

## تخمین شاخص شکنندگی سنگ با استفاده از آزمایش بار نقطه‌ای

(مطالعه موردی: سنگ توف کرج)

مهدی حسینی<sup>۱\*</sup>، میترا حاتمی جربت<sup>۲</sup>

پذیرش مقاله: ۹۵/۰۷/۲۶

دریافت مقاله: ۹۳/۱۰/۰۱

### چکیده

شکنندگی یکی از مهم‌ترین خصوصیات ذاتی سنگ است و بر روی رفتار سنگ در هنگام عملیات مختلف تاثیر زیادی دارد. در حال حاضر روش استاندارد برای اندازه‌گیری مستقیم شکنندگی سنگ در دسترس نیست. بنابراین روابط تجربی و روش‌های غیرمستقیم مختلفی از سوی محققین برای بدست آوردن شکنندگی سنگ ارائه شده است. اگرچه در نتایج حاصل شده اختلاف زیادی وجود دارد ولی تمامی روش‌ها حاکی از این است که شکنندگی سنگ تابعی از مقاومت (کششی و تراکم تک‌محوری) آن است. در این پژوهش از اطلاعات اولیه به دست آمده از آزمایشات انجام شده بر روی سنگ توف کرج استفاده شده و ارتباط بین شاخص بار نقطه‌ای و مفاهیم شکنندگی برای این سنگ بررسی شده است. در اکثر مقالاتی که در حوزه شکنندگی به چاپ رسیده است از سه مفهوم جهت تعیین این شاخص استفاده شده که شامل  $B_1$  (نسبت مقاومت تراکم تک‌محوری به مقاومت کششی)،  $B_2$  (نسبت تفاضل مقاومت تراکمی تک‌محوری و مقاومت کششی به جمع مقاومت تراکمی تک‌محوری و مقاومت کششی) و  $B_3$  (نسبت حاصل ضرب مقاومت تراکمی تک‌محوری و مقاومت کششی تقسیم بر دو) می‌باشد. ارتباط سه مفهوم شکنندگی توسط شاخص بار نقطه‌ای برای حالت خشک با استفاده از تحلیل ضریب تعیین ( $R^2$ ) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که بالاترین ضریب تعیین مربوط به رابطه  $I_{s(50)}-B_3$  می‌باشد؛ همچنین فقط معادله درجه دو می‌تواند ارتباط مقادیر شکنندگی و شاخص بار نقطه‌ای را به خوبی آشکار نماید.

کلید واژه‌ها: شاخص شکنندگی، بار نقطه‌ای، سنگ توف، کرج

۱. دانشیار گروه مهندسی معدن دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) meh\_hosseini18@yahoo.com

۲. کارشناسی مهندسی معدن دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

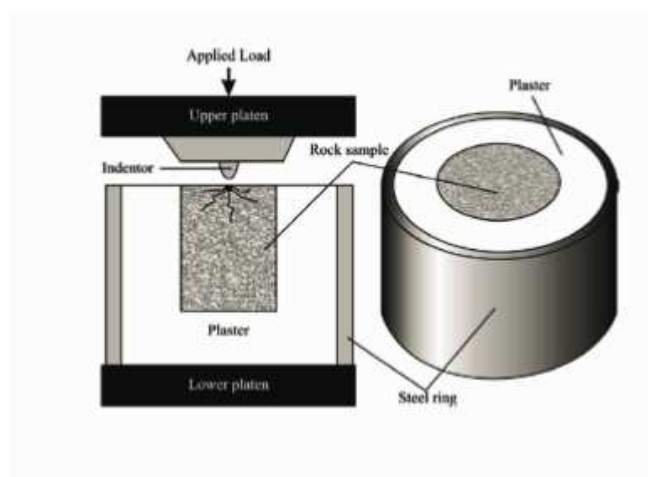
شکنندگی یکی از مهمترین ویژگی‌های مکانیکی سنگ است که در حفاری سازه‌های زیرزمینی مانند حفر تونل به کمک ماشین بازویی (Roadheader) و ماشین حفاری تونل تمام مقطع (TBM) اثر می‌گذارد (Goktan, 1992; Bilgin et al., 1993; Thuro, 1997). محققین مختلفی در خصوص ارائه روابطی برای تخمین شاخص نرخ حفاری (Drilling rate index) با استفاده از شاخص شکنندگی مطالعه کرده‌اند که می‌توان به مطالعات یارالی و کهرمان اشاره کرد (Yarali and Kahraman, 2011).

مطالعات آزمایشگاهی و عملکرد TBM نشان داده است که مکانیزم ایجاد ترک و خردشدگی در سنگ‌های شکننده‌تر، سریع‌تر صورت می‌گیرد؛ بنابراین نیاز به شاخصی جهت تعیین میزان شکنندگی یک سنگ در پروژه‌های مکانیک سنگ، امری غیر قابل انکار است. به همین دلیل با پیشرفت علم و فناوری و توسعه ماشین‌های TBM از یک سو و تاثیر شکنندگی بر عملکرد و راندمان این ماشین‌ها از سوی دیگر، نیاز به ارائه شاخصی جهت تعیین این پارامتر، هرچه بیشتر احساس می‌شود. شکنندگی به عنوان یکی از خواص سنگ‌هایی که بدون تغییر شکل قابل ملاحظه‌ای می‌شکنند

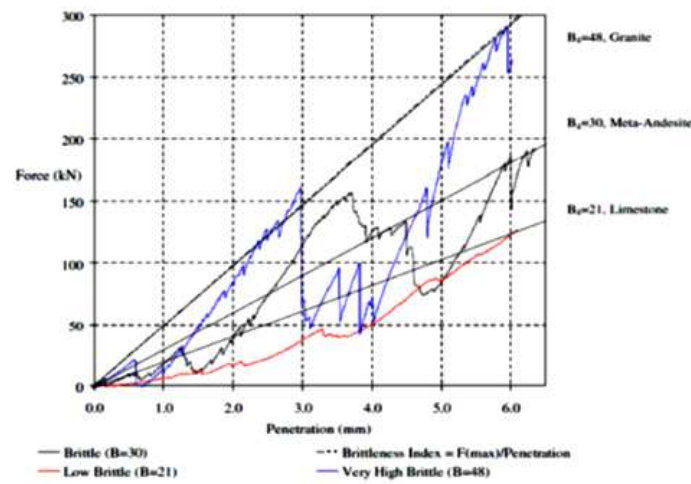
تعریف می‌شود. برای شکنندگی مفهوم و روش اندازه‌گیری استاندارد شده‌ای وجود ندارد (Young Ko et al, 2016). از جمله روش‌های اندازه‌گیری شکنندگی سنگ، می‌توان به روش آزمون نفوذ پانچ اشاره کرد که مقدار دقیق شکنندگی سنگ را به طور مستقیم تعیین می‌کند ولی روشی بسیار گران‌قیمت و هزینه‌بر است. در این آزمایش یک نفوذکننده مخروطی شکل در اثر نیروی وارد شده توسط جک، سنگ را تحت فشار قرار می‌دهد و مقدار نیرو و جابجایی نفوذکننده اندازه‌گیری شده و در کامپیوتر ذخیره می‌شود. در این آزمایش نمونه در یک قالب استوانه‌ای فولادی توسط پلاستر قالب‌گیری می‌شود (شکل ۱) و سپس به کمک نمودار نیرو-جابجایی شکنندگی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Yagiz, 2009) شکل (۲) نمودار نیرو - جابجایی که مربوط به ۳ آزمایش انجام شده روی آندزیت، گرانیت و سنگ آهک است را نشان می‌دهد.

$$B = \frac{F_{max}}{P_{max}} \quad (1)$$

در این رابطه B: اندیس شکنندگی (kN/mm)،  $F_{max}$ : حداکثر نیروی اعمال شده به نمونه (kN) و  $P_{max}$ : حداکثر نفوذ (mm) در اثر حداکثر نیروی اعمال شده به نمونه..



شکل ۱. شکل دستگاه آزمایش نفوذ پانچ (Yagiz, 2009)



شکل ۲. نتایج آزمایش نفوذ پانچ روی سه نوع سنگ شامل گرانیت، آندزیت و سنگ آهک (Yagiz, 2009)

در مطالعات گذشته شاخص شکنندگی که توسط رابطه (۴) تعریف شده است به طور گسترده‌ای استفاده شده است (Inyang and Pitt, 1990 ; Gonng and Zhao, 2007).

$$B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (4)$$

در این رابطه  $\sigma_t$ : مقاومت کششی سنگ است.

هوکا و داس در سال ۱۹۷۵ برای توصیف شکنندگی رابطه (۵) را نیز پیشنهاد کردند (Hucka and das, 1975).

$$B = \frac{(\sigma_c - \sigma_t)}{(\sigma_c + \sigma_t)} \quad (5)$$

آلتینداگ در سال ۲۰۰۲ و آلتینداگ و گانی در سال ۲۰۱۰ از رابطه (۶) برای تعیین شکنندگی استفاده کردند (Altindag, 2002; Altindag and Guney, 2010).

$$B = \frac{(\sigma_c * \sigma_t)}{2} \quad (6)$$

مطالعات قبلی توسط آلتینداگ نیز نشان داد که:

- ۱- سنگ‌هایی با داشتن مقاومت مکانیکی بالا از سنگ‌هایی که مقاومت مکانیکی پایین‌تری دارند؛ شکننده‌تر هستند.
- ۲- شکنندگی، حاصل شکست با تغییر شکل کم است.
- ۳- اگر دو سنگ مقاومت تراکمی یکسان داشته باشند، سنگی که مقاومت کششی کم‌تری دارد، شکننده‌تر است.
- ۴- اگر دو سنگ مقاومت کششی یکسان داشته باشند، سنگی که مقاومت تراکمی بالاتری دارد، شکننده‌تر است.

تعیین شکنندگی سنگ به طور گسترده تجربی می‌باشد؛ محققین 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؛ با این حال بیشتر محققین شکنندگی را تابعی از مقاومت تراکم تک‌محوری و مقاومت کششی سنگ می‌دانند (Altindag, 2003; Altindag et al, 2010).

از سال ۱۹۶۲ تا کنون مفهوم شکنندگی سنگ توسط بسیاری از محققین توصیف شده است.

پروتودیاکونوف در سال ۱۹۶۲ از طریق آزمایش ضربه‌ای که ارائه داده بود شکنندگی را از طریق رابطه (۲) تعیین کرد.

$$B = q \times \sigma_c \quad (2)$$

در این رابطه  $q$ : درصد ذرات ریزتر از ۲۸ مش که در اثر آزمایش ضربه پروتودیاکونوف تشکیل شده است و  $\sigma_c$ : مقاومت تراکم تک‌محوری سنگ می‌باشد (Protodyakonov, 1962).

هوکا و داس در سال ۱۹۷۵ برای توصیف شکنندگی رابطه (۳) را پیشنهاد کردند (Hucka and das, 1975).

$$B = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_c} \quad (3)$$

در این رابطه  $\varepsilon_c$ : کرنش برگشت‌پذیر و  $\varepsilon_t$ : کرنش کل می‌باشد.

نمی‌باشد. در این آزمایش نمونه‌های سنگ می‌تواند به شکل مغزه، بلوک و یا کلوخه‌ای نامنظم باشد. بدین ترتیب در این تحقیق سعی شده است که با انجام آزمایش بارنقطه‌ای بر روی نمونه‌های به دست آمده از توف‌های سبز کرج و به کمک تحلیل آماری، به رابطه‌ای کارآمد برای تخمین سریع شاخص شکنندگی با حداقل امکانات دست یافت.

لازم به ذکر است که  $\sigma_c$  و  $\sigma_t$  نیز می‌تواند به سادگی توسط آزمایش بار نقطه‌ای محاسبه شود. بنابراین یک ارتباط منطقی بین مقادیر  $\sigma_c$  و  $\sigma_t$  و  $I_{S(50)}$  است؛ به همین دلیل می‌توان انتظار داشت که بین  $I_{S(50)}$  و شاخص شکنندگی ارتباط وجود داشته باشد. بنابراین در این مقاله تلاش می‌شود که ارتباط بین شاخص شکنندگی توف‌ها با مقادیر  $I_{S(50)}$  بررسی شود. سنگ‌های توفی با گسترش و تنوع زیاد به عنوان منابع قرضه مورد استفاده هستند. توف جزو سنگ‌های سخت و شکننده هستند که شاخص شکنندگی بالایی دارد و تخمین آن در حفاری مکانیزه تونل‌هایی که در سنگ توف حفر می‌شوند ضروری است. در نتیجه این نوع سنگ جهت تحقیق انتخاب گردید. در ادامه به منظور ارائه رابطه‌ای جدید برای تخمین شاخص شکنندگی سنگ، رابطه موجود میان شاخص بار نقطه‌ای ( $I_{S(50)}$ ) و شاخص شکنندگی سنگ‌های توف مربوط به سازند کرج (البرز جنوبی) به کمک تحلیل آماری بررسی شده است.

## ۲. آزمایشات آزمایشگاهی انجام شده روی نمونه‌ها

### ۲-۱. آماده‌سازی نمونه

به منظور انجام این تحقیق بلوک‌هایی از سنگ توف سازند کرج (اطراف جاده چالوس) برداشت شد و برای انجام آزمایش‌های مقاومت کششی، مقاومت تراکم تک‌محوری و بار نقطه‌ای نمونه‌هایی با استانداردهای مشخص مورد نیاز است. از این بلوک‌ها مغزه‌های لازم تهیه گردید. به دلیل اینکه نمونه‌ها از چندین بلوک سنگ توف سبز گرفته شده‌اند آنها را شماره‌گذاری کرده تا مشخص شوند نمونه‌ها از کدام بلوک سنگی گرفته شده از هر بلوک ۵ مغزه گرفته شده است. تعداد

یاقیز و همکاران رابطه (۷) را برای تخمین اندیس شکنندگی بر اساس مقاومت تراکم تک‌محوری، مقاومت کششی و دانسیته سنگ ارائه دادند (Yagiz, 2009).

$$B = 0.198\sigma_c - 2.174\sigma_t + 0.913\gamma - 3.807 \quad (7)$$

در این رابطه  $\sigma_c$ : مقاومت تراکم تک‌محوری (MPa)،  $\sigma_t$ : مقاومت کششی (MPa) و  $\gamma$ : وزن مخصوص سنگ ( $\text{kN/m}^3$ ). رابطه دیگری که در سال ۲۰۱۶ توسط ازفیرات و همکارانش ارائه شده است را در رابطه (۸) مشاهده می‌کنید (et al, 2016; Özfirat).

$$B = \frac{(\sigma_c + \sigma_t)}{2} \quad (8)$$

در این پژوهش از سه رابطه (۴)، (۵) و (۶) که از جمله معروف‌ترین روابط در رابطه با شکنندگی سنگ است، استفاده شده است. محققین مختلفی به این موضوع اشاره کرده‌اند که می‌توان به تحقیقات کهرمان، آلتینداگ و یونگ‌کو و همکارانش اشاره کرد. (Kahraman, 2002; Altindag, 2002; Young Ko et al, 2016).

قابل ذکر است که مقدار شاخص شکنندگی سنگ به طور غیرمستقیم با استفاده از مقادیر مذکور ( $\sigma_c$  و  $\sigma_t$ ) قابل تعیین است اما یکی از مهمترین محدودیت‌های انجام آزمایش تراکم تک‌محوری، موانع و سختی‌های تهیه نمونه استاندارد است. نمونه‌های مورد نیاز این آزمایش باید با نسبت طول به قطر مورد نظر تهیه شوند. علاوه بر اینکه انجام آزمایش تک‌محوری مستلزم آماده‌سازی دقیق نمونه (صیقلی بودن سطوح نمونه) و در اختیار داشتن دستگاه‌های گران‌قیمت و حساس می‌باشد. بنابراین انجام دقیق و صحیح آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است و به دلیل وابستگی شاخص شکنندگی (در روابط تجربی ذکر شده) به این پارامتر، عملاً تعیین این شاخص مهم با مشکل همراه خواهد بود. به منظور رفع این اشکالات و تعیین سریع شاخصی برای نشان دادن شکنندگی سنگ، آزمایش بارنقطه‌ای پیشنهاد گردیده است؛ در آزمایش بار نقطه‌ای آماده‌سازی نمونه بسیار مختصر بوده و یا اصلاً لازم

بلوک‌ها ۷ عدد می‌باشد. در جداول ۱ تا ۳ مقدار متوسط ابعاد نمونه‌های گرفته شده از هر بلوک ذکر شده است (یعنی برای هر بلوک مقدار متوسط ابعاد ۵ نمونه ذکر شده است).

مشخصات نمونه‌های به دست آمده برای آزمایش تراکم تک‌محوری و مقاومت کششی را در جداول ۱ و ۲ مشاهده می‌کنید. در جدول ۳، قطر نمونه‌های مورد آزمایش بار نقطه‌ای آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های آزمایش مقاومت تراکم تک محوری

| D/L      | L/D      | L(mm)  | D(mm) | شماره نمونه هر بلوک |
|----------|----------|--------|-------|---------------------|
| ۰/۵۰۱۷۱۸ | ۱/۹۹۳۱۵۱ | ۱۰۱/۸۵ | ۵۱/۱  | ۱                   |
| ۰/۵۳۰۴۶۶ | ۱/۸۸۵۱۳۴ | ۹۶/۵   | ۵۱/۱۹ | ۲                   |
| ۰/۵۰۴۲۴۵ | ۱/۹۸۳۱۶۴ | ۱۰۱/۳  | ۵۱/۰۸ | ۳                   |
| ۰/۵۰۲۳۵۸ | ۱/۹۹۰۶۱۴ | ۱۰۱/۸  | ۵۱/۱۴ | ۴                   |
| ۰/۵۰۲۵۰۶ | ۱/۹۹۰۰۲۷ | ۱۰۱/۷۷ | ۵۱/۱۴ | ۵                   |
| ۰/۵۰۲۸۰۴ | ۱/۹۸۸۸۴۵ | ۱۰۱/۶۳ | ۵۱/۱  | ۶                   |
| ۰/۴۹۹۸۰۴ | ۲/۰۰۰۷۸۲ | ۱۰۲/۳  | ۵۱/۱۳ | ۷                   |

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های آزمایش کششی برزیلی

| t/D      | t(mm) | D(mm) | شماره نمونه |
|----------|-------|-------|-------------|
| ۰/۴۹۱۹۷  | ۲۵/۱۲ | ۵۱/۰۶ | ۱           |
| ۰/۴۹۸۴۳۸ | ۲۵/۵۲ | ۵۱/۲  | ۲           |
| ۰/۴۹۱۱۰۸ | ۲۵/۱۳ | ۵۱/۱۷ | ۳           |
| ۰/۵۰۳۱۲۹ | ۲۵/۷۳ | ۵۱/۱۴ | ۴           |
| ۰/۵۱۱۷۲۸ | ۲۶/۱۸ | ۵۱/۱۶ | ۵           |
| ۰/۵۱۱۲۳۷ | ۲۶/۱۶ | ۵۱/۱۷ | ۶           |
| ۰/۴۹۱۳۹۶ | ۲۵/۱۳ | ۵۱/۱۴ | ۷           |

جدول ۳. قطر نمونه‌های آزمایش بار نقطه‌ای

| شماره نمونه هر بلوک | ۱     | ۲     | ۳     | ۴     | ۵     | ۶     | ۷     |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $D_e$               | ۵۱/۰۴ | ۵۱/۱۴ | ۵۱/۱۰ | ۵۱/۲۸ | ۵۱/۱۹ | ۵۱/۱۵ | ۵۱/۱۴ |

نمونه‌های مربوط به هر بلوک است این موضوع در مورد نتایج آزمایش برزیلی و بار نقطه‌ای نیز صادق است) شکل (۳) نحوه شکست نمونه در این آزمایش را نشان می‌دهد؛ همانطور که در تصاویر مشاهده می‌شود، به علت شکنندگی بالای توف، نمونه‌ها کاملاً متلاشی شده است.

## ۲-۲. آزمایش تراکم تک‌محوری

روش انجام آزمایش تراکم تک‌محوری در سال ۱۹۷۹ توسط ISRM استاندارد شده است (ISRM, 1978). نتایج این آزمایش در جدول ۴ آورده شده است (مقادیر ذکر شده در هر ردیف، مقدار متوسط نتایج آزمایش‌های انجام شده روی

جدول ۴. نتایج آزمایش تراکم تک محوری

| شماره نمونه هر بلوک | $P_{max}(KN)$ | P(N)   | D(mm) | L(mm)  | L/D      | A(mm <sup>2</sup> ) | $\sigma_c(MPa)$ | $\sigma_c(MPa)$ (تصحیح شده) |
|---------------------|---------------|--------|-------|--------|----------|---------------------|-----------------|-----------------------------|
| ۱                   | ۴۷۳/۱۰۴       | ۴۷۳۱۰۴ | ۵۱/۱  | ۱۰۱/۸۵ | ۱/۹۹۳۱۵۱ | ۲۰۵۰/۸۴             | ۲۳۰/۶۸۸         | ۲۳۰/۶۸۸                     |
| ۲                   | ۳۹۸/۵         | ۳۹۸۵۰۰ | ۵۱/۱۹ | ۹۶/۵   | ۱/۸۸۵۱۳۴ | ۲۰۵۸/۰۷             | ۱۹۳/۶۲۸         | ۱۹۳/۶۲۸                     |
| ۳                   | ۵۶۷/۸         | ۵۶۷۸۰۰ | ۵۱/۰۸ | ۱۰۱/۳  | ۱/۹۸۳۱۶۴ | ۲۰۴۹/۲۳۴            | ۲۷۷/۰۷۹۱        | ۲۷۷/۰۷۹۱                    |
| ۴                   | ۳۸۷/۷         | ۳۸۷۷۰۰ | ۵۱/۱۴ | ۱۰۱/۸  | ۱/۹۹۰۶۱۴ | ۲۰۵۴/۰۵۲            | ۱۸۸/۷۴۸۹        | ۱۸۸/۷۴۸۹                    |
| ۵                   | ۴۳۷/۶         | ۴۳۷۶۰۰ | ۵۱/۱۴ | ۱۰۱/۷۷ | ۱/۹۹۰۰۲۷ | ۲۰۵۴/۰۵۲            | ۲۱۳/۰۴۲۴        | ۲۱۳/۰۴۲۴                    |
| ۶                   | ۳۸۵/۲         | ۳۸۵۲۰۰ | ۵۱/۱  | ۱۰۱/۶۳ | ۱/۹۸۸۸۴۵ | ۲۰۵۰/۸۴             | ۱۸۷/۸۲۵۵        | ۱۸۷/۸۲۵۵                    |
| ۷                   | ۳۸۰/۲         | ۳۸۰۲۰۰ | ۵۱/۱۳ | ۱۰۲/۳  | ۲/۰۰۰۷۸۲ | ۲۰۵۳/۲۴۸            | ۱۸۵/۱۷          | ۱۸۵/۱۷                      |



شکل ۳. نحوه شکست نمونه در آزمایش مقاومت تراکمی تک محوری

۳-۲. آزمایش برزیلی

برای تعیین مقاومت کششی بر روی نمونه‌ها آزمایش برزیلی انجام شده است. شیوه آزمایش برزیلی در سال ۱۹۷۸ توسط ISRM استاندارد شده است (ISRM, 1978).

مقاومت کششی سنگ از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد:

$$\sigma_t = 0.636 \frac{P}{D * t} \quad (9)$$

در این رابطه:

P: بار در لحظه شکست (N)، D: قطر نمونه (mm)

t: ضخامت نمونه (mm)،  $\sigma_t$ : مقاومت کششی (MPa)

سطح شکست در این آزمایش باید در راستای بارگذاری و به صورت قطری باشد در غیر این صورت آزمایش باید تکرار شود. نتایج این آزمایش در جدول ۵ آورده شده است؛ شکل ۴ نحوه شکست نمونه در این آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۵. نتایج آزمایش کششی برزیلی

| شماره نمونه هر بلوک | P(KN) | P(N)  | D(mm) | t(mm) | t/D      | $\sigma_t(MPa)$ |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|----------|-----------------|
| ۱                   | ۳۱/۲  | ۳۱۲۰۰ | ۵۱/۰۶ | ۲۵/۱۲ | ۰/۴۹۱۹۷  | ۱۵/۴۷۰۷۵        |
| ۲                   | ۴۳/۲  | ۴۳۲۰۰ | ۵۱/۲  | ۲۵/۵۲ | ۰/۴۹۸۴۳۸ | ۲۱/۰۲۷۶۳        |
| ۳                   | ۴۴/۵  | ۴۴۵۰۰ | ۵۱/۱۷ | ۲۵/۱۳ | ۰/۴۹۱۱۰۸ | ۲۲/۰۰۹۴۵        |
| ۴                   | ۲۸/۵  | ۲۸۵۰۰ | ۵۱/۱۴ | ۲۵/۷۳ | ۰/۵۰۳۱۲۹ | ۱۳/۷۷۵۳۱        |
| ۵                   | ۲۶/۳  | ۲۶۳۰۰ | ۵۱/۱۶ | ۲۶/۱۸ | ۰/۵۱۱۷۲۸ | ۱۲/۴۸۸۵۷        |
| ۶                   | ۳۳/۸  | ۳۳۸۰۰ | ۵۱/۱۷ | ۲۶/۱۶ | ۰/۵۱۱۲۳۷ | ۱۶/۰۵۹۰۸        |
| ۷                   | ۴۱/۲  | ۴۱۲۰۰ | ۵۱/۱۴ | ۲۵/۱۳ | ۰/۴۹۱۳۹۶ | ۲۰/۳۸۹۲۴        |



شکل ۴. نحوه شکست نمونه در آزمایش برزیلی

در این رابطه:

$P$ : بار در لحظه شکست (N)،  $D_e$ : قطر معادل مغزه (mm)

$I_s$ : شاخص مقاومت بار نقطه‌ای (MPa)

نتایج این آزمایش در جدول ۶ آورده شده است. نحوه شکست نمونه در این آزمایش در شکل ۵ آورده شده است.

۲-۴. آزمایش بار نقطه‌ای

روش آزمایش بار نقطه‌ای توسط ISRM در سال ۱۹۸۵ استاندارد شده است (ISRM, 1985). لازم به ذکر است، آزمایش بار نقطه‌ای بر روی نمونه‌های مورد مطالعه به روش قطری انجام شده است. شاخص مقاومت بار نقطه‌ای تصحیح نشده از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$I_s = \frac{p}{D_e^2} \quad (10)$$

جدول ۶. نتایج آزمایش بار نقطه‌ای

| $I_s(50)$ | F        | $I_s$    | $D_e$ | p(N)  | p(KN) | شماره نمونه هر بلوک |
|-----------|----------|----------|-------|-------|-------|---------------------|
| ۸/۷۱۷۳۵   | ۱/۰۰۹۳۰۷ | ۸/۶۳۶۹۶۶ | ۵۱/۰۴ | ۲۲۵۰۰ | ۲۲/۵  | ۱                   |
| ۹/۶۵۶۶۰۳  | ۱/۰۱۰۱۹۶ | ۹/۵۵۹۱۳۴ | ۵۱/۱۴ | ۲۵۰۰۰ | ۲۵    | ۲                   |
| ۱۳/۵۳۵۶۵  | ۱/۰۰۹۸۴۱ | ۱۳/۴۰۳۷۵ | ۵۱/۱  | ۳۵۰۰۰ | ۳۵    | ۳                   |
| ۹/۲۳۱۱۴   | ۱/۰۱۱۴۴  | ۹/۱۲۶۷۳  | ۵۱/۲۸ | ۲۴۰۰۰ | ۲۴    | ۴                   |
| ۷/۷۱۳۵۹   | ۱/۰۱۰۶۴۱ | ۷/۶۳۲۳۷۶ | ۵۱/۱۹ | ۲۰۰۰۰ | ۲۰    | ۵                   |
| ۱۰/۰۳۹۸۲  | ۱/۰۱۰۲۸۵ | ۹/۹۳۷۶۱۳ | ۵۱/۱۵ | ۲۶۰۰۰ | ۲۶    | ۶                   |
| ۱۰/۰۴۲۸۷  | ۱/۰۱۰۱۹۶ | ۹/۹۴۱۵   | ۵۱/۱۴ | ۲۶۰۰۰ | ۲۶    | ۷                   |



شکل ۵. نحوه شکست نمونه در آزمایش بار نقطه‌ای

### ۳. ارائه روابطی برای تخمین شکنندگی

تا کنون روش‌های تجربی متفاوتی برای تعیین شکنندگی سنگ ارائه شده‌اند که معروف‌ترین آنها روابط (۴)، (۵) و (۶) می‌باشد (Young Ko et al., 2016). در این بخش شاخص‌های شکنندگی محاسبه شده از رابطه (۴) با  $B_1$ ، از رابطه (۵) با

$B_2$  و از رابطه (۶) با  $B_3$  نشان داده شده است. نتایج محاسبات شاخص شکنندگی با استفاده از این روابط در جدول ۷ آورده شده است. اطلاعات مورد نیاز جهت ترسیم نمودارهای مربوطه در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۷. شکنندگی نمونه‌های سنگ توف سبز کرج

| شماره نمونه هر بلوک | $\sigma_t$ (MPa) | $\sigma_c$ (MPa) | $B_1$    | $B_2$    | $B_3$    |
|---------------------|------------------|------------------|----------|----------|----------|
| ۱                   | ۱۵/۴۷۰۷۴۶۲۹      | ۲۳۰/۶۸۸          | ۱۴/۹۱۱۲۴ | ۰/۸۷۴۳۰۳ | ۱۷۸۴/۴۵۸ |
| ۲                   | ۲۱/۰۲۷۶۲۵۳۹      | ۱۹۲/۲۲۲۴۹۶۵      | ۹/۱۴۱۴۲۷ | ۰/۸۰۲۷۸۹ | ۲۰۲۰/۹۹۱ |
| ۳                   | ۲۲/۰۰۹۴۵۱۵۷      | ۲۷۶/۷۹۷۰۸۶۶      | ۱۲/۵۷۶۲۸ | ۰/۸۵۲۶۸۴ | ۳۰۴۶/۰۷۶ |
| ۴                   | ۱۳/۷۷۵۳۱۲۶۹      | ۱۸۸/۶۴۲۱۸۲       | ۱۳/۶۹۴۲۲ | ۰/۸۶۳۸۹۲ | ۱۲۹۹/۳۰۳ |
| ۵                   | ۱۲/۴۸۸۵۶۹۲۴      | ۲۱۲/۹۱۴۳۳۲۶      | ۱۷/۰۴۸۷۴ | ۰/۸۸۹۱۸۹ | ۱۳۲۹/۴۹۸ |
| ۶                   | ۱۶/۰۵۹۰۷۹۹۲      | ۱۸۷/۶۹۹۱۹۱۵      | ۱۱/۶۸۸۰۴ | ۰/۸۴۲۳۷۱ | ۱۵۰۷/۱۳۸ |
| ۷                   | ۲۰/۳۸۹۲۴۳۸۲      | ۱۸۵/۱۷۸۶۹۶۹      | ۹/۰۸۲۱۷۶ | ۰/۸۰۱۶۳  | ۱۸۸۷/۸۲۷ |

جدول ۸. اطلاعات مورد نیاز جهت ترسیم نمودارهای مربوطه

| شماره نمونه هر بلوک | $I_{s(50)}$ | $B_3$    | $B_2$       | $B_1$       |
|---------------------|-------------|----------|-------------|-------------|
| ۱                   | ۸/۷۱۷۳۵۰۰۲۳ | ۱۷۸۴/۴۵۸ | ۰/۸۷۴۳۰۲۶۸۶ | ۱۴/۹۱۱۲۳۹۲۹ |
| ۲                   | ۹/۶۵۶۶۰۳۱۷۴ | ۲۰۲۰/۹۹۱ | ۰/۸۰۲۷۸۹۰۸۹ | ۹/۱۴۱۴۲۶۷۱۲ |
| ۳                   | ۱۳/۵۳۵۶۵۰۹۷ | ۳۰۴۶/۰۷۶ | ۰/۸۵۲۶۸۴۲۷  | ۱۲/۵۷۶۲۸۲۷۷ |
| ۴                   | ۹/۲۳۱۱۳۹۵۰۳ | ۱۲۹۹/۳۰۳ | ۰/۸۶۳۸۹۲۰۷۴ | ۱۳/۶۹۴۲۲۱۴۱ |
| ۵                   | ۷/۷۱۳۵۸۹۸۵۴ | ۱۳۲۹/۴۹۸ | ۰/۸۸۹۱۸۸۹۲۲ | ۱۷/۰۴۸۷۳۷   |
| ۶                   | ۱۰/۰۳۹۸۲۴۱۷ | ۱۵۰۷/۱۳۸ | ۰/۸۴۲۳۷۱۲۵۹ | ۱۱/۶۸۸۰۴۱۴۴ |
| ۷                   | ۱۰/۰۴۲۸۶۷۳  | ۱۸۸۷/۸۲۷ | ۰/۸۰۱۶۳۰۱۲  | ۹/۰۸۲۱۷۵۸۰۲ |

برای بدست آوردن رابطه‌ی بین شاخص شکنندگی و شاخص بار نقطه‌ای از روش تحلیل آماری استفاده می‌شود. تحلیل آماری از جمله روش‌های رایج در مهندسی سنگ و زمین‌شناسی مهندسی برای به دست آوردن مدل‌های پیش‌بینی کننده با استفاده از داده‌های موجود است که اغلب به دو صورت رگرسیون ساده و چندمتغیره انجام می‌شود. در اینجا برای به دست آوردن ضرایب رگرسیون، افزون بر معادلات خطی ( $y = ax + b$ )، معادلات توانی ( $y = ax^b$ )، نمایی ( $y = ae^{bx}$ )، لگاریتمی ( $y = a \ln x + b$ ) و درجه دو ( $y = ax^2 + bx + c$ ) نیز بررسی می‌شوند. ضرایب رگرسیون برای معادلات حاصل از برازش در جدول ۹، آورده شده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود، کمترین ضرایب تعیین مربوط به رابطه  $I_{s(50)} - B_2$  و بالاترین ضرایب همبستگی مربوط به رابطه  $I_{s(50)} - B_3$  می‌باشد. بهترین رابطه برای معرفی ارتباط بین شاخص شکنندگی  $B_1$ ،  $B_2$  و  $B_3$  با شاخص بار نقطه‌ای  $I_{s(50)}$  به ترتیب در روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) آورده شده است؛ نمودار نشان‌دهنده این روابط نیز در شکل ۶ آورده شده است.

(۱۱)

$$B_1 = 0.6446I_{s(50)}^2 - 14.606I_{s(50)} + 92.082$$

$$R^2 = 0.7749$$

(۱۲)

$$B_2 = 0.007I_{s(50)}^2 - 0.1579I_{s(50)} + 1.699$$

$$R^2 = 0.6338$$

(۱۳)

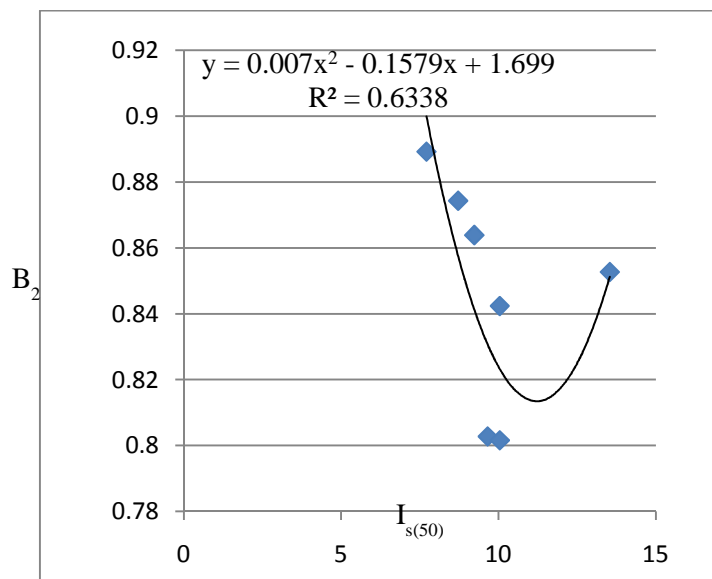
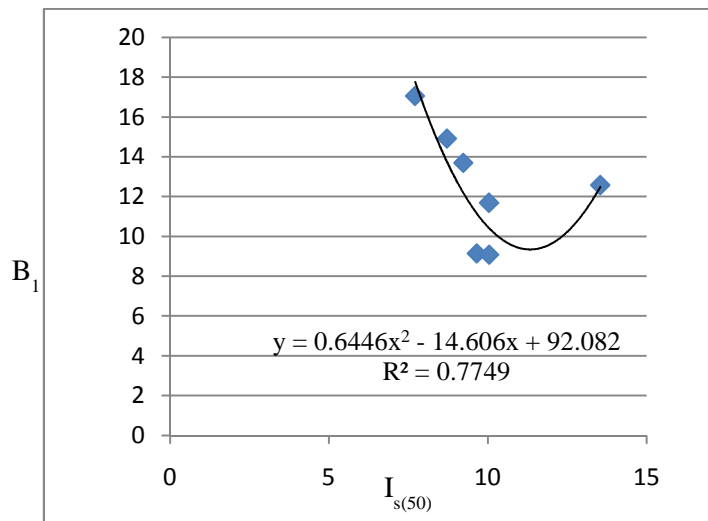
$$B_3 = 32.397I_{s(50)}^2 - 407.78I_{s(50)} + 2620.9$$

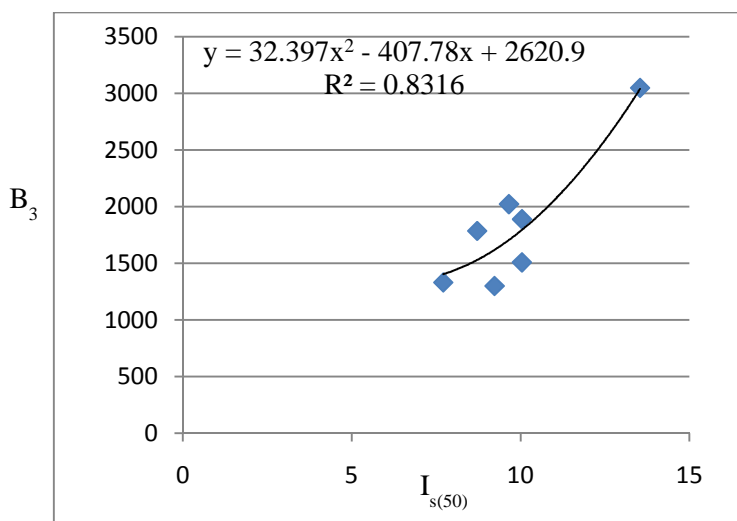
$$R^2 = 0.8316$$



جدول ۹. ضرایب تعیین روابط حاصل از برازش

| ردیف | نوع نمودار | Is(50)-B1 | Is(50)-B2 | Is(50)-B3 |
|------|------------|-----------|-----------|-----------|
| ۱    | خطی        | ۰/۱۶۶۵    | ۰/۰۹۱     | ۰/۷۹۴۹    |
| ۲    | لگاریتمی   | ۰/۲۳۲۲    | ۰/۱۳۸     | ۰/۷۵۴۸    |
| ۳    | درجه ۲     | ۰/۷۷۴۹    | ۰/۶۳۳۸    | ۰/۸۳۱۶    |
| ۴    | توانی      | ۰/۱۷۸۷    | ۰/۱۳۰۸    | ۰/۷۰۶۹    |
| ۵    | نمایی      | ۰/۱۲۳۱    | ۰/۰۸۵۴    | ۰/۷۳۰۵    |





ج

شکل ۶. نمودارهای درجه دو شاخص شکنندگی  $B$  و شاخص بار نقطه‌ای  $I_{s(50)}$  (الف) رابطه  $B_1$  و  $I_{s(50)}$  (ب) رابطه  $B_2$  و  $I_{s(50)}$  (ج)

(ج) رابطه  $B_3$  و  $I_{s(50)}$

پژوهش دیگری در سال ۱۳۸۹ در دانشگاه بوعلی سینا همدان، تحت عنوان "تخمین شاخص شکنندگی تراورتن‌های دنگله کهریز با استفاده از شاخص بار نقطه‌ای" انجام گردیده است؛ در این پژوهش آزمایشاتی بر روی ۱۵ نمونه از تراورتن‌های این منطقه انجام شده است؛ ارتباط سه مفهوم شکنندگی با شاخص بار نقطه‌ای با استفاده از تحلیل آماری مورد بررسی قرار گرفته است.

معادله بهترین خط برازش و مربع رگرسیون  $R^2$  برای تجزیه و تحلیل هر رگرسیون مشخص شد. در این تحقیق، تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی، نمایی و غیر خطی بین شاخص شکنندگی  $B_1$ ،  $B_2$  و  $B_3$  و شاخص بار نقطه‌ای صورت گرفته است اما رابطه درجه دو بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. بهترین روابط برازش شده و ضرایب همبستگی مربوطه به ترتیب طی روابط (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) آورده شده است.

$$B_1 = -1.0368I_{s(50)}^2 + 7.4943I_{s(50)} - 6.4451 \quad (17)$$

$$R^2 = 0.834$$

$$B_2 = -0.0522I_{s(50)}^2 + 0.3562I_{s(50)} + 0.1437 \quad (18)$$

$$R^2 = 0.761$$

$$B_3 = -38.623I_{s(50)}^2 + 376.32I_{s(50)} - 619.39 \quad (19)$$

$$R^2 = 0.933$$

ارتباط سه مفهوم شکنندگی توسط شاخص بار نقطه‌ای با استفاده از تحلیل ضریب تعیین مورد بررسی قرار گرفت. در

همانطور که ملاحظه می‌شود، روابط برازش شده همگی از نوع معادلات درجه دو می‌باشد.

#### ۴. تحلیل نتایج

به منظور بررسی نتایج و صحت‌سنجی روابط به دست آمده، نتایج با سه پژوهش مشابه مقایسه شده است. در پژوهشی که در سال ۱۳۹۰ در دانشگاه صنعتی شاهرود تحت عنوان "پیش‌بینی شاخص شکنندگی سنگ با استفاده از پارامترهای مقاومتی و فیزیکی سنگ" انجام گردیده است، با استفاده از روابط ذکر شده (۴)، (۵) و (۶)، شاخص شکنندگی سنگ محاسبه گردید. در نهایت روابط بین شاخص شکنندگی و شاخص بار نقطه‌ای (روابط (۱۴)، (۱۵) و (۱۶)) پیشنهاد شد. (امینی خوشالان، ۱۳۹۰).

$$B_1 = 1.6572 I_{s(50)} + 1.6488 \quad R^2 = 0 \quad (14)$$

$$B_2 = 0.1943e^{5.6373I_{s(50)}} \quad R^2 = 0.61 \quad (15)$$

$$B_3 = 6.7687 \ln(I_{s(50)}) - 12.565 \quad R^2 = 0.65 \quad (16)$$

در این تحقیق همانطوری که نتایج محاسبات آماری نشان می‌دهد فرمول‌های تجربی ذکر شده دارای دقت نسبتاً پایینی در پیش‌بینی شاخص شکنندگی سنگ‌ها می‌باشند.

سنگ توف با انجام آنالیزهای رگرسیون یک متغیره و تعیین ضرایب ( $R^2$ ) پرداخته شد. برای انجام این مطالعه از توف‌های سبز کرج نمونه برداری شده است.

در این تحقیق، تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی، نمایی، لگاریتمی، توابع درجه دو و توانی بین شاخص شکنندگی  $B_1$ ،  $B_2$  و  $B_3$  و شاخص بار نقطه‌ای رسم شده است. برای ارتباط بین شاخص شکنندگی  $B_1$ ،  $B_2$  و  $B_3$  و شاخص بار نقطه‌ای معادله درجه دوم بهترین عملکرد را نشان می‌دهد بیشترین ضریب تعیین شاخص بار نقطه‌ای با  $B_1$  و  $B_2$  به ترتیب ۰/۷۷۴۹ و ۰/۶۳۳۸ می‌باشد. با این حال ضریب تعیین شاخص بار نقطه‌ای با مفهوم شکنندگی  $B_3$  بسیار قوی‌تر است (با ضریب همبستگی ۰/۸۳۱۶).

نتایج به دست آمده، در تحقیق حاضر و تحقیقات گذشته نشان‌دهنده وجود ضریب تعیین بالاتر بین شاخص بار نقطه‌ای و  $B_3$  است.

روابط به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد از آزمایش بار نقطه‌ای که آزمایشی سریع و ارزان است می‌توان در ارزیابی‌های مقدماتی برای تخمین شکنندگی استفاده کرد. انجام این آزمایش‌ها به همراه قضاوت صحیح کارشناسی می‌تواند برآوردی از خواص مورد نیاز سنگ بکر در مراحل اولیه طراحی ارائه دهد. به دلیل تنوع رفتاری سنگ‌ها، کاربرد روابط تجربی به دست آمده بسیار محدود است و به همین علت، بررسی روش‌های غیرمستقیم برآورد شاخص شکنندگی برای انواع سنگ‌ها در مناطق و سازندهای مختلف، ضروری به نظر می‌رسد.

این خصوص می‌توان گفت بین شاخص بار نقطه‌ای و  $B_3$  یک ارتباط قوی تری وجود دارد و بین شاخص بار نقطه‌ای و مفاهیم  $B_1$  و  $B_2$  این ارتباط ضعیف تر است (کارگریان، ۱۳۸۹).

همچنین حیدری و همکاران در سال ۲۰۱۴ در خصوص تخمین شاخص شکنندگی به کمک اندیس بار نقطه‌ای روابطی را ارائه کردند که نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد ضریب تعیین بین شاخص بار نقطه‌ای و  $B_3$  از همه بالاتر و بعد از آن ضریب تعیین رابطه بین شاخص بار نقطه‌ای و  $B_1$  قرار دارد. کمترین ضریب تعیین را رابطه بین شاخص بار نقطه‌ای و  $B_2$  داراست (Heidari et al, 2014).

همانطور که در تحقیق حاضر و تحقیقات انجام شده در گذشته نشان می‌دهد، ضریب تعیین میان  $I_{S(50)}$  و  $B_3$  بالاترین ضریب بوده و منطقی تر است که برای برآورد شکنندگی سنگ مورد استفاده قرار گیرد. در تحقیق حاضر و تحقیق صورت گرفته در دانشگاه همدان بهترین روابط از نوع توابع درجه دو بوده است.

## ۵. نتیجه گیری

مقدار شاخص شکنندگی سنگ به طور غیرمستقیم با استفاده از مقادیر  $\sigma_c$  و  $\sigma_t$  قابل تعیین است. به دست آوردن این مقادیر مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است. این مقادیر می‌تواند به سادگی توسط آزمایش بار نقطه‌ای محاسبه شود. یک ارتباط منطقی بین مقادیر  $\sigma_c$  و  $\sigma_t$  و  $I_{S(50)}$  است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که بین  $I_{S(50)}$  و شاخص شکنندگی ارتباط وجود داشته باشد. در تحقیق حاضر به بررسی رابطه بین شاخص بار نقطه‌ای و شاخص شکنندگی نمونه‌هایی از

## منابع

- امینی خوشالان، ح، ترابی، ر، زادهش، ج، قاسمی، ا، ۱۳۹۰. پیش بینی شاخص شکنندگی سنگ با استفاده از پارامترهای مقاومتی و فیزیکی سنگ، هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کارگریان، س، قبادی، م، محسنی، ح، خانلری، غ، ۱۳۸۹. تخمین شاخص شکنندگی تراورتن‌های دنگله کهریز با استفاده از شاخص بار نقطه‌ای، بیست و نهمین گردهمایی علوم زمین، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

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

- Altindag, R., 2003. Correlation of specific energy with rock brittleness concepts on rock cutting, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*.
- Altindag, R., Guney, A., 2010. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. *Scientific Research and Essays*, 5(16), 2107-2118.
- Bilgin, N., Eskikaya, S., Dincer, T., 1993. The performance analysis of large diameter blast hole rotary drilling in Turkish Coal Enterprises, *Mine Mechanization and Automation Symposium*, Rotterdam, Balkema.
- Goktan, R.M., 1992. Applicability of rock brittleness ratio in percussive drilling performance. *Anadolu Uni. J. of Eng. and Arch. Fac.*, 8, 89-99 (in Turkish).
- Gong, Q.M., Zhao, J., 2007. Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite. *Tun. and Und. S. Tech.*, 22, 317-324.
- Heidari, M., Khanlari, G. R., Torabi-Kaveh, M., Kargarian, S., Saneie, S., 2014. Effect of Porosity on Rock Brittleness, *Rock Mech Rock Eng*, 47, 785-790.
- Hucka, V., Das, B., 1975. Laboratory investigation of penetration properties of the complete coal series. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 12, 213-217.
- Inyang, H.I., Pitt, J.M., 1990. Standardization of a percussive drill for measurement of the compressive strength of rocks. In: J.A. Hustrulid and W.A. Johnson, (Eds.), *Rock Mechanics Contributions and Challenges Symposium*, Rotterdam.
- ISRM, 1978. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials, *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15, 99-103.
- ISRM, 1979. Suggested methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials, *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 99-103.
- ISRM, 1985. Suggested method for determining point load strength, *Int J Rock Mech Min Sci* 22(2), 51-60.
- Kahraman, S., 2002. Correlation of TBM and drilling machine performance with rock brittleness. *Eng. Geol.* 65, 269-283.
- Özfirat, K., Yenice, H., Şimşir, F., Yaralı, O., 2016. A new approach to rock brittleness and its usability at prediction of drillability, *Journal of African Earth Sciences*, accepted manuscript, DOI:10.1016/j.jafrearsci.2016.03.017.
- Protodyakonov, M.M., 1962. Mechanical properties and drillability of rocks. 5th Symp. On Rock Mech., Univ. Minnesota.
- Thuro, K., 1997. Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunneling. *Geol. Rundsch. Springer-Verlag*, 86, 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.
- Yaralı, O., Kahraman, S., 2011. The drillability assessment of rocks using the different brittleness values, *Tunnelling and underground space technology*, 26, 406-414.
- Young K.o., Kon kim, T., Son, Y., Jeon, S., 2016. Effect of geomechanical properties on Cerchar abrasivity index (CAI) and its application to TBM tunneling, *Tunnelling and underground space technology*, article in press.