

## انتخاب معیاری بهینه برای تخمین مقاومت برشی سطوح زبر درزه در سنگ سخت آندزیت

منوچهر صانعی<sup>۱</sup>، اصغر رهمتی<sup>۱\*</sup>، بیژن دهقانی<sup>۱</sup>، لهراسب فرامرزی<sup>۲</sup> و رامب باقرپور<sup>۲</sup>

۱) کارشناس ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی اصفهان، manouchehr.sanei@gmail.com,

asgharrahmati8512063@gmail.com, bijan.dehghani@gmail.com

۲) استادیار دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، lfaramarzi@cc.iut.ac.ir, bagherpour@cc.iut.ac.ir

\* عهده‌دار مکاتبات

دریافت: ۹۱/۴/۱۶؛ دریافت اصلاح شده: ۹۲/۲/۲؛ پذیرش: ۹۲/۳/۵؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۲/۵/۱۶

### چکیده

تعیین پارامترهای ژئومکانیکی درزه‌های سنگی از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از مهم‌ترین این پارامترها مقاومت برشی درزه سنگ می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، تاکنون آزمایش‌های مختلفی انجام شده است. در این مطالعه، با انجام آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های سنگ آندزیت دارای درزه طبیعی، تفسیر و تحلیلی برای واقعی‌تر کردن تأثیر سطوح ناهمواری‌ها بر مقاومت برشی ارائه شده است. در این مقاله به بررسی و تأثیر ناهمواری‌های سطوح درزه با مفهوم ضریب زبری (JRC) بر مقاومت برشی صفحات درزه در سنگ سخت (strong rock) در دو سطح تنش نرمال پایین و بالا پرداخته شده است. نتایج نشان داد که تأثیر زاویه زبری بر مقاومت برشی سطوح درزه‌ها در سطح تنش نرمال پایین بارزتر است. سپس مقادیر مقاومت برشی حاصل از نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های با درزه طبیعی، با مقادیر تعیین شده با استفاده از معیارهای موهر-کولمب، معیار توانی و معیار تجربی بارتن مقایسه شد. بر اساس نتایج حاصل و مقایسه بین معیارهای مذکور با استفاده از آنالیز آماری می‌توان گفت که معیار توانی در مقایسه با سایر معیارهای موجود انطباق بهتری با نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های آندزیتی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** مقاومت برشی، آزمایش برش مستقیم، تنش نرمال، ضریب زبری درزه (JRC)، معیار توانی.

### ۱- مقدمه

تنش نرمال متفاوت، تعیین کرد (Brown 1981). پارامترهای مقاومتی درزه‌ها، مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده پایداری شیب‌های سنگی در معادن سطحی و زیر زمینی، راه‌های کوهستانی، تونل‌ها و پی سدها و توده‌های سنگی دارای ساختارهای تکتونیکی متفاوت می‌باشند (Jiang et al. 2006, Wyllie & Mah 2004). درزه‌ها و موقعیت قرار

در مهندسی ژئوتکنیک، آزمایش برش مستقیم برای بدست آوردن پارامترهای برشی سطوح ناپیوستگی‌ها کاربرد وسیعی دارد (Cai-Chu et al. 2013). با استفاده از این آزمایش می‌توان رفتار برشی دو سطح ناپیوستگی مانند درزه، صفحات لایه بندی، گسل و ... را در شرایط

Grasselli & Egger 2003) پیش بینی کردند که با افزایش تنش نرمال مقاومت برشی افزایش یافته و مقاومت باقیمانده اختلاف ناچیزی با مقاومت حداکثر دارد. لی و همکاران (Li et al. 2008) به آنالیز عددی زبری سطح درزه و تعیین مقدار ضریب زبری سطح بر مبنای روابط تسه و کروند پرداختند، سپس تأثیر مقیاس را به صورت سه بعدی مورد بررسی قرار دادند. عسگری و احمدی (۱۳۸۵) در مطالعات خود نشان دادند که همیشه با افزایش مقیاس، مقدار زبری و مقاومت برشی درزه کاهش نمی‌یابد، بلکه گاهی نیز افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش زاویه دندانه‌داری (i)، مقدار JRC کاهش می‌یابد. یانگ و همکاران (Yang et al. 2001b) تأثیر زبری را بر مقاومت برشی درزه مورد بررسی قرار دادند. همچنین بنکدار و مرتضوی (۱۳۹۰) با استفاده از تحلیل غیر خطی ناپوستگی‌ها، تأثیر زبری را بر مقاومت برشی توده سنگ بررسی کردند.

مقاومت برشی سطوح درزه در سنگ‌های سخت تحت تأثیر دو پارامتر زاویه اصطکاک داخلی و زبری سطح قرار دارد. تأثیر زبری سطوح درزه در سطح تنش‌های پایین بارزتر است (Barton 1973). در این تحقیق تأثیر زبری سطوح درزه در دو سطح تنش نرمال پایین و بالا بر مقاومت برشی نمونه‌های سنگی آندزیت، با انجام آزمایش برش مستقیم مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که مطالعات گذشته پیرامون این موضوع بیشتر بر روی نمونه‌های با درزه مصنوعی انجام شده است.

بر این اساس، بعد از نمونه‌گیری و انجام آزمایش برش مستقیم، هندسه زبری سطح درزه‌ها قبل و بعد از برش تعیین شد. مقادیر مقاومت برشی حاصل از نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های با درزه طبیعی، با مقادیر تعیین شده با استفاده از معیارهای مختلف مقایسه و معیاری مناسب برای ارزیابی مقاومت برشی نمونه‌های آندزیتی ارائه شد.

#### ۴- مشخصات نمونه سنگی

نمونه‌های سنگی مورد آزمایش، آندزیت می‌باشند. آندزیت‌ها سنگ‌های آذرین بیرونی هستند که دانه ریز و تقریباً روشن بوده و کانی‌های اصلی سازنده‌ی آن‌ها پلاژیوکلاز، پیروکسن، آمفیبول و بیوتیت می‌باشد که در زمینه‌ای خاکستری رنگ تا سیاه قرار گرفته‌اند. آزمایش برش بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۶۳/۵ میلی متر انجام شد. برای نشان دادن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ بکر، در حالت تک محوره و سه محوره آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های سنگی آندزیت انجام شد (جدول ۱).

گرفتن آن‌ها در توده‌های سنگی تأثیر بسزایی بر مقاومت برشی در حفریات سطحی و زیرزمینی دارد. پایداری سطوح استخراج در حفریات سطحی و زیرزمینی یکی از پارامترهای تعیین کننده در اقتصاد و ایمنی سازه‌های سنگی است (Lama & Vutukuri 1978). رفتار درزه‌های سنگ در توده سنگی تحت بارهای برشی، به اصطکاک بین سطوح، مقاومت سنگ دیواره درزه، شکل هندسی و ناهمواری‌های سطح درزه بستگی دارد. ناهمواری سطح درزه به‌ویژه در سنگ‌های سخت، یکی از پارامترهایی است که مستقیماً روی مقاومت برشی سطوح درزه تأثیر گذاشته و بیان کننده زاویه زبری (i) سطح درزه در شرایط مختلف تنش برشی و نرمال می‌باشد. وجود درزه‌ها در توده‌های سنگی، سبب کاهش مقاومت و افزایش تغییر شکل پذیری توده سنگ می‌شود (صدیقانی و همکاران ۱۳۸۵، Goodman 1975).

به دلیل اهمیت موضوع، محققین زیادی به توسعه مدل جهت تعیین مقاومت برشی و بررسی زبری سطوح ناپوستگی‌ها پرداختند. پاتن (Patton 1966a, Patton 1966b) تأثیر ناهمواری‌های سطح درزه را از طریق انجام آزمایش برش بر روی نمونه‌های طبیعی بررسی نمود. لادنی و آرشامبولت (Ladanyi & Archambault 1969) مدل خود را با در نظر گرفتن اثر اصطکاک، اتساع و به هم قفل شدن زبری سطح درزه ارائه نمودند. بارتن (Barton 1976) معیار خود را با در نظر گرفتن تغییرات اتساع درزه در سطح تنش عمودی وارد بر آن ارائه کرد. اسداللهی و تانن (Asadollahi & Tonon 2010) و بابانوری و همکاران (Babanouri et al. 2011) بر مبنای نتایج آزمایشات برش مستقیم به توسعه مدل بارتن پرداختند.

بارتن و چوبی (Barton & Choubey 1977) مفهوم ضریب زبری سطح درزه (JRC) را برای بیان ارتباط بین ناهمواری‌ها (زبری) و مقاومت برشی بیان کردند. مقدار ضریب زبری سطح درزه (JRC) به طور خطی از ۰ تا ۲۰ برای درزه‌های کاملاً صاف تا درزه‌های خیلی زبر و ناصاف تغییر می‌کند. تسه و کرودن (Tse & Cruden 1979) و یانگ و همکاران (Yang et al. 2001a) روابطی را جهت تعیین مقدار JRC از مقدار  $Z_2$  ارائه نمودند. همچنین لی و همکاران (Lee et al. 1990)، واکابایاشی و فوکوشی (Wakabayashi & Fukushima 1995) و کولاتیلکه و همکاران (Kulatilake et al. 1997) مقدار JRC را با استفاده از مفهوم فراکتال تعیین کردند.

پرات و همکاران (Pratt et al. 1974) پیش بینی کردند که مقاومت حداکثر (Peak Strength) با افزایش مساحت درزه به دلیل افزایش تماس دیواره‌ها و کاهش ناهمواری‌ها، کاهش می‌یابد. بارتن و بندیس (Barton & Bandis 1982) پیش بینی کردند که با افزایش مساحت درزه، مقادیر JRC و JCS کاهش می‌یابند. همچنین گراسلی و ایگر

جدول ۱- نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوره و سه محوره بر روی نمونه سنگ‌های آندزیت در آزمایشگاه

آزمایش مقاومت فشاری سه محوره		آزمایش مقاومت فشاری تک محوره	
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (Mpa)	مقاومت فشاری تک محوره (Mpa)	مدول الاستیک (GPa)
۴۶/۷-۶۴/۸۶	۰/۷-۱۵/۵	۶۵-۱۶۰	۲۳/۸-۷۴/۳

### ۳- نحوه انجام آزمایش برش مستقیم

حداقل سه آزمایش می‌توان مقاومت برشی سطوح درزه را تعیین کرد. در این تحقیق، آزمایش برش مستقیم به منظور تعیین پارامتر مقاومت برشی بر روی نمونه‌های با درزه طبیعی و تأثیر زبری بر آن انجام شد. با تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها بر روی ۵۰ نمونه سنگی آندزیت و با استفاده از معیار شکست خطی موهر کولمب، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی سطح درزه‌ها تعیین شد. نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم در جدول ۲ آورده شده است.

در آزمایش برش مستقیم، نمونه سنگی با درزه طبیعی در جعبه برش تحت تأثیر یک نیروی قائم (Fn) ثابت قرار می‌گیرد. در حین بارگذاری در اثر نیروی برشی، بلوک بالایی بر روی بلوک پایینی می‌لغزد (تصویر ۱). هنگامی که درزه طبیعی تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، پارامترهای مختلفی مانند نیروی برشی، جابجایی برشی، نیروی نرمال و جابجایی نرمال قابل اندازه‌گیری می‌باشند. با انجام



تصویر ۱- آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه سنگی، (الف) آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش، (ب) دستگاه آزمایش برش مستقیم و چگونگی اعمال نیرو

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های آندزیتی با درزه طبیعی

ضریب زبری	مقاومت فشاری	چسبندگی	زاویه اصطکاک	چسبندگی نهایی	زاویه اصطکاک	پارامترهای
سطح درزه	دیواره درزه	باقیمانده	باقیمانده	$c_p$ (Mpa)	نهایی	سطح
(JRC)	JCS (MPa)	$c_r$ (MPa)	$\phi_r$ (درجه)		$\phi_p$ (درجه)	مقدار
۶-۱۸	۳۰-۹۶	۰/۰۱۴-۰/۵	۲۹-۴۴/۶	۰/۰۱۴-۱/۴۸	۲۹-۴۵	

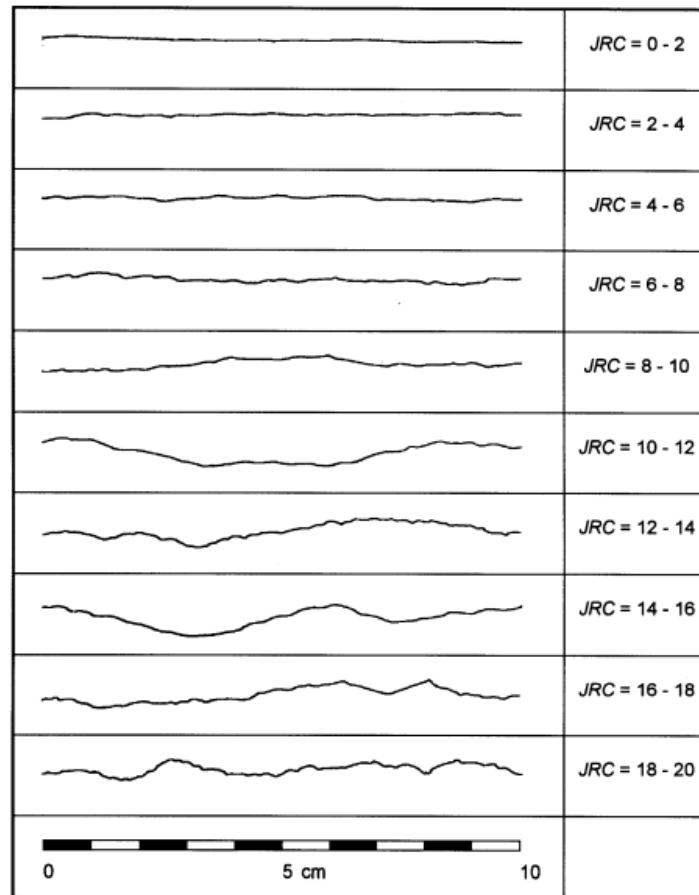
#### ۴- تعیین پروفیل‌های (زبری) سطوح (JRC) درزه

ضریب زبری سطح ابتدا پروفیل زبری درزه‌ها قبل و بعد از آزمایش برای نمونه‌های آندزیتی برداشت شد. برای این کار ابتدا سطح درزه به شبکه شطرنجی تقسیم و با استفاده از ارتفاع سنج، زبری سطح برداشت شد. سپس با مقایسه پروفیل‌های برداشت شده از سطح با پروفیل‌های بارتن و چوبی (Barton & Choubey 1977) که در تصویر ۳ نشان داده شده است، ضریب زبری درزه تعیین شد. تصویر ۲، نحوه برداشت زبری سطح درزه را در آزمایشگاه نشان می‌دهد. نتایج مربوط به زبری سطح درزه برای یکی از نمونه‌ها، قبل و بعد از آزمایش برش در تصاویر ۴ و ۵ نشان داده شده است.

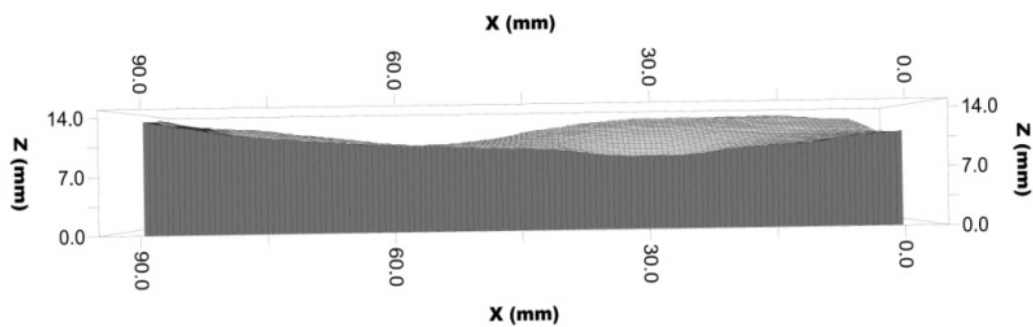
رفتار درزه‌های سنگ در توده سنگ تحت بارهای برشی، نه تنها به اصطکاک بین سطوح ناپیوستگی و مقاومت سنگ دیواره درزه بستگی دارد، بلکه به شکل هندسی و ناهمواری سطح ناپیوستگی‌ها نیز وابسته است. ناهمواری سطح درزه به‌ویژه در سنگ‌های سخت، یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که مستقیماً بر روی مقاومت برشی سطوح درزه تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق ضریب زبری سطح درزه (JRC)، قبل و بعد از آزمایش برش مستقیم اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری



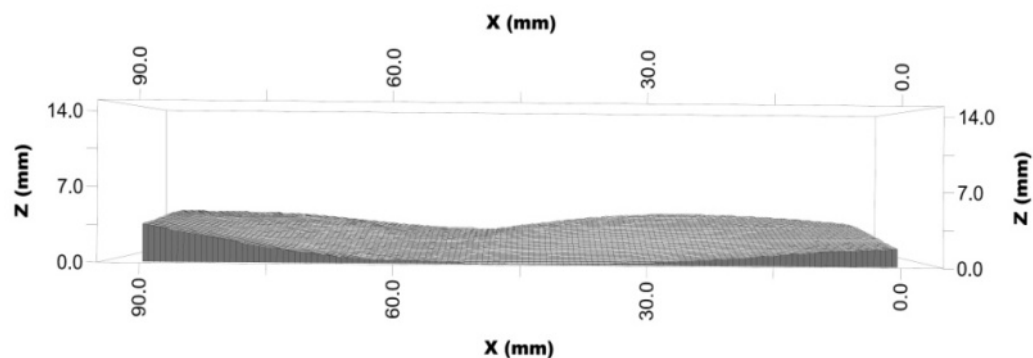
تصویر ۲- نحوه برداشت زبری سطح درزه در آزمایشگاه



تصویر ۳- تعیین مقدار JRC با استفاده از پروفیل‌های بارتن و چوبی (Barton & Choubey 1977)



تصویر ۴- زبری سطوح ناپیوستگی قبل از برش برای نمونه آندزیتی

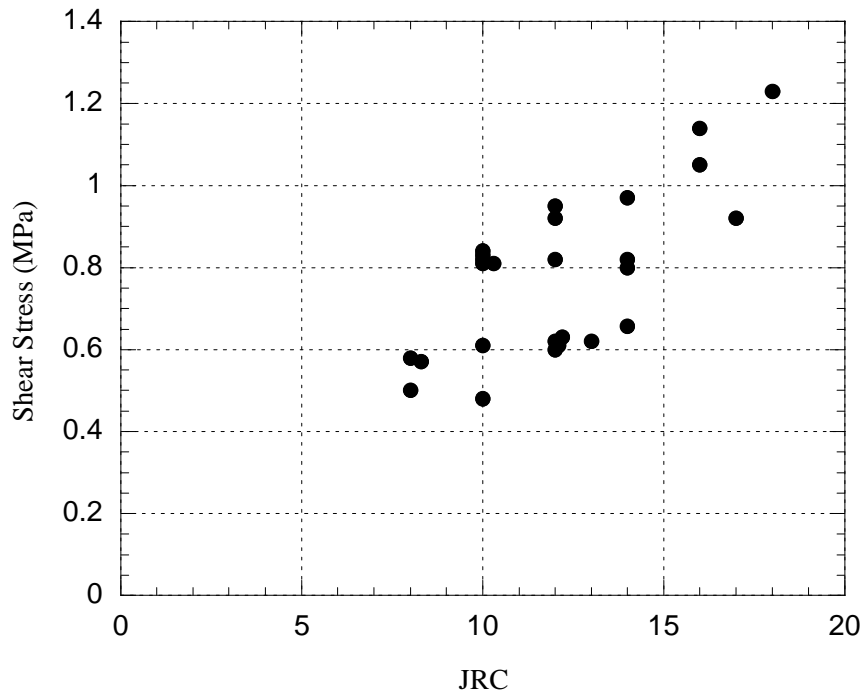


تصویر ۵- زبری سطوح ناپیوستگی بعد از برش برای نمونه آندزیتی

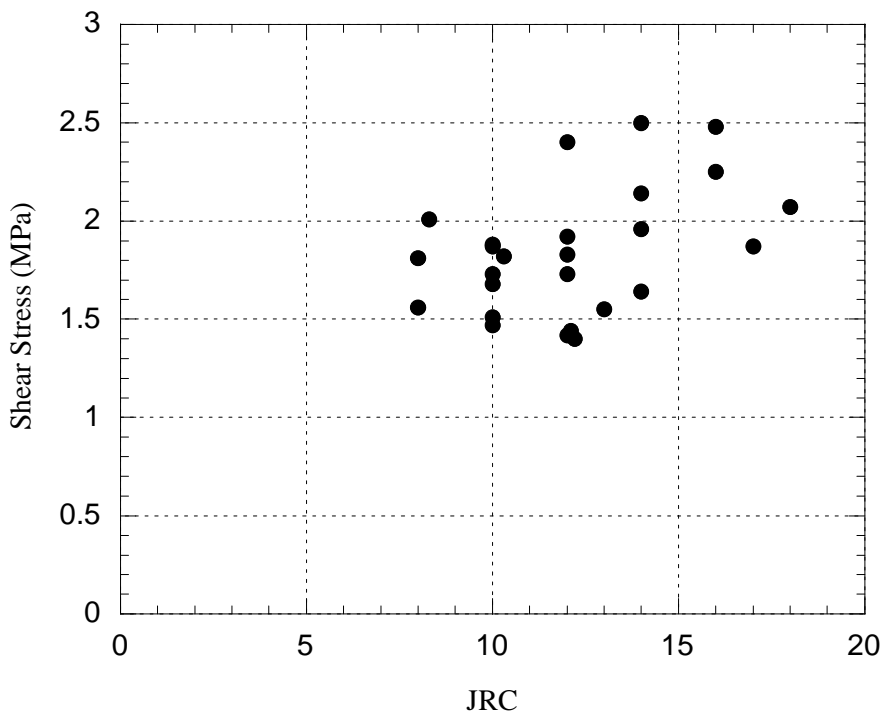
### ۵- بررسی تأثیر ناهمواری‌های سطح درزه بر مقاومت برشی

بر مقاومت برشی نمونه‌های سنگی آندزیت، ارزیابی شد. ارتباط بین ضریب زبری درزه (JRC) و تنش برشی در تصاویر ۶ و ۷ آورده شده است. بر این اساس، با افزایش تنش نرمال، تنش برشی افزایش و تأثیر زبری سطح بر مقاومت برشی کاهش می‌یابد.

بارتن و چوبی (Barton & Choubey 1977) مفهوم ضریب زبری سطح درزه (JRC) را برای بیان ارتباط بین زبری سطح درزه و مقاومت برشی بیان کردند. در این تحقیق، تأثیر زبری سطح درزه با مفهوم ضریب زبری درزه (JRC) در دو سطح تنش نرمال پایین و بالا

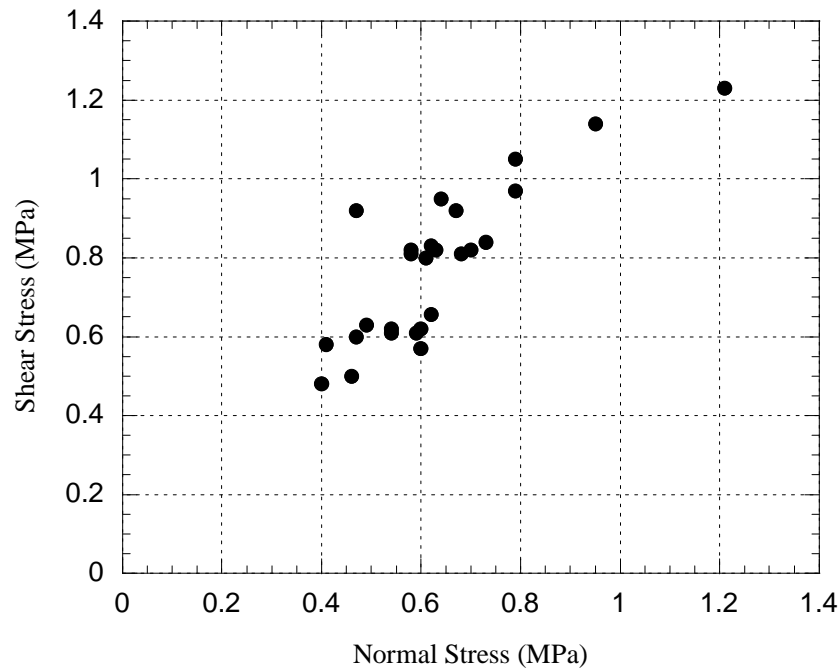


تصویر ۶- ارتباط تنش برشی و ضریب زبری سطح درزه (JRC) در سطح تنش نرمال پایین ( $\sigma_n = 0.2-1.4 MPa$ )

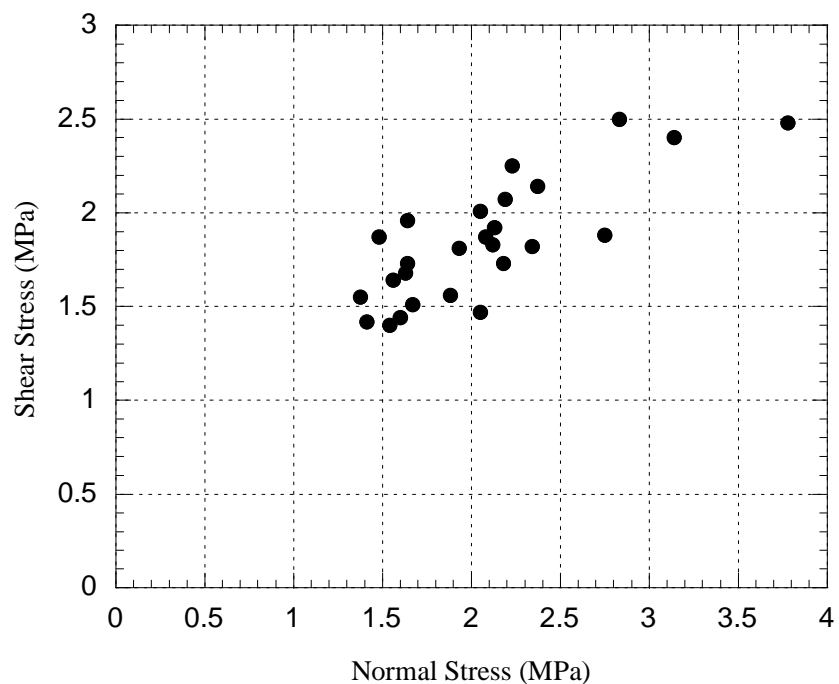


تصویر ۷- ارتباط تنش برشی و ضریب زبری سطح درزه (JRC) در سطح تنش نرمال بالا ( $\sigma_n = 1-4 MPa$ )

همچنین در تصاویر ۸ و ۹، ارتباط بین تنش برشی و تنش نرمال در بر این اساس، با افزایش سطح تنش نرمال، مقاومت برشی نمونه‌ها نیز سطوح مختلف نشان داده شده است. افزایش می‌یابد.



تصویر ۸- ارتباط مقاومت برشی و تنش نرمال در سطح تنش نرمال پایین



تصویر ۹- ارتباط مقاومت برشی و تنش نرمال در سطح تنش نرمال بالا

بین مقادیر تنش برشی حداکثر (Peak Shear Stress) و تنش برشی باقیمانده (Residual Shear Stress) کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تنش نرمال، تنش برشی نیز افزایش می‌یابد. هنگامی که سطح

در تصویر ۱۰، نمودارهای تنش برشی بر حسب جابجایی برشی نشان داده شده است. بر اساس این تصویر، با افزایش تنش نرمال در دو نمونه مختلف (در دو ضریب زبری درزه (JRC) متفاوت)، فاصله

مدل ارائه شده برای درزه با ضریب همبستگی ۰/۶۹۸۴۱ و خطای استاندارد ۰/۱۱۹۸۳ تعیین شد. نتایج مدل در تصویر ۱۱ نشان داده شده است.

تنش نرمال در سطوح درزه با زبری پایین افزایش می‌یابد، فاصله بین تنش برشی نهایی و تنش برشی باقیمانده کمتر از حالتی است که زبری سطوح بالا باشد. تصویر ۱۰، بیانگر آن است که با افزایش زبری در سطح تنش نرمال ثابت، مقاومت برشی نیز افزایش می‌یابد.

#### ۴-۲- معیار توانی (Power curve)

معیار توانی جهت تعیین مقاومت برشی نهایی به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود. (roscience website)

$$\tau_p = a(\sigma_n + d)^b \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه،  $\tau_p$  مقاومت برشی نهایی،  $\sigma_n$  تنش نرمال و  $a$  و  $b$  ضرایب ثابت می‌باشند.

آنالیز رگرسیونی بین مقاومت برشی حاصل از معیار توانی و مقاومت برشی حاصل از آزمایش برش به صورت رابطه ۴ بدست آمد.

$$\tau_{measured} = 0.9597\tau_{power} + 0.038 \quad \text{رابطه (۴)}$$

مدل ارائه شده برای درزه با ضریب همبستگی ۰/۷۰۲۹ و خطای استاندارد ۰/۱۱۹۰۹ تعیین شد. نتایج مدل در تصویر ۱۲ ارائه شده است.

#### ۴-۳- تخمین مقاومت برشی سطوح درزه

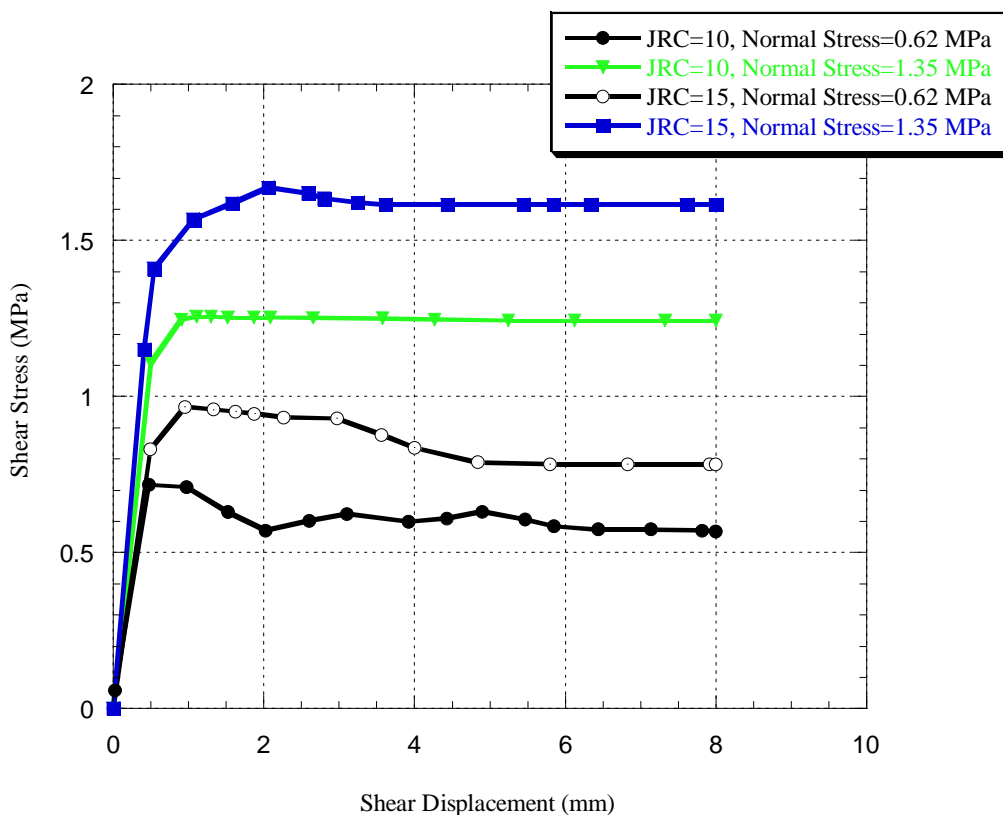
##### ۴-۱- معیار موهر-کولمب (Mohr-Coulomb)

معیار موهر-کولمب، مقاومت برشی خاک و سنگ را به صورت تابع خطی از چسبندگی و تنش نرمال بیان می‌کند. بر اساس این معیار، رابطه بین مقاومت برشی حداکثر بر حسب تنش نرمال از رابطه ۱ بیان می‌شود (Heok 2006).

$$\tau_p = c_i + \sigma_n \tan \phi_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

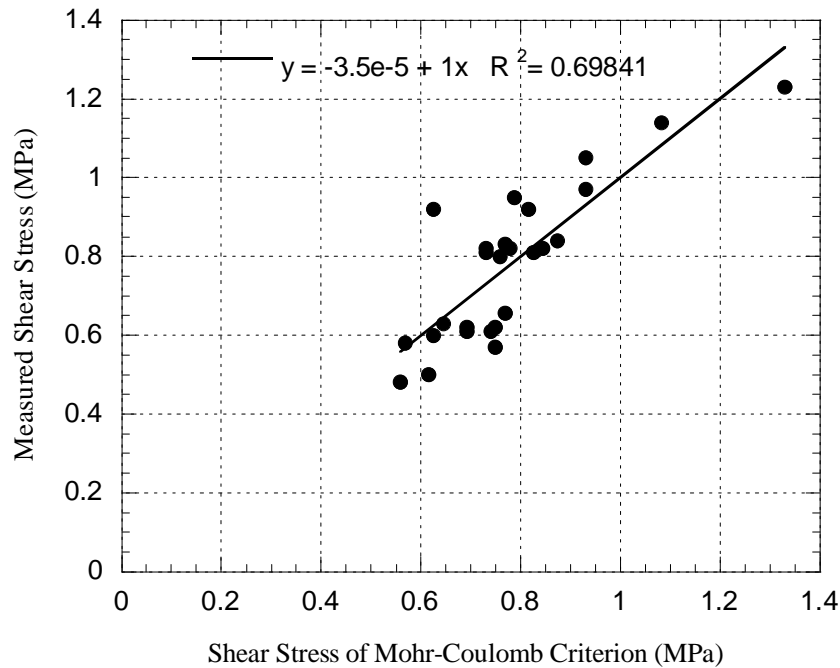
در این رابطه،  $\tau_p$  مقاومت برشی حداکثر،  $c_i$ : چسبندگی،  $\sigma_n$ : تنش نرمال و  $\phi_i$ : زاویه اصطکاک سطح درزه می‌باشد. آنالیز رگرسیونی خطی بین مقاومت برشی حاصل از معیار موهر-کولمب و مقاومت برشی حاصل از آزمایش برش از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$\tau_{measured} = 1\tau_{Mohr-Coulomb} - 3.5 * 10^{-5} \quad \text{رابطه (۲)}$$

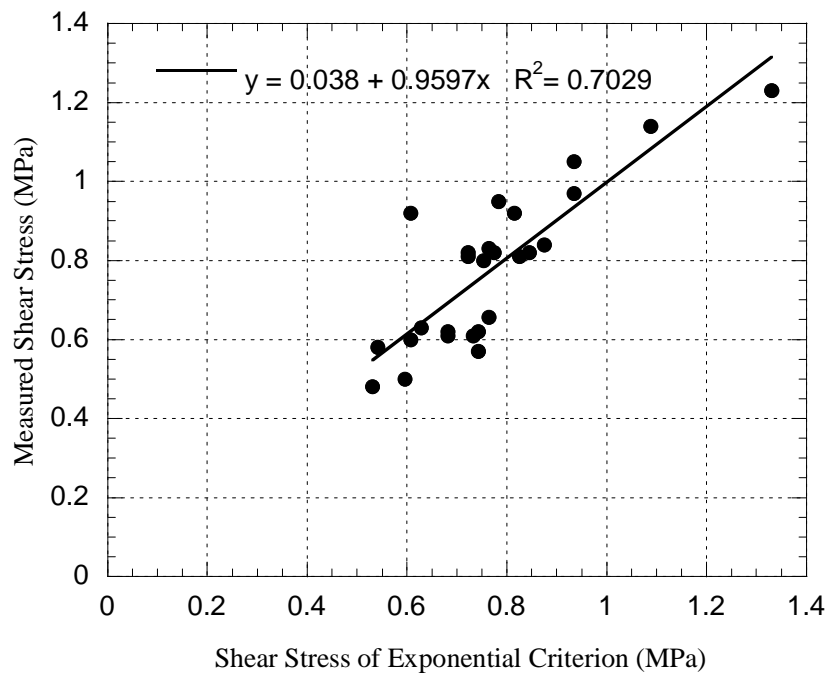


تصویر ۱۰- نمودار تنش برشی - جابجایی برشی سطوح درزه در زبری‌ها و سطوح تنش نرمال متفاوت





تصویر ۱۱- مقایسه مقاومت برشی حاصل از معیار موهر - کولمب و مقاومت برشی حاصل از آزمایش برش



تصویر ۱۲- مقایسه مقاومت برشی حاصل از معیار توانی و مقاومت برشی حاصل از آزمایش برش

#### ۴-۳- معیار تجربی بارتن (Barton)

بارتن (Barton 1971) معیار خود را با در نظر گرفتن تغییرات اتساع درزه با تنش عمودی وارد بر آن و مقاومت برشی سطح درزه را به صورت رابطه ۵ ارائه کرد.

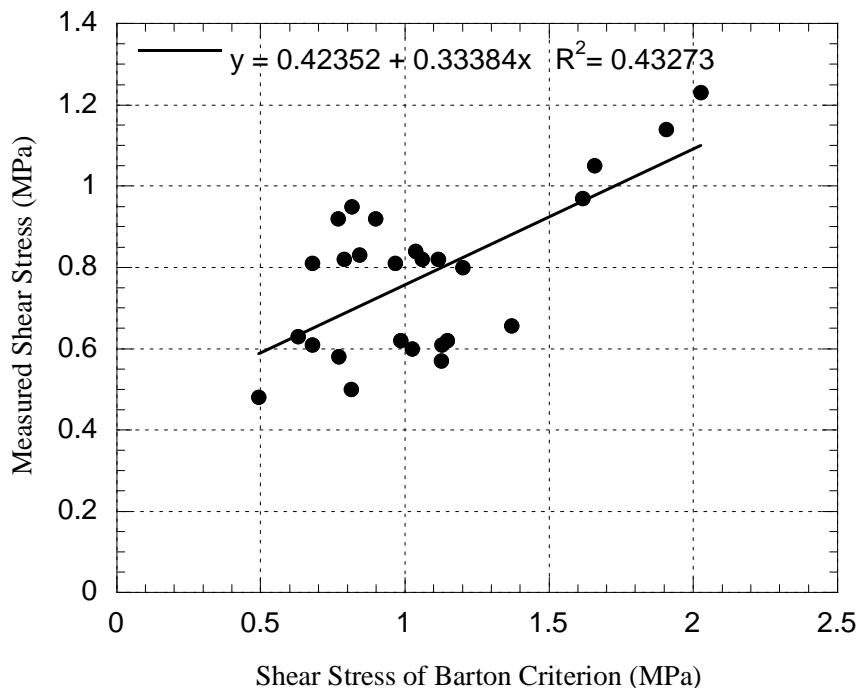
$$\tau_p = \sigma_n \tan \left[ JRC \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه،  $\tau_p$  مقاومت برشی نهایی،  $\sigma_n$  تنش نرمال و JRC ضریب زبری سطح درزه می‌باشد که مقدار آن به طور خطی از ۰ تا

۲۰ برای درزه‌های کاملاً صاف تا درزه‌های خیلی زبر و ناصاف متغیر است. همچنین JRC مقاومت فشاری دیواره درزه و  $\phi_p$  زاویه اصطکاک باقیمانده بر حسب درجه می‌باشد. آنالیز رگرسیونی بین مقاومت برشی حاصل از معیار بارتن و مقاومت برشی حاصل از آزمایش برش به صورت رابطه ۶ بدست آمد.

رابطه (۶)  $\tau_{measured} = 0.33384\tau_{Barton} + 0.42352$

مدل ارائه شده برای درزه با ضریب همبستگی ۰/۴۳۲۷۳ و خطای استاندارد ۰/۱۷۷۲۹۸ تعیین شد. نتایج مدل در تصویر ۱۳ نشان داده شده است.



تصویر ۱۳- مقایسه مقاومت برشی حاصل از معیار بارتن و مقاومت برشی حاصل از آزمایش برش

می‌یابد. نتایج نشان داد که با افزایش تنش نرمال، تأثیر زبری سطح بر مقاومت برشی کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش سطح تنش نرمال در سطوح درزه با زبری پایین، فاصله بین تنش برشی نهایی و تنش برشی باقیمانده نیز کمتر از حالتی است که زبری سطوح بالا باشد. در نهایت، در این مطالعه از مقایسه بین معیارهای مختلف مشخص شد که معیار توانی انطباق بهتری با نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های آندزیتی دارد.

### تشکر و قدردانی

نگارندگان مقاله از دانشگاه صنعتی اصفهان به جهت حمایت علمی و مالی تشکر و قدردانی می‌نمایند.

### مراجع

بنکدار، ع. و مرتضوی، ع.، ۱۳۹۰، " بررسی تأثیر وضعیت سطوح درزه‌ها در مقاومت برشی توده سنگ‌های درزه دار در تحلیل پایداری

پس از انجام آزمایش برش بر روی درزه‌های طبیعی و برداشت نتایج حاصل، به بررسی معیارهای مختلف پرداخته شد. مقادیر مقاومت برشی با استفاده از هر کدام از معیارها تعیین شد. سپس برای مقایسه نتایج و انتخاب بهترین معیار شکست برشی، مقادیر مقاومت برشی بدست آمده از هر کدام از معیارها بر حسب مقاومت برشی حاصل از آزمایش‌های برش رسم شد. نتایج آنالیز آماری نشان داد که معیار توانی نسبت به معیار موهر-کولمب و بارتن ضریب همبستگی بیشتر، خطای استاندارد کمتر و انطباق بهتری با نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های آندزیتی دارد.

### ۷- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم و بررسی اثر زبری (JRC) نمونه‌ها قبل و بعد از برش، ثابت شد که با افزایش زبری، مقاومت برشی سطوح درزه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سطح تنش نرمال بر روی نمونه‌ها، مقاومت برشی آن‌ها نیز افزایش

- Ladanyi, B. & Archambault, G., 1969, "Simulation of the shear behaviour of a jointed rock mass", *The 11th Symposium on Rock Mechanics, Berkeley*: 105–125.
- Lama, R. D. & Vutukuri, V.S., 1978, "Handbook on mechanical properties of rocks (Rock & Soil Mechanics Series)", *Trans Tech publications, Vol. IV*.
- Lee, Y. H., Carr, J. R., Barr, D. J. & Haas, C. J., 1990, "The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 27(6)*: 453-464.
- Li, N., Yang, X. & Zhang, P., 2008, "Surface roughness analysis of rock joints based on a 3D surface model", *In: Boundaries of Rock Mechanics- Cai & Wang (eds), London*: 243-247.
- Patton, F. D., 1966a, "Multiple modes of shear failure in rock", *The 1st Congress of the International Society of Rock Mechanics, Lisbon*: 509– 513.
- Patton, F. D., 1966b, "Multiple modes of shear failure in rock and related materials", *Thesis, University of Illinois*.
- Pratt, H. R., Black, A. D. & Brace, W.F., 1974, "Friction and deformation of jointed quartz diorite", *Proc. 3rd ISRM Int. Congress, Denver, Vol. 2.A*: 306-310.
- Tse, R. & Cruden, D. M., 1979, "Estimating joint roughness coefficients", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 16(5)*: 303-307.
- Wakabayashi, N. & Fukushige, I., 1995, "Experimental study on the Relation between fractal dimension and shear strength", *Fractured and jointed Rock Masses, Myer, Cook, Goodman & Tsang (eds), Balkema. Rotterdam*: 125-131.
- Wyllie, Duncan. C. & Mah, C., 2004, "Rock slope engineering: civil and mining ", *CRC Press, New York, 4 Edition*, 456 pp.
- Yang, Z. Y., Lo, S. C. & Di, C. C., 2001b, "Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using  $Z_2$ ", *Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 34(3)*: 243–251.
- Yang, Z. Y., Di, C. C. & Yen, K. C., 2001a, "The effect of asperity order on the roughness of rock joints", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 38 (5)*:745–752.
- پی سنگ با تاکید بر ساختگاه سدها، "اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاههای برق آبی.
- صدقیانی، م. ح.، خسروی، ع. و خسروی، م.، ۱۳۸۵، "بررسی تأثیر پارامتر جدید بر رفتار برشی ناپیوستگی در توده سنگ با مدل‌های فیزیکی"، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران.
- عسکری، م. و احمدی، م.، ۱۳۸۵، "اثر مقیاس بر روی رفتار برشی درزه سنگ"، هفتمین کنفرانس تونل ایران.
- Asadollahi, P. & Tonon, F., 2010, "Constitutive model for rock fractures: Revisiting Barton's empirical model", *Engineering Geology, Vol. 113(1-4)*: 11–32.
- Babanouri, N., Karimi Nasab, S., Baghbanan, A. & Mohamadi, H.R., 2011, "Over-consolidation effect on shear behavior of rock joints", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 48 (8)*: 1283-1291.
- Barton, N., 1971, "Estimation of in situ shear strength from back analysis of failed rock slopes", *Int. Symp. Rock Mech. Rock Fracture, Nancy*: 11-27.
- Barton, N., 1973, "Review of a new shear -strength criterion for rock joints", *Engineering Geology, Vol. 7(4)*: 287–332.
- Barton, N., 1976, "Rock mechanics review: the shear strength of rock and rock joints", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 13(9)*: 255– 279.
- Barton, N. & Choubey, V., 1977, "The shear strength of rock joints in theory and practice", *Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 10(1-2)*: 1–54.
- Barton, N. & Bandis, S., 1982, "Effects of block size on the the shear behaviour of jointed rock", *23rd U.S. symp. on rock mechanics, Berkeley*: 739-760.
- Brown, E. T., 1981, "Rock characterization, testing and monitoring: ISRM Suggested Methods", *Pergamon Press, 211 pp*.
- Cai-Chu, X., Zhi-Cheng, T., Wei-Min, X. & Ying-Long, S., 2013, "New Peak Shear Strength Criterion of Rock Joints Based on Quantified Surface Description", *Rock Mechanics and Rock Engineering, DOI 10.1007/s00603-013-0395-6*.
- Goodman, R. E., 1975, "Methods of geological engineering in discontinuous rock", *West Group Publication, San Francisco, 484 pp*.
- Grasselli, G. & Egger, P., 2003, "Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters", *International journal of rock mechanics & mining sciences, Vol. 40(1)*: 25-40.
- Heok, E., 2006, "Practical Rock Engineering", *North Vancouver, Canada*.
- <http://www.roscience.com/products/4/feature/172>.
- Jiang, Y., Li, B. & Tanabashi, Y., 2006, "Estimating the relation between surface roughness and mechanical properties of rock joints", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 43*:837–846.
- Kulatilake, P.H.S.W., Um, J. & Pan, G., 1997, "Requirements for accurate estimation of fractal parameters for self-affine roughness profiles using the line scaling method", *Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 30(4)*: 181-206.