

مطالعه و تحلیل فرآیند شکست سنگ توف بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی و مدلسازی عددی سه‌بعدی

حسین نیک نفس^۱، حسین جلالی فر^{۲*}

۱- کارشناس ارشد استخراج معدن، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استاد، بخش مهندسی نفت، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: خرداد ۱۳۹۴، پذیرش: تیر ۱۳۹۶)

چکیده

فرآیند شکست بسته به شرایط تنش و جنس سنگ، متفاوت است و این موضوع در پایداری سازه‌ها اهمیت زیادی دارد. یکی از تکنیک‌های بررسی فرآیند شکست انجام آزمایش سه محوره است. در این تحقیق هدف به دست آوردن راستا و فرآیند شکست نمونه‌های سنگ توف ریولیتی در شرایط تنش‌های جانبی متفاوت در آزمایشگاه و سپس مطالعه جزئیات فرآیند شکست در مدل عددی ساخته شده با روش تفاضل محدود سه‌بعدی است. راستا و نحوه شکست سنگ در آزمایشگاه، تحت تأثیر تنش‌های همه جانبه مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که با افزایش تنش جانبی، زاویه شکست از حالت قائم به مایل تغییر می‌کند. سپس مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی کالیبره گردید و در مدل عددی، جزئیات فرآیند شکست که در آزمایشگاه قابل مشاهده نیست، تجزیه و تحلیل شد. بررسی‌ها نشان داد راستای گسیختگی و جزئیات فرآیند شکست، از تجمع کرنش‌های پلاستیک در مرکز نمونه شروع شده و تا تبدیل شدن به صفحه گسیختگی برشی ادامه می‌یابد. هم‌چنین مدل عددی با دقت بسیار بالا با آزمایش‌های آزمایشگاهی تطابق نشان داد.

کلید واژه‌ها

فرآیند شکست، فشار همه جانبه، آزمایش سه محوره، روش تفاضل محدود سه‌بعدی، مدلسازی عددی

* عهده دار مکاتبات: jalalyfar@yahoo.com

۱- مقدمه

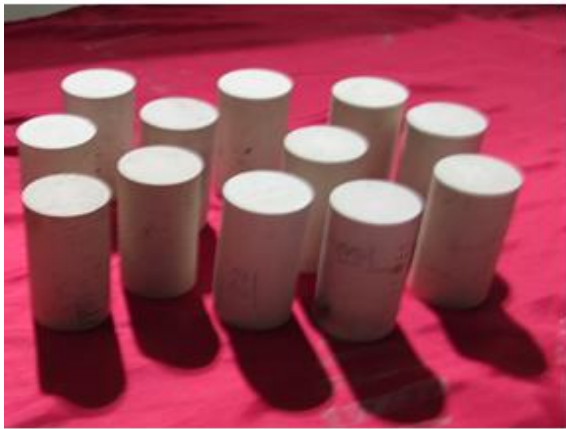
آزمایش‌ها نشان داد که شکست شکافی ایجاد شده در شرایط فشار دو محوره، به طور محسوسی با شرایط فشار تک‌محوره متفاوت است. این موضوع نشان داد که وجود تنش فشاری متوسط، فرآیند رشد ترک‌ها را به طور بنیادی تغییر می‌دهد [۱۳-۲۱].

مطالعات عددی انجام شده نشان می‌دهد که راستای صفحه ی گسیختگی برشی با افزایش تنش جانبی، به سمت وجوه نمونه متمایل می‌شود. رشد ترک‌ها در مراحل ابتدایی بارگذاری به صورت کششی در نمونه ظاهر شده و سپس با افزایش تنش‌های جانبی و محوری به صورت ترک‌های برشی توسعه یافته و به هم می‌پیوندند و صفحه‌ی برش نهایی را تشکیل می‌دهند [۲۲]. هم‌چنین با افزایش تنش جانبی آستانه‌ی مقاومت سنگ افزایش می‌یابد [۲۳-۲۶، ۸، ۱۸]. هم‌چنین مطالعات عددی نشان داد که وقوع شکست شکافی تنها به هندسه‌ی ترک‌ها وابسته نیست بلکه به شرایط تنش خارجی نیز در ایجاد این شکست مؤثر است [۲۷، ۲۸، ۲۰]. برخی مطالعات تحلیلی نیز همین مسئله را تأیید کردند [۲۹]. هم‌چنین در مطالعات انجام شده تأثیر فشار همه‌جانبه و زاویه‌ی صفحه‌ی شکستگی بررسی شده است اما این توصیف دقیقی از تأثیر تنش‌های جانبی بر فرآیند رشد و گسترش ترک‌ها در سنگ نیست. در این مطالعات تحلیل گسترش ترک‌ها تحت فشار دو محوره در مواد شبه سنگی بررسی شد و با استفاده از مدل‌سازی عددی، نمونه‌های استوانه‌ای تحت تنش‌های فشاری دو محوره مختلف قرار گرفت و نتیجه گرفته شد که ترک‌های اولیه در جهت تنش اصلی گسترش یافته و ترک‌های ثانویه که ترکیبی از فرآیند برشی و کششی هستند وابسته به تنش‌های جانبی است [۳۳، ۳۴]. برخی مطالعات، با حل عددی مسائل عددی و مقایسه با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی مشاهده کردند که به هم پیوستن و گسترش ترک‌ها با دو فرآیند کششی و برشی در سنگ و مواد شبه سنگی اتفاق می‌افتد که می‌توان آن‌ها را بر اساس نوع ترک و زمان ایجاد به دو نوع ترک‌های اولیه و ثانویه تقسیم کرد. هم‌چنین بسته به شرایط بارگذاری میزان گسترش و ایجاد این ترک‌ها متفاوت است [۳۵، ۳۶]. در این تحقیق هدف به دست آوردن راستا و زاویه‌ی شکست در تنش‌های جانبی متفاوت، تأثیر تنش جانبی بر منحنی تنش- کرنش، ترسیم پوش موهر گسیختگی سنگ،

با توجه به افزایش روزافزون تولیدات معدنی، نیاز به گسترش و عمیق‌تر شدن معادن امری اجتناب‌ناپذیر است. با عمیق‌تر شدن معادن بحث پایداری اهمیت بیشتری پیدا کرده و هم‌چنین با توسعه راه‌ها نیاز به احداث تونل‌ها افزایش یافته است. با پیشرفت صنعت نفت نیاز به حفاری چاه‌ها و احداث مغارهای زیرزمینی برای استخراج و ذخیره‌سازی نفت و گاز گسترش پیدا کرده است. تمامی این سازه‌ها در سنگ احداث شده و شناخت مباحث مکانیک سنگ در ارتباط با پایداری این سازه‌ها بسیار با اهمیت است. یکی از اصلی‌ترین مباحث مکانیک سنگ که نقش بسزایی در پایداری سازه‌ها دارد، فرآیند شکست سنگ است. از آنجاکه این سازه‌ها در عمق زمین قرار دارند و رفتار گسیختگی سنگ تحت شرایط گوناگون تنش متفاوت است، شناخت فرآیند شکست سنگ در شرایط تنش‌های سه‌محوره می‌تواند تصویر بهتری از رفتار سنگ در شرایط واقعی ارائه دهد [۱، ۲]. زمانی که توزیع و اغتشاش تنش یک عدم تعادل در توده سنگ به وجود می‌آورد، شکست سنگ به وسیله‌ی توزیع و به هم پیوستن میکروترک‌ها، اتفاق می‌افتد. هنوز در مورد این که واقعاً سنگ‌ها چگونه گسیخته می‌شوند و چگونه ترک‌ها شروع و چطور گسترش و پخش می‌یابند ابهاماتی وجود دارد. بنابراین مدل‌های پیش‌بینی شکست سنگ‌ها خیلی پیچیده بوده و نمی‌توان با مدل‌های ساده، شکست سنگ‌ها را پیش‌بینی کرد [۳-۷]. بنابراین مطالعات بنیادی برای ارزیابی فرآیندهای شکست و آسیب سنگ در مراحل مختلف تنش نیاز است. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی فرآیند شکست سنگ و توسعه‌ی ترک‌ها در شرایط تنش سه‌محوره، ترک‌های برشی حدود ۶۰ درصد مجموع ترک‌ها را مستقل از فشار جانبی تشکیل می‌دهند. اما با افزایش فشار جانبی، نسبت جمعی حجم ترک‌ها نیز افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش فشار جانبی فرآیند شکست برشی غالب‌تر می‌شود [۸-۱۰]. هم‌چنین مشخص شد که مقاومت ماکزیمم و نحوه شکست فقط به هندسه ترک وابسته نیست بلکه به فشار همه‌جانبه نیز بستگی دارد [۱۱، ۱۲].

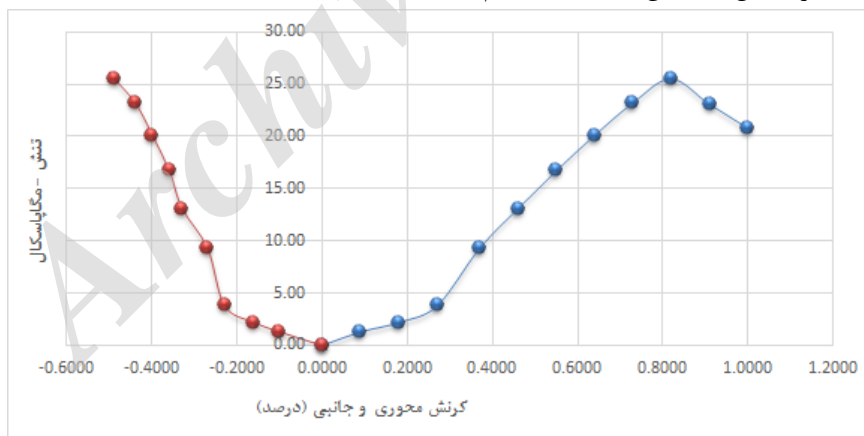
هم‌چنین مطالعات آزمایشگاهی گسترده‌ای بر روی فرآیند شکست شکافی انجام شده است بطوریکه نتایج

گرفت. در این آزمایش‌ها مقاومت و فرآیند شکست سنگ در شرایط تک‌محوره بررسی شد.



شکل ۱: نمونه مغزه تهیه شده در آزمایشگاه

نحوه شکست سنگ در حالت تک‌محوره در راستای موازی با تنش محوری و به صورت شکافی (splitting) است [۳۰]. در شکل ۲ نمودارهای تنش-کرنش محوری و تنش-کرنش جانبی نمونه‌ی سنگ توف ریولیتی نشان داده شده است. با توجه به شکل با استفاده از کرنش جانبی و محوری به دست آمده ضریب پواسون برابر 0.28 و متوسط مقدار 6 گیگاپاسکال به عنوان مدول الاستیسیته‌ی معرف سنگ در نظر گرفته شد.



شکل ۲: نمودار تنش کرنش نمونه سنگ توف ریولیتی

همه جانبه ۳، ۶، ۸، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مگاپاسکال انجام شد. با افزایش فشار جانبی میزان مقاومت نمونه‌ها افزایش پیدا کرد. هم‌چنین زاویه‌ی شکست نمونه‌ها بررسی شد. با افزایش فشار جانبی، زاویه‌ی صفحه‌ی شکست نسبت به تنش اصلی حداکثر افزایش پیدا کرد و در واقع از حالت ترک عمودی به شکل مایل درآمد (شکل ۳). زاویه‌ی صفحه شکست نسبت به راستای تنش اصلی حداکثر اندازه‌گیری

مطالعه‌ی جزئیات مراحل شکست در مدل عددی، بررسی فرآیند شکست در مدل عددی و آزمایشگاهی و در نهایت شناخت رفتار سنگ در تنش‌های جانبی متفاوت و ساخت یک مدل عددی کالیبره شده با داده‌های آزمایشگاهی برای پیش‌بینی رفتار سنگ است.

۲- آزمایش‌های آزمایشگاهی فشاری توف ریولیتی

خواص مکانیکی سنگ‌ها بستگی به اندرکنش بین بلورها، ذرات و مواد سیمانی بین آن‌ها دارد. برای تعیین خواص مکانیکی سنگ‌ها بایستی نمونه‌هایی به صورت مغزه از سنگ تهیه شود و آزمایش‌های مختلف مطابق با استانداردهای مکانیک سنگ (ISRM) انجام گیرد تا بتوان رفتار واقعی سنگ‌ها را پیش‌بینی نمود [۳]. در این تحقیق، آزمایش‌های سه محوره و تک‌محوره بر روی نمونه‌های سنگی از جنس توف ریولیتی انجام می‌شود. نمودارهای تنش کرنش مربوط رسم شده و فرآیند شکست سنگ در فشارهای جانبی متفاوت ارزیابی می‌شود.

۲-۱- آزمایش‌های تک‌محوره

آزمایش‌های تک‌محوره بر روی شش نمونه سنگ از جنس توف ریولیتی که در شکل ۱ نشان داده شده، انجام

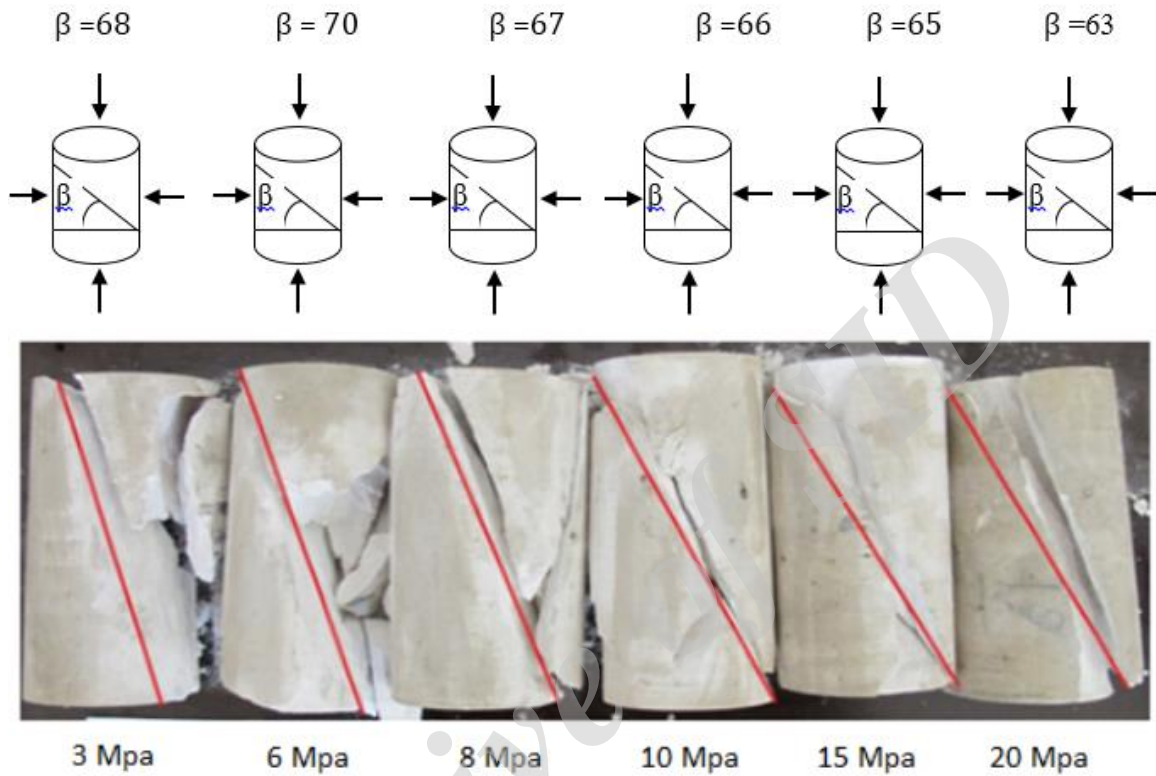
با استفاده از ضریب پواسون و مدول الاستیسیته مقادیر مدول برشی به ترتیب $2/34$ و مدول حجمی $4/54$ گیگاپاسکال محاسبه گردید.

۲-۲- آزمایش سه محوره

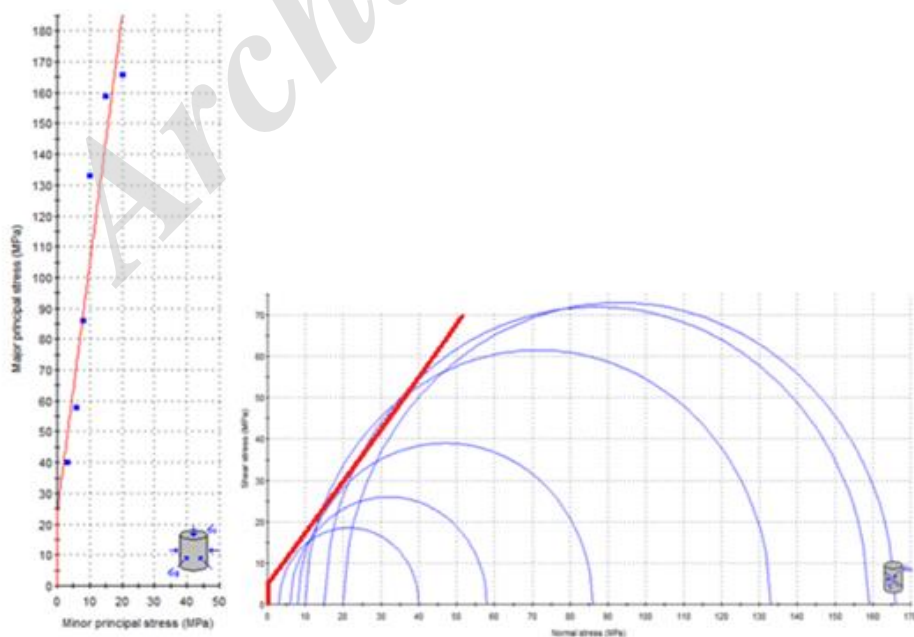
پس از تهیه نمونه‌های سه محوره به ابعاد 110×54 میلی‌متر، آزمایش‌های آزمایشگاهی سه محوره در فشارهای

۵۱ درجه به دست آمد (شکل ۴). هم چنین مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره با استفاده از منحنی پوش شکست، حدود ۲۴ مگاپاسکال به دست آمد. این مقدار بعد از انجام آزمایش‌های تک‌محوره به طور میانگین حدود ۲۵/۵ مگاپاسکال به دست آمد.

شده است که از چپ به راست به ترتیب ۶۸، ۶۷، ۷۰، ۶۸، ۶۶، ۶۵ و ۶۳ درجه است. همان‌طور که از این زوایا مشخص است با افزایش تنش جانبی زاویه صفحه شکست مایل‌تر شده است. با رسم پوش موهر به وسیله داده‌های سه‌محوره مقدار چسبندگی ۴/۲ و مگاپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی



شکل ۳: زاویه شکست نمونه‌های سنگ توف ریولیتی در فشارهای همه جانبه متفاوت



شکل ۴: رسم پوش موهر و به دست آوردن چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی

تک‌محوره‌ی به دست آمده در آزمایشگاه (۲۵ مگاپاسکال) اختلاف ناچیزی نشان داد. هم‌چنین به دلیل ضریب همبستگی خطی $R^2=0.88$ رفتار سنگ با معیار موهر-کولمب تطابق بالایی دارد.

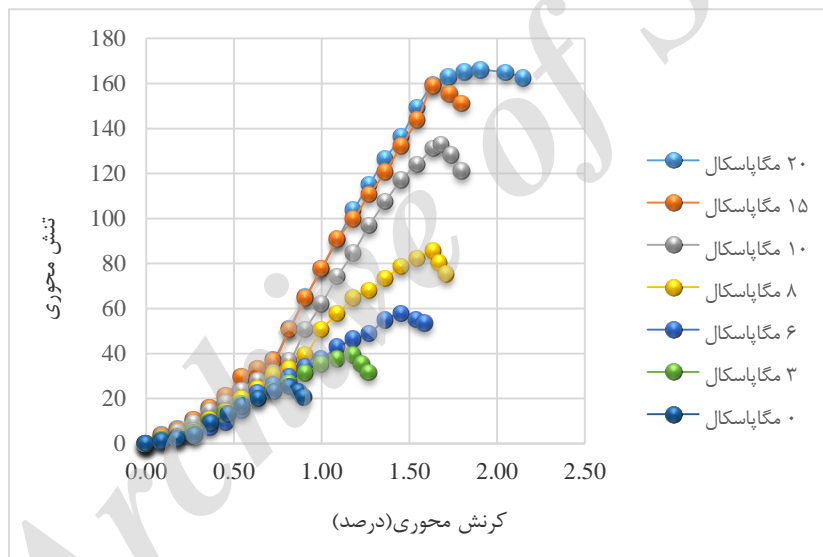
جدول ۱: تغییرات زاویه صفحه شکست و تنش بیشینه نسبت به تنش‌های جانبی

تنش جانبی (مگاپاسکال)	تنش بیشینه (مگاپاسکال)	زاویه صفحه شکست (درجه)
۳	۳۹	۶۸
۶	۵۸	۷۰
۸	۸۷	۶۷
۱۰	۱۳۳	۶۶
۱۵	۱۵۹	۶۵
۲۰	۱۶۶	۶۳

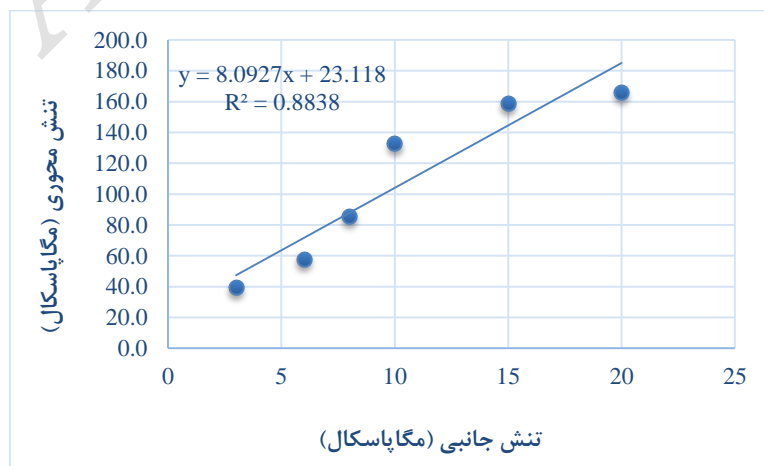
جدول شماره ۱ زاویه صفحه شکست و مقاومت بیشینه نمونه‌های ریولیتی را در فشارهای جانبی متفاوت نشان می‌دهد. با افزایش تنش جانبی مقدار مقاومت بیشینه افزایش یافته و زاویه صفحه شکست نسبت به تنش جانبی کاهش یافته است.

در این قسمت نمودار تنش- کرنش سنگ در فشارهای جانبی متفاوت رسم شده است (شکل ۵). همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تنش جانبی مقاومت سنگ افزایش داشته است.

در شکل ۶ گراف تنش محوری در برابر تنش جانبی برای شش آزمایش انجام شده ترسیم شده است. با مقایسه‌ی معادله‌ی خط رگرسیون در شکل ۶ با رابطه‌ی ۱، طبق معیار موهر-کولمب مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_c) برابر $23/2$ مگاپاسکال به دست آمده است که با مقدار مقاومت



شکل ۵: نمودار تنش-کرنش سنگ در تنش‌های جانبی متفاوت



شکل ۶: نمودار تنش جانبی در برابر محوری برای ۶ نمونه سنگ آزمایش شده

بودن شرایط مدل و سابقه‌ی طولانی و موفق روش‌های تفاضل محدود در تحلیل تنش و جابجایی و مکانیک تغییر شکل یافتن اجسام [۳۲] و همچنین شبیه‌سازی مدل‌های آزمایشگاهی و رفتار گسیختگی سنگ، این نرم‌افزار برای مدلسازی سه‌بعدی فرآیند شکست سنگ مورد استفاده قرار گرفت. پس از انجام آزمایش‌های تک‌محوره و سه‌محوره بر روی نمونه‌های سنگ ریولیت در آزمایشگاه و مشخص کردن پارامترهای مقاومتی سنگ، از این پارامترها برای ساختن مدل عددی استفاده شد. در جدول ۲ خصوصیات مدل نشان داده شده است.

در این مدلسازی محور قائم مدل در راستای محور Y و کف مدل در مبدأ مختصات قرار داده شد. در شکل ۷ هندسه‌ی مدل در محیط نرم‌افزار FLAC3D نشان داده شده است.

جدول ۲: خصوصیات مدل عددی

ابعاد مدل (میلی‌متر)	زاویه اصطکاک داخلی	چسبندگی (مگا پاسکال)	مدول برشی (گیگا پاسکال)	مدول حجمی (گیگا پاسکال)	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۱۱۰×۵۴	۵۱	۴/۲	۲/۳۴	۴/۵۴	۲/۱۴

این شکل که اجازه‌ی هیچ‌گونه جابجایی در راستاهای مختلف (x, y, z) را نخواهد داشت. بار محوری به صورت نرخ سرعت در جهت منفی (فشاری) به بالای نمونه اعمال شد. تنش جانبی به صورت گرادیان تنش متناسب با نرخ بار محوری به شکل فشاری (منفی) به مدل اعمال گردید. تنش جانبی تا رسیدن به مقدار مورد نظر، به صورت گرادیان تنش متناسب با نرخ بار محوری به شکل فشاری (منفی) افزایش یافت و تا انتهای بارگذاری و گسیختگی مدل ثابت باقی ماند. در شکل ۸ شرایط مرزی اعمال شده به مدل نشان داده شده است.

۳-۱- کالیبراسیون

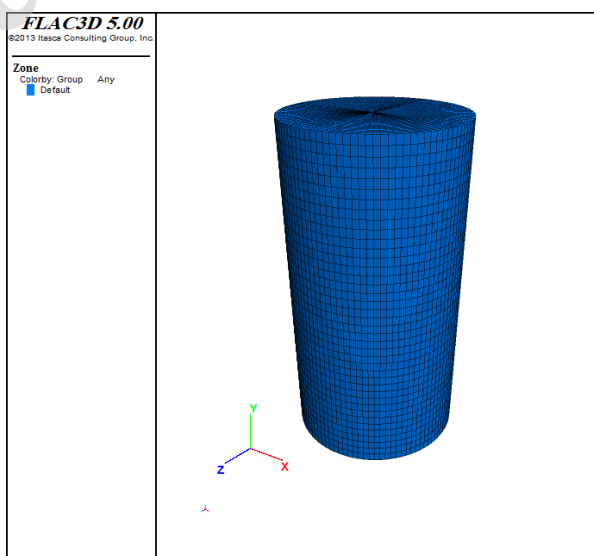
پس از ساخت مدل عددی اولیه برای مشاهده‌ی نتایج صحیح و دقیق باید آن را با شرایط آزمایشگاهی کالیبره کرد. در این تحقیق با مشاهده‌ی صفحه‌ی شکست نهایی و میزان مقاومت ماکزیمم در مدل عددی و نمونه‌ی آزمایشگاهی مدل کالیبره گردید. مراحل انجام کالیبراسیون به صورت زیر انجام گرفت. این مراحل تا زمانی ادامه می‌یابد

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \cdot q \quad (1)$$

در رابطه ۱ تنش اصلی حداکثر، σ_c مقاومت فشاری تک‌محوره، σ_3 تنش اصلی حداقل و $q = \tan^2 \beta$ است که در آن β زاویه راستای شکستگی با محور افقی است.

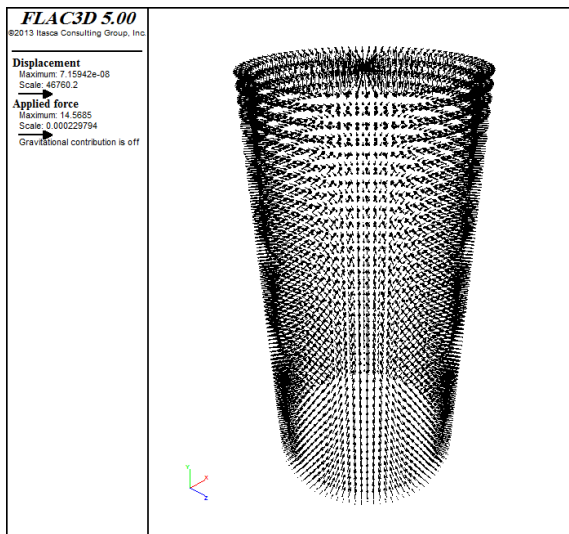
۳- مدلسازی عددی

نرم‌افزار FLAC3D یک برنامه کامپیوتری به روش تفاضل محدود صریح است. از ویژگی‌های این نرم‌افزار این است که به مدلسازی رفتارهای مرتبط به خاک و سنگ و دیگر موادی که در حالت جریان پلاستیک قرار می‌گیرند و زمانی که به حد تسلیم خود می‌رسند را دارا است و همچنین توانایی مدل کردن رفتارهای خطی و غیرخطی را بر اساس قانون تنش- کرنش دارد [۳۱]. با توجه به پیوسته



شکل ۷: هندسه‌ی مدل ساخته شده در نرم‌افزار FLAC3D

همچنین شرایط مرزی مشابه با نمونه‌ی آزمایشگاهی مدلسازی شد. منظور از شرایط مرزی، راستا و نرخ اعمال بار محوری و جانبی و مشخص کردن محدودیت‌های جابجایی برای مرزهای تعریف شده در مدل عددی است. در این مدلسازی مبدأ کف مدل به عنوان مرز ثابت قرار داده شد به



شکل ۸: شرایط مرزی اعمال شده در مدل عددی

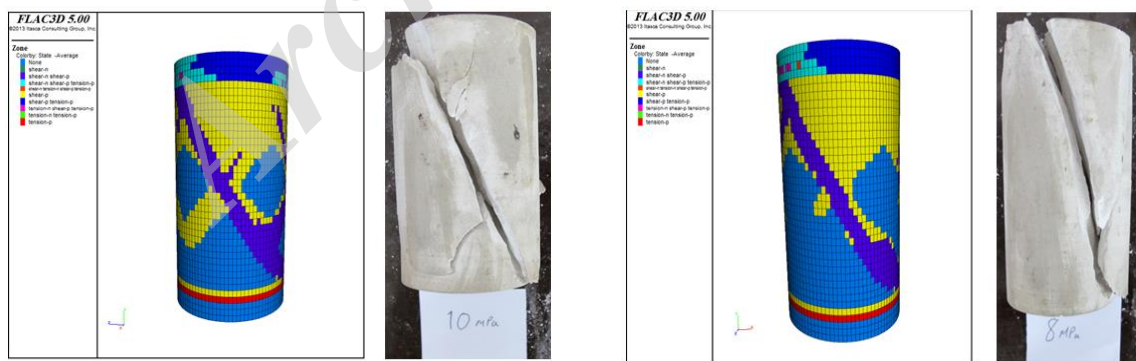
که راستای صفحه‌ی گسیختگی نهایی و مقاومت ماکزیمم ایجاد شده در نمونه‌ی آزمایشگاهی، در مدل عددی مشاهده گردد.

۱. تغییر اندازه‌ی مش‌بندی در راستای طولی و عرضی مدل
۲. تغییر نرخ سرعت اعمال شده به بالای نمونه (بارمحوری)

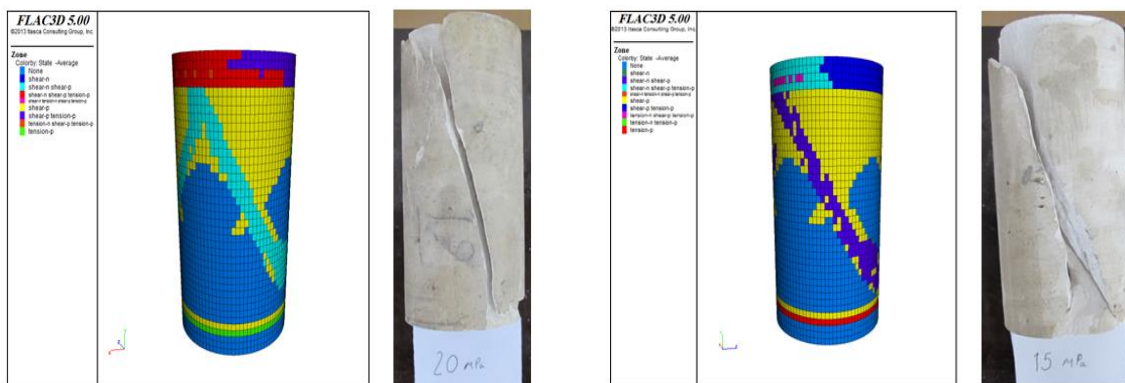
۳. تغییر نرخ بار جانبی متناسب با بار محوری پس از انجام مراحل ذکر شده، راستای صفحه‌ی گسیختگی و مقاومت نهایی مشابه با نمونه‌ی آزمایشگاهی در مدل مشاهده گردید. نرخ تنش محوری کالیبره شده 0.05 مگاپاسکال بر گام به دست آمد. در شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و راستای گسیختگی مدل بعد از کالیبره شدن در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی نشان داده شده است.



شکل ۹: راستای گسیختگی نهایی در تنش جانبی ۶ مگاپاسکال (سمت راست) و ۳ مگاپاسکال (سمت چپ)



شکل ۱۰: راستای گسیختگی نهایی در تنش جانبی ۱۰ مگاپاسکال (سمت راست) و ۸ مگاپاسکال (سمت چپ)



شکل ۱۱: راستای گسیختگی نهایی در تنش جانبی ۱۵ مگاپاسکال (سمت راست) و ۲۰ مگاپاسکال (سمت چپ)

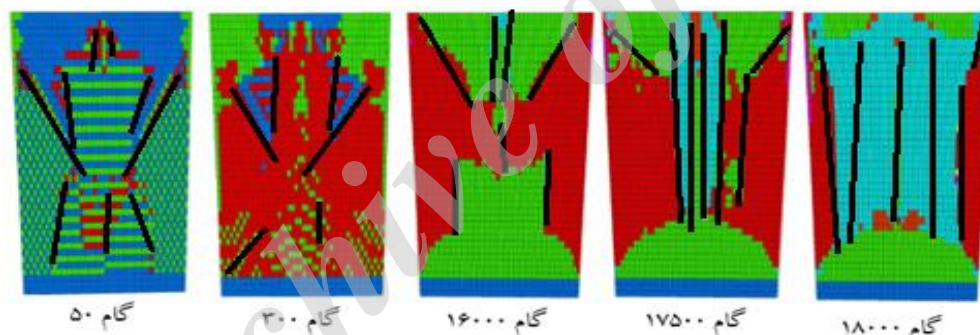
گسترش نواحی فعال کششی در مراحل بارگذاری مختلف نشان داده شده است.

۳-۳-۳- مدل‌سازی عددی آزمایش سه محوره

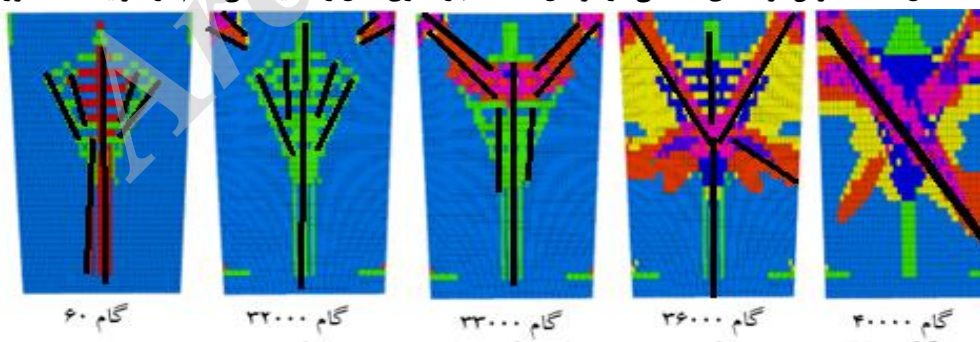
در شکل‌های ۱۳ تا ۱۸ گسترش ترک‌های کششی و برشی در گام‌های بارگذاری مختلف تا گسیختگی نهایی مدل و در تنش‌های جانبی متفاوت نشان داده شده است.

۳-۲- مدل‌سازی عددی آزمایش تک‌محوره

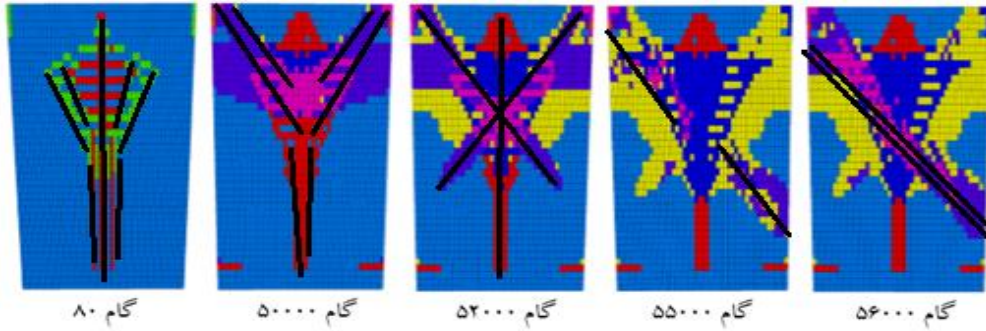
در ابتدای بارگذاری، کرنش‌های پلاستیک کششی در مرکز مدل ایجاد می‌شود. در مراحل بعدی این کرنش‌ها از گوشه‌های مدل به سمت مرکز توسعه پیدا کرده و تجمع آن‌ها در مرکز در مراحل پایانی بارگذاری، منجر به گسیختگی قائم (splitting) در مدل می‌شود. در شکل ۱۲



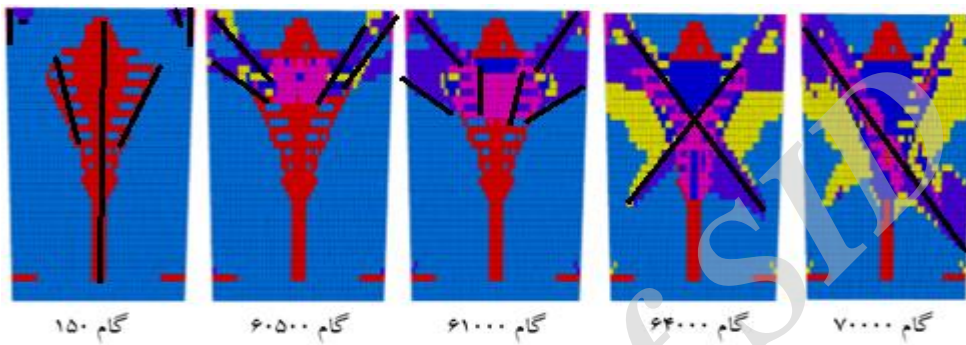
شکل ۱۲: گسترش ترک‌های کششی در مراحل مختلف بارگذاری مدل و گسیختگی قائم در شرایط تک‌محوره



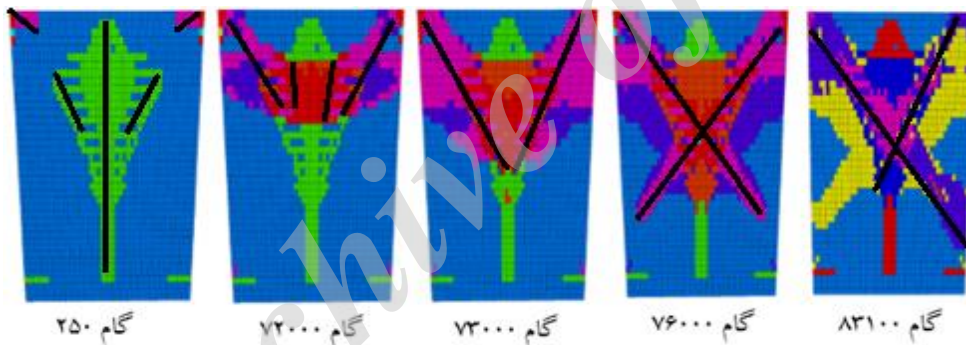
شکل ۱۳: گسترش کرنش‌های برشی و کششی (نواحی فعال تسلیم) در طی مراحل بارگذاری تحت تنش جانبی ۳ مگاپاسکال



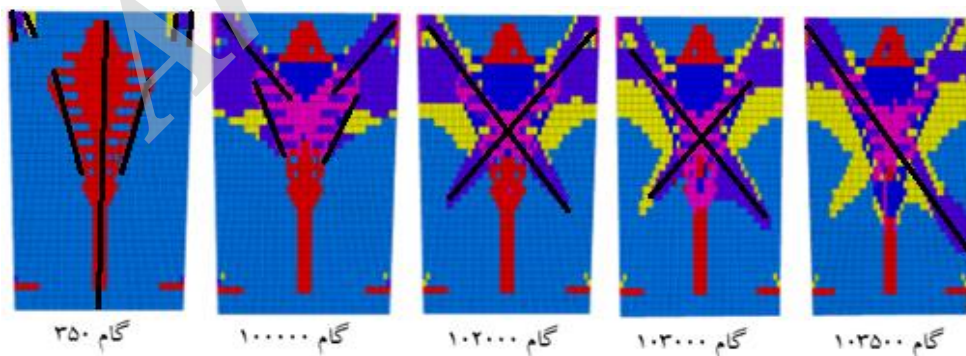
شکل ۱۴: گسترش کرنش‌های برشی در طی مراحل بارگذاری تحت تنش جانبی ۶ مگاپاسکال



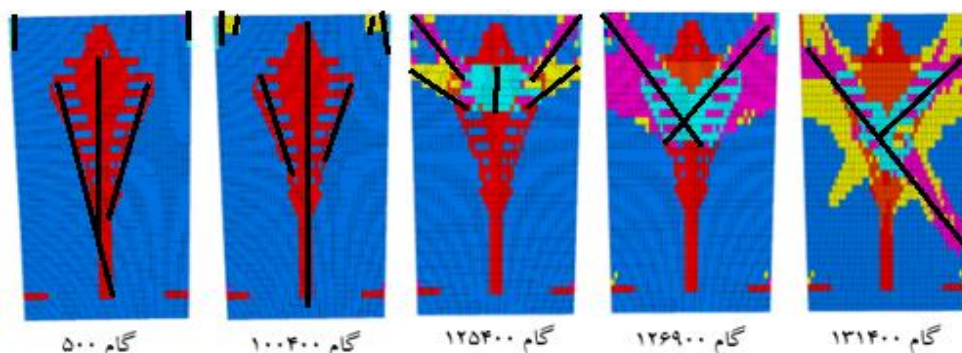
شکل ۱۵: گسترش کرنش‌های برشی در طی مراحل بارگذاری تحت تنش جانبی ۸ مگاپاسکال



شکل ۱۶: گسترش کرنش‌های برشی در طی مراحل بارگذاری تحت تنش جانبی ۱۰ مگاپاسکال



شکل ۱۷: گسترش کرنش‌های برشی در طی مراحل بارگذاری تحت تنش جانبی ۱۵ مگاپاسکال

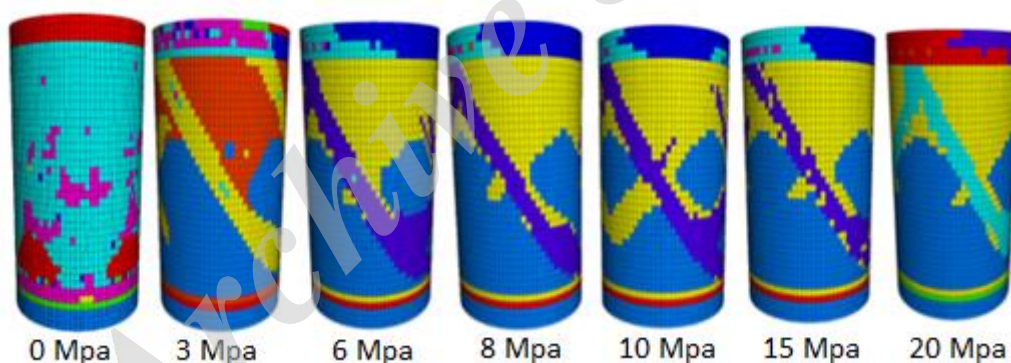


شکل ۱۸: گسترش کرنش‌های برشی در طی مراحل بارگذاری تحت تنش جانبی ۲۰ مگاپاسکال

برشی می‌شود. هم‌چنین زاویه‌ی این صفحه با افزایش فشار جانبی، مایل‌تر شده و نسبت به راستای تنش اصلی حداکثر، زاویه‌ی بیشتری پیدا می‌کند. هم‌چنین با افزایش تنش جانبی، شروع کرنش‌های پلاستیک در تنش‌های بالاتری اتفاق افتاده و دیرتر در نمونه تشکیل می‌شوند که خود حاکی از افزایش مقاومت نمونه با افزایش فشارهای جانبی است. در شکل ۱۹ مرحله‌ی گسیختگی نهایی مدل‌های ساخته شده در تنش‌های جانبی متفاوت در حالت سه‌بعدی نشان داده شده است.

۳-۴- نتایج مدل‌سازی عددی فرآیند شکست نمونه‌های استوانه‌ای

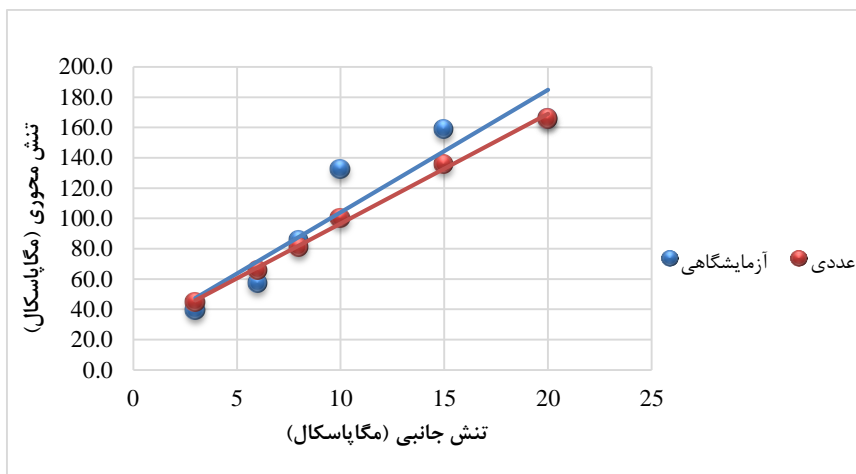
در فشار جانبی صفر (حالت تک‌محوره)، با افزایش مراحل بارگذاری نواحی فعال کششی (ترک‌های کششی) افزایش یافت. در این حالت ترک‌های کششی که در راستای محور مدل ایجاد شد، فرآیند گسیختگی قائم (splitting) را ایجاد کرد و نهایتاً نمونه را به سمت گسیختگی سوق داد. با افزایش فشار جانبی گسترش نواحی فعال برشی (ترک‌های برشی) در مدل، باعث ایجاد صفحه‌ی شکست



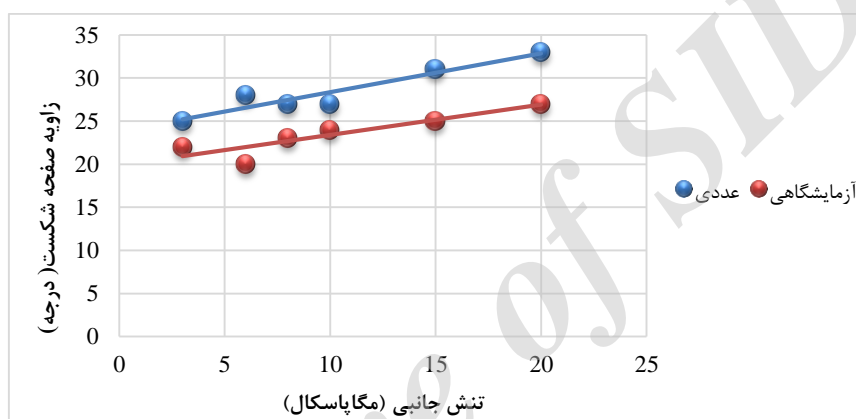
شکل ۱۹: راستای صفحه‌ی گسیختگی نهایی در تنش‌های جانبی مختلف

در شکل ۲۱ تأثیر تنش جانبی بر زاویه‌ی صفحه‌ی شکست در نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل عددی نشان داده است. زاویه‌ی صفحه‌ی شکست در هر دو حالت عددی و آزمایشگاهی با افزایش تنش جانبی کاهش می‌یابد.

در شکل ۲۰ مقایسه تأثیر تنش جانبی بر مقاومت سنگ در نمونه‌ی آزمایشگاهی و مدل عددی نشان داده شده است. در هر دو حالت با افزایش تنش جانبی، مقاومت سنگ افزایش یافت.



شکل ۲۰: مقایسه‌ی مقادیر مقاومت سنگ در مدل عددی و آزمایشگاهی تحت تنش‌های جانبی متفاوت



شکل ۲۱: مقایسه‌ی مقادیر زاویه‌ی شکست در مدل عددی و آزمایشگاهی تحت تنش‌های جانبی متفاوت

۴- بحث

صفحه‌ی شکست و مقاومت نهایی مشابه با نمونه‌ی آزمایشگاهی در مدل عددی مشاهده شود. پس از کالیبره کردن مدل جزئیات مراحل شکست به دقت بررسی شد. در مدل عددی ساخته شده با افزایش تنش جانبی، زاویه‌ی صفحه‌ی شکست نسبت به راستای تنش اصلی افزایش یافت. کرنش‌های پلاستیک کششی در ابتدای بارگذاری در مرکز نمونه ایجاد شدند. با افزایش مراحل بارگذاری کرنش‌های پلاستیک برشی از گوشه‌های نمونه شروع شده و به سمت مرکز نمونه ادامه پیدا کردند. این شرایط تا گسیختگی کامل مدل و ایجاد صفحه‌ی شکست برشی ادامه داشت. هم‌چنین با افزایش تنش جانبی، شروع کرنش‌های پلاستیک در تنش‌های بالاتری اتفاق افتاده و دیرتر در نمونه تشکیل می‌شوند. کرنش‌های پلاستیک در ابتدای بارگذاری به صورت کششی در مرکز نمونه ظاهر می‌شوند. در ادامه کرنش‌های برشی از دو گوشه‌ی بالای نمونه شروع شده و به سمت مرکز نمونه گسترش پیدا می‌کنند و این مسیر را تا ایجاد صفحه‌ی گسیختگی برشی ادامه می‌دهند. کرنش‌های

پس از انجام آزمایش‌های تک‌محوره و سه‌محوره بر روی نمونه سنگ‌های ریولیت، نمودار تنش کرنش رسم شد و با استفاده از آن خصوصیات الاستیک سنگ مانند ضریب پواسون، مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی، مدول برشی، مدول حجمی و وزن مخصوص سنگ به دست آمد. با تحلیل نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد که با افزایش تنش جانبی، مقاومت سنگ افزایش می‌یابد و راستای صفحه‌ی گسیختگی نسبت به راستای تنش اصلی حداکثر مایل‌تر شده و زاویه‌ی بیشتری پیدا می‌کند. هم‌چنین مشخص شد که رفتار سنگ با معیار گسیختگی موهر-کولمب تناسب خوبی دارد. برای مدلسازی عددی آزمایش‌های آزمایشگاهی از پارامترهای چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، مدول برشی، مدول حجمی و وزن مخصوص استفاده شد. برای کالیبره کردن مدل، مش بندی و نرخ سرعت اعمال شده به بالای نمونه، تغییر داده شد تا

- [4] J. A. Hudson and J. P. Harrison. 1997. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. Published by Elsevier Science Ltd. 458p.
- [5] B.H.G.Brady, E.T.Brown. 2004. Rock mechanics for underground mining. Springer published. 645p.
- [6] R.E.Goodman. 1989. Introduction to rock mechanics. Second Edition. 289p.
- [7] Lei, X., Funatsu, T., Ma, S., & Liu, L. (2015). A laboratory acoustic emission experiment and numerical simulation of rock fracture driven by a high-pressure fluid source. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- [8] Chang, S. H., & Lee, C. I. (2004). Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(7), 1069-1086.
- [9] Chen, Z. H., Tham, L. G., Yeung, M. R., & Xie, H. (2006). Confinement effects for damage and failure of brittle rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(8), 1262-1269.
- [10] Liu, H. Y., Kou, S. Q., Lindqvist, P. A., & Tang, C. A. (2004). Numerical studies on the failure process and associated microseismicity in rock under triaxial compression. *Tectonophysics*, 384(1), 149-174.
- [11] Yang, S. Q., Jiang, Y. Z., Xu, W. Y., & Chen, X. Q. (2008). Experimental investigation on strength and failure behavior of pre-cracked marble under conventional triaxial compression. *International Journal of Solids and Structures*, 45(17), 4796-4819.
- [12] Yao, C., Jiang, Q. H., Shao, J. F., & Zhou, C. B. (2016). A discrete approach for modeling damage and failure in anisotropic cohesive brittle materials. *Engineering Fracture Mechanics*.
- [13] Horii, H., & Nemat-Nasser, S. (1985). Compression-induced microcrack growth in brittle solids: Axial splitting and shear failure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 90(B4), 3105-3125.
- [14] Bobet, A., & Einstein, H. H. (1998). Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(7), 863-888.
- [15] Wong, R. H. C., Tang, C. A., Chau, K. T., & Lin, P. (2002). Splitting failure in brittle rocks containing pre-existing flaws under uniaxial compression. *Engineering Fracture Mechanics*, 69(17), 1853-1871.
- [16] Wong, R. H. C., Lin, P., & Tang, C. A. (2006). Experimental and numerical study on splitting failure of brittle solids containing single pore under uniaxial compression. *Mechanics of Materials*, 38(1), 142-159.

پلاستیک برشی و کششی به ترتیب به صورت (shear-n) و (tensile-n) در نمونه ایجاد می‌شوند و این کرنش‌ها قادر به ایجاد صفحه‌ی شکست برشی هستند. در واقع به هم پیوستن این کرنش‌ها به صورت پیوسته، صفحه‌ی شکست را در مدل به وجود می‌آورد. صفحه‌ی برش نهایی حاصل به هم پیوستن کرنش‌های برشی (shear-n) است. با افزایش تنش جانبی شروع این کرنش‌ها در گام‌های بالاتری اتفاق می‌افتد و زاویه‌ی صفحه‌ی شکست برشی نسبت به راستای تنش اصلی حداکثر، مایل تر می‌شود. در مدل آزمایشگاهی و عددی با افزایش تنش جانبی، مقاومت سنگ افزایش یافت. هم‌چنین زاویه‌ی صفحه‌ی شکست در هر دو حالت عددی و آزمایشگاهی با افزایش تنش جانبی کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

بررسی نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی عددی نشان داد که فرآیند شکست در حالت تک‌محوره به صورت شکافی است. با افزایش فشار جانبی فرآیند اصلی شکست به شکل برشی است. توسعه و گسترش ریزترک‌ها در سنگ در شرایط تنش‌های گوناگون متفاوت بوده و با افزایش فشار جانبی، ترک‌های برشی در سنگ افزایش یافته و با پیوستن به یکدیگر صفحه‌ی برشی شکست را تشکیل می‌دهند. هم‌چنین مشخص شد که نرم‌افزار *FLAC3D* قادر است، جزئیات مراحل شکست سنگ را نشان دهد و نواحی فعال تسلیم (کرنش‌های پلاستیک) با دقت بالا مدلسازی کند. هم‌چنین این نرم‌افزار توانایی مدلسازی آزمایش‌های آزمایشگاهی را با دقت بالا نشان داد.

مراجع

- [1] Yang, S. Q., Xu, P., & Ranjith, P. G. (2015). Damage model of coal under creep and triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80, 337-345.
- [2] Meng, Q., Han, L., Xiao, Y., Li, H., Wen, S., & Zhang, J. (2016). Numerical simulation study of the failure evolution process and failure mode of surrounding rock in deep soft rock roadways. *International Journal of Mining Science and Technology*.
- [3] Tang, C. A., & Hudson, J. A. (2010). Rock failure mechanisms: explained and illustrated. CRC.

- compression. *Engineering Fracture Mechanics*, 70(13), 1645-1658.
- [29] Zhou, X. P., & Wang, J. H. (2005). Study on the coalescence mechanism of splitting failure of crack-weakened rock subjected to compressive loads. *Mechanics Research Communications*, 32(2), 161-171.
- [30] Fakhimi, A., & Hemami, B. (2015). Axial splitting of rocks under uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, 124-134.
- [31] Itasca Consulting Group Inc. *FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)*, Version 7.0, 2011.
- [32] Unteregger, D., Fuchs, B., & Hofstetter, G. (2015). A damage plasticity model for different types of intact rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80, 402-411.
- [33] Manouchehrian, A., & Marji, M. F. (2012). Numerical analysis of confinement effect on crack propagation mechanism from a flaw in a pre-cracked rock under compression. *Acta Mechanica Sinica*, 28(5), 1389-1397.
- [34] Haeri, H., Khaloo, A., & Marji, M. F. (2015). Experimental and Numerical Simulation of the Microcrack Coalescence Mechanism in Rock-Like Materials. *Strength of Materials*, 47(5), 740-754.
- [35] Haeri, H., Shahriar, K., Marji, M. F., & Moarefvand, P. (2015). A coupled numerical-experimental study of the breakage process of brittle substances. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(2), 809-825.
- [36] Marji, M. F., Gholamnejad, J., & Eghbal, M. (2011). On the crack propagation mechanism of brittle rocks under various loading conditions. In *Proceedings of International Multidisciplinary Scientific Geo. Conference. Bulgaria* (pp. 561-568).
- [17] Ghazvinian, A. H., Fathi, A., & Moradian, Z. A. (2008). Failure behavior of marlrock under triaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(5), 807-814.
- [18] Zhu, W., Yang, W., Li, X., Xiang, L., & Yu, D. (2014). Study on splitting failure in rock masses by simulation test, site monitoring and energy model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, 152-164.
- [19] J.C.Jaeger and N.G.W.Cook. 1979. *Fundamentals of rock mechanics*. Published by Chapman and Hall. Third edition. 539p.
- [20] Arora, S., & Mishra, B. (2015). Investigation of the failure mode of shale rocks in biaxial and triaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 79, 109-123.
- [21] Chemenda, A. I. (2015). Three-dimensional numerical modeling of hydrostatic tests of porous rocks in a triaxial cell. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 76, 33-43.
- [22] Yang, S. Q., Xu, T., He, L., Jing, H. W., Wen, S., & Yu, Q. L. (2015). Numerical study on failure behavior of brittle rock specimen containing pre-existing combined flaws under different confining pressure. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15(4), 1085-1097.
- [23] Golshani, A. and H. Rajabi (2012). "Numerical modeling the effect of confining pressure on fracture pattern brittle rocks in triaxial tests." *Journal Of Omran Modarres*.(11) (In Persian)
- [24] Belheine, N., Plassiard, J. P., Donzé, F. V., Darve, F., & Seridi, A. (2009). Numerical simulation of drained triaxial test using 3D discrete element modeling. *Computers and Geotechnics*, 36(1), 320-331.
- [25] Chen, Z. H., Tham, L. G., Yeung, M. R., & Lee, P. K. K. (2003). Numerical simulation on damage and failure of brittle rocks under different confining pressures. *International Journal of Geomechanics*, 3(2), 266-273.
- [26] Haeri, H., Shahriar, K., Fatehi, M., Moarefvand, P. (2014). "Analysis Of Crack Propagation Mechanism in Rock-Like Specimens Using Displacement Discontinuity Method (DDM)." *Journal Of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 3(5): 38-49 (In Persian).
- [27] Tang, C. A., Wong, R. H. C., Chau, K. T., & Lin, P. (2005). Modeling of compression-induced splitting failure in heterogeneous brittle porous solids. *Engineering fracture mechanics*, 72(4), 597-615.
- [28] Lee, S., & Ravichandran, G. (2003). Crack initiation in brittle solids under multiaxial