

(مقاله پژوهشی)

## شبیه سازی عددی برای پیش‌بینی ناهمسانگردی سنگ کرومیت فاریاب با استفاده از نرم‌افزار PFC

بهزاد جعفری محمدآبادی<sup>۱</sup>، کورش شهریار<sup>۲</sup>، حسین جلالی‌فر<sup>۳\*</sup>، کاوه آهنگری<sup>۱</sup>

۱- گروه مهندسی معدن، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی نفت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(دریافت: فروردین ۱۴۰۰، پذیرش: مرداد ۱۴۰۰)

### چکیده

امروزه آنیزوتروپی موجود در سنگ‌ها به دلیل تأثیر بسزایی که بر پایداری و طول عمر سازه‌های مهندسی دارد، اهمیت فراوانی در کلیه مراحل طراحی سازه‌های مهندسی پیدا کرده است. با توجه به پیچیدگی رفتار سنگ‌ها در محیط‌های مختلف، به‌منظور ایجاد یک درک کامل‌تر از رفتار سنگ‌ها در مواجهه با سازه‌های مهندسی، انجام مطالعات جامع‌تری در مورد رفتار آنیزوتروپی سنگ‌ها مخصوصاً آنیزوتروپی موجود در خواص مکانیکی و مقاومتی بسیار ضروری است. با توجه به این‌که تاکنون از تأثیر میکروتکرک‌ها و ناهمسانگردی در مقاومت کششی نمونه سنگ کرومیت اطلاعات زیادی در دسترس نبوده و همچنین در راستای مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار PFC-2D و کالیبره کردن آن با نتایج عددی و اعمال شرایط مختلف و تحلیل حساسیت میکروپارامترها تحقیقات زیادی انجام نشده است، در این پژوهش با انجام سری گسترده‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی و مطالعات عددی شامل شبیه‌سازی آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت فشاری سه محوره، ناهمسانگردی خواص مکانیکی سنگ کرومیت معدن فاریاب با حداقل سختی ۲ و چگالی ۵/۵۳-۴/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب که دارای یک سری سطوح تورق بسیار ریز بوده، با نرخ بارگذاری ۱۰۰ نیوتون بر ثانیه در آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره و ۲۰۰ نیوتون بر ثانیه در آزمون مقاومت کششی برزیلی بررسی شده است تا در راستای طراحی بهینه سازه‌های سنگی در معادن کرومیت اطلاعات بیش‌تری در دسترس باشد. بعد از صحت‌سنجی، مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار PFC-2D انجام شده است که یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای مبتنی بر روش‌های المان مجزا محسوب می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان گفت در نمونه سنگ‌های کرومیت معدن فاریاب، بیش‌ترین ناهمسانگردی بین راستای X و راستاهای دیگر (Y و Z) رخ داده است؛ به‌طوری‌که راستای X کم‌ترین خواص مقاومتی را از خود نشان داده است. با این حال اختلاف مقادیر خواص مقاومتی راستای X نسبت به سایر راستاها آن‌قدر زیاد نبوده و بنابراین نمونه‌های سنگی کرومیت معدن فاریاب از همسانگردی پایینی برخوردار هستند. همچنین با بررسی‌های انجام شده مشخص شد که فشار جانبی وارده بر این سنگ‌ها تأثیر بسیار زیادی در خواص مکانیکی آن‌ها شامل مقاومت نهایی، گسترش ترک‌ها و کرنش‌های معادل آن‌ها دارد.

### کلمات کلیدی

کرومیت فاریاب، ناهمسانگردی، المان مجزا، مقاومت فشاری، مقاومت کششی

## ۱- مقدمه

جدید و نوآوری این تحقیق به این دلیل می‌باشد که تاکنون بر روی تأثیر میکروترک‌ها و ناهمسانگردی در مقاومت کششی نمونه سنگ کرومیت اطلاعات زیادی در دسترس نیست. همچنین مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار PFC-2D و کالیبره کردن آن با نتایج عددی و اعمال شرایط مختلف و تحلیل حساسیت میکروپارامترها کار زیادی انجام نشده است که بایستی در راستای طراحی بهینه سازه‌های سنگی در معادن کرومیت مطالعات بیشتری در این زمینه انجام شود. بر اساس چگونگی تشکیل سطوح ضعف، ناهمسانی به دودسته ذاتی<sup>۲</sup> و القایی<sup>۳</sup> تقسیم می‌شود. در ناهمسانی ذاتی، تشکیل سطوح ضعف با منشأ سنگ در ارتباط است؛ مانند سطوح لایه‌بندی و شیبستوزیته که هم‌زمان با تشکیل سنگ شکل می‌گیرند. درحالی‌که در ناهمسانی القایی، این سطوح پس از تشکیل سنگ و به‌واسطه‌ی ناهمسانی‌های تنش، درزه، شکستگی‌ها، سطوح برش و گسله‌ها توسعه می‌یابند [۲]. از میان سه گروه اصلی سنگ‌ها، سنگ‌های دگرگونی بیش‌ترین ناهمسانی را دارند که علت آن تشکیل لایه‌هایی با ترکیب کانی‌شناسی مختلف، طی فرآیند تفریق دگرگونی است. گرادیان‌های حرارتی و فشارهای بالای وابسته به فعالیت‌های تکتونیکی، باعث ایجاد سطوح تورق در این سنگ‌ها شده که علت اصلی رفتار ناهمسان در آن‌ها است [۲]. از آنجاکه ناهمسانگردی اهمیت فراوانی در کلیه مراحل طراحی سازه‌های مهندسی دارد، ضروری است که مطالعات گسترده‌ای جهت شناخت کامل‌تر این رفتار انجام شود بنابراین در تحقیق حاضر با شبیه‌سازی عددی یک سری آزمون آزمایشگاهی، شامل آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت فشاری سه محوره و مقاومت کششی برزلی در نرم‌افزار PFC-2D، ناهمسانگردی خواص مکانیکی سنگ کرومیت معدن فاریاب که مطابق شکل ۱ دارای یک سری سطوح تورق بسیار ریز بوده، بررسی شده است. همچنین به‌منظور بررسی‌های بیشتر، مکانیزم رشد ترک‌ها نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۱- سنگ کرومیت و سطوح تورق بسیار ریز

ناهمسانگردی (آنیزوتروپی) واژه‌ای است که از آن برای ارزیابی رفتار مکانیکی یک جسم در برابر نیروهای وارده به آن استفاده می‌شود. یک جسم ناهمسانگرد رفتار مکانیکی غیریکسانی را در همه‌ی جهات نسبت به نیروهای وارده از خود نشان می‌دهد، در صورتی‌که چنین حالتی برای یک جسم همسانگرد دیده نمی‌شود. وقتی که ناهمسانگردی یک سنگ بالا باشد، بدین معناست که رفتارهای مکانیکی محاسبه‌شده نسبت به نیروهای وارده در جهات گوناگون به‌طور عمده با یکدیگر متفاوت است و شباهت بین رفتارهای مکانیکی هر جهت کم می‌باشد و اگر آنیزوتروپی پایین باشد، رفتارهای مکانیکی نسبت به نیروهای اعمالی در جهات متفاوت به یکدیگر شبیه بوده و جسم همسانگرد است. آنیزوتروپی یا ناهمسانگردی را می‌توان یکی از اصلی‌ترین خصوصیات رفتاری توده سنگ‌های مختلف دانست. این رفتار که عمدتاً به دلیل غیریکنواختی و هندسه نامنظم سیستم‌های شکستگی سنگ‌ها به وجود می‌آید، از مسائل اصلی در مراحل مختلف طراحی‌های مهندسی ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی از جمله پایداری پی‌ها، شیروانی‌ها، حفاری‌های سطحی و زیرزمینی، معدنکاری و همچنین مهندسی نفت محسوب می‌شود. این عارضه همچنین در مهندسی نفت نیز به‌عنوان یک عامل بحرانی در کنترل انحراف گمانه، پایداری، تغییر شکل‌پذیری و شکست شناخته می‌شود [۱]. از طرف دیگر، یکی از مهم‌ترین عواملی که مکانیزم شکست سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد خواص مکانیکی آن‌ها از جمله خواص فشاری و کششی است. از آنجاکه رفتار مکانیکی سنگ‌های ناهمسانگرد تحت کشش یا فشارش در جهات‌های مختلف متفاوت می‌باشد، جهت جلوگیری از بروز حوادث ناگوار احتمالی ضروری است که در طراحی‌ها، رفتار ناهمسانگردی توده سنگ‌های محیط با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرند. با توجه به اهمیت ذکرشده، این پدیده از دیرباز مورد توجه محققین مختلف بوده است.

در این پژوهش ضمن بررسی و مطالعه بر روی مقاومت و تغییر شکل‌پذیری سنگ‌های ناهمسان لایه‌ای توسط مولر [۲] و با توجه به اهمیت آن توسط سایر محققین، به پیش‌بینی ناهمسانگردی سنگ‌های کرومیت با استفاده از مدل‌سازی المان مجزا پرداخته شده است [۳-۸]. جنبه

## ۲- مواد و روش‌ها

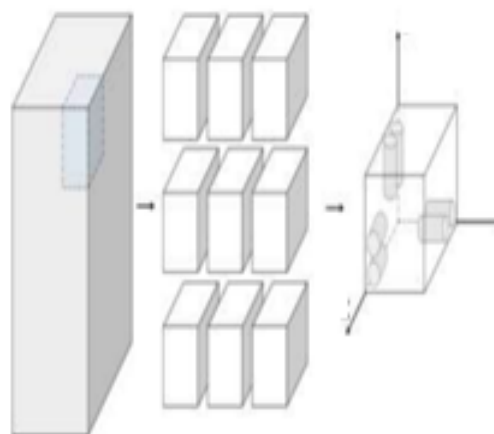
## ۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت انجام تحلیل‌ها و بررسی ناهمسانگردی از نمونه سنگ‌های معدن کرومیت فاریاب (مجتمع معدنی آسمینون) استفاده شده است. این منطقه با محدوده‌ای بالغ بر ۸۰ کیلومترمربع به طول جغرافیایی ۲۹° ۵۷' تا ۳۰° ۳۰' و عرض جغرافیایی ۱۷° ۲۷' تا ۳۰° ۲۷' در شمال شرق شهرستان میناب واقع شده و دارای یک روند عمومی شمال غرب - جنوب شرق بوده که شکل آن به صورت مثلثی است. فرآیند آماده‌سازی نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. از آنجاکه تشخیص سطوح ضعیف نمونه‌های سنگی منطقه مورد نظر مشکل بوده، ناهمسانگردی در سه جهت اصلی محورهای مختصاتی (محورهای X، Y و Z) بررسی شده است. نمونه‌های برداشت شده نیز متعلق به یکی از تونل‌های این معدن به نام تونل نعمت بوده که در عمق ۲۵۰ متری از سطح زمین واقع شده است.

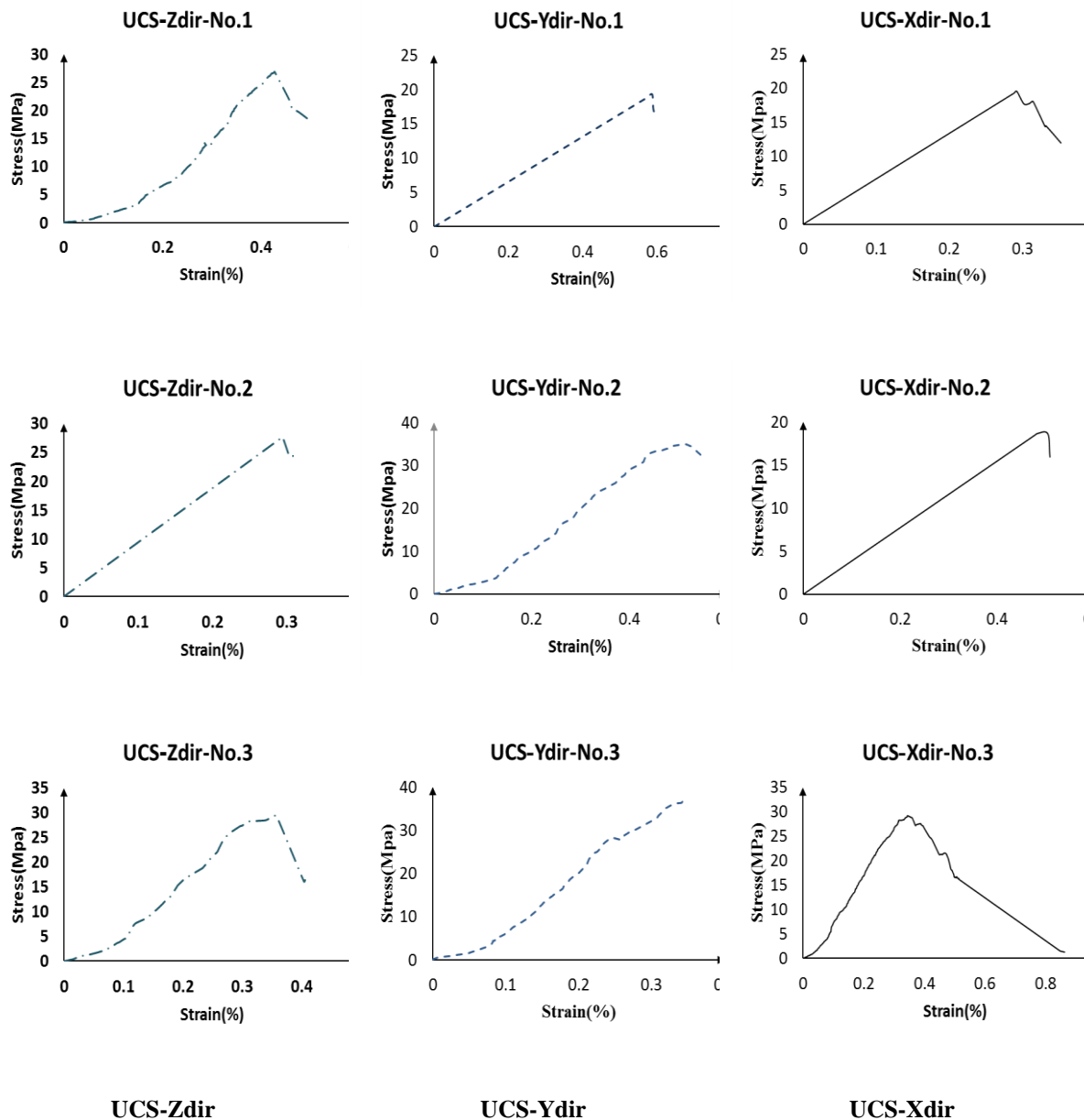
## ۲-۲- روش آزمایشگاهی

در این تحقیق پس از تقسیم بلوک اصلی به قطعات کوچک‌تر، جهت انجام تحلیل‌ها از بلوک‌های سنگی مغزه‌گیری انجام گرفت و سپس به منظور تعیین خواص مکانیکی سنگ کرومیت معدن فاریاب، آزمون‌های آزمایشگاهی متعددی روی مغزه‌های مورد آنالیز انجام شد.

برای بررسی رفتار نمونه‌ها در آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره، نمونه‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در انجام این آزمایش تعداد زیادی نمونه مورد بررسی قرار گرفت که در نهایت ۹ نمونه (۳ نمونه در هر جهت) برای بررسی دقیق‌تر انتخاب شدند. نرخ بارگذاری در آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره معادل با ۱۰۰ نیوتن بر ثانیه بوده و تا زمانی که نمونه‌ها دچار شکست شوند، عملیات بارگذاری ادامه پیدا کرده است. شکل ۳ نمودار تنش- کرنش مربوط به یک نمونه تحت آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره در جهات مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مقادیر میانگین مقاومت فشاری سنگ در هر کدام از جهات مورد بررسی محاسبه شده است که در جدول ۱ قرار داده شده است. همان‌طور که در این جدول قابل مشاهده می‌باشد، بیشترین و کمترین مقدار در جهت X، ۲۹/۱۹ MPa و ۱۸/۶۶ MPa، در جهت Y این مقادیر به ترتیب ۳۷/۳۸ MPa و ۱۹/۳۱ MPa و در جهت Z بیشترین مقاومت فشاری سنگ ۲۹/۴۰ MPa و کمترین آن ۲۶/۸۸ MPa می‌باشد. حداکثر اختلاف UCS در جهت‌های X و Y (به مقدار ۸/۲ MPa) رخ داده است به‌طوری‌که ماکزیمم مقدار در جهت Y و حداقل مقدار در جهت X می‌باشد. همچنین برای بررسی مقاومت کششی نمونه‌های سنگی مورد مطالعه از آزمون برزیلی استفاده شده است. شکل ۴ نمودار تنش - کرنش مربوط به یک نمونه آزمایشگاهی تحت آزمون مقاومت کششی برزیلی در جهات مختلف را نشان می‌دهد.



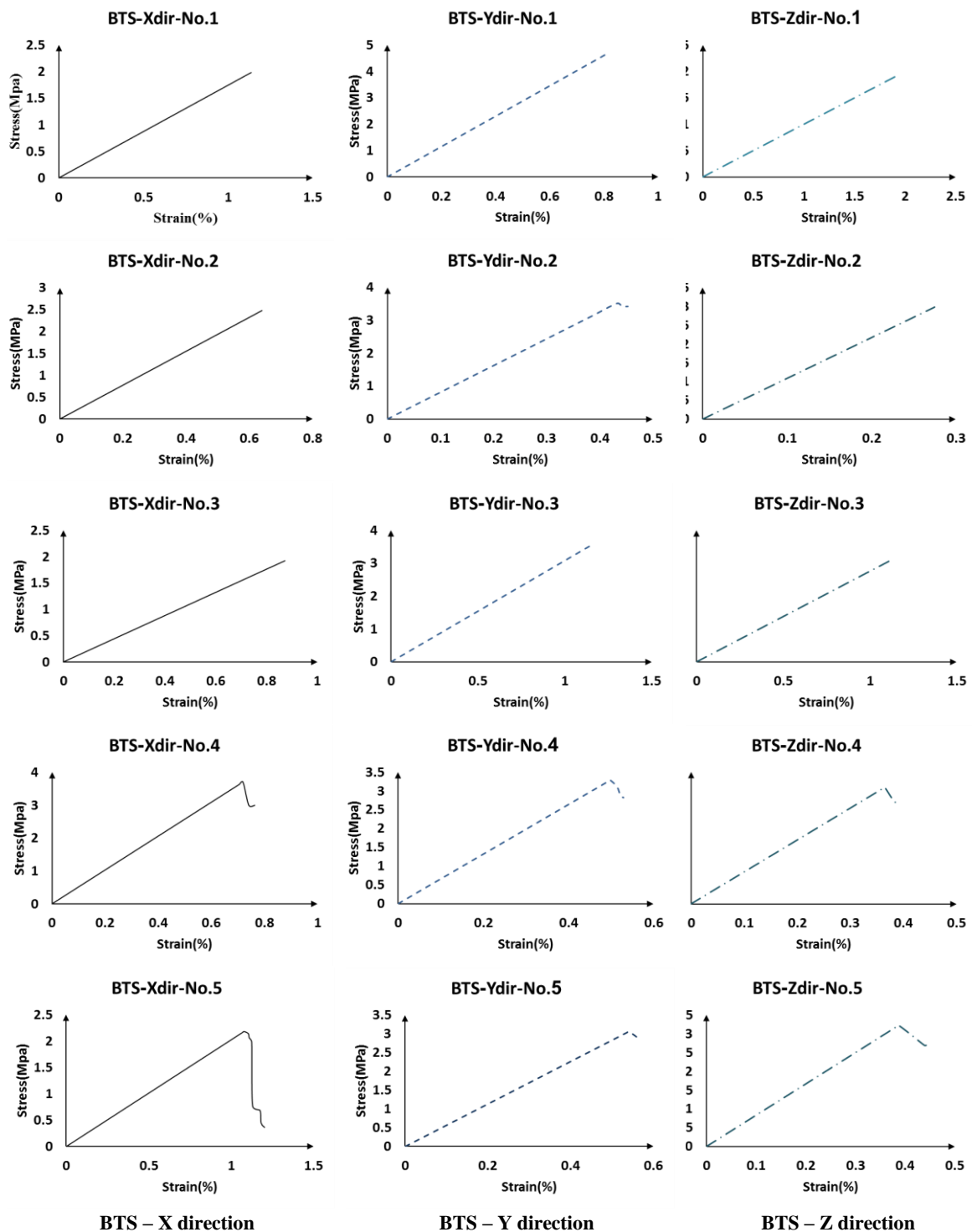
شکل ۲- نحوه تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها از بلوک‌های تهیه‌شده [۹]



شکل ۳- منحنی تنش- کرنش نمونه‌های سنگی ناشی از آزمایش تک‌محوره در جهات مختلف

جدول ۱- مقادیر خواص مقاومتی به‌دست‌آمده از آزمون تک‌محوره برای جهات مختلف

جهت Z			جهت Y			جهت X		
ε (%)	σ <sub>c</sub> (MPa)	نمونه	ε (%)	σ <sub>c</sub> (MPa)	نمونه	ε (%)	σ <sub>c</sub> (MPa)	نمونه
۰٫۴۳	۲۶٫۸۸	Z <sub>۱</sub>	۰٫۵۹	۱۹٫۳۱	Y <sub>۱</sub>	۰٫۲۹	۱۸٫۶۶	X <sub>۱</sub>
۰٫۲۹	۲۷٫۱۱	Z <sub>۲</sub>	۰٫۵۲	۳۴٫۸۹	Y <sub>۲</sub>	۰٫۵۰	۱۹٫۲۸	X <sub>۲</sub>
۰٫۳۶	۲۹٫۴۰	Z <sub>۳</sub>	۰٫۲۵	۳۷٫۳۸	Y <sub>۳</sub>	۰٫۳۴	۲۹٫۱۹	X <sub>۳</sub>



شکل ۴- منحنی تنش- کرنش نمونه‌های سنگی ناشی از آزمایش برزبلی در جهات مختلف

حداکثر مقدار مقاومت کششی در جهت  $X$ ،  $3.7 \text{ MPa}$  و حداقل آن  $1.92 \text{ MPa}$  می‌باشد. در جهت  $Y$  حداکثر و حداقل مقدار مقاومت کششی به ترتیب  $4.67 \text{ MPa}$  و  $3.06 \text{ MPa}$  و در جهت  $Z$  نیز حداکثر مقدار  $3.93 \text{ MPa}$  و حداقل مقدار  $1.92 \text{ MPa}$  می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود، حداکثر مقدار در جهت  $Y$  و حداقل مقدار مقاومت کششی

نمونه‌های مورد مطالعه مغزه‌هایی با قطر  $54$  میلی‌متر و ارتفاع  $27$  میلی‌متر می‌باشند که انتهای آن‌ها توسط آره بریده شده است. در این آزمایش تعداد  $15$  نمونه ( $5$  آزمون در هر جهت) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین سرعت بارگذاری اعمال شده به نمونه‌ها  $200$  نیوتن بر ثانیه می‌باشد. همان‌طور که در جدول  $2$  مشاهده می‌شود،

آزمون‌ها در جدول ۳ ذکر شده است. این نتایج که بیانگر خواص مکانیکی در جهات مختلف است، در شبیه‌سازی عددی به‌عنوان مبنای آنالیزها قرار گرفته‌اند.

در جهت X ایجاد شده که اختلافی برابر با ۱/۲ MPa با یکدیگر دارند. به همین ترتیب آزمون آزمایشگاهی برای آزمون سه محوره صورت گرفت و سپس نتایج حاصل از

جدول ۲- مقادیر خواص مقاومتی به‌دست‌آمده از آزمون برزلی برای جهات مختلف

جهت Z		جهت Y		جهت X	
نمونه	$\sigma_t$ (MPa)	نمونه	$\sigma_t$ (MPa)	نمونه	$\sigma_t$ (MPa)
Z <sub>1</sub>	۱,۹۲	Y <sub>1</sub>	۴,۶۷	X <sub>1</sub>	۱,۹۸
Z <sub>2</sub>	۲,۹۸	Y <sub>2</sub>	۳,۴۳	X <sub>2</sub>	۲,۴۸
Z <sub>3</sub>	۳,۹۳	Y <sub>3</sub>	۳,۵۱	X <sub>3</sub>	۱,۹۲
Z <sub>4</sub>	۳,۵۴	Y <sub>4</sub>	۳,۲۹	X <sub>4</sub>	۳,۷۰
Z <sub>5</sub>	۳,۲۲	Y <sub>5</sub>	۳,۰۶	X <sub>5</sub>	۲,۱۸

جدول ۳- خواص مکانیکی نمونه سنگ‌ها در راستاهای مختلف

واحد	راستا			پارامتر
	X	Y	Z	
(MPa)	۳۰,۵۲	۲۷,۹۶	۲۲,۳۲	UCS
(MPa)	۳,۶۳	۳	۲,۴۳	TS
(GPa)	۶,۴	۶,۹	۵,۴	E
---	۰,۲	۰,۲	۰,۲	$\nu$
(MPa)	۷,۱	۷,۳	۶,۹	c
درجه	۳۴,۶۸	۳۴,۹	۳۴,۱	$\phi$

## ۲-۳- روش عددی

## ۲-۴- روش المان مجزا

در روش المان مجزا سنگ به‌صورت اجتماع یافته‌ای از بلوک‌های مجزا معرفی شده و درزه‌ها به‌عنوان سطوح تلاقی میان بلوک‌های مجزا دیده می‌شوند که به‌عنوان شرایط مرزی مسئله منظور می‌شوند. نیروهای تماس و جابه‌جایی در محل تماس‌ها ناشی از انباشته شدن تنش بلوک‌ها از محاسبه اثرات حرکات بلوک‌ها به دست می‌آید. روند محاسبات در این روش به‌صورت تلفیقی از اعمال قانون نیرو و جابه‌جایی در محل تماس‌ها و به‌کارگیری قانون دوم نیوتون که حرکت بلوک‌ها را ناشی از اعمال نیرو بر آن‌ها است، تعیین می‌کند. این روش دارای مدل‌سازی ناپیوسته به‌منظور شبیه‌سازی و رفتار محیط سنگی درزه‌دار تحت شرایط استاتیکی، شبه استاتیکی و دینامیکی است. نرم‌افزارهای UDEC، 3DEC و PFC بر این اساس کار می‌کنند. در این مطالعه شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار PFC انجام شده است که از کدهای المان مجزا بوده و امروزه از کدهای پرکاربرد در انواع مطالعات از جمله بررسی ناهمسانگردی موجود در سنگ‌ها محسوب می‌شود.

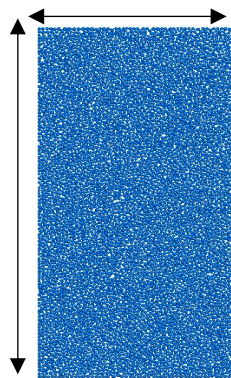
با توجه به این که روش‌های عددی ابزارهای قدرتمندی هستند که می‌توان بعد از کالیبره کردن مدل با آزمون‌های آزمایشگاهی به اتفاقات درون سنگ‌ها در لحظه شکست و چگونگی مکانیسم شکست سنگ پی برد، در این تحقیق برای شبیه‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی و بررسی پروسه و مکانیسم شکست سنگ به دلیل نقش پررنگ روش المان مجزا در بررسی ناهمسانگردی موجود در سنگ‌ها از این روش استفاده شده است. در مدل‌سازی عددی به دنبال شروع و رشد ترک‌ها هستیم که به‌صورت بیضی و استوانه‌ای گسیخته می‌شود، به همین علت مدول الاستوپلاستیک مدنظر است؛ همچنین از معیار موهر کولمب استفاده شده است. پوش موهر کولمب تخمینی از مقاومت‌های فشاری و کششی را پیش‌بینی می‌کند. روش موهر کولمب روشی محافظه‌کارانه است و مقاومت را کمتر از چیزی که می‌باشد در نظر می‌گیرد درحالی که می‌دانیم اگر تنش میانگین را لحاظ کند، مقاومت بیشتر می‌شود.

## ۲-۵- نرم‌افزار PFC

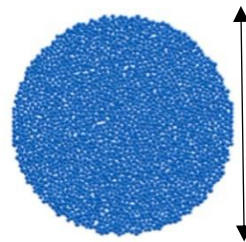
این نرم‌افزار، یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای مبتنی بر روش المان مجزا است که در طیف وسیعی از کاربردهای مهندسی مانند شبیه‌سازی سنگ‌های بکر [۱۰-۱۲]، شبیه‌سازی شکست سنگ [۱۳-۱۵]، شبیه‌سازی نگهدارنده‌های سنگ‌های زیرزمین [۱۶]، درزهای سنگ و توده سنگ درزه‌دار [۱۷-۲۵] تاکنون با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است.

پروسه تهیه نمونه در نرم‌افزار PFC-2D، شامل ایجاد مجموعه‌ای از ذرات دایروی مترکم، غیر هم‌اندازه، با اتصال مناسب بین ذرات و نصب باند در نقاط تماسی بین ذرات می‌باشد. در تحقیق حاضر، اندازه ذرات با استفاده از دو پارامتر حداقل شعاع ذره ( $R_{min} = 0.45 \text{ mm}$ ) و حداکثر شعاع ذره ( $R_{max} = 0.675 \text{ mm}$ ) کنترل شده و دارای توزیع اندازه نرمال می‌باشد. ارتفاع و قطر نمونه‌ها نیز به ترتیب برابر با مقدار ۱۱۵ mm و ۵۴ mm انتخاب شده است. در شکل ۵ مدل‌های هندسی ساخته‌شده در تحلیل‌های عددی نشان داده شده است. در نرم‌افزار PFC-2D قبل از انجام

مدل‌سازی‌ها، ابتدا ضروری است که خواص میکروپارامترها تعیین شود اما از آنجاکه خواص ذرات و باند بین آن‌ها متفاوت از رفتار بزرگ‌مقیاس سنگ‌ها بوده، تعیین میکروپارامترها یکی از چالش‌های اصلی است که غالباً از طریق فرآیند کالیبراسیون تعیین می‌شود. در این روش میکروپارامترها به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به دست آید (در شکل ۶ مقایسه شکست ایجادشده در حالت عددی و آزمایشگاهی آورده شده است). اولین مرحله از فرآیند کالیبراسیون، بازیابی مدول الاستیسته و مرحله دوم، بازیابی ضریب پواسون ماده می‌باشد. با توجه به این‌که هر دو پارامتر مدول الاستیسته و ضریب پواسون تغییر شکل‌پذیری ماده را نشان می‌دهند، مراحل اول و دوم به‌صورت بازگشتی انجام می‌شوند و در نهایت پارامترهای مقاومتی ماده با بازیابی مقاومت فشاری تک‌محوره کالیبره می‌گردند [۲۶]. مقادیر کالیبره شده میکروپارامترها برای جهات مختلف (X، Y و Z) نمونه سنگ‌های مورد بررسی در جدول ۴ ارائه شده است.

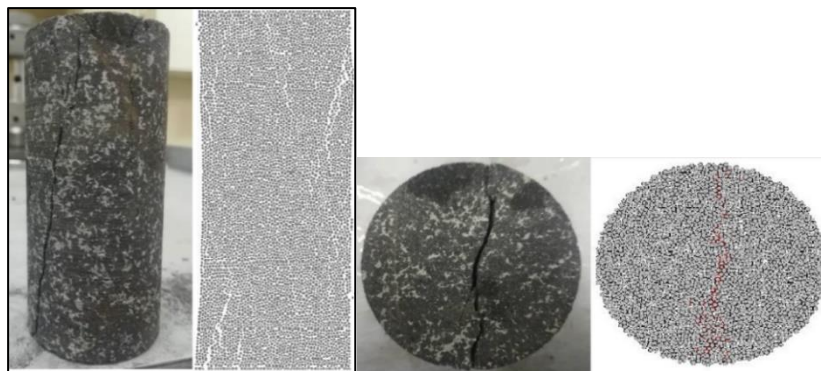


(الف)



(ب)

شکل ۵- مقطعی از مدل‌های عددی ساخته‌شده در نرم‌افزار PFC-2D. (الف) آزمون تک‌محوره و سه محوره. (ب) آزمون برزیلی



ب

الف

شکل ۶- مقایسه شکست ایجادشده در حالت عددی و آزمایشگاهی. (الف) آزمون BTS. (ب) آزمون UCS

جدول ۴- مقادیر کالیبره شده میکروپارامترهای ذرات نمونه سنگ‌ها در راستاهای مختلف

واحد	راستا			پارامتر
	Z	Y	X	
(kg/m <sup>3</sup> )	۵۷۰۰	۵۷۰۰	۵۷۰۰	دانسیتته ذرات
---	۰٫۸۲	۰٫۸۴	۰٫۷۶	نسبت باندشدگی
(GPa)	۶٫۴	۶٫۹	۵٫۴	مدول الاستیسته ذرات
---	۲٫۰	۲٫۰	۱٫۸	سختی نرمال به سختی برشی ذرات
---	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	ضریب اصطکاک
(MPa)	۱۷٫۰	۱۷٫۱	۱۳٫۳	چسبندگی ذرات
(MPa)	۷٫۰	۸٫۳	۶٫۶	مقاومت کششی ذرات
درجه	۳۰	۳۰	۳۰	زاویه اصطکاک ذرات

به تعداد ترک‌ها<sup>۲</sup> و روند گسترش آن‌ها در نمودار می‌توان گفت که ترک‌های کششی ضمن این که بیشترین ترک‌های موجود در نمونه هستند، بیشترین تأثیر را بر شکست نمونه سنگ‌ها داشته‌اند. همانند مقاومت فشاری، با بررسی روند گسترش ترک‌های مخرب می‌توان مشاهده نمود که راستای Y ( $\sigma_{cd} = 28 \text{ MPa}$ ) و راستای X ( $\sigma_{cd} = 21/1 \text{ MPa}$ ) به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت را در برابر رشد این ترک‌ها از خود نشان داده‌اند.

نرخ آنیزوتروپی در راستاهای مختلف برای حالت فشاری تک‌محوره نیز محاسبه شده که نتایج آن در جدول ۵ آمده است. با توجه به این جدول می‌توان مشاهده نمود که بیشترین نسبت نرخ آنیزوتروپی مربوط به راستای X و Y بوده که این مقدار نیز کمتر از ۱٫۳۶ می‌باشد و بنابراین می‌توان استنباط کرد که سنگ‌ها در حالت فشاری آنیزوتروپی پایینی دارند و بدین معنا است که اگر خاصیت فشاری در سمت خاصی از فضا اندازه‌گیری شود، نتیجه به دست آمده با اندازه‌گیری در سمت‌های دیگر از فضا تفاوت جزئی دارد.

جدول ۵- نسبت مقاومت فشاری تک‌محوره در جهات مختلف

$\sigma_y/\sigma_z$	$\sigma_z/\sigma_x$	$\sigma_y/\sigma_x$
۱٫۱۰	۱٫۲۴	۱٫۳۶

### ۳-۲- شبیه سازی آزمون برزیلی

جهت بررسی رفتار سنگ‌ها در حالت کششی از شبیه‌سازی عددی آزمون برزیلی استفاده شده است. مشابه باحالت قبل، در این بررسی‌ها مقاومت نهایی، مکانیزم شکست و همچنین رشد ترک نمونه سنگ‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج این بررسی‌ها را می‌توان در شکل ۸

### ۳-۳- بحث و بررسی

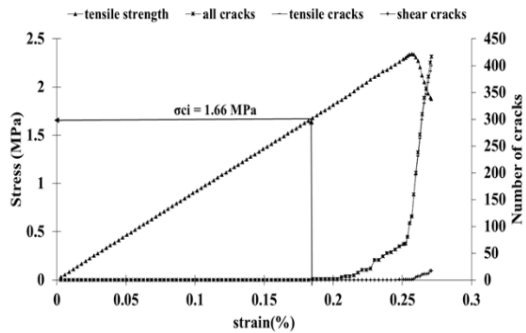
به منظور سازماندهی بهتر در انجام آنالیزهای عددی و مقایسه‌ی آنیزوتروپی، مطالعات تحقیق حاضر به سه بخش اصلی تقسیم شده است که ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود:

#### ۳-۱- شبیه سازی آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره

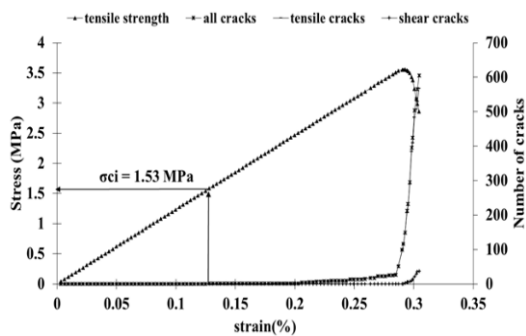
پس از انجام مراحل کالیبراسیون و کسب اطمینان از صحت نتایج عددی، در مرحله‌ی نخست از نتایج شبیه‌سازی آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوره جهت بررسی آنیزوتروپی سنگ‌های کرومیت معدن فاریاب استفاده شده است. بدین منظور تمامی مراحل لازم برای انجام یک آزمون آزمایشگاهی در نرم‌افزار PFC-2D شبیه‌سازی شده است.

در این بررسی‌ها مقاومت نهایی، مکانیزم شکست و همچنین آستانه‌ی شروع ترک‌ها<sup>۴</sup> ( $\sigma_{ci}$ ) و ترک‌های مخرب<sup>۵</sup> ( $\sigma_{cd}$ ) نمونه‌های سنگی کرومیت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. منظور از آستانه‌ی شروع ترک‌ها، لحظه‌ای است که در اثر بارگذاری و اعمال فشار، ریزترک‌ها تشکیل شده و سپس گسترش می‌یابند همچنین پس از رشد و ترکیب این ریزترک‌ها شبکه‌ای از ترک‌های بزرگ تشکیل شده که موجب شکست سنگ می‌شود که این ترک‌های بزرگ، ترک مخرب نام دارند. نتایج آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره در راستاهای مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ می‌توان مشاهده نمود که نمونه‌های سنگی کرومیت در هر سه راستا رفتاری شکننده داشته‌اند. در این نمونه‌ها، راستای Y با مقدار مقاومت فشاری حدود ۳۲ MPa و راستای X با مقدار مقاومت فشاری حدود ۲۴ MPa به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت را از خود نشان داده‌اند. با توجه

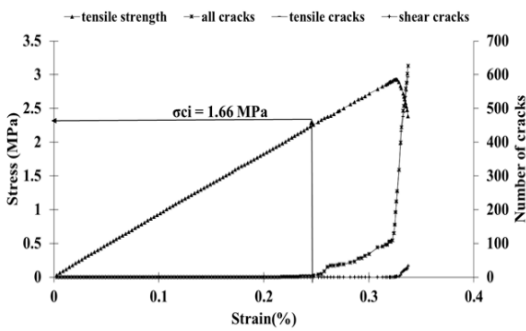




الف راستای X



ب راستای Y



ج راستای Z

شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی آزمون برزلی در نرم‌افزار PFC-2D

جدول ۶- نسبت مقاومت کششی در جهات مختلف

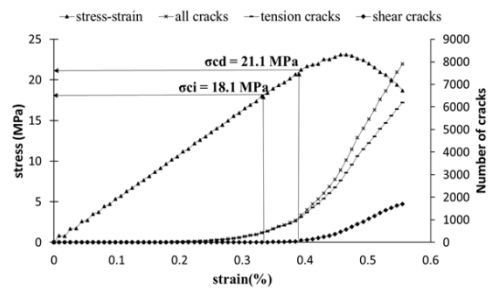
$\sigma_y/\sigma_z$	$\sigma_z/\sigma_x$	$\sigma_y/\sigma_x$
۱٫۱۵	۱٫۲۷	۱٫۴۶

### ۳-۳- شبیه‌سازی آزمون مقاومت فشاری سه محوره

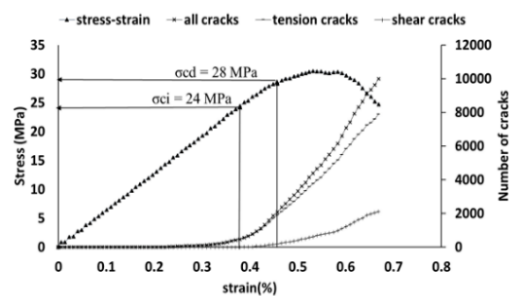
در تحقیق حاضر جهت انجام مطالعات تکمیلی‌تر، آزمون مقاومت فشاری سه محوره نیز شبیه‌سازی شد. در این آنالیز، فشار جانبی ۵ MPa به نمونه‌ها اعمال و همانند آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره، مقدار مقاومت نهایی نمونه‌ها، مکانیزم شکست و همچنین رشد ترک‌ها در راستاهای مختلف بررسی شده است.

مشاهده کرد. با توجه به شکل ۸ می‌توان مشاهده نمود که نمونه‌های سنگی کرومیت در حالت کششی نیز در هر سه راستا رفتاری شکننده از خود نشان داده‌اند. همچنین در این نمونه‌ها، راستای Y با مقدار مقاومت کششی ۳٫۵۶ MPa و راستای X با مقدار مقاومت کششی ۲٫۳۴ MPa به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت را از خود نشان داده‌اند. در این نمونه‌ها همچنین می‌توان مشاهده نمود که ترک‌های کششی ضمن این‌که بیشترین ترک موجود در نمونه هستند، بیشترین تأثیر را بر شکست نمونه سنگ‌ها دارند.

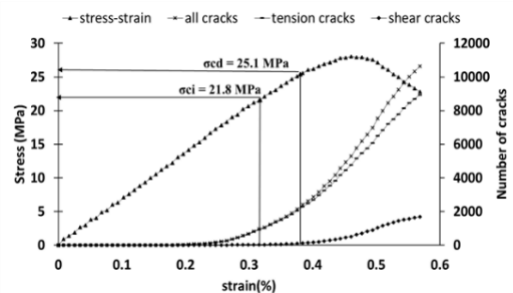
در جدول ۶ نسبت آنیزوتروپی در راستاهای مختلف محاسبه شده است و می‌توان مشاهده کرد که درجه آنیزوتروپی مقاومت کششی در جهات مختلف نمونه سنگ‌های مورد بررسی کمتر از ۱٫۴۶ بوده و در نتیجه مقاومت کششی نمونه‌ها نیز از آنیزوتروپی پایینی برخوردار هستند.



الف راستای X



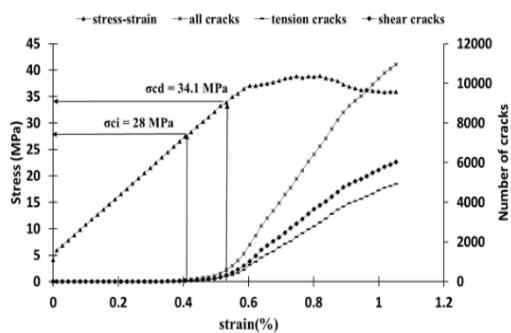
ب راستای Y



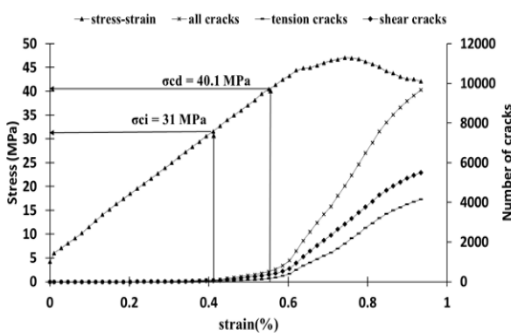
ج راستای Z

شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره در نرم‌افزار PFC-2D

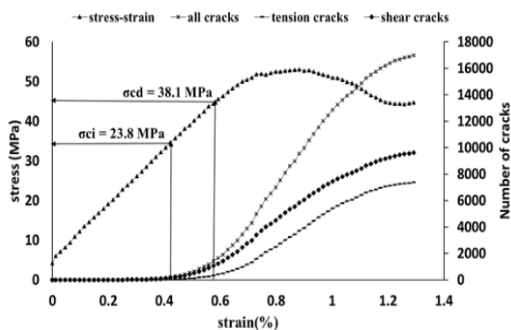
تغییرات فشار جانبی بر رشد ترک‌های نمونه سنگ‌های مورد مطالعه بررسی شده است. جهت این بررسی، از تنش‌های که در آن اولین ترک‌های مخرب ایجاد شده ( $\sigma_{ci}$ ) و کرنشی که در لحظه معادل آن ثبت شده، استفاده شده است. بر اساس نتایج شکل ۱۰ می‌توان مشاهده نمود که تغییرات فشار جانبی بر رشد ترک‌ها نیز اثرات مثبت داشته است؛ به طوری که در راستاهای مختلف (X، Y و Z) افزایش فشار جانبی منجر به افزایش مقاومت نمونه سنگ‌ها در برابر ترک‌های مخرب شده است؛ همچنین تغییرات فشار جانبی باعث شده است که نمونه سنگ‌ها تا لحظه ایجاد اولین ترک، کرنش‌های بیشتری را تحمل نمایند.



الف) راستای X



ب) راستای Y



ج) راستای Z

شکل ۹- نتایج شبیه‌سازی آزمون مقاومت فشاری سه محوره در نرم‌افزار PFC-2D

نتایج آزمون مقاومت فشاری سه محوره در هر سه راستای X، Y و Z در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، می‌توان مشاهده کرد که هر سه راستای مورد بررسی رفتار شکل‌پذیری را از خود بروز داده‌اند. برخلاف نتایج آزمون تک‌محوره در این نمونه‌ها، راستای Z با مقدار مقاومت فشاری حدود ۵۲ MPa و راستای X با مقدار مقاومت فشاری حدود ۳۹ MPa به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت فشاری را از خود نشان داده‌اند.

در این آزمون‌ها گسترش ترک‌های برشی بیشترین تأثیر را بر شکست نمونه سنگ‌ها داشته است. همچنین روند گسترش ترک‌های مخرب بیان‌گر آن بوده که راستای Y ( $\sigma_{cd} = 40/1$  MPa) و راستای X ( $\sigma_{cd} = 34/1$  MPa) به ترتیب بیشترین و کمترین مقاومت را در برابر رشد این ترک‌ها از خود نشان داده‌اند؛ بنابراین مشاهده می‌شود که در حالت محصور (آزمون سه محوره) بیشترین ناهمسانگردی در نمونه‌های سنگی کرومیت فاریاب در بین راستاهای X و Z رخ داده که نتایج حاصله با حالت نامحصور (آزمون تک‌محوره) متفاوت است. نسبت آنیزوتروپی در راستاهای مختلف نیز در جدول ۷ بیان شده است. در این آزمون‌ها بیشترین درجه آنیزوتروپی با مقدار ۱/۳۳ مربوط به جهات X و Z بوده است. با توجه به مقدار آنیزوتروپی محاسبه شده می‌توان نتیجه گرفت که نمونه سنگ‌های مورد بررسی در آزمون سه محوره نیز از آنیزوتروپی پایینی برخوردار هستند. به منظور بررسی بیشتر رفتار این نمونه سنگ‌ها، نتایج عددی به دست آمده از آزمون مقاومت فشاری سه محوره در فشارهای جانبی متفاوت نیز برای هر سه راستای X، Y و Z مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل ۱۰ اثرات میزان فشار جانبی بر مقدار مقاومت فشاری نهایی و میزان کرنش معادل آن بررسی شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۱۰ می‌توان مشاهده نمود که تغییرات فشار جانبی بر میزان مقاومت فشاری نهایی و کرنش معادل آن‌ها اثرات مثبت داشته است؛ به طوری که افزایش فشار جانبی مقاومت نهایی سنگ را افزایش داده و همچنین رفتار سنگ را شکل‌پذیرتر می‌کند. بر اساس این نتایج، مقاومت نهایی در راستاهای Y و Z مقدار نزدیک‌تری نسبت به راستای X داشته است؛ همچنین در فشارهای جانبی پایین میزان مقاومت نهایی در راستای Y از راستای Z بیشتر بوده که با افزایش فشار جانبی میزان مقاومت نهایی در راستای Z بالاتر می‌رود. در شکل ۱۱ نیز

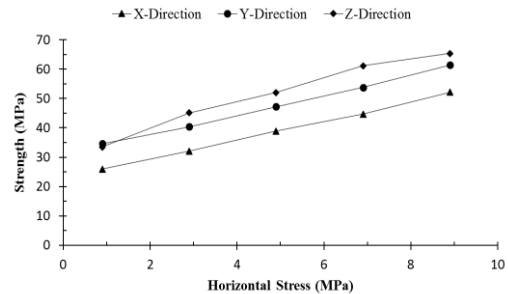
جدول ۷- نسبت مقاومت‌های فشاری در جهات مختلف

$\sigma_z/\sigma_y$	$\sigma_z/\sigma_x$	$\sigma_y/\sigma_x$
۱/۱۰	۱/۳۳	۱/۲۱

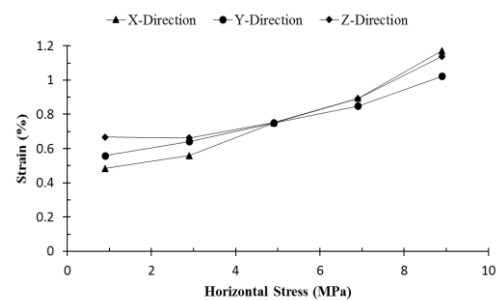
۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین خصوصیات رفتاری توده سنگ‌های مختلف ناهمسانگردی می‌باشد که عمدتاً به دلیل غیریکنواختی و هندسه نامنظم سیستم‌های شکستگی سنگ‌ها به وجود می‌آید. این خصوصیت به دلیل تأثیر بسزایی که در رفتار مکانیکی سنگ‌ها دارد، اهمیت فراوانی در کلیه مراحل طراحی سازه‌های مهندسی پیدا کرده است. در تحقیق حاضر با شبیه‌سازی عددی یک سری آزمون آزمایشگاهی شامل آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوره، کشش برزیلی و مقاومت فشاری سه محوره در نرم‌افزار PFC-2D، به تأثیر میکروترک‌ها و ناهمسانگردی در نمونه سنگ کرومیت معدن فاریاب که داری سطوح تورق بسیار ریز بوده، پرداخته شده است.

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش و جدول‌های ۵، ۶ و ۷ می‌توان گفت که در نمونه سنگ‌های کرومیت معدن فاریاب، بیشترین ناهمسانگردی بین راستای X با راستاهای دیگر (Y و Z) رخ داده است و درجه‌ی آنیزوتروپی در شبیه‌سازی عددی آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره بین راستاهای  $\sigma_y/\sigma_x$  و برابر با ۱/۳۶ بوده همچنین در شبیه‌سازی مدل عددی مقاومت فشاری سه محوره، ناهمسانگردی بین راستاهای  $\sigma_y/\sigma_x$  و برابر با ۱/۳۳ بوده است و در شبیه‌سازی مدل عددی مقاومت کششی برزیلی ناهمسانگردی بین راستاهای  $\sigma_z/\sigma_x$  و برابر با ۱/۴۶ می‌باشد که این نتایج مبین آنیزوتروپی پایین هستند؛ به بیان دیگر، راستای X کمترین خواص مقاومتی را از خود نشان داده است. با این حال مطابق با جدول ۸ اختلاف مقادیر خواص مقاومتی راستای X نسبت به سایر راستاها آن قدر زیاد نبوده و ناچیز است؛ بنابراین می‌توان گفت که نمونه‌های سنگی کرومیت معدن فاریاب از آنیزوتروپی پایینی برخوردار هستند. این نمونه سنگ‌ها تحت فشارهای جانبی بالاتر رفتاری شکل‌پذیرتری پیدا کرده و مقاومت نهایی آن‌ها نیز به مراتب بیشتر می‌شود. در بررسی روند گسترش ترک‌ها نیز این نتیجه حاصل شد که در حالت نا محصور، گسترش ترک‌های کششی و در حالت محصور گسترش ترک‌های برشی بیشترین تأثیر را بر شکست نمونه سنگ‌ها داشته است. همچنین افزایش فشار جانبی منجر به افزایش مقاومت نمونه سنگ‌ها و تحمل کرنش‌های بیشتر در برابر ترک‌های مخرب شده است.

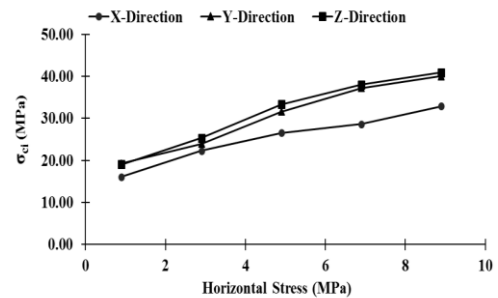


الف) تغییرات مقاومت نهایی

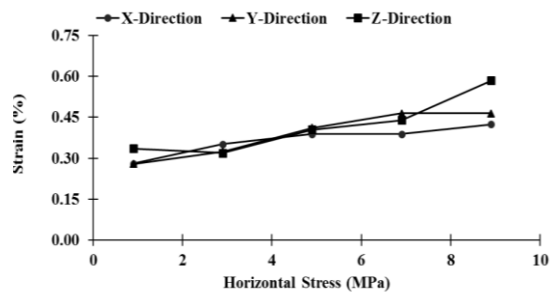


ب) تغییرات کرنش معادل مقاومت نهایی

شکل ۱۰- تغییرات مقاومت نهایی و کرنش معادل آن در فشارهای جانبی مختلف



الف) تغییرات تنش  $\sigma_{ci}$



ب) تغییرات کرنش معادل  $\sigma_{ci}$

شکل ۱۱- تأثیر فشار جانبی‌های مختلف بر رشد ترک‌های نمونه سنگ‌ها در راستاهای مختلف

جدول ۸- اختلاف خواص مقاومتی بیشترین راستا از بقیه‌ی راستاها

آزمون	بیشترین خواص مقاومتی	کمترین خواص مقاومتی	اختلاف بیشترین و کمترین خواص مقاومتی (%)	
مقاومت فشاری تک‌محوره	۱٫۳۶	۱٫۱۰	۰٫۰۰۱۲	۰٫۰۰۲۶
مقاومت کششی برزیلی	۱٫۴۶	۱٫۱۵	۰٫۰۰۳۱	۰٫۰۰۱۹
مقاومت فشاری سه محوره	۱٫۳۳	۱٫۲۱	۰٫۰۰۱۲	۰٫۰۰۲۳

[10] Potyondy, D. O., & Cundall, P. A. (2004). A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8), 1329-1364. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011>.

[11] Akram, M. S., & Sharrock, G. B. (2010). Physical and numerical investigation of a cemented granular assembly of steel spheres. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34,18, 1896-1934. doi:10.1002/nag.885.

[12] Cui, Z., Sheng, Q., Leng, X., & Ma, Y. (2019). Investigation of the long-term strength of Jinping marble rocks with experimental and numerical approaches. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 2, 877-882. doi:10.1007/s10064-017-1132-2.

[13] Huang, H. (1999). Discrete element modeling of tool-rock interaction [Ph. D. Thesis]. Minneapolis, MN: University of Minnesota.

[14] Kaitkay, P. V. (2002) Modeling of rock cutting using distinct element methods. Kansas State University.

[15] Lei, S., & Kaitkay, P. (2002). Micromechanical modeling of rock cutting under pressure boundary conditions using distinct element method. TECHNICAL PAPERS-SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS-ALL SERIES.

[16] Tannant, D. D., & Wang, C. (2002). Thin rock support liners modeled with particle flow code. Discrete element methods: Numerical modeling of discontinua, pp. 346-352.

[17] Deisman, N., Mas Ivars, D., Darcel, C., & Chalaturnyk, R. J. (2010). Empirical and numerical approaches for geomechanical characterization of coal seam reservoirs. *International Journal of Coal Geology*, 82, 3, 204-212, doi:<https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.11.003>.

[18] Mas Ivars, D., Pierce, M. E., Darcel, C., Reyes-Montes, J., Potyondy, D. O., Paul Young, R., et al. (2011). The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 4, 2, 219-244, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.11.014>.

[19] Asadi, M. S., Rasouli, V., & Barla, G. (2012). A Bonded Particle Model Simulation of Shear Strength and Asperity Degradation for Rough Rock Fractures. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45, 5, 649-675. doi:10.1007/s00603-012-0231-4.

[20] Bahaaddini, M., Hagan, P., Mitra, R., & Hebblewhite, B. (2013a). Numerical investigation of asperity degradation in the direct shear test of rock joints.

## علائم

$\sigma_{ci}$ : آستانه‌ی شروع ترک‌ها

$\sigma_{cd}$ : ترک‌های مخرب

## مراجع

[1] Chen, Chao-Shi, Ernian Pan, and Bernard Amadei. 1998. "Determination of Deformability and Tensile Strength of Anisotropic Rock Using Brazilian Tests." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 35 (1): 43-61.

[2] Ghiasvand, Sadrollah. 2006. "Anisotropy of mechanical behavior in rocks". 10th Symposium of Geological Society of Iran. Tehran (in Persian).

[3] LEE, S.-E., CHO, S.-H., SEO, Y.-S., YANG, H.-S., & PARK, H.-M. (2001). The effect of microcracks on the mechanical anisotropy of granite. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 50(3Appendix), 7-13.

[4] Cai, M., & Kaiser, P. (2004). Numerical simulation of the Brazilian test and the tensile strength of anisotropic rocks and rocks with pre-existing cracks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 478-483.

[5] Dan, D. Q., Konietzky, H., & Herbst, M. (2013). Brazilian tensile strength tests on some anisotropic rocks. *International journal of rock mechanics and mining sciences* (1997), 58, 1-7.

[6] Noorian Bidgoli, M., & Jing, L. (2014). Anisotropy of strength and deformability of fractured rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), 156-164. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.01.009>.

[7] Ismael, M. A., Imam, H. F., & El-Shayeb, Y. (2014). A simplified approach to directly consider intact rock anisotropy in Hoek-Brown failure criterion. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(5), 486-492.

[8] Wang, P., Cai, M., & Ren, F. (2018). Anisotropy and directionality of tensile behaviours of a jointed rock mass subjected to numerical Brazilian tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73, 139-153.

[9] Fahimifar, A., Soroush, H. (2001). *Rock Mechanics Tests, Theoretical Foundations and Standards*, Publications of Soil Technical and Mechanical Laboratories Company, First Edition, Volume 1. (In Persian)

- [24] Jiang, M., Liao, Y., Wang, H., & Sun, Y. (2018). Distinct element method analysis of jointed rock fragmentation induced by TBM cutting. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22, sup1, s79-s98. doi:10.1080/19648189.2017.1385540.
- [25] Yang, S. Q., & Huang, Y.-H. (2018). Failure behaviour of rock-like materials containing two pre-existing unparallel flaws: an insight from particle flow modeling. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22, sup1, s57-s78. doi:10.1080/19648189.2017.1366954.
- [26] Bahaaddini, M., Sheikhpourkhani, A. M., & Mansouri, H. (2019). Flat-joint model to reproduce the mechanical behaviour of intact rocks. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-2. Eurock. Edited by M. Kwasniewski and D. Lydzba. Taylor & Francis Group, Poland, 391-397.
- [21] Bahaaddini, M., Hagan, P. C., Mitra, R., & Hebblewhite, B. K. (2014). Scale effect on the shear behaviour of rock joints based on a numerical study. *Engineering Geology*, 181, 212-223. doi:https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.018.
- [22] Bahaaddini, M., Hagan, P., Mitra, R., & Hebblewhite, B. K. (2016). Numerical Study of the Mechanical Behavior of Nonpersistent Jointed Rock Masses. *International Journal of Geomechanics*, 16, 1, 04015035. doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000510.
- [23] Bahaaddini, M. (2017). Effect of Boundary Condition on the Shear Behaviour of Rock Joints in the Direct Shear Test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 5, 1141-1155. doi:10.1007/s00603-016-1157-z.

---

<sup>1</sup>Muller

<sup>2</sup>Inherent

<sup>3</sup>Induced

<sup>4</sup>Initiation crack

<sup>5</sup>Destructive crack

<sup>6</sup>Number of cracks