نشریه‌ی علمی-پژوهشی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره ششم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۱، صفحه ۲۲ تا ۳۱

بررسی تاثیر ناهمگنی بر مکانیزم شکست نمونه‌های سنگی

سید ایمان سجادی‌فر، حمیدرضا نجاتی،* مهرداد ایمانی
گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۲؛ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱

چکیده

سنگ ها به علت اینکه از کانی‌های مختلف تشکیل شده‌اند معمولا دارای ساختاری ناهمگن می‌باشند. این ساختار ناهمگن همواره فرایند توسعه ترک و گسیختگی نمونه‌های سنگی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از طرف دیگر در اکثر مطالعات مربوط به مکانیک گسیختگی سنگ‌ها، نمونه‌های سنگی همگن در نظر گرفته می‌شوند و یا به اثرات ناشی ناهمگنی نمونه‌ها توجهی نمی‌شود. در این مطالعه، تلاش شده است تا با استفاده از تغییر میزان پراکندگی (واریانس) خواص مکانیکی سنگ، ناهمگنی خواص مکانیکی در نمونه‌های سنگی شبیه سازی شود و اثرات آن بر مکانیزم شکست سنگ‌ها مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور از نرم افزار *PFC* برای شبیه سازی نمونه‌های سنگی استفاده شده است. این نرم‌افزار بر مبنای پارامترهای میکرمکانیکی اعمالی به پیوندها و مقایسه خواص مکانیکی نمونه شبیه-سازی شده با نتایج آزمون های آزمایشگاهی کالیبره می‌شود. مدل پیوندی استفاده شده در مدل‌سازی، مدل پیوند مسطح است. در این مدل، هر پیوند به صورت یک سطح محدود بین دو سطح فرضی می‌باشد که این سطح خود به چندین قسمت تقسیم شده است که هر کدام از این قسمت‌ها دارای مقاومت اولیه‌ایی هستند. بر این اساس یکی از پارامترهای موثری که رفتار مکانیکی نمونه‌های شبیه‌سازی شده تاثیر می‌گذارد مقاومت چسبندگی بین پیوندها می-باشد. در این مطالعه با در نظر گرفتن مقدار پراکندگی مختلف برای چسبندگی پیوندها، نمونه‌هایی با ناهمگنی مختلف شبیه‌سازی شده است. همچنین برای بررسی جامع‌تر موضوع، سعی شده از سنگ‌های مختلف با شاخص شکنندگی متفاوت استفاده شود. برای این منظور سه نمونه سنگ یا شبه سنگ، از جمله گچ، ماسه‌سنگ و گرانیت با نسبت شاخص‌های شکنندگی ۶/۶، ۱۳/۷ و ۲۲/۴ انتخاب شده است. نتایج شبیه سازی‌های انجام شده نشان می دهد که شکل شکست نمونه با تغییر انحراف استاندارد چسبندگی بین پیوندها، تغییر می‌کند. بنابراین برای تعیین مقدار انحراف استاندارد چسبندگی در شبیه سازی باید شکل شکست نمونه شبیه سازی شده با شکل شکست نمونه در آزمایشگاه مطابقت داشته باشد.

واژگان کلیدی **ناهمگنی، شکل شکست، شکنندگی، چسبندگی، خواص میکرومکانیکی**

۱- مقدمه

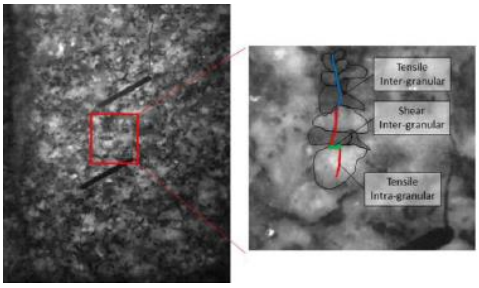
سنگ یا مواد شبه سنگی دارای ساختار ترکیبی یا ناهمگن می‌باشند که در طیف وسیعی قابل تغییر هستند؛ به طوری که در برخی از سنگ‌ها با چشم غیرمسلح ناهمگنی سنگ قابل تشخیص است ولی در برخی دیگر از نمونه‌ها برای مشاهده ناهمگنی نیاز به استفاده از میکروسکوپ با بزرگنمایی بالا می‌باشد. همچنین سنگ‌ها دارای ناپیوستگی‌هایی به شکل حفره‌ها، ریزترک‌ها و صفحات ضعیف هستند که همه این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که این ساختارها معمولا تصادفی هستند[۱].

یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر رفتار مکانیکی سنگ‌ها در طی فرآیند شکست، میزان ناهمگنی آن‌ها است. این ناهمگنی می‌تواند ناشی از دانه بندی ماتریس سنگ باشد و یا از خواص مکانیکی متفاوت قسمت‌های مختلف سنگ نشات بگیرد. میکرومکانیک یک چارچوب کلی برای مطالعه ریزترک های موجود در مواد ناهمگن مانند سنگ را فراهم می‌کند. بر این اساس، مدل‌های عددی متعددی که تاثیر ریزترک‌ها بر مکانیزم شکست را در نظر می‌گیرند، توسعه یافته‌اند[۲].

*نویسنده مسئول: دانشیار دانشگاه تربیت مدرس،
پست الکترونیک: **h.nejati@modares.ac.ir**

مکانیک شکست الاستیک خطی از ابزارهای اساسی برای تجزیه و تحلیل بسیاری از مشکلات مربوط به انتشار ترک است. با این حال، نظریه مکانیک شکست خطی تنها برای مواد همگن با یک ترک یا چند ترک منظم قابل استفاده است. این نظریه برای توصیف روند شکست مواد ناهمگن شبه شکننده مانند سنگ، بتن و سرامیک کافی نیست[۳].

توده سنگی که به طور طبیعی شکست خورده، یک محیط بسیار گسسته است. از سوی دیگر، آزمون‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شکستگی درون و بین‌دانه‌ای، ناشی از ماهیت گسسته دانه‌های سنگی در سطح میکروسکوپ است. شکل ۱ بیانگر شکستگی‌های درون و بین‌دانه‌ای مشاهده شده در آزمایش شکست هیدرولیکی گرانیت با ضعف اولیه می‌باشد[۴].



شکل ۱- شکستگی‌های بین و درون‌دانه‌ای مشاهده شده در آزمایشگاه هیدرولیک شکستن گرانیت با ضعف اولیه[۴].

در مطالعه حاضر، تاثیر ناهمگنی سنگ بکر بر شکل شکست نمونه‌ها در آزمایش تک محوری فشاری مورد بررسی قرار گرفته است. برای دستیابی به هدف تحقیق، از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار PFC_{2D}[1] استفاده شده است. در ادامه مکانیزم شکست نمونه‌های با شکنندگی متفاوت، نیز بررسی شده است.

۲- مطالعات گذشته

از مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به استفاده وانگ از روش المان محدود (FEM) برای بررسی اثر ناهمگنی و ناهمسانگردی سنگ، در ناحیه آسیب دیده اطراف محیط بازشدگی، اشاره کرد. ایشان با استفاده از حسگرهای آکوستیک، که در اطراف بازشدگی نصب شده بودند، میزان آسیب وارده بر نمونه را بررسی کرد. سپس با استفاده از شبیه‌سازی عددی توسط کد RFPA2D، تاثیر ناهمگنی بر میزان آسیب نمونه را شبیه‌سازی کرد. نتایج این مطالعه نشان داد که الگوی ریزترک‌ها در مدل‌سازی عددی با رخدادهای تعیین شده انتشار آکوستیک (AE) در آزمون آزمایشگاهی، سازگار است[۵].

[1] Particle Flow Code

لی‌یو۲ و همکاران[۱] بر اساس تجزیه و تحلیل زیرساختارها و آنالیز تصویر، ناهمگنی سنگ را با استفاده از کد R-T2D و نظریه همگن‌سازی، مدل‌سازی کردند. کد R-T2D یک ابزار پایدار، مطمئن و با ارزش برای تحقیق در مورد روند شکست مواد ناهمگن است. ایشان برای مدل‌سازی ناهمگنی سنگ، یک روش آماری استفاده کردند و نشان دادند که نتایج شبیه‌سازی، منحنی غیرخطی تنش-کرنش و روند شکستگی سنگ ناهمگن را پیش‌بینی می‌کند. همچنین ایشان تطابق خوب نتایج حاصل از مدل‌سازی آماری با نتایج حاصل از مدل‌سازی همگن را گزارش کردند.

مارکوس۳ و همکاران[۶] اثر اندازه ابعاد نمونه بر روی چقرمگی شکست بتن را بررسی نمودند. آن‌ها اثر ناهمگنی، ناشی از تغییر اندازه دانه بر خواص شکست بتن را با استفاده از تجزیه و تحلیل داده های چقرمگی شکست (KIc) در نمونه‌های SENB ۴و آزمون خمش چهار نقطه۵، مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش مقادیر KIc بدست آمده از طریق تئوری LEFM ۶ و داده‌های آزمایشگاهی آزمون خمش، با تطابق خوبی گزارش شده است. در این تحقیق مارکوس و همکاران بر تاثیر اندازه ذرات بتن بر چقرمگی شکست آن تاکید کرده‌اند هر چند این ارتباط برای همه ابعاد دانه‌ها به صورت مستقیم نمی‌باشد.

صبری و همکاران [۷] به بررسی آزمایشگاهی اثر دانه‌بندی محیط‌های ناهمگن بر گسترش ترک پرداختند. آن‌ها با مطالعه اثر ناهمگنی ناشی از اندازه دانه‌ها به عنوان یکی از عوامل مهم در چقرمگی نمونه‌ها و تاثیرگذار در مسیر گسترش ترک، به این نتیجه رسیدند که رابطه میان چقرمگی مد برش و کشش با اندازه دانه‌ها به صورت غیر خطی است. به گونه‌ای که بیشترین چقرمگی مربوط به نمونه‌هایی با اندازه دانه‌های متوسط (۲/۳۸-۲) میلی‌متر است و با افزایش و یا کاهش اندازه دانه‌ها، چقرمگی نمونه‌ها در هر دو حالت بارگذاری برش و کشش کاهش می‌یابند. با مطالعه مسیر رشد ترک برای نمونه‌های با دانه‌بندی مختلف مشاهده کردند که مسیر رشد ترک در نمونه‌هایی با دانه‌بندی ریزتر، منظم‌تر بوده و از نوک ترک اولیه شروع شده و البته جهت آن عمود بر تنش کششی حداکثر گسترش می‌یابد. اما در نمونه‌هایی با دانه‌بندی درشت‌تر، ترک از مرز دانه‌ها شروع شده و در یک مسیر نامنظم‌تر رشد کرده و انتهای مسیر رشد ترک در نقاطی با مقاومت کم در محیط نمونه است.

بهاالدینی [۸] به بررسی تاثیر ابعاد نمونه بر رفتار مکانیکی سنگ بکر پرداخت. برای این منظور، حدود ۱۲۰ نمونه ماسه‌سنگ با

[2] Liu
[3] Marques
[4] Straight Notched Disk Bending
[5] four point bending test
[6] Linear Elastic Fracture Mechanics

قطر بین ۱۹ تا ۱۴۵ میلی‌متر و نسبت لاغری ۱ تا ۴ تهیه کرد و این نمونه‌ها را تحت بارگذاری تک محوره قرار داد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش قطر نمونه تا حدود ۵۰ میلی‌متر، مقاومت فشاری تک محوره افزایش و پس از آن، قطر نمونه تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت ندارد. همچنین مشخص شد که قطر نمونه تاثیر چشم‌گیری بر مدول الاستیسته و ضریب پواسون ندارد. نتایج بررسی تاثیر نسبت لاغری نشان داد که با افزایش این نسبت تا حدود ۲/۵، مقاومت کاهش می‌یابد و پس از آن این تاثیر از بین می‌رود.

در مطالعه‌ای دیگر، بهاالدینی و همکاران[۹] عنوان تاثیر میکروپارامتراها را بر خواص مکانیکی سنگ بکر در نرم‌افزار PFC مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ابتدا پارامترهای مدل پیوند ذرات (BPM)[۷] را برای نوعی کلاستر از طریق آنالیز بازگشتی کالیبره کرده و سپس آنالیز حساسیت را بر روی تاثیر میکروپارامترها صورت داده‌اند. نتایج این بررسی نشان داد که اندازه ذرات، بر خواص ژئومکانیکی ماده بسیار تاثیرگذار است و با افزایش اندازه متوسط ذرات، مقاومت فشاری تک محوره و مدول الاستیسیته کاهش و نسبت پواسون افزایش می‌یابد.

هوآنگ[۸] و همکاران [۱۰] به بررسی تاثیر ناهمگنی، مانند ناهمگنی ذاتی سنگ و اندازه دانه، بر روی چقرمگی شکست مواد پرداختند. آن‌ها از یک مدل DEM [۹]دو بعدی برای شبیه‌سازی آغاز و انتشار شکست هیدرولیکی در رژیم‌های مختلف انتشار، استفاده کردند. شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که چقرمگی موثر نمونه ذرات تصادفی بزرگ‌تر از نمونه ذرات معمولی است که این امر ناشی از خمیدگی ناشی از ذرات است. در این حالت فشار خالص در نمونه ذرات تصادفی نیز تحت تأثیر آرایش هندسی محلی ذرات قرار می‌گیرد.

۳- ناهمگنی بافت سنگ‌ها

سنگ‌ها به علت ساختار دانه‌ای و نامتجانس، دارای بافتی ناهمگن می‌باشند. از آنجایی که ناهمگنی‌های موجود در بافت سنگ ها کاملا تصادفی می‌باشند، بنابراین رفتار مکانیکی سنگ‌ها بسیار پیچیده می باشد. دانه‌های تشکیل دهندهٔ سگ‌ها و سیمان بین آن‌ها، قابلیت تغییر شکل دارند و ممکن است تحت بارگذاری بشکنند. رفتار مکانیکی سنگ در زمان اعمال بار، ناشی از تغییر شکل، رشد ترک و اثرات متقابل ریزترک‌ها می‌باشد. مدل ذرات متصل به هم برای سنگ، به طور مستقیم این سیستم دانه‌ای را مدل می‌کند و رفتارهای حاصل از این مدل‌سازی در قیاس با نمونه واقعی سنگ تطابق بسیار خوبی دارد [۱۱].

یافته‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که بسیاری از ترک‌های حاصل از اعمال بارهای فشاری، در محل‌های ضعیف موجود در بافت سنگ (و یا ریزترک‌های اولیه) مانند مرز دانه‌های سنگ و حفرات، میل به تجمع و شکل‌گیری دارند. تقریبا جهت تمامی ترک‌های حاصل از اعمال بارهای فشاری در راستای بیشترین فشار اعمالی خواهد بود [۱۲].

در سنگ‌های رسوبی مانند ماسه‌سنگ، سیمان واقعی در بین دانه‌ها حضور دارد اما در سنگ‌های کریستالی مانند گرانیت، اتصال بین دانه‌ای را می‌توان به صورت سیمان فرض کرد. اتصالات سیمانی که در میان ذرات سنگ وجود دارند، قادر به تحمل فشار، کشش، نیروی برشی و حتی لنگر خمشی هستند ولی اتصالات فاقد سیمان فقط فشار و نیروی برشی را تحمل می‌کنند. عوامل بسیار زیادی بر روی رفتار مکانیکی سنگ تاثیر گذار می‌باشد که می‌توان به تغییر شکل‌پذیری، مقاومت ذرات و سیمان، اندازه ذرات، شکل ذرات، فشردگی ذرات و میزان سیمانی شدن (میزان فضای بین ذرات که با سیمان پر شده است) اشاره کرد [۱۲].

۴- آزمون‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق به منظور بررسی اثر ناهمگنی، سعی شده از سنگ‌های مختلف با شاخص شکنندگی[۱۰] (BI) متفاوت استفاده شود. شاخص شکنندگی مورد نظر نسبت مقاومت فشاری به مقاومت کششی نمونه های سنگی می‌باشد که توسط Hucha and Das در سال ۱۹۷۴ ارایه شده است. به همین منظور مشخصات سه نوع سنگ یا شبه سنگ (گچ، ماسه سنگ و گرانیت) با نسبت شاخص‌های شکنندگی ۶/۶، ۱۳/۷ و ۲۲/۴ انتخاب شده و در جدول۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱- مشخصات آزمایشگاهی سنگ‌های مورد نظر[۱۱, ۱۳, ۱۴]

نوع سنگ / مشخصات ژئومکانیکی	گچ	ماسه‌سنگ	گرانیت
مقاومت فشاری (MPa)	۶/۶	۱۵۹/۱۳	۲۲۴
مقاومت کششی (MPa)	۱	۱۱/۵۸	۱۰
مدول الاستیسیته (GPa)	۵	۳۹/۳۶	۶۰
نسبت پواسون	۰/۲	۰/۱۸	۰/۱۷
شاخص شکنندگی	۶/۶	۱۳/۷	۲۲/۴

کالیبراسیون مدل عددی که در ادامه به طور کامل مورد بررسی قرار خواهد گرفت، هدف اصلی از انجام آزمون‌های آزمایشگاهی می‌باشد. مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی غیر مستقیم (برزیلی)، مدول یانگ و نسبت پواسون از

[7] Bonded particle model
[8] Huang
[9] Discrete Element Method

10 . Brittleness Index

پارامتری اصلی و مورد نیاز جهت کالیبراسیون مدل عددی می‌باشند که مقادیر آن برای سه نوع سنگ مختلف در جدول ۱ آمده است.

۵- مدل‌سازی عددی

در این تحقیق به منظور بررسی اثر ناهمگنی از روش عددی و نرم‌افزار PFC_{2D} استفاده شده است. نرم‌افزار PFC از مجموعه‌ایی از دیسک‌ها در حالت دو بعدی و مجموعه‌ایی از گوی‌ها در حالت سه بعدی تشکیل می‌شود. برای اینکه سیمان بین دانه‌ها مدل شود بایستی پیوندی بین دیسک‌ها برقرار شود که هر کدام از این پیوندها در قالب مدل پیوند معرفی می‌شوند [۱۵].

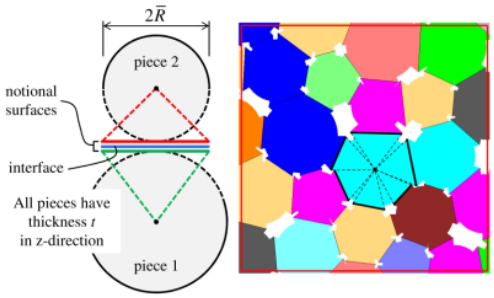
روش مدل پیوند ذرات، نمونه‌ای از یک روش مستقیم مدل‌سازی می‌باشد که در آن ذرات و اتصالات مانند بافت اجزای سنگ را تشکیل می‌دهند. روش مدل پیوند ذرات، سنگ را به عنوان یک محیط دانه‌ای سیمانی با استفاده از مقیاس ذاتی اندازه دانه‌ها، تخمین می‌زند و برای کاربر این امکان را فراهم می‌سازد که مصالح ترکیبی را به صورت شبیه‌سازی تحت آزمایشاتی قرار داده و چگونگی تاثیر خواص میکرومکانیکی را بر روی رفتار ماکروسکوپیک سنگ بررسی نماید. این یک روش مدل‌سازی جامع و کامل می‌باشد که با استفاده از تغییر خواص میکرومکانیکی مدل، می‌توان خواص ماکرومکانیکی آن‌ها را تعیین کرد [۱۵].

مدل‌سازی هر نوع آزمایشی با استفاده از نرم‌افزار PFC اصولا از دو بخش کلی کد نویسی تشکیل شده است. بخش اول، ساخت نمونه و رسیدن به بسته‌ای با مشخصات مناسب مانند فشردگی، تخلخل و هندسه مورد نظر (با ابعاد استاندارد) می‌باشد. بخش دوم، مربوط به بارگذاری نمونه و بدست آوردن پارامترهای مکانیکی مدل عددی می‌باشد[۱۵].

در مدل‌سازی‌های عددی توسط نرم‌افزارهای FLAC و UDEC، خصوصیات ماکرومکانیکی مورد نیاز برای مدل‌سازی (نظیر مدول یانگ، نسبت پواسون، مقاومت تک محوره و ...)، مستقیما از نتایج آزمایشگاهی استخراج شده و به مدل اعمال می‌گردد. در حالی‌که در نرم‌افزار PFC امکان اعمال مستقیم خصوصیات ماکرومکانیکی به مدل وجود ندارد. به همین منظور از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی برای کالیبراسیون مدل پیوند ذرات استفاده می‌شود. با انتخاب صحیح خصوصیات میکرومکانیکی (نظیر سختی نرمال و برشی اتصال‌ها، مدول یانگ اتصال‌ها و ...) و همچنین چگالی و توزیع اندازه ذرات که با استفاده از یکی از مدل‌های پیوند ذرات که در این تحقیق از مدل پیوند مسطح استفاده شده است به مدل عددی اعمال می‌شود [۱۱].

۶- مدل پیوند مسطح[11]

پوتایندی [۱۶]، مدل پیوند مسطح را معرفی کرده است که در این مدل پیوند، هر پیوند به صورت یک سطح محدود بین دو سطح فرضی می‌باشد که این سطح خود به چندین قسمت تقسیم شده است که هر کدام از این قسمت‌ها دارای مقاومت اولیه‌ایی هستند. در نهایت با استفاده از مدل پیوند مسطح می‌توان سنگ‌های با نسبت مقاومت فشاری به مقاومت کششی بالا را مدل‌سازی کرد. در حالت کلی مدل پیوند مسطح قادر به برقرار کردن پیوند، اصطکاک سطح، الاستیک خطی و همچنین آسیب می‌باشد. هر سطح بین دو المان به زیر المان تقسیم می‌شود که هر کدام از این المان‌ها قادر به شکست خواهند بود. هر کدام از این زیر المان‌ها در ابتدا دارای پیوندی هستند که اگر مقدار بار وارده از حد مجاز بیشتر شود، پیوند خواهد شکست و رفتار پیوند شکسته شده به صورت مدل خطی می‌شود که رفتار آن به صورت اصطکاکی می‌باشد. هر المان از قانون نیرو-جابجایی تبعیت می‌کند که قادر به تحمل نیرو و ممان می‌باشد [۱۷].



شکل۲- مدل پیوند مسطح[۱۷]

۷- کالیبراسیون مدل عددی

در نرم‌افزار PFC تعیین رابطه میان خصوصیات میکرومکانیکی و ماکرومکانیکی بسیار مشکل بوده و مقادیر میکرومکانیکی را نمی‌توان به صورت مستقیم از روی نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی بدست آورد. در عمل میکروپارامترهای مدل عددی را می‌توان بر اساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی کالیبره کرد. در این صورت بر طبق تفاوت ماکروپارامترهای بدست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی، میکروپارامترهای مدل عددی تغییر داده را تا آنجایی که نتایج ماکروپارامترهای بدست آمده از مدل عددی کمترین اختلاف را با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی داشته باشد.

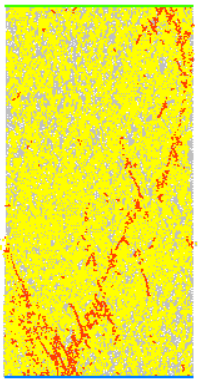
[11] Flat Joint Model

۸- آزمایش مقاومت فشاری تک محوره در مدل عددی

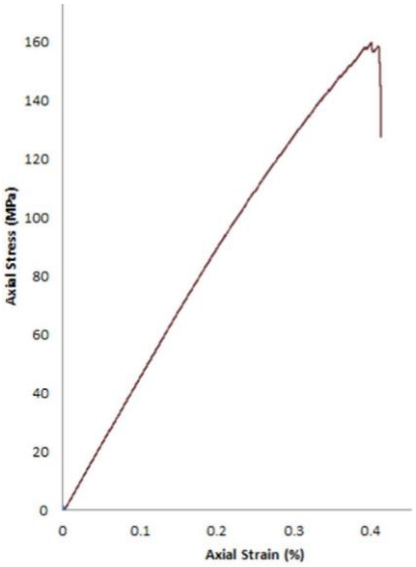
ابعاد نمونه‌ها در مدل عددی، شامل ارتفاع ۱۰۸ mm و عرض mm ۵۴ است که حاوی تعدادی دیسک می‌باشند. اندازه دیسک‌ها از قسمت‌های بسیار مهم شبیه‌سازی عددی است، چرا که اگر تعداد دیسک‌ها زیاد باشد، زمان آنالیز برنامه بسیار زیاد می‌شود و اثر مستقیمی روی نتایج بدست آمده خواهد داشت. همچنین برای اعمال بار دو صفحه صلب افقی در بالا و پایین نمونه تعبیه شده و اعمال فشار به نمونه از طریق همین صفحه‌ها انجام می‌شود. بین این صفحه‌ها و دیسک‌ها اصطکاکی در نظر گرفته نشده است. میزان تنش‌های اعمال شده به نمونه با تقسیم نیروی عمل کننده روی صفحه ها بر سطح مقطع آن‌ها محاسبه می‌گردد. کرنش محوری در مدل با ثبت جابجایی صفحات بالا و پایین اندازه‌گیری می‌شود. کرنش جانبی نیز با مانیتورکردن جابجایی جفت دیسک‌های جانبی که در امتداد محور x و در مرکز سطح نمونه قرار گرفته‌اند، اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۳، شکل شکست و نمودار تنش-کرنش نمونه ماسه‌سنگ در آزمایش فشاری تک محوری را نمایش می‌دهد. مدول یانگ، نسبت پواسون، تنش شروع ترک و مقاومت تک محوری فشاری از طریق این شبیه‌سازی اندازه‌گیری شده است.

۹- آزمایش کششی غیرمستقیم (برزیلی) در مدل عددی

قطر نمونه برزیلی ۵۰mm در نظر گرفته شده است. نیرو از طریق حرکت دیوارهای جانبی به دیسک‌ها اعمال می‌گردد. جهت افزایش اعتبار مدل عددی باید نتایج مقاومت برزیلی در آزمایشگاه کاملا مطابق نتایج مدل عددی باشد. شکست در مدل عددی از زیر صفحات بارگذاری شروع می‌شود که کاملا منطبق با شکل شکست نمونه آزمایشگاهی می‌باشد. در شکل ۴ شکل شکست نمونه ماسه سنگ در آزمایش کشش غیر مستقیم ارایه شده است. برای کالیبراسیون مقاومت کششی با چندین تکرار می‌توان به مقاومت مورد نظر رسید.بدین ترتیب مدلسازی عددی برای نمونه‌های شبه سنگ گچ، و گرانیت هم انجام می شود. همانطور که پیش تر اشاره شد، میکرپارامترهای مدل عددی با سعس و خطا به گونه ای انتخاب می شوند که مقادیر پارامترهای مقاومت تک محوری فشاری، مقاومت کششی، و مدول الاستیسیته نمونه ها در مدلسازی عددی با مقادیر آزمایشگاهی تطابق خوبی داشته باشد. جداول ۲، ۳ و۴ مقادیر میکروپارامترهای مورد استفاده در مدلسازی عددی پس از انجام کالیبراسیون را به ترتیب برای نمونه های شبه سنگ گچ، ماسه سنگ و گرانیت نمایش می دهند.

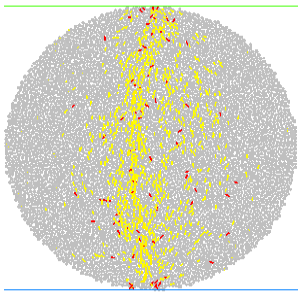


الف



ب

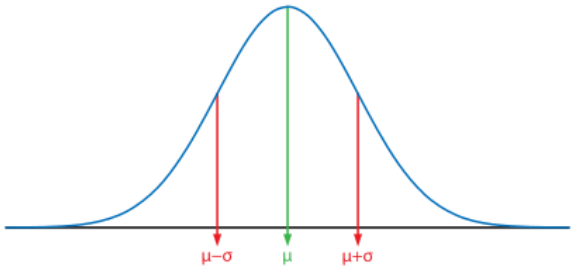
شکل ۳- الف- شکل شکست نمونه ماسه‌سنگ در آزمایش فشاری تک محور ب- نمودار تنش-کرنش نمونه ماسه‌سنگ در آزمایش فشاری تک محور



شکل ۴- شکل شکست نمونه ماسه‌سنگ در آزمایش برزیلی

همانطور که در جدول های ۲ تا ۴ نشان داده شده است، برای پارامترهای مقاومت کششی و مقاومت چسبندگی پیوندها، علاوه بر مقدار مقاومت، انحراف استاندارد آنها نیز به عنوان متغیر ورودی مورد

نیاز است. انحراف استاندارد، یکی از شاخص های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند؛ در حالی که انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها می‌باشد. بر این اساس اگر چنانچه مقدار انحراف استاندارد این دو پارامتر (مقاومت کششی و چسبندگی پیوندها) قابل ملاحظه باشد نشاندهنده نامتجانس بودن پیوندها در نمونه شبیه سازی شده می باشد. شکل ۵ منحنی توزیع نرمال را نشان می‌دهد که میانگین داده‌ها در آن μ می‌باشد. هر چه انحراف معیار (σ) داده‌ها بیشتر شود، منحنی بازتر می‌شود که نشانگر پراکندگی داده‌ها می‌باشد. هر چه داده‌ها نزدیک به مقدار میانگین باشند، منحنی بسته‌تر می‌شود که نشان‌دهنده نزدیک بودن داده‌ها به هم را دارد [۱۸].



شکل ۵- منحنی نرمال که میانگین داده‌ها برابر μ است.

در این مطالعه فرض شده است که تغییر مقدار انحراف استاندارد دو پارامتر مذکور سبب ایجاد نمونه‌های ناهمگن می‌شود و هر چه مقدار انحراف استاندارد مقاومت کششی و چسبندگی پیوندها بیشتر باشد نمونه ناهمگن‌تر خواهد بود.

جدول ۲- میکروپارامترهای اعمالی به مدل عددی جهت کالیبراسیون شبه سنگ گچ

میکروپارامتر	مقادیر
نسبت سختی نرمال به سختی برشی	۱/۷
ضریب اصطکاک	۰/۴
مقاومت کششی (MPa)	۱/۸
مقاومت کششی (MPa)(انحراف استاندارد)	۱
مقاومت چسبندگی (MPa)	۲
مقاومت چسبندگی (MPa)(انحراف استاندارد)	۰/۵
چگالی $(\frac{kg}{m^3})$	۱۰۰۰
مدول الاستیسیته موثر (GPa)	۳/۵
مینیمم قطر دیسک (mm)	۰/۵۴
نسبت قطر ماکزیمم به مینیمم	۱/۶۶

جدول ۳- میکروپارامترهای اعمالی به مدل عددی جهت کالیبراسیون ماسه‌سنگ

میکروپارامتر	مقادیر
نسبت سختی نرمال به سختی برشی	۳/۲
ضریب اصطکاک	۰/۵
مقاومت کششی (MPa)	۲۳
مقاومت کششی (MPa)(انحراف استاندارد)	۵
مقاومت چسبندگی (MPa)	۷۵
مقاومت چسبندگی (MPa)(انحراف استاندارد)	۱۰
چگالی $(\frac{kg}{m^3})$	۲۷۷۰
مدول الاستیسیته موثر (GPa)	۳۹
مینیمم قطر دیسک (mm)	۰/۳
نسبت قطر ماکزیمم به مینیمم	۱/۶۶

۱۰- بحث و بررسی

همانطور که اشاره شد در شبیه‌سازی عددی انجام شده، سعی شده است تا با تغییر انحراف استاندارد مقاومت کششی و چسبندگی پیوندها، میزان ناهمگنی نمونه‌ها تغییر داده شود. البته لازم به ذکر است که مقدار انحراف استاندارد مقاومت کششی در مقایسه با مقاومت چسبندگی خیلی بر روی فرآیند کالیبراسیون تاثیر ندارد؛ لذا برای ایجاد نمونه‌های با ناهمگنی مختلف مقادیر انحراف استاندارد متفاوتی برای مقاومت چسبندگی در نظر گرفته می‌شود.

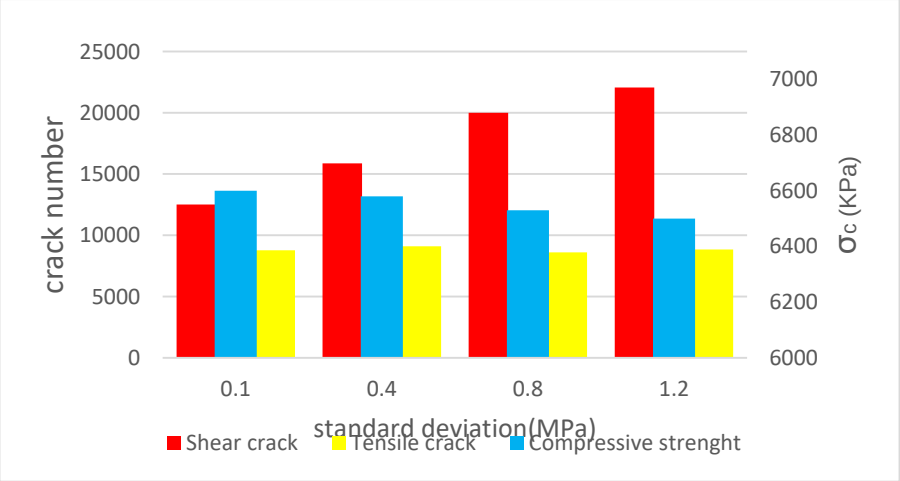
جدول ۴- میکروپارامترهای اعمالی به مدل عددی جهت کالیبراسیون گرانیت

میکروپارامتر	مقادیر
نسبت سختی نرمال به سختی برشی	۳/۷
ضریب اصطکاک	۰/۵
مقاومت کششی (MPa)	۲۱
مقاومت کششی (MPa)(انحراف استاندارد)	۱۱
مقاومت چسبندگی (MPa)	۱۰۵
مقاومت چسبندگی (MPa)(انحراف استاندارد)	۱۶
چگالی $(\frac{kg}{m^3})$	۲۹۰۰
مدول الاستیسیته موثر (GPa)	۵۷
مینیمم قطر دیسک (mm)	۰/۳
نسبت قطر ماکزیمم به مینیمم	۱/۶۶

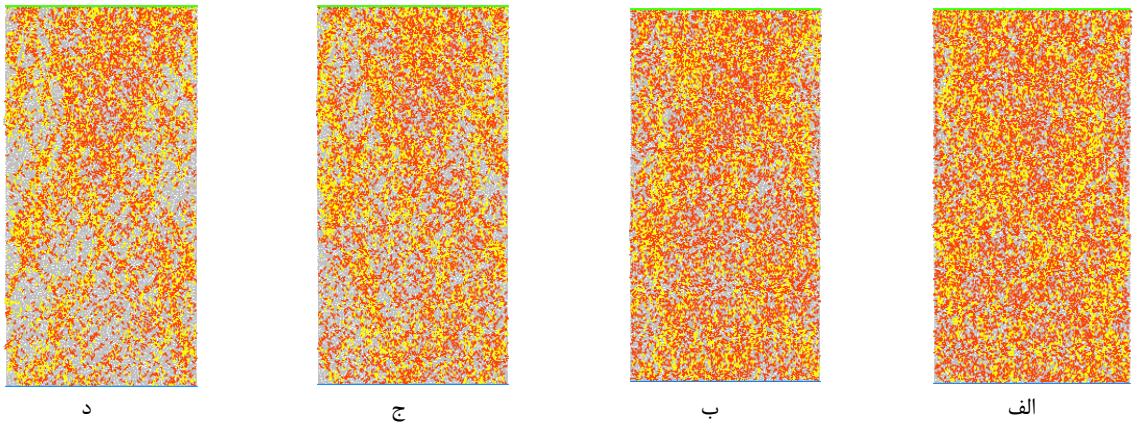
۱۰-۱- تاثیر میزان ناهمگنی نمونه بر شکل شکست

در این بخش به بررسی انحراف استاندارد چسبندگی بر شکل شکست، تعداد ترک‌ها و مقاومت نهایی نمونه پرداخته می‌شود.

چسبندگی یکی از پارامترهای مهم و اساسی در کالیبراسیون نمونه است. همان طور که در بخش قبل توضیح داده شد انحراف استاندارد خواص میکرومکانیکی نقش مهمی در مدل‌سازی عددی ایفا می‌کنند. در این بخش تاثیر انحراف استاندارد چسبندگی بر روی مکانیزم شکست سه نمونه با شکنندگی مختلف، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۶ مقاومت فشاری نمونه شبه سنگ گچ را با در نظر گرفتن مقادیر مختلف انحراف استاندارد چسبندگی نشان می دهد. همانطور که در شکل مشهود است، تغییر انحراف استاندارد چسبندگی تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها ندارد ولی افزایش انحراف استاندارد چسبندگی باعث افزایش تعداد ترک‌های برشی در نمونه تحت بار می شود. لازم به ذکر است در نمونه های با شکنندگی کم ($5 < BI < 9$) معمولا تعداد ترک های برشی در نمونه بیشتر از ترک های کششی خواهد بود. نکته دیگری که در این نمودار حائز اهمیت است، زمانی که با افزایش انحراف استاندارد تعداد ترک‌های برشی موجود در نمونه افزایش پیدا می‌کند، میزان آسیب وارده بر نمونه گچ بیشتر می‌شود.



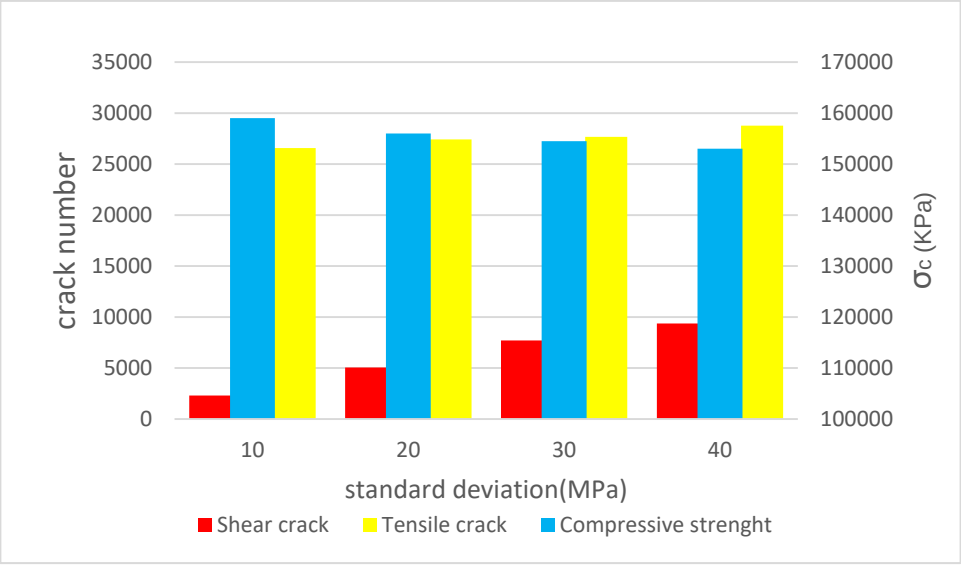
شکل۶- تعداد ترک‌های برشی، کششی و مقاومت فشاری در نمونه شبه سنگ گچ با انحراف استانداردهای مختلف در چسبندگی



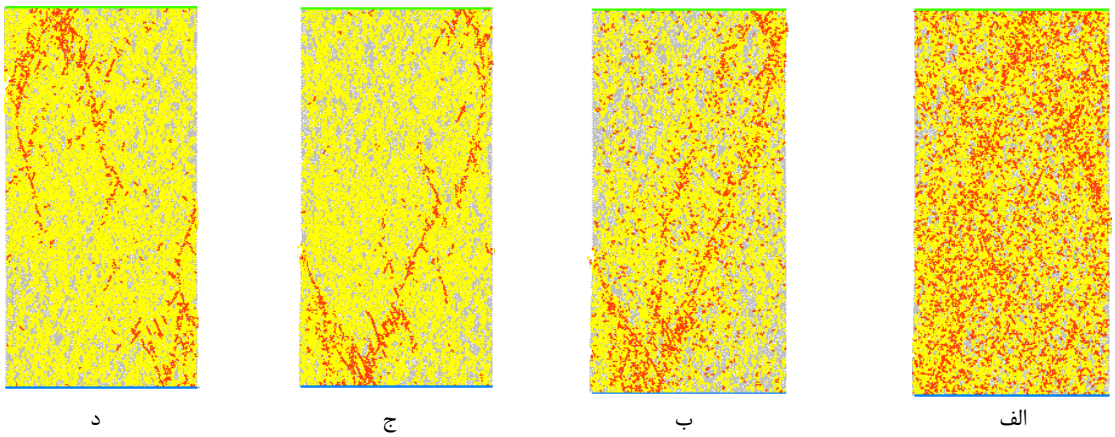
شکل ۷- شکل شکست نمونه‌های شبه سنگ گچ با انحراف استاندارد چسبندگی الف) ۱/۲ ب) ۰/۸ ج) ۰/۴ د) ۰/۱ مگاپاسکال

در شکل ۷، شکل شکست نمونه‌های گچ نشان داده شده است. همانطور گفته شد با افزایش انحراف استاندارد چسبندگی، نمونه بیشتر دچار آسیب شده و تعداد ترک‌های موجود در نمونه افزایش پیدا کرده است. برای اینکه تشخیص داده شود کدام انحراف استاندارد باید در کالیبراسیون استفاده شود، باید شکل شکست‌ها با شکل شکست نمونه در آزمایشگاه تطابق داده شود تا انحراف استاندارد صحیح برای مدل‌سازی انتخاب شود.

یکی دیگر از دلایل اینکه نمونه آسیب زیادی دیده، استفاده از مدل پیوند مسطح برای مدل‌سازی است. بین هر دو ذره یک سطح پیوند وجود دارد که خود این پیوند از چند زیر پیوند تشکیل شده است. ممکن است هر کدام از این زیر پیوندها شکسته شود ولی پیوند اصلی بین دو ذره هنوز قابلیت باربری داشته باشد. به همین دلیل زمانی که در مدل‌سازی از پیوند مسطح استفاده شود تعداد ترک‌های به وجود آمده در مقایسه با دیگر پیوندهای موجود در نرم‌افزار PFC، بیشتر است [۱۹].

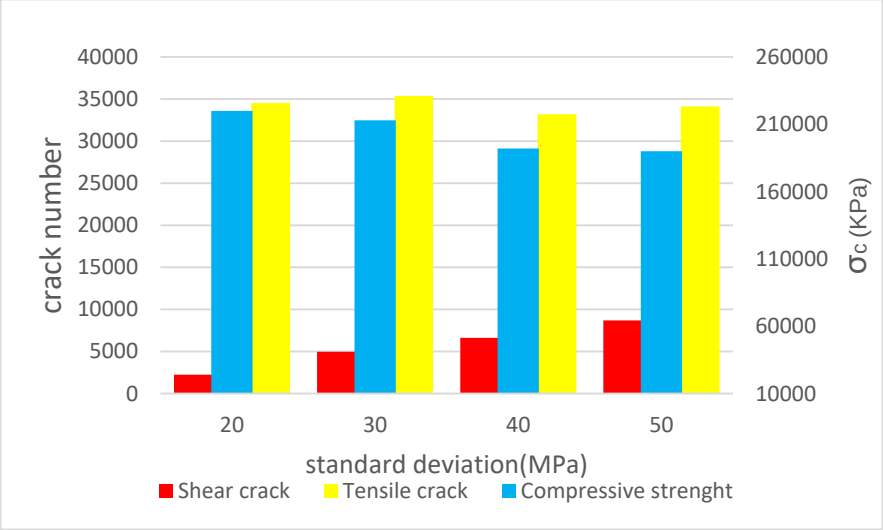


شکل ۸- تعداد ترک‌های برشی، کششی و مقاومت فشاری در نمونه ماسه‌سنگ با انحراف استانداردهای مختلف در چسبندگی

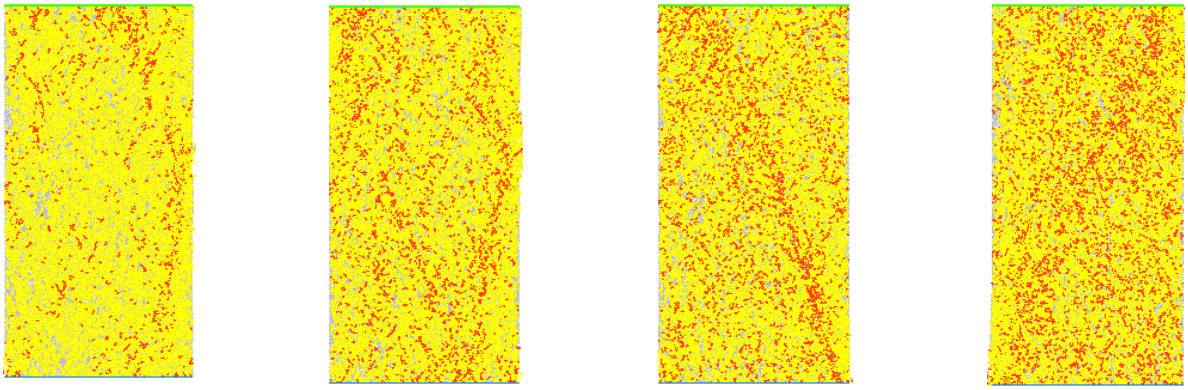


شکل ۹- شکل شکست نمونه‌های ماسه‌سنگ با انحراف معیار چسبندگی الف) ۱۰ ب)۲۰ ج)۳۰ د)۴۰ مگاپاسکال

شکل ۸ تعداد ترک‌های برشی و کششی در نمونه ماسه‌سنگ را نشان می‌دهد. در این نمونه برخلاف نمونه گچ تعداد ترک‌های کششی بیشتر از ترک‌های برشی بوده که دلیل آن همان شکنندگی بیشتر ماسه سنگ نسبت به شبه سنگ گچ است. شکنندگی ماسه‌سنگ بین ۱۰ تا ۱۵ می‌باشد که در بازه شکنندگی متوسط است. هر چه شکنندگی بیشتر شود نسبت تعداد ترک‌های کششی به برشی افزایش پیدا خواهد کرد [۱۵]. همانطور در این شکل مشاهده می‌شود، تعداد ترک‌های کششی تغییر محسوسی ندارد. اما این موضوع برای ترک‌های برشی فرق دارد. هرچه انحراف استاندارد افزایش پیدا کند، تعداد ترک‌های برشی بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر هرچه نمونه با شکنندگی متوسط، ناهمگن‌تر شود تعداد ترک‌های نمونه بخصوص ترک‌های برشی افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۹ تفاوت‌های زیادی برای شکست نمونه مشاهده می‌شود. در این قسمت مجددا بحث انتخاب انحراف استاندارد مناسب مطرح می‌شود که با توجه به نمونه‌های آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت نمونه‌ای که انحراف استاندارد چسبندگی آن برابر ۲۰ مگاپاسکال است، شکل شکست آن شبیه نمونه آزمایشگاهی است. لذا در فرآیند کالیبراسیون نمونه، باید مقدار ۲۰ را برای انحراف استاندارد نمونه ماسه سنگ در نظر گرفت.



شکل ۱۰- تعداد ترک‌های برشی، کششی و مقاومت فشاری در نمونه گرانیت با انحراف استانداردهای مختلف در چسبندگی



الف ب ج د

شکل ۱۱) شکل شکست نمونه‌های گرانیت با انحراف معیار چسبندگی الف)۲۰ ب)۳۰ ج)۴۰ د)۵۰ مگاپاسکال

همچنین در شکل۱۰، تعداد ترک های ایجاد شده در نمونه گرانیسی تحت بارگذاری تک محوری فشاری را نشان می دهد. در این نمونه نیز تعداد ترک‌های کششی بیشتر از ترک‌های برشی است. شکنندگی سنگ گرانیت ۲۲/۴ می‌باشد که نشان‌دهنده این است که این سنگ دارای شکنندگی زیاد است. از مقایسه شکل‌های ۶، ۸ و ۱۰ این‌گونه استنباط می‌شود که تعداد ترک‌های برشی و کششی در نمونه‌ها با افزایش شکنندگی افزایش می یابدبه عبارت دیگر هرچه میزان شکنندگی نمونه بیشتر شود، آسیب وارده بر نمونه تا لحظه شکست بیشتر خواهد بود. با افزایش انحراف استاندارد چسبندگی در نمونه‌های گرانیتی، همانند نمونه های ماسه سنگ و شبه سنگ گچ، ترک‌های برشی افزایش خواهد یافت اما ترک‌های کششی توسط تغییر انحراف چسبندگی، تغییر بسیار کمی نسبت به هم دارند. در نهایت می‌توان اشاره کرد با توجه به افزایش ترک‌های برشی در اثر افزایش انحراف استاندارد چسبندگی در نمونه، مقاومت فشاری نمونه در حد ناچیزی کاهش می‌یابد که این کاهش مقاومت‌ها قابل اغماض است.

۱۱- نتیجه گیری

در این مطالعه اثرات تغییر انحراف استاندارد چسبندگی پیوندهای بین ذرات، در نمونه‌های با شکنندگی مختلف به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است که نتایج آن به شرح ذیل ارائه می‌شود:

- هر چه شکنندگی نمونه بیشتر باشد، نسبت تعداد ترک‌های کششی به تعداد ترک‌های برشی بیشتر خواهد بود که این مسئله روی شکل شکست نهایی نمونه‌ها نیز تاثیر گذار می‌باشد به طوری‌که در نمونه‌های با شکنندگی بالا شاهد شکست برشی تحت بار تک محوری فشاری نخواهیم بود.
- افزایش ناهمگنی (انحراف استاندارد چسبندگی) نمونه‌ها باعث افزایش تعداد ترک‌های برشی در نمونه تحت بار می شوند در

صورتی که این مسئله تاثیری چندانی بر تعداد ترک های کششی ندارد.

- در مقایسه نمونه های با مقاومت یکسان ولی ناهمگنی متفاوت، هرچه نمونه ناهمگن‌تر باشد مقدار ترک یا آسیب وارده بر نمونه تحت بار بیشتر می‌شود.
- شکل شکست نمونه‌ها با تغییر انحراف استاندارد چسبندگی، تغییر می‌کند. بنابراین در فرآیند کالیبراسیون نمونه‌ها در نرم افزار PFC علاوه بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته لازم است شکل شکست نمونه‌های شبیه‌سازی شده نیز با شکل شکست نمونه‌ها در آزمایشگاه مقایسه شود.

۱۲- منبع‌ها

[1] Liu, H., et al., *Characterization of rock heterogeneity and numerical verification*. Vol. 72. 2004. 89-119.

[2] Fang, Z. and J.P. Harrison, *Application of a local degradation model to the analysis of brittle fracture of laboratory scale rock specimens under triaxial conditions*. Vol. 39. 2002. 459-476.

[3] Carpinteri, A., C. Scavia, and G.P. Yang, *Microcrack propagation, coalescence and size effects in compression.* Engineering Fracture Mechanics, 1996. **54**(3): p. 335-347.

[4] Gonçalves da Silva, B. and H. Einstein, *Physical processes involved in the laboratory hydraulic fracturing of granite: Visual observations and interpretation*. Vol. 191. 2018.

[5] Li, Y.-P., L.-Z. Chen, and Y.-H. Wang, *Experimental research on pre-cracked marble under compression.* International Journal of Solids and Structures, 2005. **42**(9): p. 2505-2516.

[6] S. Marques, A., et al., *Study of Aggregate Size Effect on Fracture Toughness of Petreous Macrocomposites (Concrete)*. Vol. 636-637. 2010. 1342-1348.

[7] Sabri, M., A. Ghazvinian, and H. Nejati, *Effect of particle size heterogeneity on fracture toughness and failure mechanism of rocks*. Vol. 81. 2016. 79-85.

[8] Bahaaddini, M., *Size effect on the mechanical behavior of intact rock.* mdrsjrns, 2018. **17**(6): p. 44-55.

[9] بهاالدینی، م.، بررسی تاثیر میکروپارامترها بر خواص مکانیکی سنگ بکر درنرم‌افزار PFC. ششمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، ۱۳۹۵.

[10] Huang, L., et al., *Exploring the influence of rock inherent heterogeneity and grain size on hydraulic fracturing using discrete element modeling*. 2019.

[11] سرفرازی، و.، مقاومت برشی و مود شکست پل سنگ، دانشکده فنی و مهندسی. ۱۳۹۵, دانشگاه تربیت مدرس.

[12] Potyondy, D. and P.A. Cundall, *A Bonded-Particle Model for Rock.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004. **41**: p. 1329-1364.

[13] نادی، ع.، بررسی تجربی و عددی رفتار دینامیکی سنگ‌ها، دانشکده فنی و مهندسی. ۱۳۹۲, دانشگاه تربیت مدرس.

[14] Shen, B., et al., *FRACOD Modeling of Rock Fracturing and Permeability Change in Excavation Damaged Zones*. Vol. 11. 2010.

[15] ایمانی، م.، مدل‌سازی گسترش ترک در سنگ تحت بارگذاری ضربه-ایی، دانشکده فنی و مهندسی. ۱۳۹۵, دانشگاه تربیت مدرس.

[16] Potyondy, D., *PFC2D flat-joint contact model. Itasca Consulting Group Inc, Minneapolis*. 2012.

[17] Aziznejad, *Characterization of Impact-induced Damage of Jointed Rock Masses*. 2015.

[18] Ross, S.M., *12 - Coupling*, in *Introduction to Probability Models (Twelfth Edition)*, S.M. Ross, Editor. 2019, Academic Press. p. 743-771.

[19] *PFC2D manual*. 2008, Itasca Consulting Group Inc: Minneapolis, Minnesota.