۴۱ چهل و یکمین گردهمایی (همایش ملی) علوم زمین
The 41th National Geosciences Congress
۲ و ۳ اسفند ماه ۱۴۰۱
www.geoconf.gsi.ir

ارزیابی شکنندگی سنگ‌آهک سازند اسفندیار (شمال طبس) با استفاده از روابط تجربی

زهره شریفی[۱]، غلامرضا لشکری‌پور (نویسنده مسئول)[۲]، محمد خانه‌باد[۳]، مجتبی رحیمی شهید[۴]

[۱] دانشجوی کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، Sharifizohreh95@gmail.com.

[۲] استاد زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، Lashkaripour@um.ac.ir.

[۳] دانشیار رسوب‌شناسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، Mkhanehbad@um.ac.ir.

[۴] دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، Mr619htt@gmail.com.

چکیده

شکنندگی یکی از خواص مهم سنگ است و روی رفتار سنگ، حین انجام عملیات مختلف مؤثر می‌باشد. تعیین شکنندگی سنگ نیاز به نمونه‌های خاص و ابزار پیچیده دارد و حتی می‌توان گفت که تقریباً روش استانداردی برای تعیین مستقیم شکنندگی سنگ، وجود ندارد؛ بنابراین، شاخص‌های شکنندگی سنگ، عمدتاً با استفاده از روابط تجربی مختلف، تعیین می‌شوند. هدف پژوهش حاضر، تعیین شاخص‌های شکنندگی سنگ‌آهک‌های سازند اسفندیار با استفاده از مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین است. بدین منظور ۱۵ بلوک سنگی از ایستگاه‌های مختلف از سازند اسفندیار در شمال شهر طبس برداشت شد. پس از انتقال بلوک‌های سنگی به آزمایشگاه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد و تهیه‌ی مغزه‌های استوانه‌ای استاندارد از آن‌ها، آزمایش‌های خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین در دو حالت خشک و اشباع بر روی نمونه‌ها انجام شد. با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش‌ها، شاخص‌های شکنندگی BI، B1، B2، B3 و B4 تعیین شدند. نتایج نشان داد که میانگین شاخص شکنندگی (BI) در حالت خشک برابر با ۲/۵۶و در حالت اشباع ۲/۴۹ می‌باشد. بر این اساس نمونه سنگ مورد بررسی از نظر رده‌بندی شکنندگی در دسته کمی‌شکننده قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی

سنگ‌آهک، شاخص‌های شکنندگی، شمال طبس، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلین.

۱. مقدمه

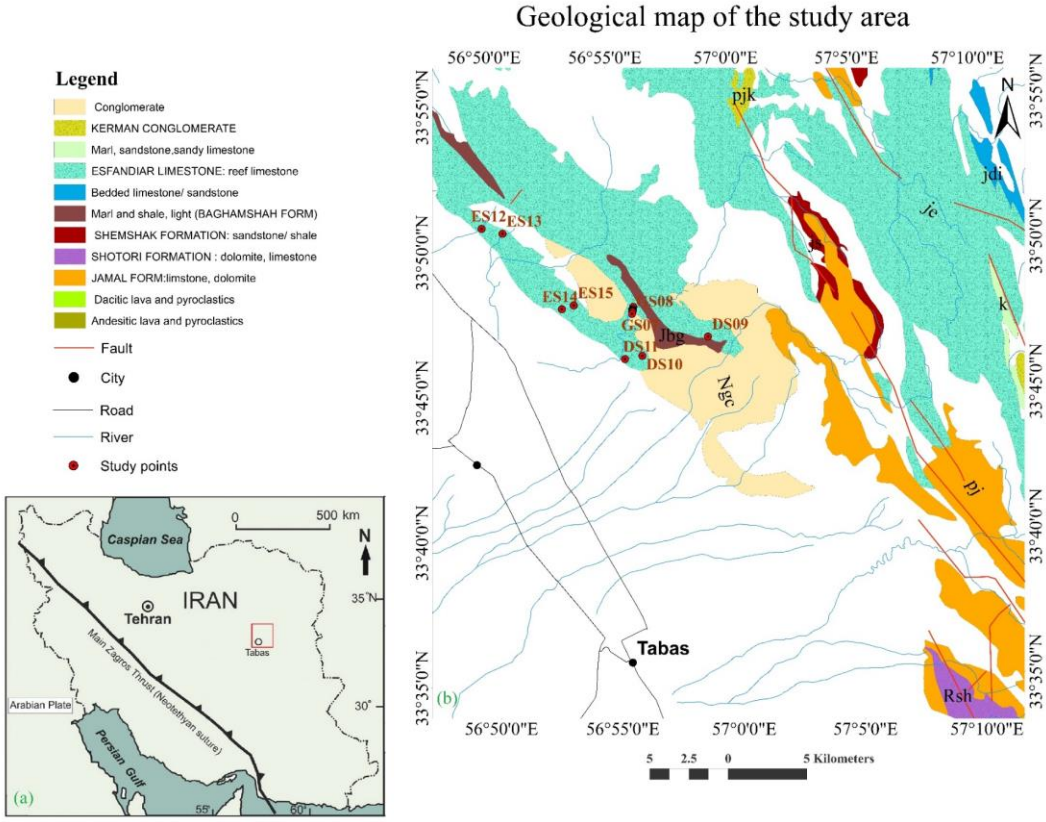
شکنندگی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی سنگ است که در طرح‌های ژئوتکنیکی مانند عملیات حفاری و سازه‌های زیرزمینی کاربرد گسترده‌ای دارد (خراسانی و همکاران، ۱۳۹۷). شکنندگی سنگ یکی از خواص مکانیکی سنگ و تابعی از مقاومت است که نشان‌دهنده‌ی استحکام سنگ در مقابل تغییرشکل در محدوده الاستیک است (Altindag, 2010). همچنین شکنندگی یکی از شاخص‌های مهم برای پیش‌بینی انفجار سنگ است که می‌تواند برای تجزیه و تحلیل پایداری توده‌های سنگی اطراف و تولید نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرد (Altindag, 2002). در مهندسی سنگ، شکنندگی اصطلاحی است که معمولاً برای شناسایی ویژگی‌های احتمالی شکست توده-سنگ به کار می‌رود (Zhang et al., 2016). تعاریف و روابط مختلفی برای شکنندگی بیان شده است. رمزی شکنندگی را به‌عنوان تخریب چسبندگی داخلی ماده‌سنگ تعریف کرده است (Ramsay, 1967). مورلی آن را به‌عنوان عدم شکل‌پذیری تعریف می‌کند و شکل‌پذیری را خاصیتی از ماده می‌داند که اجازه می‌دهد اجزا تشکیل‌دهنده‌ی آن توسط اعمال نیروی کششی به بخش‌های کوچک‌تر تقسیم شود (Morley, 1994). هیتنی شکنندگی را به‌عنوان عدم شکل‌پذیری یا عکس آن تعریف می‌کند. درجه‌ی شکنندگی معمولاً در مقادیر کشش یا فشارش سطح رخ می‌دهد. این یک اصطلاح نسبی است زیرا تاکنون عدد پذیرفته‌شده‌ای ثبت نشده که پایین‌تر از آن ماده به‌عنوان شکل‌پذیر در نظر گرفته شود (Heteyni, 1966). همچنین هاول پیشنهاد کرد که شکنندگی مواد، خاصیت شکست با شکل‌پذیری بسیار کم است (Hawell, 1959).

مطالعات متعددی به تعیین شاخص‌های شکنندگی سنگ با استفاده از روابط تجربی پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به مطالعات: حسینی و حاتمی جربت (۱۳۹۵)، خراسانی و همکاران (۱۳۹۸)، صفری فرخد و همکاران (۱۳۹۸)، کراری و همکاران (۱۳۹۹)، قاسم‌پور و همکاران (۱۴۰۰)، Rahimi Shahid and Kargaranbafghi (2021)، Karami et al., (2022)، Rahimi Shahid et al., (2022)، Ghobadi et al., (2023) اشاره کرد.

در این مطالعه با استفاده از مقاومت کششی و فشاری و روابط ارائه شده توسط: Altindag, (2010) ,Yarali and Soyer, (2011), Goktan Hunca and Dass, (1974), and Yilmaz Gunes, (2005)، شاخص‌های شکنندگی BI، B1، B2، B3 و B4 سنگ‌آهک‌های سازند اسفندیار واقع در شمال شهر طبس محاسبه و ارزیابی شده است.

۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در شمال شهرستان طبس قرار دارد. شهرستان طبس در نیمه‌ی شرقی کشور و در شمال غرب استان خراسان جنوبی قرار دارد (شکل a۱). سازند اسفندیار یکی از واحدهای سنگی ایران مرکزی است. این سازند در ناحیه شمال شرقی تا جنوب شرقی شهرستان طبس در استان خراسان جنوبی واقع‌شده و بین دو بلوک لوت و طبس قرار دارد. سن سازند اسفندیار که از فسیل‌های فراوان تشکیل شده، بر اساس فسیل‌های شاخصی چون آمونیت‌ها و فرامینیفرها و دیگر اجزاء اسکلتی موجود، ژوراسیک بالایی را نشان می‌دهد. سازند اسفندیار شامل آهک‌های روشن و ستیغ‌ساز با لایه‌بندی متوسط تا ضخیم است که بر روی یک سکوی وسیع و کم‌عمق به طول بیش از ۱۷۰ کیلومتر و عرض بین ۳۰ تا ۴۰ کیلومتر نهشته شده است و بخش عمده ارتفاعات رشته‌کوه‌های شتری را به خود اختصاص داده است (Fursich, et al., 2003). با غالب شدن شرایط آب و هوایی گرم و خشک در فاصله زمانی کالوین تا آکسفوردین در بخش بزرگی از شمال بلوک طبس، بر روی سکوی رشته‌کوه‌های شتری یک کارخانه بزرگ آهک‌سازی فعال شده که سازند اسفندیار و بخش بزرگی از آهک‌های ریزشی قلعه‌دختر را ساخته است. تشکیل رسوبات آهکی در اواخر آکسفوردین در بخش‌هایی از آغاز کیمریجین با بالا آمدن سطح آب‌ها در مقیاس جهانی (Hallam, 2001) و غرق شدن سکوی اسفندیار در بخش خاوری کوه‌های شتری پایان می‌یابد. گسترش سازند اسفندیار در منطقه‌ی مورد بررسی در شکل b۱ نمایش داده‌شده است.



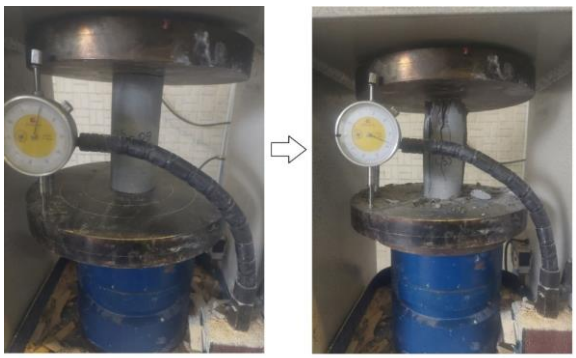
شکل ۱. (a) موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران، (b) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

۳. روش پژوهش

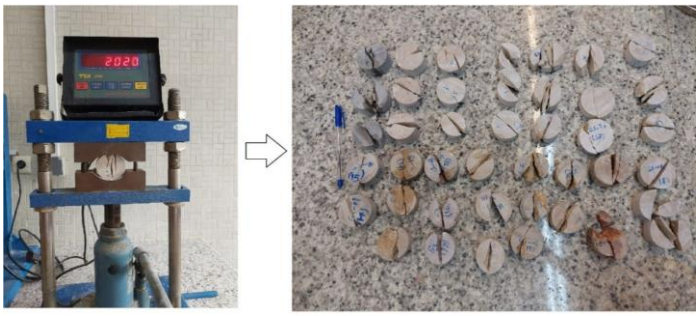
به‌منظور انجام این مطالعه از ۱۵ ایستگاه از سنگ‌آهک سازند اسفندیار در شمال شهر طبس برداشت بلوک‌های سنگی انجام شد. پس از انتقال نمونه‌های بلوک، از منطقه موردمطالعه به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، کار آماده‌سازی نمونه‌ها با هدف انجام آزمایش‌های مکانیکی صورت گرفت (شکل ۲). برای انجام آزمایش‌ها در حالت خشک، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفتند و همچنین جهت انجام آزمایش‌ها در حالت اشباع، نمونه‌ها در حالت خلأ، اشباع شدند. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق با استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 2007) تعداد ۹۰ نمونه‌ی استوانه‌ای از ۱۵ بلوک سنگ با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر دو به یک آماده‌سازی شد. هر نمونه توسط دستگاه جک بتن‌شکن فشاری با نرخ بارگذاری حدود ۰/۵ مگاپاسکال در ثانیه تا لحظه شکست تحت فشار قرار داده‌شد. با تعیین حداکثر بار وارد بر نمونه‌ها در طول آزمایش و محاسبه سطح مقطع مؤثر هر مغزه، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها محاسبه و میانگین مقادیر محاسبه‌شده به‌عنوان مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ مورد مطالعه برای هر ایستگاه، در نظر گرفته شد (شکل ۳). همچنین جهت انجام آزمایش مقاومت کششی برزیلین مطابق با استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 2007)، ابتدا توسط دستگاه مغزه‌گیر، تعداد ۸۶ نمونه مغزه با قطر ۵۴ میلی‌متر، تهیه شد و سپس ابتدا و انتهای نمونه‌ها با نسبت طول به قطر ۰/۵ به‌گونه‌ای که صفحات برش کاملاً عمود بر محور استوانه مغزه باشد، بریده شدند. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها بین دو فک فولادی بارگذاری قوسی شکل قرارگرفته و توسط دستگاه جک فشاری تا لحظه شکست تحت‌فشار قرار گرفتند (شکل ۴). پس از شکستن نمونه‌ها و تعیین حداکثر بار وارده بر نمونه‌ها، مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها محاسبه شد. برای هر ایستگاه میانگین مقادیر محاسبه‌شده به‌عنوان مقاومت کششی برزیلین سنگ مورد مطالعه، در نظر گرفته شد. در مرحله‌ی بعد

شاخص‌های شکنندگی BI، B1، B2، B3 و B4 با استفاده از مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین و روابط موجود محاسبه شد. در نهایت شاخص‌های شکنندگی سنگ‌های منطقه، ارزیابی شد و رده‌ی سنگ بر اساس شاخص شکنندگی (BI) تعیین شد.

شکل ۲. آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام آزمایش‌ها



شکل ۳. انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های آماده‌شده توسط دستگاه جک فشاری



شکل ۴. انجام آزمایش برزیلین بر روی نمونه‌های آماده‌شده توسط دستگاه فشار

۴. خصوصیات مکانیکی سنگ‌آهک‌های منطقه مورد مطالعه

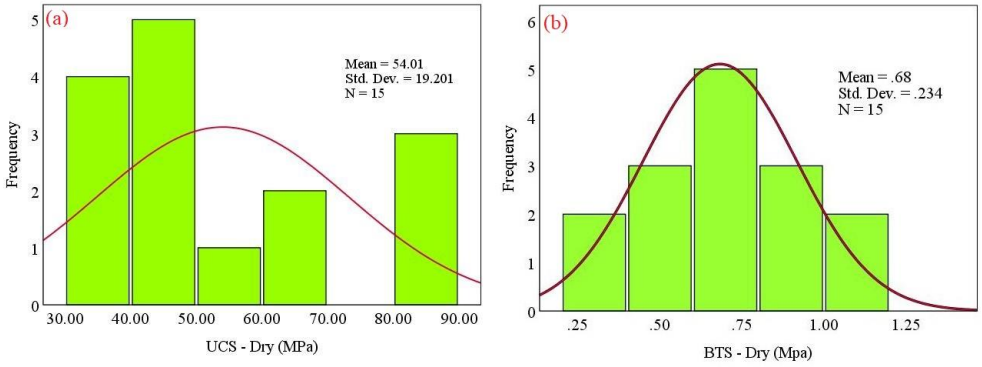
خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها مطابق استاندارد (ISRM, 2007) و شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین اندازه‌گیری شدند. در جدول ۱ نتایج حاصل از میانگین‌گیری نمونه‌ها از ۱۵ ایستگاه در دو حالت خشک و اشباع به مگاپاسکال (MPa) بیان شده است که مقدار آن در حالت خشک از ۳۲/۹۸ تا ۸۷/۴۶ مگاپاسکال و در حالت اشباع از ۲۴/۵۵ تا ۱۰۳/۸۴ مگاپاسکال متغیر است. به‌طور متوسط مقاومت فشاری تک‌محوری در حالت خشک با میانگین ۵۴/۰۱ مگاپاسکال بیش‌تر از حالت اشباع است. برای رده‌بندی مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری از رده‌بندی ارائه شده توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (Bieniawski, 1979) استفاده شد (جدول ۲) که بر این اساس نمونه سنگ‌های سازند اسفندیار، به‌طور میانگین در حالت خشک و اشباع به ترتیب در رده مقاومت متوسط و نسبتاً پایین قرار می‌گیرند. بر اساس رده‌بندی دیر و میلر نیز (جدول ۲) میانگین نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع در رده پایین قرار می‌گیرند. همچنین مقدار مقاومت کششی برزیلین در حالت خشک به‌طور میانگین ۰/۶۸ مگاپاسکال می‌باشد و در حالت اشباع این مقدار برابر ۰/۵۷ مگاپاسکال است. بیش‌ترین مقدار مقاومت کششی برزیلین در حالت خشک ۱/۱۱ مگاپاسکال و در حالت اشباع ۱/۰۱ مگاپاسکال است و کمترین مقدار آن به‌ترتیب در دو حالت خشک و اشباع ۰/۲۲ و ۰/۲۰ مگاپاسکال است. شکل ۵ و ۶ نمودار روند تغییرات و توزیع مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین در حالت خشک دارای توزیع تقریباً نرمال هستند. فراوانی مقاومت فشاری تک‌محوری در حالت خشک بین ۳۰ تا ۵۰ مگاپاسکال، بیش‌تر است. نمونه‌ها مقاومت فشاری تک‌محوری کمتر از ۹۰ مگاپاسکال را دارند و در حالت اشباع بیش‌ترین فراوانی بین ۲۰ تا ۴۰ مگاپاسکال می‌باشد و اکثر نمونه‌ها مقاومت کمتر از ۸۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهند. منحنی فراوانی مقاومت کششی برزیلین در حالت خشک تقریباً نرمال است.

جدول ۱. آمار توصیفی نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی

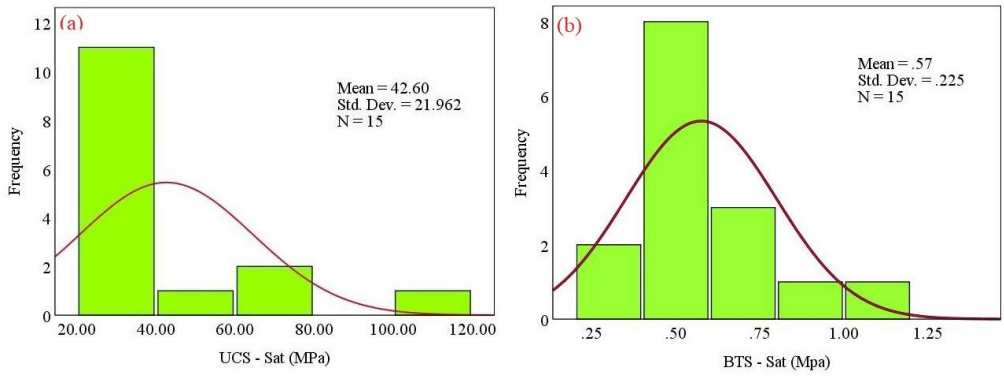
Test type	N	Range	Min	Max	Mean	Std. Deviation	Variance
UCS - Dry (MPa)	15	54.48	32.98	87.46	54.01	19.20	368.69
UCS - Sat (MPa)	15	79.29	24.55	103.84	42.60	21.96	482.35
BTS - Dry (MPa)	15	0.89	0.22	1.11	0.68	0.23	0.055
BTS - Sat (MPa)	15	0.81	0.20	1.01	0.57	0.22	0.050

جدول ۲. رده‌بندی سنگ بکر بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب مگاپاسکال (Deere and Miller, 1966; Bieniawski, 1979)

ISRM	توصیف	دیر و میلر	توصیف
1-5	خیلی پایین	28>	خیلی پایین
5-25	پایین	28-56	پایین
25-50	نسبتاً پایین	56-112	متوسط
50-100	متوسط	112-224	بالا
100-250	بالا	224<	خیلی بالا
250<	خیلی بالا		



شکل ۵. نمودار فراوانی و منحنی نرمال پارامترهای مکانیکی در حالت خشک: (a) مقاومت فشاری تک‌محوری، (b) مقاومت کششی برزیلین



شکل ۶. نمودار فراوانی و منحنی نرمال پارامترهای مکانیکی در حالت اشباع: (a) مقاومت فشاری تک‌محوری، (b) مقاومت کششی برزیلین

۵. نتایج و بحث

۱,۵. شاخص‌های شکنندگی

شاخص شکنندگی سنگ اصطلاحی است که برای توصیف شکنندگی توده‌سنگ بیان می‌شود. برای تعیین شاخص شکنندگی از پنج نسبت استفاده شده که در جدول ۳ ارائه شده است. در جدول ۳، BI، B1، B2، B3 و B4 شاخص‌های شکنندگی و σc و σt به ترتیب مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی سنگ بر حسب مگاپاسکال (Mpa) است. برای بیان شاخص شکنندگی (BI) از رابطه Goktan and Yilmaz (2005) استفاده شده است. در رابطه BI ضریب k با توجه به جدول ۴ بر اساس رده‌بندی سنگ که توسط Hunca and Das (1974) ارائه شده، انتخاب می‌شود که برای سنگ‌های مورد بررسی در این پژوهش (سنگ‌آهک) برابر ۰/۱۷ است.

جدول ۳. روابط شکنندگی مورد استفاده در این پژوهش

1	$B_1 = (\boldsymbol{\sigma c/\sigma t})$	(Hunca and Das, 1974)
2	$B_2 = ((\sigma c - \sigma t)/(\sigma c + \sigma t))$	(Hunca and Das, 1974)
3	$B_3 = (\sigma c \times \sigma t)/2$	(Altindag, 2002)
4	$B_4 = (\sigma_c \times \sigma_t)^{0.72}$	(Yarali and Soyer, 2011)
5	$BI = 2.065 + K\ (\log \sigma c)^2$	(Goktan and Yilmaz Gunes, 2005)

جدول ۴. رده‌بندی سنگ بر اساس ضریب k (Hunca and Das, 1974)

Rock group	Material type	K
Group a	Carbonate materials with well-developed crystal cleavage (e.g., limestone, dolomite, and marble)	**0.17**
Group b	Lithified argillaceous (e.g., mudstone, shale, clay)	**0.231**
Group c	Arenaceous materials with strong crystals and poorly developed crystal cleavage (e.g., sandstone and quartzite)	**0.270**
Group d	Fine-grained polymineralic igneous crystalline materials (e.g., andesite, dolerite, diabase and rhyolite)	**0.276**
Group e	Coarse-grained polymineralic igneous and metamorphic materials (e.g., granite, gabbro, gneiss)	**0.659**

نتایج حاصل از ضرایب شکنندگی و شاخص شکنندگی سنگ بر اساس معادله‌های مندرج در جدول ۳، به‌صورت میانگین در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین نمودار فراوانی ضرایب شکنندگی در شکل ۷ نمایش داده شده است. بیش‌ترین مقدار BI در حالت خشک ۲/۷۱ و کمترین مقدار آن ۲/۴۶ می‌باشد و در حالت اشباع بیشترین و کمترین مقدار به‌ترتیب ۲/۷۶ و ۲/۳۹ می‌باشد. میانگین شاخص شکنندگی (BI) در حالت خشک ۲/۵۶ و در حالت اشباع ۲/۴۹ است. منحنی شاخص شکنندگی (BI) در دو حالت خشک و اشباع تقریباً نرمال است. شاخص‌های B2 و B3 و B4 در حالت خشک منحنی تقریباً نرمالی را دارند و فراوانی نمونه‌ها دارای توزیع تقریباً یکنواختی است. با توجه به شکل ۷، میانگین شاخص‌های شکنندگی در حالت اشباع مقدار کمتری دارند.

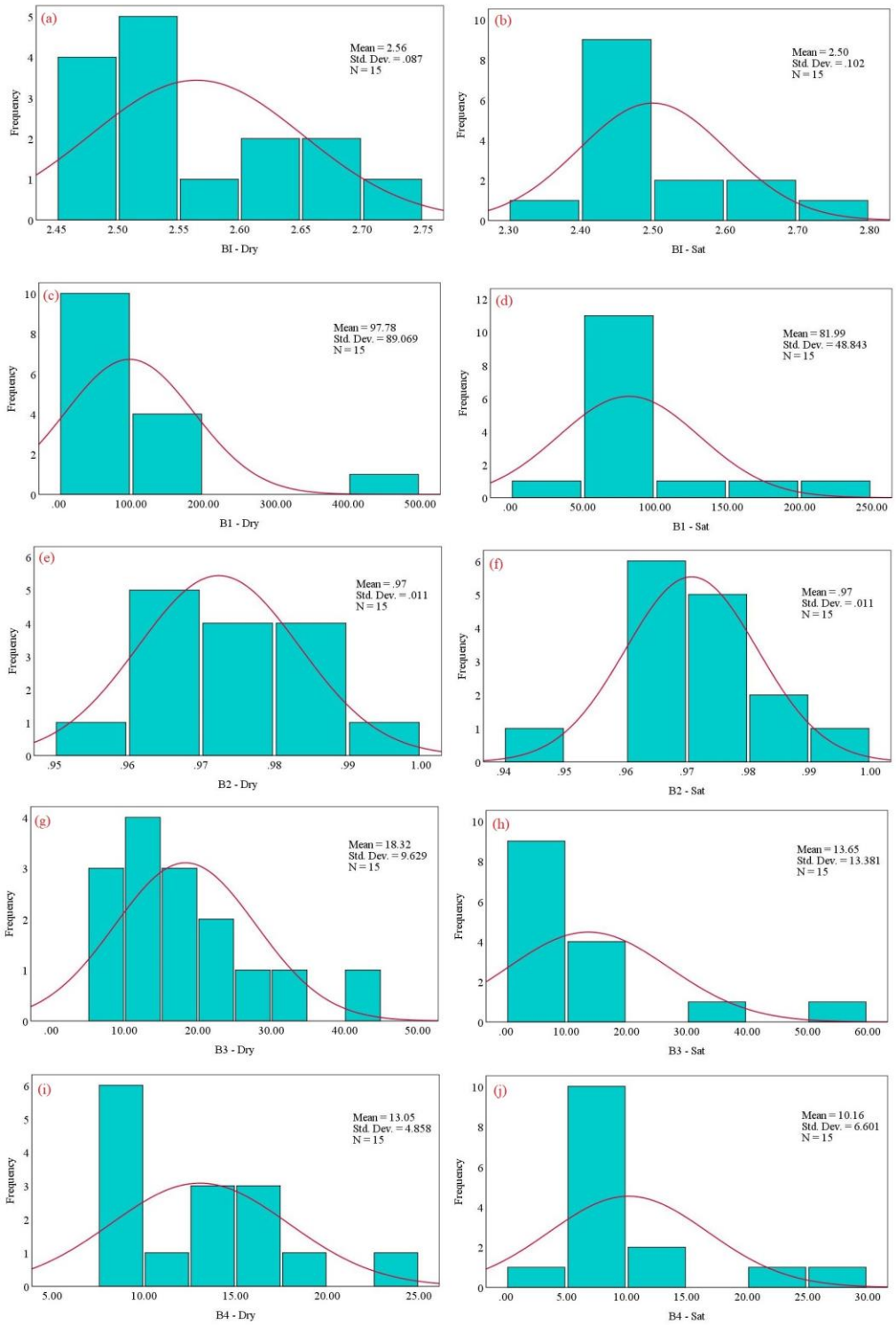
جدول ۵. خلاصه توصیف آماری شاخص‌های شکنندگی

Test type	N	Range	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Variance
BI - Dry	15	0.25	2.46	2.71	2.5646	0.08715	0.008
BI - Sat	15	0.36	2.39	2.76	2.4998	0.10247	0.011
B1 - Dry	15	358.33	43.90	402.23	97.7786	89.06876	7933.243
B1 - Sat	15	181.35	36.48	217.83	81.9862	48.84313	2385.651
B2 - Dry	15	0.04	0.96	1.00	0.9724	0.01101	0.000
B2 - Sat	15	0.04	0.95	0.99	0.9707	0.01083	0.000
B3 - Dry	15	33.39	8.84	42.23	18.3168	9.62901	92.718
B3 - Sat	15	48.32	3.56	51.88	13.6464	13.38086	179.047
B4 - Dry	15	16.48	7.91	24.39	13.0521	4.85796	23.600
B4 - Sat	15	24.17	4.11	28.28	10.1569	6.60097	43.573

طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس شاخص شکنندگی BI، در جدول ۶ ارائه شده است (Hoek, 1983). با توجه به این‌که میانگین شاخص شکنندگی BI در حالت خشک برابر با ۲/۵۶ و در حالت اشباع برابر با ۲/۴۹ است، سنگ موردمطالعه از لحاظ شکنندگی در رده کمی‌شکننده قرار می‌گیرد.

جدول ۶. رده‌بندی سنگ بر اساس شاخص شکنندگی (Hoek, 1983)

Class	(BI)	Description
1	BI>25	Very brittle
2	15<BI<25	Brittle
3	10<BI<15	Moderately brittle
4	BI<10	Lowly brittleness



شکل ۷. نمودار فراوانی و منحنی نرمال شاخص‌های شکنندگی مختلف: (a) B1 در حالت خشک، (b) B1 در حالت اشباع، (c) B2 در حالت خشک، (d) B2 در حالت اشباع، (e) B3 در حالت خشک، (f) B3 در حالت اشباع، (g) B4 در حالت خشک، (h) B4 در حالت اشباع، (i) BI در حالت خشک، (j) BI در حالت اشباع

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به ارزیابی شکنندگی سنگ به‌طور غیرمستقیم با استفاده از پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین در دو حالت خشک و اشباع پرداخته شد. با توجه به نتایج آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت که سنگ‌های آهکی سازند اسفندیار دارای مقاومت فشاری تک‌محوری متوسط هستند. با استفاده از روابط تجربی موجود بین مقاومت و شکنندگی، مقدار شاخص‌های شکنندگی سنگ‌های مورد آزمایش محاسبه شد. شاخص‌های شکنندگی نمونه‌ها در حالت خشک توزیع نرمال بهتری نسبت به حالت اشباع دارند. میانگین شاخص شکنندگی BI در حالت خشک برابر با ۲/۵۶ و در حالت اشباع برابر با ۲/۴۹ است؛ بنابراین سنگ‌های مورد آزمایش دارای شکنندگی کم هستند.

سپاس‌گزاری

نگارندگان لازم می‌دانند تا از گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد به سبب فراهم نمودن امکانات لازم برای انجام طرح پژوهشی شماره ۵۶۸۷۳ قدردانی نمایند. از جناب آقای مهندس حمید حافظی‌مقدس مسئول آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، تشکر می‌شود. همچنین نگارندگان از ژئوپارک شهرستان طبس به دلیل مساعدت در این امر پژوهشی کمال تشکر را دارند.

منابع

حسینی، م.، حاتمی جربت، م.، ۱۳۹۵. تخمین شاخص شکنندگی سنگ با استفاده از آزمایش بار نقطه‌ای (مطالعه موردی: سنگ توف کرج)، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۱ و ۲، ۱۵-۲۶.

خراسانی، ر.، اجل‌لوئیان، ر.، جمشیدی، ا.، ۱۳۹۸. برآورد شکنندگی سنگ‌های گرانیتی مناطق تواندشت و گوشه شهرستان بروجرد از سختی واجهشی اشمیت و خصوصیات پتروگرافی، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۴، ۶۸-۵۵.

صفری فرخد، س.، لشکری‌پور، غ.، حافظی مقدس، ن.، ۱۳۹۸. ارزیابی شاخص شکنندگی S20 سنگ‌آهک و بررسی عوامل مؤثر بر آن در حالت خشک و اشباع، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۳، ۲۱-۳۶.

قاسم‌پور، ع.، لشکری‌پور، غ.، غفوری، م.، ۱۴۰۰. ارزیابی شاخص شکنندگی S20، خصوصیات مهندسی و پتروگرافی برخی سنگ‌های آذرین معدن سنگ‌آهن سنگان خواف، مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، ۳۰، ۳۳-۴۶.

کراری، س.س.، حیدری، م.، خادمی حمیدی، ج.، شریفی تشنیزی، ا.، ۱۳۹۹. ارزیابی شاخص‌های شکنندگی سنگ‌ها، برای تخمین مدل چقرمگی، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۳، ۶۵-۵۱.

Altindag, R., 2002. The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hole drills, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 102, 61- 66.

Altindag, R., 2010. Assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency, Rock Mechanics and Rock Engineering, 43, 361– 370.

Bieniawski Z.T. 1974. Estimating the strength of rock materials. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 74, 312-320.

Deere D., Miller R., 1966. Engineering classification and index properties of intact rock: Technical Report No. AFNL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, Albuquerque, NM, np.

Fursich, F.T., Wilmsen, M., Seyed-Emami, K.& Majidfard, M.R., 2003. evidence of Synsedimentary Tectonics in the Northern Tabas Block, East-Central Iran: The Callovian (Middle Jurassic) Sikor Formation-Facies, 48, 151-170.

Ghobadi, M.H., Amiri, M., Rahimi Shahid, M., 2023. The estimation of Brittleness indexes of Qom Formation sandstones in northern Hamedan using the ratio between point load index and porosity, New Findings in Applied Geology, 17(33).

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.

Hallam, A., 2001. A review of the broad pattern of Jurassic sea-level changes and their possible causes in the light of current knowledge, Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 167, 23-37.

Hetenyi, M. I., 1966. Handbook of Experimental Stress Analysis. 15 p.

Hoek, E., 1983. Strength of jointed rock masses. Geotechnique, 33, 187–223.

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, 11,389–392.

ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring, In: Ulusay R, Hudson JA (eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods.

Karami, M., Rahimi Shahid, M., Lashkaripour, G.R., 2022. Prediction of brittleness index and determination of experimental correlation between physical and mechanical properties of limestone of TaleZang Formation in Hawasan dam basement, New Findings in Applied Geology, 15(30), 125-145.

Morley, A., 1944. Strength of Material. Longman, Green, London.

Rahimi Shahid, M., Amiri, M., Lashkaripour, G., Moradi, S. 2022. The estimation of Hamedan limestone brittleness index using point load index and porosity test. Geopersia, 12(2), 331-352.

Rahimi Shahid, M., Kargaranbafghi, F., 2021. Determining the Rock Brittle Index (BI) Using Multivariate Regression (A Case Study), Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 21(2), 29-39.

Ramsay, J. G., 1967. Folding and fracturing of rocks. McGraw Hill Book Company, 568 p.

Yarali, O., Soyer, E., 2011. The effect of mechanical rock properties and brittleness on drillability. Scientific Research and Essays, 6(5), 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.

۲ و ۳ اسفند ماه ۱۴۰۱
www.geoconf.gsi.ir
۴۱ چهل و یکمین گردهمایی (همایش ملی) علوم زمین
The 41th National Geosciences Congress

Evaluation of limestone brittleness of Esfandiar Formation (North of Tabas, Iran) using experimental relationships

Zohreh Sharifi[1], Gholam Reza Lashkaripour*[2], Mohammad Khanehbad[3], Mojtaba Rahimi Shahid[4]

[1] M.Sc. candidate in Engineering Geology, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
[2] Professor in Engineering Geology, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Lashkaripour@um.ac.ir
[3] Associate Professor in Sedimentology, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
[4] Ph.D. candidate in Engineering Geology, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract
Brittleness is one of the important properties of stone and it affects the behavior of stone during various operations. Determining the brittleness of stone requires special samples and complex tools, and it can even be said that there is almost no standard method for directly determining the brittleness of stone. Therefore, rock brittleness indices are mainly determined by using different experimental relationships. The aim of the current research is to determine the brittleness indices of Esfandiar Formation limestones using uniaxial compressive strength and tensile strength. For this purpose, 15 stone blocks were collected from different stations of the Esfandiar formation in the north of Tabas city. After transferring the stone blocks to the geology laboratory of the Ferdowsi University of Mashhad and preparing standard cylindrical cores from them, mechanical properties tests including uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength in two dry and saturated states on the sample were done. Using the results of the experiments, the brittleness indices BI, B1, B2, B3, and B4 were determined. The results showed that the average brittleness index (BI) in the dry state is equal to 2.56 and in the saturated state is 2.49. Therefore, the studied rock sample is classified as lowly brittleness in the classification of brittleness.

Keywords
Brazilian tensile strength, Brittleness indices, Limestone, North Tabas, Uniaxial compressive strength.