

## تأثیر توزیع پارامتر مکانیکی (زاویه اصطکاک) شبکه شکستگی مجزا بر مقاومت توده سنگ

هادی فتحی پور آذر<sup>۱</sup>؛ سید محمد اسماعیل جلالی<sup>۱</sup>؛ سید رحمان ترابی<sup>۱</sup>

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

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳

### چکیده

قابلیت و توانایی شبکه شکستگی مجزا برای شبیه‌سازی شکستگی‌های توده سنگ به اثبات رسیده است. در اکثر مدل‌سازی‌های انجام‌شده، مقدار میانگین برای زاویه اصطکاک هر دسته شکستگی در نظر گرفته می‌شود. در حالیکه در طبیعت، هر دسته شکستگی تابع توزیع مختص خود برای این پارامتر مکانیکی شکستگی را دارد. به همراه پارامترهای هندسی شبکه شکستگی، طبیعت ناهمگن پارامترهای مکانیکی شکستگی برای فهم رفتار توده سنگ بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق، اثر توزیع آماری زاویه اصطکاک شکستگی‌ها بر مقاومت توده سنگ با استفاده از رویکرد شبکه شکستگی مجزا در نرم‌افزار اجزای مجزا *UDEC* مطالعه شده است. به این منظور ابتدا شبکه شکستگی مجزا کدنویسی و تابع توزیع نرمال برای زاویه اصطکاک هر دسته شکستگی در نظر گرفته شده است. سپس چهار گروه شبکه شکستگی با شدت شکستگی مختلف تولید و برای هر گروه ۵ تکرار با انحراف استاندارد 2/5، 5، 7/5 و 10 درجه در نظر گرفته شده است. در آخر نتایج با حالت پایه یعنی استفاده از مقدار میانگین، مقایسه و بررسی شده است. نتایج تحلیل‌های عددی نشان‌دهنده اهمیت و تأثیر قابل توجه در نظر گرفتن اثر توزیعی آماری پارامتر مکانیکی زاویه اصطکاک در شبکه شکستگی مجزا بر مقاومت توده سنگ است.

شبکه شکستگی مجزا، زاویه اصطکاک، اجزای مجزا، تابع توزیع احتمال

واژگان کلیدی

### ۱- مقدمه

توده سنگ ترکیبی از ماده سنگ و ناپیوستگی‌هایی مانند شکستگی‌ها و درزه‌ها است. اغلب این ناپیوستگی‌ها به صورت شبکه‌ای پیچیده بوده و رفتار کلی توده سنگ را کنترل می‌کنند. در اکثر موارد، این شبکه شکستگی‌ها دلیل اصلی خرابی سازه‌های سنگی هستند. فهم تأثیر ویژگی‌های هندسی و مکانیکی این شکستگی‌ها یک موضوع بسیار مهم در بسیاری از تحلیل‌ها و کاربردهای مهندسی ژئومکانیک مانند سازه‌های زیرزمینی و روباز است. شبیه‌سازی این شبکه شکستگی‌ها با تکنیک مدل‌سازی شبکه شکستگی مجزا انجام می‌شود. در واقع، رویکرد مدل‌های تصادفی شبکه شکستگی‌ها یک روش شبیه‌سازی است که طبیعت ناهمگن توده‌سنگ‌های شکستگی‌دار را با استفاده از ارایه شبکه شکستگی به صورت عناصری گسسته با خصوصیات هندسی (مانند جهت‌یابی، اندازه، موقعیت) نمایش می‌دهد. بنابراین توسعه این روش، پیشرفت قابل توجهی در مدل‌سازی

توده سنگ و بررسی رفتار آن محسوب می‌شود [1].

در سال‌های اخیر، پیشرفت زیادی در توسعه شبکه شکستگی مجزا برای ارایه واقعی‌تر ناپیوستگی‌ها شده است. ماپر و همکاران [2] شبکه شکستگی را با در نظر گرفتن الزامات مش‌بندی در روش عددی توسعه داده‌اند. حمدی و همکاران [3] تأثیر میکروترک‌ها را با استفاده از کد شبکه شکستگی توسعه داده‌شده در [2] را بر مقاومت و توسعه شکستگی در سنگ‌های ترد بررسی کرده‌اند. فرشته نژاد و همکاران [4] ناپیوستگی‌های منحنی را تحقیق کرده‌اند. اخیراً، جینگ و همکاران [5] شبکه شکستگی با سطوح زبر را ارایه کرده‌اند. بر اساس مدل‌های شبکه شکستگی مجزا، مدل آماری به منظور بررسی اثرات وابستگی بین توزیع بازشدگی و طول اثر درزه را بر رفتار هیدرومکانیکی و مکانیکی توده سنگ درزه‌دار توسعه داده شده است. در این زمینه برای مثال می‌توان مدل دو بعدی ارایه شده توسط باغبانان و جینگ [6] و سه بعدی ژو و دود [7] را نام برد. با استفاده از رویکرد شبکه شکستگی مجزا، مطالعات بسیار

واقعیت می‌گردد.

در این تحقیق با توجه به تاثیر توزیع آماری پارامتر مکانیکی زاویه اصطکاک شکستگی بر رفتار توده سنگ، مدل تصادفی شبکه شکستگی با در نظر گرفتن ویژگی آماری زاویه اصطکاک ساخته شده است. به این منظور کدی دو بعدی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی ++C تهیه شده است که قادر است بر اساس داده‌های مکانیکی برداشت‌شده، توزیع آماری برای پارامترهای مکانیکی شکستگی نیز تولید کند. در نتیجه می‌توان از این مفهوم در نرم‌افزارهای تحلیل عددی (در این مطالعه نرم‌افزار اجزای مجزای یودک) استفاده کرد.

## ۲- مدل‌سازی عددی

به منظور مدل‌سازی و تحلیل عددی مدل، ابتدا مدل هندسی شکستگی‌ها بر اساس شبکه شکستگی‌های مجزا برنامه‌نویسی و در برنامه تحلیل عددی فراخوانی می‌شود. در برنامه تحلیل عددی اجزای مجزا *UDEC*، محیط نمونه سنگی با استفاده از الگوریتم ورونوی به اجزای کوچکی تقسیم می‌شود که رفتار کلی سنگ را خصوصیات این اجزا و سطوح تماسی تشکیل می‌دهد. همچنین در این مطالعه، مدل رفتاری اجزای چسبنده برنامه‌نویسی و استفاده شده است. مراحل گفته‌شده در بخش‌های زیر توضیح داده می‌شوند.

### ۲-۱- شبکه شکستگی مجزا

یک مدل شبکه شکستگی بر اساس شبیه‌سازی آماری سیستم ناپیوستگی‌ها که با استفاده از توابع توزیع آماری پارامترهای هندسی آن‌ها (مانند چگالی، جهت‌یابی و اندازه) که مطابق با داده‌های برداشت‌شده میدانی تهیه شده است، تولید می‌شود. در واقعیت همانند پارامترهای هندسی شکستگی‌ها، پارامترهای مقاومتی هر دسته شکستگی نیز به صورت توزیعی است. بنابراین مدل پیشنهادی، توزیع آماری از پارامترهای مکانیکی شبکه شکستگی‌ها را با استفاده از تابع چگالی به دست آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی در شبکه شکستگی مرسوم در نظر می‌گیرد.

مدل‌های مختلفی برای مدل‌سازی بهتر شبکه شکستگی‌ها ارائه شده‌اند. به‌طور خلاصه، برای ساخت شبکه شکستگی مجزا که در این مطالعه برنامه‌نویسی شد، پنج مولفه‌ی زیر مورد نیاز است:

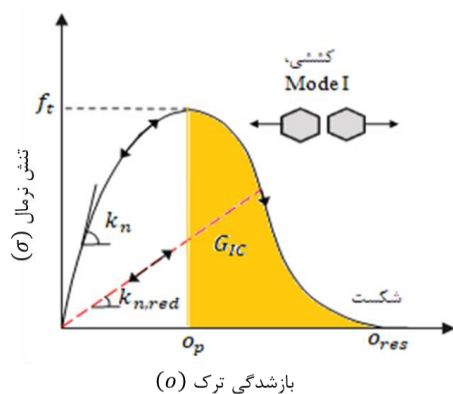
- ۱) تابع چگالی احتمال جهت‌داری شکستگی‌ها
  - ۲) چگالی یا شدت شکستگی‌ها
  - ۳) تابع چگالی احتمالی تغییرات اندازه شکستگی‌ها
  - ۴) تابع چگالی احتمالی تغییرات اندازه پارامترهای مکانیکی شکستگی‌ها
  - ۵) موقعیت مراکز درزه‌ها
- یک دسته شکستگی در فضای دوبعدی با کاربرد متوالی چهار فرایند تصادفی زیر تولید می‌شود:

زیادی انجام شده است. مین و جینگ [8] ویژگی‌های الاستیکی معادل توده سنگ را با لحاظ وابستگی اندازه مطالعه کرده‌اند. کولاتیلاک و همکاران [9] فرایند جدیدی برای تخمین مقاومت و تغییر شکل‌پذیری بلوک سنگی با استفاده از این رویکرد ارائه کرده‌اند. در مطالعه‌ای، المو و استید [10] مقاومت توده سنگ و خرابی پیش‌رونده در پیلاز را شبیه‌سازی کرده‌اند. ویازمینسکی و همکاران [11,12] تاثیر تخریب بلوکی بر نشست سطح زمین و وقوع شکست در شیب معدن رو بررسی کرده‌اند. اسماعیلی و همکاران [13] اندازه حجم معرف توده سنگ را بر اساس مقاومت تک محوره و مدول تغییر شکل‌پذیری الاستیک تخمین زده‌اند. لو و همکاران [14] و گائو و کنگ [15] بیان کردند که با افزایش شدت شکستگی مقاومت کاهش می‌یابد. بر اساس مدل‌سازی عددی مین و جینگ [8]، نوریان بیدگلی و همکاران [16] و خانی و همکاران [17,18] مقاومت و تغییر شکل‌پذیری توده سنگ را تحت شرایط بارگذاری و شدت شبکه شکستگی مختلف مطالعه کرده‌اند. سپس نوریان بیدگلی و جینگ [19,20] آنیزوتروپی و تحلیل آماری مقاومت و تغییر شکل‌پذیری را مطالعه کرده‌اند. گرینون و همکاران [21] از طریق تحلیل حساسیت تاثیر تغییرات در مقادیر پارامترهای ورودی شبکه شکستگی مجزا را بر ویژگی‌های مکانیکی حداکثری توده سنگ یعنی مقاومت فشاری یک محوره، مدول یانگ و ضریب پواسون مطالعه کرده‌اند. این مطالعه راهی برای ارزیابی پارامترهای ساختاری بحرانی کنترل‌کننده ویژگی‌های توده سنگ است. حوائج و همکاران [22] مکانیزم شکست شیروانی کواری را تحقیق کرده‌اند. در این مطالعه از سنجش از دور در برداشت ناپیوستگی و تشکیل شبکه شکستگی استفاده شده است. مایر و استید [2] عدم قطعیت نتایج به دلیل وابستگی مش را در تحقیقشان گزارش کرده‌اند. به تازگی، فرهمند و همکاران [23] وابستگی مقیاسی پارامترهای هندسی و مکانیکی توده سنگ حاوی شبکه شکستگی را بر اساس مفهوم حجم معرف بررسی کرده‌اند. با مقایسه نتایج عددی با معیار تجربی هوک و براون، تخمین درستی این معیار تجربی برای مقاومت نامحور به دست آمده است. ولی برآورد بزرگتری از مقاومت در تنش‌های محصور گزارش شده است. با مطالعه پژوهش‌های گذشته و مدل‌سازی‌های مرسوم شبکه شکستگی [24,25]، یک مقدار ثابت برای پارامتر مکانیکی زاویه اصطکاک دسته شکستگی در نظر گرفته می‌شود. تاکنون مطالعه مشخصی در مورد اثرات احتمالی استفاده از توابع توزیع برای زاویه اصطکاک بر خروجی مورد نظر وجود ندارد. به هر حال با توجه به توزیع تصادفی آماری ویژگی‌های هندسی و مکانیکی شکستگی‌ها، نتایج تحلیل‌های عددی رفتاری توده سنگ در مسایل و کاربردهای مهندسی علاوه بر توزیع پارامترهای هندسی شکستگی‌ها به توزیع تصادفی آماری پارامترهای مکانیکی نیز بسیار زیاد وابسته خواهد بود؛ و استفاده از مقدار میانگین منجر به ارائه نتایج متفاوتی نسبت به

شکستگی‌ها است. بنابراین تاثیر زاویه قرارگیری شکستگی‌ها باید به حد کافی حذف شود. به این منظور زاویه شکستگی‌ها با تابع توزیع یکنواخت بین ۰ تا ۹۰ درجه در نظر گرفته و تولید شد. این توزیع، زوایای تصادفی بین ۰ و ۹۰ درجه تولید خواهد کرد. ۴ گروه شبکه شکستگی با شدت شکستگی مختلف یعنی  $1/2$  و  $3/6$  و ۶ و  $1/$  متر/۱۸،۴ ایجاد شد. 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 زاویه اصطکاک به شکستگی‌ها از همان تابع توزیع به شبکه شکستگی مطالعه شد. پارامترهای مکانیکی برای حالت پایه شبکه شکستگی، یعنی سختی نرمال و برشی شکستگی‌ها برابر با مقدار واسنجی شده یعنی به ترتیب ۱۶۰۰۰ و متر/گیگاپاسکال ۱۲۸۰۰، زاویه اصطکاک شکستگی ۳۵ درجه، چسبندگی و مقاومت کششی شکستگی ۰ فرض شد.

## ۲-۲- معیار شکست

خصوصیات اجزای تشکیل‌دهنده سنگ و سطوح تماسی این اجزا رفتار کلی سنگ را کنترل می‌کنند. در این مطالعه، مدل رفتاری سطوح تماسی بر اساس مفاهیم مکانیک شکست غیرخطی در محیط فیش نرم‌افزار اجزای مجزا *UDEC* برنامه‌نویسی می‌شود (شکل ۲). بر اساس این مدل ارایه شده در [26]، احتمال شکست در سطوح تماسی با توجه به تنش جابجایی‌های نسبی سطوح محلی وجود دارد. با توجه به شکل ۲ قسمت‌های غیرخطی منحنی تنش-کرنش بیانگر رفتار سطوح تماسی به دلیل کاهش سختی به علت وضعیت خرابی ناشی از گسترش خرابی در سطوح تماسی قبل از شکست تا تنش حداکثر است. بعد از این ناحیه، قسمت نرم‌شوندگی مواد به علت جمع شدن خرابی و در نتیجه از بین رفتن انرژی است.



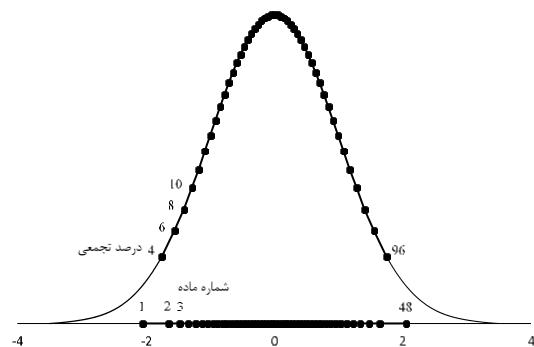
شکل ۲- مدل رفتاری سطوح تماسی چسبیده تحت شرایط کششی

همان طوری که گفته شد، شکست سطوح وقتی رخ می‌دهد که جابجایی‌های نسبی به مقدار بازشدگی بحرانی در کشش ( $\sigma_p$ )، برش ( $\sigma_p$ ) برسد. جابجایی‌های گفته‌شده در تنش حداکثر از رابطه زیر

- ۱) شبکه پواسونی همگن برای تولید مرکز شکستگی بر اساس چگالی درزه‌داری
- ۲) انتخاب تصادفی مقدار شیب درزه از تابع چگالی احتمالی شیب
- ۳) انتخاب تصادفی مقدار طول اثر شکستگی از تابع چگالی احتمال آن
- ۴) انتخاب تصادفی مقدار پارامتر مکانیکی شکستگی از تابع چگالی احتمال آن

در حال حاضر ۵۰ نوع ماده در برنامه اجزای مجزا *UDEC* می‌توان تعریف کرد. بنابراین ۴۸ نوع ماده مختلف برای شکستگی‌ها با توجه به پارامتر مکانیکی شکستگی‌ها یعنی زاویه اصطکاک داخلی 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 پیش‌رو به تاثیر پارامتر مکانیکی زاویه اصطکاک داخلی پرداخته است.

در روش مونت کارلو، عدد تصادفی تولیدشده بین ۰ و ۱ از توزیع یکنواخت به این معنی است که احتمال تولید هر عددی برابر است. بنابراین برای تابع توزیع مفروض، برای مثال توزیع نرمال، به ۴۸ بخش با احتمال تجمعی برابر یعنی مساحت برابر تقسیم می‌شود (شکل ۱). از آنجائی که مساحت هر بخش برابر است، هر نوع ماده احتمال برابری برای تولید در شبیه‌ساز مونت کارلو خواهد 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 نرمال

برای مطالعه تاثیر توزیع زاویه اصطکاک شکستگی‌ها بر مقاومت مدل‌های توده سنگ مصنوعی، تعدادی از شبکه شکستگی‌های تولیدشده وارد مدل می‌شوند. برای مطالعه تاثیر توزیع پارامتر مکانیکی شکستگی‌ها از تابع توزیع نرمال استفاده شد (شکل ۱). هدف از این مقاله، بررسی اثر توزیعی زاویه اصطکاک داخلی

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

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

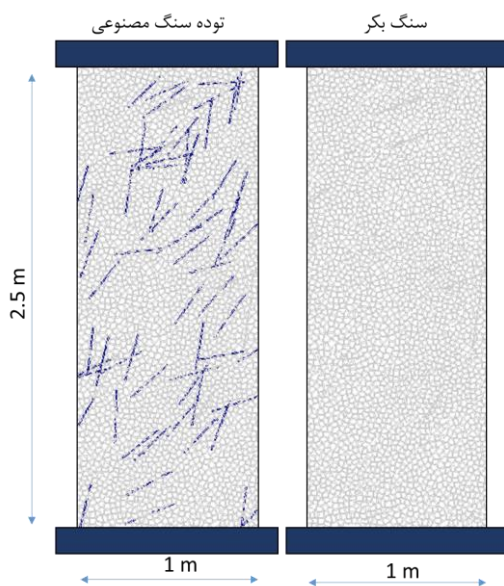
در این مطالعه، همچنین به منظور مدل‌سازی رفتار غیرخطی سطوح در حالت بارگذاری فشاری، تابع هایپربولیک استفاده می‌شود [30]

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

$k_{n0}$  بیانگر سختی نرمال اولیه سطوح و  $o$  بیانگر بسته‌شدگی سطوح تحت فشار و  $o_{max}$  بیانگر حداکثر مقدار بسته‌شدگی سطوح است.

### ۲-۳- واسنجی مدل

مدل‌سازی و تحلیل‌های عددی در نرم‌افزار اجزای مجزا UDEC انجام شد. در این نرم‌افزار با استفاده از رویکرد ورونومی می‌توان محیط مورد نظر را به اجزای کوچکی تقسیم کرد. از این رو ویژگی‌های مکانیکی تماسی این اجزا باید واسنجی گردند تا رفتاری معادل رفتار سنگ بکر از خود نشان دهند. در شکل ۳ مدل عددی سنگ بکر و توده سنگ مصنوعی نشان داده شده است. نیروی محوری به بالا و پایین نمونه با سرعت ثابت و کم وارد و تنش در داخل نمونه با فیش نوشته‌شده ثبت می‌شود. 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 مدل‌سازی می‌شود.



شکل ۳- نمونه مدل‌سازی عددی سنگ بکر و توده سنگ مصنوعی

محاسبه می‌گردند.

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

در این رابطه،  $e$  لگاریتم پایه،  $k_n$  و  $k_s$  معرف سختی نرمال و برشی اولیه می‌باشند.  $f_t$  و  $f_s$  معرف مقاومت کشش و معرف مقاومت برشی سطوح می‌باشند.

حداکثر مقاومت برشی سطوح تماسی که بیانگر مقاومت برشی چسبندگی سطوح می‌باشد از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

در این رابطه،  $c$  بیانگر چسبندگی و  $\sigma_n$  بیانگر تنش نرمال و  $\varphi$  معرف زاویه اصطکاک سطوح چسبیده می‌باشند.

با عبور از مقاومت حداکثر بحرانی در حال کشش، برش و یا ترکیبی از این دو، سطوح می‌شکنند. برای ناحیه بعد شکست یعنی ناحیه نرم‌شوندگی رابطه تنش-جابجایی که تنش را به جابجایی سطوح مرتبط می‌کند استفاده می‌شود:

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

در اینجا،  $\sigma_n$  و  $\tau$  بیانگر تنش‌های نرمال و برشی در طول سطوح تماسی به ترتیب می‌باشند.  $\chi(D_i)$  تابع نرم‌شوندگی می‌باشد که کاهش مقاومت سطوح در ناحیه بعد شکست را توصیف می‌کند. معادله نرم‌شوندگی بر اساس نتایج آزمایشگاهی به صورت زیر است [27]

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

$a$ ،  $b$  و  $c$  ثابت‌های به دست آمده آزمایشگاهی می‌باشند که به ترتیب برابر  $0/63$ ،  $1/8$  و  $6$  هستند. و متغیر خرابی با مقدار بین ۰ و ۱ است. این معادله شیب و انحنای ناحیه نرم‌شوندگی منحنی تنش-جابجایی را برای دو حالت کشش و برش تعریف می‌کند.

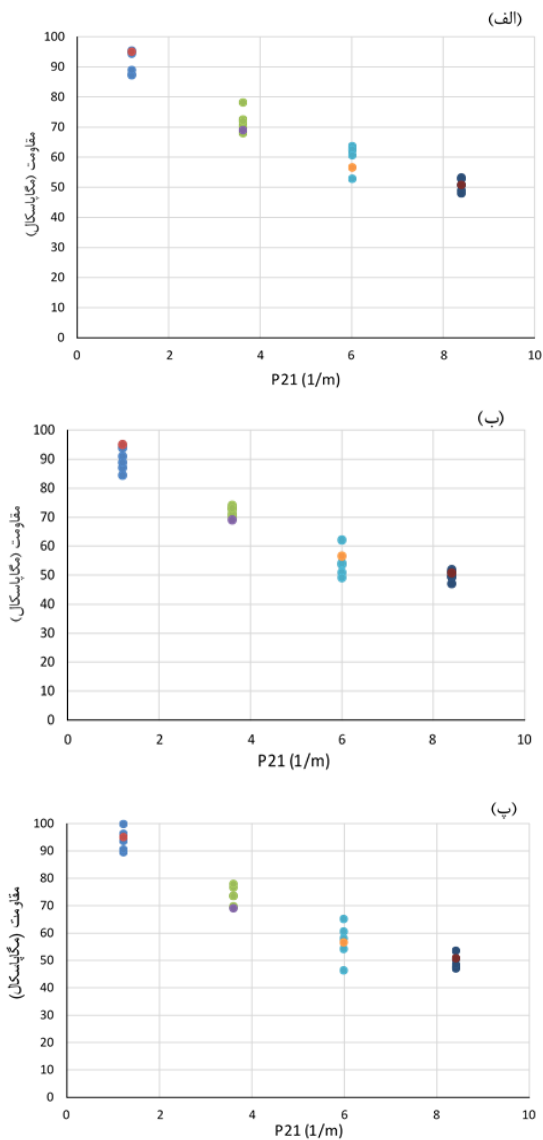
متغیر خرابی سطوح در حالت کشش [28]، برش و ترکیبی [29] و همچنین مقادیر باقیمانده جابجایی‌ها از روابط ۵ و ۶ زیر محاسبه می‌گردند:

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

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

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

مقدار میانگین استفاده شده به منظور مقایسه با نتایج به دست آمده از حالت توزیعی مختلف (2/5 (الف)، 5 (ب)، 7/5 (پ) و 10 (ت)) و 5 تکرار با توزیع مربوطه برای آن حالت است. همان طوری که مشخص است استفاده از مقدار توزیعی، نتایج مقاومت توده سنگ مختلفی خواهد داشت. چرا که در این رویکرد برخلاف مدل سازی های انجام شده با شبکه شکستگی مرسوم و با یک مقدار میانگین پارامتر ژئومکانیکی اختصاص داده شده به شبکه شکستگی، بدون توجه به پارامترهای هندسی شبکه شکستگی، احتمال شکست هر شکستگی در شبکه شکستگی با یکدیگر متفاوت خواهد بود. با توجه به شکل 5، به طور کلی با کاهش انحراف استاندارد، پراکندگی نتایج کم و مقادیر به نتیجه ای که با در نظر گرفتن مقدار میانگین (رنگ متفاوت در هر گروه شبکه شکستگی) حاصل می شود، نزدیک تر می شوند.

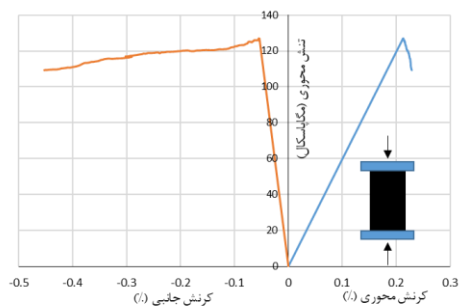


برای واسنجی ویژگی های تماسی سطوح یعنی سختی نرمال و برشی، چسبندگی، زاویه اصطکاک و تنش کششی سطوح ورونویی روند تکراری سعی و خطا انجام می شود. مقاومت حداکثر، مدول یانگ، ضریب پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک به دست آمده از آزمایشگاه و یا میدانی اهداف واسنجی در نظر گرفته می شوند. همچنین برای دستیابی به چسبندگی و زاویه اصطکاک نمونه، تنش های محصور 1 تا 4 در نظر گرفته شد. با استفاده از روابط زیر [31]، چسبندگی و زاویه اصطکاک نمونه سنگی تعیین می شود.

$$\varphi = \arcsin \frac{m-1}{m+1} \quad (8)$$

$$c = b \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \quad (9)$$

در این رابطه،  $c$  بیانگر چسبندگی و  $\varphi$  زاویه اصطکاک نمونه است.  $m$  بیانگر شیب خط و  $b$  محل تقاطع خط با محور است. این خط از برازش خط بر روی داده های تنش حداکثر-تنش محصور به دست می آید. همچنین منحنی تنش- کرنش آزمایش تک محوره در شکل 4 آورده شده است. نتایج در کل تطابق خوبی با داده های ارائه شده در منابع [11,12,32] برای این نمونه سنگ مفروض یعنی مدول یانگ 60 گیگاپاسکال، نسبت پواسون 0/25 و مقاومت فشاری تک محوره 127 مگاپاسکال دارد. با توجه به معادلات 8 و 9، زاویه اصطکاک و چسبندگی نمونه به ترتیب برابر با 50/16 درجه و 23/03 مگاپاسکال است. بعد از این مرحله، همان طوری که در بخش 2 توضیح داده شد، شبکه شکستگی های تولید شده وارد مدل شده و تحلیل عددی می شوند.



شکل 4- منحنی تنش-کرنش برای آزمایش بارگذاری فشاری تک محوره

### 3- نتایج و بحث

شکل 5 بیانگر مقاومت حداکثر به دست آمده توده سنگ برای هر مدل و در هر شرایط است. با توجه به شکل و برای همه حالات، کاهش قابل توجهی در مقاومت توده سنگ با افزایش شدت شکستگی یعنی  $P_{21}$  مشاهده می شود. در شکل، رنگ متفاوت در هر گروه

نخواهد بود. در نتیجه با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق، پیشنهاد می‌شود اثر توزیعی پارامترهای مکانیکی در تحلیل و کاربردهای بزرگ مقیاس مهندسی مورد نظر قرار گیرد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در اکثر موارد در تحلیل‌های فضاهای زیرزمینی و روباز، توزیع پارامتر مکانیکی زاویه اصطکاک شکستگی‌ها با فرض یک مقدار میانگین در نظر گرفته می‌شود. اما در واقع، این پارامتر برای هر دسته شکستگی‌ها به صورت توزیعی در توده سنگ است. این امر تأثیر زیادی بر میزان برآورد مقاومت توده‌سنگ در مهندسی ژئومکانیک دارد. در نظر گرفتن ویژگی‌های تصادفی پارامترهای مکانیکی شکستگی و ارایه مدلی تا حد امکان واقعی از توده‌سنگ که گویای ویژگی‌های مکانیکی شکستگی‌های توده‌سنگ برجا باشد، به منظور برآورد مقاومت و رفتار توده سنگ لازم است. در این مقاله با توجه به تأثیر شدید پارامتر مکانیکی زاویه اصطکاک شکستگی بر برآورد مقاومت توده سنگ، مدل تصادفی شبکه شکستگی با در نظر گرفتن ویژگی آماری این پارامتر ساخته شده است. نتایج بیانگر ضرورت در نظرگیری توزیع ویژگی‌های مکانیکی شکستگی (ناهمگنی مکانیکی) به منظور انجام و تحلیل مدل‌سازی‌های واقعی تر و مناسب‌تر در برآورد مقاومت و رفتار توده سنگ است. با توجه به این قابلیت‌های در نظر گرفته‌شده در این رویکرد، می‌توان از آن در مطالعات و تحلیل‌های رفتاری توده سنگ فضاهای روباز یا زیرزمینی به خوبی استفاده کرد.

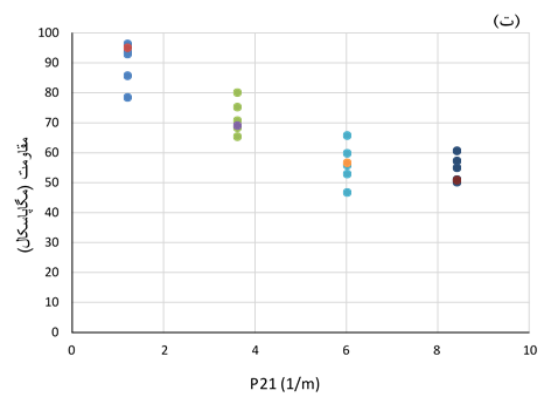
fracture network model for geometrical modeling of cylindrically folded rock layers. *Engineering Geology*, 215, 81-90.

[5] Jing, Y. Armstrong, R. T. & Mostaghimi, P. (2017). Rough-walled discrete fracture network modelling for coal characterisation. *Fuel*, 191, 442-453. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.094>

[6] Baghbanan, A. & Jing, L. (2007). Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(5), 704-719. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.11.001>

[7] Xu, C. & Dowd, P. (2010). A new computer code for discrete fracture network modelling. *Computers & Geosciences*, 36(3), 292-301. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2009.05.012>

[8] Min, K. B. & Jing, L. (2003). Numerical determination of the equivalent elastic compliance tensor for fractured rock masses using the distinct element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(6), 795-816.



شکل ۵- مقاومت توده سنگی مدل‌سازی شده برای حالات انحراف استاندارد 2/5 (الف)، 5 (ب)، 7/5 (پ) و 10 (ت) درجه

شبکه شکستگی مجزا در مهندسی ژئومکانیک به طور گسترده-ای استفاده می‌شود. این روش اساس توسعه مدل‌های توده سنگ مصنوعی در تحلیل‌های مکانیکی است [33]. تکنیک‌های عددی مانند مدل توده سنگ مصنوعی ابزاری است که ویژگی‌های توزیع آماری هندسی شکستگی‌های توده سنگ را در مقیاس‌های مختلف در نظر می‌گیرد. به طور کلی همان طوری که مرور شد، اثر توزیعی پارامتر مکانیکی شکستگی در مدل‌سازی‌های عددی در نظر گرفته نمی‌شود و یک مقدار برای کل دسته لحاظ می‌شود. در این تحقیق، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، تأثیر زاویه اصطکاک داخلی بر مقاومت توده سنگ بررسی شد. با در نظر گرفتن این رویکرد، دیگر یک شکستگی در یک دسته شکستگی زاویه اصطکاک یکسانی با شکستگی دیگر در همان دسته نخواهد داشت. بنابراین احتمال شکست مکانیکی هیچ شکستگی در یک دسته شکستگی یکسان

#### ۵- منابع

[1] Rogers, & Moffitt, K. (2006). Probabilistic slope and tunnel block stability analysis using realistic fracture network models. In *Golden Rocks 2006, The 41st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association. <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-06-1052>

[2] Mayer, J. M. & Stead, D. (2017). Exploration into the causes of uncertainty in UDEC grain boundary models. *Computers and Geotechnics*, 82, 110-123. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.10.003>

[3] Hamdi, P. Stead, D. & Elmo, D. (2014). Characterizing the influence of micro-heterogeneity on the strength and fracture of rock using an FDEM- $\mu$ DFN approach. *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses*, 359.

[4] Fereshtenejad, S. Afshari, M. K. Bafghi, A. Y. Laderian, A. Safaei, H. & Song, J. J. (2016). A discrete

- [19] Bidgoli, M. N. & Jing, L. (2014). Anisotropy of strength and deformability of fractured rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), 156-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.01.009>.
- [20] Noorian-Bidgoli, M. & Jing, L. (2015). Stochastic analysis of strength and deformability of fractured rocks using multi-fracture system realizations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 78, 108-117. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.05.010>.
- [21] Grenon, M. Bruneau, G. & Kalala, I. K. (2014). Quantifying the impact of small variations in fracture geometric characteristics on peak rock mass properties at a mining project using a coupled DFN-DEM approach. *Computers and Geotechnics*, 58, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.01.010>
- [22] Havaej, M. Coggan, J. Stead, D. & Elmo, D. (2016). A combined remote sensing-numerical modelling approach to the stability analysis of Delabole Slate Quarry, Cornwall, UK. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(4), 1227-1245. <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-015-0805-z>.
- [23] 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>
- [24] Lorig, L. J. Darcel, C. Damjanac, B. Pierce, M. & Billaux, D. (2015). Application of discrete fracture networks in mining and civil geomechanics. *Mining Technology*, 124(4), 239-254.
- [25] 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.
- [26] Fathipour-Azar, H. Wang, J. Jalali, S. M. E. & Torabi, S. R. (2019). Numerical modeling of geomaterial fracture using a cohesive crack model in grain-based DEM. *Computational Particle Mechanics*, 1-10.
- [27] Evans, R. H. & Marathe, M. S. (1968). Microcracking and stress-strain curves for concrete in tension. *Matériaux et Construction*, 1(1), 61-64.
- [28] Munjiza, A. A. (2004). The combined finite-discrete element method. John Wiley & Sons.
- [29] Tatone, B. S. A. (2014). Investigating the evolution of rock discontinuity asperity degradation and void space morphology under direct shear. University of Toronto (Canada).
- [30] 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-
- [9] Kulatilake, P.H.S.W. Park, J. Um, J. 2004. Estimation of Rock Mass Strength and Deformability in 3-D for a 30 m Cube at a Depth of 485 m at Aspo Hard Rock Laboratory. *Geotechnical and Geological Engineering*, 22(3), 313-330. DOI:10.1023/B:GEGE.0000025033.21994.c0.
- [10] Elmo, D. & Stead, D. (2010). An integrated numerical modelling-discrete fracture network approach applied to the characterisation of rock mass strength of naturally fractured pillars. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(1), 3-19. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0027-3>
- [11] Vyazmensky, A. Elmo, D. & Stead, D. (2010). Role of rock mass fabric and faulting in the development of block caving induced surface subsidence. *Rock mechanics and rock engineering*, 43(5), 533-556. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0069-6>
- [12] 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>.
- [13] Esmaeili, K. Hadjigeorgiou, J. & Grenon, M. (2010). Estimating geometrical and mechanical REV based on synthetic rock mass models at Brunswick Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(6), 915-926. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.05.010>
- [14] Lu, Y. Martin, C. D. & Lan, H. (2013). Strength of intact rock containing flaws. In *47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association. <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-2013-175>
- [15] Gao, F. Q. & Kang, H. P. (2016). Effects of pre-existing discontinuities on the residual strength of rock mass-Insight from a discrete element method simulation. *Journal of Structural Geology*, 85, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.02.010>
- [16] Bidgoli, M. N. Zhao, Z. & Jing, L. (2013). Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(6), 419-430. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.09.002>.
- [17] Khani, A. Baghbanan, A. & Hashemolhosseini, H. (2013). Numerical investigation of the effect of fracture intensity on deformability and REV of fractured rock masses. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 63, 104-112.
- [18] Khani, A. Baghbanan, A. Norouzi, S. & Hashemolhosseini, H. (2013). Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (60), 345-352.

for rock masses. *Geotechnique*, 57(9), 757-766.  
<https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.9.757>

[33] 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), 219-24.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.11.014>

268.

[31] 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 & Geomechanic Abs*, 20(6).

[32] Pine, R. J. Owen, D. R. J. Coggan, J. S. & Rance, J. M. (2007). A new discrete fracture modelling approach