



## بررسی امکان استفاده از آزمایش برزلی برای تعیین مقاومت کششی سنگ های شیستوز

عبدالهادی قزوینیان<sup>۱</sup>؛ فواد رستگار<sup>۱\*</sup>؛ فرشید رستگار<sup>۲</sup>

۱) گروه مهندسی معدن، مکانیک سنگ- دانشگاه تربیت مدرس، abdolhadi@yahoo.com

rastegar.uotm@gmail.com

۲) دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران- دانشگاه بوعلی همدان، rastegar.uob@gmail.com

(\* عهده دار مکاتبات)

دریافت: ۹۱۴۳۰؛ دریافت اصلاح شده: ۹۴/۶/۳؛ پذیرش: ۹۴/۶/۱۰؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۴/۹/۱۵

### مکیده

مقاومت کششی سنگ نقش بسزایی در مکانیزم شکست، انتشار ترک و شکست نمونه های سنگی دارد که تعیین مقدار دقیق آن می تواند کمک بسزایی در بهینه کردن طراحی سازه های سنگی داشته باشد. معمولاً در طبیعت سنگ های کاملاً همسانگرد بندرت یافت می شود. سنگ های شیستوز به علت ناهمسانگردی ذاتی شان، در جهات مختلف فولیاسیون، مقاومت یکسانی ندارند. هدف از این تحقیق، تحلیل مقایسه ای مقاومت کششی برزلی و مقاومت کششی مستقیم و همچنین استفاده از روش غیر مستقیم آزمایش برزلی به منظور تعیین مقاومت کششی سنگ های شیستوز در جهات مختلف فولیاسیون می باشد. بدین منظور، از نمونه های فیلیتی با زوایای فولیاسیون صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به محور بارگذاری ( $\beta$ ) استفاده شده است و در مجموع ۱۸ آزمایش کشش مستقیم و ۴۹ آزمایش برزلی روی نمونه های تهیه شده مطابق استاندارد ISRM انجام شده است. نتایج این آزمایش های انجام شده نشان می دهد که حداکثر و حداقل مقاومت کششی مربوط به هر دو آزمایش در زوایای صفر و ۹۰ درجه و مقادیر آن ها به ترتیب برای مقاومت کششی غیر مستقیم (برزلی) و مستقیم برابر ۹/۵۶، ۳/۷۶ و ۸/۵۰، ۱/۰۱ مگاپاسکال می باشد. در نهایت یک رابطه ای تجربی برای تخمین مقاومت کششی سنگ های ناهمسانگرد با استفاده از آزمایش برزلی ارائه شده است.

**واژه های کلیدی:** مقاومت کششی، شیستوزیته، زوایای فولیاسیون، آزمایش کشش مستقیم، آزمایش کشش غیر مستقیم.

### ۱- مقدمه

پایداری شیروانی های سنگی خصوصاً در زون های کششی بسیارحایز اهمیت است (خانلری ۱۳۸۹). لازم به ذکر است که مقاومت کششی سنگ ها از مقاومت برشی یا فشاری آنها کمتر است و اغلب، ترک های کششی، قبل از شکست برشی یا فشارشی

شناسایی رفتار سنگ ها در حالت بارگذاری کشش و تعیین میزان مقاومت کششی آنها از مواردی است که در تحلیل پایداری سقف و دیواره های فضاهای زیر زمینی، حفاری، آتشکاری و همچنین

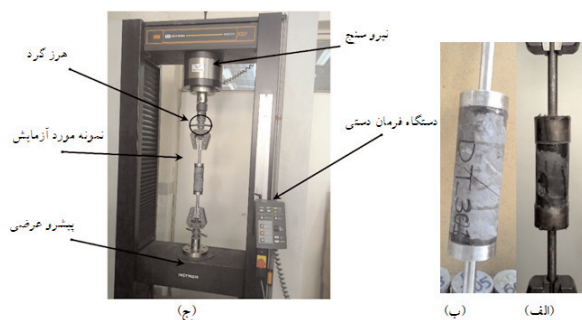
برزیلی در سال ۱۹۵۳ (Carneiro & Barcellos) معرفی و برای سنگ‌های همگن گسترش یافت. در سال‌های اخیر مطالعات متعددی برای بررسی مقاومت کششی سنگ‌های ناهمسانگرد انجام شده است (Amadei 1996; Chen et al. 1998; Ke et al. 2008; Gonzaga et al. 2008; Gao et al. 2010; Tavallali & Vervoort 2010; Kwasniewski 2009). در این مطالعه امکان استفاده از آزمایش برزیلی برای تعیین مقاومت کششی سنگ‌های ناهمسانگرد مورد بررسی بیشتر قرار می‌گیرد.

## ۲- روش تحقیق

جهت تهیه نمونه‌های مورد استفاده برای آزمایش‌های آزمایشگاهی، نمونه‌های فیلیتی با ابعاد حدود ۵۰ سانتی‌متر تهیه و از این نمونه‌ها مغزه‌هایی با قطر NX تهیه شده است؛ به طوری که سطوح فولیاسیون با محور اعمال بار ( $\beta$ ) زوایای صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه تشکیل می‌دهند. در این تحقیق تعداد ۱۸ آزمایش کشش مستقیم و ۴۹ آزمایش برزیلی انجام شده است. نسبت طول به قطر در آزمایش کشش مستقیم و برزیلی به ترتیب ۲/۵ تا ۳ و ۰/۵ می‌باشد. نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها و شیوه انجام آزمایش‌ها مطابق استاندارد (ISRM 1978) انجام شده است.

در آزمایش کشش مستقیم، به منظور اتصال نمونه استوانه‌ای به دستگاه کشش مستقیم از دو جفت صفحه فولادی با هندسه‌ای نسبتاً متفاوت و چسب اپوکسی استفاده شده است. محل چسباندن صفحه فولادی به نمونه بصورت یک سطح زبر تهیه شد تا استحکام چسب و صفحه افزایش یابد. تصویر ۱ نمایی از صفحه‌های فولادی مورد استفاده در این آزمایش را نشان می‌دهد.

تصویر (۱-الف) برای زوایای صفر، ۳۰ و ۴۵ درجه و تصویر (۱-ب) برای



تصویر ۱-الف و ب) نمایی از صفحه‌های فولادی مورد استفاده در آزمایش کشش مستقیم و ج) دستگاه بارگذاری کشش مستقیم Instron 5500R.

گسترش می‌یابند (Goodman 1989). از طرف دیگر انجام آزمایش کشش مستقیم برای تعیین مقاومت کششی سنگ‌ها زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد؛ ضمن اینکه انجام آزمایش کشش غیر مستقیم نیز ملاحظات فنی زیادی داشته و انجام دقیق آن نیاز به مهارت و تجربه بالایی دارد. به علت وجود اجتناب‌ناپذیر تنش‌های خمشی، ممان‌های پیچشی و غیر عادی بودن تمرکز تنش در محل اتصال نمونه به دستگاه، این آزمایش کمتر انجام می‌شود (Liao et al. 1997). به همین دلیل روش‌های غیر مستقیمی برای تعیین مقاومت کششی سنگ‌ها ارائه شده‌اند که یکی از پرکاربردترین آنها آزمایش برزیلی می‌باشد.

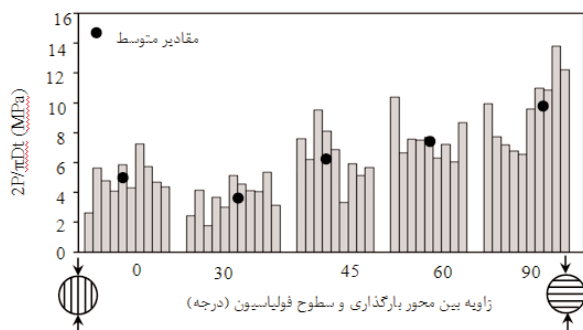
اگر چه برای بیشتر سنگ‌ها تلاش می‌شود تا مقدار واحدی به عنوان مقاومت کششی سنگ مورد نظر معرفی شود ولی تعیین مقاومت کششی سنگ‌ها در آزمایش‌های کشش مستقیم و برزیلی، باید با در نظر گرفتن ناهمگنی‌ها و ناهمسانگردی‌های موجود در نمونه انجام شود. اغلب سنگ‌های موجود در طبیعت سنگ‌های ناهمسانگرد بوده و سنگ‌های کاملاً همسانگرد بندرت یافت می‌شود. به عنوان نمونه سنگ‌های شیستوز به علت ناهمسانگردی ذاتی‌شان، در جهات مختلف فولیاسیون، مقاومت یکسانی ندارند. اثرات ناهمسانگردی سنگ‌ها در شرایط کشش، در مقایسه با حالت فشاری با شدت بیشتری ظاهر می‌شود و در واقع برای شناخت ناهمسانگردی خواص یک سنگ، انجام آزمایش‌ها کششی الزامی است (Kwasniewski 1993). در سنگ‌ها، همانند سایر مواد شکننده دیگر، وقتی تنش‌ها به اندازه کافی زیاد شدند، ترک‌ها شروع به نمایان شدن می‌کنند. شیستوزیته بودن سنگ‌ها باعث می‌شود که الگوی شکست به پارامترهای مکانیکی سنگ ناهمسانگرد بستگی داشته باشد. برای تحلیل یا پیش‌بینی الگوهای شکست در سنگ‌های لایه‌ای یا ناهمسانگرد، آگاهی از شرایط تنش و پارامترهای مکانیکی سنگ در جهت لایه‌بندی و یا جهت‌های دیگر ضروری است (Debecker & Vervoort 2009).

همانطور که اشاره شد، در میان روش‌های اندازه‌گیری غیر مستقیم مقاومت کششی، آزمایش برزیلی به صورت گسترده‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش برای بدست آوردن مقاومت کششی مواد شکننده شبیه بتن، سنگ و مواد شبه سنگی مناسب می‌باشد (Diyuan & Wong 2012). این آزمایش بدلیل سهولت در تهیه نمونه و انجام آن، بطور عمده در کارهای مهندسی کاربرد دارد. آزمایش

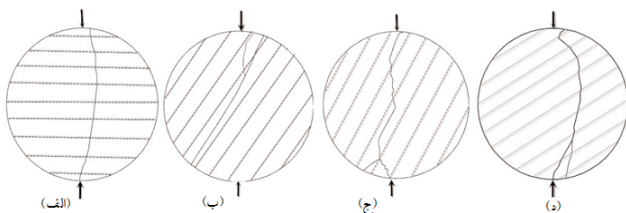
همسانگرد برابر ۲ می باشد (Amadei et al. 1983).

تصویر ۲ مقادیر مقاومت کششی برزلی ( $\frac{2P}{\pi Dt}$ ) را برای نمونه‌های با زوایای مختلف فولیاسیون نشان می‌دهد. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که حداکثر و حداقل مقاومت این نمونه‌ها در زوایای ۹۰ و ۳۰ درجه اتفاق می‌افتد و بترتیب برابر ۹/۵۶ و ۳/۷۶ مگاپاسکال می‌باشد. بنابراین نسبت ناهمسانگردی مقاومت کششی برزلی برای این نمونه‌ها برابر ۲/۵۴ می‌باشد. همچنین، حداقل مقدار انحراف معیار برای زاویه ۳۰ درجه و حداکثر این مقدار برای زاویه ۹۰ درجه می‌باشد؛ این مقادیر به ترتیب برابر ۷۱۰ و ۲/۸۲ مگاپاسکال می‌باشد.

مد شکست غالب در این نمونه‌ها به چهار صورت رخ داده است: (۱) لغزش در فولیاسیون، (۲) ترک مرکزی، (۳) ترک غیر مرکزی و (۴) ترکیب ترک مرکزی و لغزش در فولیاسیون. در تصویر ۳ مدهای شکست غالب نشان داده شده‌اند. ترک‌های مرکزی در راستای محور بارگذاری می‌باشد و در بخش مرکزی نمونه قرار دارند. بخش مرکزی بصورت اختیاری انتخاب می‌شود؛ یعنی فاصله ۱۰٪ قطر نمونه از هر دو طرف خط بارگذاری می‌باشد. ترک‌های مرکزی دیگر، که از راستای محور بارگذاری بیش از این مقدار فاصله دارند را ترک‌های غیر مرکزی می‌نامند (Tavallali & Vervoort 2010).



تصویر ۲- تغییرات مقاومت کششی برزلی نسبت به زاویه بین محور بارگذاری و صفحه فولیاسیون ( $\beta$ ).



تصویر ۳- نمایی شماتیک از مدهای شکست غالب در آزمایش برزلی. الف) ترک مرکزی، ب) لغزش در فولیاسیون، ج) ترکیب ترک مرکزی و لغزش در فولیاسیون و د) ترک غیر مرکزی.

زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه مورد استفاده قرار گرفته است دستگاه اعمال بار کششی مجهز به هرزگرد می‌باشد که مانع از ایجاد پیچش در نمونه می‌شود. تصویر (۱-ج) نمایی از دستگاه کشش (Instron 5500R) را نشان می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است هم محور بودن نمونه با صفحه در طول چسباندن توسط تراز کروی کنترل می‌شود. به منظور استفاده از استحکام نهایی چسب، حداقل ۴۸ ساعت پس از چسباندن نمونه، آزمایش انجام می‌شود.

### ۳- انجام آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها

#### ۳-۱- آزمایش برزلی

فرمولی که جهت محاسبه مقاومت کششی برزلی توسط ISRM پیشنهاد شده است، به صورت رابطه ۱ می‌باشد (ISRM 1978):

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} \quad \text{رابطه (۱)}$$

این رابطه، که پارامتر تنش حداکثر نامیده می‌شود، برای سنگ‌های همسانگرد معادل مقاومت کششی می‌باشد. در حالی که برای سنگ‌های ناهمسانگرد نظیر اسلیت، فیلیت، شیست و ... این مقدار با مقاومت کششی متفاوت است و مد شکست ترکیبی از شکست کششی و برشی است (Debecker & Vervoort 2009). آزمایش برزلی ممکن است مقادیری کمتر یا بیشتر از مقاومت کششی مستقیم را تخمین زند. جیگر (۱۹۶۷) روی نمونه‌های تراکیتی و مرمری آزمایش‌های برزلی و کشش مستقیم انجام داد و در نهایت به این نتیجه رسید که نمونه‌های تراکیتی مقاومت کششی برزلی کمتر و نمونه‌های مرمری مقاومت کششی برزلی بیشتر از مقاومت کششی مستقیم را ارائه می‌دهند (Jaeger 1967). با فرض اینکه مقاومت کششی غیر مستقیم سنگ‌های ناهمسانگرد برابر حداکثر مقدار تنش در جهت عمود بر محور بارگذاری در مرکز نمونه دیسکی باشد، لذا:

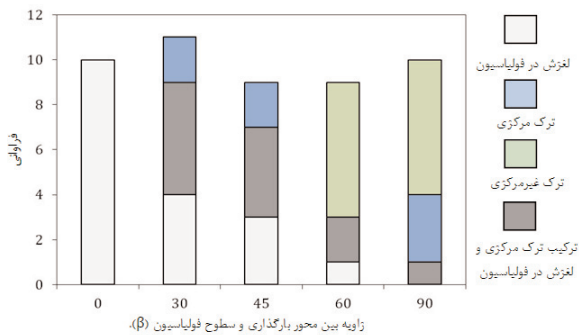
$$\sigma_t = -q_{xx} \frac{P}{\pi Dt} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که  $q_{xx}$  فاکتور تمرکز تنش در مرکز نمونه دیسکی می‌باشد. معمولاً  $q_{xx}$  را نمی‌توان با استفاده از عبارات ریاضی ساده بدست آورد، زیرا تابعی پیچیده از  $\frac{E}{G'}$ ،  $\frac{E}{E'}$  و زاویه شیب فولیاسیون ( $\psi$ ) می‌باشد ( $E$  و  $E'$  به ترتیب مدول یانگ در جهت موازی و عمود بر صفحه ناهمسانگردی،  $G'$  مدول برشی در صفحات عمود بر صفحه ناهمسانگردی و  $\nu$  نسبت پواسون در جهت عمود بر صفحه ناهمسانگردی می‌باشد). این فاکتور برای سنگ‌های همگن و

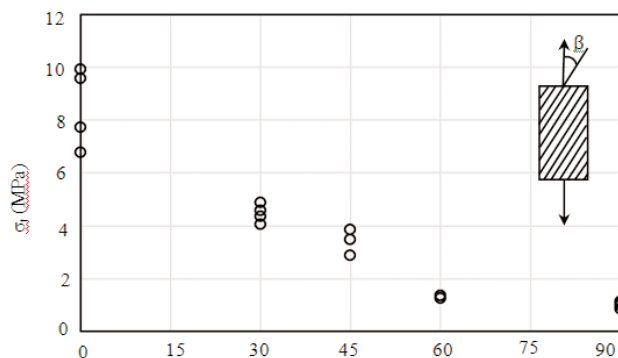
تصویر ۴ نمودار فراوانی نمونه های با مدهای شکست مختلف را برای زوایای صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ نشان می دهد. با توجه به شکل، مشخص می شود که در زوایای پایین  $\beta$ ، بخصوص زمانی که سطوح فولیاسیون با محور بارگذاری موازی است، لغزش در فولیاسیون مد شکست غالب بوده و با افزایش  $(\beta)$  ابتدا ترکیب ترک مرکزی و لغزش در فولیاسیون و سپس در زوایای بالاتر ترک غیر مرکزی غالب می شود. همچنین مد شکست ترکیب ترک مرکزی و لغزش در فولیاسیون (تصویر ۴-ج) با افزایش زاویه  $(\beta)$ ، کاهش می یابد. ترک های مرکزی و ترک های غیر مرکزی اکثراً از داخل ماده سنگ رخ می دهند، بنابراین مشاهده می شود که مجموع این دو مد شکست با افزایش زاویه  $(\beta)$  افزایش می یابد. همچنین مد شکست ترک غیر مرکزی تنها در زوایای بالا (۳۰ و ۶۰ درجه) مشاهده می شود.

این همبستگی به صورت یک تابع نمایی با ضریب تصمیم گیری  $(R^2)$  ۰/۹۷۶۳ می باشد (معادله ۳).

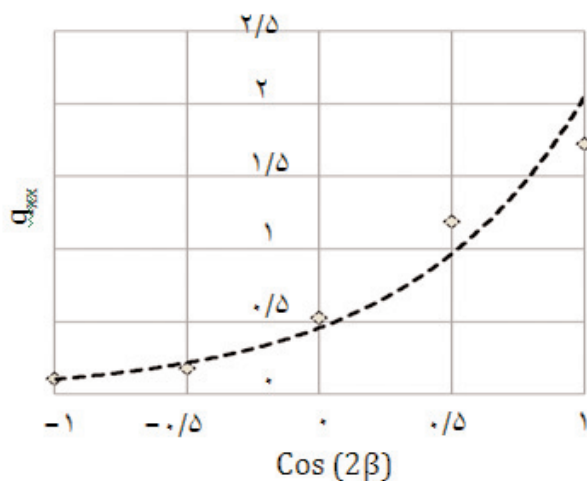
$$q_{xx} = \frac{\sigma_t}{P/\pi D t} = 0.457 e^{1.5 \cos 2\beta} \quad \text{رابطه (۳)}$$



تصویر ۴-ج: فراوانی مدهای شکست برای زوایای مختلف (beta)



تصویر ۵- مقاومت کششی مستقیم نمونه های فیلیتی برای زوایای مختلف (beta)



تصویر ۶- همبستگی بین فاکتور تمرکز تنش  $(q_{xx})$  و  $\cos(2\beta)$

در این مطالعه، از دو نرخ بارگذاری متفاوت استفاده شده است. زمان استاندارد شکست نمونه در آزمایش کشش مستقیم طبق استاندارد ISRM حدود پنج دقیقه می باشد (ISRM 1978). بنابراین در طی انجام آزمایش، سرعت بارگذاری در نمونه های با زوایای  $(\beta)$  بالا (۶۰ و ۹۰ درجه) برابر  $0.5 \frac{mm}{min}$  و در نمونه های با زوایای کمتر برابر  $0.15 \frac{mm}{min}$  اعمال می شد. این تغییر سرعت بارگذاری به این دلیل بوده است که مقاومت نمونه ها در زوایای فولیاسیون مختلف با هم متفاوت هستند. به عنوان مثال استفاده از سرعت بالا برای زوایای  $(\beta) = 60$  و  $(\beta) = 90$  باعث می شود که نمونه زودتر از زمان استاندارد شکسته شود. برای هر زاویه  $(\beta)$  حداقل سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است.

### ۳-۲- آزمایش کشش مستقیم

تصویر ۵ نمودار مقاومت کششی مستقیم را برای زوایای مختلف نمونه های فیلیتی نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش زاویه  $(\beta)$  مقاومت کششی کاهش می یابد. لازم به ذکر است، حداکثر و حداقل مقدار انحراف معیار مقاومت کششی به ترتیب برابر ۷۳ و ۰/۰۵ مگاپاسکال می باشد که مربوط به زوایای صفر و ۶۰ درجه می باشد.

### ۳-۳- رابطه بین مقاومت کششی مستقیم و مقاومت

#### کششی برزیلی

جهت یافتن رابطه ای منطقی بین مقاومت کششی مستقیم و مقاومت

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، نمونه‌های فیلیتی با زوایای فولیاسیون صفر، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به محور بارگذاری ( $\beta$ ) استفاده شده است و در مجموع ۱۸ آزمایش کشش مستقیم و ۴۹ آزمایش برزیلی روی نمونه‌های تهیه شده مطابق استاندارد ISRM انجام شد. حداکثر و حداقل مقاومت کششی مربوط به هر دو آزمایش در زوایای صفر و ۹۰ درجه و مقادیر آن‌ها به ترتیب برای مقاومت کششی غیر مستقیم (برزیلی) و مستقیم برابر ۹/۵۶، ۳/۷۶ و ۸/۵۰، ۷/۰۱ مگاپاسکال بدست آمده است. نسبت ناهمسانگردی مقاومت کششی در آزمایش کشش مستقیم برابر ۸/۴۲ و در آزمایش برزیلی برابر ۲/۵۴ بدست آمده است. از مقایسه مقادیر متناظر مقاومت کششی برزیلی و مقاومت کششی مستقیم برای زوایای مختلف به این نتیجه می‌توان رسید که آزمایش برزیلی، مقاومت کششی را بیشتر از مقدار واقعی برای نمونه‌های فیلیتی تخمین می‌زند. همچنین با افزایش زاویه ( $\beta$ ) مقاومت کششی برزیلی و فراوانی نمونه‌های شکسته شده از داخل ماده سنگ (ترک مرکزی و غیر مرکزی) افزایش و فراوانی مد شکست لغزش در فولیاسیون و ترکیب ترک مرکزی و لغزش در لایه بندی کاهش می‌یابد. در نهایت یک رابطه‌نمایی بین نسبت مقاومت کششی مستقیم به نصف مقاومت کششی برزیلی ( $P/\pi Dt$ ) و  $\cos(2\beta)$  با ضریب تصمیم‌گیری ( $R^2$ ) ۰/۹۷۶ معرفی شده است.

#### مراجع

خانلری، غ، ۱۳۸۹. اصول مکانیک سنگ، برای مهندسين زمین‌شناسی، عمران و معدن. دانشگاه بوعلی سینا، ۴۵۴ ص.

Amadei, B., 1996. Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, vol. 33:293-325.

Amadei, B., Rogers, J.D., & Goodman, R.E., 1983. Elastic constant and tensile strength of the anisotropic rocks. *Proc 5th Congr International Society of Rock Mechanics Melbourne Australia*, 189-196.

Carneiro, F., & Barcellos, A., 1953. International association of testing and research laboratories for materials and structures. *RILEM Bull*, vol. 13:99-125.

Chen, C., Pan, E., & Amadei, B., 1998. Fracture mechanics analysis of cracked discs of anisotropic rock using the boundary element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 195:218-35.

Debecker, B., & Vervoort, A., 2009. Experimental observation of fracture patterns in layered slate.

*International Journal of Fractures*, vol. 159:51-62.

Gao, Z., Zhao, J., & Yao, Y., 2010. A generalized anisotropic failure criterion for geomaterials. *International Journal of Solids Structures*, vol. 47:3166-85.

Gonzaga, G.G., Leite, M.H., & Corthesy, R., 2008. Determination of anisotropic deformability parameters from a single standard rock specimen. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 45:1420-38.

Goodman, R.E., 1989. Introduction to rock mechanics. 2nd edn. John Wiley, Singapore, 55-57.

ISRM, 1978. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*, vol. 15:99-103.

Jaeger, J.C., 1967. Failure of rocks under tensile conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*, vol. 4(2):219-227.

Ke, C., Chen, C., & Tu, C., 2008. Determination of fracture toughness of anisotropic rock by boundary element method. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, vol. 41:509-38.

Kwasniewski, M. A., 2009. Testing and modeling of the anisotropy of tensile strength of rocks. In: *Proceedings (CD-Rom) of the international conference on rock joints and jointed rock masses, Tucson, Arizona, USA; January 7-8*.

Kwasniewski, M. A., 1993. Mechanical behavior of anisotropic rocks. In: Hudson JA, editor, *Comprehensive rock engineering*, Oxford: Pergamon, vol. 1: 313-29.

Li, D., & Wong, L. N. Y., 2012. The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights. *Rock Mechanics & Rock Engineering DOI 10.1007/s00603-012-0257-7*.

Liao, J. J., Yang, M. T., & Hsieh, H. Y., 1997. Direct tensile behavior of a transversely isotropic rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 34(5): 837-849.

Tavallali, A., & Vervoort, A., 2010. Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under Brazilian test conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 313: 22-47.