

Research Article

## Investigating the drillability of laminated sandstone based on the brittleness index, considering the effect of orientation and spacing of lamination

Amin Jamshidi\*

Department of Geology, Faculty of Science, Lorestan University, Khorramabad, Iran

**Keywords:** Sandstone, Lamination, Brittleness index, Drillability, Anisotropy

### 1-Introduction

Brittleness is one of the critical parameters in rock engineering, which affects the drillability of the rocks in various geotechnical projects such as tunnels, caves, dams, oil and gas wells, road trenches, and building stone quarries. Therefore, investigating the drillability of the rocks before drilling operations can significantly help in planning and managing the implementation of geotechnical projects, saving time and the cost of exploration operations.

Several researchers have investigated the relationship between rotary drilling ability and different geomechanical characteristics of rocks (Selim and Bruce, 1970; Selmer-Olsen and Blindheim, 1970; Schmidt, 1972; Pathinkar and Misra, 1980; Rabia and Brook, 1980; Howarth and Rowland, 1987; Thuro and Spaun, 1996).

In previous research, the drillability mass rocks or laminated rocks were investigated. Regression equations have been developed using geomechanical characteristics such as uniaxial compressive and Brazilian tensile strengths, hardness, density modulus of elasticity and shear, ultrasonic wave velocity, and brittleness index. However, more limited research has been carried out to investigate the drillability of various rocks from the brittleness index. On the other hand, one of the essential parameters in the drillability of laminated rocks can be the orientation and spacing of laminations in them. Researchers in previous studies have not considered this issue. Therefore, in the present research, by selecting two laminated sandstone samples (with different lamination intervals), their drillability has been investigated based on the brittleness index, considering the orientation and spacing of lamination intervals.

### 2-Material and methods

In the present research, two samples of laminated sandstone were identified during several stages of field visits to the Rabat Namaki area in the north of Khorramabad (Khorramabad-Alshatar road route), Lorestan province. Cylindrical cores were prepared from rock blocks according to  $\beta$  of  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ , Using a coring machine. Here,  $\beta$  is the angle between the lamination and loading direction in uniaxial compressive strength. It is used in Brazilian tensile strength tests (Fig. 1). These tests were performed at different  $\beta$ s on the cores prepared from sandstone samples. Based on the results, the brittleness index of the samples was calculated at the corresponding  $\beta$ s. Finally, the anisotropy of uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength has been investigated. In addition, using the rock drillability classification proposed by Altindag (2010), the drillability of the samples was evaluated based on the brittleness index, considering the orientation and spacing of lamination distances.

\* Corresponding author: jamshidi.am@lu.ac.ir

DOI :<https://doi.org/10.22055/aag.2022.41896.2317>

Received: 2022-09-17

Accepted: 2022-11-23

### 3-Results and discussions

Figure 2 shows the anisotropy of the uniaxial compressive strength of the samples. An asymmetrical shoulder-type curve was obtained in the thin laminated sandstone, and the minimum uniaxial compressive strength (35.58 MPa) was obtained at  $\beta = 30^\circ$ . The maximum values of uniaxial compressive strength for this sample at  $\beta = 0^\circ$  and  $\beta = 90^\circ$  are equal to 53.44 and 63.62 MPa, respectively. At  $\beta = 60^\circ$ , the anisotropy curve shows an almost linear shape, and the value of uniaxial compressive strength at this  $\beta$  is equal to 62.63 MPa. In contrast, a U-type anisotropy curve is obtained for the uniaxial compressive strength of thick laminated sandstone. The minimum (41.76 MPa) and maximum (67.24 and 85.44 MPa) uniaxial compressive strength values in this sample were obtained at  $\beta = 30^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$  and  $\beta = 90^\circ$ , respectively.

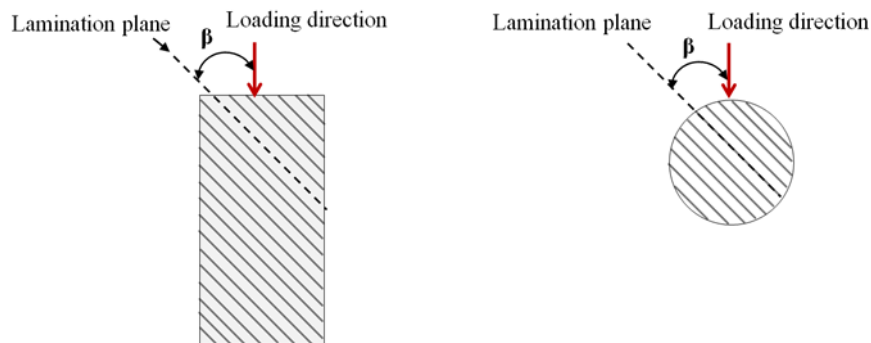


Fig. 1. Schematic diagram showing the lamination angle ( $\beta$ ) (a) uniaxial compressive strength sample and (b) Brazilian tensile strength sample.

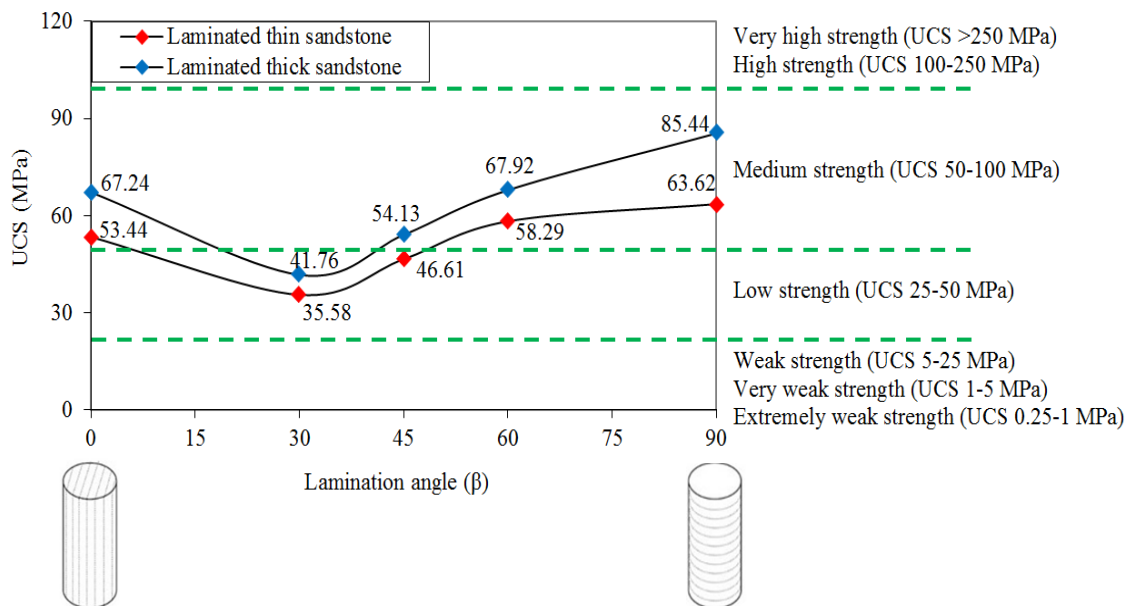


Fig. 2. Changes and classification of the samples' UCS in the various lamination angles ( $\beta$ ) (ISRM, 2007).

Figure 3 presents the change in the Brazilian tensile strength of the samples in various  $\beta$ s. The results show that increase of  $\beta$  from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ , the Brazilian tensile strength of the samples increased with an almost linear trend. In thin laminated sandstone, Brazilian tensile strength has increased from 3.51 to 6.87 MPa, and in thick laminated sandstone from 4.49 to 9.60 MPa.

According to Fig. 4, the samples are in various categories of drillability according to their  $\beta$ . As  $\beta$  increases from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ , the drillability of the samples changes from "very easy" to "easy" and "easy" to "difficult" for thin laminated sandstone and thick laminated sandstone, respectively. By comparing the drillability of the samples at a specific  $\beta$ , it is concluded that the overall drillability in thin laminated

sandstone is always one level lower than in thick laminated sandstone. For example, at  $\beta = 30^\circ$ , thin laminated thin sandstone and thick laminated thick sandstone are categorised as "very easy" and "easy" drillability, respectively. Alternatively, at  $\beta$  equal to  $60^\circ$ , they are categorised as having "easy" and "moderate" drill ability.

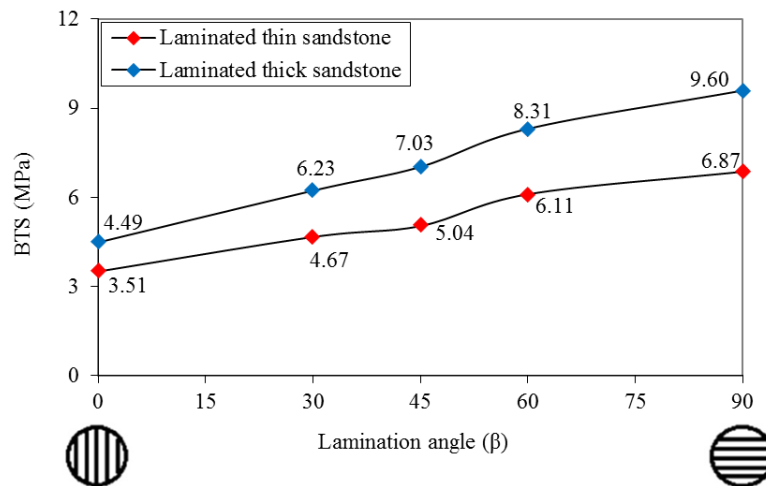


Fig. 3. Changes of the samples BTS in the various lamination angles ( $\beta$ ).

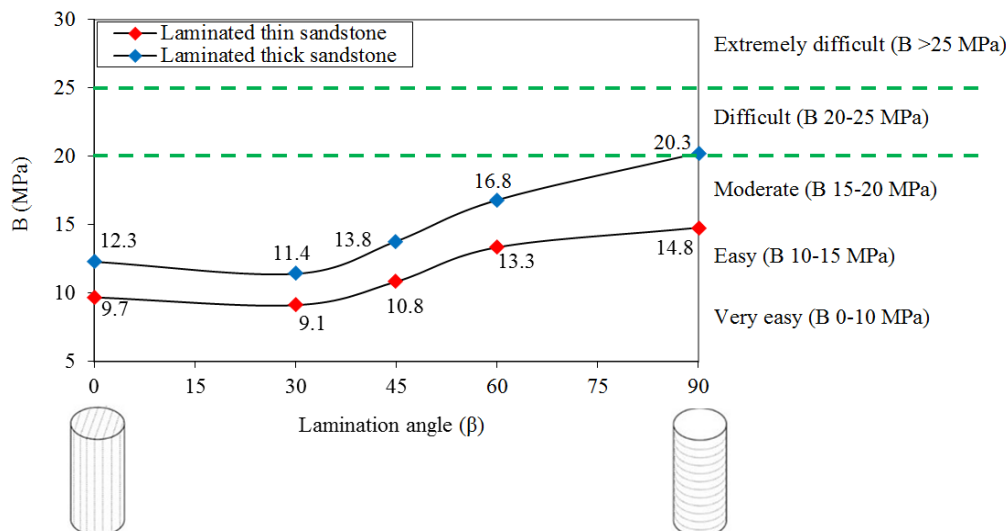


Fig. 4. Drillability classification of the studied sandstones based on their brittleness index (B) according to Altindag (2008).

#### 4- Conclusion

- The changes of uniaxial compressive strength as a function of  $\beta$  in laminated thin sandstone and laminated thick sandstone are in the form of asymmetrical shoulder and U-shaped curves, respectively. In these curves, the minimum and maximum uniaxial compressive strength were obtained at  $\beta$  equal to  $30^\circ$ , and  $0^\circ$  and  $90^\circ$ , respectively.
- With the increase of  $\beta$  from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ , the Brazilian tensile strength of the samples showed an increasing trend. Comparison of the results showed that at a certain  $\beta$ , the laminated thick sandstone always had a higher Brazilian tensile strength than that laminated thin sandstone. This issue is caused by the different lamination spacing in them, which plays an important role in the failure load of the samples, and therefore the value of Brazilian tensile strength.

- The direction and spacing of lamination played a significant role in evaluating the drillability of the samples. Generally, with the increase of  $\beta$  from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ , the drillability changed from "very easy" to "easy" and "easy" to "difficult" for laminated thin sandstone and laminated thick sandstone, respectively. On the other hand, at a certain  $\beta$ , the drillability in laminated thin sandstone is always easier than that laminated thick sandstone. Lamination panes in rocks act as weak panes that facilitate drilling in them. The results showed that the lesser spacing between the lamination planes in the sample, the easier it will be to drill.

## References

- Altindag, R., 2008. Relationships between brittleness and specific energy in excavation mechanics. Proceedings of 9th regional rock mechanics symposium. İzmir, Turkey, pp. 437–451.
- Howarth, D.F., Rowland, J.C., 1987. Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40, 711–723. <https://doi.org/10.1007/BF01019511>.
- Pathinkar, A.G., Misra, G.B., 1980. Drillability of rocks in percussive drilling from energy per unit volume as determined with a microbit. Mining Engineering 32, 1407–1410. <https://doi.org/10.1007/BF01019511>.
- Rabia, H., Brook, N., 1980. An empirical equation for drill performance prediction. Proceeding of the 21st US Symposium on Rock Mechanics, University of Missouri-Rolla. pp. 103–111.
- Schmidt, R.L., 1972. Drillability studies - percussive drilling in the field. University of Michigan Library. p. 40.
- Selim, A.A., Bruce, W.E., 1970. Prediction of penetration rate for percussive drilling. US Bureau of Mines RI 7396.
- Selmer-Olsen, R., Blindheim, O.T., 1970. On the drillability of rock by percussive drilling. Proceedings of the 2nd Congress of the Int. Society for Rock Mechanics, Belgrade, Yugoslavia.
- Thuro, K., Spaun, G., 1996. Introducing the 'destruction work' as a new rock property of toughness referring to drillability in conventional drill and blast tunnelling. Proceedings of Eurock'96. Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering. pp. 707–713.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Jamshidi, A., 2023. Investigating the drillability of laminated sandstone based on the brittleness index, considering the effect of orientation and spacing of lamination. Adv. Appl. Geol. 13(2), 439-454.

DOI : <https://doi.org/10.22055/aag.2022.41896.2317>

URL: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_18122.html](https://aag.scu.ac.ir/article_18122.html)

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

## بررسی قابلیت حفاری ماسه سنگ لامیناسیوندار بر اساس شاخص شکنندگی با نگرشی بر تأثیر جهت و فواصل لامیناسیون

امین جمشیدی

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، جمهوری اسلامی ایران  
Jamshidi.am@lu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲

### چکیده

شاخص شکنندگی یکی از پارامترهای مهم در مهندسی سنگ است که بر قابلیت حفاری سنگ‌ها در پروژه‌های مختلف ژئوتکنیکی مانند تونل‌ها، مغارها، سدها، چاه‌های نفت و گاز، ترانشه جاده‌ها و معادن سنگ ساختمانی تأثیرگذار است. بررسی قابلیت حفاری سنگ‌ها قبل از عملیات حفاری می‌تواند کمک قابل توجهی به برنامه‌ریزی و مدیریت اجرای پروژه‌های ژئوتکنیکی داشته باشد که این منجر به صرفه جویی زمان و هزینه عملیات اکتشافی خواهد شد. در این مقاله قابلیت حفاری دو نمونه ماسه سنگ لامیناسیوندار (با فواصل لامیناسیون متفاوت) بر اساس شاخص شکنندگی با در نظر گرفتن جهت و فواصل لامیناسیون بررسی شده است. به این منظور با تهیه مغزه‌های استوانه‌ای شکل، مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی نمونه‌های ماسه سنگ در زوایای لامیناسیون ( $\beta$ )  $0^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $90^\circ$  تعیین و سپس بر اساس نتایج این مقاومت‌ها، مقادیر شاخص شکنندگی در  $\beta$ های مختلف محاسبه شدند. بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌ها، جهت لامیناسیون نقش بسزایی در قابلیت حفاری دارد به طوری که در  $\beta$ های  $30^\circ$  و  $90^\circ$  به ترتیب آسان‌ترین و سخت‌ترین شرایط قابلیت حفاری حاصل شده است. همچنین نتایج حاکی از آن است که نمونه ماسه سنگ با فواصل لامیناسیون کم‌تر در مقایسه با نمونه ماسه سنگ دیگر، شرایط مناسب‌تری از لحاظ قابلیت حفاری داشته است. در پایان، یافته‌های پژوهش حاضر می‌تواند در عمل برای پروژه‌های ژئوتکنیکی که برای اجرای آن‌ها نیاز به حفاری در سنگ‌های لامیناسیوندار است، مفید و کارآمد باشد.

**واژه‌های کلیدی:** ماسه سنگ، لامیناسیون، شاخص شکنندگی، قابلیت حفاری، ناهمسانگردی

### ۱- مقدمه

ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها قبل از عملیات حفاری در برخی پروژه‌های ژئوتکنیکی مانند تونل‌ها، مغارها، سدها، چاه‌های نفت و گاز، ترانشه جاده‌ها و معادن سنگ ساختمانی اهمیت بسزایی در برآورد هزینه‌های عملیات اجرای پروژه دارد. ارزیابی دقیق قابلیت حفاری سنگ‌ها با استفاده از روش‌های غیر مستقیم می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های ساخت و در نتیجه صرفه جویی در بودجه تخصیص یافته به پروژه شود. یکی از انواع مهم روش‌های حفاری در سنگ، حفاری چرخشی است که به طور گسترده‌ای در معادن سنگ ساختمانی، ساختگاه پروژه‌های ژئوتکنیکی مانند سد و تونل، و چاه‌های نفت و گاز برای به دست آوردن اطلاعات زیرسطحی تا یک عمق معین استفاده می‌شود. تعدادی از محققین به بررسی ارتباط بین قابلیت حفاری چرخشی با ویژگی‌های ژئومکانیکی مختلف سنگ‌ها پرداخته‌اند

که از این میان می‌توان به تحقیقات Selim و Bruce (۱۹۷۰)، Blindheim و Selmer-Olsen (۱۹۷۰)، Pathinkar و Misra (۱۹۸۰)، Rabia و Brook (۱۹۷۲)، Rowland و Howarth (۱۹۸۷)، و Thuro (۱۹۸۰) و Spaun (۱۹۹۶) اشاره کرد.

Paone و همکاران (۱۹۶۹) تحقیقی در ارتباط با ارزیابی قابلیت حفاری سنگ‌ها از برخی ویژگی‌های ژئومکانیکی آن‌ها انجام دادند. این پژوهشگران نتیجه گرفتند که قابلیت حفاری ارتباط نزدیکی با مقاومت‌های فشاری تک محوری و کششی برزیلی، سختی شور و مدول الاستیسیته سنگ‌ها دارد. همچنین آن‌ها اظهار کردند که استفاده همزمان از چند ویژگی ژئومکانیکی می‌تواند ارزیابی دقیق‌تری از قابلیت حفاری بدهد. Selim و Bruce (۱۹۷۰) یک مطالعه آزمایشگاهی به منظور قابلیت حفاری سنگ‌های مختلف انجام دادند. این

مطالعه Thuro و Spaun (۱۹۹۶) نشان داد که مقاومت‌های فشاری و کششی سنگ‌ها دو ویژگی ژئومکانیکی مناسب برای ارزیابی قابلیت حفاری آن‌ها هستند. Jamshidi (۲۰۲۱) با بررسی قابلیت حفاری در تعدادی سنگ آهک به این نتیجه رسید که می‌توان با استفاده از شاخص شکنندگی یک ارزیابی دقیق از قابلیت حفاری به دست آورد.

در پژوهش‌های گذشته قابلیت حفاری روی سنگ‌های توده‌ای یا سنگ‌های لامیناسیون‌دار انجام شده و با استفاده از برخی ویژگی‌های ژئومکانیکی مانند مقاومت‌های فشاری تک محوری و کششی برزیلی، سختی، چگالی، مدول‌های الاستیسیته و برشی، سرعت امواج صوتی و شاخص شکنندگی، روابطی برای تخمین آن ارائه شده است. به هر حال، پژوهش‌های محدودتری برای بررسی قابلیت حفاری سنگ‌های مختلف از شاخص شکنندگی انجام شده است. از طرف دیگر، یکی از عوامل مهم در قابلیت حفاری سنگ‌های لامیناسیون‌دار می‌تواند جهت و فواصل لامیناسیون در آن‌ها باشد. این مساله در پژوهش‌های گذشته مورد توجه محققان قرار نگرفته است. بنابراین در پژوهش حاضر با تهیه دو نمونه ماسه سنگ لامیناسیون‌دار (با فواصل لامیناسیون متفاوت)، قابلیت حفاری آن‌ها بر اساس شاخص شکنندگی با در نظر گرفتن جهت و فواصل لامیناسیون انجام شده است.

## ۲- مواد و روش پژوهش

در پژوهش حاضر، طی چندین مرحله بازدید میدانی از منطقه رباط نمکی در شمال شهرستان خرم‌آباد (مسیر جاده خرم‌آباد-الشترا)، استان لرستان، دو نمونه ماسه سنگ لامیناسیون‌دار از رخنمون‌های منطقه شناسایی شدند. بعد از بررسی‌های میکروسکوپی نمونه‌ها و مطمئن شدن از وجود لامیناسیون و متفاوت بودن فواصل لامیناسیون در آن‌ها، تعدادی بلوک سنگی جمع‌آوری شد. در تهیه بلوک‌ها سعی شد حداقل امکان به صورت مکعبی شکل باشند تا تهیه نمونه‌های استاندارد برای آزمون‌های آزمایشگاهی مختلف از آن‌ها راحت‌تر صورت گیرد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و نقاط نمونه‌برداری از ماسه سنگ‌ها روی نقشه زمین‌شناسی نمایش داده شده‌اند.

در ادامه با تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی (در دو جهت عمود و موازی با سطوح لامیناسیون)، کانی‌های موجود شناسایی و بر اساس نتایج، نمونه‌ها نام‌گذاری شدند. همچنین از مقاطع نازک میکروسکوپی برای تعیین فواصل لامیناسیون نمونه‌ها نیز

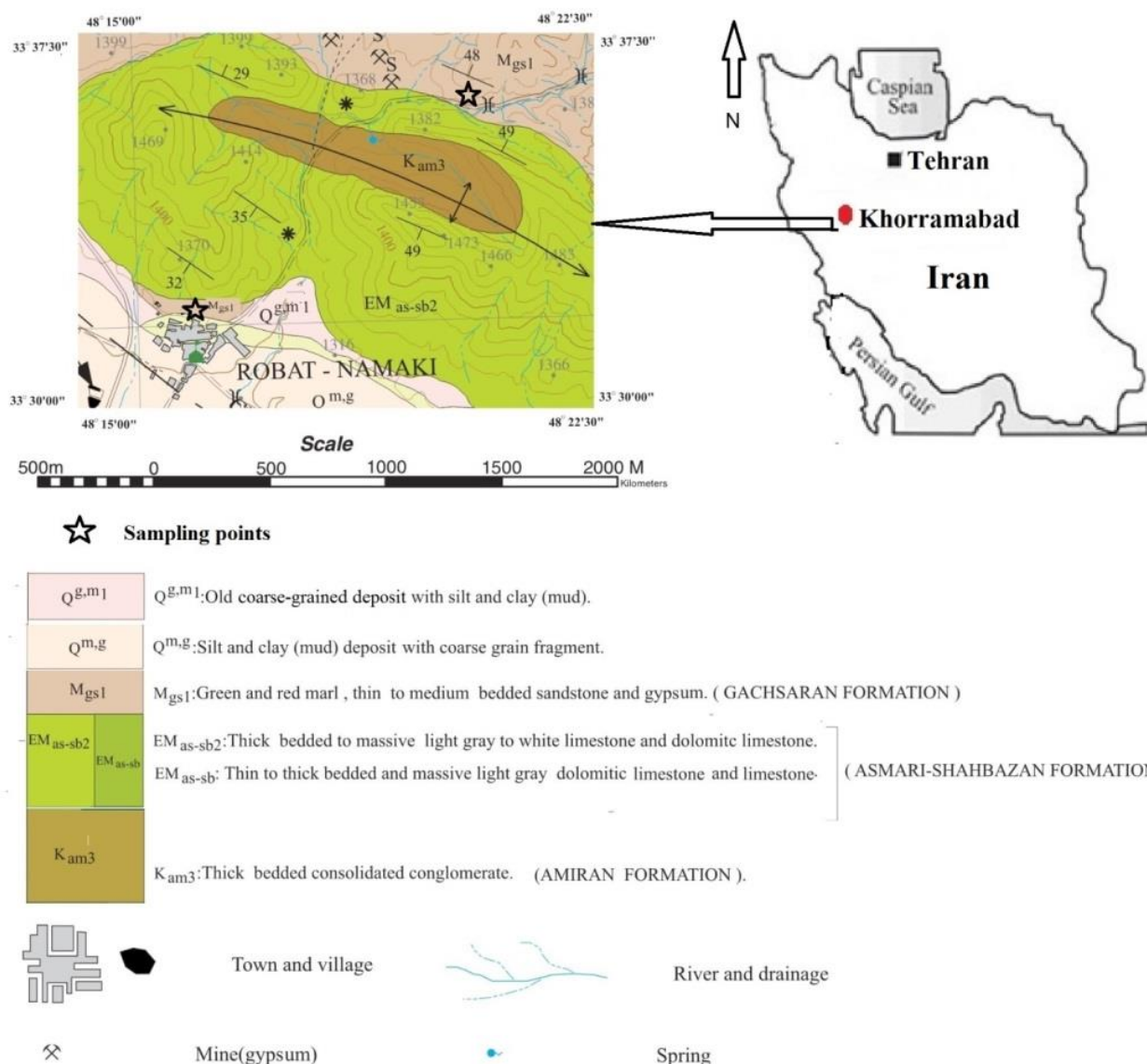
محققین روابط همبستگی بین قابلیت حفاری با مقاومت‌های فشاری تک محوری و کششی برزیلی، مدول‌های الاستیسیته و برشی، چگالی، سختی شور و درصد کوارتز توسعه دادند. نتایج نشان داد که این روابط در برآورد قابلیت حفاری سنگ‌ها مناسب و کارآمد هستند. Selmer-Olsen و Blindheim (۱۹۷۰) با انجام عملیات حفاری چرخشی صحرائی، همبستگی قابل قبولی میان قابلیت حفاری و شاخص سرعت حفاری برقرار کردند و به این نتیجه رسیدند که سختی، مقاومت، شکنندگی و سایش پذیری سنگ اهمیت بسزایی در قابلیت حفاری دارند. Schmidt (۱۹۷۲) روابطی بر اساس مقاومت‌های فشاری و کششی، مدول‌های الاستیسیته و برشی، نسبت پواسون، سختی شور، چگالی و سرعت امواج صوتی به منظور تخمین قابلیت حفاری سنگ‌ها توسعه داد. این پژوهشگر نتیجه گرفت که قابلیت حفاری صرفاً با مقاومت‌های فشاری تک محوری و کششی، و نسبت پواسون همبستگی خوبی دارد. Misra و Pathinkar (۱۹۸۰) حفاری در پنج نوع سنگ مختلف را در مقیاس آزمایشگاهی انجام دادند. قابلیت حفاری سنگ‌های مورد مطالعه از برخی ویژگی‌های ژئومکانیکی آن‌ها تخمین زده شد. نتایج این محققین آشکار کرد که مقاومت‌های فشاری و کششی، سختی‌های موس و شور به تنهایی نمی‌توانند تخمین قابل قبولی از قابلیت حفاری داشته باشند. حال آن‌که وقتی این ویژگی‌ها به طور همزمان در یک رابطه رگرسیون چند متغیره وارد می‌شوند، قابلیت حفاری می‌تواند با دقت مناسبی تخمین زده شود. Brook و Rabia (۱۹۸۰) برای تخمین قابلیت حفاری از سختی‌های شور و ضربه‌ای یک رابطه رگرسیون برقرار کردند. نتایج نشان داد همبستگی بسیار خوبی بین این متغیرها وجود دارد. Howarth و همکاران (۱۹۸۶) ارتباط بین قابلیت حفاری با برخی از ویژگی‌های ژئومکانیکی را بررسی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که قابلیت حفاری همبستگی قابل قبولی با چگالی، مقاومت فشاری تک محوری اشباع، تخلخل و سرعت موج صوتی دارد، در صورتی که با سختی اشمیت، مقاومت فشاری تک محوری خشک همبستگی ضعیفی دارد. Rowland و Howarth (۱۹۸۷) یک معیار کیفی از بافت سنگ به نام ضریب بافت معرفی کردند و رابطه آن را با قابلیت حفاری بررسی کردند. این محققین به این نتیجه رسیدند که ضریب بافت همبستگی خوبی با قابلیت حفاری دارد. آن‌ها همچنین نشان دادند که یک سنگ با ضریب بافتی بالا دارای قابلیت حفاری پایین است.



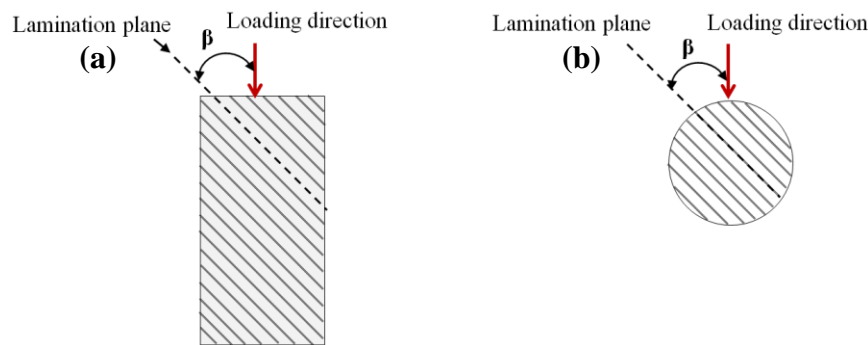
استفاده شد. حاصل از آن‌ها، شاخص شکنندگی نمونه‌ها در  $\beta$ های مختلف محاسبه شدند.

در پایان، ناهمسانگردی مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی بررسی شده است. علاوه بر این، با استفاده از طبقه‌بندی قابلیت حفاری سنگ‌ها پیشنهاد شده توسط Altindag (۲۰۰۸)، قابلیت حفاری نمونه‌ها بر اساس شاخص شکنندگی با در نظر گرفتن جهت و فواصل لامیناسیون ارزیابی شده است.

با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر، از بلوک‌های سنگی مغزه‌های استوانه‌ای شکل مطابق با استاندارد ISRM (۱۹۸۱) در  $\beta$ های  $0^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $60^\circ$  و  $90^\circ$  تهیه شدند. در اینجا  $\beta$  زاویه بین جهت لامیناسیون با جهت بارگذاری در آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی است (شکل ۲). این آزمایش‌ها در  $\beta$ های مختلف بر روی مغزه‌های تهیه شده از نمونه‌های ماسه سنگ انجام شد و بر اساس نتایج



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی مناطق نمونه‌برداری.  
 Fig. 1. Geographical location and geological map of sampling areas.



شکل ۲- طرح شماتیک نشان دهنده زاویه لامیناسیون ( $\beta$ ) (a) نمونه مقاومت فشاری تک محوری و (b) نمونه مقاومت کششی برزیلی.  
 Fig. 2. Schematic diagram showing the lamination angle ( $\beta$ ) (a) uniaxial compressive strength sample and (b) Brazilian tensile strength sample.

طول مسیر روبش بر حسب سانتی متر (SL) و تعداد سطوح لامیناسیون (LN)، فاصله لامیناسیون (LD) بر اساس رابطه زیر تعیین شد:

$$L_D = \frac{S_L}{L_N} \quad (\text{رابطه ۱})$$

بر اساس مطالعات مقاطع نازک میکروسکوپی و رابطه (۱)، برای یکی از ماسه سنگها، فاصله لامیناسیون ۲/۱ میلی متر و در نمونه ماسه سنگ دیگر ۳/۸ میلی متر اندازه گیری شدند که به ترتیب تحت عنوان ماسه سنگهای نازک لامینه و ضخیم لامینه از آنها نام برده خواهد شد (Ingram, 1954). بر اساس مطالعات کانی شناسی و آنالیز مودال، ماسه سنگ نازک لامینه از خرده سنگ (۷۷ درصد مودال)، کوارتز (۱۵ درصد مودال) و کانیهای رسی (۸ درصد مودال) که توسط سیمانهای کربناته و اکسید آهن به هم متصل شده اند، تشکیل شده است. از سوی دیگر، ماسه سنگ ضخیم لامینه ترکیب کانی شناسی مشابه با ماسه سنگ نازک لامینه دارد با این تفاوت که درصد کانیهای تشکیل دهنده آنها تا حدود کمی متفاوت هستند. بر اساس بررسی مقاطع نازک میکروسکوپی، ماسه سنگ ضخیم لامینه از ۷۸ درصد خرده سنگ، ۱۰ درصد کوارتز، و ۱۲ درصد کانی رسی با سیمانهای کربناته و اکسید آهن تشکیل شده است. نمونههای ماسه سنگ مطابق طبقه بندی Folk (۱۹۷۴) به عنوان لیتیک آرنایت نامگذاری می شوند. در شکل ۴ مقاطع نازک میکروسکوپی ماسه سنگها نشان داده شده است.

### ۳- موقعیت زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

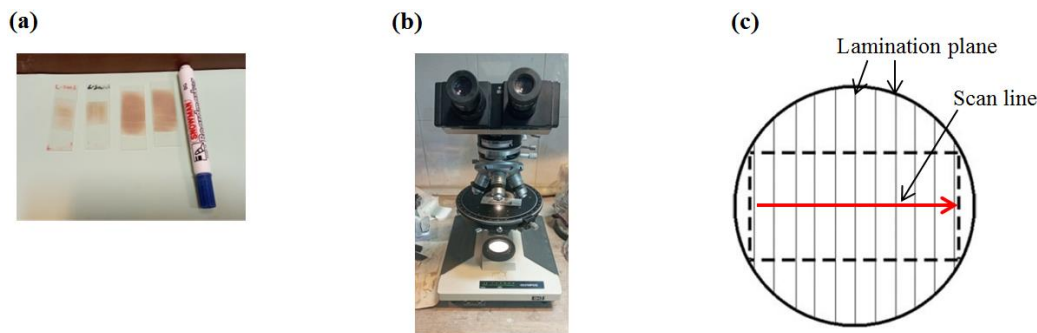
منطقه مورد مطالعه در شمال شهرستان خرم آباد با مختصات عرض شمالی ۳۰' ۳۳° تا ۳۷' ۳۳° و طول شرقی ۱۵' ۴۸° تا ۲۲' ۴۸° در بخش میانی ناحیه لرستان واقع شده است. از منظر تقسیم بندی زونهای ساختاری ایران، منطقه مورد مطالعه در زون ساختاری زاگرس مرتفع قرار گرفته است. این منطقه به نام "روستای رباط نمکی" معروف است که در ۱۵ کیلومتری مسیر جاده اصلی خرم آباد- الشتر قرار گرفته است. شکل ۱ نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد. رخنموهای سنگی منطقه عمدتاً از واحدهای سنگی کرتاسه- ترشیری است و به ترتیب از قدیم به جدید شامل کنگلومرای ضخیم لایه سازند امیران، سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی ضخیم لایه تا توده ای سازند آسماری-شهبازان و مارن، ماسه سنگ نازک تا متوسط لامینه و ژئیس سازند گچساران است. در این پژوهش، ماسه سنگهای مورد مطالعه از سازند گچساران با سن میوسن انتخاب شده اند.

### ۴- موقعیت زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

#### ۴-۱- مطالعات پتروگرافی

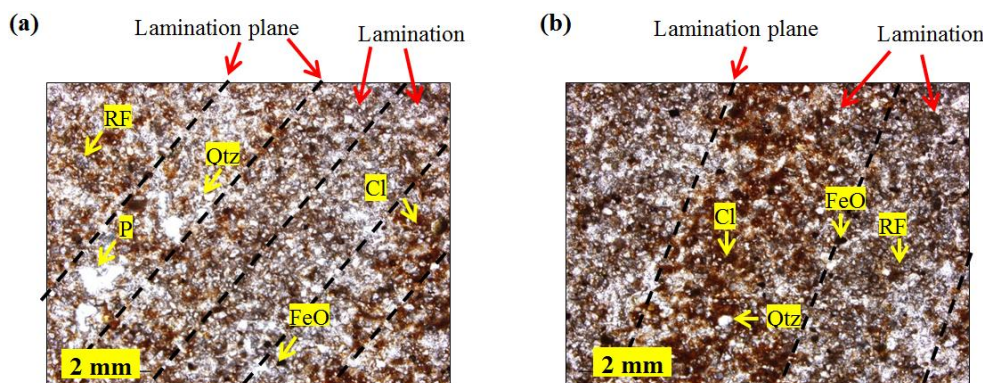
برای تعیین فواصل لامیناسیون و ترکیب کانی شناسی نمونه های ماسه سنگ، مقاطع نازک میکروسکوپی عمود بر سطوح لامیناسیون مطابق طرح شماتیک نمایش داده در شکل ۳ با استفاده از میکروسکوپ نوری پلاریزان مقاطع مورد مطالعه قرار گرفتند. به این منظور در یک مسیر روبش خطی عمود بر سطوح لامیناسیون، تعداد سطوح لامیناسیون شمارش شد. با داشتن





شکل ۳- روند تعیین فواصل سطوح لامیناسیون در نمونه‌ها (a) تهیه مقطع نازک میکروسکوپی عمود بر سطوح لامیناسیون (b) مطالعه مقطع نازک با استفاده از میکروسکوپ نوری پلاریزان و (c) طرح شماتیک خط روبش بر روی مقطع نازک میکروسکوپی.

Fig. 3. The process of determining the number of lamination planes in the samples (a) preparing the microscopic thin sections perpendicular to the lamination planes (b) studying the thin sections using an optical polarizing microscope and (c) schematic drawing of the scanning line on microscopic thin section.



شکل ۴- مقاطع نازک میکروسکوپی نمونه‌ها (a) ماسه سنگ نازک لامینه و (b) ماسه سنگ ضخیم لامینه (RF خرده سنگ، Qtz کوارتز، FeO اکسید آهن، Cl رس، P فضای خالی).

Fig. 4. Microscopic thin sections of the samples (a) laminated thin sandstone and (b) laminated thick sandstone (RF Rock Fragment, Qtz Quartz, FeO Iron Oxide, Cl Clay, P pore space).

$90^\circ$ ,  $60^\circ$  مطابق استاندارد ISRM (۱۹۸۱) تعیین شدند. به این منظور از هر زاویه  $\beta$ ، ۵ نمونه با نسبت ضخامت به قطر  $0/5$  (قطر ۵۴ میلی‌متر) تهیه و تحت بارگذاری با نرخ ۲۰۰ نیوتن بر ثانیه قرار گرفتند تا در نهایت گسیختگی در آن‌ها رخ دهد. با استفاده از رابطه (۲) مقدار مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها تعیین شد:

$$BTS = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن P بار در لحظه گسیختگی نمونه، D و t به ترتیب قطر و ضخامت نمونه و  $\pi = 3.14$  می‌باشد.

#### ۲-۴- تعیین شاخص شکنندگی

شکنندگی سنگ یکی از خواص مکانیکی سنگ می‌باشد که در عملیات حفاری‌های ژئوتکنیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است (Dai and Xia, 2013). شکنندگی تابعی از مقاومت است که نشان

#### ۲-۴- آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی

برای تعیین مقاومت فشاری تک محوری از استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ ISRM (۱۹۸۱) استفاده شده است. از هر ماسه سنگ، نمونه‌های مغزه استوانه‌ای با نسبت طول به قطر  $2/5$  (قطر ۵۴ میلی‌متر) در  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  تهیه شد. برای هر زاویه  $\beta$  تعداد ۵ نمونه برای هر نوع ماسه سنگ تهیه شد. با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری تک محوری، بارگذاری در یک نرخ ثابت  $0/5$  مگاپاسکال در ثانیه بر روی نمونه‌ها اعمال شد به طوری که در نهایت دچار گسیختگی شوند. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها در  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$

است. این شاخص از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$B = \sqrt{\frac{UCS \times BTS}{2}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این رابطه  $B$  شاخص شکنندگی،  $UCS$  و  $BTS$  به ترتیب مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزلی نمونه می‌باشند. با قرار دادن مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزلی در  $\beta$ های  $0^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $90^\circ$  در رابطه (۳)، مقادیر شاخص شکنندگی متناظر با این  $\beta$ ها محاسبه شد. نتایج این محاسبات در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

دهنده استحکام سنگ در مقابل تغییر شکل در محدوده الاستیک است. محققین روابط تجربی متفاوتی را برای اندازه‌گیری و تعیین میزان شکنندگی سنگ‌ها ارائه کرده‌اند ولی نتایج حاصل از این روش‌ها تا حدود زیادی با هم اختلاف دارند. با این حال بیشتر محققین شکنندگی را تابعی از مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزلی سنگ می‌دانند. از این رو برای ارزیابی شکنندگی سنگ‌ها، در اکثر موارد از مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزلی استفاده می‌شود.

در این پژوهش، برای تعیین شکنندگی نمونه‌ها از شاخص شکنندگی پیشنهاد شده توسط Altindag (۲۰۰۸) استفاده شده

جدول ۱- نتایج مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزلی و شاخص شکنندگی نمونه‌ها در  $\beta$ های مختلف

Table 1. Results of uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, and brittleness index of the samples at various  $\beta$

Sample name	Lamination angle ( $\beta$ )	Property		
		UCS (MPa)	BTS (MPa)	B (MPa)
Laminated thin sandstone	$0^\circ$	53.44	3.51	9.7
	$30^\circ$	35.58	4.67	9.1
	$45^\circ$	46.61	5.04	10.8
	$60^\circ$	58.29	6.11	13.3
	$90^\circ$	63.62	6.87	14.8
Laminated thick sandstone	$0^\circ$	67.24	4.49	12.3
	$30^\circ$	41.76	6.23	11.4
	$45^\circ$	54.13	7.03	13.8
	$60^\circ$	67.92	8.31	16.8
	$90^\circ$	85.44	9.60	20.3

شود. این موضوع می‌تواند باعث تحمیل هزینه‌های اضافی مالی برای بازنگری در طراحی، یا بازسازی و بهسازی پروژه در زمان بهره برداری از آن شود (Gholami and Rasouli, 2014; Xu et al., 2017, Jamshidi and Torabi-Kaveh, 2021). در این بخش از پژوهش، ناهمسانگردی مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزلی نمونه‌ها بررسی شده است. در شکل ۵ ناهمسانگردی مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها نمایش داده شده است. در ماسه سنگ نازک لامینه یک منحنی شانهای نامتقارن شکل (asymmetrical shoulder-type) حاصل شده که حداقل مقدار مقاومت فشاری تک محوری  $\beta = 30^\circ$  (در  $35/58$  مگاپاسکال) در  $\beta = 0^\circ$  مقادیر مقاومت فشاری تک محوری برای این نمونه در  $\beta = 0^\circ$

## ۵- تجزیه و تحلیل نتایج

### ۵-۱- ناهمسانگردی مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزلی نمونه‌ها

ناهمسانگردی در سنگ ویژگی است که باعث متفاوت بودن رفتار مهندسی آن در جهات مختلف می‌شود (Ajallouian and Lashkaripour, 2000; Kahnlari et al., 2014; Nikrouz et al., 2016; Jamshidi et al., 2021). این ویژگی در برخی سنگ‌های رسوبی حاوی لامیناسیون مانند ماسه سنگ و شیل، و سنگ‌های دگرگونی دارای شیسستوزیته مانند شیسست و اسلیت وجود دارد. عدم بررسی دقیق ناهمسانگردی در سنگ‌های محل ساختگاه یک پروژه ژئوتکنیکی می‌تواند منجر به خطاهای طراحی در احداث آن

ناپیوستگی باشد. به عبارت دیگر گسیختگی در یک سطح فرضی درون ماده سنگ (Intact rock) رخ می‌دهد. در این شرایط، حداقل تنش فشاری برای وقوع گسیختگی در مغزه سنگ از رابطه زیر حاصل خواهد شد (Jaeger and Cook, 1979):  
(رابطه ۵)

$$\sigma_{1f} = 2c_i \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_i}{2}\right)$$

که در آن  $c_i$  و  $\phi_i$  به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ماده سنگ هستند.

مقدار  $\sigma_{1f}$  مورد نیاز برای وقوع گسیختگی در مغزه سنگ (سطح لامیناسیون یا ماده سنگ) برابر با یکی از مقادیر کمتر به دست آمده از رابطه (۴) یا (۵) است. اگر در یک زاویه لامیناسیون مشخص ( $\beta$ )، مقدار  $\sigma_{1f}$  حاصل از رابطه (۴) کمتر از مقدار حاصل از رابطه (۵) باشد، گسیختگی در امتداد سطح لامیناسیون رخ خواهد داد. برعکس، اگر مقدار  $\sigma_{1f}$  حاصل از رابطه (۴) بیشتر از مقدار حاصل از رابطه (۵) باشد، گسیختگی در ماده سنگ اتفاق خواهد افتاد.

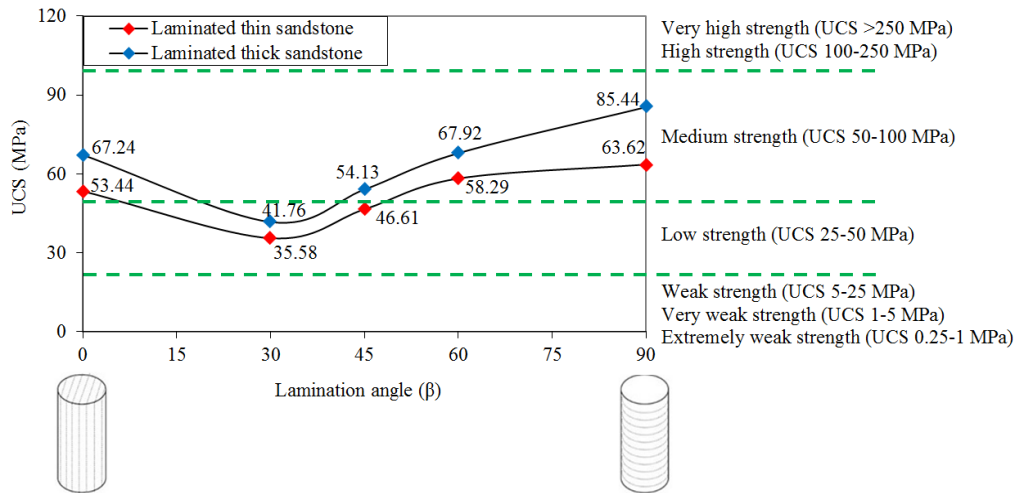
مقادیر  $\sigma_{1f}$  لازم برای وقوع گسیختگی در مغزه سنگی به صورت منحنی در شکل ۶ نمایش داده شده‌اند. قسمت‌های مقعر منحنی متناظر با مقادیر بدست آمده  $\sigma_{1f}$  از رابطه (۴) می‌باشد و نشان دهنده وقوع گسیختگی در امتداد سطح لامیناسیون است. قسمت‌های افقی منحنی از رابطه (۵) حاصل شده‌اند و نشان دهنده وقوع گسیختگی در ماده سنگ هستند (Jaeger and Cook, 1979).

بر اساس شکل (۵) یک منحنی شانه‌ای نامتقارن برای مقاومت فشاری تک محوری نمونه ماسه سنگ نازک لامینه به دست آمده است. با مقایسه این منحنی با منحنی حاصل از روابط (۴) و (۵) ارائه شده در شکل ۶، می‌توان به این نتیجه رسید که در  $\beta$ های بین  $0^\circ$  تا  $60^\circ$  (قسمت‌های مقعر منحنی شکل ۵) گسیختگی در سطح لامیناسیون و در  $\beta$ های بزرگ‌تر از  $60^\circ$  (قسمت‌های تقریباً افقی منحنی شکل ۵) گسیختگی در ماده سنگ نمونه ماسه سنگ نازک لامینه رخ داده است. از سوی دیگر، با توجه به منحنی U شکل برای ماسه سنگ ضخیم لامینه و مقایسه آن با منحنی ارائه شده توسط Jaeger و Cook (۱۹۷۹) می‌توان گفت که در تمامی  $\beta$ ها گسیختگی در سطح لامیناسیون نمونه رخ داده است.

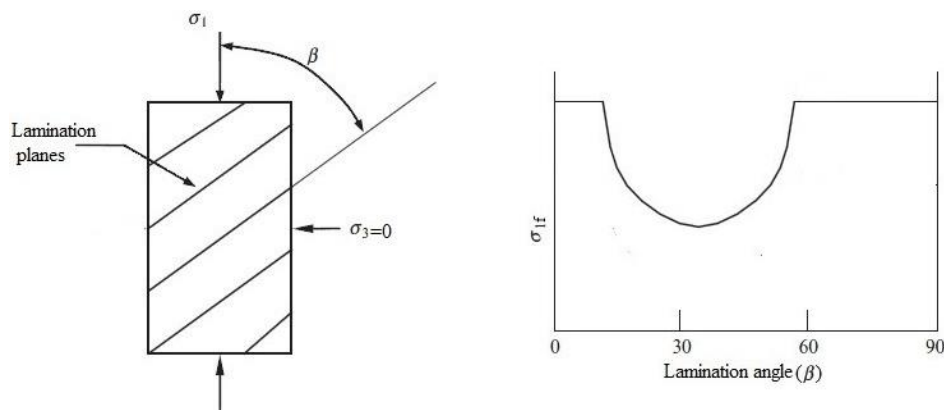
و  $\beta = 90^\circ$  به ترتیب برابر با  $53/44$  و  $63/62$  مگاپاسکال حاصل شده است. در  $\beta = 60^\circ$  منحنی ناهمسانگردی تقریباً شکل خطی از خود نشان می‌دهد که مقدار مقاومت فشاری تک محوری در این  $\beta$  برابر با  $58/29$  مگاپاسکال است. در مقابل، یک نمودار ناهمسانگردی U شکل (U-type) برای مقاومت فشاری تک محوری ماسه سنگ ضخیم لامینه به دست آمده است. مقادیر حداقل ( $41/76$  مگاپاسکال) و حداکثر ( $67/24$  و  $85/44$  مگاپاسکال) مقاومت فشاری تک محوری در این نمونه به ترتیب در  $\beta = 30^\circ$ ،  $\beta = 0^\circ$  و  $\beta = 90^\circ$  حاصل شده است. نوع منحنی و مقادیر حداقل و حداکثر مقاومت فشاری تک محوری که در پژوهش حاضر برای ماسه سنگ نازک لامینه بدست آمده‌اند، منطبق بر یافته‌های پژوهش‌های Zhang و همکاران (۲۰۰۹) و Khanlari و همکاران (۲۰۱۵) روی ماسه سنگ‌ها هستند. به هر حال، نوع منحنی ناهمسانگردی ماسه سنگ ضخیم لامینه متفاوت از ماسه سنگ نازک لامینه مطالعه شده در پژوهش حاضر و ماسه سنگ‌های لامیناسیون‌دار در پژوهش‌های Zhang و همکاران (۲۰۰۹) و Khanlari و همکاران (۲۰۱۵) است. دلیل متفاوت بودن نوع منحنی ناهمسانگردی بر اساس مدل ناهمسانگردی مقاومت ارائه شده توسط Jaeger و Cook (۱۹۷۹) قابل توضیح است. در شکل ۶ یک نمونه مغزه سنگ استوانه‌ای که در معرض تنش فشاری محوری ( $\sigma_1$ ) قرار گرفته، نمایش داده شده است. نمونه دارای سطوح لامیناسیون خوب توسعه یافته است که در زاویه  $\beta$  نسبت به  $\sigma_1$  جهت دارند. مطابق با مدل Jaeger و Cook (۱۹۷۹)،  $\sigma_{1f}$  مورد نیاز برای وقوع گسیختگی در امتداد سطح لامیناسیون از رابط زیر تعیین می‌شود:

$$\sigma_{1f} = \frac{2c_j}{\sin 2\beta (1 - \tan \phi_j \cot \beta)} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در این رابطه  $\sigma_{1f}$  حداقل تنش فشاری مورد نیاز برای وقوع گسیختگی در امتداد سطح لامیناسیون،  $c_j$  و  $\phi_j$  به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سطح لامیناسیون هستند. با توجه به اینکه  $\sigma_{1f}$  در شرایط آزمایش فشاری تک محوری (یعنی  $\sigma_3 = 0$ ) است، بنابراین مقدار آن برابر با UCS است. رابطه (۴) برای شرایطی است که گسیختگی در امتداد سطح لامیناسیون رخ دهد. در مقابل، ممکن است گسیختگی در قسمتی از مغزه سنگ استوانه‌ای رخ دهد که فاقد سطح



شکل ۵- تغییرات و طبقه‌بندی مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها در زوایای لامیناسیون مختلف (β) (ISRM, 2007).  
 Fig. 5. Changes and classification of the samples' UCS in the various lamination angles (β) (ISRM, 2007).



شکل ۶- تغییرات تنش فشاری محوری مورد نیاز برای وقوع گسیختگی در یک نمونه سنگ لامیناسیون دار به عنوان تابعی از زاویه لامیناسیون (β) [با تغییراتی از Jaeger و Cook (۱۹۷۹)].

Fig. 6. Variation of the axial compression stress ( $\sigma_1$ ) needed to cause failure a laminated rock sample as a function of the lamination angle ( $\beta$ ) [modified after Jaeger and Cook (1979)].

هنگامی که سنگ بکر دارای لامیناسیون باشد در جهات مختلف لامیناسیون مقادیر مقاومت فشاری تک محوری متفاوتی خواهد داشت. این که مقاومت فشاری تک محوری در چه  $\beta$  ای تعیین و به عنوان یک پارامتر در توصیف مقاومت سنگ‌های موجود در ساختگاه پروژه ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار گیرند، بسیار حائز اهمیت است. همان‌طور که نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها در  $\beta$  های مختلف با همدیگر متفاوت است. به منظور توصیف کمی-کیفی مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها در  $\beta$  های مختلف، از طبقه‌بندی پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM, 2007)

در اکثر پروژه‌های ژئوتکنیکی، برای توصیف کمی-کیفی مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌های بکر (Intact rock) محل ساختگاه از طبقه‌بندی‌های رایج که توسط افراد یا مؤسسات مختلف ارائه شده‌اند، استفاده می‌شود. طبقه‌بندی سنگ بکر بر مبنای مقاومت فشاری تک محوری دارای کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی ساختگاه برای اجرای پروژه‌های ژئوتکنیکی مانند سد، تونل و راه دارد. برای مثال در طبقه‌بندی‌های ژئومکانیکی توده سنگ (RMR) و کیفیت تونل سازی (Q)، مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر به عنوان یکی از پارامترهای ورودی آن در نظر گرفته می‌شود. به هر حال،

با استفاده از مقادیر حداکثر و حداقل مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها و قرار دادن آن‌ها در رابطه (۶)، نسبت ناهمسانگردی برای ماسه سنگ نازک لامینه و ماسه سنگ ضخیم لامینه به ترتیب برابر ۱/۷۹ و ۲/۰۵ خواهند بود. طبقه بندی ناهمسانگردی سنگ‌ها بر اساس مقاومت فشاری تک محوری ارائه شده توسط Ramamurthy (۱۹۹۳) در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به نسبت ناهمسانگردی نمونه‌ها، ماسه سنگ نازک لامینه در رده سنگ‌های با ناهمسانگردی پایین و در مقابل، ماسه سنگ ضخیم لامینه در گروه سنگ‌های با ناهمسانگردی متوسط قرار گرفته است. هر چه مقدار نسبت ناهمسانگردی بیشتر باشد نشان دهنده رفتار مهندسی متفاوت تر نمونه سنگ در جهات مختلف لامیناسیون است. با توجه به نسبت‌های ناهمسانگردی بدست آمده از نمونه‌های مورد مطالعه، ماسه سنگ ضخیم لامینه (نسبت ناهمسانگردی ۲/۰۵) نسبت به ماسه سنگ نازک لامینه (نسبت ناهمسانگردی ۱/۷۹) دارای رفتار مهندسی متفاوتی در جهات مختلف لامیناسیون می‌باشد. پژوهشگرانی مانند Zhang و همکاران (۲۰۰۹) و Khanlari و همکاران (۲۰۱۵) با مطالعه رفتار مهندسی نمونه‌های ماسه سنگ به نسبت‌های ناهمسانگردی به ترتیب برابر با ۱/۵۰ و ۱/۵۱ دست یافتند که این مقادیر کم‌تر از مقادیر حاصل از نمونه‌های پژوهش حاضر هستند (شکل ۷).

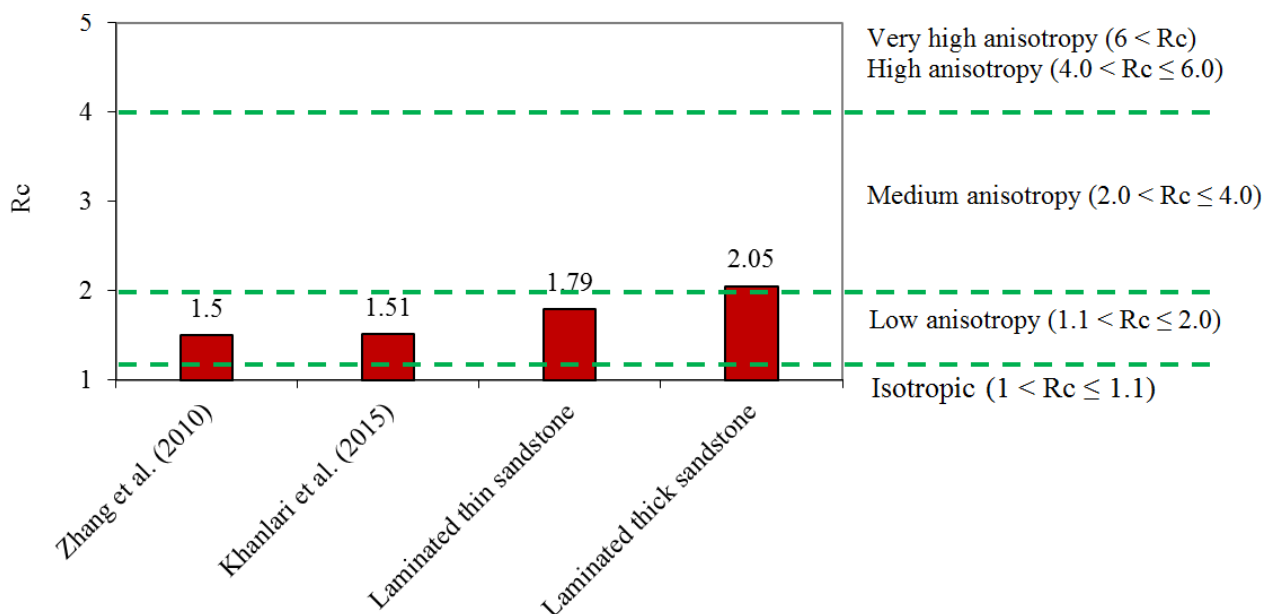
استفاده شده است. مطابق شکل ۵، نمونه‌ها در  $\beta$ های مختلف در رده‌های مختلفی بر اساس مقاومت فشاری تک محوری شان قرار گرفته‌اند. در ماسه سنگ نازک لامینه در  $45^\circ$  و  $30^\circ = \beta$  و ماسه سنگ ضخیم لامینه در  $30^\circ = \beta$  در رده سنگ‌های با مقاومت پایین (مقاومت فشاری تک محوری بین ۲۵ تا ۵۰ مگاپاسکال) قرار گرفته‌اند در صورتی که هر دوی این نمونه‌ها در سایر  $\beta$ ها متعلق به رده سنگ‌های با مقاومت متوسط (مقاومت فشاری تک محوری بین ۵۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال) هستند.

برای نشان دادن شدت ناهمسانگردی سنگ‌های لامیناسیون دار می‌توان از پارامتری به نام نسبت ناهمسانگردی ( $R_c$ ) استفاده کرد. این پارامتر توسط Ramamurthy (۱۹۹۳) معرفی شد و طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_c = \frac{UCS_{max}}{UCS_{min}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در این رابطه  $UCS_{max}$  و  $UCS_{min}$  به ترتیب حداکثر و حداقل مقاومت فشاری تک محوری نمونه در  $\beta$ های مختلف هستند.

با توجه به نتایج مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها در  $\beta$ های مختلف (جدول ۱)، مقادیر حداکثر و حداقل این پارامتر به ترتیب در  $\beta$ های برابر با  $90^\circ$  و  $30^\circ$  درجه حاصل شده است.



شکل ۷- مقادیر و طبقه‌بندی ناهمسانگردی مقاومت فشاری تک محوری ماسه‌سنگ‌های مورد مطالعه مطابق با پیشنهاد Ramamurthy (۱۹۹۳).

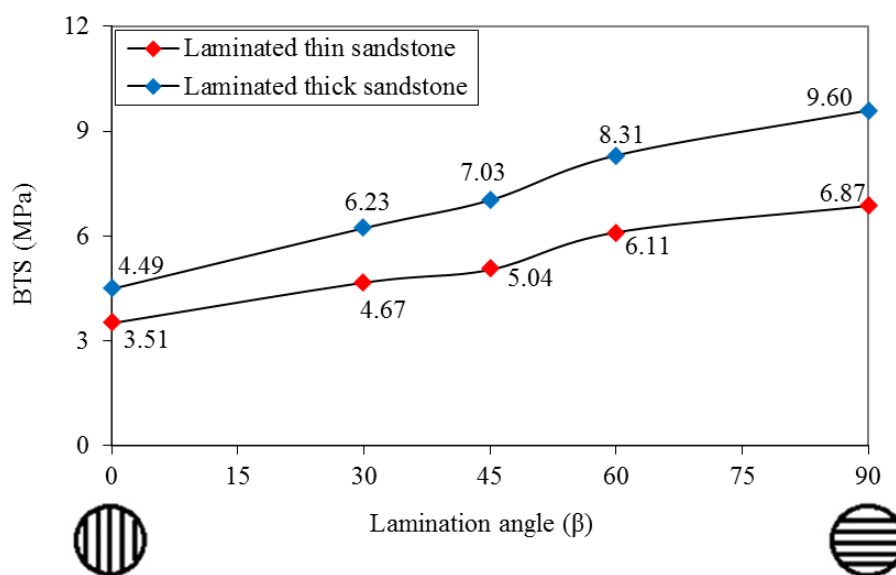
Fig. 7. Values and classification of UCS anisotropy of the studied sandstones according to Ramamurthy (1993).

بارگذاری خطی و در دومی به صورت بارگذاری صفحه‌ای است (Tavallali and Vervoort, 2010; Zhang et al., 2009; ) (Ali et al., 2014).

نکته‌ای که از نتایج مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلی نمونه‌ها می‌توان به آن اشاره کرد، مقادیر کم این ویژگی-ها در ماسه سنگ نازک لامینه در مقایسه با ماسه سنگ ضخیم لامینه است (شکل‌های ۵ و ۸). یکی از عوامل مهم و بسیار تأثیر گذار بر مقاومت یک نمونه سنگ، حضور سطوح لامیناسیون و بویژه فواصل بین آن‌هاست. نتایج مطالعات مقاطع نازک میکروسکوپی نشان داد که برای ماسه سنگ نازک لامینه و ماسه سنگ ضخیم لامینه فواصل لامیناسیون به ترتیب برابر با ۲/۱ و ۳/۸ میلی‌متر می‌باشند. سطوح لامیناسیون به دلیل ایجاد ناپوستگی بین مصالح تشکیل دهنده نمونه سنگ به عنوان سطوح ضعف عمل می‌کنند به طوری که با اعمال فرآیند بارگذاری، احتمال وقوع گسیختگی در تنش‌های کم‌تر افزایش خواهد یافت. از اینرو، با توجه به کم‌تر بودن فواصل لامیناسیون در ماسه سنگ نازک لامینه، تعداد سطوح لامیناسیون آن در مقایسه با ماسه سنگ ضخیم لامینه بیشتر خواهد بود. این موضوع باعث خواهد شد که ماسه سنگ نازک لامینه در تنش-های فشاری کمتری دچار گسیختگی شود و بنابراین مقاومت فشاری تک محوری و کششی برزیلی کم‌تری در مقایسه با ماسه سنگ ضخیم لامینه از خود نشان دهد.

در شکل ۸ تغییرات مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها در  $\beta$ های مختلف نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش  $\beta$  از  $0^\circ$  به  $90^\circ$ ، مقدار مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها با یک روند تقریباً خطی افزایش پیدا کرده است. در ماسه سنگ نازک لامینه مقاومت کششی برزیلی از ۳/۵۱ به ۶/۸۷ مگاپاسکال و در ماسه سنگ ضخیم لامینه از ۴/۴۹ به ۹/۶۰ مگاپاسکال افزایش پیدا کرده است. این نتایج در تطابق با یافته‌های Chen و همکاران (۱۹۹۸) و Khanlari و همکاران (۲۰۱۵) هستند. این پژوهشگران با بررسی رفتار ناهمسانگردی مقاومت کششی برزیلی ماسه سنگ‌های لامیناسیون‌دار به این نتیجه رسیدند که مقدار این ویژگی ژئومکانیکی با افزایش  $\beta$  افزایش پیدا کرده است.

شبهات و تفاوتی که در رفتار ناهمسانگردی مقاومت کششی برزیلی با مقاومت فشاری تک محوری وجود دارد در مقدار  $\beta$ هایی است که در آن‌ها مقادیر حداکثر و حداقل این ویژگی-های ژئومکانیکی حاصل شده‌اند. با مقایسه شکل‌های ۵ و ۸ می‌توان مشاهده کرد که مقادیر حداکثر مقاومت کششی برزیلی و مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها در  $\beta$  برابر با  $90^\circ$  حاصل شده است. در مقابل مقادیر حداقل مقاومت کششی برزیلی و مقاومت فشاری تک محوری به ترتیب در  $\beta$ های معادل با  $0^\circ$  و  $30^\circ$  رخ داده است. این موضوع را می‌توان به دلیل متفاوت بودن سیستم بارگذاری در آزمایش‌های مقاومت کششی برزیلی و مقاومت فشاری تک محوری نسبت داد که در اولی به صورت



شکل ۸- تغییرات مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها در زوایای لامیناسیون مختلف ( $\beta$ ).  
Fig. 8. Changes of the samples' BTS in the various lamination angles ( $\beta$ ).



## ۵-۲- توصیف شکنندگی و قابلیت حفاری نمونه‌ها بر

### اساس شاخص شکنندگی

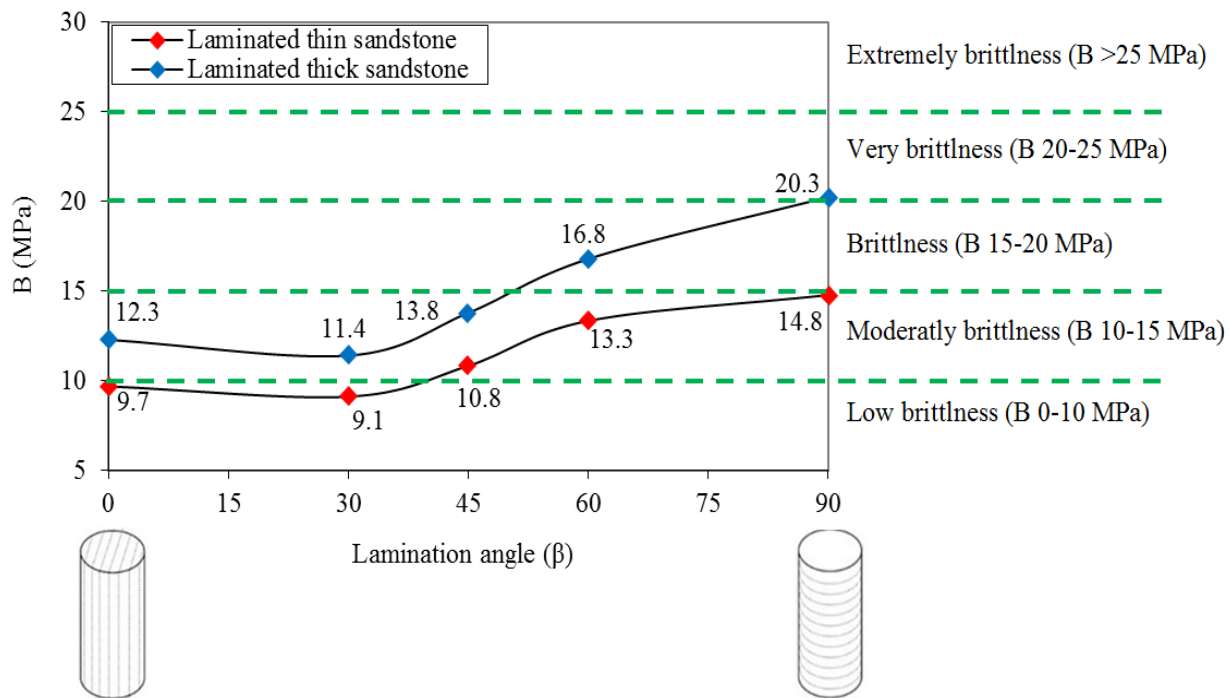
در شکل ۹ شاخص شکنندگی نمونه‌ها به عنوان تابعی از  $\beta$  نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود شاخص شکنندگی نمونه‌ها در  $\beta$ های مختلف، مقادیر متفاوتی از خود نشان داده است. مقادیر حداکثر و حداقل شاخص شکنندگی به ترتیب در  $\beta$ های برابر با  $90^\circ$  و  $30^\circ$  حاصل شده است. به هر حال مشاهده می‌شود که در یک  $\beta$  معین، ماسه سنگ ضخیم لامینه در مقایسه با ماسه سنگ نازک لامینه مقدار شاخص شکنندگی بزرگ‌تری دارد. مطابق با رابطه (۳)، شاخص شکنندگی تابعی از مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی است. از آنجایی که ماسه سنگ ضخیم لامینه نسبت به ماسه سنگ نازک لامینه، مقادیر مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی بزرگ‌تری دارد (به ترتیب شکل‌های ۵ و ۸ مشاهده شوند) بنابراین مقادیر شکنندگی بزرگ‌تری دارد.

Altindag (۲۰۰۸) بر اساس شاخص شکنندگی یک طبقه‌بندی توصیفی برای شکنندگی سنگ‌ها ارائه داد. در این طبقه‌بندی که به صورت خطوط منقطع در شکل ۹ نشان داده شده است، سنگ‌ها به ۵ رده شامل "شکنندگی کم"، "شکنندگی متوسط"، "شکننده"، "شکنندگی زیاد" و "شکنندگی خیلی زیاد" تقسیم می‌شوند. مطابق شکل ۹، ماسه سنگ نازک لامینه در  $\beta$ های  $0^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $90^\circ$  به ترتیب در رده سنگ‌های با "شکنندگی کم"، "شکنندگی کم"، "شکنندگی متوسط"، "شکنندگی متوسط" و "شکنندگی متوسط" قرار گرفته است. برای همین  $\beta$ ها، ماسه سنگ ضخیم لامینه به ترتیب متعلق به رده سنگ‌های با "شکنندگی متوسط"، "شکنندگی متوسط"، "شکنندگی متوسط"، "شکننده" و "شکنندگی زیاد" است. نتایج توصیفی شکنندگی نمونه‌ها نشان می‌دهد که صرفاً در  $\beta$  معادل با  $45^\circ$ ، دو نمونه ماسه‌سنگ در یک رده شکنندگی مشابه با هم قرار گرفته‌اند در صورتی که در سایر  $\beta$ ها، ماسه سنگ ضخیم لامینه همواره در رده شکنندگی بالاتری نسبت به ماسه سنگ نازک لامینه قرار گرفته است. برای مثال در  $\beta = 45^\circ$ ، هر دو نمونه متعلق به رده سنگ‌های با "شکنندگی متوسط" هستند، حال آنکه در  $\beta =$

$90^\circ$ ، ماسه سنگ نازک لامینه و ماسه سنگ ضخیم لامینه به ترتیب در رده سنگ‌های با "شکنندگی متوسط" و "شکنندگی زیاد" قرار گرفته‌اند.

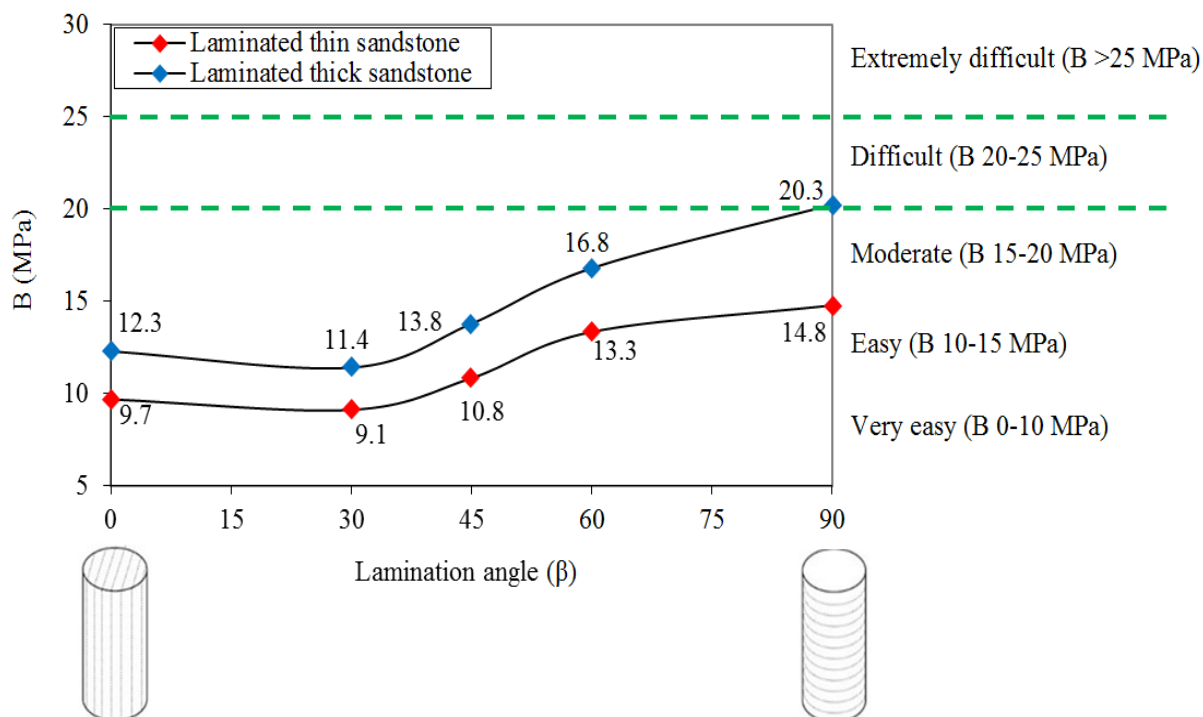
در شکل ۱۰ طبقه‌بندی توصیفی قابلیت حفاری سنگ‌ها بر اساس شاخص شکنندگی ارائه شده است (Altindag, 2008). در این طبقه‌بندی با افزایش شاخص شکنندگی سنگ‌ها، قابلیت حفاری در آن‌ها سخت‌تر می‌شود. این موضوع به دلیل این است که شاخص شکنندگی سنگ‌ها تابعی از مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی است، و با افزایش این مقاومت‌ها قابلیت حفاری سخت‌تر می‌شود (Paone et al., 1969; Howarth et al., 1986; Thuro and Spaun, 1996). بنابراین همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، قابلیت حفاری یک رابطه مستقیم با شاخص شکنندگی خواهد داشت.

مطابق با شکل ۱۰، نمونه‌ها با توجه به  $\beta$  در رده‌های مختلف قابلیت حفاری قرار گرفته‌اند. با افزایش  $\beta$  از  $0^\circ$  به  $90^\circ$ ، قابلیت حفاری نمونه‌ها از شرایط "خیلی آسان" به "آسان" و "آسان" به "سخت" به ترتیب برای ماسه سنگ نازک لامینه و ماسه سنگ ضخیم لامینه تغییر پیدا می‌کند. با مقایسه قابلیت حفاری نمونه‌ها در یک  $\beta$  معین، می‌توان نتیجه گرفت که به طوری کلی قابلیت حفاری در ماسه سنگ نازک لامینه همواره یک رده پایین‌تر از ماسه سنگ ضخیم لامینه است. برای مثال در  $\beta = 30^\circ$ ، ماسه سنگ نازک لامینه و ماسه سنگ ضخیم لامینه به ترتیب در رده سنگ‌ها با قابلیت حفاری "خیلی آسان" و "آسان" قرار گرفته‌اند یا در  $\beta$  معادل با  $60^\circ$  به ترتیب متعلق به سنگ‌های با قابلیت حفاری "آسان" و "متوسط" هستند. شرایط مناسب‌تر قابلیت حفاری در ماسه سنگ نازک لامینه را می‌توان به کم‌تر بودن فواصل سطوح لامیناسیون آن در مقایسه با ماسه سنگ ضخیم لامینه نسبت داد. کم‌تر بودن فواصل لامیناسیون به معنای بیشتر بودن تعداد سطوح لامیناسیون است. سطوح لامیناسیون به عنوان سطوح ضعف عمل می‌کنند که باعث ایجاد عدم یکپارچگی و پیوستگی در ماده سنگ می‌شوند، که این به نوبه خود می‌تواند قابلیت حفاری در سنگ را تسهیل‌تر کند.



شکل ۹- تغییرات و توصیف شاخص شکنندگی نمونه‌ها (B) در زوایای لامیناسیون مختلف ( $\beta$ ) بر اساس طبقه‌بندی Altindag (۲۰۰۸).

Fig. 9. Changes and brittleness description (B) of the samples in the various lamination angles ( $\beta$ ) according to Altindag (2008).



شکل ۱۰- طبقه‌بندی قابلیت حفاری ماسه سنگ‌های مورد مطالعه بر اساس شاخص شکنندگی آن‌ها (B) مطابق با پیشنهاد Altindag (۲۰۰۸).

Fig. 10. Drillability classification of the studied sandstones based on their brittleness index (B) according to Altindag (2008).

## ۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر دو نمونه ماسه سنگ لامیناسیون دار از شمال شهرستان خرم آباد، استان لرستان، جمع آوری شد. مغزه‌های استوانه‌ای در  $\beta$ های معادل با  $0^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $45^\circ$  و  $60^\circ$  و  $90^\circ$  تهیه و بر روی آن‌ها آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی انجام شد. بر اساس داده‌های این آزمایش‌ها، شاخص شکنندگی نمونه‌ها در  $\beta$ های مختلف محاسبه شد. با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا ناهمسانگردی مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها بررسی شد. سپس بر اساس شاخص شکنندگی، قابلیت حفاری نمونه‌ها با در نظر گرفتن جهت و فواصل لامیناسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش حاضر به طور خلاصه در ادامه ارائه شده‌اند:

- تغییرات مقاومت فشاری تک محوری به عنوان تابعی از  $\beta$  در ماسه سنگ نازک لامینه و ماسه سنگ ضخیم لامینه به ترتیب به صورت منحنی‌های شانه‌ای نامتقارن و U شکل می‌باشند. در این منحنی‌ها حداقل و حداکثر مقاومت فشاری تک محوری به ترتیب در  $\beta$ های معادل با  $30^\circ$  و  $0^\circ$  و  $90^\circ$  حاصل شدند.

- بر اساس نوع منحنی ناهمسانگردی مقاومت فشاری تک محوری، در ماسه سنگ نازک لامینه از  $\beta$ های  $0^\circ$  تا  $60^\circ$  گسیختگی در سطح لامیناسیون و در  $\beta$ های بزرگ‌تر از  $60^\circ$  گسیختگی در ماده سنگ رخ داده است. در مقابل، برای ماسه

سنگ ضخیم لامینه در تمامی  $\beta$ ها گسیختگی در سطوح لامیناسیون اتفاق افتاده است.

- با افزایش  $\beta$  از  $0^\circ$  به  $90^\circ$ ، مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها یک روند افزایشی را نشان داد. مقایسه نتایج نشان داد که در یک  $\beta$  معین، ماسه سنگ ضخیم لامینه همواره مقدار مقاومت کششی برزیلی بزرگ‌تری نسبت به ماسه سنگ نازک لامینه داشته است. این موضوع ناشی از متفاوت بودن فواصل لامیناسیون در آن‌هاست که نقش مهمی در بار گسیختگی نمونه‌ها و بنابراین مقدار مقاومت کششی برزیلی دارد.

- ناهمسانگردی شاخص شکنندگی نمونه‌ها یک منحنی شانه‌ای نامتقارن را نشان داد که مقادیر حداکثر و حداقل آن به ترتیب در  $\beta$ های برابر با  $90^\circ$  و  $30^\circ$  حاصل شد.

- جهت یافتگی و فواصل لامیناسیون نقش بسزایی در ارزیابی قابلیت حفاری نمونه‌ها بر اساس شاخص شکنندگی داشتند. به طور کلی با افزایش  $\beta$  از  $0^\circ$  به  $90^\circ$ ، قابلیت حفاری "خیلی آسان" به "آسان" و "آسان" به "سخت" به ترتیب برای ماسه سنگ نازک لامینه و ماسه سنگ ضخیم لامینه تغییر پیدا کرد. از طرف دیگر در یک  $\beta$  معین، قابلیت حفاری در ماسه سنگ نازک لامینه همواره آسان‌تر از ماسه سنگ ضخیم لامینه است. سطوح لامیناسیون در سنگ‌ها به عنوان سطوح ضعف عمل می‌کنند که باعث تسهیل حفاری در آن‌ها می‌شود. نتایج نشان داد هر چه فاصله سطوح لامیناسیون در نمونه کم‌تر باشد، قابلیت حفاری آن آسان‌تر خواهد بود.

## مراجع

- Ajalloeian, R., Lashkaripour, G.R., 2000. Strength anisotropies in mudrocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 59, 195–199. <https://doi.org/10.1007/s10064000005>.
- Ali, E., Guang, W., Zhiming, Z., Weixue, J., 2014. Assessments of strength anisotropy and deformation behavior of banded amphibolite rocks. *Geotechnical and Geological Engineering* 32, 429–438. <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9724-5>.
- Altindag, R., 2008. Relationships between brittleness and specific energy in excavation mechanics. *Proceedings of 9th regional rock mechanics symposium*. İzmir, Turkey, pp. 437–451.
- Chen, C.S., Pan, E., Amadei, B., 1998. Determination strength of anisotropic Brazilian tests of deformability and tensile rock using Brazilian tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 35(1), 43–61. [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(97\)00329-X](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(97)00329-X).
- Dai, F., Xia, K., 2013. Laboratory measurements of the rate dependence of the fracture toughness anisotropy of barre granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 60, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.035>.
- Folk, R.L., 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill, Austin.
- Gholami, R., Rasouli, V., 2014. Mechanical and elastic properties of transversely isotropic slate. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 47, 1763–1773. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0488-2>.

- Howarth, D.F., Adamson, W.R., Brendt, J.R., 1986. Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties. *Tunnelling and Underground Space Technology* 102, 61–66. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(86\)90344-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(86)90344-X).
- Howarth, D.F., Rowland, J.C., 1987. Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40, 711–723. <https://doi.org/10.1007/BF01019511>.
- Ingram, R.L., 1954. Terminology for the thickness of stratification and parting units in sedimentary rocks. *Bulletin of the Geological Society of America* 86, 937–938. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1954\)65](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1954)65).
- ISRM., 1981. Rock characterization testing and monitoring. ISRM suggested methods. In: Brown, E.T., (Ed.), Pergamon Press, Oxford. p. 280. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0>
- ISRM., 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. In: Ulusay, R., Hudson, J.A, (Eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods. P. 628.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., 1979. *Fundamentals of Rock Mechanics*. third ed. Chapman and Hall, London.
- Jamshidi, A., 2021. Evaluation of rotary drilling rate in limestones based on brittleness indices. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 121, 1–8. <https://doi.org/10.22071/gsj.2021.237778.1813>. (In Persian with English Abstract).
- Jamshidi, A., Torabi-Kaveh, M., 2021. Anisotropy in ultrasonic pulse velocity and dynamic elastic constants of laminated sandstone. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 54, 1–9. <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-101>.
- Jamshidi, A., Torabi-Kaveh, M., Nikudel, M.R., 2021. Effect of anisotropy on the strength and brittleness indices of laminated sandstone. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science* 45, 927–936. <https://doi.org/10.1007/s40995-021-01080-w>.
- Khanlari, G., Rafiei, B., Abdilor, Y., 2015. Evaluation of strength anisotropy and failure modes of laminated sandstones. *Arabian Journal Geosciences* 8, 3089–3102. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1411-1>.
- Khanlari, G.R., Heidari, M., Sepahigero, A.A., Fereidooni, D., 2014. Quantification of strength anisotropy of metamorphic rocks of the Hamedan province, Iran, as determined from cylindrical punch, point load and Brazilian tests. *Engineering Geology* 169, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.11.014>.
- Nikrouz, R., Moomivand, H., Azad, R., 2016. Effect of foliation orientation on the P- and S-wave velocity anisotropies and dynamic elastic constants of the quartz micaschists metamorphic rocks, Angouran mine, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 9, 669. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2699-9>.
- Paone, J., Madson, D., Bruce, W.E., 1969. Drillability studies - laboratory percussive drilling. International U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, Washington.
- Pathinkar, A.G., Misra, G.B., 1980. Drillability of rocks in percussive drilling from energy per unit volume as determined with a microbit. *Mining Engineering* 32, 1407–1410. <https://doi.org/10.1007/BF01019511>.
- Rabia, H., Brook, N., 1980. An empirical equation for drill performance prediction. *Proceeding of the 21st US Symposium on Rock Mechanics, University of Missouri-Rolla*. pp. 103–111.
- Ramamurthy, T., 1993. Strength and modulus responses of anisotropic rocks. In: Hudson, J.A. (Ed.), *Comprehensive Rock Engineering—Principle, Practice and Projects*, vol. 1. Pergamon, Oxford, pp. 313–329.
- Schmidt, R.L., 1972. Drillability studies - percussive drilling in the field. *University of Michigan Library*. p. 40.
- Selim, A.A., Bruce, W.E., 1970. Prediction of penetration rate for percussive drilling. *US Bureau of Mines RI* 7396.
- Selmer-Olsen, R., Blindheim, O.T., 1970. On the drillability of rock by percussive drilling. *Proceedings of the 2nd Congress of the Int. Society for Rock Mechanics, Belgrade, Yugoslavia*.
- Tavallali, A., Vervoort, A., 2010. Failure of layered sandstone under Brazilian test conditions: Effect of micro-scale parameters on macro-scale behaviour. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43, 641–653. <https://doi.org/10.1007/s00603-010-0084-7>.
- Thuro, K., Spaun, G., 1996. Introducing the 'destruction work' as a new rock property of toughness referring to drillability in conventional drill and blast tunnelling. *Proceedings of Eurock'96: Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering*, pp. 707–713.

- Xu, F., Yang, C., Guo, Y., Wang, L., Hou, Z., Li, H., Hu, X., Wang, T., 2017. Effect of bedding planes on wave velocity and AE characteristics of the Longmaxi shale in China. *Arabian Journal of Geosciences* 10, 41. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2943-y>.
- Zhang, X.M., Yang, J.C., Liu, B.C., 2009. Experimental study on anisotropic strength properties of sandstone. *The ISRM International Symposium on Rock Mechanics - SINOROCK 2009*, The University of Hong Kong, China.