

(پژوهشی)

برآورد مقاومت توده‌سنگ با شبکه شکستگی‌های بالقوه شکست در روش اجزای مجزا- رویکرد ورونویی

هادی فتحی‌پور آذر^۱، سیدمحمداسماعیل جلالی^{۲*}، سیدرحمان ترابی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت: آذر ۱۳۹۷، پذیرش: تیر ۱۳۹۸)

چکیده

به طور کلی تمام مدل‌های ارائه شده برای لحاظ شبکه شکستگی‌ها در توده‌سنگ، شکستگی‌های بالفعل موجود در توده‌سنگ با مقاومت کششی صفر است. در حالی که، شبکه‌ای از سطوح ضعیف از جمله پل‌های سنگی، رگچه‌ها، سطوح تورق و غیره گزینه‌های اصلی برای شکست در اثر تنش‌های القایی ایجاد شده دارای مقاومت برشی و کششی هستند. به همراه پارامترهای هندسی شبکه سطوح ضعیف ناپیوستگی‌ها، طبیعت ناهمگن پارامترهای مکانیکی ناپیوستگی‌ها برای فهم رفتار توده‌سنگ بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، تاثیر شبکه سطوح بالقوه مذکور بر مقاومت توده‌سنگ با استفاده از رویکرد شبکه شکستگی بالقوه- مدل ورونویی نرم‌افزار اجزای مجزا مطالعه شده است. در این راستا، شبکه شکستگی بالقوه کدنویسی و تابع توزیع برای پارامترهای ژئومکانیکی شکستگی‌ها بالقوه نیز در نظر گرفته شده است. با این رویکرد، سطوح ضعیف و بالقوه که پتانسیل بودن به صورت شکستگی را دارند نیز در شبکه شکستگی در نظر گرفته می‌شوند. سپس برای مطالعه، چهار گروه شبکه شکستگی بالقوه در نظر گرفته شد. به منظور مقایسه نتایج با حالت پایه یعنی استفاده از مقدار میانگین و حالات دیگر، پنج حالت مختلف برای یک حالت انحراف استاندارد تابع توزیع و بیول در نظر گرفته و در آخر شبکه شکستگی بالقوه مدلسازی و بررسی شد. نتایج بیانگر اهمیت رویکرد پیشنهادی برای ارزیابی مناسب‌تر مقاومت توده‌سنگ با در نظر گرفتن شبکه شکستگی‌های بالقوه است.

کلمات کلیدی

شبکه شکستگی مجزا بالقوه، تحلیل آماری، پارامتر مکانیکی شکستگی، رویکرد ورونویی، مدلسازی عددی

* عهده‌دار مکاتبات: jalalime@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

توده سنگ به طور معمول به دلیل ساختارهای تشکیل دهنده مانند ناپیوستگی‌ها (مانند ترک، درزه، سطوح ضعیف، گسل) ماهیت ناهمگن پیچیده‌ای دارد. رویکرد شبکه شکستگی مجزا ماهیت پیچیده‌ای از الگو و توزیع شبکه شکستگی‌ها را در نظر می‌گیرد و نقش بسیار مهمی در فهم رفتار میکرومکانیکی [۱] ماکرومکانیکی [۳،۲] توده سنگ دارد. در برخی موارد مانند روش‌های معدنکاری تخریب توده‌ای و آشکاری نیاز به ایجاد و توسعه ناپیوستگی‌ها در توده سنگ است. برای مثال در روش معدنکاری تخریب توده‌ای، برآورد تخریب‌پذیری و خرد شوندگی توده سنگ و در نتیجه خارج شدن مواد معدنی از نقاط تخلیه، از نظر موفقیت‌آمیز بودن عملیات معدنکاری بسیار حایز اهمیت است [۴]. در مقابل، مسایل مکانیک سنگی دیگری نیز وجود دارند که در آنها اصرار بر کاهش توسعه ناپیوستگی‌ها و عدم تشکیل ناپیوستگی‌های جدید است. برای مثال، ملاحظات مربوط به ارزیابی پایداری شیب‌های معادن روباز و پایداری فضاهای زیرزمینی از این دسته مسایل هستند.

تحقیقات علمی بسیار زیادی برای توسعه و تولید شبکه شکستگی از زمان معرفی آن یعنی اواسط دهه ۱۹۶۰، تا به حال شده است [۵]. مدل‌های مفهومی متفاوتی از شبکه شکستگی‌های مجزا وجود دارند، که هر کدام بر اساس روابط خاص بین ویژگی‌های هندسی مانند مرکز، نوع پایایی و غیره شبکه شکستگی‌ها است. مدل اولیه (مدل ارتوگونال) برای نمایش سیستم‌های شکستگی بر اساس اینکه تمام شکستگی‌ها می‌تواند به صورت سه دسته شکستگی نامتصل عمود برهم باشند، ارائه شد [۶]. مدل پایه تعریف شده شامل دسته‌های عمود بر هم از شکستگی‌های نامتصل موازی بود [۵]. مدل دیسک بیچر^۱ که یکی از اولین توصیف‌گرهای شبکه شکستگی و متداولترین مدل تولید شبکه شکستگی است [۷،۸]. در مدل معمولی بیچر، مراکز شکستگی به صورت یکنواخت با روند پواسونی در محیط تعیین و شکستگی‌ها به صورت دیسک‌هایی با توزیع‌های شعاع و شیب اختصاص یافته، تولید می‌شوند. مدل معمولی بیچر برای لحاظ پایایی شکستگی در تلاقی با شکستگی‌های اولیه و برای اشکال شکستگی عمومی توسعه بیشتری یافت (مدل ارتفاع یافته

بیچر [۹] و مدل بارت^۲ [۱۰]). مدل چهارضلعی پواسون، نسخه ساده‌ای از مدل بیچر ارتفاع یافته است که شکستگی‌ها با طول و عرض به جای دیسک‌های چند ضلعی با شعاع تاثیر نمایش داده می‌شوند [۱۱]. مدل نزدیک‌ترین همسایگی مانند مدل بیچر ارتفاع یافته است اما مفروضات متفاوت در مورد توزیعات مکانی شکستگی‌ها دارند [۹]. از مفهوم صفحه شکستگی پواسونی در شکستگی‌های متصل استفاده شد (مدل وینزیانو^۳) [۱۲]. بر اساس اینکه تلاقی و لبه‌های شکستگی‌ها هم‌زمان نباشد، معایب مدل وینزیانو برطرف گردید [۱۳]. مدل سه‌بعدی (مدل شکستگی سه‌بعدی مرتبه‌ای) خاصی برای تولید سیستم‌های شکستگی بر اساس پروسه‌های صفحه و خط پواسون توسعه یافت که در نتیجه به مدل‌های توسعه یافته اولیه وینزیانو و دیرشوینتز^۴ ارتباط دارد [۱۴،۱۵]. مدل ناحیه فعال بر اساس اینکه هندسه داخلی ناحیه برشی که شدت شکستگی زیادی به علت تشکیل شکستگی‌های برشی هم‌گروه بین گسل موازی دارند، ارائه شده است [۹]. مدل زمین‌آماری بر اساس این فرض که موقعیت شکستگی‌ها و ویژگی‌های هندسی و هیدرومکانیکی دیگر آنها رابطه مکانی دارند، ارائه شد [۱۶]. زمانی که هیستوگرام کمیت به صورت کاهشی است، توزیع توانی و زمانی که رابطه مکانی بین اهداف با اندازه مختلف بیانگر نظم خارج از ناحیه مشهود است، هندسه فرکتالی مدل ریاضی مفیدی است [۱۷]. جذابیت مدل هندسی فرکتالی به خاطر این است که این رویکرد مستقل از ابعاد مشاهدات است. چندین مدل فرکتالی که در روند تولید شکستگی از روند و الگوریتم‌های مربوطه استفاده می‌کنند ارائه شده‌اند [۹،۱۰]. از شناخته‌شده‌ترین برنامه‌های کامپیوتری شبکه شکستگی‌ها می‌توان به FracMan، FracMesh، FracSim3D، NAPSاک، FRACA اشاره کرد.

مطالعه اخیر نشان داده است که احتمال شکست در سطوح ضعیف بالقوه‌ای به غیر از سطوح مشخص بالفعل ناپیوستگی (برای مثال درزه)، وجود دارد [۴]. از طرف دیگر و به طور کلی، برای ناپیوستگی‌ها، چسبندگی و تنش کششی صفر در نظر گرفته می‌شود. در حالی که مطالعات آزمایشگاهی و میدانی وجود مقادیری برای این سطوح ناپیوسته را نشان داده است [۴،۱۸،۱۹]. وجود شبکه‌ای از این سطوح ضعیف بالقوه که اغلب در نگاه اول قابل مشاهده نیستند بیشترین تاثیر را در خردشوندگی اولیه و

میدانی و تحلیل‌های آماری از ویژگی‌های شکستگی‌ها مانند طول، زاویه قرارگیری، شدت و غیره شکستگی‌ها به دست آمده از اندازه‌گیری‌های برجا است. برای تولید مدل شبکه شکستگی آماری در توده‌سنگ، به تعریف ویژگی‌های سیستم شکستگی‌های بالفعل و بالقوه به صورت توزیعی نیاز است. علاوه بر این همانند پارامترهای هندسی، نه تنها پارامترهای مقاومتی برای هر دسته شکستگی بالفعل و بالقوه با یکدیگر متفاوت خواهد بود، بلکه در هر دسته شکستگی، ویژگی‌های مقاومتی توزیعی خواهند بود. بنابراین مدل پیشنهادی، توزیع آماری از پارامترهای مکانیکی شبکه شکستگی‌های بالقوه را با استفاده از تابع چگالی به دست آمده از اندازه‌گیری‌های برجا در شبکه شکستگی مرسوم در نظر می‌گیرد.

همان گونه که در مقدمه گفته شد، مدل‌های مختلفی برای مدلسازی بهتر شبکه شکستگی‌ها ارائه شده‌اند. به طور خلاصه، مراحل ساخت شبکه شکستگی بالقوه که در این مطالعه کدنویسی شد به صورت زیر است:

- (۱) انتخاب ناحیه و تعداد تکرار شبکه شکستگی
- (۲) تولید هندسه شبکه شکستگی (مرکز، شیب، طول و غیره) و پارامترهای مکانیکی مربوط به هر شکستگی بر اساس تابع توزیع هر دسته شکستگی
- (۳) تکرار مرحله دو برای تمام دسته‌های شکستگی با استفاده از روش مونت کارلو. با استفاده از شبیه‌ساز مونت کارلو برای هر ترکیبی از این پارامترها شبکه شکستگی منحصر بفردی تولید خواهد شد.

به علت محدودیت در بیشینه تعداد مواد تعریفی قابل استفاده در برنامه اجزای مجزا UDEC (۵۰ نوع)، ۴۸ نوع مواد مختلف برای دسته شکستگی در این مقاله در نظر گرفته می‌شود. زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و تنش کششی به عنوان پارامتر مقاومتی شکستگی بالفعل در این تحلیل‌ها در نظر گرفته می‌شود. اگر امکان برداشت اطلاعات دقیق و جزئی از تغییرات سایر پارامترها وجود داشته باشد، می‌توان آنها را نیز در نظر گرفت. به هر حال، مطالعه پیش رو به تاثیر پارامترهای مقاومت برشی و کششی پرداخته و پایه‌ای برای تحقیقات بیشتری برای در نظر گرفتن تغییرات سایر پارامترها در آینده نیاز خواهد بود.

در روش مونت کارلو، عدد تصادفی تولید شده بین صفر و یک از توزیع یکنواخت به این معنی است که احتمال تولید هر عددی برابر است. بنابراین برای تابع توزیع

ثانویه توده‌سنگ در روش‌های استخراج تخریبی خواهند داشت [۴]. در نتیجه توزیع مکانی پارامترهای مکانیکی توده‌سنگ ناهمگن در شبکه سطوح ناپیوستگی بالقوه به صورت صفر و یا یک مقدار نخواهد بود. به هر حال با وجود پیشرفت‌های که در توسعه و استفاده از شبکه شکستگی‌های مجزا وجود دارد [۲۰، ۲۱]، تاکنون نه تنها موضوع ناپیوستگی بالقوه در مدل شبکه شکستگی‌ها و در خود شبکه شکستگی‌ها لحاظ نشده بلکه در مدلسازی‌های عددی نیز در نظر گرفته نشده است. همچنین مطالعه مشخصی در مورد این رویکرد بر خروجی مورد نظر وجود ندارد. به طور معمول پیش‌فرض‌هایی از ناپیوستگی‌های بالفعل با مقاومت کشش صفر در نظر گرفته می‌شود. این ساده‌سازی‌ها محدودیت‌های جدی بر توانایی مدلسازی رفتار واقعی توده‌سنگ، تحمیل می‌کند. به هر حال، شبکه شکستگی‌های بالقوه از اهمیت اساسی برخوردار بوده و نقش بسیار مهمی در برآورد مقاومت توده‌سنگ دارد. از اینرو برای مدلسازی دقیق توده‌سنگ باید رویکرد شبکه شکستگی‌ها بالقوه نیز در نظر گرفته شود.

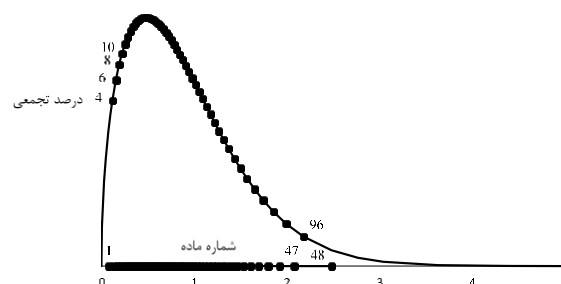
در این مقاله، مدل شبکه شکستگی بالقوه برای شبیه‌سازی واقعی‌تر شبکه شکستگی‌های مجزا در توده‌سنگ ارائه شده است. برای نیل به این هدف، شبکه شکستگی مجزا در محیط ++C نوشته می‌شود و توابع توزیع مربوط به پارامترهای مکانیکی شبکه شکستگی‌ها نیز اضافه می‌گردد. سپس خروجی این مرحله در نرم‌افزار اجزای مجزا فراخوانی می‌شود. در مدلسازی عددی با استفاده از رویکرد ورونوبی، محیط به صورت مجموعه‌ای از اجزای کوچک الاستیک به هم چسبیده مدلسازی می‌گردد که امکان رشد و گسترش شکستگی با توجه به خصوصیات بین این اجزا و مدل رفتاری تعریف شده سطوح تماسی بین این اجزا وجود دارد. برای مدل رفتاری، مدل اجزای چسبنده در محیط فیش برنامه‌نویسی می‌گردد و به این سطوح تماسی اختصاص داده می‌شود. در آخر، تاثیر شبکه شکستگی بالقوه شکست با توزیع زاویه اصطکاک، چسبندگی و تنش کششی در شبکه شکستگی بر مقاومت توده‌سنگ بحث و بررسی می‌شود.

۲- شبکه شکستگی مجزا

رویکرد شبکه شکستگی مجزا توصیفی از سیستم ناپیوستگی‌های توده‌سنگ بر اساس اندازه‌گیری‌های

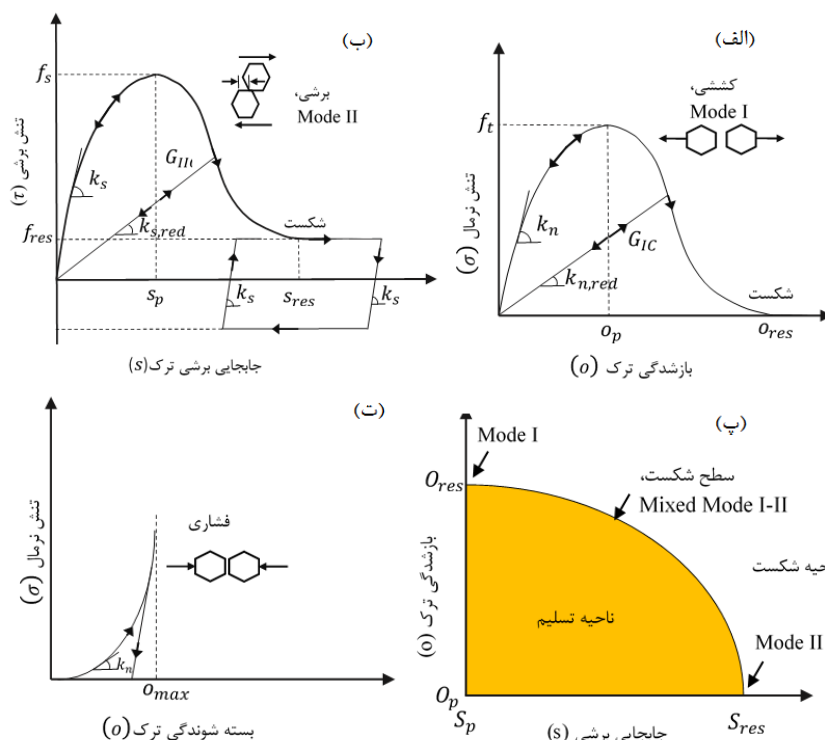
شکست در نمونه سنگی با نمایش صریح رشد و گسترش ترک بین سطوح تماسی اجزای کوچک (در اینجا ورونویی) در شرایط کشش یا برشی و یا ترکیبی از این دو حالت بر اساس مفاهیم مکانیک شکست غیر خطی و با کدنویسی در محیط فیش شبیه‌سازی می‌شود (شکل ۲). مدل کدنویسی شده در این مقاله مشابه مدل ارائه شده در [۲۲] است و ویژگی باربرداری و بارگذاری مجدد بعد از شکست نیز در این مطالعه به این مدل اضافه شده است. بر اساس این مدل، احتمال شکست در سطوح تماسی با توجه به تنش جابجایی‌های نسبی سطوح محلی وجود دارد. با توجه به شکل ۲- الف و ۲- ب، قسمت‌های غیرخطی منحنی تنش- کرنش بیانگر رفتار سطوح تماسی به دلیل کاهش سختی به علت وضعیت خرابی ناشی از گسترش خرابی در سطوح تماسی است قبل از شکست تا تنش بیشینه است. بعد از این ناحیه، قسمت نرم‌شوندگی مواد به علت جمع شدن خرابی و در نتیجه از بین رفتن انرژی است.

مفروض، برای مثال توزیع نرمال، به ۴۸ بخش با احتمال تجمعی برابر یعنی مساحت برابر تقسیم می‌شود (شکل ۱). از آنجایی که مساحت هر بخش برابر است، هر نوع ماده احتمال برابری برای تولید در شبیه‌ساز مونت کارلو خواهند داشت. میانگین تجمعی هر ناحیه معرف آن ناحیه در نوع مواد تولیدی (۱ تا ۴۸ ماده از همان تابع توزیع) برای ویژگی مورد نظر اختصاص داده می‌شود.



شکل ۱: تعداد و موقعیت ماده اختصاصی در تابع توزیع ویبول

۳- مدل رفتاری حاکم بر شکست سطوح اجزا



شکل ۲: مدل رفتاری سطوح تماسی چسبیده تحت شرایط کششی (الف)، برشی (ب)، ترکیبی (پ) و فشاری (ت)

در رابطه (۱)، e لگاریتم پایه، k_n و k_s معرف سختی نرمال و برشی اولیه و f_t و f_s معرف مقاومت کششی و معرف مقاومت برشی سطوح هستند.

همان طوری که گفته شد، شکست سطوح وقتی رخ می‌دهد که جابجایی‌های نسبی به مقدار بازشدگی بحرانی در کشش (o_p)، برش (s_p) برسد. جابجایی‌های گفته شده در تنش بیشینه از رابطه (۱) محاسبه می‌گردند.

$$o_p = e \frac{f_t}{k_n} \quad s_p = e \frac{f_s}{k_s} \quad (1)$$

O و S مقادیر جابجایی های سطوح به ترتیب در حالت کشش و برش، O_{res} و S_{res} به ترتیب مقادیر باقیمانده جابجایی های در شرایط کشش و برش و G_{IC} و G_{IIC} به ترتیب بیانگر انرژی لازم برای رشد واحد سطح ترک در حالات کششی و برشی است.

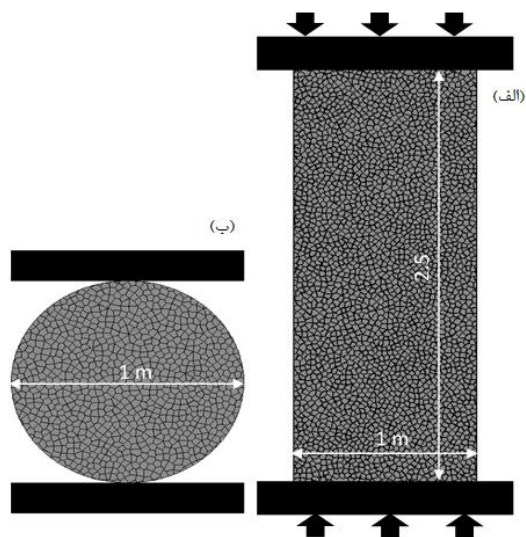
در این مطالعه، همچنین به منظور مدلسازی رفتار غیر خطی سطوح در حالت بارگذاری فشاری (شکل ۲-ت)، تابع هایپربولیک استفاده می شود [۲۴]:

$$\sigma_n = \frac{k_{n0} o}{1 - (o/o_{max})} \quad (7)$$

k_{n0} بیانگر سختی نرمال اولیه سطوح و O بیانگر بسته شونده گی سطوح تحت فشار و بیانگر O_{max} بیشینه مقدار بسته شونده گی سطوح است.

۴- مدلسازی عددی

نمونه های دو بعدی از توده سنگ در نرم افزار UDEC به ابعاد ۱ در ۲/۵ متر برای مدلسازی سنگ بکر و توده سنگ و دیسک برزلی با قطر یک متر انجام شد (شکل ۳). محیط مدلسازی شده با استفاده از رویکرد ورونوی به بلوک های مجزای کوچکی تقسیم می گردد. در نتیجه امکان تشکیل و گسترش ترک بین این اجزای کوچک وجود دارد. مدل از ۲۸۶۹ بلوک تشکیل شده است. نیروی محوری به بالا و پایین نمونه با سرعت ثابت و کم وارد و تنش در داخل نمونه با فیش نوشته شده ثبت می شود. ویژگی های استفاده شده برای توده سنگ در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۳: ساختار نمونه مدلسازی شده برای حالت های آزمایش تک محوره و سه محوره (الف) و دیسک برزلی (ب)

بیشینه مقاومت برشی سطوح تماسی، که بیانگر مقاومت برشی چسبندگی سطوح است از رابطه (۲) به دست می آید:

$$|f_s| = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (2)$$

در این رابطه، c بیانگر چسبندگی و σ_n بیانگر تنش نرمال و φ معرف زاویه اصطکاک سطوح چسبیده هستند. با عبور از مقاومت بیشینه بحرانی در حال کشش، برش و یا ترکیبی از این دو، سطوح می شکنند. برای ناحیه بعد شکست یعنی ناحیه نرم شونده گی رابطه تنش-جابجایی که تنش را به جابجایی سطوح مرتبط می کند، استفاده می شود:

$$\begin{bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{bmatrix} = \chi(D_i) \cdot \begin{bmatrix} f_t \\ f_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

در اینجا، σ_n و τ به ترتیب بیانگر تنش های نرمال و برشی در طول سطوح تماسی هستند. $\chi(D_i)$ تابع نرم شونده گی است که کاهش مقاومت سطوح در ناحیه بعد شکست را توصیف می کند. معادله نرم شونده گی بر اساس نتایج آزمایشگاهی به صورت زیر است [۲۳]:

$$\chi(D_i) = \left[1 - \frac{a+b-1}{a+b} e^{D_i(a+cb/((a+b)(1-a-b)))} \right] \times [a(1-D_i) + b(1-D_i)^c] \quad (4)$$

a ، b و c ثابت های به دست آمده آزمایشگاهی به ترتیب برابر ۰/۶۳، ۱/۸ و ۶ هستند و متغیر خرابی با مقدار بین صفر و یک است. این معادله شیب و انحنا ی ناحیه نرم شونده گی منحنی تنش-جابجایی را برای دو حالت کشش و برش تعریف می کند.

متغیر خرابی سطوح در حالت کشش، برش و ترکیبی و همچنین مقادیر باقیمانده جابجایی ها از رابطه های (۵) و (۶) محاسبه می گردند:

$$D_I = \frac{o - o_p}{o_{res} - o_p}$$

$$D_{II} = \frac{s - s_p}{s_{res} - s_p} \quad (5)$$

$$D_{I-II} = \sqrt{\left(\frac{o - o_p}{o_{res} - o_p} \right)^2 + \left(\frac{s - s_p}{s_{res} - s_p} \right)^2}$$

$$o_{res} = o_p + \frac{3G_{IC}}{f_t}$$

$$s_{res} = s_p + \frac{3G_{IIC}}{f_s} \quad (6)$$

جدول ۱: ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ کربناته [۲۷]

ویژگی ماده	مقدار
مدول یانگ (گیگاپاسکال)	۶۰
ضریب پواسون	۰/۲۵
چگالی (مترمکعب/کیلوگرم)	۳۱۰۰
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۱۰
انرژی شکست (مترمربع/ژول)	۱۵۰
سختی نرمال* (متر/گیگاپاسکال)	۱۶۰۰
سختی برشی* (متر/گیگاپاسکال)	۱۲۸۰۰
چسبندگی*، چسبندگی باقیمانده* (مگاپاسکال)	صفر، ۱۵/۸
زاویه اصطکاک*، زاویه اصطکاک باقیمانده* (درجه)	۵، ۵۴
مقاومت کششی*، مقاومت کششی باقیمانده*	صفر، ۱۶
(مگاپاسکال)	

* ویژگی‌های کالیبره شده سطوح ورونویی

برای محاسبه کرنش محوری و جانبی جابجایی‌های نسبی در دو سطوح بالا و جوانب در نظر گرفته می‌شود. رفتار شکست در مرز این بلوک‌ها با ویژگی مکانیکی اختصاص یافته و مدل رفتاری، در این مطالعه موهر کولمب، مدلسازی می‌شود. از آنجایی که این ویژگی‌ها یعنی سختی نرمال و برشی، چسبندگی، زاویه اصطکاک و تنش کششی سطوح ورونویی به طور کلی نامعلوم هستند. از این رو، کالیبراسیون مدل جهت تعیین این ویژگی‌ها از طریق روند تکراری سعی و خطا از طریق مجموعه‌ای از مدلسازی‌های آزمایش‌های کشش غیر مستقیم (دیسک برزیلی) و یک محوره و سه محوره انجام می‌شود. مقاومت بیشینه، مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک به دست آمده از آزمایشگاه و یا میدانی اهداف کالیبراسیون در نظر گرفته می‌شوند. همچنین برای دست‌یابی به چسبندگی و زاویه اصطکاک نمونه، تنش‌های محصور یک تا ۴ در نظر گرفته شد. با استفاده از رابطه‌های (۸) و (۹) [۲۵]، چسبندگی و زاویه اصطکاک نمونه سنگی تعیین می‌شود:

$$\varphi = \arcsin \frac{m-1}{m+1} \quad (۸)$$

$$c = b \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \quad (۹)$$

φ زاویه اصطکاک و c چسبندگی نمونه، m بیانگر شیب خط و b محل تقاطع خط با محور است. این خط از برازش خط بر روی داده‌های تنش بیشینه-تنش محصور به دست می‌آید.

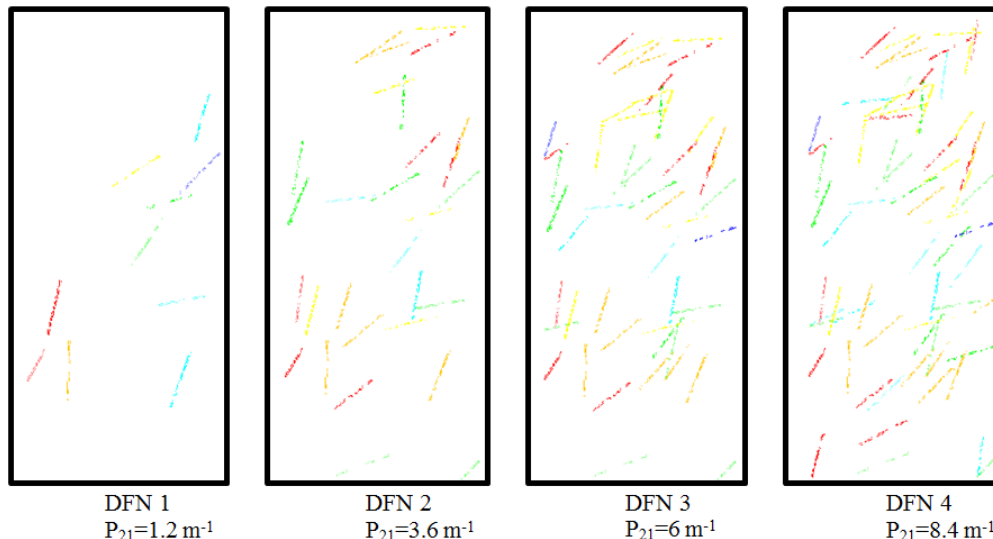
روند کالیبراسیون با توجه به مراحل کلی ارایه شده در [۱۹، ۲۶] به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- مدول یانگ و پواسون نمونه به سختی نرمال و برشی و خصوصیات الاستیکی بلوک‌ها وابسته است.
- ویژگی‌های مقاومتی سطوح ورونویی به منظور دست‌یابی به مقاومت‌های بیشینه در آزمایش‌های یک محوره و دیسک برزیلی از طریق روند تکراری به دست می‌آیند.
- مدلسازی‌های سه محوره با اصلاح داده‌های قبلی به منظور به دست آوردن منحنی شکست، زاویه اصطکاک و چسبندگی نمونه زیر تنش‌های محصور مختلف انجام می‌شوند. در آخر، دوباره مرحله دوم با استفاده پارامترهای مکانیکی به دست آمده از این مرحله باید مدلسازی و بررسی شود تا همخوانی تنش‌های فشاری و کششی به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی اطمینان حاصل گردد.

بعد از این مرحله و برای مطالعه تاثیر توزیع زاویه اصطکاک شکستگی‌ها بر مقاومت مدل‌های مصنوعی توده‌سنگ، تعدادی از شبکه شکستگی‌های تولید شده همان طوری که در بخش ۲ توضیح داده شد، وارد مدل می‌شوند. برای مطالعه تاثیر توزیع پارامتر مکانیکی شکستگی‌ها، برای زاویه اصطکاک، چسبندگی و مقاومت کششی از تابع توزیع ویبول استفاده شد (شکل ۱). هدف از این مقاله، بررسی تاثیر استفاده از تابع توزیع برای پارامترهای مکانیکی و با رویکرد سطوح ضعیف و بالقوه شکست است. بنابراین تاثیر زاویه قرارگیری شکستگی‌ها باید به حد کافی حذف شود. به این منظور زاویه شکستگی‌ها با تابع توزیع یکنواخت بین صفر تا ۹۰ درجه در نظر گرفته و تولید شد. این توزیع، زوایای تصادفی بین صفر و ۹۰ درجه تولید خواهد کرد. ۴ گروه شبکه شکستگی با شدت شکستگی مختلف ایجاد شد. نمونه‌های از این چهار گروه در شکل ۴ نشان داده شده است. طول شکستگی برای ۴ گروه به منظور حذف تاثیر طول شکستگی، ثابت و یکسان در نظر گرفته شد. برای هر گروه از ۴ گروه شبکه شکستگی‌ها، ۵ حالت مختلف (علاوه بر مقدار میانگین) برای اختصاص چسبندگی، زاویه اصطکاک و مقاومت کششی به شکستگی‌ها از همان تابع توزیع مربوطه به شبکه شکستگی بالقوه مطالعه شد (شکل ۴). حالت انحراف استاندارد ۲ برای این سه پارامتر مکانیکی در

استاندارد ۲ برای تابع توزیع ویبول مقادیری بسیار کوچک (حدوداً صفر) تا بزرگ (حدوداً برابر سنگ بکر کالیبره شده) برای مقادیر چسبندگی، زاویه اصطکاک و مقاومت کشش به دست خواهد آمد که معرف سطوح ضعیف خواهند بود.

نظر گرفته و بررسی شد. برای تمامی حالات شبکه شکستگی، سختی نرمال و برشی شکستگی‌ها برابر مقدار میانگین و برای زاویه اصطکاک، چسبندگی و مقاومت کششی نصف مقدار کالیبره شده فرض شد. با حالت انحراف



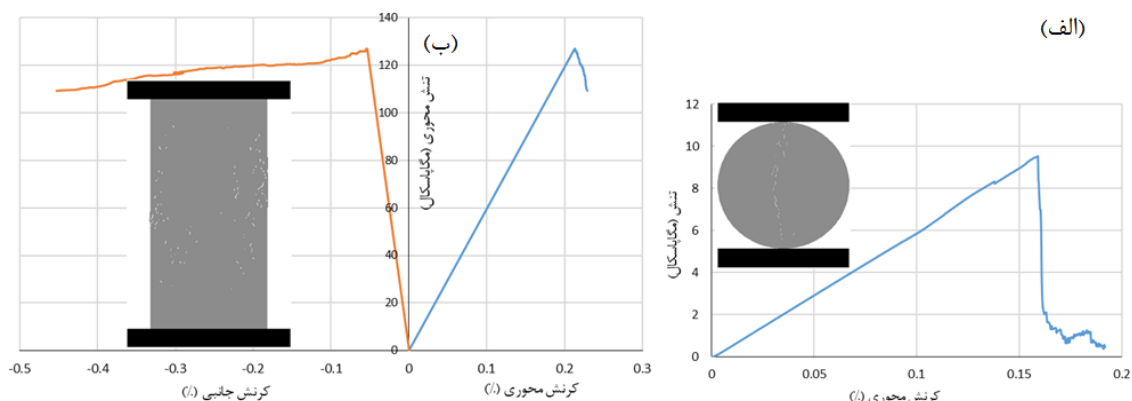
شکل ۴: نمونه‌هایی از شبکه شکستگی تولیدی (رنگ‌های مختلف بیانگر پارامترهای ژئومکانیکی توزیعی مختلف حاصل از تابع توزیع ویبول در شبکه شکستگی بالقوه است)

همچنین منحنی تنش-کرنش و آزمایش تک محوره و دیسک برزیلی به ترتیب در شکل ۵-الف و ۵-ب آورده شده است. از آزمایش نمونه دیسکی به طور معمول مقاومت کششی سطوح کالیبره می‌گردد. شکل ۵ بیانگر شکست ترد برای نمونه سنگی است. همان طوری که در شکل ۵ مشخص است، شکست از رشد و به هم پیوستن ترک‌ها در راستای قطر و امتداد اعمال تنش، اتفاق افتاده است. نتایج در کل تطابق خوبی با داده‌های ارایه شده برای این نمونه سنگی سخت دارد. با توجه به شکل ۶ و رابطه‌های (۸) و (۸)، زاویه اصطکاک و چسبندگی نمونه به ترتیب برابر با ۵۰/۱۶ درجه و ۲۳/۰۳ مگاپاسکال است.

۵- نتایج و بحث

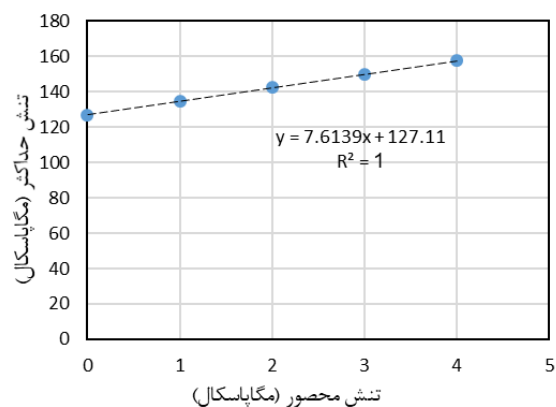
۵-۱- کالیبراسون

مجموعه‌ای از مدل‌سازی‌های عددی برای تعیین یک مجموعه از پارامترهای سطوح تماسی و رونویی که منجر به دست آوردن پارامتر مورد نظر یعنی مقاومت، مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک می‌شود، انجام شد. به این منظور آزمایش‌های تک محوره و سه محوره (تنش محصور ۱ تا ۴) و دیسک برزیلی انجام شد (شکل‌های ۵ و ۶). نتایج به دست آمده در جدول ۱ ارایه شده است.



شکل ۵: منحنی تنش-کرنش و وضعیت نهایی نمونه در حالت بارگذاری یک محوره (الف) و دیسک برزیلی (ب)

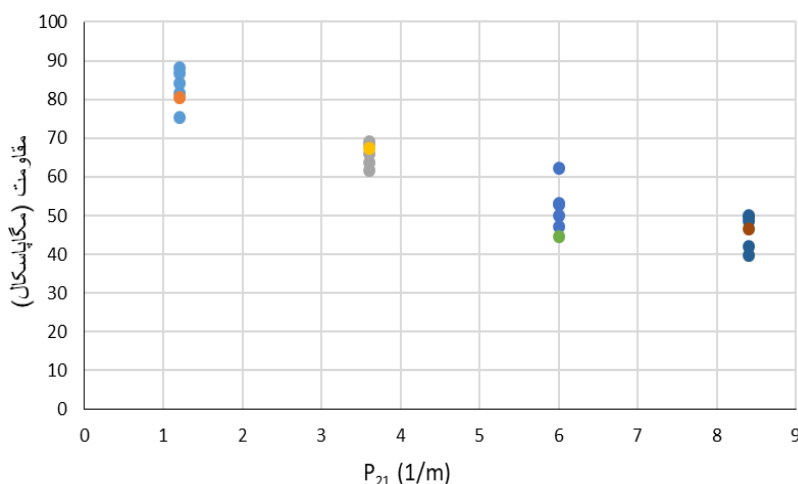
همه حالات، کاهش قابل توجهی در مقاومت توده‌سنگ با افزایش شدت شکستگی یعنی P_{21} مشاهده می‌شود. در شکل، رنگ متفاوت در هر گروه P_{21} ، مقدار میانگین استفاده شده به منظور مقایسه با نتایج به دست آمده از حالت توزیعی مختلف و ۵ تکرار با توزیع مربوطه برای آن حالت است. همان طوری که مشخص است استفاده از مقدار توزیعی، نتایج مقاومت توده‌سنگ مختلفی خواهد داشت. چرا که در این رویکرد برخلاف مدلسازی‌های انجام شده با شبکه شکستگی مرسوم شبکه شکستگی، بدون توجه به پارامترهای هندسی شبکه شکستگی، احتمال شکست هر شکستگی بالقوه در شبکه شکستگی بالقوه با یکدیگر متفاوت خواهد بود (شکل ۸).



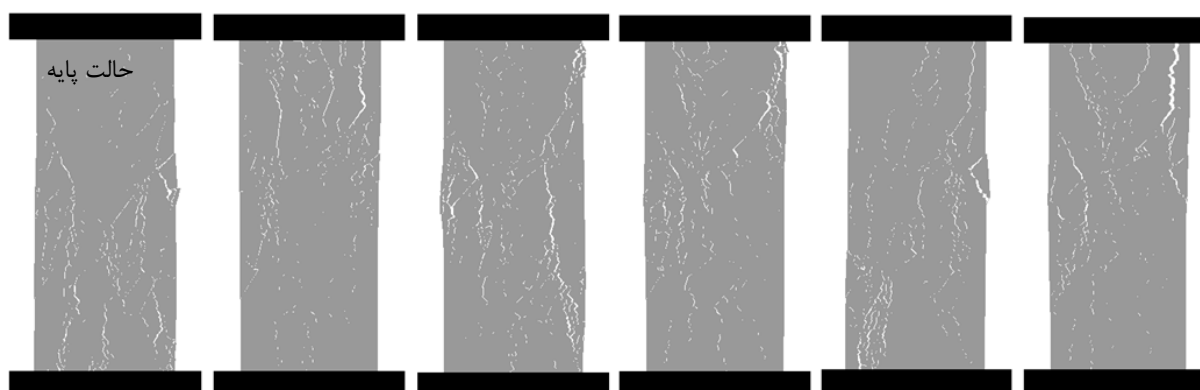
شکل ۶: معیار مقاومتی (تنش بیشینه - تنش محصور) نشان‌دهنده خطی بودن شکست نمونه

۵-۲- شبکه شکستگی

شکل ۷ بیانگر مقاومت بیشینه به دست آمده توده‌سنگ برای هر مدل و در هر شرایط است. با توجه به شکل و برای



شکل ۷: مقاومت توده‌سنگی مدلسازی شده



شکل ۸: الگوی شکست متفاوت توده‌سنگ مدلسازی شده ($DFN 3, P_{21}=6 m^{-1}$)

محاسبه شده ایجاد می‌کند. چرا که سطوح ضعیف [۲] و قوی [۱۸، ۱۹] نیز در شبکه وجود داشته و از این رو برای محاسبه مقاومت توده‌سنگ باید توزیع پارامترهای مکانیکی

اگر چه شبکه شکستگی مرسوم برای محاسبه مقاومت توده‌سنگ در دسترس است اما استفاده از شبکه شکستگی بالفعل تردیدهای چشمگیری را بر روی مقاومت

چسبندگی، زاویه اصطکاک و مقاومت کششی شبکه شکستگی بالقوه، بر مقاومت توده‌سنگ است. علاوه بر این، محل اختصاص پارامتر ژئومکانیکی توزیعی در شبکه شکستگی بالقوه نیز باعث به دست آمدن جواب‌های مقاومتی متفاوت برای همان شبکه خاص و محل‌های اختصاصی متفاوت شد. از این رو، در نظر گرفتن تابع توزیع برای پارامترهای مکانیکی شبکه شکستگی بالفعل و بالقوه به منظور انجام و تحلیل مدلسازی‌ها واقعی‌تر بیش از پیش حائز اهمیت است.

منابع

- [1] Hamdi, P., Stead, D., & Elmo, D. (2015). Characterizing the influence of stress-induced microcracks on the laboratory strength and fracture development in brittle rocks using a finite-discrete element method-micro discrete fracture network FDEM- μ DFN approach. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(6), 609-625. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.07.005>
- [2] Vyazmensky, A., Stead, D., Elmo, D., & Moss, A. (2010). Numerical analysis of block caving-induced instability in large open pit slopes: a finite element/discrete element approach. *Rock mechanics and rock engineering*, 43(1), 21-39. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0035-3>
- [3] Ivars, D. M., Pierce, M. E., Darcel, C., Reyes-Montes, J., Potyondy, D. O., Young, R. P., & Cundall, P. A. (2011). The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(2), 219-244. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.11.014>
- [4] Emami Meybodi, E. and Jalali, S. M. E. (2015). "Estimation of Fragmentation on Geometrical Viewpoint." *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 5(9): 51-61. [http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565\(15\)940915-X](http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940915-X)
- [5] Snow, D. T. (1965). A parallel plate model of fractured permeable media. PhD Thesis, Univ. of California.
- [6] Dershowitz, W. S., & Einstein, H. H. (1988). Characterizing rock joint geometry with joint system models. *Rock mechanics and rock engineering*, 21(1), 21-51. <https://doi.org/10.1007/BF01019674>.
- [7] Baecher, G. B., Lanney, N. A., & Einstein, H. H. (1977, January). Statistical description of rock properties and sampling. In *The 18th US*

شبکه ناپیوستگی‌های بالقوه نیز در مدلسازی‌ها لحاظ گردد. با توجه به تابع توزیع و انحراف استاندارد مورد نظر، رویکرد پیشنهادی این مطالعه شامل شبکه ناپیوستگی‌های بالفعل و بالقوه با هم است. در واقع با انتخاب مقاومت کششی صفر برای شبکه شکستگی بالقوه، شبکه شکستگی بالفعل تولید خواهد شد از این رو محیط مورد مطالعه را می‌توان با هم نظر گرفتن هم‌زمان شکستگی‌های بالفعل و بالقوه با هم بررسی کرد. همان گونه که در این مطالعه نشان داده شد باید توجه کرد که در حقیقت با معرفی تابع توزیع برای ویژگی‌های مکانیکی در شبکه شکستگی بالقوه، نتایج یکسانی حتی برای یک تابع توزیع استفاده شده به دست نخواهد آمد. چرا که محل دقیق ویژگی مکانیکی اختصاص داده شده در شبکه شکستگی در توده‌سنگ مدلسازی شده، برای مثال اگر شکستگی ضعیف یا قوی باشد، می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر رفتار و مقاومت توده‌سنگ داشته باشد. خروجی مورد نظر به صورت یک مقدار نخواهد بود بلکه توزیعی خواهد بود که تفسیرهای جزئی‌تری را ممکن می‌سازد. در این تحقیق، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها تاثیر سه پارامتر مکانیکی - مقاومتی یعنی چسبندگی، زاویه اصطکاک و مقاومت کششی سطوح شکستگی بر مطالعه شکست بررسی شد. تاثیر رویکرد پیشنهادی بر رفتار توده‌سنگ در واقعیت میدانی و با ترکیب با سایر پارامترها مانند توزیع طولی مختلف شکستگی‌ها و اختصاص پارامتر ژئومکانیکی توزیعی مربوطه، بیش از پیش مشخص خواهد بود.

۶- نتیجه‌گیری

مدلسازی شبکه شکستگی‌ها با در نظر گرفتن ناپیوستگی‌های بالقوه برای تحلیل مکانیکی بسیار اهمیت دارد. با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته در شبکه شکستگی‌ها که شکستگی‌های بالفعل با مقاومت کششی صفر است، شبکه ناپیوستگی بالقوه با مقاومت توزیعی کششی و برشی که نقش اساسی در برآورد مقاومت توده‌سنگ و خردشوندگی دارند مطالعه نشده است. در این مقاله، مدلی برای مدلسازی واقعی‌تر توده‌سنگ که منجر به نتایج مناسب‌تری می‌شود، ارائه شد. نتایج مدلسازی‌های عددی توده‌سنگ حاوی شکستگی بالقوه بیانگر تاثیر استفاده از توزیع پارامترهای مکانیکی یعنی

- [19] Shang, J., Hencher, S. R., & West, L. J. (2016). Tensile Strength of Geological Discontinuities Including Incipient Bedding, Rock Joints and Mineral Veins. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(11), 4213-4225. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1041-x>
- [20] Lorig, L. J., Darcel, C., Damjanac, B., Pierce, M., & Billiaux, D. (2015). Application of discrete fracture networks in mining and civil geomechanics. *Mining Technology*, 124(4), 239-254. <https://doi.org/10.1179/1743286315Y.0000000021>
- [21] Lei, Q., Latham, J. P., & Tsang, C. F. (2017). The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks. *Computers and Geotechnics*, 85, 151-176. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.12.024>
- [22] Farahmand, K., Vazaios, I., Diederichs, M. S., & Vlachopoulos, N. (2018). Investigating the scale-dependency of the geometrical and mechanical properties of a Moderately jointed rock using a synthetic rock mass (SRM) approach. *Computers and Geotechnics*, 95, 162-179. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.10.002>
- [23] Evans, R. H., & Marathe, M. S. (1968). Microcracking and stress-strain curves for concrete in tension. *Matériaux et Construction*, 1(1), 61-64.
- [24] Bandis, S. C., Lumsden, A. C., & Barton, N. R. (1983). Fundamentals of rock joint deformation. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20(6), pp. 249-268.
- [25] Kovari, K., Tisa, A., Einstein, H. H., & Franklin, J. A. (1983). Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: revised version. *Intl J of Rock Mech & Mining Sci & Geomechanics Abs*, 20(6).
- [26] Kazerani, T., & Zhao, J. (2010). Micromechanical parameters in bonded particle method for modelling of brittle material failure. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 34(18), 1877-1895. <https://doi.org/10.1002/nag.884>
- [27] Pine, R. J., Owen, D. R. J., Coggan, J. S., & Rance, J. M. (2007). A new discrete fracture modelling approach for rock masses. *Geotechnique*, 57(9), 757-766. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.9.757>
- Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.
- [8] Barton, C. M. (1978, January). Analysis of joint traces. In 19th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.
- [9] Geier, J. E., Lee, K., & Dershowitz, W. S. (1988). Field validation of conceptual models for fracture geometry. *Transactions of American Geophysical Union*, 69(44), 1177.
- [10] Dershowitz, W.S., Lee, G., Geier, J., Foxford, T., LaPointe, P., Thomas, A., (1998). *FracMan, Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modeling, and Exploration Simulation. User Documentation, Version 2.6.* Golder Associates Inc., Washington.
- [11] Staub, I., Fredriksson, A., & Outters, N. (2002). Strategy for a Rock Mechanics Site Descriptive Model. Development and testing of the theoretical approach (No. SKB-R--02-02). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co..
- [12] Veneziano, D. (1978). Probabilistic model of joints in rock. Unpublished Manuscript, MIT, Cambridge, MA.
- [13] Dershowitz, W.S., 1984. Rock Joint System. (Ph.D. Thesis). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA .
- [14] Ivanova, V. M. (1995). Three-dimensional stochastic modeling of rock fracture systems (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [15] Ivanova, V. M., & Einstein, H. H. (2004, January). Three-dimensional hierarchical stochastic modeling of rock fracture systems: An example from the Yates field. In *Gulf Rocks 2004, the 6th North America Rock Mechanics Symposium (NARMS)*. American Rock Mechanics Association.
- [16] Gervais, F., Gentier, S., Chiles, J. P. (1995). Geostatistical analysis and hierarchical modelling of a fracture network in a stratified rock mass. In: Myer, L. R., Goodman, R. E., Cook, N. G., & Tsang, C. F. (Eds.) *Fractured and jointed rock masses*, 153-159, Balkema, Rotterdam.
- [17] LaPointe, P.R., (1993). Pattern analysis and simulation of joints for rock engineering. *Comprehensive Rock Engineering. Rock Testing and Site Characterization vol. III*, pp. 215-239.
- [18] Turichshev, A., & Hadjigeorgiou, J. (2017). Development of Synthetic Rock Mass Bonded Block Models to Simulate the Behaviour of Intact Veined Rock. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(1), 313-335. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0108-5>

¹ Baecher² BART³ Veneziano⁴ Dershowitz