



## تعیین شاخص شکنندگی سنگ آهک‌های غرب ایران (زون ۳۸) با استفاده از روابط تجربی

مجتبی رحیمی شهید<sup>۱</sup>، غلامرضا لشکری پور (نویسنده مسئول)<sup>۲</sup>، ناصر حافظی مقدس<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

<sup>۲</sup> استاد زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. Lashkaripour@um.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

### چکیده

یک ویژگی مکانیکی ضروری که نقش مهمی در طبقه‌بندی سنگ و ارزیابی خطر انفجار در سنگ بازی می‌کند، شکنندگی سنگ است. شکنندگی رفتار شکست سنگ حین بارگذاری و باربرداری نظیر شکست‌پذیری، مت‌پذیری، برش‌پذیری و غیره را کنترل می‌کند. در این مطالعه پس از تشکیل بانک اطلاعات خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ آهک‌های ایران، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری زون ۳۸ (غرب ایران) استخراج و بررسی شد. سپس با استفاده از روابط تجربی موجود و مقاومت فشاری تک‌محوری خشک و اشباع، شاخص شکنندگی خشک (BI-Dry) و اشباع (BI-Sat) تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که میانگین BI-Sat و BI-Dry برای سنگ آهک‌های منطقه‌ی مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۲/۵۵ و ۲/۵۳ است و بر اساس رده‌بندی (Hoek, 1983) در رده‌ی کمی شکننده ( $BI < 10$ ) قرار می‌گیرند. همچنین مقایسه‌ی میانگین BI-Sat با میانگین BI-Dry نشان می‌دهد که با اشباع شدن نمونه‌ها، شاخص شکنندگی ۰/۹۸ درصد کاهش یافته است.

### واژه‌های کلیدی

اکسس، بانک اطلاعات، تحلیل آماری، طبقه‌بندی، مقاومت فشاری.

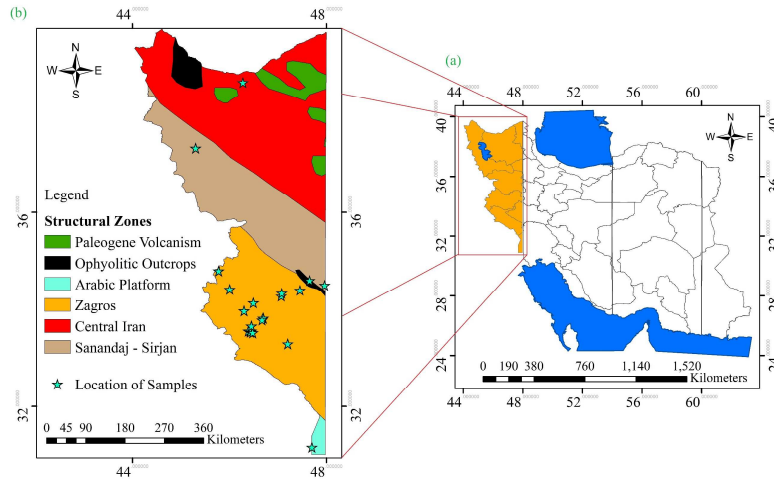


## ۱- مقدمه

تقریباً در تمامی پروژه‌های مهندسی که بر روی مصالح سنگی احداث می‌شوند، بررسی رفتار سنگ تحت بارگذاری و باربرداری یکی از الزامات اصول ساخت‌وساز است. نوع مطالعات و سازه‌های احداثی در این‌گونه پروژه‌ها را رفتار مهندسی سنگ‌های واقع در محل، تعیین می‌کنند. سنگ‌ها رفتارهای متنوعی در برابر عوامل و تنش‌های بیرونی از خود نشان می‌دهند که رفتار شکننده یکی از این نوع رفتارها در برابر تنش‌های وارده به سنگ است. در سازه‌های زیرزمینی و حفاری‌ها (استخراج نفت و گاز) بررسی رفتار شکنندگی سنگ‌ها اهمیت دوچندانی دارد. شکنندگی سنگ یک پارامتر کلیدی است که ویژگی‌های شکست سنگ در شرایط بارگیری و باربرداری را تعیین می‌کند (Meng et al., 2021). در طول ۵۰ سال گذشته، ده‌ها شاخص شکنندگی سنگ معرفی شده و توسعه یافته است (Andreev, 1995; Meng et al., 2015; Zhang et al., 2016; Hucka & Das, 1974). علیرغم استفاده گسترده از شاخص‌های شکنندگی در زمینه‌های مختلف مهندسی سنگ، تعریف و روش اندازه‌گیری شکنندگی سنگ به‌طور قابل توجهی متفاوت بوده و هنوز روش استاندارد برای تعیین آن وجود ندارد و هر یک از شاخص‌های شکنندگی در زمینه‌ای خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند (Meng et al., 2021). از میان تعاریف مختلف، به زبانی ساده می‌توان شاخص شکنندگی سنگ را تابعی از مقاومت (فشاری تک‌محوری (UCS)) که نشان‌دهنده استحکام سنگ در مقابل تغییر شکل در محدوده الاستیک است، تعریف کرد. در حقیقت هر چه شاخص شکنندگی سنگی بیش‌تر باشد بدین معنی است که مقاومت فشاری تک‌محوری بالاتری دارد. در مطالعه‌ی حاضر نیز منظور از شاخص شکنندگی، تعریف مذکور است. با توجه به اهمیت بررسی رفتار شکننده سنگ‌ها، تاکنون مطالعات متعددی در خصوص این ویژگی سنگ‌ها توسط محققین مختلف انجام شده است. در برخی مطالعات شاخص‌های شکنندگی با استفاده از مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلین محاسبه و بررسی شده‌اند (Ghobadi et al., 2023; Karami et al., 2021; Meng et al., 2021; Rahimi Shahid et al., 2022; Rahimi Shahid, 2023; Sharifi et al., 2023; Kargarabafghi, 2021). در برخی مطالعات شاخص‌های شکنندگی به‌طور مستقیم با استفاده از آزمایش پانچ تعیین شده و بعد رابطه‌ی بین شاخص‌های شکنندگی با سایر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی سنگ‌ها بررسی شده‌اند (Lashkaripour et al., 2018). در مطالعات جدیدتر شاخص شکنندگی با استفاده از مساحت زیر منحنی تنش - کرنش محاسبه و بررسی می‌شوند (Tao et al., 2020). در این پژوهش، پس از تشکیل بانک اطلاعات خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌آهک‌های ایران، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) زون ۳۸ (سیستم UTM) استخراج و بررسی شد. در مرحله‌ی بعد شاخص شکنندگی (BI) با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده توسط (Goktan & Gunes Yilmaz, 2005) محاسبه شده و مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه در غرب کشور ایران و در زون مختصات ۳۸ (سیستم UTM) با طول جغرافیایی ۴۴ تا ۴۸ درجه‌ی شرقی و عرض جغرافیایی بین ۳۱ تا ۴۰ درجه‌ی شمالی قرار دارد. در شکل ۱، موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه و محدوده‌های گردآوری نمونه‌ها نمایش داده شده است. این منطقه بر اساس طبقه‌بندی (Stoeklin, 1968) بخشی از زون‌های ساختاری ولکانیسم پالئوژن، کمپلکس افیولیتی، دشت خوزستان (پلتفرم عربی)، زاگرس، ایران مرکزی و سنندج - سیرجان را شامل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود بیش‌ترین محل نمونه‌های استخراج شده، از زون ساختاری زاگرس است.



شکل ۱. (a) موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه در ایران و (b) محدوده‌های نمونه‌برداری در منطقه‌ی مورد مطالعه (زون ۳۸)

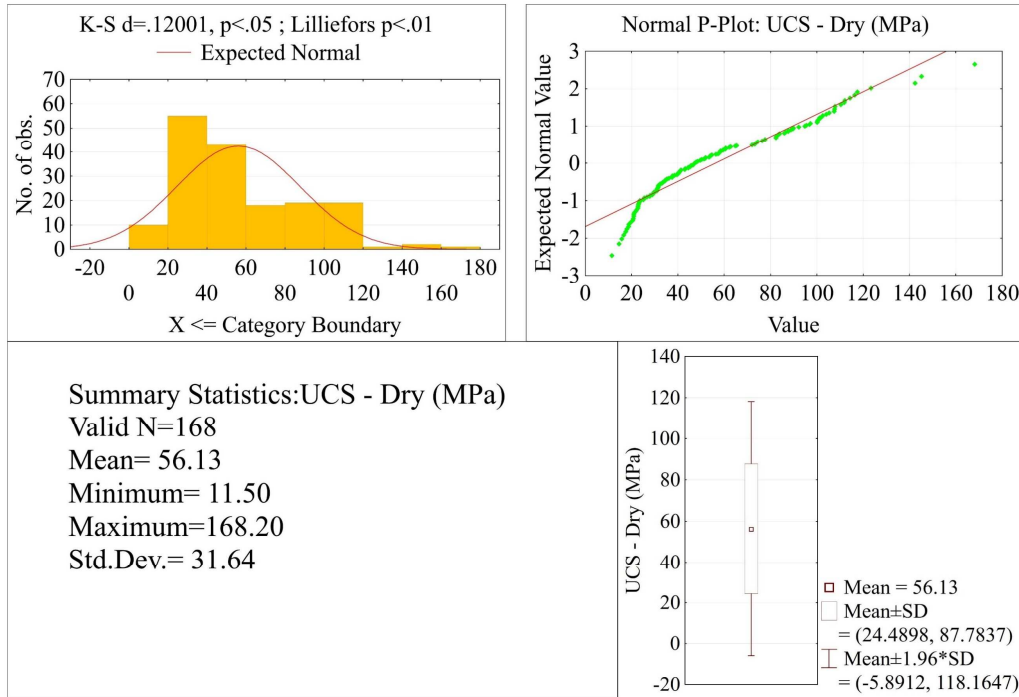
### ۳- روش پژوهش

پس از مطالعه‌ی منابع مختلف، خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌آهک‌های ایران، استخراج و گردآوری شد. در مرحله‌ی بعد با استفاده از نرم‌افزار اکسس (Access) و داده‌های گردآوری شده، یک بانک اطلاعات جامع از خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌آهک‌های ایران تهیه شد. برای انجام مطالعه‌ی حاضر، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) مربوط به زون ۳۸ از بانک اطلاعات تهیه شده، استخراج و بررسی شد. جهت بررسی آماری مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری از نرم‌افزار Statistica استفاده شد. در مرحله‌ی بعد شاخص شکنندگی (BI) با استفاده از مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری و رابطه‌ی ارائه شده توسط (Goktan & Gunes, 2005) محاسبه شد. تحلیل آماری نتایج شاخص شکنندگی خشک و اشباع در محیط نرم‌افزار Statistica انجام شد.

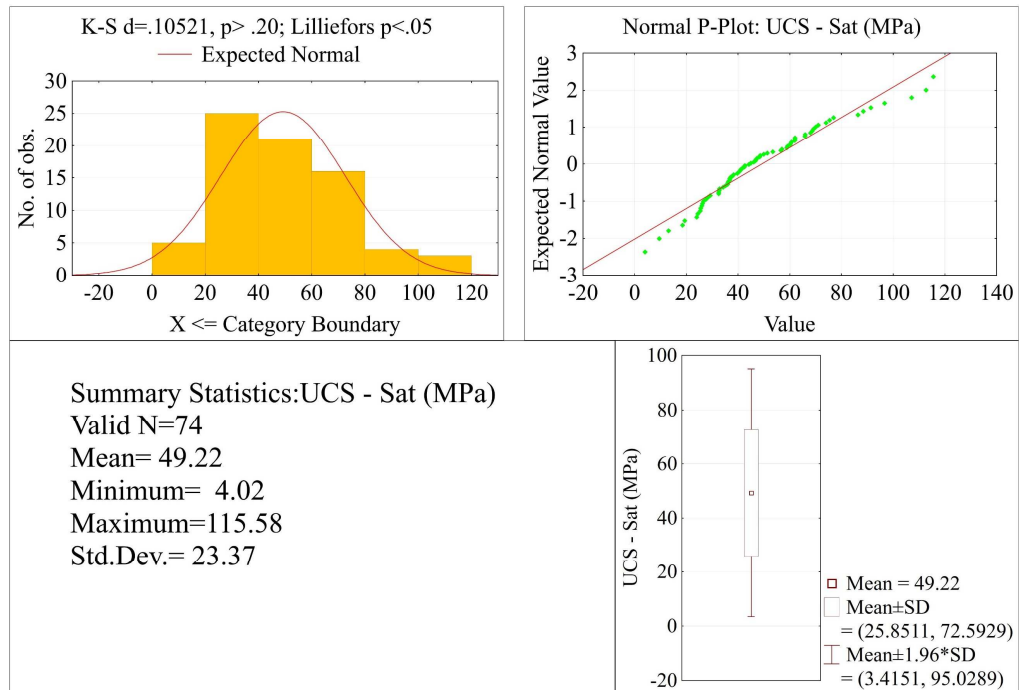
### ۴- نتایج و بحث

#### ۵- مقاومت فشاری تک‌محوری

از بانک اطلاعات تهیه شده، ۱۶۸ و ۷۴ عدد آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری به ترتیب در شرایط خشک و اشباع، استخراج شد. نتایج تحلیل آماری مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌آهک‌های غرب ایران در شرایط خشک و اشباع در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. بر اساس نمودار هیستوگرام ارائه شده در شکل ۲، مقاومت فشاری تک‌محوری خشک بین ۲۰ تا ۶۰ مگاپاسکال، بیش‌ترین فراوانی را دارد. بر اساس نمودار P - Plot توزیع فراوانی مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری خشک تقریباً به حالت نرمال نزدیک است. بر اساس طبقه‌بندی (ISRM, 2007) اکثر نمونه‌ها در شرایط خشک کمی مقاوم (۲۵ تا ۵۰ مگاپاسکال) تا با مقاومت متوسط (۵۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال) هستند و تعداد اندکی از نمونه‌ها مقاومت بالایی دارند (بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال). به‌طور کلی سنگ‌آهک‌های مورد بررسی در شرایط خشک از مقاومت متوسطی برخوردار هستند (با میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری خشک برابر با ۵۶/۱۳۰ مگاپاسکال). بر اساس نمودار هیستوگرام ارائه شده در شکل ۳، مقاومت فشاری تک‌محوری اشباع از توزیع تقریباً نرمال برخوردار است و مقادیر بین ۲۰ تا ۸۰ مگاپاسکال بیش‌ترین فراوانی را دارد. بر اساس نمودار P - Plot توزیع فراوانی مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری اشباع نسبت به حالت خشک، به حالت نرمال خیلی نزدیک‌تر است. بر اساس طبقه‌بندی (ISRM, 2007) بیش از نیمی از نمونه‌ها در شرایط اشباع کمی مقاوم (۲۵ تا ۵۰ مگاپاسکال) و بقیه تقریباً مقاومت متوسطی (۵۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال) دارند و تنها سه نمونه مقاومت بالایی دارند (بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال). به‌طور کلی سنگ‌آهک‌های مورد بررسی در شرایط اشباع از مقاومت متوسطی برخوردار هستند (با میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری اشباع برابر با ۴۹/۲۲۰ مگاپاسکال). میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری اشباع نشان می‌دهد که با اشباع شدن نمونه‌ها، مقاومت سنگ‌آهک‌های منطقه‌ی مورد بررسی ۱۲/۳۱ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۲. نتایج تحلیل آماری مقادیر مقاومت فشاری تک محوری خشک



شکل ۳. نتایج تحلیل آماری مقادیر مقاومت فشاری تک محوری اشباع



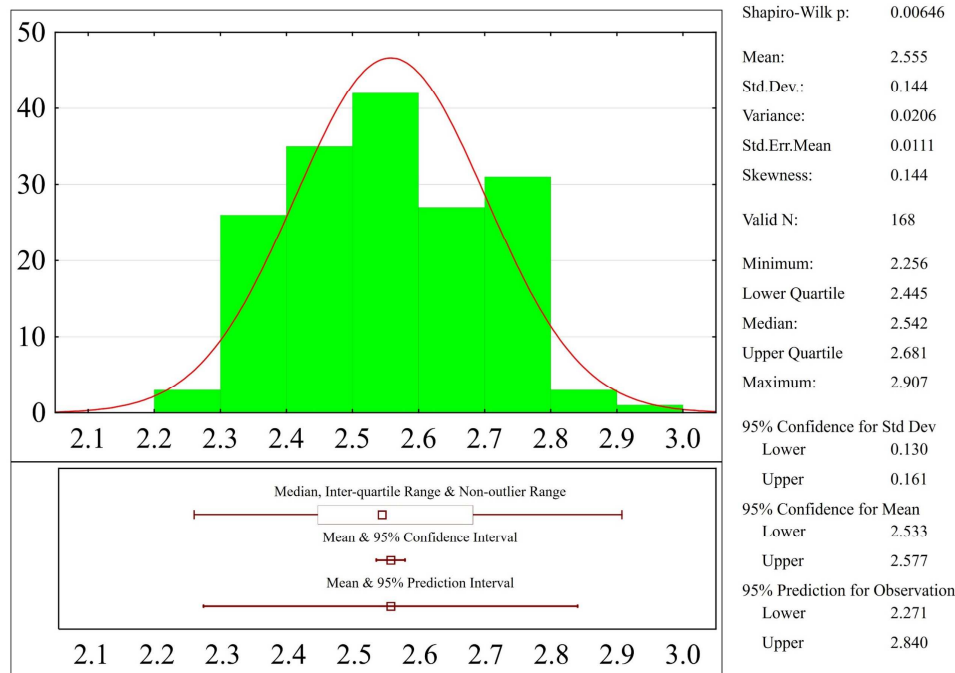
#### ۶- شاخص شکنندگی (BI)

در این مطالعه به منظور برآورد شاخص شکنندگی (BI) از رابطه‌ی ارائه شده توسط (Goktan & Gunes Yilmaz, 2005) استفاده شده است. در رابطه BI ضریب K بر اساس رده‌بندی سنگ که توسط (Hucka & Das, 1974) ارائه شده، انتخاب می‌شود که برای سنگ‌های مورد بررسی در این مطالعه (سنگ‌آهک) برابر ۰/۱۷ است.

$$BI = 2.065 + K (Log UCS)^2 \quad (۱)$$

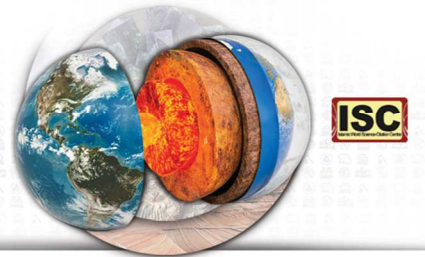
پس از استخراج و بررسی مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری از بانک اطلاعات، با استفاده از رابطه‌ی فوق، شاخص شکنندگی (BI) در دو شرایط خشک و اشباع تعیین شد که نتایج تحلیل آماری آن‌ها در دو شکل ۴ و ۵ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود توزیع شاخص شکنندگی در شرایط خشک (BI-Dry) نرمال است. بر اساس این شکل برای تمام نمونه‌ها شاخص شکنندگی خشک (BI-Dry) کمتر از ۳ است و بر اساس رده‌بندی (Hoek, 1983) در رده‌ی کمی شکننده ( $BI < 10$ ) قرار می‌گیرند. میانگین BI-Dry برای سنگ‌آهک‌های منطقه‌ی مورد مطالعه برابر با ۲/۵۵ است و سایر شاخص‌های آماری آن در شکل ۴ نمایش داده شده است.

Graphical Summary for BI - Dry

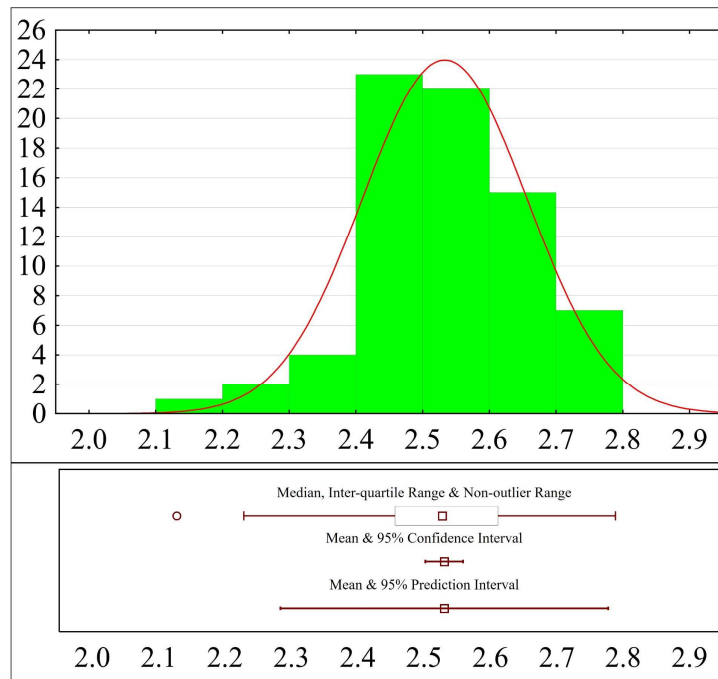


شکل ۴. نتایج تحلیل آماری مقادیر شاخص شکنندگی (BI) خشک

نتایج تحلیل آماری مقادیر شاخص شکنندگی در شرایط اشباع (BI-Sat) در شکل ۵ آورده شده است. مطابق شکل، توزیع داده‌ها تقریباً نرمال است. میانگین BI-Sat برای سنگ‌آهک‌های منطقه‌ی مورد مطالعه برابر با ۲/۵۳ است و کمی شکننده هستند. مقایسه‌ی میانگین BI-Sat با میانگین BI-Dry نشان می‌دهد که با اشباع شدن نمونه‌ها، شاخص شکنندگی ۰/۹۸ درصد کاهش یافته است.



Graphical Summary for BI - Sat



شکل ۵. نتایج تحلیل آماری مقادیر شاخص شکنندگی (BI) اشباع

### ۷- نتیجه گیری

در این مطالعه بعد از تشکیل بانک اطلاعات خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌آهک‌های ایران و استخراج مقاومت فشاری تک‌محوری خشک و اشباع، با استفاده از روابط تجربی مقادیر شاخص شکنندگی در دو شرایط خشک و اشباع محاسبه شد. بر پایه‌ی مطالعات صورت گرفته:

- میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری خشک و اشباع به ترتیب برابر با ۵۶/۱۳۰ و ۴۹/۲۲۰ مگاپاسکال است و بر اساس طبقه‌بندی ISRM (۲۰۰۷) در رده‌ی با مقاومت متوسط قرار می‌گیرند.
- میانگین مقاومت فشاری تک‌محوری اشباع نشان می‌دهد که با اشباع شدن نمونه‌ها، مقاومت سنگ‌آهک‌های منطقه‌ی مورد بررسی ۱۲/۳۱ درصد کاهش می‌یابند.
- میانگین BI-Dry و BI-Sat برای سنگ‌آهک‌های منطقه‌ی مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۲/۵۵ و ۲/۵۳ است و بر اساس رده‌بندی (Hoek, 1983) در رده‌ی کمی شکننده ( $BI < 10$ ) قرار می‌گیرند.
- مقایسه‌ی میانگین BI-Sat با میانگین BI-Dry نشان می‌دهد که با اشباع شدن نمونه‌ها، شاخص شکنندگی ۰/۹۸ درصد کاهش یافته است.

### سیاس‌گذاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از دانشگاه فردوسی مشهد بخاطر حمایت مالی تحت عنوان طرح پژوهشی شماره ۳/۵۶۹۴۳ قدردانی نمایند.



منابع

- Andreev, G. E., 1995. Brittle Failure of Rock Materials. Taylor & Francis.  
<https://books.google.com/books?id=8cwp1txxupwC>
- Ghobadi, M. H., Amiri, M., and 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), -. <https://doi.org/10.22084/nfag.2022.25272.1493>
- Goktan, R., and Gunes Yilmaz, N., 2005. "A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting efficiency". Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 105(10), 727-733 .
- Hoek, E., 1983. "Strength of jointed rock masses". Geotechnique, 33(3), 187-223.
- Hucka, V., and Das, B., 1974. "Brittleness determination of rocks by different methods". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 11(10), 389-392.
- ISRM., 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-200 . Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics. Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group Ankara.
- Karami, M., Rahimi Shahid, M., and Lashkaripour, G. R., 2021. "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. <https://doi.org/10.22084/nfag.2021.22903.1436>
- Lashkaripour, G. R., Rastegarnia, A., and Ghafouri, M., 2018. "Assessment of brittleness and empirical correlations between physical and mechanical parameters of the Asmari limestone in Khersan 2 dam site, in southwest of Iran". Journal of African Earth Sciences, 138, 124-132.
- Meng, F., Wong, L. N. Y., and Zhou, H., 2021. "Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review". Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 13(1), 221-247. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.06.008>
- Meng, F., Zhou, H., Zhang, C., Xu, R., and Lu, J., 2015. "Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress-strain curves". Rock Mechanics and Rock Engineering, 48, 1787-1805.
- Rahimi Shahid, M., Amiri, M., Lashkaripour, G. R., and Moradi, S., 2022. "The estimation of Hamedan limestone brittleness index using point load index and porosity test". Geopersia, 12(2), 331-352. <https://doi.org/10.22059/geope.2022.341721.648656>
- Rahimi Shahid, M., and Kargaranbafghi, F., 2021. "Determining the Rock Brittle Index (BI) using multivariate regression (a case study)". Italian journal of engineering geology and environment(2), 29-39.
- Sharifi, Z., Lashkaripour, G. R., Khanehbad, M., and Rahimi Shahid, M., 2023. "Evaluation of limestone brittleness of Esfandiar Formation (North of Tabas, Iran) using experimental relationships". The 41th National Geosciences Congress, Tehran.
- Stoecklin, J., 1968. "Structural history and tectonics of Iran: a review". AAPG bulletin, 52(7), 1229-1258.
- Tao, W., Tang, H., Wang, Y., and Ma, J., 2020. "Evaluation of methods for determining rock brittleness under compression". Journal of Natural Gas Science and Engineering, 78. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103321>
- Zhang, D., Ranjith, P., and Perera, M., 2016. "The brittleness indices used in rock mechanics and their application in shale hydraulic fracturing: A review". Journal of petroleum science and Engineering, 143, 158-170.



## Determining the brittleness index of limestones in western Iran (Zone 38) using experimental relationships

Mojtaba Rahimi Shahid<sup>1</sup>, Gholam Reza Lashkaripour<sup>\*2</sup>, Naser Hafezi Moghaddas<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. candidate in Engineering Geology, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>2</sup> Professor in Engineering Geology, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Lashkaripour@um.ac.ir

<sup>3</sup> Professor in Engineering Geology, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

### Abstract

An essential mechanical property that plays an important role in rock classification and rock blast risk assessment is rock brittleness. Brittleness controls the fracture behavior of rock during loading and unloading, such as fracability, drillability, cutability, etc. In this study, after the formation of the database of engineering geological characteristics of Iranian limestones, the uniaxial compressive strength values of zone 38 (western Iran) were extracted and analyzed. Then, dry and saturated brittleness index were determined using existing experimental relationships and dry and saturated uniaxial compressive strength. The results show that the average BI-Dry and BI-Sat for the limestones of the study area are 2.55 and 2.53, respectively, and according to the classification Hoek (1983), they are in the lowly brittleness category ( $BI < 10$ ). Also, the comparison of BI-Sat average with BI-Dry average shows that the brittleness index decreased by 0.98% when the samples were saturated.

### Keywords

Access, Database, Statistical analysis, Classification, Compressive strength.