

## کالیبراسیون مقاومت کششی مدل سنگ در نرم‌افزار PFC2D با استفاده از تابع توزیع ریزترک و روش کلامپ

مرتضی احمدی<sup>1\*</sup>، علی‌اصغر صفری<sup>2</sup> و کامران گشتاسبی<sup>3</sup>

1- دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

2- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

3- دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت: خرداد 1392، پذیرش: اسفند 1393)

### چکیده

توانایی روش المان مجزا برای شبیه‌سازی شروع و گسترش ترک محققان را قادر ساخته تا مطالب مختلفی را در زمینه مکانیزم شکست در سنگ‌ها بررسی کنند که با استفاده از روش‌های المان محدود و المان مرزی امکان‌پذیر نیست. بررسی تعداد میکروترک‌ها و آستانه شکست در سنگ‌ها به فهم بهتر رفتار سنگ‌های شکننده تحت شرایط واقعی کمک می‌کند. نرم‌افزار PFC2D بر اساس روش المان مجزا بوده و قابلیت ویژه آن در مدل‌سازی گسترش ترک نسبت به دیگر روش‌های عددی است. مشکلی که محققان در مدل‌سازی با این نرم‌افزار مواجه هستند، عدم تطابق مقاومت کششی مدل عددی و الگوی شکست آن با نمونه واقعی با مقاومت فشارشی بالا است. در این تحقیق از نتایج آزمایشگاهی برای کالیبراسیون مدل‌های عددی استفاده شد. از نمونه سنگ گرانیت مقاطع نازک پتروگرافی و نمونه‌هایی نیز برای انجام مطالعات SEM تهیه شد. اطلاعات لازم در مورد توزیع دانه‌بندی و توزیع ریزترک‌ها در این نمونه سنگ با انجام مطالعات میکروسکوپی برای استفاده در مدل‌های عددی به دست آمد. علاوه بر این در این تحقیق برای دستیابی به الگوی شکست صحیح مدل‌ها مطابق با نمونه‌های آزمایشگاهی، از روشی که در آن اندازه کلامپ‌ها به وسیله یک شعاع تأثیر معلوم کنترل می‌شود، استفاده شد. استفاده از این نوع کلامپ‌ها مشخص نمود که نسبت مقاومت کششی به فشارشی به دست آمده از آزمایش‌های تک‌محوره و کشش از مقدار 0/5 (در حالت بدون کلامپ) به مقدار کمتر از 0/1 کاهش یافته و مقدار مقاومت کششی در نمونه‌های آزمایشگاهی با مقاومت فشارشی بالا تقریباً با مدل‌های عددی برابر می‌شود.

### کلمات کلیدی

روش المان مجزا، کالیبراسیون مدل عددی، PFC2D، توزیع ریزترک‌ها، روش کلامپ

\* عهده دار مکاتبات: moahmadi@modares.ac.ir

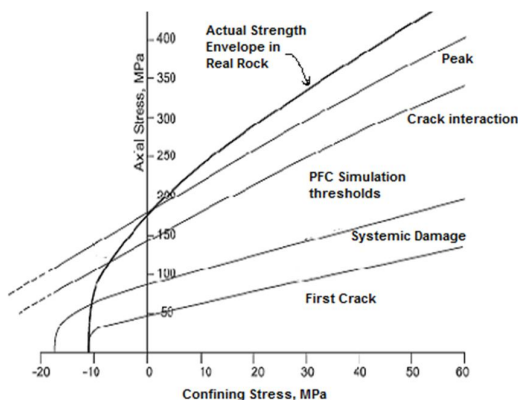
## 1- مقدمه

- تشخیص تماس بین اجزا دیسکی ساده‌تر از تشخیص اتصال و تماس بین سطوح بلوکی شکل و گوشه‌دار (در نرم‌افزارهای UDEC و 3DEC) است.
- هیچ محدودیتی در رابطه با بزرگی جابجایی مدل وجود ندارد و باعث نزدیکی مدل ساخته شده با واقعیت می‌شود.
- این امکان وجود دارد که بلوک‌ها شکسته شوند، زیرا از مجموعه‌ای ذرات در کنار هم ایجاد شده‌اند، ولی در مدل‌سازی با نرم‌افزارهای UDEC و 3DEC امکان شکست بلوک‌ها وجود ندارد و این مسئله مدل را از حالت و رفتار واقعی دور می‌سازد [1].

دیدریچ (1999) بر اساس نتایج مدل‌سازی با این نرم‌افزار گزارش کرد که استفاده از اتصال تماسی برای سنگ‌گرانیت لاک دو بنت نتایج زیر را در بر داشت [3]:

- 1- پوش شکست نهایی در روش عددی منطبق با پوش شکست آزمایشگاهی نیست،
- 2- زاویه اصطکاک داخلی برای نمونه‌های عددی پایین‌تر از مقدار واقعی است و
- 3- مقاومت کششی مدل خیلی بیشتر از یک سنگ واقعی است.

این عدم انطباق در شکل 1 که پوش شکست آزمایشگاهی در مراحل مختلف به همراه پوش شکست مدل عددی را نشان می‌دهد، قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف بین رفتار شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی در مقاومت کششی زیاد است.



شکل 1: مقایسه بین پوش شکست مدل عددی و سنگ واقعی در مراحل مختلف شکست [3]

روش عددی المان مجزا را می‌توان برای تحلیل تنش و تغییر شکل در سازه‌های زیرزمینی با وجود ناپیوستگی درون محیط استفاده کرد. نرم‌افزار PFC<sup>2D</sup> علاوه بر شبیه‌سازی شروع و گسترش ترک، قادر به فراهم کردن امکان شمارش تعداد و پیگیری مکان ترک‌ها و مقایسه آن‌ها با ثبت و نمایش انرژی (رویدادهای آکوستیک) را دارد. البته محدودیت‌هایی برای مدل‌سازی ترک در این نرم‌افزار وجود دارد که بهتر است رفع شوند [1].

از آنجاکه مدل عددی در شبیه‌سازی آزمون‌های آزمایشگاهی نماینده سنگ واقعی است، لذا باید از ذرات دیسکی با اتصال تماسی-موازی بین دیسک‌ها استفاده شود. بایستی در توالی‌های مکرر خصوصیات میکرومکانیکی اتصال‌های تماسی-موازی، نظیر مدول یانگ تماسی  $E$ ، نسبت سختی‌های نرمال و برشی در اتصال تماسی  $K_n/K_s$ ، مدول یانگ اتصال موازی  $\bar{E}$ ، نسبت سختی‌های نرمال و برشی در اتصال موازی  $\bar{K}_n/\bar{K}_s$ ، میانگین مقاومت نرمال اتصال موازی  $\sigma_{c(Mean)}$ ، میانگین مقاومت برشی اتصال موازی  $\tau_{c(Mean)}$ ، انحراف استاندارد مقاومت نرمال اتصال موازی  $\sigma_{c(Std,dev)}$  و انحراف استاندارد مقاومت برشی اتصال موازی  $\tau_{c(Std,dev)}$  را تغییر می‌دهد تا رفتار تک‌محوره، سه‌محوره و برزلی و کشش مستقیم مدل با نمونه‌های آزمایشگاهی یکسان شود همچنین در آزمون عددی تک‌محوره بایستی مدول الاستیک، ضریب پواسون، تنش شروع ترک و مقاومت تک‌محوره و در آزمون عددی سه‌محوره پوش هوک-براون و در آزمون عددی برزلی و کشش مستقیم مقاومت کششی مدل با نمونه آزمایشگاهی کالیبره شود [1، 2].

این نرم‌افزار با داشتن منطقی وسیع، مدل‌سازی مصالح جامد را آسان نموده و آن‌ها را مانند مجموعه‌ای از ذرات در کنار هم مدل می‌نماید. این روند منطقی به وسیله مجموعه دستوراتی به صورت فیش در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. مصالح جامد ممکن است همگن و یا به چندین قطعه بلوک مجزا قابل تفکیک باشند. این گونه مواد را می‌توان با استفاده از روش المان مجزا مدل کرد. عمده مزایای این نرم‌افزار نسبت به سایر نرم‌افزارهای المان مجزا عبارت است از:

برای ارائه‌ی تعریف کمی از توزیع دانه‌بندی سنگ‌ها انجام شده است [9-13]. روش ارائه شده توسط ونگ و همکاران [14] قادر به تعریف کمی دقیقی از توزیع دانه‌بندی سنگ‌ها با استفاده از شیوه‌های سریع و آسان نیست. در سایر موارد نیز نرم‌افزارهای ویژه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۴] و یا تجهیزات ویژه‌ای، از جمله میکروسکوپ الکترونی پویشی (Scanning Electronic Microscope) بکار گرفته شده‌اند [12].

### 2-1-2- شرح اجرای مطالعات میکروسکوپی

برای اعتبار سنجی کالیبراسیون، نمونه سنگ گرانیت مورد مطالعه قرار گرفت؛ زیرا نرم‌افزار PFC2D در تخمین مقاومت کششی سنگ‌ها با مقاومت فشاری بالا دچار مشکل است [15-20]. از نمونه سنگ علاوه بر تهیه سه مقطع نازک پتروگرافی، سه نمونه مکعب مستطیلی با ابعاد  $2 \times 1 \times 1$  سانتیمتر مکعب برای انجام مطالعات SEM تهیه شد. سه محور متعام روی هر یک از نمونه‌های مکعب مستطیلی در نظر گرفته شد. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) برای هر یک از سه وجه نمونه‌ها مطابق با محورهای مختصات فضایی، تصاویر دیجیتال تهیه شدند. در این روش طول و جهت میکروترک‌ها به صورت مستقیم از روی تصاویر با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویر اندازه‌گیری شد. اندازه و شکل ذرات نیز از طریق عکس برداری دیجیتال از روی مقاطع نازک تعیین شدند. تصاویر دیجیتال با مقیاس میلی‌متر از نمونه‌های سنگی تهیه و سپس با استفاده از نرم‌افزار مطلب آماده‌سازی شدند. در ادامه کار، تصاویر با نرم‌افزار آنالیز تصویر، مورد آنالیز قرار گرفتند. شکل 2 (الف) و (ب) به ترتیب مراحل تهیه یکی از تصاویر SEM برای اندازه‌گیری طول و جهت ریزترک‌ها را نشان می‌دهد. شکل 3 تصویر را پس از آنالیز و مشخص شدن ریزترک‌ها نشان می‌دهد. در این روش با دقت بالایی ریزترک‌ها نمایان می‌شوند. طول و جهت این ریزترک‌ها نیز قابل محاسبه است. برای حصول اطمینان از اینکه با کنار هم قرار دادن تصاویر هر سطح مقطع، تمام سطح مقاطع پوشش داده می‌شود، تصویربرداری بین باندهای موازی به گونه‌ای که هر تصویر با تصاویر مجاورش حداقل 10% همپوشانی داشته باشد، انجام شد.

دیدریج (2003) پیشنهاد نمود تا از اتصال‌های تماسی - موازی، کلامپ، کلاستر و ترکیبی از این‌ها می‌توان نسبت مقاومت فشاری به کششی را بهبود بخشید [4].

### 2- مواد و روش‌ها

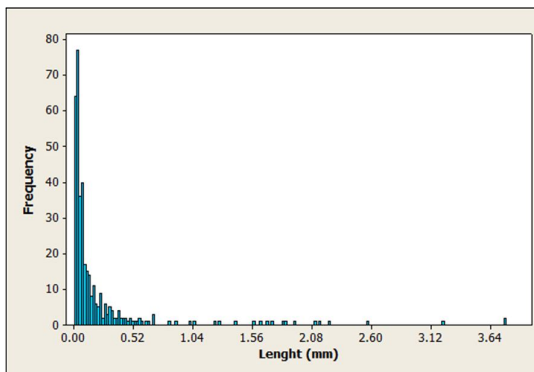
مطالعات آزمایشگاهی همواره نقش مهمی در شبیه‌سازی‌های عددی ایفا می‌کند. بنابراین خصوصیات مکانیکی توده سنگ باید به گونه‌ای صحیح اندازه‌گیری شوند تا در کالیبراسیون مدل عددی استفاده شوند. میکرو پارامترهای گوناگون مانند شکل دانه‌ها و چگونگی ارتباط آن‌ها، توزیع دانه‌بندی سنگ به عنوان میکرو پارامترهای هندسی برای مدل‌های عددی محسوب می‌شوند. از سوی دیگر ریزترک‌ها نیز در مدل‌های عددی، پارامتری تعیین کننده در تخمین مقاومت کششی سنگ می‌باشند. باین حال، تحقیق پیرامون این مهم تاکنون اندک بوده و این ارتباط تا حدودی ناشناخته باقی مانده است. در این تحقیق بررسی‌های آماری بر روی تابع توزیع ریزترک‌ها و دانه‌بندی سنگ انجام و روش کلامپ با شعاع کنترلی برای نزدیک نمودن به الگوی شکست صحیح نمونه و تخمین دقیق‌تر از مقاومت کششی استفاده شده است.

### 2-1- مطالعات میکروسکوپی

#### 2-1-1- تعیین توزیع دانه‌بندی نمونه سنگ

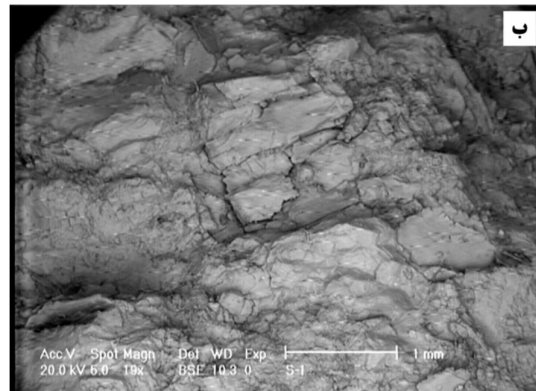
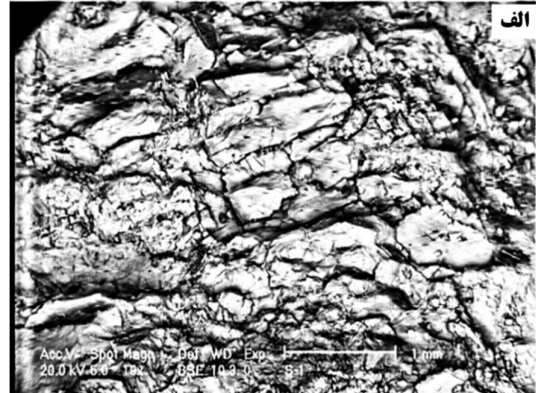
انجام مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع نازک اطلاعات لازم در مورد توزیع دانه‌بندی و انجام مطالعات میکروسکوپی روی نمونه‌های مکعب مستطیلی اطلاعات لازم در مورد توزیع ریزترک‌ها در نمونه سنگ را فراهم می‌آورد. با مقایسه‌ی مقاومت مدل‌های عددی، وجود تأثیر توزیع دانه‌بندی و ریزترک‌ها بر مقاومت فشاری و کششی را می‌توان مورد بحث قرار داد. در مدل‌سازی عددی نمونه سنگ از توزیع دانه‌بندی و مطالعات مربوط به ریزترک‌ها به عنوان میکروپارامترهای هندسی مهم، استفاده شده است. توزیع دانه‌بندی یکی از ویژگی‌های مهم سنگ به شمار می‌آید. این پارامتر کاربردهای گسترده‌ای در دانش پتروفیزیک سنگ‌های مخازن هیدروکربوری [۵، ۶]، فرآوری مواد معدنی و مدیریت باطله‌ها [7] و مدل‌سازی‌های گوناگون در مهندسی سنگ [8] دارد. تعیین توزیع دانه‌بندی سنگ‌ها در عمل دشوار است. تاکنون تلاش‌هایی

شده است (برای صفحات دیگر نیز کار به همین منوال انجام گرفته است). برای تعیین تابع توزیع احتمال، توابع توزیع نرمال، لاگ نرمال و ویبال انتخاب و برازش شدند. ضریب تصمیم‌گیری توابع توزیع احتمال در بازه اطمینان 95 درصد بررسی شد. مقادیر میانگین، ضریب تصمیم‌گیری، انحراف معیار و کران‌های بازه اطمینان برای طول ریزترک‌ها در صفحه XY نیز در جدول 1 ارائه شده است. تابع چگالی احتمال و همچنین پارامترهای تابع توزیع ویبال در شکل 5 ارائه شده است. میانگین و انحراف معیار طول ریزترک‌ها در صفحه XY به ترتیب برابر با 0/1212 و 0/1216 میلی‌متر است. با محاسبات مشابه در صفحه XZ، میانگین و انحراف معیار طول ریزترک‌ها به ترتیب 0/1004 و 0/1131 میلی‌متر و در صفحه YZ، 0/1121 و 0/1340 میلی‌متر است.

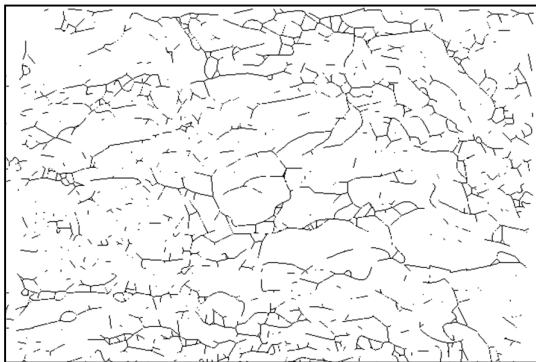


شکل 4: هیستوگرام طول ریزترک‌ها بر حسب فراوانی در صفحه XY.

برای مطالعه جهت ریزترک‌ها، هیستوگرام مربوط به جهت ریزترک‌ها در صفحه XY مطابق با شکل 6 ترسیم شد (برای صفحات دیگر نیز کار به همین منوال انجام گرفت). مقادیر میانگین و انحراف معیار برای جهت ریزترک‌ها نیز بر حسب رادیان در جدول 2 ارائه شده است. میانگین و انحراف معیار جهت ریزترک‌ها در صفحه XY به ترتیب برابر با 0/2948 و 0/69 رادیان است. با محاسبات مشابه میانگین و انحراف معیار جهت ریزترک‌ها در صفحه XZ به ترتیب 0/1764 و 0/232 رادیان و در صفحه YZ به ترتیب 0/2268 و 0/3391 رادیان است. تابع چگالی احتمال و همچنین پارامترهای تابع توزیع نرمال در شکل 7 ارائه شده است. برای تعیین تابع توزیع دانه‌بندی و اندازه ذرات از مقاطع نازک پتروگرافی نمونه سنگی در سه جهت



شکل 2: (الف) یکی از تصاویر تهیه شده با SEM در صفحه XY. (ب) تغییر میزان نور تصویر جهت آماده سازی تصویر برای آنالیز



شکل 3: تصویر آنالیز شده SEM و مشخص شدن ریزترک‌ها.

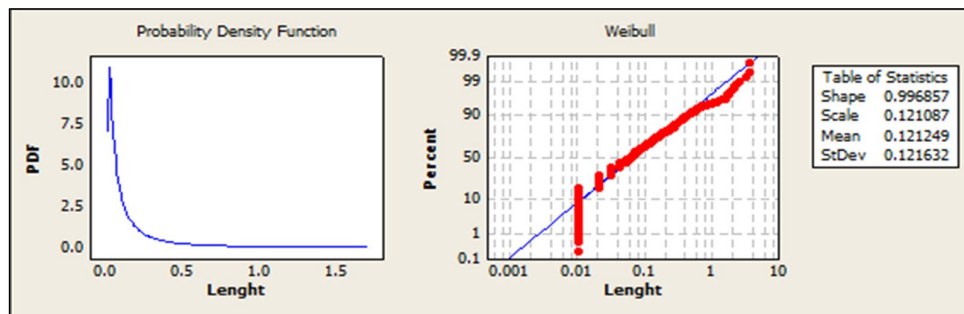
### 2-1-3- نتایج مطالعات میکروسکوپی برای توزیع ریزترک‌ها

با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویر طول و جهت ریزترک‌ها در سه صفحه XY و XZ و YZ مکعب مستطیل‌ها محاسبه شدند. هیستوگرام طول ریزترک‌ها بر حسب تعداد (فراوانی) در صفحه XY مطابق شکل 4 رسم

محور مختصات  $XY$  و  $XZ$  و  $YZ$  استفاده شد و تصاویر دیجیتال با مقیاس میلی‌متر از مقاطع نازک گرفته شدند. با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویر مرز کانی‌ها بر روی تصاویر

جدول 1: مقادیر میانگین، ضریب تصمیم‌گیری، انحراف معیار و کران‌های بازه اطمینان برای طول ریزترک‌ها در صفحه  $XY$  (بر حسب میلی‌متر)

میانگین (mm)	ضریب تصمیم‌گیری	خطا استاندارد	بازه اطمینان 95%		تابع توزیع احتمال
			کران پایین	کران بالا	
0/121249	0/975	0/0063343	0/109449	0/134322	ویبال
0/177034	0/902	0/0175415	0/145786	0/214980	لاگ نرمال
0/211816	0/652	0/0162450	0/179977	0/243656	نرمال

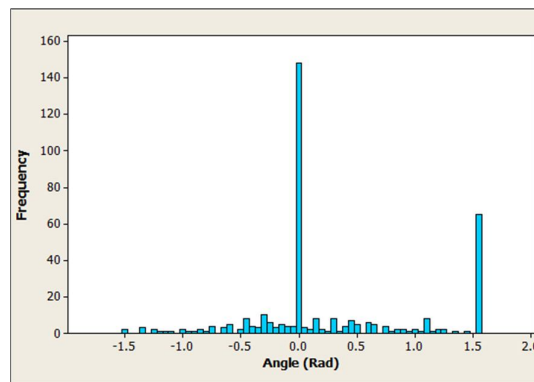


شکل 5: برازش تابع توزیع احتمال ویبال، تعیین میانگین و انحراف معیار برای طول ریزترک‌ها

جدول 2: مقادیر میانگین، ضریب تصمیم‌گیری و کران‌های بازه اطمینان برای جهت ریزترک‌ها در صفحه  $XY$

میانگین (radian)	ضریب تصمیم‌گیری	خطا استاندارد	بازه اطمینان 95%		تابع توزیع احتمال
			کران پایین	کران بالا	
0/294813	0/931	0/0358279	0/224591	0/365034	نرمال

با توجه به تعیین اندازه ذرات، می‌توان هیستوگرام اندازه ذرات بر حسب فراوانی در صفحه  $XY$  را به صورت شکل 8 ارائه نمود. برای مشخص کردن بهترین تابع توزیع برازش برای توزیع اندازه ذرات، توابع توزیع احتمال ویبال، لاگ نرمال و نرمال انتخاب شدند که ضریب تصمیم‌گیری در هر یک از برازش‌ها در جدول 3 مشخص شده‌اند. با توجه به ضریب تصمیم‌گیری توابع، تابع توزیع احتمال لاگ نرمال با ضریب تصمیم‌گیری 0/95 بهترین برازش را نشان می‌دهد. مقادیر میانگین و انحراف معیار اندازه ذرات و همچنین پارامترهای تابع توزیع احتمال لاگ نرمال (میانگین و

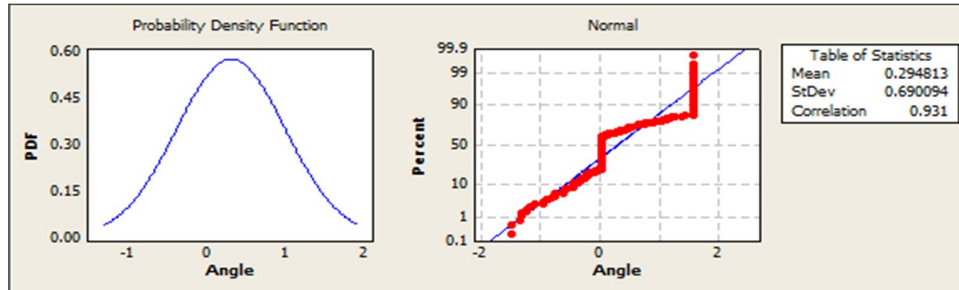


شکل 6: هیستوگرام جهت ریزترک‌ها در صفحه  $XY$ .

با  $1/4712$  و  $1/526$  میلی‌متر است. با استفاده از انحراف معیار و میانگین، ضریب تغییرات را می‌توان برای هر سری از داده‌ها محاسبه کرد. در نهایت با میانگین‌گیری از اعداد به دست آمده برای صفحات  $XZ$  و  $YZ$  و  $XY$  می‌توان میانگین و انحراف معیار طول، جهت ریزترک‌ها و اندازه ذرات را تعیین نمود. در جدول 4 مقادیر محاسبه شده برای هر یک ارائه شده است.

انحراف معیار لگاریتمی) در شکل 9 به همراه تابع چگالی احتمال مشخص شده‌اند.

با توجه به این مقادیر، میانگین و انحراف معیار اندازه ذرات در صفحه  $XY$  برابر با  $1/2869$  و  $1/5457$  میلی‌متر است. با محاسبات مشابه میانگین و انحراف معیار اندازه ذرات (میلی‌متر) در صفحه  $XZ$  و  $YZ$  به ترتیب برابر با  $1/584$  و  $1/771$  میلی‌متر و در صفحه  $YZ$  به ترتیب برابر

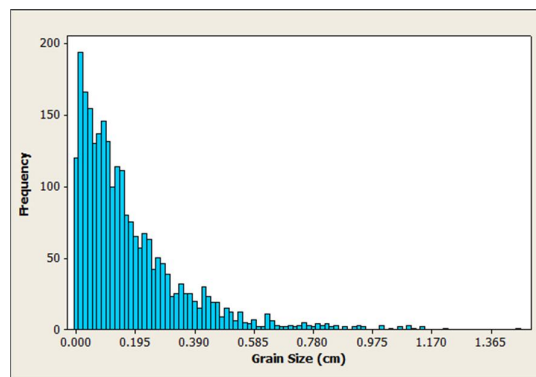


شکل 7: برازش تابع توزیع نرمال (بازه اطمینان 95 درصد) و تعیین میانگین و انحراف معیار جهت ریزترک‌ها در صفحه  $XY$

جدول 3: مقادیر میانگین، ضریب تصمیم‌گیری و کران‌های بازه اطمینان برای اندازه ذرات در صفحه  $XY$  (بر حسب سانتیمتر)

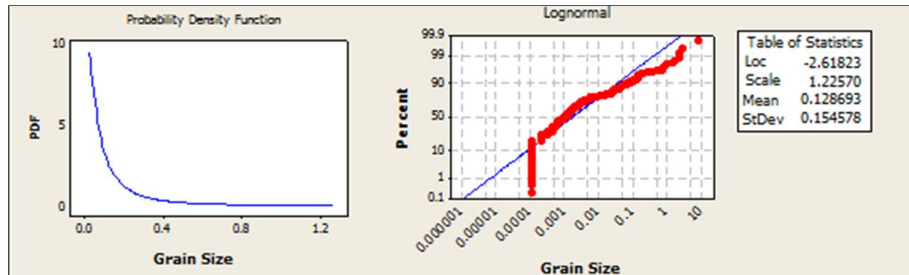
میانگین (cm)	ضریب تصمیم‌گیری	خطا استاندارد	بازه اطمینان 95%		تابع توزیع احتمال
			کران پایین	کران بالا	
0/130057	0/854	0/0042113	0/122060	0/138579	ویبال
0/128693	0/950	0/0079534	0/141446	0/172675	لاگ نرمال
0/126742	0/839	0/0035303	0/119823	0/133661	نرمال

کشش مستقیم، آزمایش مقاومت فشاری سه محوره و آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره انجام شدند. برای هر یک از آزمایش‌ها نمونه‌ها بر اساس استانداردهای ISRM تهیه و آزمایش شدند [21-23]. خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها در جدول 5 ارائه شده‌اند. الگوی شکست هر یک از نمونه‌ها بعد از انجام آزمون تک‌محوره در شکل 10 نشان داده شده است. مدول یانگ 50٪ و ضریب پواسون 50٪ برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه شدند. مقدار میانگین به دست آمده از مقاومت فشارش تک‌محوره این سه نمونه و همچنین مقادیر میانگین به دست آمده از مقاومت کششی نمونه‌ها، شامل پنج نمونه برزلی و دو نمونه کشش مستقیم در جدول 6 ارائه شده است.



شکل 8: هیستوگرام اندازه ذرات بر حسب تعداد (فراوانی) در صفحه  $XY$ .

برای تعیین خصوصیات مکانیکی نمونه‌های سنگی آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (آزمایش برزلی)،



شکل 9: برازش تابع توزیع لاگ نرمال (بازه اطمینان 95 درصد) و تعیین میانگین و انحراف معیار اندازه ذرات در صفحه XY

جدول 4: میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات برای هر یک از توابع توزیع

نوع داده‌ها	میانگین (mm)	انحراف معیار (mm)	ضریب تغییرات
طول ریزترک‌ها	0/1112	0/1229	1/10
جهت ریزترک‌ها	0/232	0/42	1/80
اندازه ذرات	1/448	1/614	1/11

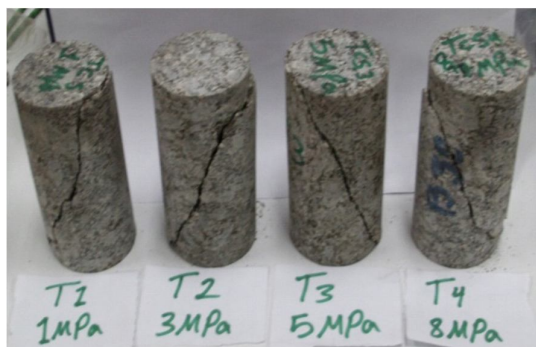
جدول 5: مقاومت تک‌محوره، مقاومت کششی، مدول یانگ 50٪ و ضریب پواسون متناظر با آن

میانگین	$\sigma_t$ (MPa)	$\nu$	E (GPa)	$\sigma_c$ (MPa)
	5/76	0/153	12/5	90/2

جدول 6: خصوصیات فیزیکی نمونه گرانیت

آب محتوا (درصد)	تخلخل (درصد)	چگالی طبیعی (gr/cm <sup>3</sup> )	پوکی (درصد)	درجه اشباع شدگی (درصد)
0/15	0/69	2/71	0/70	0/58

می‌توان میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ را محاسبه نمود.

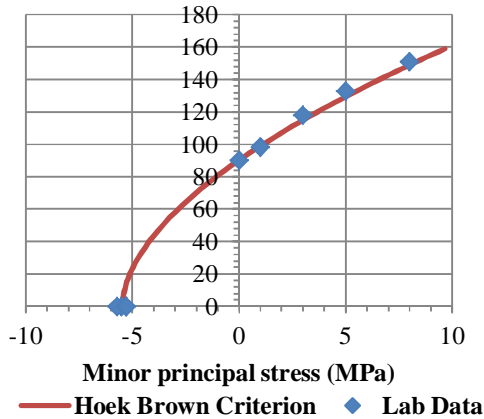


شکل 10: الگوی شکست نمونه‌ها تحت آزمایش تک‌محوره

شکل 11: الگوی شکست نمونه‌ها تحت فشارهای محصورکننده 1، 3، 5 و 8 مگاپاسکال

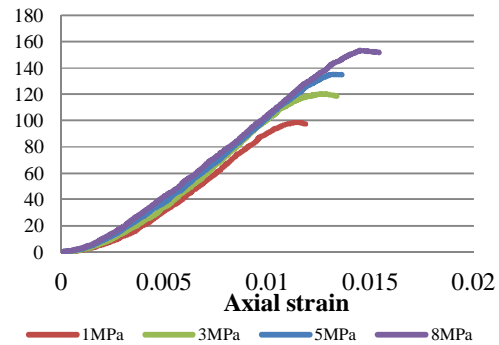
شکل 12 منحنی تنش محوری بر حسب کرنش محوری را در فشارهای محصورکننده مختلف و همچنین شکل 13 پوش شکست هوک-براون نمونه‌های آزمایشگاهی را در فضای  $\sigma_1 - \sigma_3$  نشان می‌دهد. با استفاده از این پوش

مقادیر محاسبه شده به وسیله نرم‌افزار Rocklab برای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی سنگ، مقاومت کششی و



شکل 13: پوش شکست هوک-براون اطلاعات آزمایشگاهی در فضای  $\sigma_1 - \sigma_3$ .

فشاری و پارامترهای مربوط به پوش شکست هوک-براون در جدول 7 آمده است.

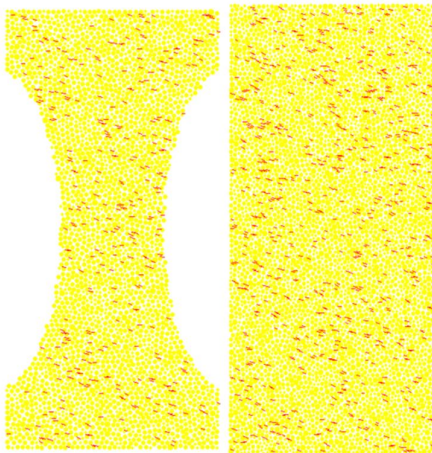


شکل 12: منحنی تنش-کرنش در فشارهای محصورکننده مختلف

جدول 7: مقادیر به دست آمده از آزمایش سه محوره

$m_b$	s	a	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	زاویه اصطکاک (Degrees)	چسبندگی (MPa)
16/279	1	0/5	5/74	90/2	48	16/55

یک دانه در مدل ارائه شوند. کلامپها سطحی ناهموارتر از یک دیسک تنها دارند و بنابراین این ویژگی باعث افزایش پارامتر ماکرو زاویه اصطکاک می‌شود.



شکل 14: دیسک‌ها و ریزترک‌ها در مدل دمبلی و مستطیلی شکل برای انجام آزمون‌های کشش و فشارش

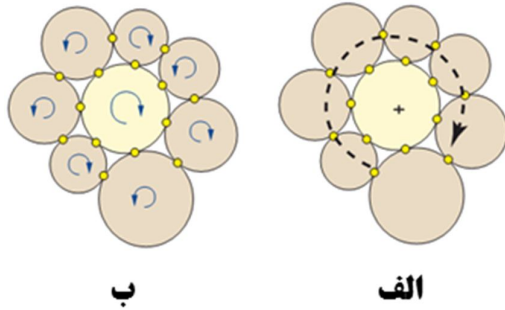
### 3-2- مدل‌سازی عددی

مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار PFC2D همراه با ریزترک‌ها مدل شدند. ریزترک‌ها به منظور پایین آوردن مقاومت کششی در مدل‌ها استفاده شده‌اند و فقط جانمایی ریزترک‌ها در سطح نمونه‌ها با توزیع نرمال انجام شدند و نحوه اتصال ریزترک‌ها مدنظر نیست و لزومی ندارد شبیه‌سازی ریزترک‌ها مانند شکل واقعی باشد. در شکل 14 نمونه دمبلی و مستطیلی شکل، تشکیل شده از دیسک‌ها و ریزترک‌ها، به ترتیب برای انجام آزمون‌های کشش و فشارش را نشان می‌دهد.

### 3-2-1- کلامپ و کلاستر

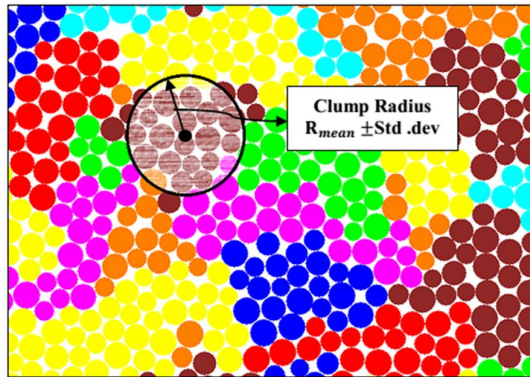
اتصال موازی و تماسی بین دیسک‌ها به صورت شماتیک به ترتیب در شکل 15 (الف) و (ب) نشان داده شده است. در PFC امکان اتصال گروهی از دیسک‌ها به یکدیگر برای تشکیل توده صلب وجود دارد که کلامپ نامیده می‌شود. این توده مانند یک دیسک تنها عمل می‌کند. کلامپ‌ها برای مطالعه تأثیر شکل دانه‌بندی و توزیع اندازه ذرات در سنگ‌ها مفید هستند. هر یک از کلامپ‌ها می‌تواند به صورت





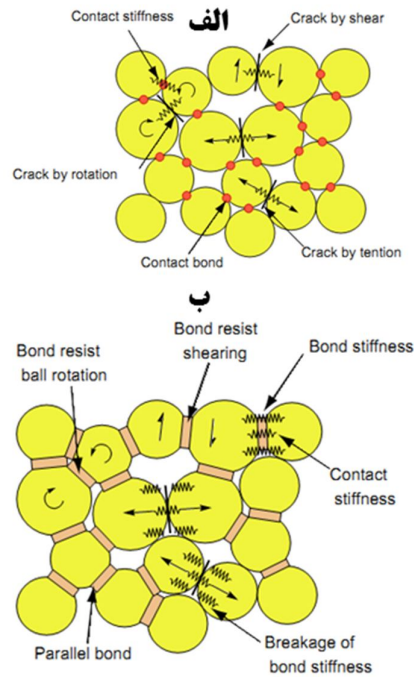
شکل 16: (الف) مکانیزم چرخش دیسک‌ها در یک کلامپ، (ب) مکانیزم چرخش دیسک‌ها در یک کلاستر [16]

با توجه به تابع توزیع دانه‌بندی و اندازه میانگین و انحراف معیار ذرات و با استفاده از روش کلامپ با شعاع معین (به صورت میانگین و انحراف معیار قابل بیان است) مدل‌های عددی با رفتار مشابه با مدل‌های طبیعی تهیه شد. شکل 17 بزرگنمایی مدل ساخته شده در نرم‌افزار PFC2D که دارای کلامپ‌هایی با شعاع معین است، را نشان می‌دهد. شعاع یکی از کلامپ‌ها نیز به صورت تقریبی در شکل مشخص شده است. شکل 18 مدل ساخته شده توسط این روش برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی فشاری سه محوره را نشان می‌دهد.



شکل 17: مدل شامل کلامپ با شعاع معین

استفاده از کلامپ‌ها نشان داد که نسبت مقاومت کششی به فشاری به دست آمده از آزمایش‌های مدل شده از مقدار 0/5 (در حالت بدون کلامپ) تا مقدار کمتر از 0/1 کاهش می‌یابد شکل 19 آنالیز حساسیت برای اندازه کلامپ‌ها و نسبت مقاومت فشاری به مقاومت کششی را نشان می‌دهد. عدد صفر برای اندازه کلامپ بیانگر حالت مدل بدون هیچ‌گونه کلامپی است.



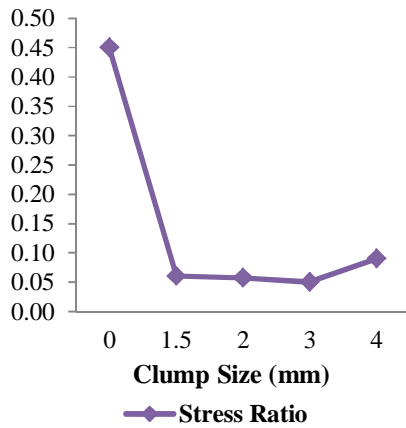
شکل 15: (الف) مدل اتصال موازی بین دیسک‌ها، (ب) مدل اتصال تماسی بین دیسک‌ها [16]

چو و همکاران (2007) نشان دادند که استفاده از کلامپ‌های با اندازه‌های تصادفی رفتار مدل را تا حدودی بهبود می‌بخشند [27].

در این تحقیق از روشی که در آن اندازه کلامپ‌ها به وسیله یک شعاع تأثیر معلوم کنترل می‌شود، استفاده شد. اندرکنش بین کلامپ‌ها نیز با تعریف میکرو خصوصیات دیسک‌ها حاکم می‌شوند. شکل 16 (الف) مکانیزم چرخش دیسک‌ها در یک کلامپ را نشان می‌دهد. کلاستر اصطلاح دیگری است که در PFC کاربرد دارد، کلاستر مجموعه‌ای از دیسک‌های به هم متصل است. خصوصیات کلاسترها می‌توانند با کلاسترهای مجاور یکسان یا متفاوت باشد. کلاسترها برای شبیه‌سازی سیستم‌های سنگی بلوکی یا ذرات سنگ بکار می‌روند.

تفاوت بین کلاسترها و کلامپ‌ها در صلب بودن آن‌ها است، یعنی کلاسترها به صورت جزئی می‌شکنند در حالی که در کلامپ‌ها شکست رخ نمی‌دهد. شکل 16 (ب) مکانیزم چرخش دیسک‌ها در یک کلاستر را نشان می‌دهد [24]. برای ایجاد کلامپ و کلاسترها در زبان فیش، کدنویسی انجام شد.

شده‌اند. نتایج نهایی برای این میکرو پارامترها در جدول 8 ارائه شده است.



شکل 19: تأثیر اندازه کلامپ‌ها بر نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری

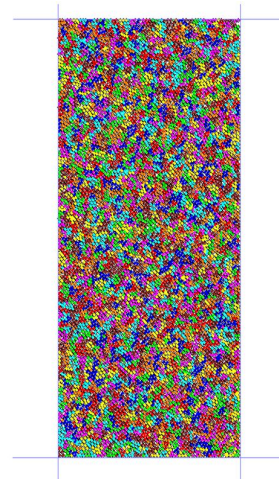
### 2-3-3-3- فرآیند آزمون مدل‌ها

ابعاد نمونه‌ها و هندسه آن‌ها مطابق با نمونه‌های آزمایشگاهی است. ابعاد و هندسه نمونه‌ها برای آزمایش‌های تک‌محوره برزیلی و کشش مستقیم در شکل 20 نشان داده شده است.

جدول 8: میکرو پارامترهای لازم جهت کالیبراسیون آزمون‌های آزمایشگاهی

واحد	مقدار	میکرو پارامتر	واحد	مقدار	میکرو پارامتر
---	1/5	نسبت سختی‌های اتصال موازی ( $\bar{K}_n / \bar{K}_s$ )	mm	0/20	حداقل شعاع دیسک $D_{min}$
---	1/11	ضریب اصطکاک	---	1/5	نسبت شعاع کمینه به شعاع بیشینه ( $D_{min} / D_{max}$ )
mm	0/34	انحراف معیار شعاع کلامپ	mm	1/38	میانگین شعاع کلامپ
MPa	16/7	$\sigma_c(Mean)$	GPa	3/5	مدول یانگ تماسی E
MPa	95	$\tau_c(Mean)$	---	1/5	نسبت سختی‌های اتصال تماسی ( $K_n / K_s$ )
MPa	4/7	$\tau_c(Std, dev)$	---	1	ضریب افزایش شعاع اتصال موازی $\bar{\lambda}$
MPa	4/7	$\sigma_c(Std, dev)$	GPa	3/5	مدول یانگ اتصال موازی $\bar{E}$

مجموعه دیسک‌ها از بالا و پایین فشار اعمال می‌کنند، شبیه‌سازی شد. این صفحه‌ها فاقد اصطکاک هستند. میزان تنش‌های اعمال شده به نمونه با تقسیم نیروی عمل‌کننده بر روی صفحه‌ها بر سطح مقطع آن‌ها محاسبه می‌گردد.



شکل 18: نمونه ساخته شده برای انجام آزمون‌های آزمایشگاهی فشاری سه محوره با استفاده از روش کلامپ

### 2-3-3-2- میکرو پارامترهای لازم جهت کالیبراسیون آزمون‌های آزمایشگاهی

با وجود این که نسبت دادن خواص انتخابی به مدل PFC کار چندان دشواری نیست، ولی انتخاب کردن این خواص به نحوی که ماده مدل شده، نماینده نمونه فیزیکی و واقعی سنگ باشد، اغلب روند دشواری دارد. میکروپارامترهای مناسب جهت کالیبراسیون آزمون‌های آزمایشگاهی برای نمونه سنگ گرانیت در طی کوشش‌های متوالی حاصل

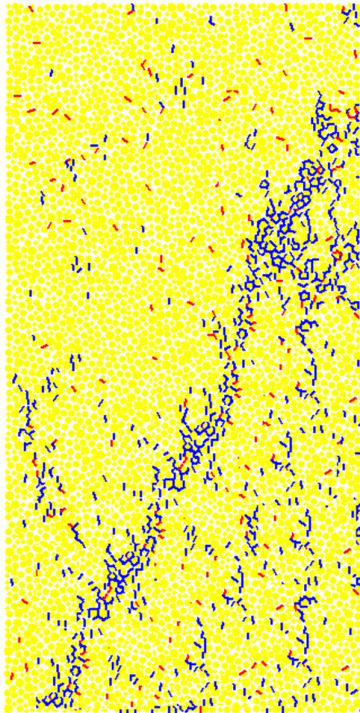
### 2-3-3-2- الف- آزمایش فشاری تک‌محوره

ابعاد مدل عددی مطابق با شکل 20 (ج) و حاوی 18456 دیسک است. بارگذاری با دو صفحه متحرک که به

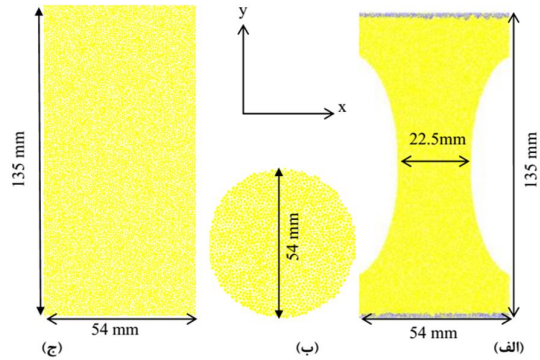
جدول 9: مقاومت تک‌محوره، مدول یانگ 50٪ و ضریب پواسون متناظر آن

نمونه	$\nu$	E(GPa)	$\sigma_c$ (MPa)
عددی	0/14	12/12	91/76
آزمایشگاهی	0/153	12/5	90/2

الگوی شکست مدل عددی تحت فشار تک‌محوره در شکل 22 ارائه گردیده است. ترک‌های کششی و برشی به ترتیب به رنگ آبی و قرمز مشخص شده‌اند. از این شکل می‌توان دریافت که استفاده از ریزترک‌ها به همراه سیستم کلامپ برای مدل‌ها یکی دیگر از مشکلات PFC را برای سنگ‌های با مقاومت بالا حل کرده است. الگوی شکست در این مدل با نمونه‌های آزمایشگاهی تقریباً یکسان است در صورتی که همان‌طور که چو و همکاران (2007) گزارش داده‌اند، استفاده از سیستم کلامپ به‌صورت تنها الگوی شکست یکسانی را در مقایسه با نمونه‌های آزمایشگاهی به دست نمی‌دهد [16].

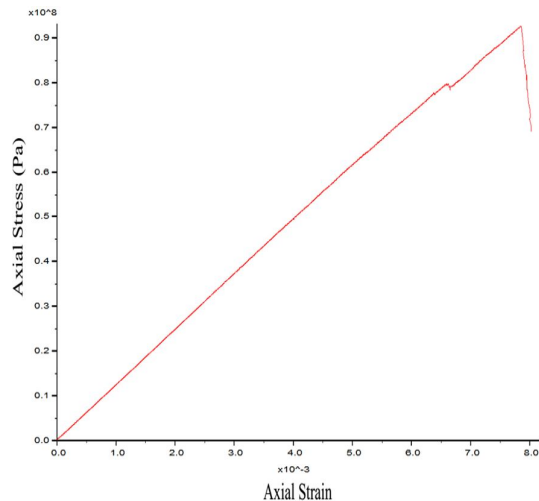


شکل 22: الگوی شکست نمونه مستطیلی تحت آزمایش فشاری تک‌محوره



شکل 20: هندسه نمونه‌های آزمایشگاهی مدل‌سازی شده

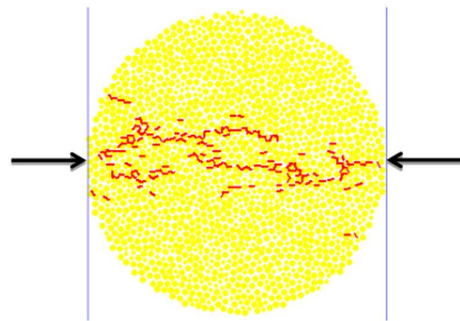
کرنش محوری در مدل با ثبت جابجایی صفحات بالا و پایین اندازه‌گیری می‌شود. کرنش جانبی نیز با مانیتور کردن جابجایی جفت دیسک‌های جانبی که در امتداد محور X و در مرکز سطح نمونه قرار گرفته‌اند، اندازه‌گیری می‌شود (محور نمونه موازی با محورهای مختصات است). کالیبراسیون عددی برای به دست آوردن مقدار تقریبی مقاومت فشاری تک‌محوره آزمایشگاهی انجام شد. نمودار تنش-کرنش محوری مدل عددی در شکل 21 نشان داده شده است. این شکل حاکی از آن است که رفتار مدل عددی شکننده است. مدول یانگ 50٪، نسبت پواسون 50٪ و مقاومت تک‌محوره از طریق این مدل‌سازی قابل اندازه‌گیری است. مقایسه‌ی نتایج آزمون عددی و آزمایشگاهی در جدول 9 ارائه شده‌اند.



شکل 21: منحنی تنش-کرنش محوری مدل عددی

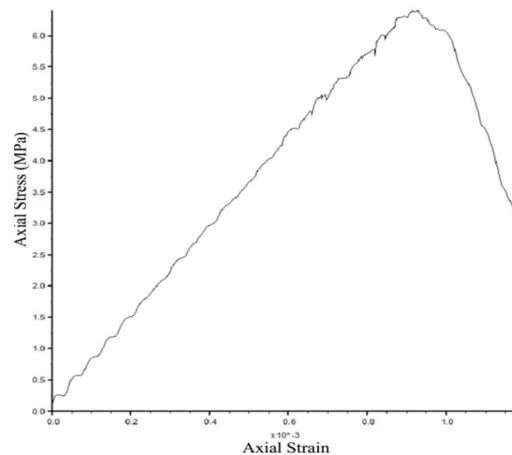
## 2-3-3-ب- آزمایش کشش غیر مستقیم (برزیلی)

از آنجایی که مقاومت کششی اهمیت به سزایی در بحث شکست هیدرولیکی دارد برای کالیبراسیون این پارامتر ابعاد و شکل نمونه مطابق با شکل 20 (ب) انتخاب شد تا کالیبراسیون مورد آنالیز حساسیت قرار بگیرد. در نمونه برزیلی نیرو از طریق حرکت دیوارهای جانبی به دیسک‌ها اعمال می‌گردد. کالیبراسیون عددی برای به دست آوردن مقدار تقریبی مقاومت کششی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی انجام شد. شکل 23 الگوی شکست نمونه برزیلی به همراه دیواره‌های کناری و بارهای وارده را نشان می‌دهد. ترک‌های کششی در اینجا با رنگ قرمز مشخص شده است.



شکل 23: الگوی شکست در نمونه برزیلی

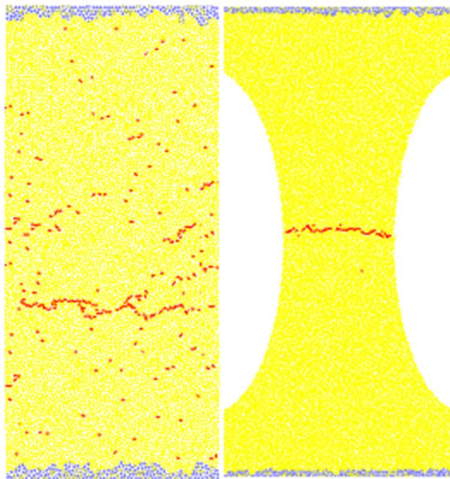
شکل 24 نمودار تنش بر حسب کرنش را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که ذرات بهم چسبیده دارای رفتار تقریباً شکننده می‌باشند، به طوری که تا لحظه تنش ماکزیم رفتار تقریباً خطی از خود نشان می‌دهند.



شکل 24: منحنی تنش کرنش محوری برای آزمون کشش غیر مستقیم (نمونه برزیلی).

## 2-3-3-پ- آزمایش کشش مستقیم

برای طراحی آزمایش کشش مستقیم ابعاد مدل عددی مطابق با شکل 20 (الف) و (ج) به صورت دمبلی شکل و مستطیلی شکل انتخاب شدند. نیروی کششی از طریق معین کردن دیسک‌هایی در بالا و پایین نمونه (این دیسک‌ها مانند گیره عمل می‌کنند) اعمال می‌شود. الگوی شکست نمونه‌ها و نمودار تنش محوری بر حسب کرنش برای نمونه مستطیلی و دمبلی شکل به ترتیب در شکل 25، شکل 26 (الف) و (ب) ارائه شده است.



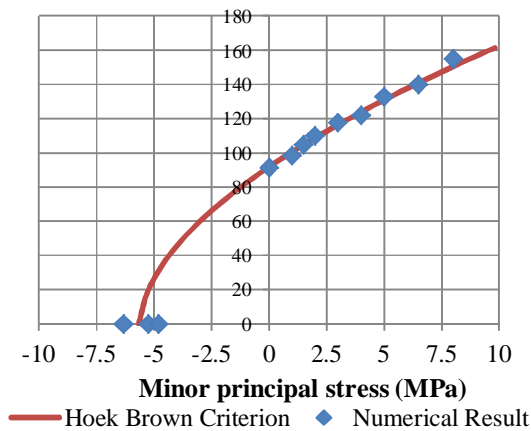
شکل 25: الگوی شکست نمونه‌های دمبلی و مستطیلی شکل تحت کشش مستقیم

همچنین مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از هر سه نوع آزمون با نتایج آزمایشگاهی در جدول 10 ارائه شده است.

جدول 10: انواع مدل‌ها و مقاومت کششی آن‌ها

مشخصات نمونه	$\sigma_t$ (MPa)	شماره نمونه
برزیلی	6/36	1
دمبلی	4/8	2
مستطیلی	5/3	3
میانگین عددی	5/48	---
میانگین آزمایشگاهی	5/76	---

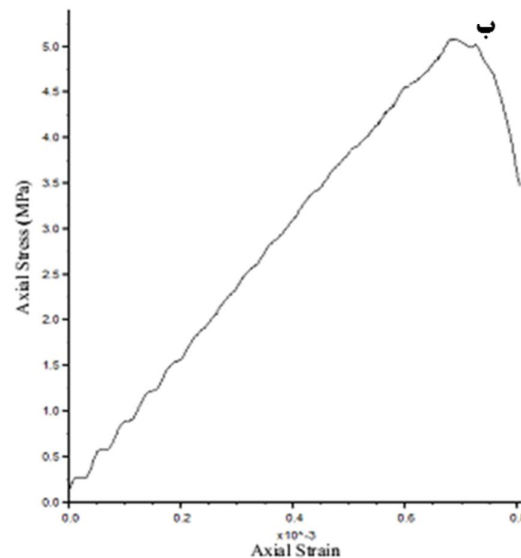
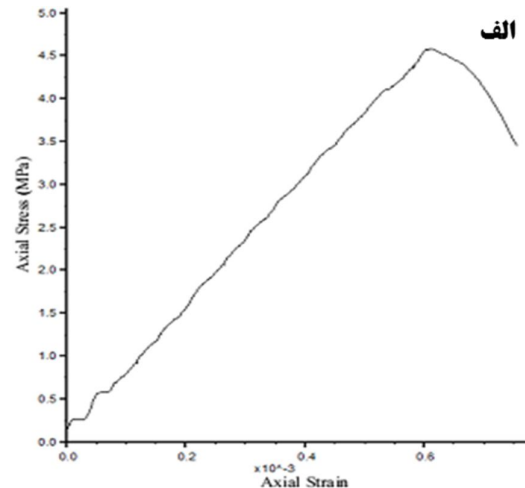
حالی که تنش نرمال تا لحظه شکست بر نمونه اعمال می شود پوش هوک-براون نمونه های عددی نیز در فضای  $\sigma_1 - \sigma_3$  نیز در شکل 27 نشان داده شده است. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مدل عددی از پارامترهایی است که از این پوش برای قیاس با نتایج آزمایشگاهی حاصل شد. نتایج حاصل از پوش هوک-براون برای نمونه های آزمایشگاهی و عددی سنگ گرانیت در جدول 11 ارائه شده اند. مقاومت فشاری و مقاومت های کششی به دست آمده از آزمون های تک محوره و کشش به همراه نتایج حاصل از آزمون های سه محوره به عنوان پارامترهای ورودی استفاده شدند.



شکل 27: پوش هوک-براون نمونه های عددی در فضای  $\sigma_1 - \sigma_3$

### 3- نتیجه گیری

هدف از تحقیق انجام شده درک بهتر از کالیبراسیون مدل های عددی به روش المان مجزا و شناخت عوامل و پارامترهای مؤثر بر کالیبراسیون و بررسی تأثیر هر یک از این عوامل بر الگوی رشد شکست می باشد. مدل های عددی در نرم افزار PFC2D، براساس آزمون های آزمایشگاهی کالیبره می شوند. مشکلی که محققان در مدل سازی با این نرم افزار مواجه می باشند، عدم تطابق مقاومت کششی مدل عددی و الگوی شکست آن با نمونه واقعی با مقاومت فشاری بالا می باشد. برای حل این مشکل در این تحقیق با استفاده از مطالعات میکروسکوپی، ساختار میکروی سنگ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعات روی سنگ گرانیت نشان داد که توزیع طول ریزترک ها در نمونه



شکل 26: منحنی تنش کرنش محوری برای آزمون کشش مستقیم، (الف) نمونه مستطیلی شکل، (ب) نمونه دمبلی شکل

### 2-3-3- ت - آزمایش فشاری سه محوره

مشخصات هندسی نمونه در آزمایش سه محوره مشابه آزمایش تک محوره مطابق شکل 20 (ج) است، با این تفاوت که در آزمایش سه محوره نمونه توسط چهار صفحه پیرامونی بارگذاری می گردد. صفحات بالا و پایین، وظیفه بارگذاری نمونه را بر عهده دارند و صفحات جانبی، فشار محصورکننده مورد نظر را به نمونه اعمال می کنند. سختی نرمال دیواره های جانبی کسری از سختی نرمال دیسک ها (0/001-0/2) در نظر گرفته می شود تا وضعیت انعطاف پذیری غشا اطراف نمونه حفظ شود. در طی آزمایش میزان تنش جانبی با مکانیزم کنترل شده ای ثابت می ماند، در

حالت بدون کلامپ) به مقدار کمتر از 0/1 کاهش می‌یابد. با توجه به کالیبراسیون مدل‌های عددی در PFC2D می‌توان نتیجه گرفت که در بحث کالیبراسیون مقاومت کششی و دستیابی به الگوی شکست صحیح، مطالعه رفتار ریزترک‌ها و استفاده از روش کلامپ با شعاع تأثیر کنترلی نقش اساسی را ایفا کرده و الزامی است.

سنگ گرانیت با تابع توزیع احتمال ویبال همبستگی خوبی دارد. برای تابع توزیع احتمال ویبال، ضریب تصمیم‌گیری 0/975 است. توزیع جهت ریزترک‌ها با تابع توزیع احتمال نرمال ضریب تصمیم‌گیری 0/931 است. همچنین با کدنویسی در این نرم‌افزار از روش کلامپ با شعاع کنترلی که توسط میانگین و انحراف استاندارد که مرتبط با توزیع دانه‌بندی است، استفاده شد. استفاده از این روش مشخص نمود که نسبت مقاومت کششی به فشاری از مقدار 0/5 (در

جدول 11: نتایج به دست آمده از پوش هوک-براون نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی سنگ گرانیت

نمونه	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک (Degree)	مقاومت کششی (MPa)	a	s	m <sub>b</sub>
عددی	16/8	47/95	5/68	0/5	1	16/20
آزمایشگاهی	16/55	48	5/76	0/5	1	16/28

[11] Hatzor, Y.H., Palchik, V.; 1997; "The influence of grain size and porosity on crack initiation stress and critical flaw length in dolomites", *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 34, 805-16.

[12] Prikryl, R.; 2001; "Some micromechanical aspects of strength variation in rocks", *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 38, 671-82.

[13] Wong, R.H.C., Chau, K.T., Wang, P.; 1996; "Microcracking and grain size effect in Yuen long marbles", *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 33, 479-85.

[14] Xia, K.; Nasser, M.H.B., Mohanty, B., Lu, F., Chen, R., Luo, S.N.; 2008; "Effects of microstructures on dynamic compression of Barre granite", *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 45, 879-87.

[15] Cho, N. Martin, C.D. Sego, D.C.; 2007; "A clumped particle model for rock", *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.* 44, 997-1010.

[16] Martin, C.D.; 1995; "Brittle rock strength and failure: Laboratory and in situ", *Proc. ISRM Congress, Tokyo Japan*.

[17] Ghazvinian, E. Diederichs, M.S.; "Effect of clumping and clustering on more realistic behaviour of bonded-particle model", *Proc. 63rd Canadian Geotechnical Conference, Calgary, Canada 2010*.

[18] Hazzard, J.F. Young, R.P.; 2000; "Simulating acoustic emissions in bonded-particle models of rock", *Int J of Rock Mech Min Sci*, 37, 867 – 872.

[19] Potyondy, D.O.; 2007; "Simulating stress corrosion with a bonded-particle model for rock", *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.* 44, 677-691.

[20] Yoona, J.S., Zangb, A., Stephanssonb, O.; 2012; "Simulating fracture and friction of Aue granite under confined asymmetric compressive test using clumped particle model", *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.* 49, 63-68.

#### 4- مراجع

[1] Itasca Consulting Group Inc.; 2008; "PFC2D Manual".

[2] Cundall, P.A., Strack, O.; 1979; "A Discrete Element Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*", 29, 47-65.

[3] Diederichs, M.S.; 1999; "Instability of Hard Rockmasses: The Role of Tensile Damage and Relaxation". Ph.D., Thesis University of Waterloo.

[4] Diederichs, M.S.; 2003; "Rock fracture and collapse under low confinement conditions", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36, 5, 339-381.

[5] Tiab, D., Donaldson, E.C.; 2004; "Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties", 2nd ed., Elsevier, 890 pp.

[6] Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, A.M., Risnes, R.; 2008; "Petroleum related rock mechanics", 2<sup>nd</sup> ed, Elsevier, 491 pp.

[7] European Commission, Directorate general JRC; 2004; "Institute for prospective technological studies, Reference document on best available techniques for management of tailings and waste-rock in mining activities", IPPC, 563 pp.

[8] Bons, P.D., Koehn, D., Jessell, M.W.; 2008; "Lecture notes in earth sciences: Microdynamics simulation", Springer, 407pp.

[9] Nasser, M.H.B., Mohanty, B.; 2008; "Fracture toughness anisotropy in granitic rocks", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 45, 167-93.

[10] Nasser, M.H.B., Mohanty, B., Robin, P.Y.F.; 2005; "Characterization of microstructures and fracture toughness in five granitic rocks", *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 42, 450-460.

[21] ISRM, Commission on Standartization of Laboratory and Field Tests; "Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Gcomech. Abstr., 16, 135-140.

[22] ISRM, Commission on Standartization of Laboratory and Field Tests; 1978; "Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials", Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Gcomech. Abstr., 15, 99-103.

[23] ISRM, Commission on Standartization of Laboratory and Field Tests; 1978; "Sugested Methodes for Determining The Strength of Rock Materials In Triaxial Compression", Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Gcomech. Abstr., 15. pp. 47-51.

[24] Cho, N. Martin, C.D. Sego, D.C.; 2007; "A clumped particle model for rock", Int. J. of Rock Mech, Min. Sci. 44, 997-1010