

مطالعه شکست درزه‌های ناممتد صفحه‌ای و پلکانی بسته با استفاده از نرم‌افزار PFC2D

محمد جواد آذین فر^{۱*}؛ وهاب سرفرازی^۲؛ آزاده آگاه^۱

۱- عضو هیات علمی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- عضو هیات علمی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

چکیده

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار PFC2D، به مطالعه رفتار برشی درزه‌های ناممتد صفحه‌ای و پلکانی بسته پرداخته شده است. به این منظور مدلی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر در محیط نرم‌افزار ساخته شد. سپس میکروپارامترهای کالیبره شده در مدل اعمال شد. به منظور بررسی تاثیر درزه‌های بسته بر روی مکانیزم شکست، مدل درزه صاف *smooth joint* در نرم‌افزار انتخاب شد. آزمایش‌های برش مستقیم بر روی دو دسته مدل با درزه‌های از پیش ایجاد شده در آنها به صورت هم سطح و پلکانی و تنش عمودی ۰/۱ مگاپاسکال انجام شده است. طول درزه‌های ایجاد شده در مدل‌ها ۲، ۴ و ۶ سانتیمتر و فاصله عمودی بین درزه‌ها در حالت پلکانی ۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که مود شکست و الگوی شکست تابع فاصله‌داری طولی و عرضی درزه‌ها می‌باشد. ابتدا شکست در پل سنگ اتفاق می‌افتد و سپس درزه بسته برش می‌خورد. با افزایش طول درزه مقاومت برشی درزه کاهش می‌یابد. با افزایش زاویه‌داری پل سنگ مقاومت کششی کم می‌شود.

درزه بسته، رفتار برشی، نرم‌افزار عددی PFC2D

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

و در شرایط مختلف بارگذاری انجام شده است. از نمونه تحقیقات پایه در زمینه توسعه ترک در سنگ‌های دارای ترک می‌توان به کارهای بوبت و انیشتین که توسعه ترک در نمونه تحت فشار تک محوری بررسی شده است اشاره کرد [۷].



شکل ۱- الف و ب) گسیختگی پله‌ای در شیب سنگها، ج) به هم پیوستگی ترک‌های از پیش ایجاد شده در یک پایه معدنی [۶]

مطالعات آزمایشگاهی شامل اشکال مختلف ترک‌ها، درک نقش ترک‌های از پیش موجود در سنگ را در گسیختگی آن بیشتر کرده است. شکل‌های اصلی توسعه ترک در شکل ۲ نشان داده شده است.

توده‌های سنگی مواد ناهمگنی هستند که حاوی تعداد زیادی ناپیوستگی بوده و گسیختگی توده‌های سنگی در طبیعت یا پروژه‌های مهندسی اغلب با شروع و رشد ترک‌ها از ناپیوستگی‌ها، خصوصاً در توده سنگ‌هایی که تحت بارهای خارجی مانند آتشیاری، حفاری مکانیزه، شکست هیدرولیکی، حفاری‌های زمین شناسی، انفجار سنگ^۱، زلزله و عواملی از این قبیل قرار دارند، رخ می‌دهد [۱-۵]. بسیاری از حوادث مهندسی مرتبط با شروع، توسعه و بهم پیوستن ترک‌ها در پل‌سنگ‌های بین ترک‌هایی است که از قبل در توده سنگ وجود داشته اند (شکل ۱) [۶].

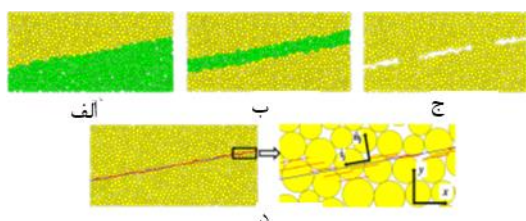
تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بسیاری جهت مطالعه نحوه شروع ترک، توسعه آن و به هم پیوستن ترک‌ها در سنگ، نمونه‌های شبه سنگی^۲ شامل انواع مختلف ترک‌های از پیش اعمال شده در آنها

^۱ - Rock burst

^۲ - Rock-Like materials

در این نرم افزار مواد به صورت دیسک‌ها (2D) و توپ‌های (3D) صلب متصل شده به یکدیگر مدل‌سازی می‌شوند. سه نوع اصلی اتصال بین ذرات وجود دارد: مدل اتصال تماسی (Contact Bond)، مدل اتصال موازی (Parallel Bound) و مدل اتصال مسطح (Flat Joint). در مدل اتصال تماسی، اتصال ذرات به گونه‌ای است که سیمانی بین آنها وجود ندارد و تنها در مقابل نیروهای عمودی و برشی مقاومت می‌کند و در مقابل گشتاور مقاومتی ندارد. در مدل اتصال موازی، طول مشخصی از سیمان در نقطه تماس وجود دارد و اتصال ذرات در مقابل اعمال نیرو و گشتاور مقاومت می‌کند. سختی بزرگ مقیاس مدل متأثر از هر دو سختی اتصال و سیمان است. مدل PB نسبت به CB برای مدل‌سازی محیط‌های سنگی مناسب‌تر است [۲۵]. مدل اتصال FJ ، مشابه PB دارای طولی از سیمان بین ذرات است با این تفاوت که با شکستن اتصال بین ذرات، سیمان هنوز می‌تواند در مقابل گشتاور مقاومت کند [۲۶ و ۲۷]. مدل FJ نسبت به PB ، شبیه‌سازی بهتری را در مقاومت کششی و زاویه اصطکاک برای محیط‌های سنگی ارائه می‌دهد. بنابراین در تحقیق حاضر مدل FJ برای اتصال بین ذرات در نظر گرفته شده است.

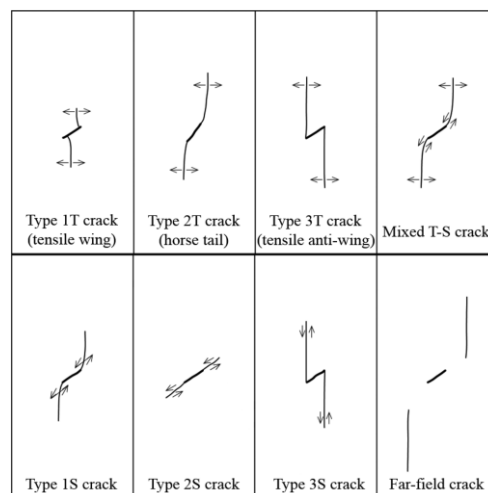
برای شبیه‌سازی ترک اولیه در مدل‌های $PFC2D$ ، در بیشتر تحقیقات انجام شده از سه راه استفاده شده است: الف) ایجاد صفحات درزه با هندسه متفاوت از طریق تغییر خصوصیات بین دیسک‌هایی که در دو طرف درزه قرار می‌گیرند (شکل ۳-الف). ب) ایجاد یک لایه ضعیف، حداقل به عرض سه دیسک (شکل ۳-ب) و ج) حذف نواری از ذرات برای ایجاد درزه‌های باز (شکل ۳-ج). مشکل اصلی روش الف و ب زبری القا شده توسط دیسک‌های با اندازه و ترتیب قرارگیری مختلف است و مشکل روش ج این است که بازشدگی درزه آنقدر زیاد است که امکان شبیه‌سازی درزه بسته وجود ندارد. شرکت $ITASCA$ ، مدلی از درزه را به نام $Smooth Joint$ ارائه نموده است که نواقص روش‌های قبلی را برطرف می‌نماید [۲۸ و ۲۹].



شکل ۳- طبقه بندی انواع ترک‌ها [۲۸]

در مدل درزه SJ ، دیسک‌هایی که توسط این نوع درزه قطع می‌شوند، خصوصیات SJ تعریف شده به آنها اختصاص می‌یابد و دیسک‌ها می‌توانند با توجه به جهت‌داری و ضریب اصطکاک سطح درزه تعریف شده بر روی یکدیگر بلغزند. از طرف دیگر میزان

بر این اساس سه نوع اصلی توسعه ترک در سنگ‌های از پیش درزه-دار وجود دارد: سه نوع ترک کششی، سه نوع ترک برشی و یک نوع ترک ترکیبی کششی و برشی که مبنایی برای تشریح علمی رفتار ترک در سنگ‌های از پیش درزه‌دار در تحقیقات مختلف است [۸-۱۰].



شکل ۲- طبقه بندی انواع ترک‌ها [۱۰]

اگرچه با آزمایشات تک محوری می‌توان تا حدی اطلاعات مفیدی از نحوه انتشار ترک در سنگ بدست آورد اما در اکثر موارد نتایج غیر واقعی بدست می‌آید چون تنش‌های محصور کننده همیشه در شرایط طبیعی وجود دارند و این تنش‌ها تأثیر زیادی بر روی خصوصیات مکانیکی و گسیختگی سنگ‌های از پیش درزه‌دار دارد. برای بررسی رفتار گسیختگی تحت تنش محصور کننده معمولاً از آزمایش فشاری چند محوری استفاده شده است [۱۱-۲۰].

با توجه به پیچیده بودن فرآیند توسعه ترک در سنگ، اندازه گیری پارامترهای مختلف هنگام شروع و گسترش ترک و بررسی ماهیت گسیختگی‌های مختلف ایجاد شده در پل‌سنگ‌ها، از طریق مدل‌های آزمایشگاهی، خصوصاً در شرایط بارگذاری‌های چند محوری بسیار مشکل می‌باشد. بنابراین با توسعه روش‌های عددی، شبیه‌سازی این فرآیندها روشی دقیق و موثر بوده که امروزه مورد توجه محققین قرار گرفته است. از آنجایی که روش المان مجزا (DEM) بر پایه تئوری مکانیک محیط‌های ناپیوسته در شبیه‌سازی محیط‌های سنگی، از نقطه نظر تحلیل‌های ریز مقیاس ($Microscopic$) دارای مزایایی نسبت به روش المان محدود (FEM) است، به صورت گسترده جهت شبیه‌سازی خصوصیات مکانیکی و مکانیزم‌های گسیختگی توده سنگ مورد استفاده قرار گرفته است. نرم‌افزاری که عموماً در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته است، نرم‌افزار PFC است [۲۱-۲۴].

بازشدگی درزه نیز قابل تعریف است.

در تحقیق حاضر درزه از مدل درزه SJ در مدل سازی استفاده شده و درزه‌ها به صورت بسته (بازشدگی صفر) در نظر گرفته شده است و تاثیر فاصله داری طولی و عرضی درزه‌ها بر مکانیزم برشی درزه‌های ناممتد بررسی شده است.

۲- نرم افزار PFC2D

نرم افزار $PFC2D$ محیط سنگ را مانند مجموعه فشرده از ذرات با اندازه‌های غیریکنواخت و اشکال کروی و دایره‌ای مدل سازی می کند که ذرات در نقاط اتصال خویش با پیوندهای موازی به هم چسبیده‌اند. فرآیند تولید مصالح، این سیستم را طوری تولید می کند که ذرات به خوبی به هم وصل شده و نیروهای بین دانه‌ای اندک خواهد بود. نیروهای بین دانه‌ای و فشردگی مجموعه ذرات، در مقیاس ماکروسکوپی دلخواه و ایزوتروپ می باشد. این حالت زمانی که ذرات بر اثر نیروی جاذبه متراکم می شوند، تحقق نمی یابد و زنجیره‌های نیرو به سمت قائم متمایل شده و بزرگی این زنجیره‌ها با افزایش ارتفاع مدل افزایش می یابد. پروسه تولید مصالح دارای پنج مرحله است که در زیر شرح داده می شود: فشردگی اولیه ذرات، اعمال تنش ایزوتروپیک، کاهش تعداد ذرات معلق در مدل، ایجاد پیوندهای موازی و حذف دیواره‌های مدل.

۲-۱- انتخاب میکروخصوصیات

در مدل سازی‌های عددی توسط نرم افزار PFC امکان اعمال مستقیم داده‌های آزمایشگاهی به مدل وجود ندارد. در این شرایط، بایستی خصوصیات مکانیکی مدل را با انتخاب صحیح میکروخصوصیات آن برآورد نمود. در حقیقت، با انتخاب صحیح میکروخصوصیات، مدل به گونه‌ای کالیبره می شود که رفتارش با رفتار مکانیکی نمونه فیزیکی مشابه گردد (جدول ۱).

جدول ۱- میکروخصوصیات ثابت استفاده شده جهت ساخت مدل‌ها

میکروخصوصیات	مقادیر	میکروخصوصیات	مقادیر
نوع ذره	دیسکی	افزایش دهنده شعاع اتصال موازی	۱
دانسیته (gr/cm^3)	۳۰۰۰	نسبت تخلخل	۰٫۰۸
مینیم شعاع	۰٫۸	ضریب میرایی	۰٫۷
دیسک (mm)	۱٫۳۵	ضریب اصطکاک	۰٫۵
نسبت مینیم شعاع به ماکزیم شعاع دیسک			

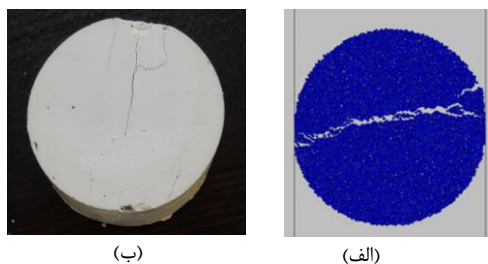
۲-۲- کالیبراسیون مقاومت‌های کششی

در نرم افزار PFC باید میکروپارامترها به مدل داده شود و با سعی و خطا، مقاومت کششی مدل را با نمونه آزمایشگاهی کالیبره کرد. قطر

دیسک برزلی $54mm$ می باشد. نیرو از طریق حرکت دیواره‌های جانبی به مدل‌ها اعمال می گردد (شکل ۴-الف). شکل ۴-الف و ب به ترتیب الگوی شکست مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود الگوی شکست مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی مشابه می باشد. جدول ۲ مقادیر مقاومت کششی مدل عددی و مدل عددی را نشان می دهد. مقدار مقاومت کششی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی تقریباً یکسان می باشد که نشان از کالیبره شده مدل عددی دارد.

۲-۳- مدل سازی اصلی:

در ابتدا مدل عددی دوبعدی از دیسک‌ها ساخته شد سپس با اعمال میکروخصوصیات تعیین شده به مدل، نمونه سنگ گچ با مقاومت کششی $1/2 MPa$ ساخته شد. بعد از مدل سازی اولیه، درزه‌های بسته SJ در مدل اجرا شدند. خصوصیات درزه‌های SJ در جدول ۳ آمده است.



شکل ۴-الف- الگوی شکست مدل PFC2D تحت آزمایش برزلی؛
ب- الگوی شکست نمونه آزمایشگاهی تحت آزمایش برزلی

جدول ۲- مقادیر مقاومت کششی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی

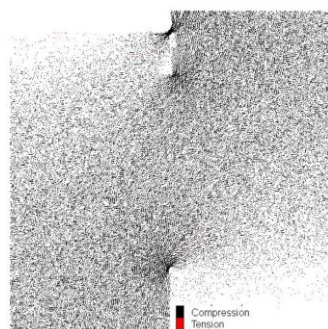
مقاومت کششی آزمایشگاهی (MPa)	مقاومت کششی عددی (MPa)
۱	۱٫۲

جدول ۳- خصوصیات SJ

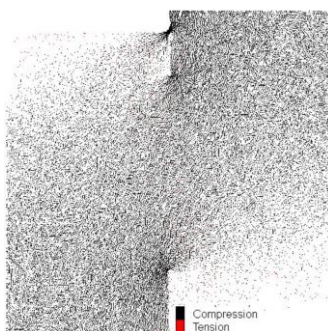
مقادیر	مقادیر	مقادیر	مقادیر
مقاومت چسبندگی	2×10^8	مقاومت کششی	۰
درزه		درزه	
مقاومت کششی	4×10^8	مقاومت کششی	۰
درزه		درزه	
بازشدگی درزه	۰٫۶	بازشدگی درزه	۰
درزه		درزه	

طول درزه‌ها عبارتست از: a (در شکل ۵-الف) و فاصله عمودی بین درزه‌ها برابر است با: b (در شکل ۵-ب). با اعمال تنش نرمال 0.1 مگاپاسکال، آزمایش برش بر روی مدل‌ها انجام شد (شکل ۵-الف). جهت نمایش متمایز درزه‌های SJ ، این درزه‌ها در تصاویر

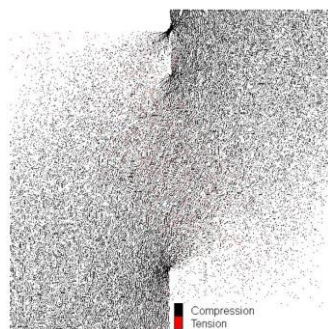
مربوط به مدل‌های عددی که در ادامه آمده است، به رنگ سفید نمایش داده شده اند، لذا بازشدگی ظاهری نشان داده شده در تصاویر واقعی نیست و در تمام آزمایشات بازشدگی درزه‌ها صفر در نظر گرفته شده است.



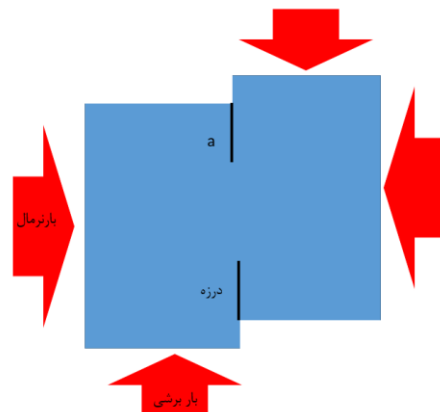
(الف)



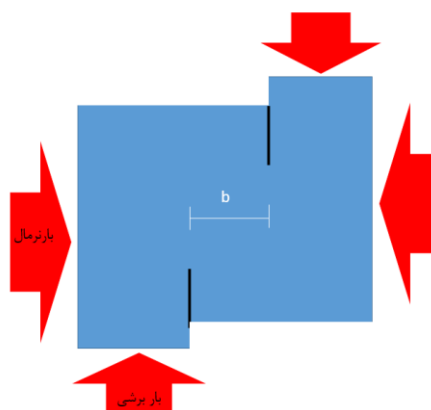
(ب)



(ج)



(الف)



(ب)

شکل ۵-الف) شماتیک نمونه دارای درز ناممتد صفحه ای، ب) درزه ناممتد پلکانی.

۳- ارائه نتایج و تحلیل‌ها

۳-۱- بررسی اثر فاصله داری طولی درزه ناممتد بسته

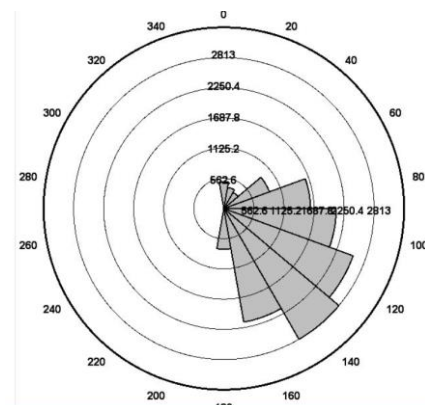
صفحه‌ای بر الگوی شکست

الف: طول درزه ۲cm

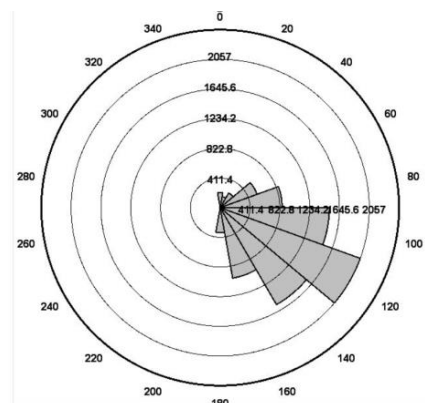
شکل ۶-الف، ب و ج کانتور نیروهای فشاری و کششی اطراف پل سنگ را در سه مرحله قبل از رشد ترک، در لحظه شروع ترک و مرحله تنش ماکزیمم نشان می‌دهد. رنگ قرمز و سیاه به ترتیب بیانگر نیروهای فشاری و کششی می‌باشد. ضخامت خطوط بیانگر بزرگی نیرو است. نیروهای کششی ماکزیمم در نوک درزه‌ها و نیروی فشاری در پل سنگ متمرکز می‌شود. با افزایش بارگذاری، بزرگی نیروهای توزیع شده در پل سنگ افزایش می‌یابد. شکل ۷ الف، ب و ج الگوی رشد ترک را در سه مرحله قبل از رشد ترک، در لحظه شروع ترک و مرحله تنش ماکزیمم نشان می‌دهد.

شکل ۶ - کانتور نیروهای فشاری و کششی اطراف پل سنگ در سه مرحله الف) قبل از رشد ترک، ب) در لحظه شروع ترک و ج) مرحله تنش ماکزیمم

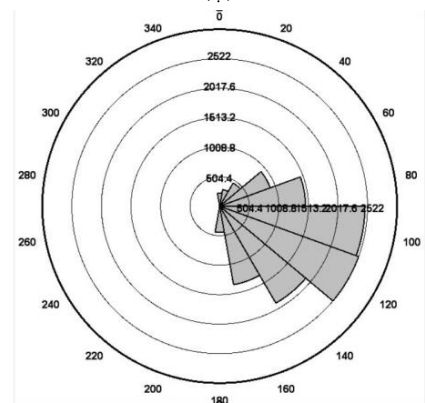
رنگ قرمز و سیاه به ترتیب بیانگر ترک‌های برشی و کششی می‌باشد. ترک‌های کششی در نوک درزه ایجاد می‌شود و سپس پل سنگ با نوارهای برشی می‌شکند. بعد از شکست پل سنگ، شکست برشی در درزه بسته اتفاق می‌افتد. شکل ۸ نمودار گل سرخی ترک‌ها را در سه مرحله قبل از رشد ترک، در لحظه شروع ترک و مرحله تنش ماکزیمم نشان می‌دهد. زاویه ترک‌های ایجاد شده بین ۹۰ درجه و ۱۳۰ درجه متغیر است. با افزایش بارگذاری، تعداد ترک‌ها افزایش می‌یابد.



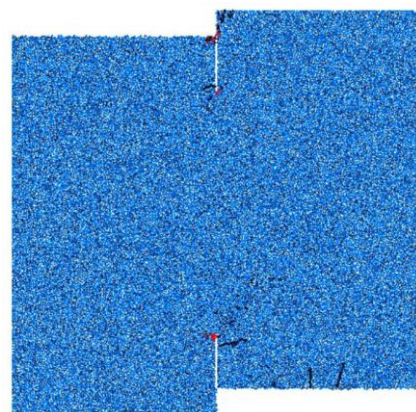
(الف)



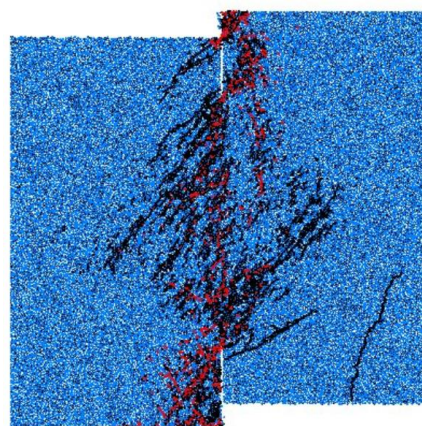
(ب)



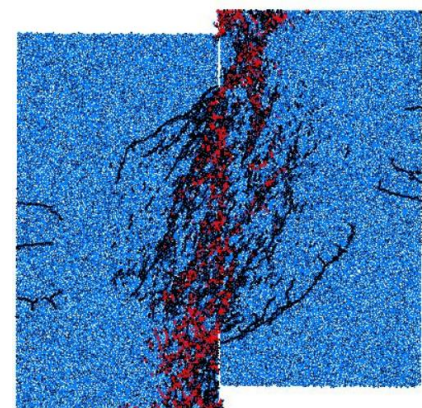
(ج)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸- نمودار گل سرخی ترک در سه مرحله (الف) قبل از رشد ترک، (ب) در لحظه شروع ترک و (ج) مرحله تنش ماکزیمم

شکل ۷- ترک‌های برشی و کششی اطراف پل سنگ در سه مرحله (الف) قبل از رشد ترک، (ب) در لحظه شروع ترک و (ج) مرحله تنش ماکزیمم

ب: طول درزه ۴ cm

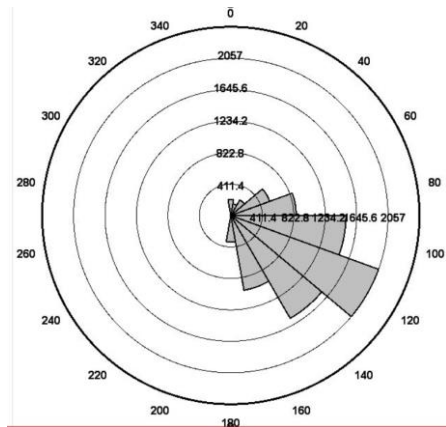
بسته اتفاق می‌افتد. شکل ۱۰ نمودار گل سرخی ترک‌ها را در سه مرحله قبل از رشد ترک، در لحظه شروع ترک و مرحله تنش ماکزیمم نشان می‌دهد. زاویه ترک‌های ایجاد شده بین ۹۰ و ۱۳۰ درجه متغیر است. با افزایش بارگذاری، تعداد ترک‌ها افزایش می‌یابد.

ج: طول درزه ۶ cm

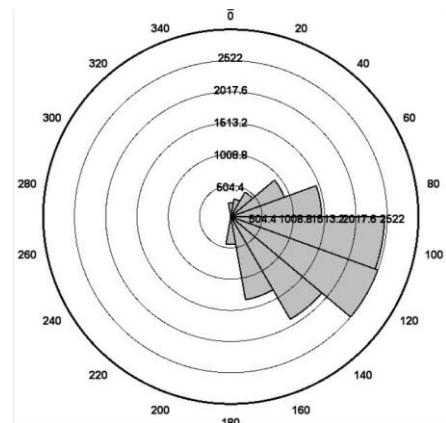
شکل ۱۱- الف، ب و ج الگوی رشد ترک را در سه مرحله قبل از رشد

شکل ۹- الف، ب و ج الگوی رشد ترک را در سه مرحله قبل از رشد ترک، در لحظه شروع ترک و مرحله تنش ماکزیمم نشان می‌دهد. رنگ قرمز و سیاه به ترتیب بیانگر ترک‌های برشی و کششی می‌باشد. ترک‌های کششی در نوک درزه ایجاد می‌شود و سپس پل سنگ با نوارهای برشی می‌شکند. بعد از شکست پل سنگ، شکست برشی در درزه

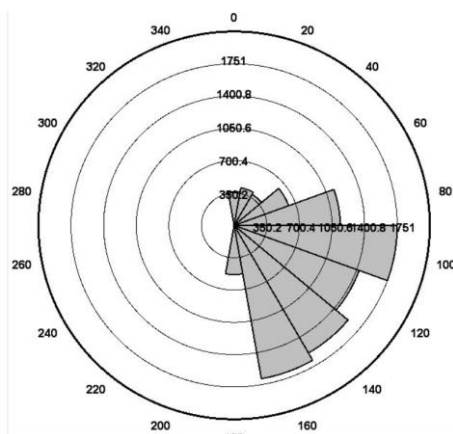
سه مرحله قبل از رشد ترک، در لحظه شروع ترک و مرحله تنش ماکزیمم نشان می‌دهد. زاویه ترک‌های ایجاد شده بین ۹۰ درجه و ۱۶۰ درجه متغیر است. با افزایش بارگذاری، تعداد ترک‌ها افزایش می‌یابد.



(الف)



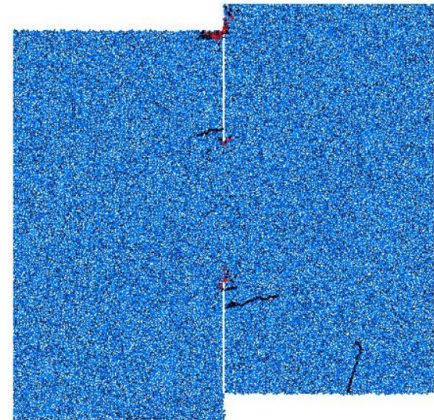
(ب)



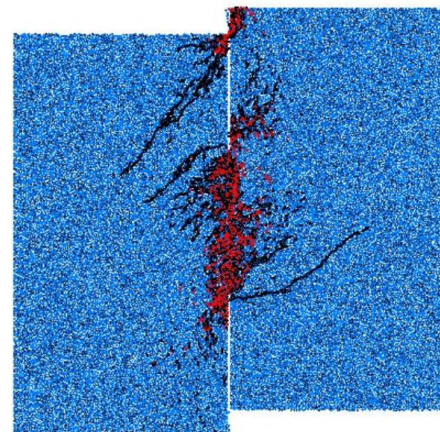
(ج)

شکل ۱۰- نمودار گل سرخی ترک در سه مرحله (الف) قبل از رشد ترک، (ب) در لحظه شروع ترک و (ج) مرحله تنش ماکزیمم

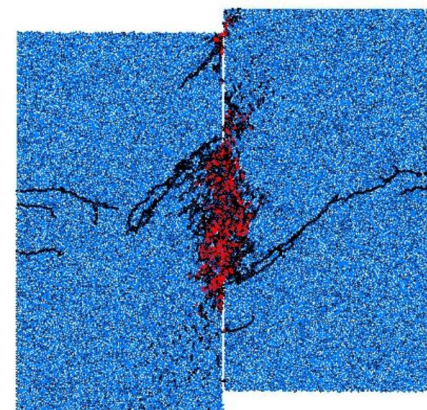
ترک، در لحظه شروع ترک و مرحله تنش ماکزیمم نشان می‌دهد. رنگ قرمز و سیاه به ترتیب بیانگر ترک‌های برشی و کششی می‌باشد. ترک‌های کششی در نوک درزه ایجاد می‌شود و سپس پل سنگ با نوارهای برشی می‌شکند. بعد از شکست پل سنگ، شکست برشی در درزه بسته اتفاق می‌افتد. شکل ۱۲ نمودار گل سرخی ترک‌ها را در



(الف)

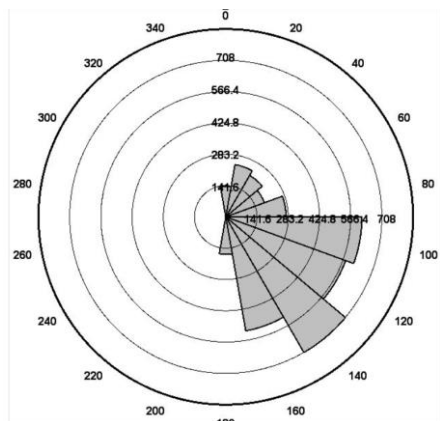


(ب)

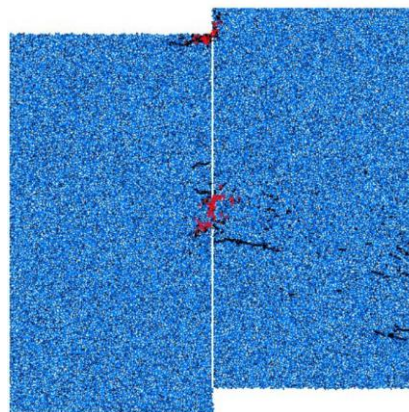


(ج)

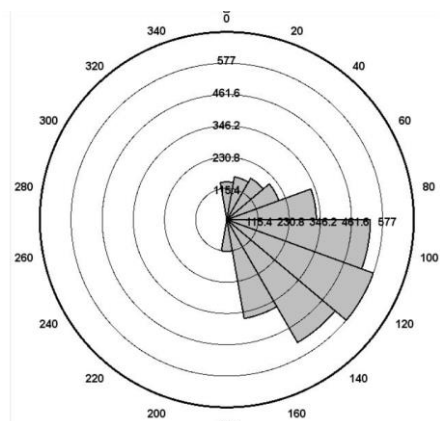
شکل ۹- ترک‌های برشی و کششی اطراف پل سنگ در سه مرحله (الف) قبل از رشد ترک، (ب) در لحظه شروع ترک و (ج) مرحله تنش ماکزیمم



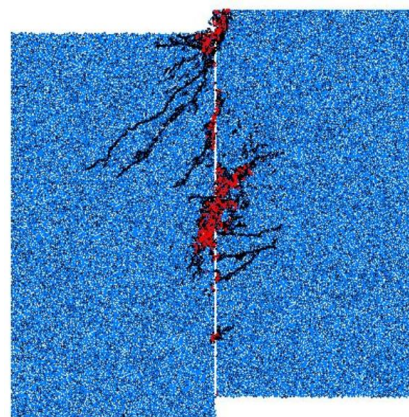
(الف)



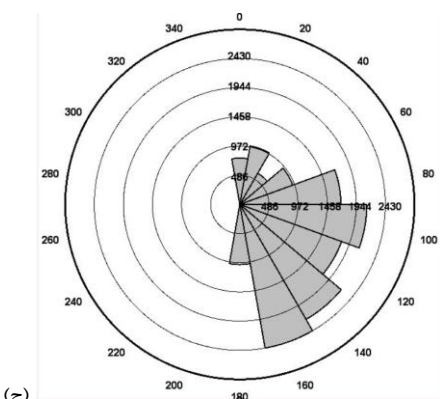
(الف)



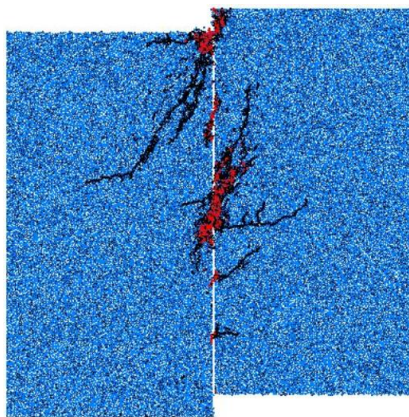
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۱۱- ترک‌های برشی و کششی اطراف پل سنگ در سه

مرحله الف) قبل از رشد ترک، ب) در لحظه شروع ترک و ج) مرحله تنش ماکزیمم

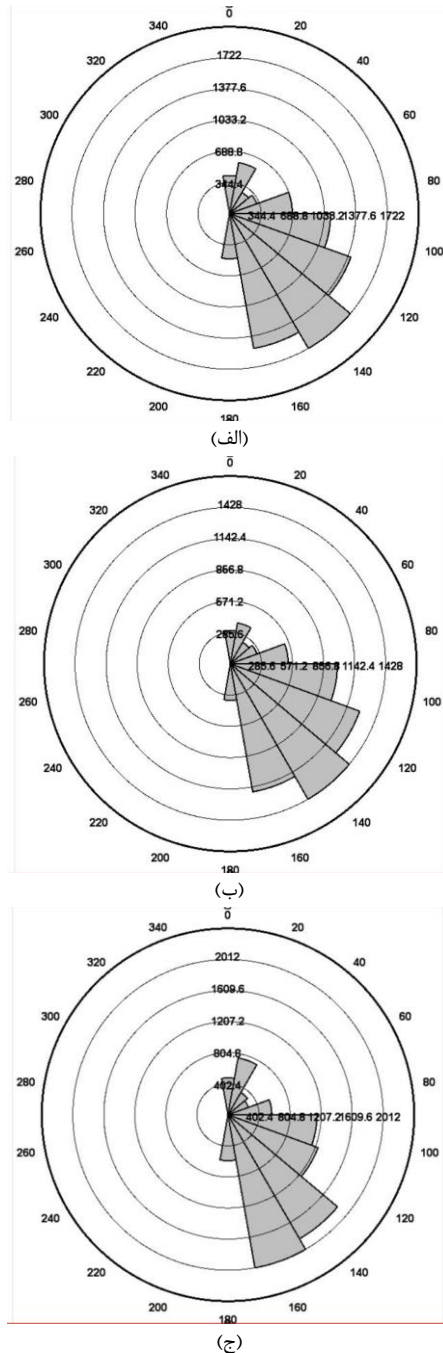
شکل ۱۲- نمودار گل سرخی ترک در سه مرحله الف) قبل از رشد ترک، ب) در لحظه شروع ترک و ج) مرحله تنش ماکزیمم

ترک، در لحظه شروع ترک و مرحله تنش ماکزیمم نشان می‌دهد. رنگ قرمز و سیاه به ترتیب بیانگر ترک‌های برشی و کششی می‌باشد. ترک‌های کششی در نوک درزه ایجاد می‌شود و سپس پل سنگ با نوارهای برشی می‌شکند. بعد از شکست پل سنگ، شکست برشی در درزه بسته اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که ترک‌های برشی در

۳-۲- بررسی اثر فاصله داری طولی درزه ناممتد بسته پلکانی بر الگوی شکست

الف: طول درزه ۲ cm

شکل ۱۳ الف، ب و ج الگوی رشد ترک را در سه مرحله قبل از رشد

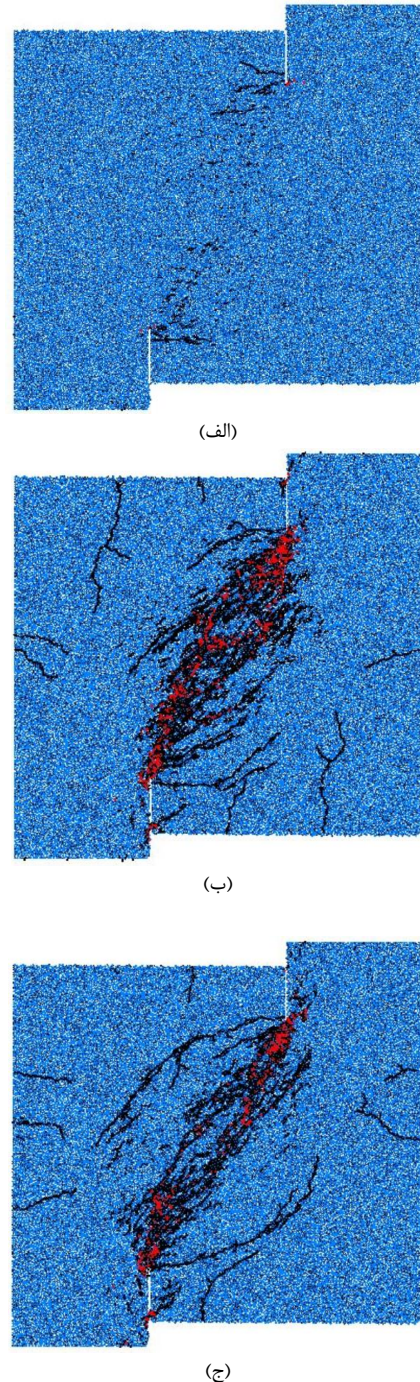


شکل ۱۴- نمودار گل سرخی ترک در سه مرحله (الف) قبل از رشد ترک، (ب) در لحظه شروع ترک و (ج) مرحله تنش ماکزیمم

ب: طول درزه ۴ cm

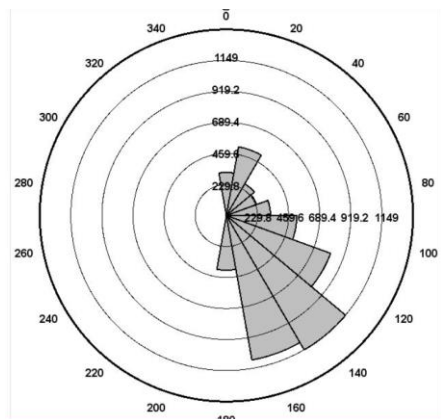
شکل ۱۵ الف، ب و ج الگوی رشد ترک را در سه مرحله قبل از رشد ترک، در لحظه شروع ترک و مرحله تنش ماکزیمم نشان می‌دهد. رنگ قرمز و سیاه به ترتیب بیانگر ترک‌های برشی و کششی می‌باشد. ترک‌های کششی در نوک درزه ایجاد می‌شود و سپس پل سنگ با نوارهای برشی می‌شکند. بعد از شکست پل سنگ، شکست برشی در

آخرین مرحله از شکست پل سنگ ظاهر می‌شوند. شکل ۱۴ نمودار گل سرخی ترک‌ها را در سه مرحله قبل از رشد ترک، در لحظه شروع ترک و مرحله تنش ماکزیمم نشان می‌دهد. زاویه ترک‌های ایجاد شده بین ۱۱۰ درجه و ۱۷۰ درجه متغیر است. با افزایش بارگذاری، تعداد ترک‌ها افزایش می‌یابد.

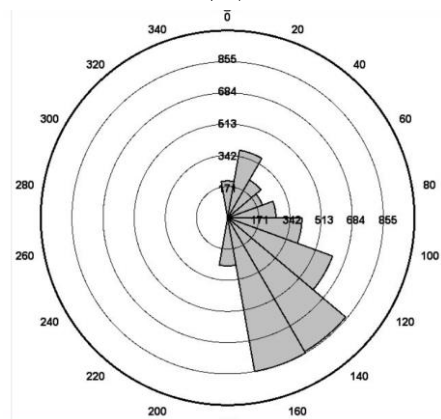


شکل ۱۳- ترک‌های برشی و کششی اطراف پل سنگ در سه مرحله (الف) قبل از رشد ترک، (ب) در لحظه شروع ترک و (ج) مرحله تنش ماکزیمم

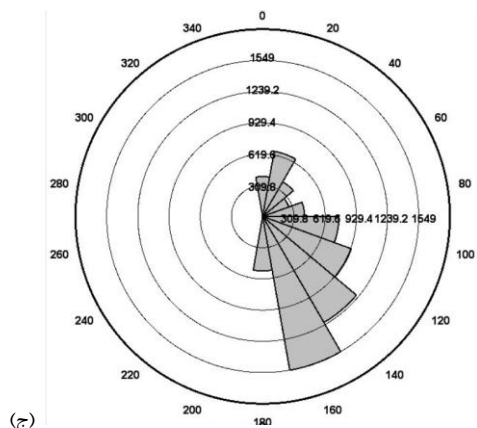
درزه بسته اتفاق می‌افتد. شکل ۱۶ نمودار گل سرخی ترک‌ها را در سه مرحله قبل از رشد ترک، در لحظه شروع ترک و مرحله تنش ماکزیمم نشان می‌دهد. زاویه ترک‌های ایجاد شده بین ۱۱۰ درجه و ۱۷۰ درجه متغیر است. با افزایش بارگذاری، تعداد ترک‌ها افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)

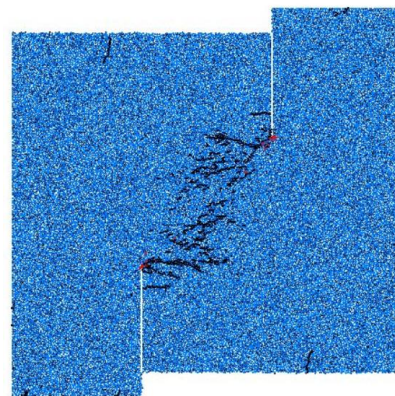


(ج)

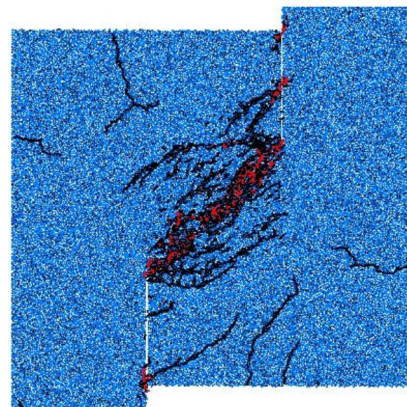
شکل ۱۶- نمودار گل سرخی ترک در سه مرحله (الف) قبل از رشد ترک، (ب) در لحظه شروع ترک و (ج) مرحله تنش ماکزیمم

ج: طول درزه ۶ cm

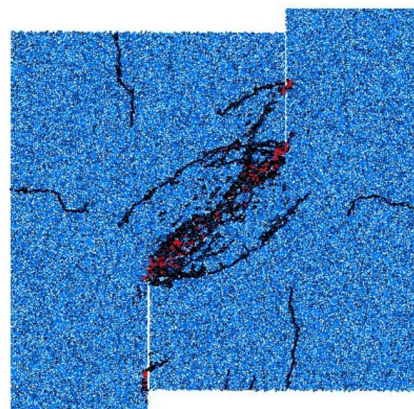
شکل ۱۷- الف، ب و ج الگوی رشد ترک را در سه مرحله قبل از رشد ترک، در لحظه شروع ترک و مرحله تنش ماکزیمم نشان می‌دهد. رنگ قرمز و سیاه به ترتیب بیانگر ترک‌های برشی و کششی می‌باشد. ترک‌های کششی در نوک درزه ایجاد می‌شود و سپس پل سنگ با نوارهای برشی می‌شکنند. بعد از شکست پل سنگ، شکست برشی در درزه بسته اتفاق می‌افتد.



(الف)

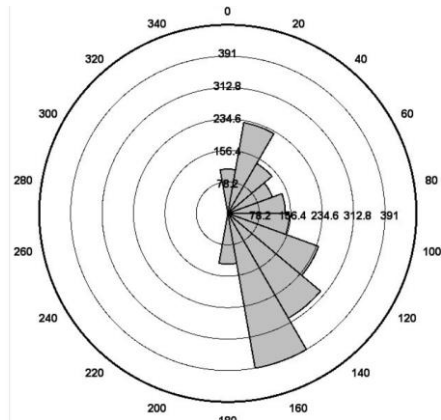


(ب)

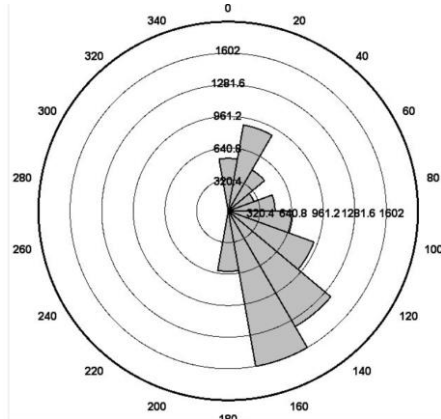


(ج)

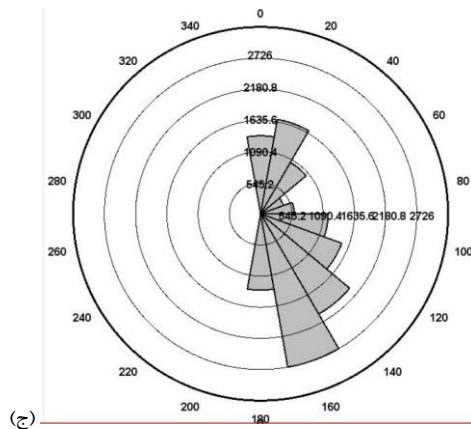
شکل ۱۷ ترک‌های برشی و کششی اطراف پل سنگ در سه مرحله (الف) قبل از رشد ترک، (ب) در لحظه شروع ترک و (ج) مرحله تنش ماکزیمم



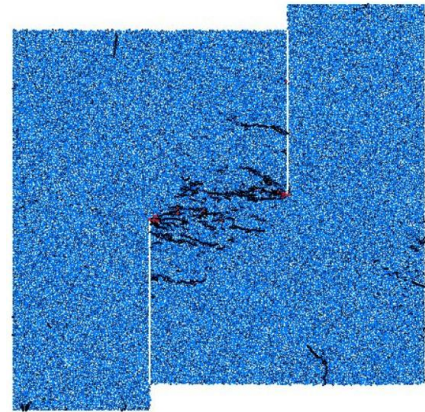
(الف)



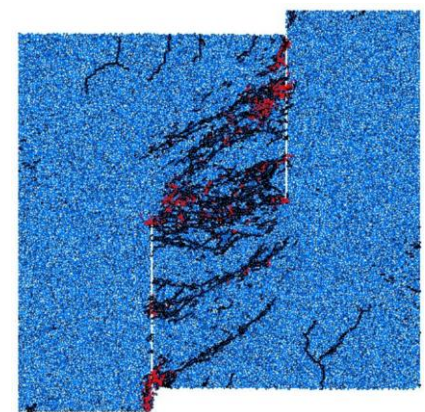
(ب)



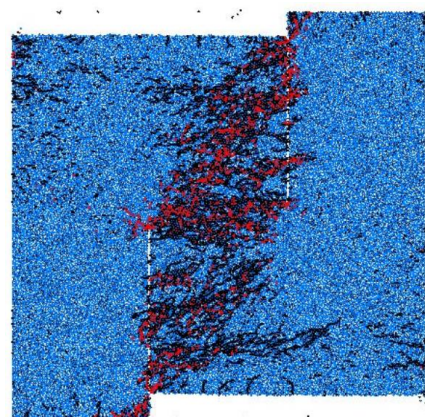
(ج)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۸- نمودار گل سرخی ترک در سه مرحله (الف) قبل از رشد ترک، (ب) در لحظه شروع ترک و (ج) مرحله تنش ماکزیمم

شکل ۱۷- ترک‌های برشی و کششی اطراف پل سنگ در سه مرحله (الف) قبل از رشد ترک، (ب) در لحظه شروع ترک و (ج) مرحله تنش ماکزیمم

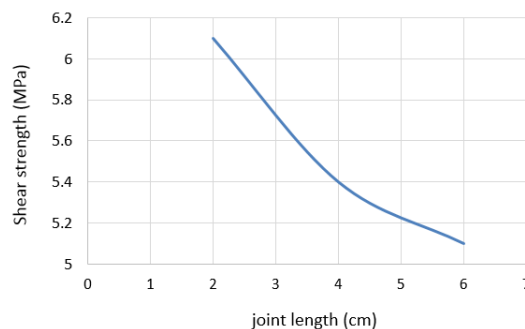
۳-۳- بررسی اثر فاصله‌داری طولی و عرضی درزه ناممتد بسته بر مقاومت برشی
شکل ۱۹، تاثیر فاصله‌داری طولی و عرضی درزه ناممتد را بر مقاومت برشی نشان می‌دهد.

زاویه ترک‌های ایجاد شده بین ۹۰ درجه و ۱۶۰ درجه متغیر است. با افزایش بارگذاری، تعداد ترک‌ها افزایش می‌یابد.

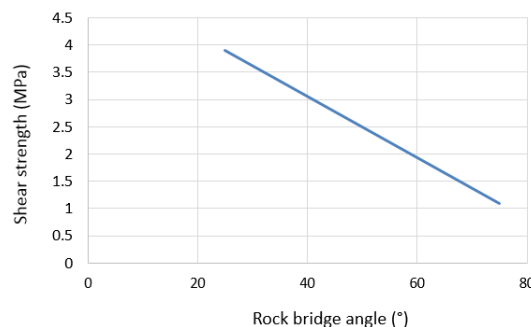
کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش طول درزه مقاومت برشی زیاد می‌شود.

۴- نتیجه گیری

- ترک‌های کششی مود غالب شکست هستند که در پل سنگ اتفاق می‌افتند.
- با افزایش طول پل سنگ، تعداد ترک‌های برشی در مدل زیاد می‌شود.
- با افزایش زاویه‌داری پل سنگ، شکست کششی در پل سنگ رخ می‌دهد.
- ترک‌های برشی در مراحل پایانی شکست در نمونه ایجاد می‌شوند.
- با افزایش زاویه پل سنگ، زاویه رشد ترک‌های تازه متولد شده زیاد می‌شود.
- با افزایش طول درزه، زاویه رشد ترک‌های تازه متولد شده زیاد می‌شود.
- درزه‌های ناممتد پلکانی دارای مقاومت کمتری نسبت به درزه‌های صفحه‌ای هستند.
- با افزایش زاویه پل سنگ مقاومت برشی کاهش می‌یابد.
- با کاهش طول درزه مقاومت برشی زیاد می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱۹- تاثیر فاصله‌داری طولی و عرضی درزه ناممتد بر مقاومت برشی (الف) درزه صفحه ای، (ب) درزه پلکانی

به طور کلی درزه‌های ناممتد پلکانی دارای مقاومت کمتری نسبت به درزه‌های صفحه‌ای هستند. با افزایش زاویه پل سنگ مقاومت برشی

۴- منابع

flawed rocks: A review. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2021;1-27.

[7] Bobet A, Einstein HH. Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression. *Int J Rock Mech Min Sci*. 1998;35(7):863-889.

[8] Yang SQ, Jing HH. Evaluation on strength and deformation behavior of red sandstone under simple and complex loading paths. *Eng Geol*. 2013;164:1-17.

[9] Yang SQ, Tian WL, Huang YH, Ranjith PG, Yu Y. An experimental and numerical study on cracking behavior of brittle sandstone containing two non-coplanar fissures under uniaxial compression. *Rock Mech Rock Eng*. 2016;49(4):1497-1515.

[10] Wong LNY, Xiong Q. A method for multiscale interpretation of fracture processes in Carrara marble specimen containing a single flaw under uniaxial compression. *J Geophys Res-Sol Ea*. 2018;123(8):6459-6490.

[11] Liu XW, Liu QS, Liu B, Zhu YG, Zhang PL. Failure behavior for rocklike material with cross crack under biaxial compression. *J Mater Civ Eng*. 2019;31(2):06018025.

[1] Esterhuizen GS, Dolinar DR, Ellenberger JL. Pillar strength in underground stone mines in the United States. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2011;48(1):42-50.

[2] Esterhuizen GS, Tyrna PL, Murphy MM. A case study of the collapse of slender pillars affected by through-going discontinuities at a limestone mine in Pennsylvania. *Rock Mech Rock Eng*. 2019;52(12):4941-4952.

[3] Yang SQ, Jing HW, Huang YH, Ranjith PG, Jiao YY. Fracture mechanical behavior of red sandstone containing a single fissure and two parallel fissures after exposure to different high temperature treatments. *J Struct Geol*. 2014;69:245-264.

[4] Cao RH, Cao P, Lin H, Fan X, Zhang CY, Liu TY. Crack initiation, propagation, and failure characteristics of jointed rock or rock-like specimens: a review. *Adv Civ Eng*. 2019;69:75751.

[5] Xie HP, Zhu JB, Zhou T, Zhang K, Zhou CT. Conceptualization and preliminary study of engineering disturbed rock dynamics. *Geomech Geophys Geo-energ Geo-resour*. 2020;6(2):34.

[6] Zhou X-P, Zhang J-Z, Yang S-Q, Berto F. Compression-induced crack initiation and growth in

10.12989/cac.2017.20.4.429.

[22] CHEN S J, YIN D W, JIANG N, WANG F, GUO W J. Simulation study on effects of loading rate on uniaxial compression failure of composite rock-coal layer [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2019, 17(4): 333–342. DOI: 10.12989/gae.2019.17.4.333.

[23] LIU Guang, SUN Wai-ching, LOWINGER S M, ZHANG Zhen-hua, HUANG Ming, PENG Jun. Coupled flow network and discrete element modeling of injection-induced crack propagation and coalescence in brittle rock [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(13): 843–868. DOI: 10.1007/s11440-018-0682-1.

[24] YIN Peng-fei, YANG Sheng-qi. Discrete element modeling of strength and failure behavior of transversely isotropic rock under uniaxial compression [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2019, 93(2): 235–246. DOI: 10.1007/s12594-019-1158-0.

[25] CAO R H, CAO P, LIN H, PU C Z, OU K. Mechanical behavior of brittle rock-like specimens with pre-existing fissures under uniaxial loading: Experimental studies and particle mechanics approach [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(3): 763–783. DOI: 10.1007/s00603-015-0779-x.

[26] WU Shun-chuan, XU Xue-liang. A study of three intrinsic problems of the classic discrete element method using flat-joint model [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(5): 1813–1830. DOI: 10.1007/s00603-015-0890-z.

[27] POTYONDY D O. The bonded-particle model as a tool for rock mechanics research and application: Current trends and future directions [J]. *Geosystem Engineering*, 2015, 18(1):1–28. DOI: 10.1080/12269328.2014.998346.

[28] Cheng, C., Chen, X., & Zhang, S. (2016). Multi-peak deformation behavior of jointed rock mass under uniaxial compression: insight from particle flow modeling. *Engineering Geology*, 213, 25-45.

[29] Itasca Consulting Group, Inc. (2014a). PFC (particle flow code in 2 and 3 dimensions), version 5.0 [User's manual]. Minneapolis, MN: ICG

[12] Du K, Yang CZ, Su R, Tao M, Wang SF. Failure properties of cubic granite, marble, and sandstone specimens under true triaxial stress. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2020;130:104309.

[13] Liu K, Zhao J, Wu G, Maksimenko A, Haque A, Zhang QB. Dynamic strength and failure modes of sandstone under biaxial compression. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2020;128:104260.

[14] Wang HY, Dyskin A, Pasternak E, Dight P. 3D crack growth in biaxial compression: influence of shape and inclination of initial cracks. *Rock Mech Rock Eng*. 2020;53(7):3161-3183.

[15] Wang HY, Dyskin A, Pasternak E, Dight P, Sarmadivaleh M. Experimental and numerical study into 3D crack growth from a spherical pore in biaxial compression. *Rock Mech Rock Eng*. 2020;53(1):77-102.

[16] Mughieda O, Karasneh I. Coalescence of offset rock joints under biaxial loading. *Geotech Geo Eng*. 2006;24(4):985-999.

[17] Prudencio M, Van Sint Jan M. Strength and failure modes of rock mass models with non-persistent joints. *Int J Rock Mech Min Sci*. 2007;44(6):890-902.

[18] Yang SQ, Huang YH, Ranjith PG. Failure mechanical and acoustic behavior of brine saturated sandstone containing two pre-existing flaws under different confining pressures. *Eng Fract Mech*. 2018;193:108-121.

[19] Huang D, Gu D, Yang C, Huang R, Fu G. Investigation on mechanical behaviors of sandstone with two preexisting flaws under triaxial compression. *Rock Mech Rock Eng*. 2015;49: 375-399.

[20] Ghazvinian, A., Sarfarazi, V., Schubert, W., Blumel, M., 2012. A study of the failure mechanism of planar non-persistent open joints using PFC2D. *Rock Mech. Rock. Eng*. 45 (5), 677–693.

[21] SARFARAZI V, HAERI H, SHEMIRANI A B, HEDAYAT A, HOSSEINI S S. Investigation of ratio of TBM disc spacing to penetration depth in rocks with different tensile strengths using PFC2D [J]. *Computers and Concrete*, 2017, 20(4): 429–437. DOI: