %	درصد جذب آب
Gr1	۲/۷۰	۲/۷۰	۰/۲۸	۰/۱۰
Gr2	۲/۶۲	۲/۶۳	۰/۵۸	۰/۲۲
Gr3	۲/۵۹	۲/۶۰	۱/۱۴	۰/۴۴
Gr4	۲/۶۰	۲/۶۱	۱/۵۵	۰/۶۰
Gr5	۲/۵۸	۲/۶۰	۱/۹۴	۰/۷۵
Gr6	۲/۶۴	۲/۶۴	۰/۵۶	۰/۲۱
Gr7	۲/۵۳	۲/۵۴	۱/۵۸	۰/۶۲
Gr8	۲/۴۴	۲/۵۲	۷/۹۶	۳/۲۷
Grd1	۲/۵۸	۲/۵۹	۱/۴۸	۰/۵۷
Grd2	۲/۶۰	۲/۶۱	۰/۴۳	۰/۱۷
Grd3	۲/۶۱	۲/۶۲	۰/۴۴	۰/۱۷
Grd4	۲/۶۱	۲/۶۲	۰/۹۰	۰/۳۴
D1	۲/۵۵	۲/۵۸	۳/۳۳	۱/۳۱
D2	۲/۶۱	۲/۶۳	۱/۶۱	۰/۶۲
D3	۲/۵۷	۲/۵۸	۰/۸۳	۰/۳۲
D4	۲/۶۱	۲/۶۱	۰/۵۲	۰/۲۰
D5	۲/۶۵	۲/۶۷	۱/۶۰	۰/۶۰
D6	۲/۵۸	۲/۵۸	۰/۴۰	۰/۱۵
D7	۲/۵۹	۲/۶۰	۰/۵۷	۰/۲۲



شکل ۲. تعیین سرعت امواج فراصوتی نمونه‌ها

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمایش سرعت موج سنگ‌های (گرانیت، گرانودیوریت و داسیت)

Vs dry (km/s)	Vp sat (km/s)	Vp dry (km/s)	کد سنگ
۳/۲۹	۶/۸۴	۶/۴۱	Gr1
۲/۷۵	۵/۷۶	۵/۴۷	Gr2
۲/۸۸	۵/۹۷	۵/۶۴	Gr3
۲/۸۱	۵/۷۲	۵/۱۵	Gr4
۲/۸۸	۵/۲۲	۴/۵۷	Gr5
۲/۹۳	۶/۱۶	۶/۱۱	Gr6
۳/۰۰	۵/۱۰	۴/۹۷	Gr7
۱/۹۴	۳/۶۹	۳/۳۳	Gr8
۲/۷۶	۵/۵۵	۵/۴۱	Grd1
۳/۱۴	۵/۶۶	۵/۵۷	Grd2
۳/۱۰	۵/۹۷	۵/۸۱	Grd3
۳/۰۲	۵/۵۵	۵/۴۳	Grd4
۲/۶۳	۵/۳۶	۴/۹۷	D1
۲/۹۳	۵/۰۹	۵/۰۲	D2
۳/۱۱	۵/۵۹	۵/۵۷	D3
۳/۰۷	۵/۷۴	۵/۶۱	D4
۲/۵۹	۵/۴۴	۵/۲۱	D5
۳/۰۵	۵/۶۷	۵/۶۲	D6
۳/۰۳	۵/۶۴	۵/۵۵	D7

مقاومت فشاری تک‌محوری: برای این آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای با نسبت طول به قطر ۲ تا ۲/۵ برای دو حالت خشک و اشباع تهیه و آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌ها انجام شد (شکل ۳ الف). مقادیر حاصل از مقاومت فشاری تک‌محوری در جدول ۴ نشان داده شده است.

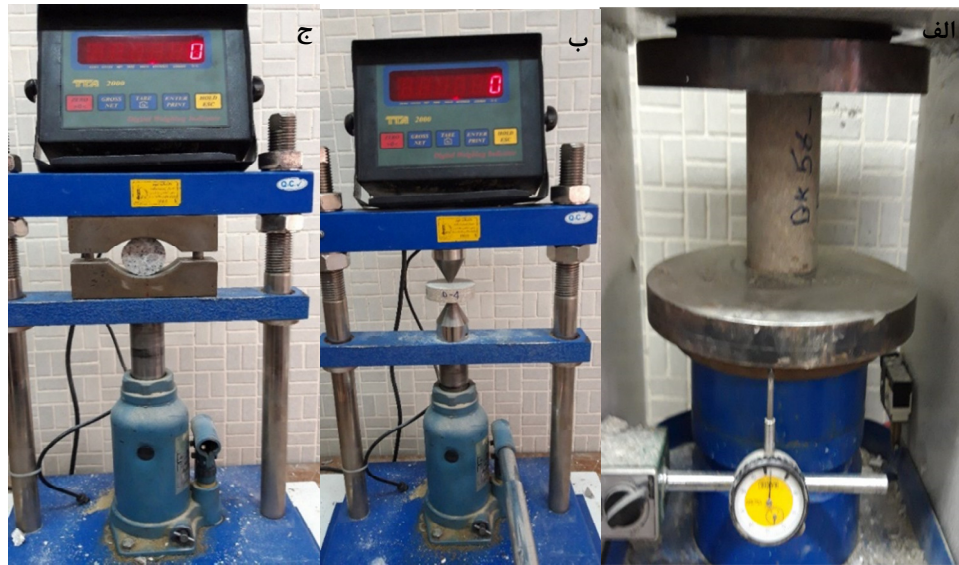
مقاومت کششی برزیلی: برای آزمایش مقاومت کششی برزیلی تعداد ۳ نمونه از هر نوع سنگ در حالت خشک و اشباع با نسبت طول به قطر ۰/۵ تا ۰/۷۵ مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۳ ب). بعد انجام آزمایشات از مقادیر بدست آمده میانگین گرفته شد و به عنوان مقدار نهایی مقاومت کششی برزیلی در نظر گرفته شد (جدول ۴).

۳-۲-۳- تعیین خواص مهندسی

بررسی و تعیین خواص مکانیکی سنگ‌ها و توده‌های سنگی مهم‌ترین بخش در هر پروژه زمین‌شناسی مهندسی می‌باشد (دیامنتیس و همکاران، ۲۰۰۹). از مهم‌ترین عواملی که بر خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها تاثیر می‌گذارد می‌توان به ترکیب کانی‌شناسی و بافت، اندازه و شکل کانی‌ها، شکستگی‌های میکروسکوپی، میزان خلل و فرج، درجه آلتراسیون کانی‌ها، درجه قفل‌شدگی و نوع تماس بین دانه‌ها اشاره نمود (همتی و همکاران، ۲۰۲۰). در این تحقیق آزمایشات مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی و بارنقطه‌ای براساس استاندارد (ISRM, 2007) انجام گردید.

بارگذاری محوری با نسبت طول به قطر ۰/۳ تا ۱ مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۳ ج) و از مقادیر بدست آمده میانگین گرفته شد. نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای برای قطر ۵۰ میلی‌متر تصحیح شد و به صورت IS_{50} در جدول (۴) ارائه شده‌اند.

مقاومت بار نقطه‌ای: آزمایش بار نقطه‌ای به طور گسترده‌ای برای تعیین ضریب مقاومت سنگ در مهندسی ژئوتکنیک در نتیجه سادگی آزمایش استفاده می‌شود (محمد و همکاران، ۲۰۱۹). برای انجام آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای ۵ نمونه از هر سنگ در حالت خشک و اشباع براساس



شکل ۳. الف) آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، ب) آزمایش مقاومت کششی برزیلی و ج) آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای

جدول ۴. نتایج حاصل از آزمایش خصوصیات مکانیکی سنگ‌های (گرانیت، گرانودیوریت و داسیت)

کد سنگ	Ucs dry (MPa)	Ucs sat (MPa)	BTS dry (MPa)	BTS sat (MPa)	IS_{50} dry (MPa)	IS_{50} sat (MPa)
Gr1	۷۶/۶۷	۶۵/۶۳	۸/۰۷	۷/۰۸	۵/۴۰	۴/۳۵
Gr2	۱۲۳/۵۵	۱۱۶/۳۸	۶/۸۲	۶/۷۹	۵/۰۵	۴/۵۴
Gr3	۸۳/۸۴	۷۵/۵۶	۷/۶۴	۷/۰۴	۴/۳۲	۳/۰۸
Gr4	۱۱۸/۷۶	۹۶/۰۷	۷/۶۱	۴/۳۴	۴/۷۷	۴/۵۰
Gr5	۷۵/۸۶	۶۷/۱۵	۷/۷۸	۷/۷۱	۴/۴۲	۵/۶۸
Gr6	۱۱۳/۷۹	۹۸/۵۶	۶/۶۶	۶/۵۹	۲/۹۵	۲/۶۸
Gr7	۱۰۴/۷۹	۹۲/۶۶	۸/۷۹	۸/۷۰	۵/۴۲	۵/۳۹
Gr8	۳۲/۵۴	۱۹/۵۲	۳/۵۱	۲/۶۲	۱/۵۷	۰/۸۱
Grd1	۱۰۲/۵۹	۹۳/۷۶	۱۰/۳۷	۹/۴۶	۵/۸۰	۵/۷۸
Grd2	۱۵۴/۴۳	۱۴۵/۶۱	۹/۴۸	۹/۴۲	۷/۱۹	۵/۶۷
Grd3	۱۱۰/۳۱	۱۰۹/۷۶	۸/۹۷	۷/۹۱	۴/۳۹	۶/۰۴
Grd4	۱۰۵/۰۸	۹۸/۸۷	۹/۹۹	۷/۵۰	۶/۲۶	۴/۴۵
D1	۴۵/۲۳	۳۳/۰۹	۵/۴۷	۵/۳۳	۴/۲۴	۲/۶۱
D2	۱۱۳/۶۲	۱۰۱/۴۹	۷/۰۲	۷/۰۰	۵/۹۸	۴/۲۴
D3	۲۰۵/۱۹	۱۸۸/۷۲	۸/۲۵	۸/۱۹	۴/۷۹	۴/۷۶
D4	۱۱۱/۳۰	۸۴/۵۶	۱۰/۵۱	۷/۳۸	۵/۷۳	۴/۷۵
D5	۶۴/۰۵	۵۴/۱۰	۳/۹۸	۳/۰۷	۲/۴۵	۲/۰۵
D6	۹۳/۸۹	۸۲/۰۸	۱۱/۱۷	۸/۴۰	۵/۹۸	۵/۹۳
D7	۱۷۷/۲۱	۱۷۱/۳۱	۸/۲۹	۶/۶۲	۵/۲۶	۵/۲۳

۳-۳- آزمایش شکنندگی

آزمایش شکنندگی اندازه‌گیری خوبی از مقاومت سنگ در برابر خرد شدن در اثر ضربات مکرر نشان می‌دهد. این آزمایش توسط مترن و هلمر در سوئد در سال ۱۹۴۳ ساخته شد (مترن و هلمر، ۱۹۴۳). چندین روش اصلاح شده از این آزمایش برای اهداف مختلف ساخته شده است. یک طرح کلی از آزمایش در شکل ۴ الف نشان داده شده است. وزن مورد نیاز برای انجام آزمایش شکنندگی ۵۰۰ گرم برای چگالی ۲/۶۵ می‌باشد. روش آزمایش بدین صورت می‌باشد که ابتدا خرده‌سنگ‌های عبوری از الک ۱۶ میلی‌متر و باقیمانده بر روی الک مستطیلی ۱۱/۲

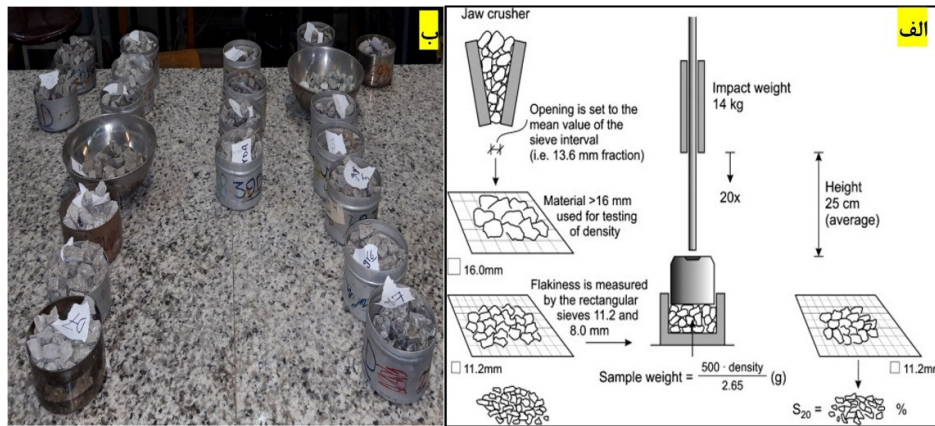
میلی‌متر تفکیک می‌شوند (شکل ۴ ب). سپس با اعمال ۲۰ ضربه توسط وزنه ۱۴ کیلوگرمی از ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری آزمایش انجام شد. در آخر درصد ذرات عبوری از الک مربعی ۱۱/۲ میلی‌متری به عنوان شکنندگی S20 در نظر گرفته شد (سو و همکاران، ۲۰۱۴). علاوه بر این محققین مختلفی تاکنون روابط تجربی متفاوتی را برای تعیین میزان شکنندگی سنگ‌ها ارائه کرده‌اند ولی نتایج حاصل از این روش‌ها تا حدود زیادی با هم اختلاف دارند ولی با این حال بیش‌تر محققین شکنندگی را تابعی از مقاومت کششی و مقاومت فشاری تک‌محوری می‌دانند. در جدول ۵ به برخی از روابط ارائه شده توسط محققین مختلف پرداخته شد.

جدول ۵. روابط ارائه شده توسط محققین مختلف برای تعیین میزان شکنندگی سنگ‌ها

$B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_t}$	هوکا و داس (۱۹۷۴)	۱
$B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}$	هوکا و داس (۱۹۷۴)	۲
$B_3 = \frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2}$	(التینداگ، ۲۰۰۲)	۳
$B_4 = (\sigma_c \times \sigma_t)^{.۷۲}$	(یارالی و سویر، ۲۰۱۱)	۴
$B_5 = \frac{\sigma_c^{0.807}}{\sigma_t^{0.485}}$	(قادری نژاد و همکاران، ۱۳۹۷)	۵

جدول ۶. نتایج تعیین ضرایب شکنندگی در حالت خشک سنگ‌های (گرانیت، گرانودیوریت و داسیت)

کد سنگ	S20 (%)	B1	B2	B3	B4	B5
Gr1	۲۲/۳۴	۹/۵۰	۰/۸۱	۳۰۹/۴۴	۱۰۲/۳۲	۱۲/۰۵
Gr2	۲۱/۳۲	۱۸/۱۱	۰/۹۰	۴۲۱/۴۲	۱۲۷/۸۰	۱۹/۲۲
Gr3	۱۵/۴۵	۱۰/۹۸	۰/۸۳	۳۲۰/۱۴	۱۰۴/۸۵	۱۳/۳۰
Gr4	۱۸/۲۲	۱۵/۶۲	۰/۸۸	۴۵۲/۱۳	۱۳۴/۴۴	۱۷/۶۵
Gr5	۲۸/۹۱	۹/۷۵	۰/۸۱	۲۹۵/۰۰	۹۸/۸۶	۱۲/۱۶
Gr6	۱۴/۸۸	۱۷/۰۹	۰/۸۹	۳۸۷/۸۹	۱۱۸/۳۸	۱۸/۱۹
Gr7	۱۵/۲۲	۱۱/۹۳	۰/۸۵	۴۶۰/۴۰	۱۳۶/۲۱	۱۴/۸۸
Gr8	۴۶/۵۲	۹/۲۶	۰/۸۱	۵۷/۱۸	۳۰/۳۴	۹/۰۳
Grd1	۸/۷۲	۹/۸۹	۰/۸۲	۵۳۲/۰۴	۱۵۱/۱۵	۱۳/۵۰
Grd2	۹/۰۴	۱۶/۳۰	۰/۸۸	۷۳۱/۶۴	۱۹۰/۱۲	۱۹/۶۲
Grd3	۱۵/۳۵	۱۲/۳۰	۰/۸۵	۴۹۴/۴۹	۱۴۳/۴۰	۱۵/۳۶
Grd4	۸/۸۸	۱۰/۵۲	۰/۸۳	۵۲۴/۷۰	۱۴۹/۶۵	۱۴/۰۲
D1	۱۵/۴۵	۸/۲۷	۰/۷۸	۱۲۳/۷۰	۵۲/۸۷	۹/۵۱
D2	۹/۰۰	۱۶/۱۹	۰/۸۸	۳۹۸/۷۴	۱۲۲/۸۱	۱۷/۷۱
D3	۱۰/۶۰	۲۴/۸۷	۰/۹۲	۸۴۶/۵۸	۲۱۱/۱۸	۲۶/۳۹
D4	۱۲/۵۶	۱۰/۵۹	۰/۸۳	۵۸۵/۱۱	۱۶۱/۸۷	۱۴/۳۲
D5	۲۳/۴۶	۱۶/۱۰	۰/۸۸	۱۲۷/۳۷	۵۴/۰۰	۱۴/۶۹
D6	۱۱/۸۳	۸/۴۰	۰/۷۹	۵۲۴/۵۸	۱۴۹/۶۳	۱۲/۱۲
D7	۹/۰۶	۲۱/۳۸	۰/۹۱	۷۳۴/۵۳	۱۹۰/۶۶	۲۳/۳۹



شکل ۴. الف) طرح کلی آزمایش تعیین شکنندگی S20 (دهل، ۲۰۰۳) و ب) نمونه‌های آماده شده برای تعیین S20

جدول ۷. نتایج تعیین ضرایب شکنندگی در حالت اشباع سنگ‌های (گرانیت، گرانودیوریت و داسیت)

B5	B4	B3	B2	B1	S20 (%)	کد سنگ
۱۱/۳۳	۸۳/۲۸	۲۳۲/۴۷	۰/۸۱	۹/۲۷	۲۳/۳۸	Gr1
۱۸/۳۵	۱۲۲/۰۵	۳۹۵/۳۲	۰/۸۹	۱۷/۱۳	۲۲/۱۹	Gr2
۱۲/۷۲	۹۱/۷۹	۲۶۶/۱۰	۰/۸۳	۱۰/۷۳	۱۵/۲۷	Gr3
۱۹/۵۴	۷۶/۹۵	۲۰۸/۳۱	۰/۹۱	۲۲/۱۵	۲۳/۴۳	Gr4
۱۱/۰۷	۹۰/۰۲	۲۵۹/۰۲	۰/۷۹	۸/۷۱	۳۰/۲۵	Gr5
۱۵/۹۰	۱۰۹/۷۳	۳۴۱/۰۰	۰/۸۷	۱۴/۲۴	۲۱/۳۳	Gr6
۱۳/۵۴	۱۲۳/۷۴	۴۰۳/۰۷	۰/۸۳	۱۰/۶۵	۱۵/۰۱	Gr7
۶/۸۹	۱۷/۰۱	۲۵/۵۷	۰/۷۶	۷/۴۵	۵۱/۰۹	Gr8
۱۳/۱۳	۱۳۲/۶۰	۴۴۲/۵۴	۰/۸۲	۹/۹۱	۱۱/۶۳	Grd1
۱۸/۷۶	۱۸۱/۴۷	۶۸۵/۸۰	۰/۸۸	۱۵/۴۶	۱۰/۱۴	Grd2
۱۶/۲۶	۱۳۰/۵۲	۴۳۳/۹۲	۰/۸۷	۱۳/۸۸	۱۵/۲۴	Grd3
۱۵/۳۳	۱۱۶/۵۴	۳۷۰/۷۵	۰/۸۶	۱۳/۱۸	۹/۶۱	Grd4
۷/۴۸	۴۱/۴۲	۸۸/۱۱	۰/۷۲	۶/۲۱	۱۶/۶۵	D1
۱۴/۹۶	۱۲۷/۱۴	۴۱۸/۳۹	۰/۸۵	۱۲/۳۱	۱۱/۶۹	D2
۲۳/۸۳	۲۰۹/۲۷	۸۳۵/۹۵	۰/۹۱	۲۱/۳۰	۱۰/۸۱	D3
۱۳/۶۲	۱۰۲/۹۵	۳۱۲/۱۰	۰/۸۴	۱۱/۴۶	۱۳/۶۲	D4
۱۴/۵۴	۳۹/۶۷	۸۲/۹۹	۰/۸۹	۱۷/۶۳	۳۱/۲۸	D5
۱۲/۴۹	۱۱۰/۶۰	۳۴۴/۷۷	۰/۸۱	۹/۷۷	۱۲/۵۵	D6
۲۵/۳۹	۱۵۸/۱۷	۵۶۶/۶۲	۰/۹۳	۲۵/۹۰	۱۲/۰۵	D7

درصد کانی‌های آلکالی فلدسپات بالاتر می‌باشد البته این همبستگی در حالت اشباع بالاتر از حالت خشک می‌باشد یعنی با افزایش مقدار آلکالی فلدسپات مقدار شکنندگی S20 افزایش می‌یابد که دلیل آن وجود کلیواژهای درشت و آسان این کانی است که منجر به هدایت و توسعه مسیر شکستگی‌ها در امتداد صفحات کلیواژی می‌گردد. بررسی رابطه نسبت کوارتز به بیوتیت و شکنندگی S20 در شکل ۷ نشان می‌دهد که وجود کانی بیوتیت در بعضی سنگ‌های مورد مطالعه تاثیر چندانی در شکنندگی سنگ‌های مورد

۵- بحث و تحلیل نتایج

در این بخش، تفسیری از رابطه شکنندگی S20 در حالت خشک و اشباع و خصوصیات مهندسی و پتروگرافی سنگ‌ها با استفاده از روش تحلیل آماری ارائه شده. برای این منظور از رگرسیون‌های خطی و غیرخطی استفاده شده است. نتایج نشان داد که شکنندگی S20 با کوارتز و پلاژیوکلاز رابطه معکوس دارد و با آلکالی فلدسپات رابطه مستقیم دارد (رابطه ۶) (شکل ۵). همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی بین شکنندگی S20 با

$$S20_{(dry)} = -0.077 Ucs_{(dry)} - 3.830 Pt_{(dry)} + 43.326$$

$$R^2 = \%63.6 \quad (9)$$

$$S20_{(sat)} = -0.076 Ucs_{(sat)} - 3.183 BTS_{(sat)} + 47.98$$

$$R^2 = \%64. \quad (10)$$

که در آن $S20_{(dry)(sat)}$ شکنندگی در حالت خشک و اشباع و $Ucs_{(dry)(sat)}$ مقاومت فشاری تک‌محوری در حالت خشک و اشباع و $Pt_{(dry)}$ مقاومت بار نقطه‌ای در حالت خشک و $BTS_{(sat)}$ مقاومت کششی برزیلین در حالت اشباع می‌باشند. شکنندگی سنگ‌ها هم در آزمایشگاه و هم از نظر تجربی مشخص شد. نتایج آزمایشات آزمایشگاهی به دست آمده توسط دستگاه آزمایش ضربه بر روی نمونه‌های مختلف سنگ برای آنالیز در نظر گرفته شد سپس نتایج به دست آمده از نظر آماری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و بهترین روابط بین شکنندگی آزمایشگاهی $S20$ و شاخص‌های شکنندگی در حالت خشک و اشباع در شکل (۸ و ۹) و روابط کلی بین این دو پارامتر (۱۱ و ۱۲) نشان داده شد. مطابق شکل (۸، ۹)، یک رابطه معکوس بین شکنندگی آزمایشگاهی و شاخص‌های شکنندگی وجود دارد، با افزایش مقدار شکنندگی آزمایشگاهی مقادیر شاخص‌های شکنندگی کاهش می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که معادلات پیشنهادی توسط محققین مختلف معتبر است و شکنندگی آن نزدیک به مقاومت فشاری تک‌محوری و کششی برزیلی سنگ‌هاست زیرا در معادلات دیده شده است. همچنین مقادیر پایین‌تر شاخص‌های شکنندگی (BI) به این معنی است که مقاومت نمونه‌ها نیز پایین است. این مفهوم به طور کلی معنی ندارد زیرا خلاف طبقه‌بندی‌های ارائه شده در گذشته است. به عنوان مثال، طبقه‌بندی‌ها با توجه به شکنندگی، که توسط برولند (۱۹۹۸) و دهل و همکاران (۲۰۱۲) ارائه شده نشان می‌دهد که مقادیر پایین‌تر شکنندگی بدان معنی است که سنگ برای حفاری بسیار سخت است. بنابراین، روشن است که شکنندگی حاصل از آزمایشگاه ممکن است از نظر ارزیابی آن واقع بینانه‌تر باشد.

$$S20_{(dry)} = 0.118 B3 - 0.659 B4 + 49.479$$

$$R^2 = \%61.5 \quad (11)$$

$$S20_{(sat)} = 4.406 B1 + 0.23 B3 - 6.127 B5 + 44.188$$

$$R^2 = \%69.9 \quad (12)$$

که در آن $S20_{(dry)(sat)}$ شکنندگی در حالت خشک و اشباع و $B1, B2, B3, B4$ و $B5$ شاخص‌های شکنندگی می‌باشند.

مطالعه ندارد. همچنین وجود ریزدرزه‌ها و رگه‌های کربناتی موجود در بعضی نمونه‌ها بخصوص نمونه Gr1, Gr8 که دارای رگه‌های کربناتی هستند باعث کاهش مقاومت و افزایش شکنندگی سنگ می‌شود که این عامل در حالت اشباع بیش‌تر می‌باشد. در ادامه ارتباط شکنندگی $S20$ و خواص فیزیکی در دو حالت خشک و اشباع مورد بررسی قرار گرفت که برای ارتباط بین شکنندگی $S20$ و خواص فیزیکی با استفاده از نرم‌افزار SPSS رابطه کلی γ پیشنهاد شد و از بین خواص فیزیکی همان‌طور که در شکل ۸ الف مشاهده می‌شود درصد جذب آب در دو حالت خشک و اشباع نسبت به دیگر خواص فیزیکی دارای بیش‌ترین همبستگی با شکنندگی $S20$ می‌باشد.

$$S(20)_{(dry)} = -0.816 Qz - 0.632 PI + 0.373 Alf + 58.66$$

$$R^2 = \%80.6 \quad (6)$$

که در آن‌ها $S20_{(dry)}$ شکنندگی در حالت خشک و Qz کوارتز و PI پلاژیوکلاز و Alf آلکالی فلدسپات نمونه‌ها می‌باشند.

$$S20_{(dry)} = 88.92 Pd + 15.759W - 222.425$$

$$R^2 = \%73.8 \quad (7)$$

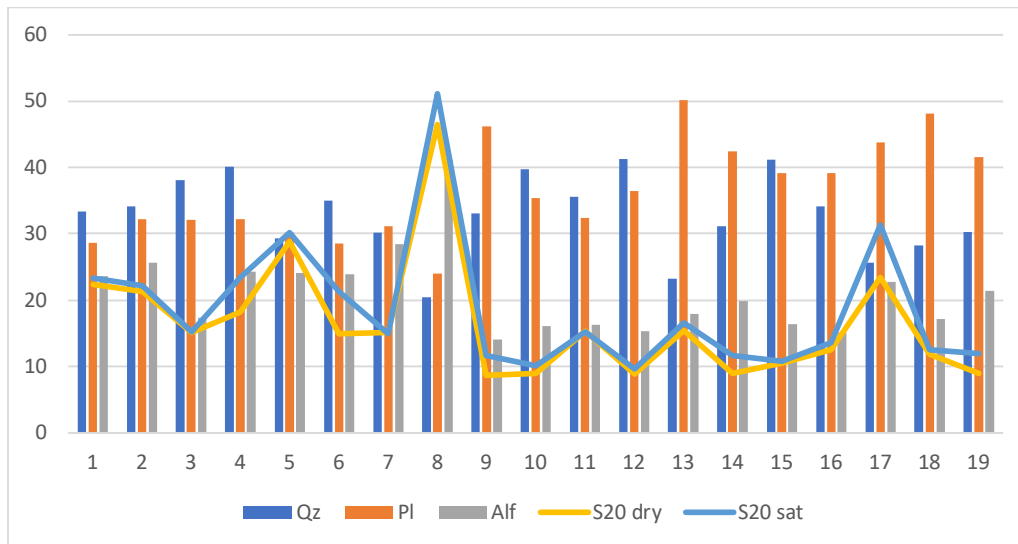
که در آن‌ها $S20_{(dry)}$ شکنندگی در حالت خشک و Pd چگالی خشک و W درصد جذب آب نمونه‌ها می‌باشند. بر اساس شکل ۸ ب مشاهده می‌شود که یک همبستگی قابل قبولی از نوع درجه دو بین شکنندگی $S20$ و سرعت موج P در حالت خشک وجود دارد که نشان می‌دهد که با افزایش سرعت موج شکنندگی کاهش می‌یابد و همچنین بهترین رابطه کلی (رابطه ۸) برای معرفی بین شکنندگی $S20$ و سرعت موج به صورت زیر می‌باشد.

$$S20_{(dry)} = -3.018 Vp_{(dry)} - 17.593 Vs_{(dry)} + 83.705$$

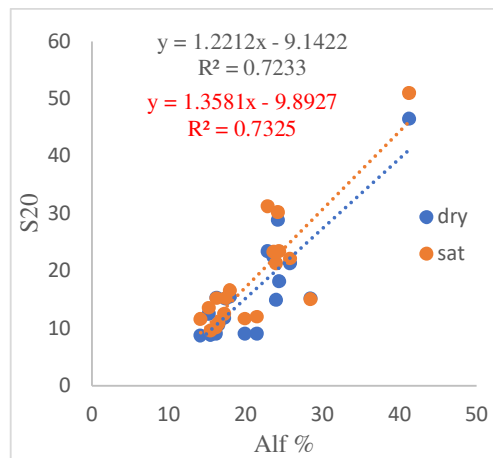
$$R^2 = \%54.6 \quad (8)$$

که در آن $S20_{(dry)}$ شکنندگی در حالت خشک و $Vp_{(dry)}$ سرعت موج فشاری در حالت خشک و $Vs_{(dry)}$ سرعت موج برشی در حالت خشک نمونه‌ها می‌باشند.

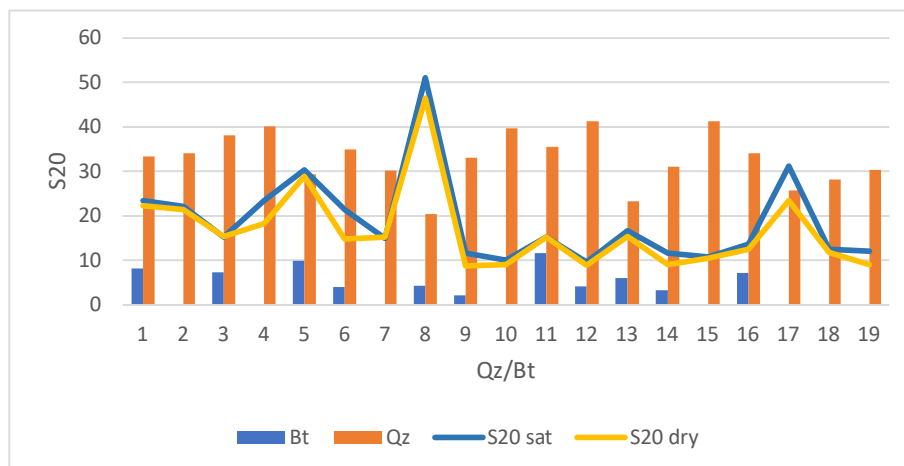
با بررسی خواص مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه و شکنندگی $S20$ معادله کلی (۹ و ۱۰) برای هر حالت ارائه گردید که هر دو حالت نشان می‌دهند که با افزایش خصوصیات مکانیکی شکنندگی کاهش می‌یابد. همان‌طور که گفته شد و در شکل (۸ ج و د) نشان داده شده است، بین خواص مکانیکی و شکنندگی $S20$ ارتباط معناداری وجود دارد. با افزایش مقاومت بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزیلی سنگ‌ها، شکنندگی آن کاهش می‌یابد.



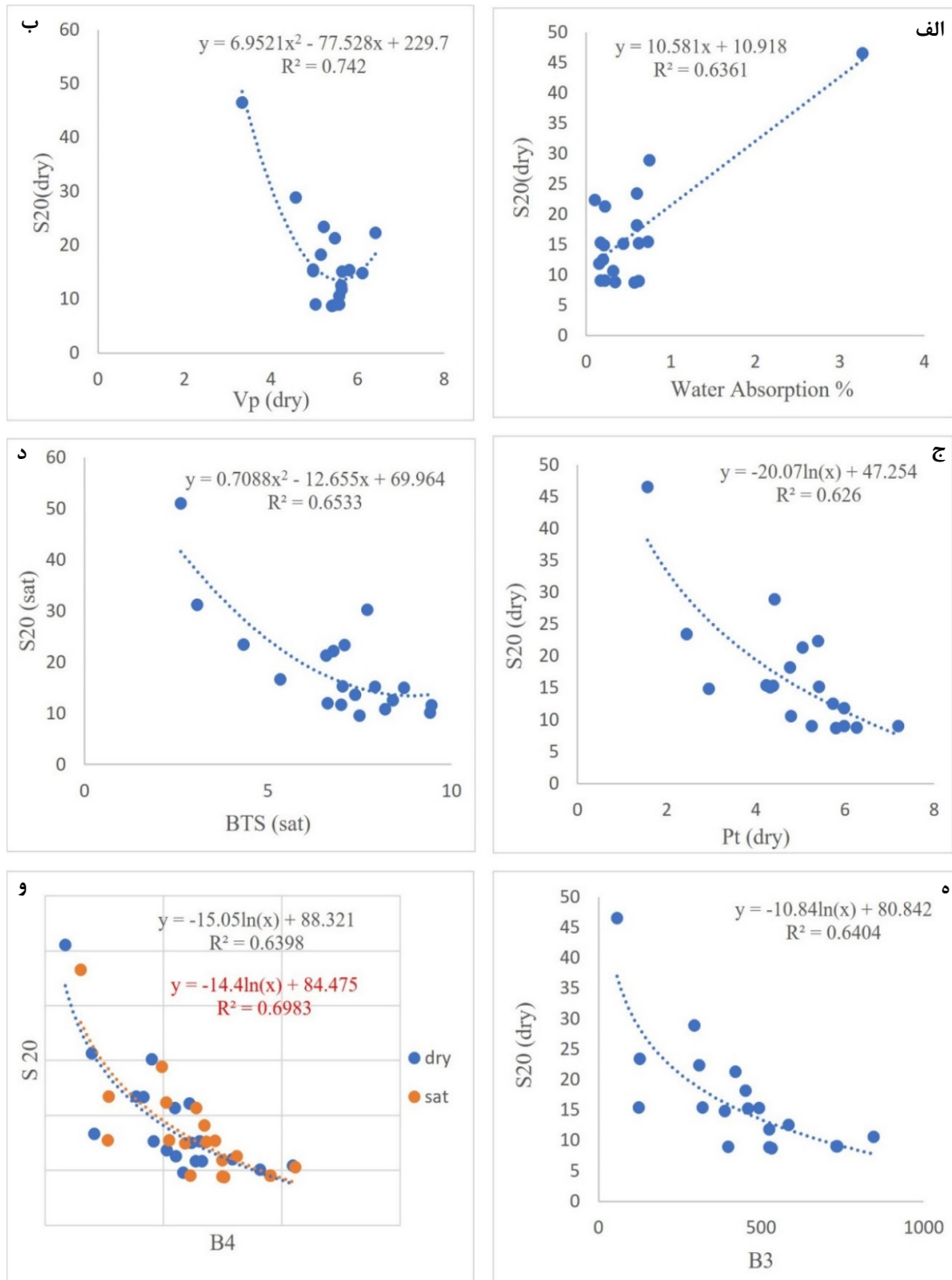
شکل ۵. نمودار بین درصد کانی‌های اصلی سنگ و شکنندگی S20 در حالت خشک و اشباع



شکل ۶. رابطه شکنندگی S20 با درصد کانی الکالی فلدسپات



شکل ۷. نمودار بین درصد کانی کوارتز به بیوتیت و شکنندگی S20 در حالت خشک و اشباع



شکل ۸. الف) رابطه شکنندگی S20 خشک با درصد جذب آب؛ ب) رابطه بین شکنندگی S20 خشک و سرعت موج P؛ ج) رابطه بین شکنندگی S20 و مقاومت بار نقطه‌ای؛ د) رابطه بین شکنندگی S20 و مقاومت کششی؛ ه) رابطه بین شکنندگی S20 و شاخص شکنندگی B3 حالت اشباع در حالت خشک؛ و) رابطه بین شکنندگی S20 و شاخص شکنندگی B4.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق ۱۹ نمونه از برخی سنگ‌های آذرین معدن سنگ‌آهن سنگان خواف برای ارزیابی رابطه شکنندگی S20 با خصوصیات پتروگرافی و ژئومکانیکی از جمله مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی، مقاومت بار نقطه‌ای، سرعت موج، چگالی، درصد جذب آب و تخلخل و شاخص‌های شکنندگی مورد بررسی قرار گرفت و بر اساس آزمایشات صورت گرفته نتایج به صورت زیر می‌باشد:

۱- نتایج نشان داد با افزایش آلکالی فلدسپات و کاهش کوارتز و پلاژیوکلاز مقدار شکنندگی نمونه‌ها افزایش و همچنین وجود ریزدرزه‌ها و رگه‌های کربناتی موجود در بعضی نمونه‌ها بخصوص نمونه Gr1، Gr8 که دارای رگه‌های کربناتی هستند باعث کاهش مقاومت و افزایش شکنندگی سنگ می‌شود و قابلیت حفاری نمونه‌ها آسانتر شده است که این عامل در حالت اشباع بیش تر می‌باشد.

۲- برای ارتباط بین شکنندگی S20 و شاخص‌های شکنندگی بررسی شده معادله لگاریتمی بهترین عملکرد را نشان می‌دهد که یک رابطه معکوس بین شکنندگی S20 و شاخص‌های شکنندگی وجود دارد، با افزایش مقدار شکنندگی S20 مقادیر شاخص‌های شکنندگی کاهش می‌یابد و شکنندگی S20 با شاخص شکنندگی B3 و B4 دارای بیش‌ترین ضریب تعیین می‌باشد. با این حال B4 در حالت اشباع دارای ضریب تعیین قوی‌تری ($R^2=69.83\%$) می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که شکنندگی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه می‌تواند در بیان شکنندگی سنگ‌ها واقع بینانه‌تر باشد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از مدیریت محترم عملیات اکتشاف مجتمع سنگ‌آهن سنگان خواف به خاطر همکاری صمیمانه جهت تهیه نمونه‌های سنگی مورد آزمایش و سایر هماهنگی‌ها تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

- صفری فرخ، س.، لشکری پور، غ. ر.، حافظی مقدس، ن (۱۳۹۷) ارزیابی شاخص شکنندگی سنگ‌آهک و بررسی عوامل موثر بر آن در حالت خشک و اشباع. مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، دوره ۱۲، شماره ۳، ص ۲۱-۳۶.
- Aligholi, S., Lashkaripour, Gh. R., Ghafoori, M (2016) Strength/Brittleness Classification of Igneous Intact Rocks Based on Basic Physical and Dynamic Properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(1): 45-65.
- Altindag, R (2002) The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hold drills. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 102(1): 61-66.
- Bruland, A (1998) Project Report 13A-98 Drillability Test Methods, 18 p.
- Dahl, F (2003) DRI, BWI, CLI Standards. NTNU, Angleggsdrift, Trondheim.
- Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P. D., Nilsen, B., Grov, E (2012) Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28: 150-158.
- Diamantis, K., Gartzos, E., Migiros, G (2009) Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from central Greece: test results and empirical relation, *Engineering Geology*, 108(3): 199-207.
- Engelder, T., Plumb, R (1984) Changes in situ ultrasonic properties of rock on strain relaxation, *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, 21(2): 75-82.
- Hajiabdolmajid, V., Kaiser, P., Martin, C (2003) Mobilised strength components in brittle failure of rock. *Géotechnique*, 53(3): 327-336.
- Hemmati, A., Ghafoori, M., Moomivand, H., Lashkaripour, Gh. R (2020) The effect of mineralogy and textural characteristics on the strength of crystalline igneous rocks using image-based textural quantification. *Engineering Geology*, 266: 10-16.
- Holt, R. M., Fjaer, E., Nes, O. M., Alassi, H. T (2011) A shaly look at brittleness. In: 45th US rock mechanics/geomechanics symposium.

فهیمی فر، ا.، سروش، ح (۱۳۸۰) آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها، جلد اول: آزمون‌های آزمایشگاهی، انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک.

قادری نژاد، ص.، لاله گانی دزکانی، س.، نجانی، ح. ر.، علی پنهانی، ب (۱۳۹۷) ارائه شاخصی جدید برای ارزیابی تردی سنگ. نشریه مهندسی منابع معدنی، شماره ۳، ص ۴۳-۵۵.

کریم پور، م. ح.، سعادت، س.، ملک‌زاده شفاوردی، آ (۱۳۸۱) شناسایی و معرفی کانی‌سازی نوع Fe-Oxides Cu-Au و مگنتیت مرتبط با کمر بند ولکانیکی- پلوتونیک خواف- کاشمر- بردسکن. بیست و یکمین گردهمایی علوم زمین گل محمدی، ع.، حیدری، م.، کرابی، ب (۱۳۹۲) نقشه زمین شناسی ۱:۵۰۰۰ آنومالی غربی تا مرکزی معدن سنگ‌آهن سنگان خواف.

- Ramsay, J. G (1967) Folding and fracturing of rocks. Mc Graw Hill Book Company, 568p.
- Rickman, R., Mullen, M. J., Petre, J. E., Grieser, W.V., Kundert, D (2008) A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett Shale. In: Proceedings of the SPE annual technical conference and exhibition, Society of Petroleum Engineers.
- Streckeisen, A. L (1974) Classification and nomenclature of plutonic rocks. *Geologische Rundschau*, 63(2): 773-786.
- Su, O., Sakiz, U., Köken, E (2014) Drillability Assessment of Rocks Based on Strength and Brittleness, International Pittsburgh Coal Conference.
- Tarasov, B., Potvin, Y (2013) Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression. *Int J Rock Mech Min Sci*, 59: 57-69.
- Thuro, K (1997) Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunnelling, *Geologische Rundschau*, 86(2): 426-438.
- Yagiz, S (2009) Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24: 66-74.
- Yang, Sh. Q., Yin, P. F., Ranjith, P. G (2020) Experimental Study on Mechanical Behavior and Brittleness Characteristics of Longmaxi Formation Shale in Changning, Sichuan Basin, China, *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02057-8>.
- Yarali, O., Soyer, E (2011) The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability. *Scientific Research and Essays*, 6: 1077-1088.
- Zhang, D., Ranjith, P. G., Perera M. S. A (2016) The brittleness indices used in rock mechanics and their application in shale hydraulic fracturing: a review. *J Pet Sci Eng*, 143: 158-170.
- American Rock Mechanics Association: 11-366.
- Howell, J. V (1960) Glossary of geology and related sciences. American Geological Institute, Washington, DC.
- Hucka, V., Das, B (1974) Brittleness determination of rocks by different methods. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 17(10): 389-392.
- Jin, X., Shah, S. N., Roegiers, J. C., Zhang, B (2014a) Fracability evaluation in shale reservoirs-an integrated petrophysics and geomechanics approach. In: Proceedings of the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Society of Petroleum Engineers.
- Jin, X, Shah, S. N., Truax, J. A., Roegiers, J. C (2014b) A Practical petrophysical approach for brittleness prediction from porosity and sonic logging in shale reservoirs. In: SPE annual technical conference and exhibition, Society of Petroleum Engineers.
- Karimpour, M. H (2006) Cu-Au mineralizaion accompany with magnetite- spcullarite (IOCG) and examples in Iran. 9th Iranian Geology Society Conference, University of Tarbiat Moallem, Tehran, Iran.
- Matern, N. V., Hjelmer, A (1943) Forsok med pagrus (Tests with Chippings), *Medelande nr. 65, Statens väginstitut, Stockholm*, p 65. English summary, 56-60.
- Meng, F., Zhou, H., Zhang, C., Xu, R., Lu, J (2015) Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress-strain curves. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48: 1787-1805.
- Mohamed, M. E. S., Saeed, M. A., Radwan, N. A. A (2019) Prediction of unconfined compressive strength of rocks by point load strength index. *Journal Of Al-Azhar University Engineering Sector*, 14(51): 453-459.
- Nygård, R., Gutierrez, M., Bratli, R. K., Høeg, K (2006) Brittle-ductile transition, shear failure and leakage in shales and mudrocks. *Marine and Petroleum Geology*, 23(2): 201-212.

Evaluation of the S20 brittleness index, Engineering and petrographic properties of some igneous rocks of Sangam iron ore mine in Khaf

A. Ghasempour^{1*}, G. R. Lashkaripour² and M. Ghafouri³

1- M. Sc., student. Dept., of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

2, 3- Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

* ghasempouramirarsalan7522@gmail.com

Received: 2020/6/3 Accepted: 2021/1/2

Abstract

Brittleness is one of the most important mechanical properties of rock which has a widespread application in underground constructs drilling like tunnel drilling. Although many methods have been introduced for estimating brittleness, no standard has been mentioned for measuring brittleness. In this research, experiments for determining brittleness of S20 along with petrographic (main mineral percentage), physical (dry density, saturation density, porosity and water absorption percentage), mechanical (uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, point load test) and dynamic properties (pressure and shear wave velocity) in the two states of dry and saturated were performed on 19 test samples of igneous rocks (granite, granodiorite and dacite) selected from Sangam iron ore mine in Khaf. Statistical analysis of the results shows that brittleness of samples increases with increasing alkali feldspar and quartz and also reducing plagioclase. Also existence of micro particles and carbonate veins decreases strength and increases the brittleness of rock and facilitates excavability of samples which is more prominent in saturated state. There is an inverse relationship between S20 brittleness and the brittleness indices, and as the value of S20 brittleness increases, the value of brittleness indices decrease. The relationship between S20 brittleness and brittleness indices B3 and B4 has the highest coefficient of determination. As a result, it can be said that the brittleness measured in the laboratory can be more realistic in expressing the brittleness of rocks.

Keywords: S20 brittleness, Alkali feldspar, Igneous rock, Sangam Khaf