

## پیش‌بینی مکانیزم گسیختگی سنگ در شرایط تنش سه‌بُعدی بالا با استفاده از روش‌های تجربی و رگرسیون خطی

اصغر سیاه‌منصوری<sup>۱</sup>، حسین جلالی‌فر<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی نفت، بخش مهندسی نفت و گاز، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استاد، بخش مهندسی نفت و گاز، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: آذر ۱۳۹۷، پذیرش: اردیبهشت ۱۳۹۸)

### چکیده

در معیارهای دو بُعدی گسیختگی، نقش تنش اصلی میانی ( $\sigma_2$ ) کمتر از تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه در نظر گرفته شده و به منظور ساده‌سازی، از معیار گسیختگی حذف شده است. با این حال برخی از شواهد تجربی نشان می‌دهد که تنش اصلی میانی می‌تواند در بعضی از حالت‌ها و حداقل برای برخی از سنگ‌ها، بر روی روند گسیختگی مؤثر باشد. یکی از این موارد، رفتار سنگ‌های مقاوم در شرایط تنش سه‌بُعدی بالا (اعماق زیاد) است. در این مقاله برای بررسی تأثیر تنش اصلی میانی بر روی رفتار گسیختگی سنگ، از نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه محوره واقعی انجام شده بر روی ۱۷۵ نمونه از ۵ نوع سنگ متفاوت، استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد که تأثیر تنش اصلی میانی بر گسیختگی سنگ‌های مقاوم بیشتر از سنگ‌های سست است. همچنین دقت معیارهای سه‌بُعدی فون میزز، دراگر-پراگر و پن و هادسون در تخمین گسیختگی این نمونه‌های سنگی بررسی شد که معیار پن و هادسون با میانگین خطای نسبی  $0/24$  دارای خطای کمتری (دقت بیشتر) بوده و معیارهای فون میزز و دراگر-پراگر در رتبه‌های بعد قرار دارند. سپس با استفاده از روش رگرسیون خطی و غیرخطی معیار سه‌بُعدی جدیدی با مربع ضریب همبستگی  $0/96$  و میانگین خطای نسبی  $0/05$  ارائه شد. در ادامه معیار پیشنهادی برای نتایج آزمایش ۱۹۰ نمونه از ۷ نوع سنگ مختلف دیگر نیز اعتبارسنجی شد که مربع ضریب همبستگی  $0/94$  و میانگین خطای نسبی  $0/06$  حاکی از همبستگی مناسب و دقت بالای این معیار نسبت سایر معیارهای موجود برای پیش‌بینی رفتار گسیختگی سایر سنگ‌ها است.

### کلمات کلیدی

معیار گسیختگی سنگ، آزمایش سه‌محوره واقعی، تنش سه‌بُعدی بالا، روش‌های تجربی، رگرسیون خطی، سنگ‌های عمیق

\* عهده‌دار مکاتبات: [jalalifar@uk.ac.ir](mailto:jalalifar@uk.ac.ir)

## ۱- مقدمه

به طور کلی اعتبار هر معیار گسیختگی به عواملی مانند دقت معیار، فراگیر بودن آن (به معنای کاربرد در محیط‌های مختلف) و عوامل فرعی دیگری مانند سادگی (قابلیت استفاده) رابطه بستگی دارد. برخی از این معیارها برای محیطی محدود و یا یک نوع سنگ خاص کاربرد دارند. مزیت این معیارها این است که در همان محیط محدود یا برای همان نوع سنگ خاص دقت خوبی دارند اما از این جهت که در محیط‌های دیگر قابلیت استفاده ندارند، یک عیب محسوب می‌شود. برخی دیگر از معیارها فراگیرتر بوده و در حوزه گسترده‌تری کاربرد دارند. در این صورت ممکن است دقت آنها کمتر باشد.

یکی از محیط‌هایی که تنش اصلی میانی می‌تواند در گسیختگی سنگ تأثیر قابل توجهی داشته باشد، محیط‌های سنگی با عمق زیاد است. پرداختن به این موضوع وقتی اهمیت ویژه پیدا می‌کند که پیش‌بینی مقاومت و روند گسیختگی سنگ در اعماق زیاد روز به روز در حال افزایش است. در حوزه مهندسی نفت و گاز معیار گسیختگی سنگ در اعماق زیاد کاربرد بسیاری یافته است. موضوعاتی مانند پایداری دیواره چاه‌ها، مخازن و فضاهای ذخیره‌سازی با هدف پیشگیری از شکست و موضوعات دیگری مانند حفاری و عملیات شکافت هیدرولیکی با هدف ایجاد تجمعی شکست در سنگ از جمله این کاربردها است. تا کنون مطالعات مختلفی در خصوص گسترش ترک در محیط‌های سنگی از جمله در اطراف چاه‌های نفت و گاز انجام شده است [۹-۱۲].

در این پژوهش سعی می‌شود تا با مطالعه بر روی نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی که بر روی نمونه‌هایی از سنگ‌های مختلف در اعماق زیاد (اغلب سازندهای هیدروکربوری) انجام شده است، معیار تجربی جدیدی با دقت بیشتر برای توصیف آغاز گسیختگی سنگ ارائه شود. برای این منظور ابتدا با بررسی نتایج آزمایش‌ها، تأثیر تنش‌های اصلی از جمله تنش اصلی میانی بر گسیختگی نمونه‌های سنگی بررسی می‌شود. سپس نتایج این آزمایش‌ها با تعدادی از معیارهای تحلیلی و تجربی شناخته شده مقایسه شده و دقت هر معیار بررسی می‌گردد. در ادامه با استفاده از روش رگرسیون خطی و غیرخطی سعی خواهد شد تا معیاری دقیق‌تر (با ضریب همبستگی بالاتر و خطای کمتر) بر این داده‌ها برازش شود.

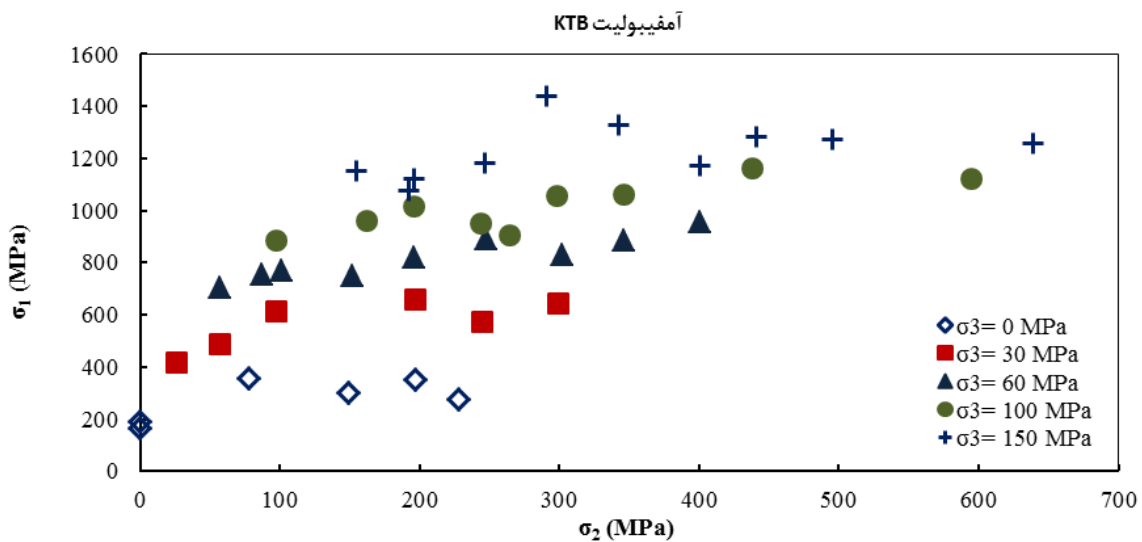
سنگ نیز مانند هر جسم جامد دیگری، در برابر اعمال تنش‌ها تا حدی مقاومت کرده و در نهایت دچار گسیختگی می‌شود. مرز شکست سنگ با معیار گسیختگی بیان شده و در ادامه، روند گسترش شکستگی با معیارهای شکست و بر مبنای علم مکانیک شکست توصیف می‌شود. در واقع معیار گسیختگی معادله‌ای است که بین خصوصیات مقاومتی سنگ و میزان تنش‌ها وجود داشته و برای توصیف رفتار سنگ‌ها تا آغاز گسیختگی استفاده می‌شود. این معادله به صورت یک سطح محدود (تابع) در محور مختصات تنش‌های اصلی تعریف می‌شود [۱]. این تابع بر اساس روش‌های تحلیلی و تجربی مختلف تعیین می‌گردد. فرم کلی معیارهای گسیختگی دو بُعدی معمولاً به صورت رابطه بین تنش‌های اصلی بیشینه ( $\sigma_1$ ) و کمینه ( $\sigma_3$ ) است که گاهی به صورت رابطه بین تنش‌های عمودی و برشی وارد بر سطح شکست سنگ نیز ارائه می‌شود. در معیارهای دو بُعدی نقش تنش اصلی میانی ( $\sigma_2$ ) کمتر از تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه در نظر گرفته شده و به منظور ساده‌سازی، از معیار گسیختگی حذف شده است. برخی از مشهورترین معیارهای دو بُعدی گسیختگی سنگ عبارت است از: معیار کولمب، معیار مور، معیار گریفیث، معیار هوک و براون، معیار بنیاوسکی و ... که برخی از این معیارها تحلیلی بوده و برخی دیگر تجربی است [۵-۱].

با این حال برخی از شواهد تجربی نشان می‌دهد که تنش اصلی میانی می‌تواند در بعضی از حالت‌ها و حداقل برای برخی از سنگ‌ها، بر روی روند گسیختگی مؤثر باشد. معیار ترسکا معروف به معیار بیشینه تنش برشی در سال ۱۸۶۴ توسط وی ارائه شد که سطح تسلیمی به صورت منشور شش وجهی منتظم داشت [۶]. فون میزز معیار گسیختگی سه بُعدی خود را با سطح تسلیم استوانه‌ای به صورت تحلیلی ارائه داد [۶]. پس از آن دراگر و پراگر معیار گسیختگی فون میزز را تعمیم داده و معیار جدیدی تحت عنوان معیار دراگر-پراگر ارائه دادند [۷]. پن و هادسون معیارهای متعددی که در آنها تأثیر تنش اصلی میانی در نظر گرفته شده بود را مرور کرده و یک تغییر سه بُعدی را برای معیار هوک و براون پیشنهاد کردند [۸].

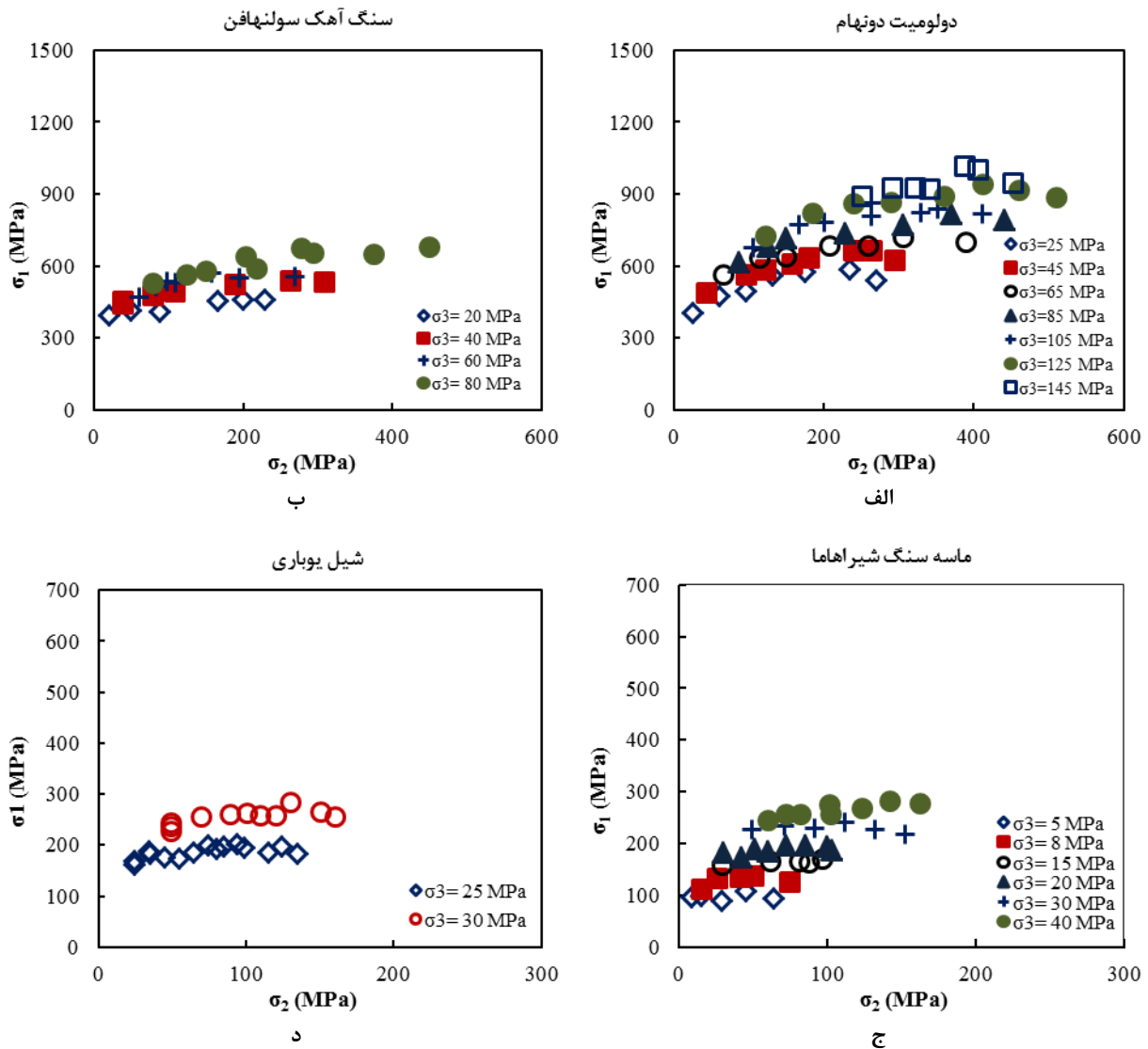
در شکل‌های ۱ و ۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی نمونه‌های سنگی نشان داده شده است. برای نشان دادن نتایج سه‌محوره در تصویر دو بُعدی، در هر شکل چند نمودار رسم شده است که هر نمودار در یک تنش کمینه ثابت، تغییرات تنش بیشینه را نسبت به تغییرات تنش میانی نشان می‌دهد. همان گونه که از این شکل‌ها پیداست، در نمونه‌های سنگی سست‌تر مانند ماسه سنگ شیراهاما و شیل یوباری، نمودارها به یک خط افقی نزدیک‌تر است که نشان می‌دهد تنش میانی تأثیر چندانی بر مقاومت و گسیختگی سنگ ندارد. اما در نمونه‌های مقاوم‌تر مانند دولومیت دونهام، سنگ آهک سولنهافن و آمفیبولیت KTB تغییرات عمودی این نمودارها بیشتر مشاهده می‌شود که به معنی تأثیر بیشتر تنش میانی در این نوع سنگ‌ها است.

جدول ۱: ویژگی‌های مقاومتی نمونه‌های سنگی [۱۳-۱۵]

نمونه سنگی	مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	$\mu (\tan \phi)$	m	s
دولومیت دونهام <sup>۱</sup>	۴۵۰	۰/۶۵	۸	۱
سنگ آهک سولنهافن <sup>۲</sup>	۳۷۵	۰/۵۵	۴/۶	۱
ماسه سنگ شیراهاما <sup>۳</sup>	۹۵	۰/۸	۱۸/۲	۱
شیل یوباری <sup>۴</sup>	۱۲۰	۰/۵	۶/۵	۱
آمفیبولیت KTB <sup>۵</sup>	۳۰۰	۱/۲	۳۰	۱



شکل ۱: نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی روی آمفیبولیت KTB در تنش‌های جانبی مختلف



شکل ۲: نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی روی دولومیت دونهام (الف)، سنگ آهک سولنهافن (ب)، ماسه‌سنگ شیراهاما (ج) و شیل یوباری (د) در تنش‌های جانبی مختلف

پارامتر بی بُعد  $\sigma'_1 = \sigma_1 / \sigma_c$  که در این رابطه‌ها،  $\sigma_{1,2,3}$  تنش‌های اصلی،  $S_{1,2,3}$  تنش‌های انحرافی،  $J_2$  ثابت دوم تنش انحرافی و  $\sigma_v$  تنش فون میزز است. به منظور بررسی دقت معیار فون میزز در پیش‌بینی رفتار پنج نوع سنگ گفته شده، نتایج تخمین معیار فون میزز با نتایج واقعی آزمایش‌ها، در یک پارامتر بی‌بُعد مقایسه شده است. برای این منظور از پارامتر بی‌بُعد نسبت تنش بیشینه به مقاومت فشاری تک محوره استفاده شد که نتایج این مقایسه در شکل ۳ نشان داده شده است. مربع ضریب همبستگی<sup>۶</sup>، میانگین خطای نسبی<sup>۷</sup> و ریشه میانگین مربعات خطای<sup>۸</sup> معیار فون میزز برای این نوع سنگ‌ها به ترتیب برابر ۰/۲۶، ۰/۲۸ و ۰/۹۹ است.

### ۳- پیش‌بینی معیارهای گسیختگی سه‌بعدی موجود از رفتار سنگ در شرایط تنش بالا

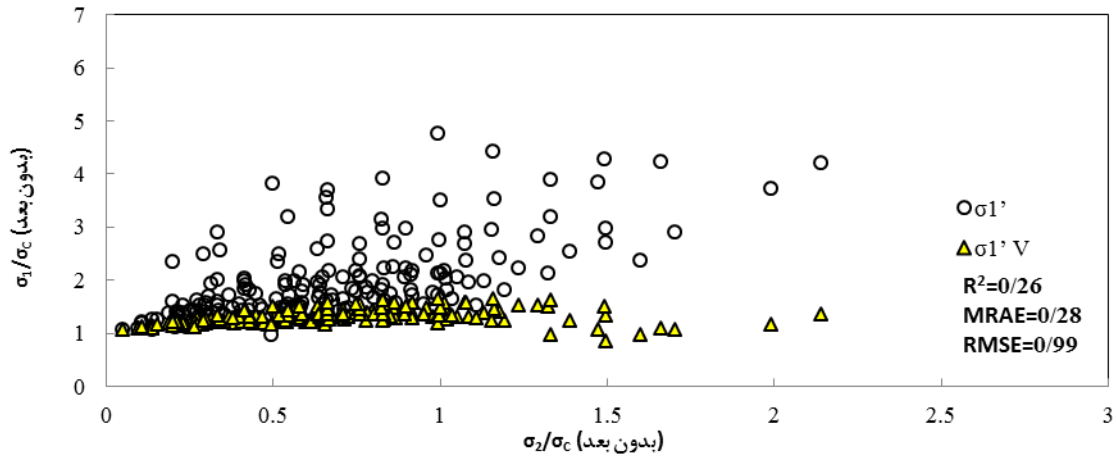
#### ۳-۱- معیار فون میزز

معیار فون میزز به صورت رابطه (۱) ارائه شده است [۶]:

$$J_2 = \frac{\sigma_v^2}{3}$$

$$J_2 = \frac{1}{2}(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2) = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - S)^2 + (\sigma_2 - S)^2 + (\sigma_3 - S)^2] \quad (1)$$

$$S = \sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$



شکل ۳: مقایسه نتایج تخمین معیار فون میزز با نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی

در این رابطه‌ها،  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک محوره،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی،  $J_1$  ثابت اول تنش انحرافی و  $a$  و  $b$  ضرایب معیار دراگر-پراگر است. نتایج مقایسه معیار دراگر-پراگر با نتایج واقعی آزمایش‌ها، در همان پارامتر بی‌بعد که در شکل ۴ نشان داده شده است، مربع ضریب همبستگی، میانگین خطای نسبی و ریشه میانگین مربعات خطا را به ترتیب برابر ۰/۸۲، ۰/۴۴ و ۱/۴۴ نشان می‌دهد.

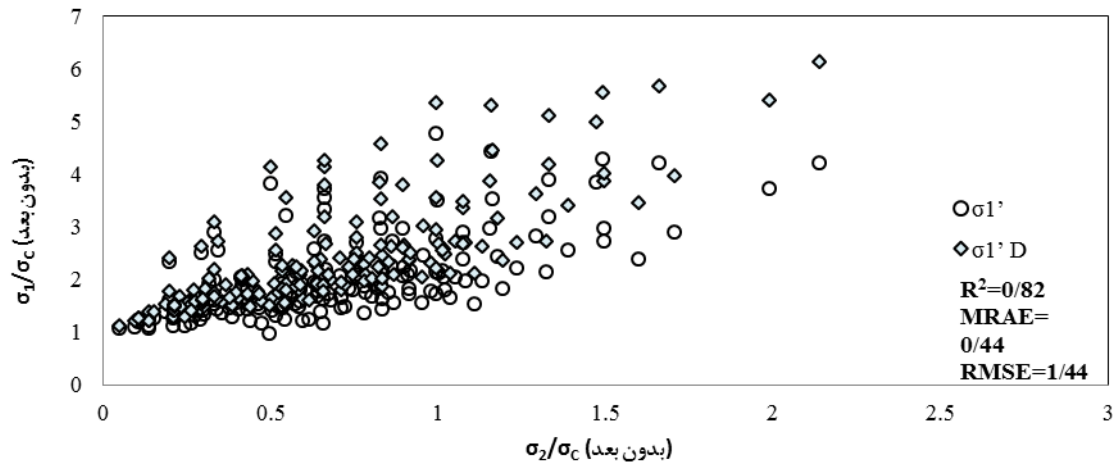
## ۳-۲- معیار دراگر-پراگر

معیار دراگر-پراگر به صورت رابطه (۲) ارائه شده است:

$$J_2^{1/2} = a + bJ_1$$

$$J_1 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

$$a = \frac{\sqrt{3}\sigma_c}{q+2} \quad b = \frac{\sqrt{3}(q-1)}{q+2} \quad q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$



شکل ۴: مقایسه نتایج تخمین معیار دراگر-پراگر با نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی

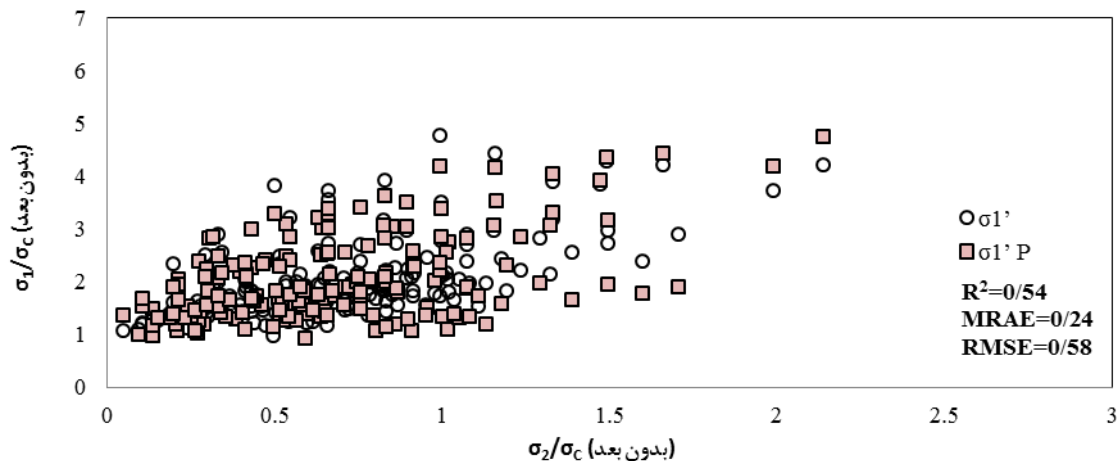
در این رابطه،  $I_1$  ثابت اول تنش‌ها و  $m$  و  $s$  ثابت‌های هوک و براون است. نتایج مقایسه معیار پن و هادسون با نتایج واقعی آزمایش‌ها، در همان پارامتر بی‌بعد که در شکل ۵ نشان داده شده است، مربع ضریب همبستگی، میانگین خطای نسبی و ریشه میانگین مربعات خطا را به ترتیب برابر ۰/۵۴، ۰/۲۴ و ۰/۵۸ نشان می‌دهد.

## ۳-۳- معیار پن و هادسون

معیار پن و هادسون به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود [۸]:

$$3J_2 + m\sigma_c \left[ \frac{\sqrt{3}J_2}{2} - \frac{I_1}{3} \right] = s\sigma_c^2 \quad (3)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$



شکل ۵: مقایسه نتایج تخمین معیار پن و هادسون با نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی

متفاوت تنش‌های بیشینه، کمینه و میانی با اعمال ضرایب متفاوت لحاظ شود. همچنین مقاومت فشاری تک‌محوره ( $\sigma_c$ ) و زاویه اصطکاک داخلی ( $\varphi$ )، پارامترهای مقاومتی این معیار است. این معیار به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

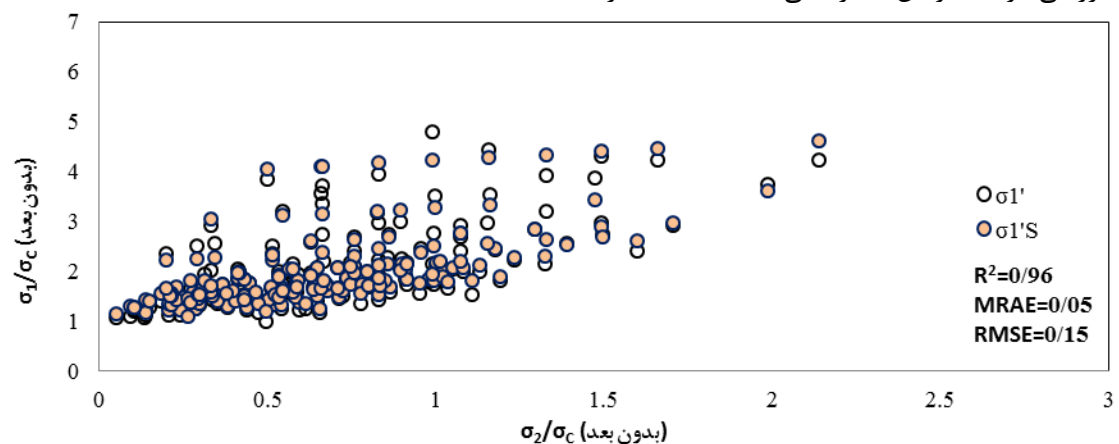
$$\sigma'_1 = 1 + 0.35\sigma'_2 + 0.75q\sigma'_3$$

$$q = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

$$\sigma'_1 = \sigma_1/\sigma_c \quad \sigma'_2 = \sigma_2/\sigma_c \quad \sigma'_3 = \sigma_3/\sigma_c$$

نتایج مقایسه معیار پیشنهادی جدید با نتایج واقعی آزمایش‌ها، در همان پارامتر بی‌بُعد که در شکل ۶ نشان داده شده است، مربع ضریب همبستگی، میانگین خطای نسبی و ریشه میانگین مربعات خطا را به ترتیب برابر ۰/۹۶، ۰/۰۵ و ۰/۱۵ نشان می‌دهد که از دیگر معیارهای بررسی شده همبستگی بهتری داشته و دقت بالاتری را نشان می‌دهد.

$$R^2 = 0.96 \geq 0.82 \geq 0.54 \geq 0.26$$



شکل ۶: مقایسه نتایج تخمین معیار پیشنهادی جدید با نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی

#### ۴- پیش‌بینی رفتار گسیختگی سنگ در شرایط تنش بالا با معیار پیشنهادی جدید

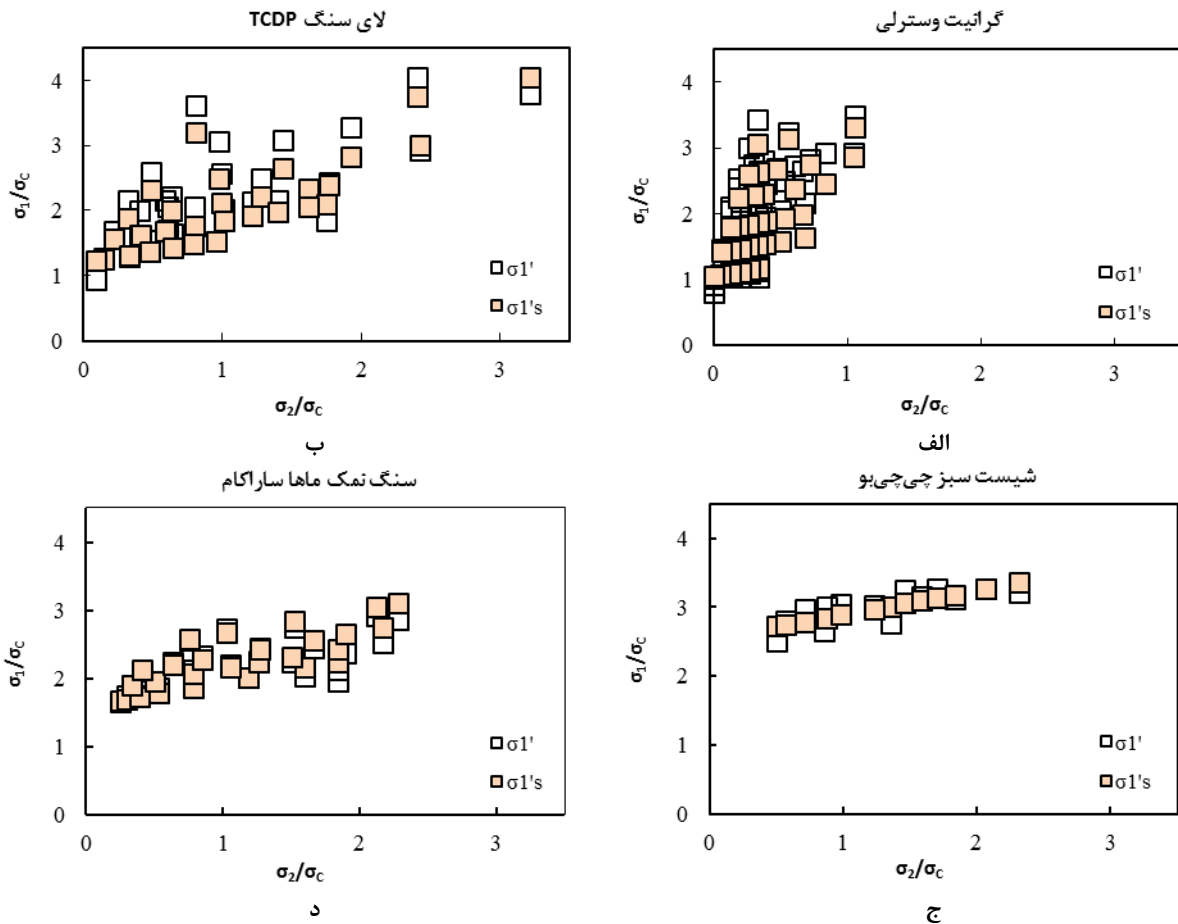
همان‌گونه که نمودارهای بخش ۲ نشان داد، تنش اصلی میانی در شرایط تنش بالا (به ویژه سنگ‌های مقاوم‌تر) تأثیر قابل توجهی در مقاومت نهایی سنگ داشته و نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی را کنترل می‌کند. از طرفی نتایج بخش قبل نشان داده شد، که معیارهای فون میزز، دراکر-پراگر و پن و هادسون به رغم لحاظ نمودن تنش اصلی میانی، در تخمین مقاومت نهایی سنگ تحت شرایط تنش بالا دارای خطای قابل توجه بوده و به عبارتی نمی‌توانند رفتار گسیختگی سنگ تحت این شرایط را به خوبی پیش‌بینی نمایند. از این رو با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی و روش رگرسیون خطی، معیار سه‌بُعدی جدیدی ارائه شده و دقت آن در تخمین مقاومت فشاری سه‌محوره پنج نوع سنگ موجود ارزیابی گردید. در این معیار سعی شده است تا تأثیر

## ۵- اعتبارسنجی معیار پیشنهادی برای سایر سنگ‌ها

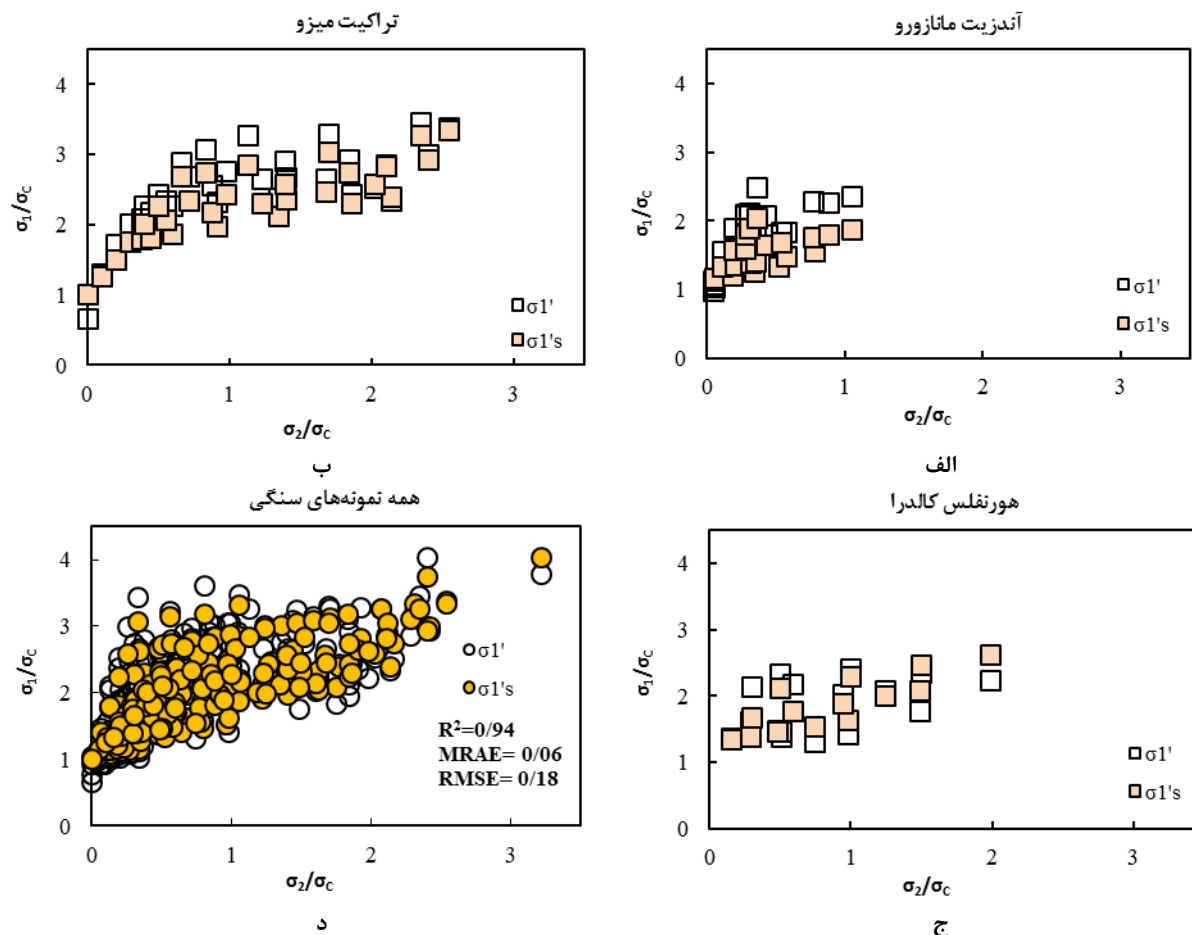
به منظور اعتبارسنجی معیار پیشنهادی برای پیش‌بینی رفتار گسیختگی دیگر سنگ‌ها، نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوری واقعی مربوط به تعداد ۱۹۰ نمونه از هفت نوع سنگ مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از سنگ‌های گرانیت وسترلی<sup>۹</sup>، لای سنگ TCDP<sup>۱۰</sup>، شیست سبز چی‌چی‌بو<sup>۱۱</sup>، سنگ نمک ماها ساراگام<sup>۱۲</sup>،

آندزیت مانازورو<sup>۱۳</sup>، تراکیت میزو<sup>۱۴</sup> و هورنفلس کالدر<sup>۱۵</sup> در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است [۲۶-۱۶].

دقت معیار پیشنهاد شده برای هر یک از هفت نوع سنگ متفاوت بوده ولی در مجموع مقادیر قابل قبولی را ارائه می‌دهد. در جدول ۲ دقت پیش‌بینی معیار پیشنهادی با سایر معیارها در سه شاخص مربع ضریب همبستگی، میانگین خطای نسبی و ریشه میانگین مربعات خطا مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای نمونه‌های سنگی جدید نیز، معیار پیشنهادی ضریب همبستگی و دقت بیشتری را نشان می‌دهد.



شکل ۷: مقایسه نتایج تخمین معیار پیشنهادی جدید با نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی روی گرانیت وسترلی (الف)، لای سنگ TCDP (ب)، شیست سبز چی‌چی‌بو (ج) و سنگ نمک ماها ساراگام (د) در تنش‌های جانبی مختلف



شکل ۸: مقایسه نتایج تخمین معیار پیشنهادی جدید با نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی روی آندزیت مانازورو (الف)، تراکیت میزو (ب)، هورنفلس کالدرا (ج) و همه نمونه‌های سنگی (د) در تنش‌های جانبی مختلف

جدول ۲: مقایسه دقت معیارهای مختلف در پیش‌بینی گسیختگی ۱۹۰ نمونه سنگ جدید

معیار گسیختگی	مربع ضریب همبستگی	میانگین خطای نسبی	ریشه میانگین مربعات خطا
معیار فون میزز	۰/۶۰	۰/۳۶	۱/۰۱
معیار دراگر-پراگر	۰/۷۳	۰/۳۱	۰/۹۵
معیار پن و هادسون	۰/۵۷	۰/۲۱	۰/۶۳
معیار پیشنهادی	۰/۹۴	۰/۰۶	۰/۱۸

سنگ آهک سولنهافن و آمفیبولیت KTB بیش از سنگ‌های سست‌تر مانند ماسه سنگ شیراهاما و شیل یوباری است. این موضوع نشان می‌دهد که جهت پیش‌بینی رفتار گسیختگی سنگ در شرایط تنش بالا باید از معیارهای گسیختگی سه بعدی (با لحاظ نمودن تنش اصلی میانی) استفاده نمود. از این رو به منظور انتخاب معیار مناسب جهت پیش‌بینی رفتار گسیختگی سنگ تحت این شرایط، نتایج تخمین برخی از معیارهای پرکاربرد موجود با نتایج واقعی آزمایش مقایسه گردید که معیار دارکر-پراگر

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری سه‌محوره واقعی که بر روی ۱۷۵ نمونه از پنج نوع سنگ متفاوت در نقاط مختلف انجام شده است، تأثیر تنش اصلی میانی بر رفتار گسیختگی سنگ بررسی شد. این بررسی‌ها نشان داد که تأثیر تنش اصلی میانی بر روی گسیختگی سنگ‌های مقاوم‌تر که معمولاً در اعماق بیشتر و در شرایط تنش بالاتری قرار دارند، مانند دولومیت دونهام،



- [5] Labuz, J. F., and Zang, A. (2012). Mohr–Coulomb failure criterion. *Rock mechanics and rock engineering*, 45(6), 975-979.
- [6] Revil-Baudard, B., and Cazacu, O. (2014). Role of the plastic flow of the matrix on yielding and void evolution of porous solids: Comparison between the theoretical response of porous solids with Tresca and von Mises matrices. *Mechanics Research Communications*, 56, 69-75.
- [7] Drucker, D. C., and Prager, W. (1952). Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of applied mathematics*, 10(2), 157-165.
- [8] Sheorey, P. R. (1997). Empirical rock failure criteria. AA Balkema.
- [9] Hosseini\_Nasab, H., & Fatehi Marji, M. (2007). A semi-infinite higher-order displacement discontinuity method and its application to the quasistatic analysis of radial cracks produced by blasting. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2(3), 439-458.
- [10] Marji, M. F., Siahmansouri, A., & Yarahmadi, A. (2012) LEM approach for the rock failure analysis around circular opening by BEM. 19th European conference on fracture proceeding, Kazan.
- [11] Abdollahipour, A., Marji, M. F., Bafghi, A. Y., & Gholamnejad, J. (2015). Simulating the propagation of hydraulic fractures from a circular wellbore using the Displacement Discontinuity Method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80, 281-291.
- [12] Yousefian, H., Soltanian, H., Marji, M. F., Abdollahipour, A., & Pourmazaheri, Y. (2018). Numerical simulation of a wellbore stability in an Iranian oilfield utilizing core data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 168, 577-592.
- [13] Mogi, K. (1971). Fracture and flow of rocks under high triaxial compression. *Journal of Geophysical Research*, 76(5), 1255-1269.
- [14] Takahashi, M., & Koide, H. (1989, January). Effect of the intermediate principal stress on strength and deformation behavior of sedimentary rocks at the depth shallower than 2000 m. In *ISRM international symposium*. International Society for Rock Mechanics.
- [15] Chang, C., & Haimson, B. (2000). True triaxial strength and deformability of the German Continental Deep Drilling Program (KTB) deep hole amphibolite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B8), 18999-19013.
- [16] Haimson, B., & Chang, C. (2000). A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite. *International*

با مربع ضریب همبستگی  $0/82$  نسبت به معیارهای پن و هادسون ( $R^2 = 0/54$ ) و فون میزز ( $R^2 = 0/26$ )، همبستگی بیشتری را نشان داد. به عبارت دیگر معیار دراگر-پراگر تأثیر تنش اصلی میانی را بهتر از سایر معیارهای موجود منعکس نموده است. همچنین بررسی دقت این معیارها در تخمین مقاومت سه‌محوره این پنج نوع سنگ نشان داد که معیار پن و هادسون با میانگین خطای نسبی  $0/24$  دارای خطای کمتری (دقت بیشتر) بوده و معیارهای فون میزز ( $MRAE=0/28$ ) و دراگر-پراگر ( $MRAE=0/44$ ) در رتبه‌های بعد قرار دارند. در ادامه با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت سه‌محوره واقعی موجود (۱۷۵ نمونه از پنج نوع سنگ) و روش رگرسیون خطی و غیرخطی معیار سه‌بُعدی جدیدی ارائه شد که معیار پیشنهادی با مربع ضریب همبستگی معادل  $0/96$  همبستگی بسیار بیشتری از معیارهای موجود داشته و اثر تنش اصلی میانی و به عبارتی واقعیت موجود در نتایج واقعی آزمایش را بسیار بهتر نمایان ساخته است. علاوه بر این، میانگین خطای نسبی در نتایج تخمین معیار پیشنهادی معادل  $0/05$  بوده که نسبت به معیار پن و هادسون (دقیق‌ترین معیار موجود)، در حدود پنج برابر دقیق‌تر است. پس از آن به منظور اعتبارسنجی معیار پیشنهادی برای سایر سنگ‌ها، نتایج ۱۹۰ آزمایش مقاومت سه‌محوره واقعی از هفت نوع سنگ مختلف دیگر با نتایج تخمینی معیار جدید مقایسه گردید که مربع ضریب همبستگی و میانگین خطای نسبی به ترتیب برابر با  $0/94$  و  $0/06$  بیانگر همبستگی مناسب و دقت بالای معیار پیشنهادی برای پیش‌بینی رفتار گسیختگی سایر سنگ‌ها است.

## مراجع

- [1] Goodman, R. E. (1989). Introduction to rock mechanics (Vol. 2). New York: Wiley.
- [2] Griffith, A. A. (1924). The theory of rupture. In *Proc. First Int. Congr. Appl. Mech.*
- [3] Bieniawski, Z. T. (1974). Estimating the strength of rock materials. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 74(8), 312-320.
- [4] Hoek, E. and Brown, E. T. (1989). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 106 (GT9), 1013-1035.

Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37(1-2), 285-296.

[17] Haimson, B. (2006). True triaxial stresses and the brittle fracture of rock. *Pure and Applied Geophysics*, 163(5-6), 1101-1130.

[18] Oku, H., Haimson, B., & Song, S. R. (2007). True triaxial strength and deformability of the siltstone overlying the Chelungpu fault (Chi-Chi earthquake), Taiwan. *Geophysical research letters*, 34(9).

[19] Chang, C., & Haimson, B. (2012). A failure criterion for rocks based on true triaxial testing. In *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014* (pp. 259-262). Springer, Cham.

[20] Li, X., Du, K., & Li, D. (2015). True triaxial strength and failure modes of cubic rock specimens with unloading the minor principal stress. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(6), 2185-2196.

[21] Mogi, K. (2007). *Experimental rock mechanics* (Vol. 3). CRC Press.

[22] Kwasniewski, M., Li, X., & Takahashi, M. (Eds.). (2012). *True triaxial testing of rocks* (Vol. 4). CRC Press.

[23] Sriapai, T., Walsri, C., & Fuenkajorn, K. (2013). True-triaxial compressive strength of Maha Sarakham salt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61, 256-265.

[24] Kapang, P., Walsri, C., Sriapai, T., & Fuenkajorn, K. (2013). Shear strengths of sandstone fractures under true triaxial stresses. *Journal of Structural Geology*, 48, 57-71.

[25] Kaunda, R. (2014). New artificial neural networks for true triaxial stress state analysis and demonstration of intermediate principal stress effects on intact rock strength. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(4), 338-347.

[26] Hao, T. S., & Liang, W. G. (2016). A new improved failure criterion for salt rock based on energy method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(5), 1721-1731.

<sup>1</sup> - Dunham Dolomite

<sup>2</sup> - Solenhofen Limestone

<sup>3</sup> - Shirahama Sandstone

<sup>4</sup> - Yuubari Shale

<sup>5</sup> - KTB Amphibolite

<sup>6</sup> - Squared Correlation Coefficient (RSQ or R<sup>2</sup>)

<sup>7</sup> - Mean Relative Absolute Error (MRAE)

<sup>8</sup> - Root Mean Square Error (RMSE)

<sup>9</sup> - Westerly Granite

<sup>10</sup> - TCDP Siltstone

<sup>11</sup> - Chichibu Green Schist

<sup>12</sup> - Maha Sarakham Salt

<sup>13</sup> - Manazuru Andesite

<sup>14</sup> - Mizuho Trachyte

<sup>15</sup> - Caldera Hornfels