

مدلسازی آزمایشگاهی و عددی تاثیر درزه‌های ناممتد بر الگوی شکست و نیروی شکست نمونه‌ها

وهاب سرفرازی^{۱*}، محمد غفاری^۲، هادی حایری^۳

^۱سرفرازی، وهاب* استادیار دانشگاه صنعتی همدان، vahab.sarfarazi@gmail.com

^۲غفاری، محمد پژوهشگر دانشگاه صنعتی همدان، sarfarazi@hut.ac.ir

^۳مدیر تحقیق و توسعه و کنترل کیفیت شرکت راهسازی و عمران، تهران، ایران، haerihadi@gmail.com

(دریافت: ۰۷-۰۹-۱۳۹۶، پذیرش: ۱۶-۱۱-۱۳۹۷)

چکیده

مطالعه رفتار گسیختگی درزه‌های ناممتد با توجه به نقش آن‌ها در توسعه ناپایداری‌های موضعی و کلی در ساختارهای سنگی بسیار مهم است. مطالعه این درزه‌ها بهبود طراحی در پروژه‌های مهندسی را به ارمغان می‌آورد. وجود درزه‌های ناممتد در توده‌های سنگ، ضمن تشکیل ساختارهایی به نام پل‌سنگ، مقاومت برشی را افزایش می‌دهد. برای مطالعه تاثیر درزه‌های ناممتد بر رفتار برشی پل‌سنگ، بارگذاری تک‌محوره روی ۲۴ نمونه گچی حاوی درزه‌های ناممتد به ابعاد ۱۰×۱۰×۵ سانتی‌متر انجام شد. هر نمونه شامل ۴ درزه ناممتد است. در نمونه‌های مختلف طول درزه‌ها متفاوت ولی در یک نمونه طول درزه‌ها یکسان است. طول درزه‌ها در نمونه‌های مختلف برابر ۱،۲،۳ و ۴ سانتی‌متر است. در نمونه با طول درزه یکسان، زاویه‌داری درزه‌ها عبارت از ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه است. نتایج نشان می‌دهد مادامی که نیروی شکست نمونه‌ها تابع الگوی شکست مدل است، الگوی رشد ترک تحت تاثیر طول درزه، زاویه‌داری درزه و طول پل‌سنگ قرار دارد. همزمان با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی‌های عددی با نرم‌افزار PFC2D انجام شد. مشابه نمونه‌های آزمایشگاهی، مدل‌های عددی دارای طول درزه ۱،۲،۳ و ۴ سانتی‌متر است که در هر طول درزه، زاویه‌داری درزه ۰ و ۴۵ درجه است. مادامیکه نیروی شکست نمونه‌های عددی بیشتر از نمونه‌های آزمایشگاهی است، الگوی شکست مدل‌های عددی و نمونه آزمایشگاهی یکسان است. با توجه به یکسان بودن نتایج نرم‌افزار PFC2D با نتایج آزمایش‌ها می‌توان نمونه‌هایی که در آزمایشگاه قابل ساخت نیست را به صورت عددی مدلسازی و نتیجه‌گیری کرد.

واژه‌های کلیدی

درزه‌های ناممتد، رشد ترک، پل‌سنگ، بارگذاری تک‌محوره، PFC2D.

۱- مقدمه

کششی به برشی تغییر می‌کند [۱۰]. شن، بوبت و ونگ پیشروی و یکپارچگی ترک را در نمونه‌های سنگی و شبه‌سنگی حاوی درزه‌های ناممتد بازتحت فشارتک محوره مورد مطالعه قرار دادند. الگوی شکست مشترک در این نمونه‌ها عبارت است از ترک‌های باله‌ای که در نوک درزه‌ها ایجاد می‌شوند و در یک مسیر منحنی شکل با افزایش بار پیشروی می‌کنند. ترک‌های باله‌ای، ترک‌های کششی‌اند که در یک وضعیت پایدار رشد می‌کنند و برای پیشروی به افزایش بارگذاری نیاز دارند و دوم، ترک‌های ثانویه و یا ترک‌های برشی که در نوک درزه‌ها ایجاد می‌شوند. دو مسیر در امتداد درزه‌های اولیه و با شبیهی مشابه با ترک‌های باله‌ای اما در جهت مخالف برای ادامه پیشروی ترک‌های ثانویه وجود دارد [۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴]. موعیدا، یکپارچگی ترک رادرنمونه‌های شبه‌سنگی حاوی درزه‌های ناممتد بازهم‌پوشان و غیرهم‌پوشان تحت فشارتک‌محوره و دو محوره بررسی کرد. آزمایش‌ها نشان داد که زمانی که درزه‌های ناممتد در وضعیت هم‌پوشان قرار دارند، شکست کششی در پل سنگ ایجاد می‌شود و با غیرهم‌پوشان شدن درزه‌ها، تمایل به شکست ترکیبی و برشی در پل سنگ افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش دو محوره نیز حاکی از آن بود که با افزایش فشار جانبی، ترک‌های برشی و یا ترکیبی در شکست پل سنگ تاثیر گذارند [۱۵ و ۱۶]. در این مقاله با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و عددی، اثر زاویه‌داری درزه‌های ناممتد و طول درزه‌ها بر الگوی شکست و بار شکست نمونه‌ها تحت بارگذاری تک‌محوره مطالعه شده است.

۲- نحوه ساخت نمونه

تعداد ۲۴ نمونه آزمایش به صورت بلوک‌های مکعبی به ابعاد $10 \times 10 \times 5$ سانتی‌متر با استفاده از گچ تهیه شده است. برای ساخت قالب‌ها و ایجاد درزه، پروفیل‌هایی از جنس گالوانیزه به نحوی که به‌سادگی امکان استفاده از آن‌ها فراهم باشد و به نمونه آسیب نرسد به صورت شکل ۱ تهیه می‌شود. ابعاد قالب $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر است. در کف این قالب فوم با ابعاد $10 \times 10 \times 5$ سانتی‌متر قرار می‌گیرد. این فوم برای جایگذاری تیغه‌ها درون آن، تعبیه شده است. در هر مرحله چهار تیغه با طول‌های یکسان،

درزه‌های ناممتد نقش مهمی در مکانیزم شکست توده‌سنگ دارند و ممکن است در رشد و گسترش ترک تاثیرگذار باشند [۲ و ۳]. افزایش شدت تنش در نوک این درزه‌ها ممکن است منجر به رشد ترک‌های ثانویه از این نواحی شود. پیشروی و اتصال ترک‌های ثانویه به یکدیگر و به درزه‌های اطراف، باعث کاهش مقاومت توده‌سنگ می‌شود [۳ و ۴]. ونگ مقاومت برشی و الگوی شکست نمونه‌های مصنوعی و طبیعی حاوی درزه‌های ناممتد را تحت برش مستقیم و الگوی شکست نمونه‌های مصنوعی و طبیعی حاوی درزه‌های ناممتد را تحت برش مستقیم مطالعه کرد. نتایج نشان داد که الگوی شکست با فاصله‌داری نوک درزه‌ها کنترل می‌شود و مقاومت برشی به الگوی شکست وابسته است [۵]. قزوینیان و همکاران، آنالیز کاملی از رفتار برشی درزه‌های ناممتد بر اساس تغییر در امتداد یافتگی پل سنگ انجام دادند. نتایج نشان داد که حالت و مکانیزم شکست پل سنگ، تحت تاثیر امتداد یافتگی پل سنگ قرار دارد [۶]. ژانگ و همکاران با مدلسازی عددی، الگوی شکست برشی درزه‌های ناممتد را شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که با افزایش فاصله‌داری درزه‌ها، الگوی شکست تغییر می‌کند [۷]. قزوینیان و همکاران، با یک جریان درزه دو بعدی، رفتار برشی درزه‌های ناممتد را مدلسازی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش طول پل سنگ تعداد نوارهای برشی که منجر به گسیختگی پل سنگ می‌شود، افزایش می‌یابد [۸]. بوبت و انیشتین، یکپارچگی ترک در مواد شبه‌سنگی حاوی جفت درزه ناممتد باز و بسته تحت فشار تک محوره را مورد کاوش قرار دادند. این تحقیق نشان داد که مقاومت پل سنگ محصور بین جفت درزه‌های بسته بیشتر از مقاومت پل سنگ محصور بین جفت درزه‌های باز است [۹]. لاجتای، آزمایش برش مستقیم را روی نمونه‌های سنگ طبیعی که دارای دو درزه ناممتد صفحه‌ای بودند، انجام داد. آزمایش نشان داد که در ابتدا ترک‌های کششی در نوک درزه‌ها ایجاد می‌شوند و در طی آزمایش ترک‌های برشی باعث یکپارچگی درزه‌های ناممتد می‌شوند. همچنین نتایج حاکی از این بود که با افزایش تنش نرمال، مود شکست از



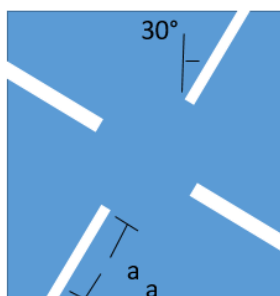
(الف)



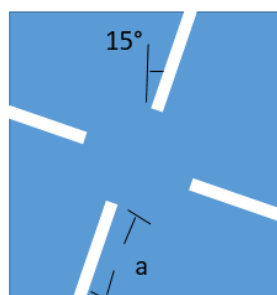
(ب)

۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر و زاویه‌داری‌های ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه درون قالب جای می‌گیرد. روند ساخت نمونه‌ها بدین شرح است که ابتدا ۷۷۰ گرم گچ داخل یک لیتر آب حل می‌شود، پس از گذشت ۴ دقیقه که گچ خود را گرفت، سطح داخلی قالب و پروفیل‌ها اندود از مایع ظرف‌شویی می‌شود تا نمونه به قالب و پروفیل نچسبد و به راحتی جدا شود. سپس دوغاب گچ درون قالب ریخته می‌شود. پس از ۱۰ دقیقه پروفیل‌ها از داخل نمونه خارج و ۵۰ دقیقه بعد نمونه‌ها از قالب خارج می‌شوند. به طور کلی ۲۴ نمونه با ابعاد $10 \times 10 \times 5$ سانتی‌متر، طول درزه (a) ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر و زاویه‌داری ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ آماده‌سازی شد. شکل ۲ نمای شماتیکی از نمونه‌های با درزه‌داری‌های مختلف را نشان می‌دهد.

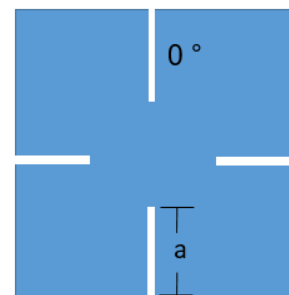
شکل ۱- الف - قالب مورد استفاده برای ساخت نمونه، ب- پروفیل‌های مورد استفاده به عنوان درزه



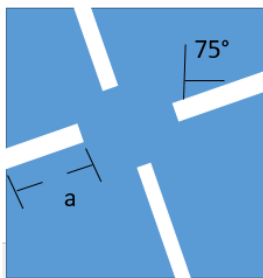
(پ)



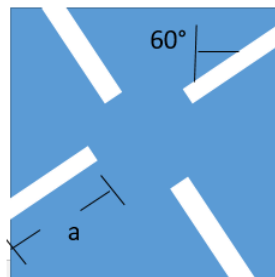
(ب)



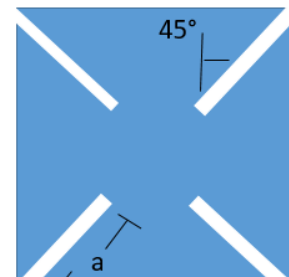
(الف)



(ج)



(ث)



(ت)

شکل ۲- نمونه با طول درزه (a) ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر و زاویه‌داری (الف) ۰، (ب) ۱۵، (پ) ۳۰، (ت) ۴۵، (ث) ۶۰ و (ج) ۷۵ درجه

۳- بارگذاری تک محوره

برای مطالعه رفتار تک محوره نمونه حاوی درزه‌های ناممتمند، آزمایش بارگذاری تک محوره با آهنگ بارگذاری ۰/۰۵ میلی‌متر/ دقیقه انجام شد (شکل ۳).



شکل ۳- ماشین تک محوره

۴- نتایج آزمایش

۴-۱- رشد ترک در نمونه‌های با طول درزه ۱ سانتی‌متر و زاویه‌داری ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه

الگوی شکست ۶ نمونه که هر یک دارای ۴ درزه یک سانتی‌متری و زاویه‌داری ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه است در شکل ۴ نشان داده شده است. به طور کلی دو نوع شکست در نمونه‌ها مشاهده می‌شود. شکست نوع اول از درون نواحی بکر است و درزه‌ها تأثیری در پروسه شکست ندارد (شکل ۴- الف و ب) و در شکست نوع دوم علاوه بر آسیب نواحی بکر سنگ، درزه‌های مجاور به یکدیگر متصل می‌شوند (شکل ۴- پ، ت، ث و ج).



(پ)



(ب)



(الف)



(ج)



(ث)



(ت)

شکل ۴- نمونه‌های شکسته شده با طول درزه یک سانتی‌متر و زاویه‌های الف) ۰، ب) ۱۵، پ) ۳۰، ت) ۴۵، ث) ۶۰ و ج) ۷۵ درجه

علاوه بر آسیب نواحی بکر سنگ، درزه‌های مجاور به یکدیگر متصل می‌شوند (شکل ۵- پ، ت، ث).

۴-۳- رشد ترک در نمونه‌های با طول درزه ۳ سانتی‌متر و زاویه‌داری ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه

الگوی شکست در ۶ نمونه که هر کدام دارای ۴ درزه با طول ۳ سانتی‌متر و زاویه‌داری ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه است در شکل ۶ نشان داده شده است. در این آرایه یک الگوی شکست غالب مشاهده می‌شود. به

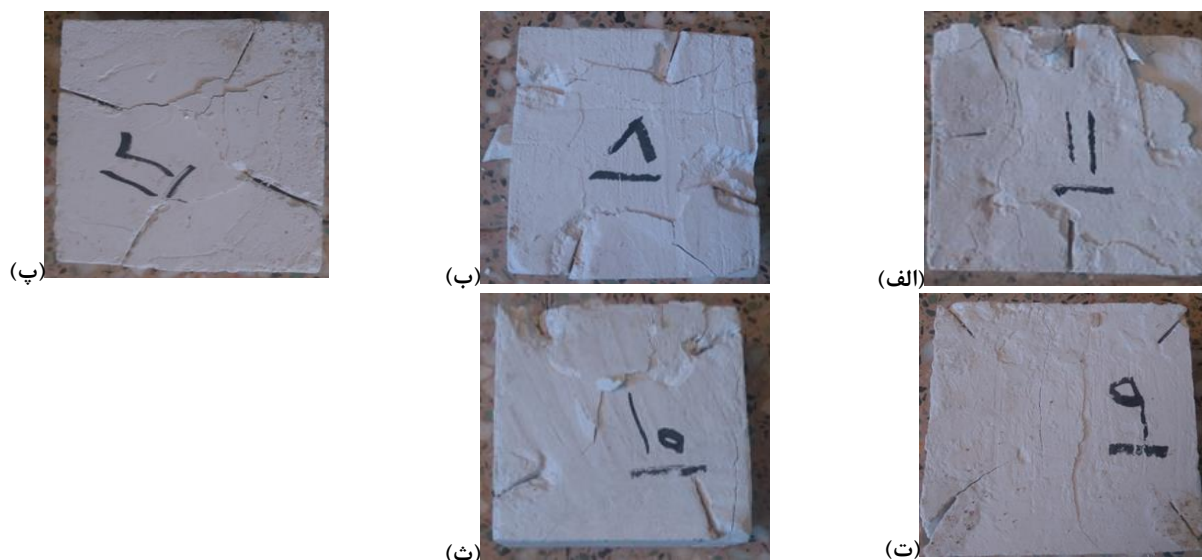
۴-۲- رشد ترک در نمونه‌های با طول درزه ۲ سانتی‌متر و زاویه‌داری ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه

الگوی شکست در ۵ نمونه که هر کدام دارای ۴ درزه با طول ۲ سانتی‌متر و زاویه‌داری ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه‌اند در شکل ۵ نشان داده شده است. به طور کلی دو نوع شکست در نمونه‌ها مشاهده می‌شود. شکست نوع اول از درون نواحی بکر است و درزه‌ها تأثیری در پروسه شکست ندارد (شکل ۵- الف و ب) و در شکست نوع دوم

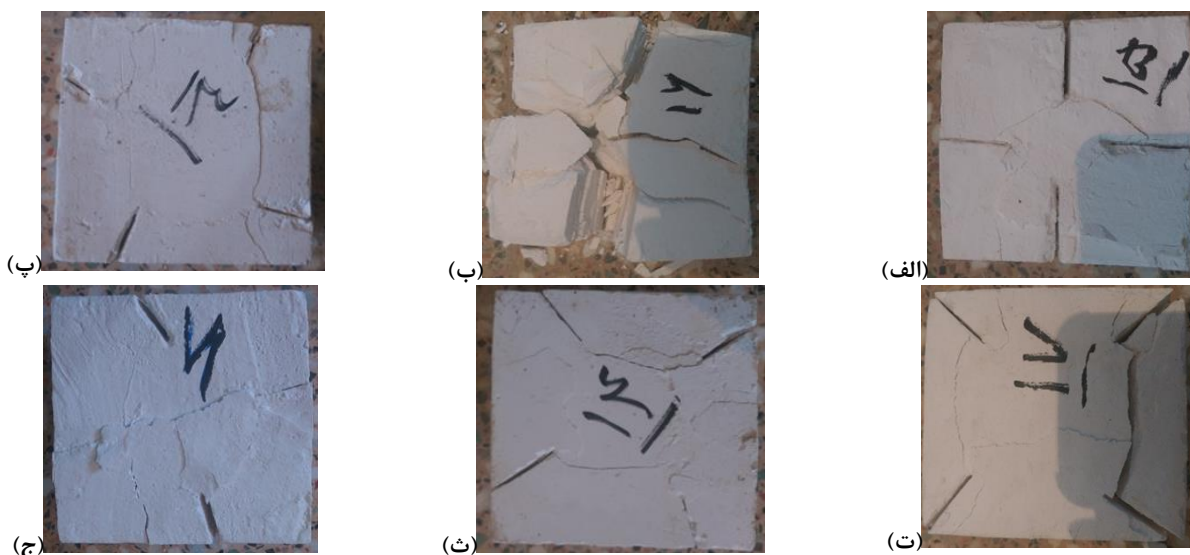
است در شکل ۷ نشان داده شده است. در این آرایه نیز یک الگوی شکست قابل مشاهده است. به طور کلی علاوه بر آسیب نواحی داخلی بکر سنگ، درزه‌های مجاور به یکدیگر متصل می‌شوند.

طور کلی علاوه بر آسیب نواحی بکر سنگ، درزه‌های مجاور به یکدیگر متصل می‌شوند.
۴-۴- رشد ترک در نمونه‌های با طول درزه ۴ سانتی‌متر و زاویه-داری ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۷۵ درجه

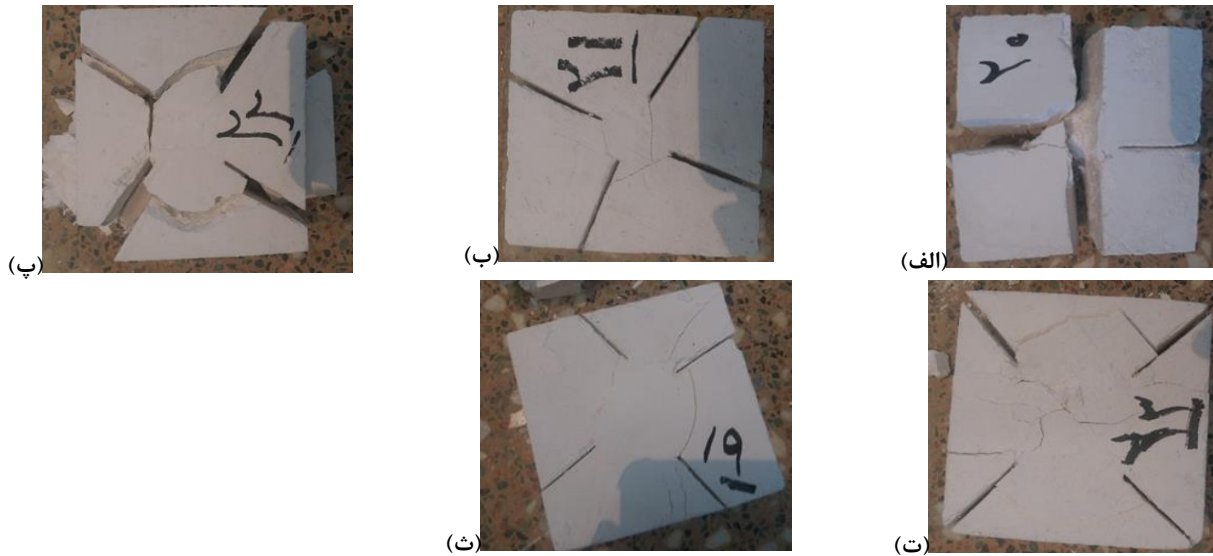
الگوی شکست در ۵ نمونه که هر کدام دارای ۴ درزه با طول ۴ سانتی‌متر و زاویه‌داری ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۷۵ درجه



شکل ۵- نمونه‌های شکسته شده با طول درزه ۲ سانتی‌متر و زاویه‌های، الف) ۰، ب) ۱۵، پ) ۳۰، ت) ۴۵ و ث) ۶۰ درجه



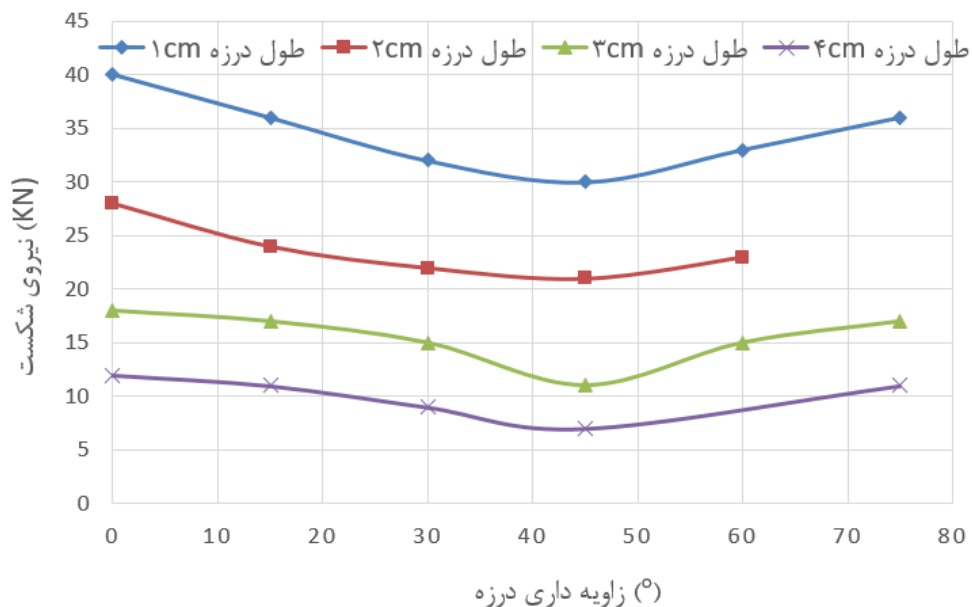
شکل ۶- نمونه‌های شکسته شده با طول درزه ۳ سانتی‌متر و زاویه‌های، الف) ۰، ب) ۱۵، پ) ۳۰، ت) ۴۵، ث) ۶۰ و ج) ۷۵ درجه



شکل ۷- نمونه‌های شکسته شده با طول درزه ۳ سانتی‌متر و زاویه‌های الف) ۰، ب) ۱۵، پ) ۳۰، ت) ۴۵ و ث) ۷۵ درجه

بیشترین نیروی شکست ثبت شده است. همچنین با افزایش طول درزه از ۱ به ۴ سانتی‌متر نیروی شکست کاهش می‌یابد.

۴-۵- بررسی تاثیر زاویه‌داری درزه ناممتد بر نیروی شکست نمونه‌ها تغییرات نیروی شکست براساس زاویه‌داری درزه برای طول‌های مختلف درزه در شکل ۸ نشان داده شده است. در زاویه‌داری‌های ۴۵ درجه کمترین مقدار مقاومت ثبت شده است. در زاویه‌داری‌های صفر و ۷۵ درجه



شکل ۸- تغییرات نیروی شکست براساس زاویه‌داری درزه برای طول‌های مختلف درزه

۵-مدلسازی عددی

۱-۵- معرفی نرم‌افزار PFC2D

کد جریان ذره دوبعدی، یک کد اجزا مجزا است که سنگ را با مجموعه‌ای از دیسک‌های به هم چسبیده مدل می‌کند [۱۷]. این دیسک‌ها ممکن است نسبت به یکدیگر جابه‌جایی داشته و در فصل مشترک، با یکدیگر اندرکنش داشته باشند. میزان جابه‌جایی و اندرکنش نیروها با روش تفاضل محدود محاسبه می‌شود [۱۸]. این روش در شناسایی شکست موثر است و پیچیدگی‌های محاسباتی ندارد [۱۹].

تماس بین ذرات با اتصال‌های خطی یا غیرخطی معرفی می‌شود. اتصال خطی که در این مقاله از آن استفاده شده است، رابطه الاستیک را بین تغییرشکل و نیروهای اعمال شده به دیسک‌ها مهیا می‌کند. دیسک‌ها در PFC در یک نقطه به یکدیگر متصل می‌شوند که در فصل مشترک آن‌ها فنرهایی با سختی نرمال و برشی قرار دارد. زمانیکه مدل تحت بار خارجی قرار می‌گیرد، در محل تماس دو دیسک جابه‌جایی ایجاد می‌شود. این جابه‌جایی باعث اعمال نیرو به فنرها می‌شود که این نیرو برابر با حاصل ضرب جابه‌جایی در سختی فنرها است. همچنین زمانیکه چرخش در دیسک‌ها ایجاد می‌شود، این چرخش نیز باعث جابه‌جایی در محل تماس شده و منجر به اعمال نیرو در فنرها می‌شود. زمانیکه تنش حاصل از این نیروها بر مقاومت فنرها غلبه کند، آن فنر گسیخته شده و یک شکستگی ایجاد می‌شود. در PFC مقاومت فنرها با دو اتصال تماسی و موازی معرفی می‌شود. مدل اتصال موازی که در این مقاله از آن استفاده شده است با مشخصه‌های زیر معرفی می‌شود:

مدول یانگ دیسک‌ها، نسبت سختی نرمال به سختی برشی دیسک، ضریب اصطکاک دیسک، مقاومت نرمال اتصال موازی، مقاومت برشی اتصال موازی، نسبت انحراف استاندارد به انحراف میانگین مقاومت نرمال، نسبت انحراف استاندارد به انحراف میانگین مقاومت برشی، مینیمم شعاع دیسک‌ها، ضریب افزایش‌دهنده شعاع دیسک، مدول یانگ اتصال موازی دیسک‌ها و نسبت سختی نرمال به سختی برشی اتصال موازی

با انتخاب مناسب این میکروپارامترها می‌توان مدل عددی را به گونه‌ای واسنجی کرد که رفتار نمونه طبیعی را داشته باشد. در ادامه مراحل آماده‌سازی مدل عددی، تعیین میکروپارامترهای فوق و واسنجی مدل، آماده‌سازی مدل‌های اصلی، انواع هندسه تیغه‌ها و نحوه بارگذاری مدل ارائه شده است.

۲-۵- مراحل آماده‌سازی مدل عددی اولیه

به طور کلی آماده‌سازی مدل در نرم‌افزار PFC2D شامل ۵ مرحله ایجاد مرزهای مدل و تولید دیسک‌ها با ابعاد مورد نظر، فشردگی اولیه ذرات، اعمال تنش ایزوتروپیک و کاهش تعداد ذرات معلق و اعمال پیوندهای موازی است.

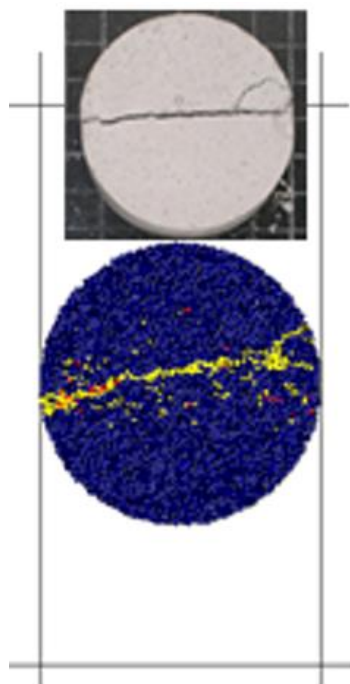
۳-۵- واسنجی مدل

بعد از ساخت مدل اولیه باید مدل را واسنجی کرد. به عبارت دیگر باید میکروپارامترهای معرفی شده فوق را به گونه‌ای تعیین کرد که رفتار مکانیکی مدل عددی (مقاومت کششی) و نمونه آزمایشگاهی یکسان شود. با سعی و خطا، میکروپارامترها به گونه‌ای انتخاب شدند که مدل عددی با مقاومت کششی یک مگاپاسکال حاصل شود (جدول ۱).

جدول ۱- میکروپارامترهای مورد نیاز برای ساخت مدل عددی با مقاومت کششی یک مگاپاسکال

| مقادیر | میکروخصوصیات | مقادیر | میکروخصوصیات |
|--------|------------------------------------|--------|------------------------------------|
| ۱ | افزایش‌دهنده شعاع اتصال موازی | دیسکی | نوع ذره |
| ۵ | مدول یانگ اتصال موازی (گیگاپاسکال) | ۱۰۰۰ | دانسیته (کیلوگرم / سانتی‌متر مکعب) |
| ۳ | نسبت سختی‌های اتصال موازی | ۰/۲۷ | مینیمم شعاع دیسک (میلی‌متر) |
| ۰/۵ | ضریب اصطکاک | ۱/۷۶ | نسبت مینیمم شعاع به ماکزیمم شعاع |

| | | دیسک | |
|---|--|------|------------------------------|
| ۶ | مقاومت نرمال اتصال موازی، میانگین (مگاپاسکال) | ۰/۰۸ | نسبت تخلخل |
| ۲ | مقاومت نرمال اتصال موازی، انحراف استاندارد (مگاپاسکال) | ۰/۷ | ضریب میرایی (α) |
| ۶ | مقاومت برشی اتصال موازی، میانگین (مگاپاسکال) | ۵ | مدول یانگ تماسی (گیگاپاسکال) |
| ۲ | مقاومت برشی اتصال موازی، انحراف استاندارد (مگاپاسکال) | ۳ | نسبت سختی های اتصال تماسی |



الگوهای شکست مدل‌های عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۹ نشان داده شده است. خطوط زردرنگ (رنگ روشن) و قرمز رنگ (رنگ تیره) نشان‌دهنده ترک‌های کششی و ترک‌های برشی است. به طور کلی مود شکست کششی، مود شکست غالب است که در مدل عددی رخ می‌دهد که مشابه نمونه آزمایشگاهی است، همچنین الگوی شکست مدل‌های عددی مشابه الگوی شکست نمونه‌های آزمایشگاهی است که نشان‌دهنده واسنجی مقارنت کششی برزیلی است.

شکل ۹- الگوی شکست مدل‌های عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی

۵-۴- آماده‌سازی مدل اصلی

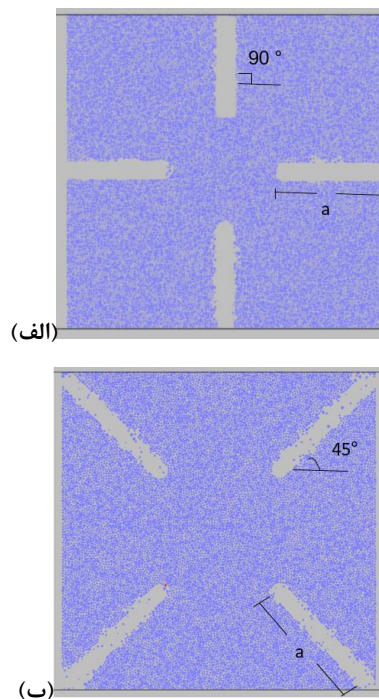
بعد از واسنجی مدل، مدل‌های عددی با ابعاد 110×110 میلی‌متر ساخته شد (شکل ۱۰). این مدل‌ها 23456 دیسک دارند. دو آرایه درزه با زاویه 45° و صفر درجه ساخته شد. در هر زاویه‌داری، طول درزه های a یکسان و برابر ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر است. به طور کلی ۸ مدل عددی ساخته شد.

زمانیکه طول درزه یک سانتی‌متر است، ترک‌های کششی مود غالب شکست‌اند که در مدل اتفاق می‌افتد. در این آرایه، نواحی بکر مدل نیز با نوارهای برشی گسیخته می‌شود. با مقایسه شکل ۱۱-الف و ۴-الف می‌توان دریافت که الگوی شکست مشابهی در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی به وقوع پیوسته است.

زمانیکه طول درزه دو سانتی‌متر است، ترک‌های کششی مود غالب شکست‌اند که در مدل اتفاق می‌افتد. در این آرایه، درزه‌های ناممتد بالا و پایین با ترک‌های مورب به بالا و پایین نمونه متصل می‌شوند. نواحی بکر مدل نیز با نوارهای برشی گسیخته می‌شود. با مقایسه شکل ۱۱-ب و ۵-الف می‌توان دریافت که الگوی شکست مشابهی در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی به وقوع پیوسته است.

زمانیکه طول درزه سه سانتی‌متر است، ترک‌های کششی مود غالب شکست‌اند که در مدل اتفاق می‌افتد. در این آرایه، درزه‌های ناممتد بالا و پایین با ترک‌های مورب به بالا و پایین نمونه متصل می‌شوند، همچنین مجموعه‌ای از نوارهای برشی نوک درزه سمت راست را به پایین مدل و نوک درزه سمت چپ را به بالای مدل وصل می‌کند. با مقایسه شکل ۱۱-پ و ۶-الف می‌توان دریافت که الگوی شکست مشابهی در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی به وقوع پیوسته است.

زمانیکه طول درزه چهار سانتی‌متر است، ترک‌های کششی مود غالب شکست‌اند که در مدل اتفاق می‌افتد. در این آرایه، درزه‌های ناممتد بالا و پایین با ترک‌های مورب به بالا و پایین نمونه متصل می‌شوند، همچنین درزه‌های ناممتد با نوارهای برشی به یکدیگر متصل می‌شوند. با مقایسه شکل ۱۱-ت و ۷-الف می‌توان دریافت که الگوی شکست مشابهی در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی به وقوع پیوسته است.



شکل ۱۰- مدل عددی با زاویه‌داری الف) ۹۰ درجه و ب) ۴۵ درجه

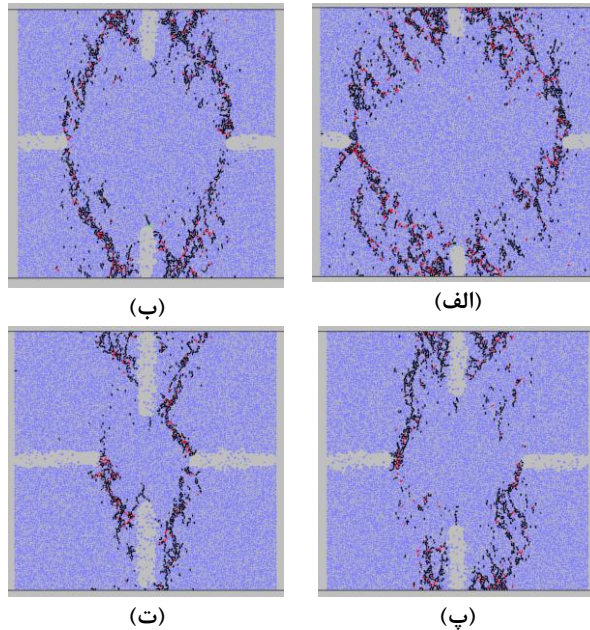
۵-۵-بارگذاری مدل‌ها

اعمال تنش در برنامه PFC با دیوارهای مدل انجام می‌شود. سختی نرمال و برشی دیوارها، ۲ برابر سختی دیسک‌ها انتخاب می‌شود تا دیوارها نسبت به مدل سخت‌تر باشند و صلابت آزمایش حفظ شود. زاویه اصطکاک دیوارها در مدل صفر انتخاب می‌شود تا اصطکاک بین دیوار و مدل ایجاد نشود. در تمام آزمایش‌ها، آهنگ بارگذاری استاتیکی دیوار برابر ۰/۰۲ متر / ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

۱-۶- تاثیر طول درزه بر مکانیزم شکست مدل‌های حاوی درزه-های صفر درجه

توزیع ترک‌ها در مدل‌های حاوی درزه‌های ناممتد با زاویه‌داری صفر درجه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. ترک‌های قرمز و سیاه رنگ به ترتیب نشان‌دهنده ترک‌های برشی و کششی‌اند.



شکل ۱۱- توزیع ترک‌ها در مدل‌های حاوی درزه‌های ناممتمد با زاویه صفر درجه و طول‌های، (الف)، (ب)، (پ) ۳ و (ت) ۴ سانتی‌متر

شوند. با مقایسه شکل ۱۲- ب و ۵- ت می‌توان دریافت که الگوی شکست مشابهی در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی به وقوع پیوسته است.

زمانیکه طول درزه سه سانتی‌متر است، ترک‌های کششی مود غالب شکست‌اند که در مدل اتفاق می‌افتد. در این آرایه، درزه‌های ناممتمد با ترک‌های مورب به بالا و پایین نمونه متصل می‌شوند. نواحی بکر مدل نیز با نوارهای برشی گسیخته می‌شود. با مقایسه شکل ۱۲- پ و ۶- ت می‌توان دریافت که الگوی شکست مشابهی در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی به وقوع پیوسته است.

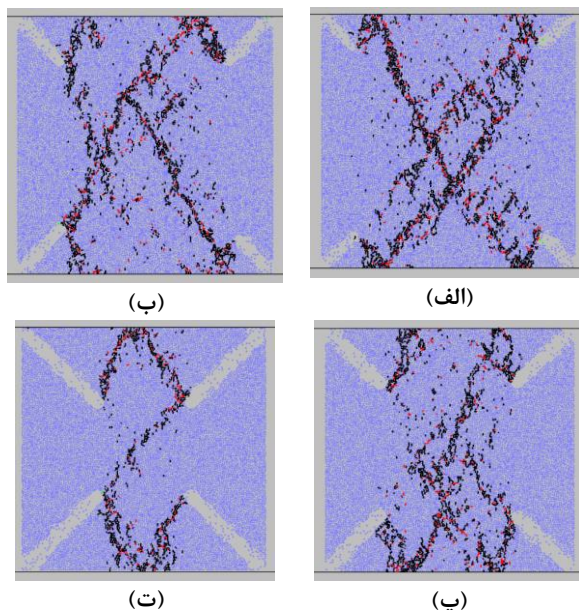
زمانیکه طول درزه چهار سانتی‌متر است، ترک‌های کششی مود غالب شکست‌اند که در مدل اتفاق می‌افتد. در این آرایه، درزه‌های ناممتمد با ترک‌های مورب به بالا و پایین نمونه متصل می‌شوند. در این آرایه، درزه‌های ناممتمد سمت راست بالا و سمت چپ پایین با ترک‌های کششی به یکدیگر متصل می‌شوند. با مقایسه شکل ۱۲- ت و ۷- ت می‌توان دریافت که الگوی شکست مشابهی در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی به وقوع پیوسته است.

۲-۶- تاثیر طول درزه بر مکانیزم شکست مدل‌های حاوی درزه‌های ۴۵ درجه

توزیع ترک‌ها در مدل‌های حاوی درزه‌های ناممتمد با زاویه‌داری ۴۵ درجه در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ترک‌های قرمز و سیاه رنگ به ترتیب نماینده ترک‌های برشی و کششی‌اند.

زمانیکه طول درزه یک سانتی‌متر است، ترک‌های کششی مود غالب شکست‌اند که در مدل اتفاق می‌افتد. در این آرایه، درزه‌های ناممتمد با ترک‌های مورب به بالا و پایین نمونه متصل می‌شوند. نواحی بکر مدل نیز با نوارهای برشی گسیخته می‌شود. با مقایسه شکل ۱۲- الف و ۴- ت می‌توان دریافت که الگوی شکست مشابهی در مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی به وقوع پیوسته است.

زمانیکه طول درزه دو سانتی‌متر است، ترک‌های کششی مود غالب شکست‌اند که در مدل اتفاق می‌افتد. در این آرایه، درزه‌های ناممتمد با ترک‌های مورب به بالا و پایین نمونه متصل می‌شوند. نواحی بکر مدل نیز با نوارهای برشی گسیخته می‌شود. درزه‌های سمت چپ مدل با ترک‌های عمده تا کششی به یکدیگر متصل می‌-



شکل ۱۲- توزیع ترک‌ها در مدل‌های حاوی درزه‌های ناممتد با زاویه ۴۵ درجه و طول‌های (الف) ۱، (ب) ۲، (پ) ۳ و (ت) ۴ سانتی‌متر

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار نمونه‌های ساخته شده از گچ که حاوی درزه‌هایی با طول ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر و زاویه‌داری ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه است تحت بارگذاری تک‌محوری بررسی شده است. برای این منظور تعداد ۲۴ نمونه به صورت آزمایشگاهی مطالعه شد. همزمان با تست‌های آزمایشگاهی، مدلسازی عددی با نرم‌افزار PFC2D انجام شد که نتایج آن به شرح زیر است:

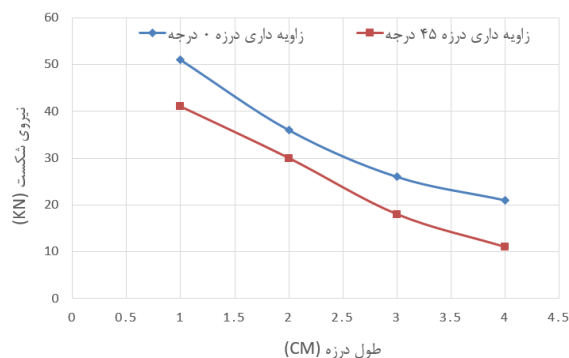
- زمانیکه طول درزه یک سانتی‌متر است، دو نوع شکست در نمونه‌ها مشاهده می‌شود. شکست نوع اول از درون نواحی بکر است و درزه‌ها تاثیری در پروسه شکست ندارند. در شکست نوع دوم علاوه بر آسیب نواحی بکر سنگ، درزه‌های مجاور به یکدیگر متصل می‌شوند. با افزایش طول درزه، فقط شکست نوع دوم به وقوع می‌پیوندد.

- در زاویه ۴۵ درجه کمترین میزان نیروی شکست ثبت شده است. در زاویه صفر و ۷۵ درجه بیشترین نیروی شکست ثبت شده است.

- در مدل‌های عددی زمانیکه طول درزه‌ها کم است، شکست عمدتاً در لبه‌های بالا و پایین رخ می‌دهد.

۳-۶- بررسی تاثیر طول درزه‌های ناممتد بر نیروی شکست مدل‌ها

تغییرات نیروی شکست مدل عددی براساس طول درزه برای زاویه‌داری‌های مختلف درزه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش طول درزه، نیروی شکست کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه‌داری درزه از صفر به ۴۵ درجه، نیروی شکست کاهش می‌یابد. این رفتار در تطابق خوبی با رفتار نمونه آزمایشگاهی شکل ۳ است. با مقایسه شکل ۳ و شکل ۲ می‌توان دریافت که نیروی شکست مدل‌های عددی بیشتر از نمونه‌های آزمایشگاهی است. این پدیده به دلیل نقص PFC ورژن ۳ است که نسبت مقاومت تک-محوره به مقاومت کششی را کمتر از حد معمول تقریب می‌زند.



شکل ۱۳- تغییرات نیروی شکست بر اساس طول درزه برای زاویه‌داری‌های مختلف درزه

7. Zhang HQ, Zhao ZY, Tang CA, Song L, 2006, "Numerical study of shear behavior of intermittent rock joints with different geometrical parameters". *Intl J Rock Mech Min Sci* 43: 802– 816.
 8. Ghazvinian A, Sarfarazi V, Schubert W, Blumel M, 2011, "A study of the failure mechanism of planar non- persistent open joints using PFC2D". *Rock Mech Rock Eng J* 45: 677– 693.
 9. Bobet, A, Einstein, H.H, 1998, "Fracture coalescence in rock-type materials under uniaxial and biaxial compression". *Intl. J. Rock Mech. Min. Sci.* 35, 863-888.
 10. Lajtai, E.Z, 1969, "Strength of discontinuous rock in direct shearing". *Geotechnique.* 19, 218–233.
 11. Einstein HH. Veneziano D. Baecher GB. O'Reilly KJ. 1983 "The effect of discontinuity persistence on rock slope stability". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 20(5), pp. 227–36
 12. Shen, B, Stephansson, O, Einstein, H.H. Ghahreman, B, 1995, "Coalescence of fracture under shear stresses in experiments". *J. Geophys. Res.* 100, 725–729.
 13. Bobet, A, 2000, "The initiation of secondary cracks in compression". *Eng. Fract. Mech.* 66, 187–219.
 14. Wong, R.H.C. Chau, K.T. Tang, C.A. Lin, P, 2001, "Analysis of crack coalescence in rock-part I: experimental approach". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38, 909–924.
 15. Mughieda and A.K. Alzoubi, 2004, "Fracture mechanisms of offset rock joints-A laboratory investigation". *Geotech. Geol. Eng* 22: 545-562.
 16. Mughieda, O.S. and I. Khawaldeh, 2006, "Coalescence of offset rock joints under biaxial loading". *Geotech. Geol. Eng.* 24: 985-999.
 17. Itasca Consulting Group Inc, "PFC2D/3D (Particle Flow Code in 2/3 Dimensions) User's Guides" Minneapolis, MN, USA, 2004/2005.
 18. Potyondy, D., Cundall, P., 2004. A bonded-particle model for rock. *Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr*, Vol. 41, pp. 1329-1364.
 19. Cundall P (1971) A computer model for simulating progressive large scale movements
- در حالیکه با افزایش طول درزه نواحی بین درزه‌ها نیز می‌شکنند.
- نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که با افزایش طول درزه نیروی شکست کاهش می‌یابد و با افزایش زاویه درزه از صفر به ۴۵ درجه نیروی شکست کم می‌شود.
- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که نتایج عددی در تطابق خوبی با یافته‌های آزمایشگاهی است.
- با توجه به یکسان بودن نتایج نرم‌افزار PFC با نتایج آزمایش‌ها می‌توان نمونه‌هایی که در آزمایشگاه قابل ساخت نیست را به صورت عددی مدل‌سازی و نتیجه‌گیری کرد.
- منابع و مراجع
1. Wang, Xin, P. H. S. W. Kulatilake, and Weidong Song, 2012, "Stability investigations around a mine tunnel through three-dimensional discontinuum and continuum stress analyses. *Tunnelling and Underground Space Technology* 32: 98-112.
 2. Einstein HH, Veneziano D, Baecher GB, O'Reilly KJ, 1983, "The effect of discontinuity persistence on rock slope stability". *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 20: 227– 236.
 3. Gehle C, Kutter HK, 2003, "Breakage and shear behavior of intermittent rock joints". *Int J Rock Mech Min Sci* 40: 687– 700.
 4. Cho N, Martin CD, Sego DC, 2008, "Development of a shear zone in brittle rock subjected to direct shear". *Int J Rock Mech Min Sci* 45: 1335– 1346.
 5. Wong RHC, Leung WL, Wang SW, 2001, "Shear strength study on rock-like models containing arrayed open joints". In: Elsworth D Tinucci JP, Heasley KA (eds) *Rock mechanics in the national interest. Swets&Zeitlinger Lisse, Leiden*, pp 843–849. (ISBN: 90- 2651- 827- 7).
 6. Ghazvinian A, Nikudel MR, Sarfarazi V, 2007, "Effect of rock bridge continuity and area on shear behavior of joints". 11th congress of the international society of rock mechanics, Lisbon, Portug.

mechanics, vol1. Nancy, France. Paper no. II-8

in blocky rock systems. In: Proceedings of the symposium of international society of rock

