

بررسی تاثیر زاویه‌داری سرتمه PDC بر مکانیزم شکست نمونه شبه سنگی بصورت آزمایشگاهی و عددی

وهاب سرفرازی^۱، حسام دهقانی^۱، شیرین جهانمیری^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

۲- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان

(دریافت ۱۳۹۹/۰۴/۰۳، پذیرش ۱۳۹۹/۱۱/۱۹)

چکیده

در این مقاله با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، تاثیر زاویه‌داری سرتمه PDC بر مکانیزم شکست نمونه‌های شبه سنگی بررسی شده است. به این منظور، سه جفت سرتمه PDC با زاویه برنده صفر، ۳۰ و ۶۰ درجه ساخته شد. ۹ نمونه شبه سنگی گچ با ابعاد ۵ cm*۱۱ cm*۱۴ cm آماده‌سازی شد. نسبت گچ به آب، ۲ در نظر گرفته شد. برای هر زاویه‌داری سرتمه، ۳ نمونه گچ تحت آزمایش قرار گرفت. نمونه گچ بالای سرتمه‌ها نصب شده و مجموعه‌ها تحت آزمایش تک محوره قرار گرفتند. نرخ بارگذاری ۰/۰۵ mm/min است. همزمان با تست‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی به وسیله نرم‌افزار کد جریان ذره انجام شد. به این ترتیب که ابتدا نرم‌افزار PFC برای گچ کالیبره شد. در مرحله دوم، مدل عددی با ابعاد ۵ cm*۱۱ cm*۱۴ cm آماده شد، سپس هفت جفت سرتمه با زاویه‌داری، صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه شبیه‌سازی شد و در قسمت تحتانی مدل عددی قرار گرفت. سرتمه‌ها با نرخ ۰/۰۱ mm/sec به سمت مدل حرکت کرده و باعث شکست مدل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که الگوی شکست نمونه‌ها تابع زاویه‌داری سرتمه است. همچنین مقاومت نمونه‌ها توسط الگوی شکست نمونه‌ها کنترل می‌شود. با افزایش زاویه‌داری نمونه، نیروی شکست کاهش می‌یابد. بیشترین نیروی شکست مربوط به زاویه داری صفر درجه و کمترین نیروی شکست مربوط به زاویه‌داری ۶۰ درجه است. الگوی شکست مدل‌های عددی و نمونه‌های آزمایشگاهی یکسان است.

کلمات کلیدی

PFC2D، سرتمه، ترک کششی.

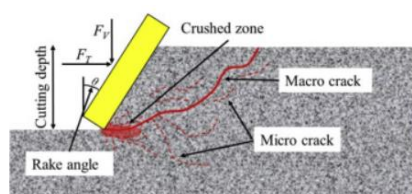
۱- مقدمه

حفاری دورانی- ضربه‌ای سنگ یکی از فعالیت‌های اصلی در صنایع معدن، عمران و نفت است. یکی از تجهیزات جانبی مورد استفاده در این نوع حفاری، سرمته است. سرمته به بخش انتهایی رشته حفاری متصل شده و باعث حفر زمین می‌گردد. با توجه به اتصال سرمته به کف چال، می‌توان آن را به عنوان اصلی‌ترین المان حفاری نام برد. در نتیجه عملکرد سرمته‌ها در سرعت و چگونگی عملیات حفاری تاثیر بسزایی دارد. سرمته‌ها بر اساس اصول زیر طراحی می‌شوند: (۱) مته‌هایی که باعث خراشیدگی و خرد شدن سنگ می‌شوند. (۲) مته‌هایی که با ایجاد بریدگی و خراش‌اندازی موجب نفوذ در سنگ می‌شوند. (۳) مته‌هایی که همزمان باعث خراش‌اندازی و خرد شدن سنگ می‌شوند. (۴) مته‌هایی که در اثر اعمال ضربه و کوبیدن به سنگ عمل می‌کنند.

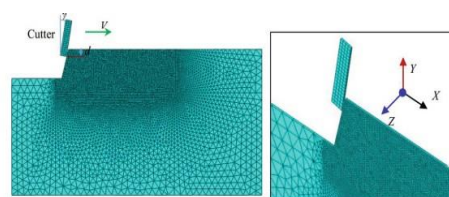
مته‌هایی که در حفاری چرخشی استفاده می‌شوند، از جنس فولاد، الماس و کاربید تنگستن‌اند. در ماشین‌های حفاری چرخشی، مته و لوله‌ها هر دو می‌چرخند و انرژی حفاری از این طریق به سنگ وارد می‌شود. به عبارت دیگر حفاری از طریق ترکیب انرژی چرخشی و فشار روی مته انجام می‌شود. تنشی که از طریق مته به سنگ وارد می‌شود، از نوع مماسی است. سرعت حفاری در این نوع سیستم عمدتاً به نوع سنگ، مقدار انرژی چرخشی و فشار روی مته بستگی دارد. نوع مته‌ای که برای عملیات حفاری انتخاب می‌شود، به سازندی که باید حفاری در آن صورت گیرد، بستگی دارد. معمولاً برای حفاری از دو نوع مته اصلی (کاج غلتان و تیغه ثابت) استفاده می‌شود. نوع تیغه ثابت، گران‌تر ولی سریع‌تر از نوع کاج غلتان است.

یکی از سرمته‌های قابل کاربرد در سنگ سخت، سرمته الماسه است که به دو نوع PDC^۱ و TSP^۲ تقسیم می‌شود. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در صنایع معدن و متالورژی، استفاده از سرمته‌های PDC افزایش یافته و توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. از سال ۱۹۶۶، مطالعه درباره مکانیزم شکست ناشی از حفاری به وسیله سرمته‌ها در عمق توسط چت هام و همکاران آغاز شد [۱]. کارپنتر و همکاران مکانیزم شکست و گسیختگی سنگ را به صورت عددی مدل کردند و تغییر شکل پلاستیک را حین حفاری بررسی کردند. آنها با در نظر گرفتن اینکه وجود ترک‌ها در سنگ می‌تواند تاثیر بسزایی بر روند حفاری و شکست سنگ داشته باشد،

در ترکیبات مختلف سنگی و با در نظر گرفتن ناپیوستگی‌ها مکانیزم شکست سنگ را مدلسازی کردند. آنها دریافتند که وجود ترک‌ها تا حد معینی باعث می‌شود که سنگ سریع‌تر شکسته بشود. آنها همچنین شرایط مختلف شکستگی در سنگ را در مراحل زمانی مختلف حفاری مدلسازی کردند [۱]. فرانسوا اندرکنش بین سرمته و سنگ را در حفاری‌های دورانی ضربه‌ای مدل کرد. او علاوه بر در نظر گرفتن روند حفاری با سرمته‌های دورانی ضربه‌ای، تاثیر انحراف حفاری بر مکانیزم شکست سنگ را بررسی کرد [۲]. در این مطالعه رابطه بین نیروی لازم وارد شده به سرمته برای رسیدن به نرخ نفوذ معین مشخص شده است. ژو و همکاران گسیختگی سنگ را زیر بار دینامیکی و استاتیکی سرمته دورانی شبیه‌سازی کردند. آنها فشار میله حفاری را در شکافتن چال حفاری بسیار موثر دانسته و کار آزمایشگاهی خود را با شرط افزایش و کاهش فشار راد و در نتیجه فشار پشت سرمته انجام دادند و تاثیر نیروی پشت سرمته بر مکانیزم شکست سنگ را در تست‌های مختلف مطالعه کردند [۳]. سلوان شکست سنگ در مرکز چال را به صورت سه بعدی به وسیله نرم‌افزار RFPA3D^۳ مدلسازی کردند [۴]. انتاچر گسیختگی و شکست سنگ در نمونه‌های دیسکی تحت فشار ابزار سرمته را مدلسازی کردند [۵]. گیو و همکاران گسیختگی سنگ‌های خرد شده حین حفاری با استفاده از روش المان مجزا را مدلسازی کردند و ارتباط چسبندگی ذرات را با شکست آنها حین حفاری بررسی کردند [۶]. تیان نوعی جدید از سرمته با مدل شبه گردبادی را مدلسازی کردند. آنها با فرض اینکه سرمته‌های دورانی مانند گردباد حفاری می‌کنند و ذرات پراکنده در انتهای چال حکم ذرات گردباد را دارند مدلسازی جدید خود را ایجاد کرده و بر اساس سرعت دوران سرمته، مکانیزم شکست را بررسی کردند [۷]. ژو و همکاران برش سنگ به وسیله سرمته‌های چرخشی را شبیه‌سازی کردند آنها با بهره گرفتن از سرمته‌های PDC مدل خود را در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار دادند [۸]. لی مکانیزم شکست سنگ در برش‌های دورانی ضربه‌ای سرمته‌های تکی PDC را بررسی و مدلسازی کردند [۹]. شکل ۱ مدلسازی برش سنگ با روش المان محدود به وسیله برنده‌های سرمته PDC را نشان می‌دهد. آنها در عمق‌های مختلف برش نحوه برش را مدلسازی کردند. بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط لی، زاویه مطلوب برنده با محور قایم بین صفر درجه تا ۶۰ درجه تعیین شد (شکل ۱-ب) [۹].



(ب)



(الف)

شکل ۱: (الف) مدلسازی برش سنگ با روش المان محدود توسط برنده‌های سرمته PDC [۹]، (ب) زاویه برنده با محور قائم بین صفر درجه تا ۶۰ درجه [۹]

چنگ و همکاران مدلی برای تحلیل نیروی برش سنگ و گسیختگی سطحی در تست برش خطی برنده‌های تکی PDC ایجاد کردند و تنش برشی ایجاد شده را دخیل بر شکست برشی سنگ دانسته و میزان آن را تخمین زدند [۱۰]. آنها سه نمونه گرانیته، مرمر و سنداستون را تحت برش قرار داده و مکانیزم شکست نمونه‌ها را تحت سرمته‌های PDC مطالعه کردند. لیو رفتار گسیختگی سنگ در برش سنگ با استفاده از روش المان محدود را آنالیز کردند. آنها مدل سه بعدی برش سنگ به وسیله سرمته‌های تکی PDC ایجاد کردند، سپس اندرکنش بین سرمته و سنگ را در مدل المان محدود ایجاد شده بررسی کردند و در نهایت مدل‌های ایجاد شده را در آزمایشگاه کالیبره کردند [۱۱]. اسکیا و همکاران شکست سنگ حین حفر چاه را با پردازش تصویر بررسی کردند. آنها با استفاده از پردازش تصویر اندازه ذرات میکروسکوپی سنگ، مکانیزم شکست سنگ را به صورت میکروسکوپی بررسی کردند [۱۲]. یاری و همکاران با استفاده از نرم‌افزار آباکوس یک مدل المان محدود را برای شبیه‌سازی شکست سنگ توسعه دادند که می‌توانست نیروهای برش را به وسیله پارامترهای مختلف عملیاتی مانند زاویه پشت برش، عمق برش، سرعت برش پیش‌بینی کند [۱۳]. یانژین و همکاران، تاثیر عمق نفوذ برنده PDC بر مکانیزم شکست سنگ را با استفاده از نرم‌افزار PFC مطالعه کردند [۱۴]. منزس و همکاران، سعی در بهینه‌سازی عملیات حفاری برای کاهش هزینه‌های کلی استخراج نفت و گاز کردند. شبیه‌سازی عملیات حفاری ممکن است به انتخاب پارامترها برای بهره‌وری حداکثر حفاری منجر شود. آنها نیروی لازم برای برش در عمق‌های مختلف را مقایسه کردند. در این مطالعه یک مدل کامپیوتری دو بعدی با استفاده از کد جریان ذرات نرم‌افزار PFC برای شبیه‌سازی عمق برش یک برنده ایجاد شد. در مدل ساخته شده توجه زیادی به وزن تیغه، سرعت چرخش و تاثیر انتخاب

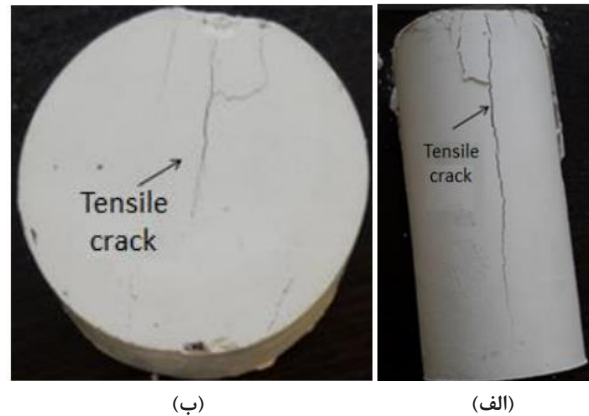
سرمته در عملکرد حفاری شده است [۱۵]. جودی و همکاران با استفاده از دو کدهای Finite element و LS-DYNA عملیات شکست سنگ در طول برش مکانیکی سنگ به وسیله سرمته شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی انجام شده برای زاویه‌های مختلف برنده در عمق‌های مختلف انجام گرفته است. در نهایت نشان داده شد که مدل المان محدود ابزار قدرتمندی برای شبیه‌سازی مکانیزم شکست ناشی از حفاری سنگ به وسیله سرمته است [۱۶]. ریچارد اندرکنش سنگ و سرمته را با استفاده از مدلسازی عددی مطالعه کرد. وی به این نتیجه رسید که مودهای شکست شکننده و شکل‌پذیر تحت تاثیر سختی سنگ‌اند [۱۷، ۱۸]. ریچارد تاثیر عمق برنده را بر مکانیزم شکست سنگ بررسی کرد [۱۹]. ها [۲۰]، ها و همکاران [۲۱]، ها [۲۲]، هوانگ [۲۳]، هوانگ [۲۴] و هوانگ [۲۵] تاثیر عمق برنده را بر مکانیزم شکست سنگ بررسی کردند. آنها یافتند که عمق نفوذ موثر در سنگ رسوبی ۱ cm است. همچنین عمق نفوذ موثر تابعی از مقاومت کششی سنگ و چقرمگی شکست مود کشش سنگ است. در مطالعات اخیر تاثیر زوایای سرمته V شکل بر مکانیزم شکست سنگ بررسی نشده است. در این مقاله به مطالعه آزمایشگاهی و عددی تاثیر زاویه‌داری سرمته V شکل بر مکانیزم شکست نمونه‌های شبه سنگی پرداخته می‌شود.

۲- مراحل انجام آزمون‌های آزمایشگاهی

در این بخش، تاثیر زاویه‌داری برنده v شکل بر الگوی شکست نمونه شبه سنگی و مود شکست نمونه‌ها بررسی می‌شود. در ابتدا به تعیین خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده از گچ پرداخته می‌شود، سپس به نحوه ساخت نمونه‌های بلوکی پرداخته و در ادامه نحوه بارگذاری نمونه‌ها ارائه می‌شود. در خاتمه رفتار شکست نمونه‌ها بررسی می‌گردد.

۱-۲- تعیین خواص مکانیکی نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها، از ترکیب گچ و آب با نسبت ۲ به ۱ استفاده شده است. آزمایش تک محوره و برزیلی روی نمونه‌های استوانه‌ای و دیسکی انجام گردید. نمونه‌های استوانه‌ای دارای قطر ۵۴ mm و ارتفاع ۱۰۸ mm است. نمونه‌های دیسکی دارای قطر ۵۴ mm و ضخامت ۲۷ mm است. شکل ۲-الف و ب الگوی شکست نمونه‌های تک محوره و برزیلی را نشان می‌دهد. جدول ۱ نیز مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲: الگوهای شکست (الف) نمونه تک محوره، (ب) نمونه برزیلی

۲-۲- نحوه ساخت نمونه‌های بلوکی

برای ساخت نمونه‌های بلوکی از ترکیب گچ و آب با نسبت ۲ به ۱ استفاده شده است. مخلوط گچ و آب داخل قالب‌های مخصوصی ریخته می‌شود (شکل ۳). ابعاد این قالب‌ها ۵ cm * ۱۱ cm * ۱۴ cm است (شکل ۳). جنس قالب‌ها از فایبرگلاس بوده که آب جذب نمی‌کند و رطوبت باعث افزایش حجم قالب نمی‌گردد. بعد از مدت ۱۵ روز نمونه‌ها تحت بارگذاری قرار گرفته و نحوه شکست نمونه‌ها بررسی شده است.

۲-۳- آماده‌سازی قالب فولادی U شکل

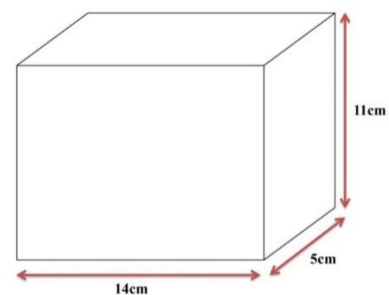
قالب فولادی U شکل، از دو قالب برنده و یک قالب میانی تشکیل شده است. دو قالب برنده به قطعه وسط که مکعبی ۸ سانتی‌متر در ۴ سانتی‌متر در ۳ سانتی‌متر است، وصل می‌شوند. دو قطعه مجاور که به عنوان برنده انتخاب شدند با زاویه‌های مختلف ۳۰ و ۶۰ و ۹۰ درجه تهیه شدند که به صورت جفت به طور کاملاً تراز به قطعه وسط متصل می‌شوند. این برنده‌ها شبیه نوک سرمته PDC است. برای اینکه بتوان تست‌های آزمایشگاهی را انجام داد، دو عدد برنده انتخاب گردید تا تقارن حفظ گردد و نمونه شبه سنگی روی برنده‌ها تعادل داشته باشد. شکل ۴ نمای شماتیک قالب را نشان می‌دهد. شکل‌های ۵ و ۶ قطعات و نحوه اتصال را نشان می‌دهد.

۲-۴- نحوه بارگذاری نمونه‌های بکر

به منظور انجام بارگذاری بر نمونه‌ها، ابزار U شکل روی فک پایینی ماشین بارگذاری قرار داده می‌شود (شکل ۷-الف)، سپس نمونه گچ بین فک بالایی و ابزار U شکل نصب می‌شود (شکل ۷-ب). این ابزار بار را به طور خطی به نمونه منتقل می‌کند. نرخ بارگذاری ماشین (mm/s) ۰٫۰۱ تنظیم شده

جدول ۱: مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها

۱۰٫۵	مقاومت فشاری (MPa)
۱٫۳	مقاومت کششی (MPa)



شکل ۳: ابعاد داخلی قالب ساخته شده برای تهیه نمونه‌های گچ

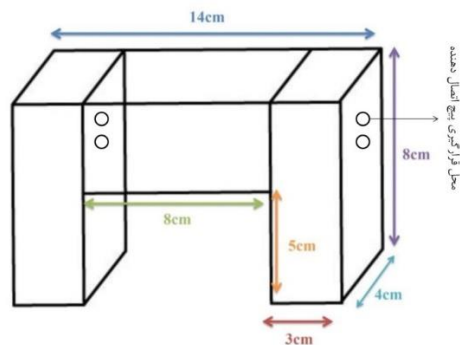
است. شکل ۷-ج طرح شماتیکی از نمونه و ابزار برش را نشان می‌دهد. الگوی شکست نمونه‌ها و نیروی شکست آنها برداشت شده و مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۳- نتایج آزمایش

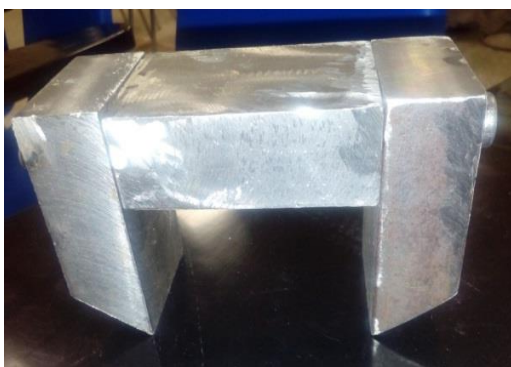
۳-۱- الگوی شکست نمونه‌ها

الف) زاویه برنده صفر درجه

شکل ۸ الگوی شکست نمونه‌ها زیر برنده صفر درجه را نشان می‌دهد. در این آرایش، دو و یا سه ترک کششی از زیر



شکل ۴: ابعاد کلی قالب U شکل فولادی



(الف)

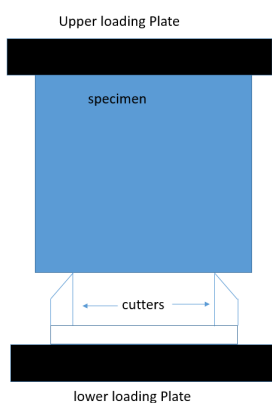


(ب)



شکل ۵: قسمت‌های جدا شده برنده‌ها در قالب فولادی

شکل ۶: نحوه اتصال قالب بعد از وصل کردن برنده‌ها و قطعه وسط متصل‌کننده



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۷: الف) قرارگیری ابزار U شکل روی فک پایینی ماشین بارگذاری، ب) قرارگیری نمونه بین فک بالایی ماشین بارگذاری و ابزار U شکل، ج) شکل شماتیک از نحوه بارگذاری نمونه‌ها

شده، به طور مورب رشد کرده و به لبه جانبی نمونه متصل می‌شود. بازبینی سطح شکست نشان‌دهنده سطح صاف و صیقل است که بیانگر ترک کششی است. در این شرایط، تراشه‌ای به اندازه ۲۵٪ حجم بلوک گچ ایجاد می‌گردد. ترک‌های فشاری به صورت ناحیه لهیده شده زیر برنده اتفاق می‌افتد.

به طور کلی می‌توان دریافت که با افزایش زاویه برنده، ترک کششی مسیر کوتاه تری را طی کرده و تراشه کوچکتری ایجاد می‌گردد.

۳-۲- تاثیر زاویه‌داری برنده بر نیروی شکست نمونه‌ها

شکل ۱۱، تاثیر زاویه‌داری برنده بر نیروی شکست نمونه را نشان می‌دهد. با افزایش زاویه‌داری نمونه، نیروی شکست کاهش می‌یابد. بیشترین نیروی شکست مربوط به زاویه‌داری صفر درجه است، زیرا در این زاویه‌داری، بیشترین تماس صفحه بارگذاری با نمونه اتفاق می‌افتد. کمترین نیروی شکست مربوط به زاویه‌داری ۶۰ درجه است، زیرا در این زاویه‌داری کمترین تماس صفحه بارگذاری با نمونه اتفاق می‌افتد.

برنده شروع شده، به طور مورب رشد کرده و به لبه بالایی نمونه متصل می‌شود. بازبینی سطح شکست نشان‌دهنده سطح صاف و صیقل است که بیانگر ترک کششی است. در این شرایط، تراشه‌ای به اندازه ۵۰٪ حجم بلوک گچ ایجاد می‌گردد. ترک‌های فشاری به صورت ناحیه لهیده شده زیر برنده اتفاق می‌افتد.

(ب) زاویه برنده ۳۰ درجه

شکل ۹ الگوی شکست نمونه‌ها زیر برنده ۳۰ درجه را نشان می‌دهد. در این آرایش، دو ترک کششی از زیر برنده شروع شده، به طور قائم رشد کرده و به لبه بالایی نمونه متصل می‌شود. بازبینی سطح شکست نشان‌دهنده سطح صاف و صیقل است که بیانگر ترک کششی است. در این شرایط، تراشه‌ای به اندازه ۲۰٪ حجم بلوک گچ ایجاد می‌گردد. ترک‌های فشاری به صورت ناحیه لهیده شده زیر برنده اتفاق می‌افتد.

(ج) زاویه برنده ۶۰ درجه

شکل ۱۰ الگوی شکست نمونه‌ها زیر برنده ۶۰ درجه را نشان می‌دهد. در این آرایش، دو ترک کششی از زیر برنده شروع



(ب)



(الف)

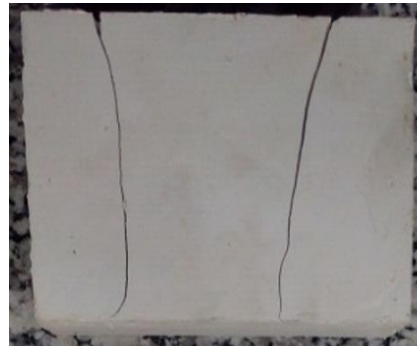


(ج)

شکل ۸: الگوی شکست ۳ نمونه گچی زیر برنده با زاویه صفر درجه



(ب)



(الف)

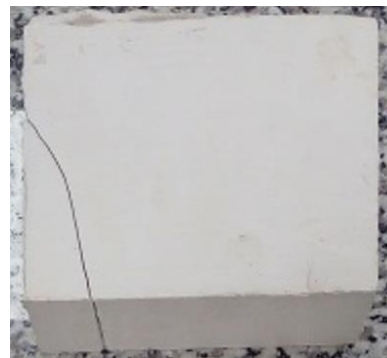


(ج)

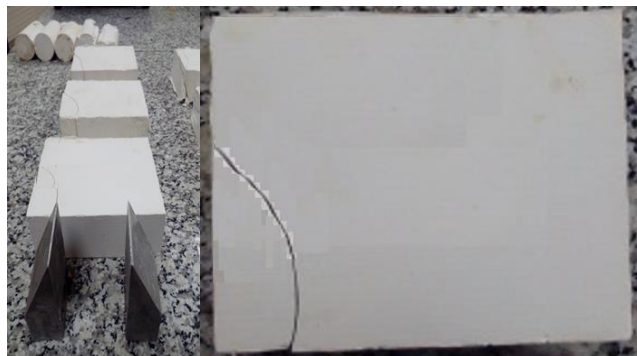
شکل ۹: الگوی شکست ۳ نمونه گچی زیر برنده با زاویه صفر درجه



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۰: الگوی شکست ۳ نمونه گچی زیر برنده با زاویه صفر درجه

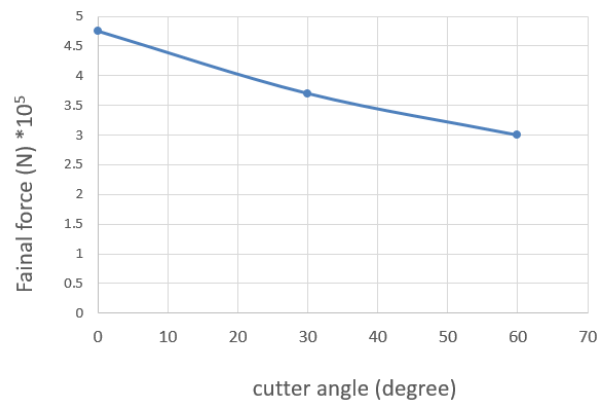
و یا اشکال خاص هندسی دیگری هستند. هر دیواری برای خود دارای خصوصیات اتصالی است. شرایط خاص اتصال در لبه‌های دیوار به وجود می‌آید. سرعت حرکت دیوارها (انتقالی یا چرخشی) و نیز نیرو و ممان بر روی هر دیوار را می‌توان کنترل و برداشت کرد. ذرات و دیواره‌ها را می‌توان در هر مرحله در برنامه اضافه و یا حذف کرد و همچنین می‌توان خصوصیات آنها را نیز تغییر داد. میکروخصوصیات دیسک‌ها در این نرم‌افزار عبارتند از: مقاومت برشی اتصال موازی، مقاومت فشاری اتصال موازی، انحراف معیار مقاومت ها، مدول یانگ اتصال موازی، نسبت سختی نرمال به برشی اتصال موازی. همچنین میکروپارامترهای درزه‌ها در PFC2D عبارتند از مقاومت برشی و نرمال اتصال‌ها، زاویه اصطکاک سطح درزه. از آنجایی که تنش صفحه‌ای حکمفرما است، بنابراین از شبیه‌سازی دو بعدی استفاده شده است.

۴-۱- فرآیند تولید مصالح یا مراحل ساخت نمونه در PFC 2D

نرم‌افزار PFC محیط سنگ را مانند مجموعه فشرده از ذرات با اندازه‌های غیریکنواخت و اشکال کروی و دایره‌ای مدل‌سازی می‌کند که ذرات در نقاط اتصال خویش با پیوندهای موازی به هم چسبیده‌اند. ذرات به خوبی به هم وصل شده و نیروهای بین دانه‌ای اندک خواهد بود. نیروهای بین دانه‌ای و فشردگی مجموعه ذرات، در مقیاس ماکروسکوپیک دلخواه و ایزوتروپ است. این حالت زمانی که ذرات بر اثر نیروی جاذبه متراکم می‌شوند، تحقق نمی‌یابد و زنجیره‌های نیرو به سمت قائم متمایل شده و بزرگی این زنجیره‌ها با افزایش ارتفاع مدل افزایش می‌یابد. پروسه تولید مصالح پنج مرحله دارد که در زیر شرح داده می‌شود [۲۷]: الف) فشردگی اولیه ذرات. ب) اعمال تنش ایزوتروپیک. ج) کاهش تعداد ذرات معلق در مدل. د) ایجاد پیوندها. ه) حذف دیواره‌های مدل.

الف) فشردگی اولیه ذرات

در این مرحله، دیواره‌های مدل متشکل از چند صفحه مسطح و بی‌اصطکاک ایجاد شده و مجموعه‌ای از ذرات با چینش دلخواه تولید می‌شود تا ظرف مورد نظر را پر کند. ظرف یاد شده در حالت دو بعدی در برنامه PFC2D از محیطی مستطیلی در صفحه شکل می‌گیرد. در فرآیند تولید ذرات، قطر ذرات که به وسیله پارامترهای D_{max} و D_{min} مشخص می‌شود، توزیع یکنواخت اندازه ذرات را در محیط مدل تثبیت می‌کند. در راستای ایجاد فشردگی اولیه محکم، تعداد ذرات باید طوری تعیین شود که میزان تخلخل اولیه



شکل ۱۱: تاثیر زاویه‌داری برنده بر نیروی شکست نمونه‌ها

۴- نرم‌افزار PFC2D

در این برنامه، مدل‌سازی به صورت مرحله به مرحله انجام می‌گیرد. در هر پله زمانی در این نرم‌افزار قانون دوم نیوتن برای هر ذره، دو بار در راستای تصحیح میزان سرعت و مکان قرارگیری ذره، به طور کامل اعمال می‌گردد. نتیجه این محاسبات در هر مرحله، یک سری از نیروهای اتصالی است که به کلیه ذرات وارد می‌شود. قانون دوم نیوتن عبارت از تساوی حاصل ضرب میزان جرم در شتاب جسم با نیروی وارده بر جسم در راستای شتاب وارده است. بر اساس موقعیت‌های ایجاد شده جدید برای ذرات، نیروهای اتصالی از جابه‌جایی نسبی هر جفت ذره ایجاد می‌شود. در این برنامه، ذرات به صورت خودکار در پهنه مشخص شده‌ای توسط کاربر شکل می‌گیرند. شعاع ذرات دیسکی شکل، ممکن است یکسان بوده و یا به صورت متفاوت در بازه‌ای مشخص با استفاده از توزیع گاوس به وجود آیند. می‌توان در هر مرحله با استفاده از ضریبی مشخص، شعاع ذرات را جهت دستیابی به میزان تخلخل مطلوب کاربر افزایش داد [۲۷]. مجموعه ذرات با استفاده از حرکت دیواره‌هایی که به صورت مرز از قبل پیش‌بینی شده است تحت اثر نیرو قرار می‌گیرند. بخشی از مجموعه دستورات تکمیلی زبان برنامه‌نویسی فیش، یک سری توابع مفید جهت اعمال تنش مورد نظر به نمونه را در اختیار کاربران قرار می‌دهد. در راستای ساخت مرزهای پیرامون مدل، دو نوع دیوار در این برنامه قابل استفاده است [۲۷]: ۱) دیوارهای نامحدود: این مرزهای نمونه در واقع صفحاتی‌اند که به صورت نامحدود در تمام جهات توسعه می‌یابند. ۲) دیوارهای محدود: این مرزها در واقع سطوحی محدب مانند استوانه‌ها، کره‌ها

مدل در ظرف ایجاد شود. ذرات در ابتدا با حداکثر مقدار شعاعی برابر نصف شعاع مورد نظر کاربر در داخل محیط یا فضای مدل به صورت اتفاقی جای می‌گیرند، به صورتی که هیچ‌کدام از دو ذره روی هم قرار نگیرد (شکل ۱۲-الف). سپس، شعاع ذرات برای رسیدن به تخلخل مورد نظر افزایش می‌یابد و سیستم امکان می‌یابد در شرایط اصطکاک صفر دوباره مرتب گردد (شکل ۱۲-الف) [۲۷].

ب) اعمال تنش ایزوتروپیک

در این مرحله شعاع تمامی ذرات جهت رسیدن به تنش ایزوتروپیک مورد نظر کاهش می‌یابد؛ تنش ایزوتروپیک، میانگین تنش مستقیم است و از میانگین حاصل تقسیم کل نیروی وارده بر دیواره‌ها بر مقطع نمونه به دست می‌آید. مقدار تنش ایزوتروپیک، برابر ۰.۲٪ مقدار مقاومت کششی برزیلی مصالح مورد آزمایش است [۲۷] (شکل ۱۲-ب).

ج) کاهش تعداد ذرات معلق در مدل

یک مجموعه از ذرات که با توزیع غیریکنواخت اندازه‌هایشان و با اشکال دایره‌ای به صورت اتفاقی در داخل مدل جای می‌گیرند و با استفاده از روش‌های مکانیکی متراکم می‌شوند، ممکن است دارای تعداد زیادی ذرات معلق باشند. به ذراتی، معلق گفته می‌شود که تعداد اتصالات آنها با ذرات مجاور کمتر از ۳ باشد. ذرات معلق در شکل ۱۲-ج با رنگ سبز نشان داده شده‌اند. برای به دست آوردن مدل با شبکه‌هایی از پیوندهای محکم‌تر باید تعداد ذرات معلق را کاهش داد. با فرض $N_f=3$ ، می‌توان این امکان را به وجود آورد که تعداد ذرات معلق به صفر برسد و در نهایت تعدادی از ذرات متصل به هم در مدل ایجاد شود، طوری که تقریباً تمامی ذرات دور از مرزهای مدل، حداقل سه اتصال داشته باشند [۲۷].

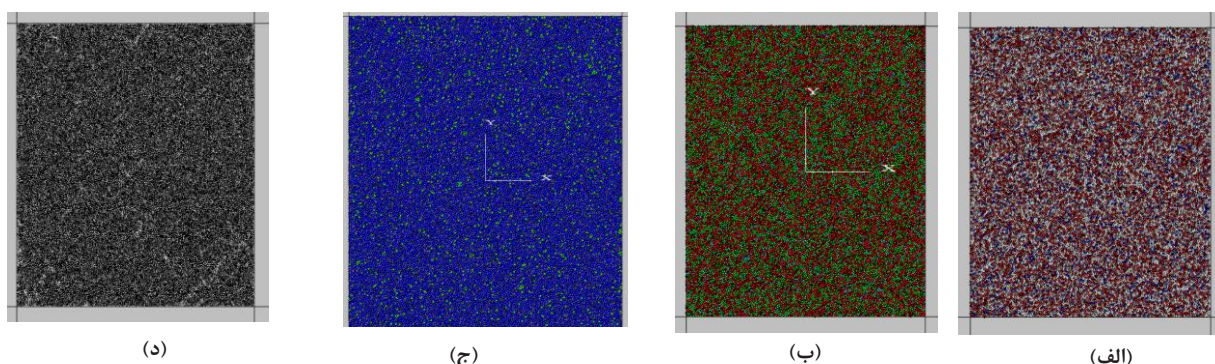
د) ایجاد پیوندهای

پیوندها به صورت شبکه‌ای منظم در تمامی ذرات که در مجاور هم هستند ایجاد می‌شوند. این مجاورت و نزدیکی، زمانی تحقق می‌یابد که فاصله بین سطوح ذرات، کمتر از 10^{-6} برابر میانگین شعاع دو ذره مورد نظر باشد (شکل ۱۲-د) [۲۷].

۴-۲- کالیبراسیون نمونه در PFC2D

الف) انتخاب میکروخصوصیات مدل عددی

در مدلسازی‌های عددی به وسیله نرم‌افزار PFC امکان اعمال مستقیم داده‌های آزمایشگاهی به مدل وجود ندارد. در این شرایط، باید خصوصیات مکانیکی مدل را با انتخاب صحیح میکروخصوصیات آن برآورد کرد. در حقیقت، با انتخاب صحیح میکروخصوصیات، مدل به گونه‌ای کالیبره می‌شود که رفتارش با رفتار مکانیکی نمونه فیزیکی مشابه گردد. بعد از کالیبراسیون، از میکروخصوصیات تعیین شده به عنوان پارامترهای ورودی مدل PFC استفاده می‌شود و مانند سایر روش‌های عددی، تحقیقات مورد نظر روی مدل انجام می‌گیرد. همان‌گونه که از جدول ۲ مشاهده می‌شود، نوع ذره دیسکی بوده و نسبت قطر بزرگترین دانه به قطر کوچکترین دانه بزرگتر از ۱.۶۶ انتخاب می‌شود. به این ترتیب، مجموعه‌ای با دانه‌های ریز و درشت ایجاد می‌گردد تا بتوانند در مقیاس میکروسکوپی رفتار آنیزوتروپیک از خود بروز دهند. چنانچه نسبت ابعاد دانه‌ها برابر ۱ انتخاب گردد، ابعاد همه دانه‌ها یکسان می‌شود و رفتار کاملاً ایزوتروپیک از خود نشان می‌دهد که این وضعیت با رفتار طبیعی دانه‌های سنگ متفاوت است. نسبت تخلخل مدل ۰.۱ انتخاب شده است تا سیستم متراکم شده‌ای از ذرات مهیا گردد. $\bar{\alpha}$ برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. این نشان می‌دهد که



شکل ۱۲: الف) مجموعه ذرات پس از مرحله تولید اولیه و قبل از چینش و جایگیری مجدد، ب) اعمال تنش ایزوتروپیک، ج) ذرات معلق با تعداد اتصالات کمتر از ۳ و د) شبکه پیوندها پس از تعادل

از طریق حرکت دیوارهای فوقانی و تحتانی به مدل‌ها اعمال می‌گردد (شکل ۱۳-الف). شکل ۴، الگوی شکست مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. طول و عرض مدل تک محوره نیز به ترتیب ۱۰۸ mm و ۵۴ mm است. نیرو از طریق حرکت دیوارهای فوقانی و تحتانی به مدل‌ها اعمال می‌گردد (شکل ۱۳-ج). شکل ۱۳، الگوی شکست مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تطابق مناسب بین نتایج عددی و آزمایشگاهی گویای کالیبراسیون صحیح مدل عددی

سیمان به طور کامل فضای بین ذرات به هم چسبیده را اشغال کرده است. چنانچه α برابر صفر انتخاب گردد، رفتار به سمت مواد دانه‌ای میل می‌کند. ضریب میرایی (α) برابر با ۰٫۷ انتخاب شده که گویای شرایط استاتیکی آنالیز است. مقادیر دانسیته و اصطکاک سطح تماس دیسک‌ها برابر با $3000 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ و ۰٫۵ انتخاب شد.

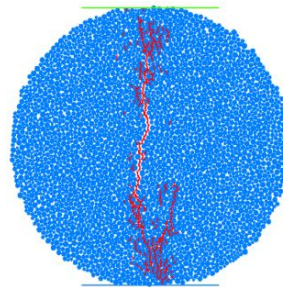
ب) کالیبراسیون مقاومت‌های کششی و مقاومت فشاری قطر دیسک برزبلی در تمام مدل‌ها ۵۴ mm است. نیرو

جدول ۲: میکروخصوصیات استفاده شده جهت ساخت مدل‌ها

مقادیر	میکروخصوصیات	مقادیر	میکروخصوصیات
۱	افزایش دهنده شعاع اتصال	0.25×10^{-3}	مینیم شعاع دیسک (m)
۴	مدول یانگ اتصال (GPa)	۳۰۰۰	دانسیته (gr/cm^3)
۱	نسبت سختی‌های اتصال	۱٫۶۶	نسبت مینیم شعاع به ماکزیم شعاع دیسک
۰٫۵	ضریب اصطکاک	۰٫۵	ضریب میرایی
۹	مقاومت کششی اتصال، میانگین (MPa)	۱۲	چسبندگی اتصال، میانگین (MPa)
۲	مقاومت کششی اتصال، انحراف استاندارد (MPa)	۲	چسبندگی اتصال، انحراف استاندارد (MPa)



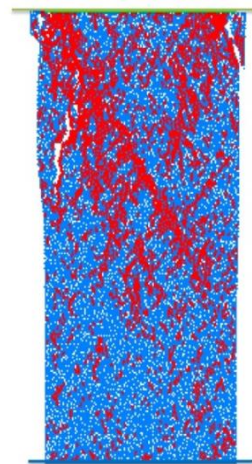
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۳: الف) الگوی شکست مدل عددی، ب) الگوی شکست نمونه آزمایشگاهی

۴-۳- الگوی شکست نمونه‌ها

الف) زاویه برنده صفر درجه

شکل ۱۵- الف الگوی شکست نمونه‌ها زیر برنده صفر درجه را نشان می‌دهد. خطوط قرمز رنگ و سیاه رنگ به ترتیب بیانگر ترک‌های کششی و برشی در مدل هستند. در این آرایش، ترک‌های کششی کوچک مقیاس زیادی در زیر برنده ایجاد شده و به طور عمودی رشد می‌کنند و زون خرد شده را تشکیل می‌دهند. همچنین دو و یا سه شکستگی کششی بزرگ مقیاس در طرفین زون خرد شده ایجاد می‌گردد و به سمت یکدیگر پیشروی می‌کنند و سرانجام به یکدیگر متصل می‌شوند. به طور کلی، دو ناحیه آسیب دیده ناحیه خرد شده زیر برنده و گوه حاصل از شکستگی‌های کششی مورب قابل شناسایی است. در این شرایط، زون شکست تقریباً به اندازه ۵۰٪ حجم مدل است.

ب) زاویه برنده ۱۵ درجه

شکل ۱۵- ب الگوی شکست نمونه‌ها زیر برنده ۱۵ درجه را نشان می‌دهد. خطوط قرمز رنگ و سیاه رنگ به ترتیب بیانگر ترک‌های کششی و برشی در مدل هستند. در این آرایش، ترک‌های کششی کوچک مقیاس زیادی در زیر برنده ایجاد شده و به طور عمودی رشد می‌کنند و زون خرد شده را تشکیل می‌دهند. همچنین دو و یا سه شکستگی کششی بزرگ مقیاس در طرفین زون خرد شده ایجاد می‌گردد و به سمت یکدیگر پیشروی می‌کنند و سرانجام به یکدیگر متصل می‌شوند. به طور کلی، دو ناحیه آسیب دیده ناحیه خرد شده زیر برنده و گوه حاصل از شکستگی‌های کششی مورب قابل شناسایی است. در این شرایط، زون شکست تقریباً به اندازه ۴۰٪ حجم مدل است. یعنی مساحت زون شکست و گوه در این آرایش کمتر از مساحت زون شکست حاصل برنده صفر درجه است.

ج) زاویه برنده ۳۰ درجه

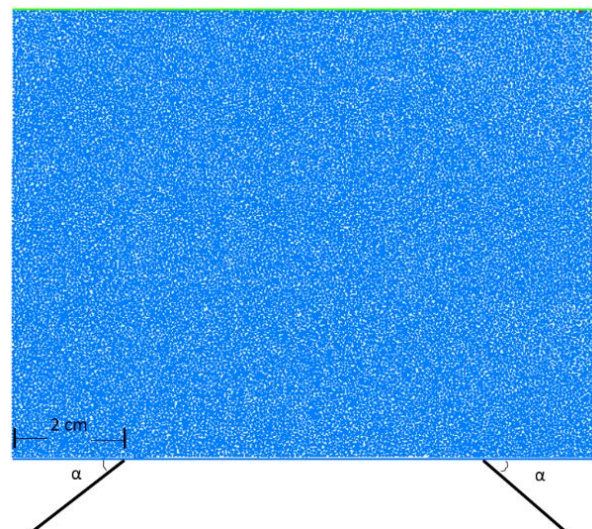
شکل ۱۵- ج الگوی شکست نمونه‌ها زیر برنده ۳۰ درجه را نشان می‌دهد. خطوط قرمز رنگ و سیاه رنگ به ترتیب بیانگر ترک‌های کششی و برشی در مدل هستند. در این آرایش، ترک‌های کششی کوچک مقیاس اندکی در زیر برنده ایجاد شده و به طور عمودی رشد می‌کنند و زون خرد شده را تشکیل می‌دهند. همچنین دو و یا سه شکستگی کششی بزرگ مقیاس در بالای زون خرد شده ایجاد می‌گردد و به سمت عمودی پیشروی می‌کنند. به طور کلی، دو ناحیه آسیب دیده ناحیه خرد شده زیر برنده و گوه‌های ستونی حاصل از شکستگی‌های

است. جدول ۳ مقاومت کششی و فشاری مدل عددی را نشان می‌دهد. با مقایسه جدول ۱ و ۳ می‌توان دریافت که تطابق مناسب بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برقرار است که گویای کالیبراسیون صحیح مدل عددی است.

جدول ۳: مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در مدل عددی

مقاومت فشاری (MPa)	۱۱
مقاومت کششی (MPa)	۱,۳۵

ج) آماده‌سازی مدل عددی بلوکی و انجام تست به منظور انجام آزمایش دندان‌گذاری، ابتدا یک مدل عددی با ابعاد ۱۱ cm * ۱۴ cm آماده‌سازی شد (شکل ۱۴). مشخصات فیزیکی و مکانیکی این مدل‌ها مشابه داده‌های کالیبراسیون است. دو دیوار که نقش برنده را ایفا می‌کنند در قسمت پایین مدل، سمت راست و سمت چپ، قرار می‌گیرند. طول دیوارها ۴ cm و محل قرارگیری راس دیوار تا لبه نمونه ۲ cm است (شکل ۱۴). سختی نرمال و برشی دیوارها ۲ برابر سختی نرمال و برشی دیسک‌ها انتخاب شده است تا از نفوذ دیسک درون دیوارها جلوگیری شود. زاویه‌داری این دیوارها نسبت به افق (α)، ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه است (شکل ۱۴). دیوارها با نرخ ۰,۰۱ mm/sec به سمت مدل حرکت کرده و باعث شکست مدل می‌شود.



شکل ۱۴: مدل عددی همراه با برنده‌ها

می‌دهند. همچنین دو و یا سه شکستگی کششی بزرگ مقیاس در بالای زون خرد شده ایجاد می‌گردد و به سمت عمودی پیشروی می‌کنند. به طور کلی، دو ناحیه آسیب دیده ناحیه خرد شده زیر برنده و گوه‌های ستونی حاصل از شکستگی‌های کششی قائم قابل شناسایی است. میزان زون خرد شده در این آرایش بیشتر از زون خرد شده در برنده ۳۰ درجه و کمتر از زون خرد شده در برنده‌های صفر و ۱۵ درجه است.

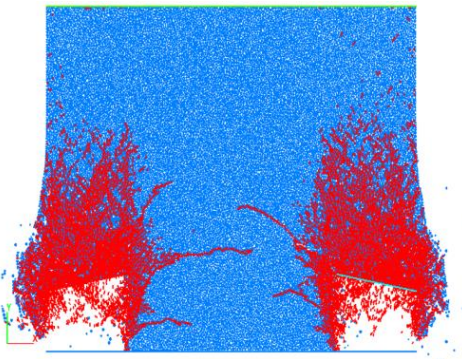
(ه) زاویه برنده ۶۰ درجه

شکل ۱۵- ه الگوی شکست نمونه‌ها زیر برنده ۶۰ درجه را نشان می‌دهد. خطوط قرمز رنگ و سیاه رنگ به ترتیب بیانگر

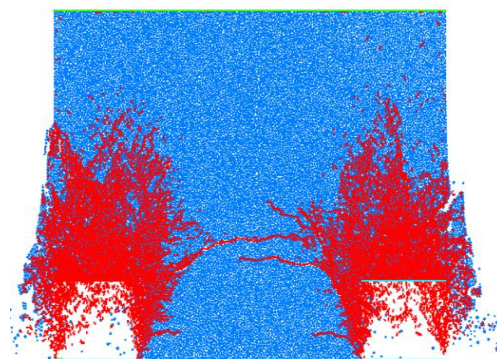
کششی قائم قابل شناسایی است. در این شرایط، زون شکست تقریباً به اندازه ۳۰٪ حجم مدل است. یعنی مساحت زون شکست و گوه در این آرایش کمتر از مساحت زون شکست حاصل برنده صفر و ۱۵ درجه است.

(د) زاویه برنده ۴۵ درجه

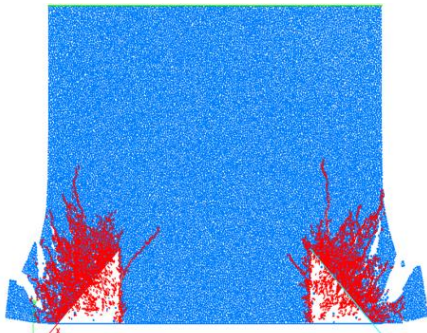
شکل ۱۵- د الگوی شکست نمونه‌ها زیر برنده ۴۵ درجه را نشان می‌دهد. خطوط قرمز رنگ و سیاه رنگ به ترتیب بیانگر ترک‌های کششی و برشی در مدل هستند. در این آرایش، ترک‌های کششی کوچک مقیاس اندکی در زیر برنده ایجاد شده و به طور عمودی رشد می‌کنند و زون خرد شده را تشکیل



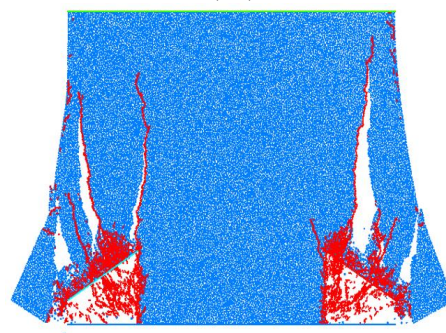
(ب)



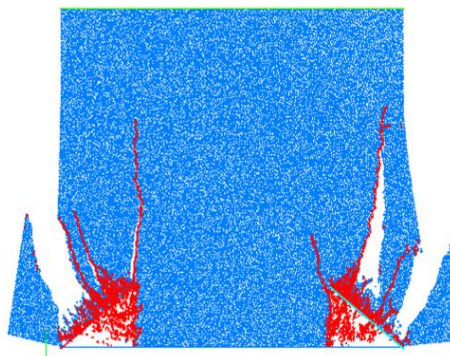
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۱۵: الگوی شکست در مدل عددی با زاویه برنده، الف) صفر درجه، ب) ۱۵ درجه، ج) ۳۰ درجه، د) ۴۵ درجه، ه) ۶۰ درجه

۴-۴- تغییرات نیروی اعمالی از طرف برنده‌ها بر اساس کرنش نمونه

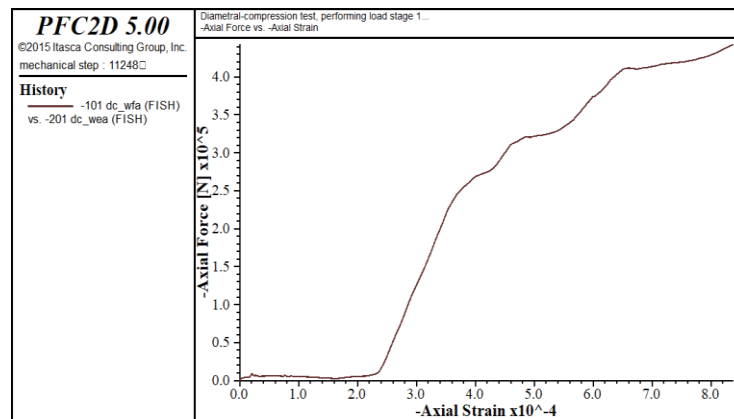
شکل ۱۶ تغییرات نیروی اعمالی از طرف برنده‌ها بر اساس کرنش نمونه را نشان می‌دهد. با افزایش میزان بارگذاری، کرنش نمونه افزایش می‌یابد. با ایجاد ترک‌ها در نمونه، اعوجاج در منحنی ظاهر می‌شود. روند صعودی منحنی تا جایی ادامه می‌یابد که تراشه بزرگ مقیاسی از نمونه جدا گردد.

۴-۵- تاثیر زاویه‌داری برنده بر نیروی شکست نمونه‌ها

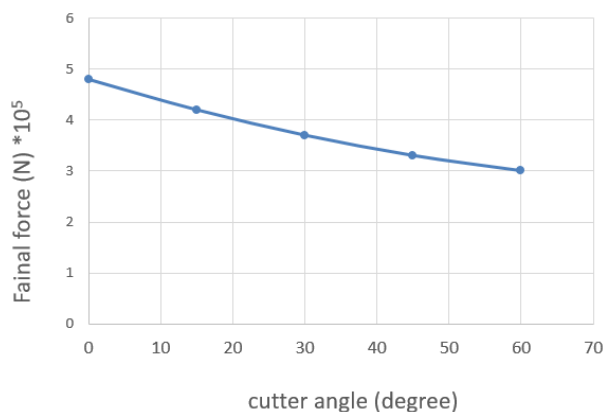
شکل ۱۷، تاثیر زاویه‌داری برنده بر نیروی شکست نمونه را نشان می‌دهد. با افزایش زاویه‌داری نمونه، نیروی شکست کاهش می‌یابد. بیشترین نیروی شکست مربوط به زاویه‌داری صفر درجه است، زیرا در این زاویه‌داری، بیشترین تماس صفحه

ترک‌های کششی و برشی در مدل هستند. در این آرایش، ترک‌های کششی کوچک مقیاس اندکی در زیر برنده ایجاد شده و به طور عمودی رشد می‌کنند و زون خرد شده را تشکیل می‌دهند. همچنین دو و یا سه شکستگی کششی بزرگ مقیاس در بالای زون خرد شده ایجاد می‌گردد و به سمت عمودی پیشروی می‌کنند. به طور کلی، دو ناحیه آسیب دیده ناحیه خرد شده زیر برنده و گوه‌های ستونی حاصل از شکستگی‌های کششی قائم قابل شناسایی است. میزان زون خرد شده در این آرایش کمتر از سایر آرایش‌ها است.

با مقایسه نتایج آزمایشگاهی (شکل‌های ۸ تا ۱۰) و یافته‌های عددی (شکل ۱۵)، می‌توان دریافت که بزرگترین زون خرد شده در زاویه صفر درجه و کوچکترین زون خرد شده در زاویه ۶۰ درجه حاصل می‌شود.



شکل ۱۶: تغییرات نیروی محوری بر اساس کرنش محوری مدل‌ها



شکل ۱۷: تاثیر زاویه‌داری برنده بر نیروی شکست نمونه‌ها

آنها در عمق‌های مختلف برش، نحوه برش را مدلسازی کردند. با مقایسه شکل‌های ۸ تا ۱۰ و شکل ۱۵ (مربوط به برنده با زاویه‌داری ۶۰ درجه) و شکل ۱۸ می‌توان دریافت که در زاویه برنده ۶۰ درجه، الگوی شکست مشابهی در مدل المان محدود، مدل PFC و مطالعات آزمایشگاهی ایجاد شده است.

۴-۷- اعتبارسنجی نتایج عددی PFC و نتایج کد جریان ذره حاصل از تحقیقات یانژین [۱۴]

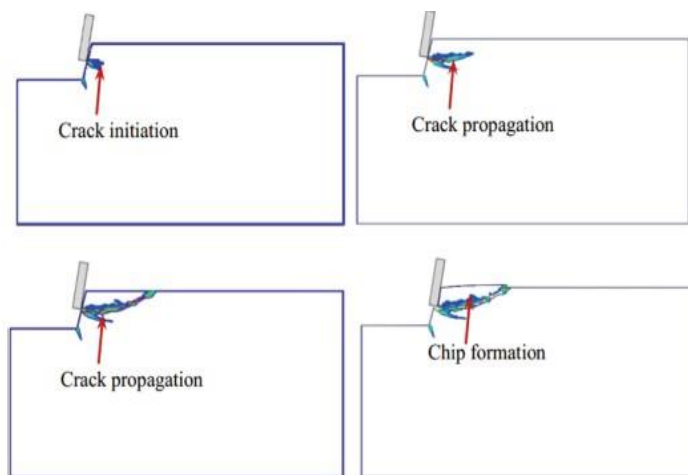
یانژین و همکاران [۱۴]، تاثیر عمق نفوذ برنده PDC بر مکانیزم شکست سنگ را با استفاده از نرم‌افزار PFC مطالعه کردند (شکل ۱۹). نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق نفوذ، طول رشد ترک‌های القایی افزایش می‌یابد. با مقایسه شکل‌های ۸ تا ۱۰ و شکل ۱۵ (مربوط به برنده با زاویه‌داری ۶۰ درجه) و

بارگذاری با نمونه اتفاق می‌افتد. کمترین نیروی شکست مربوط به زاویه‌داری ۶۰ درجه است، زیرا در این زاویه‌داری کمترین تماس صفحه بارگذاری با نمونه اتفاق می‌افتد.

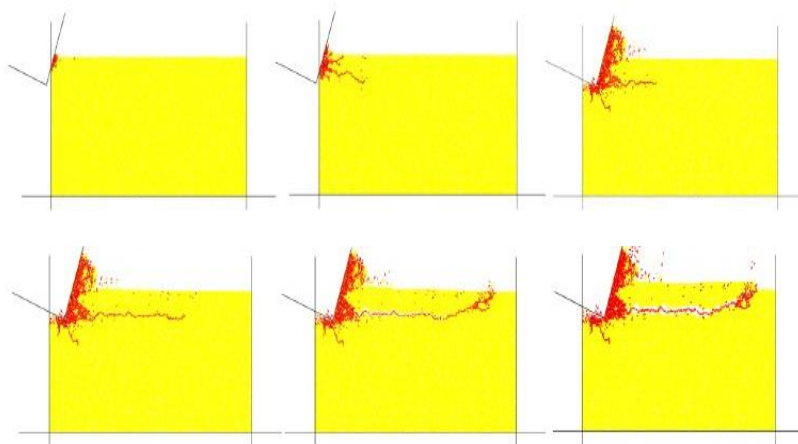
با مقایسه شکل ۱۱ و شکل ۱۷ می‌توان دریافت که نیروی شکست در نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی یکسان است که این حاکی از عملکرد مناسب نرم‌افزار کد جریان ذره در شبیه‌سازی PDCها است.

۴-۶- اعتبارسنجی نتایج عددی PFC و نتایج المان محدود حاصل از تحقیقات لی [۹]

لی مکانیزم شکست سنگ در برش سرمته PDC را مدلسازی کردند [۹]. شکل ۱۸ مدلسازی برش سنگ با روش المان محدود به وسیله برنده‌های سرمته PDC را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸: مدلسازی شرایط شکست سنگ تحت برش سرمته در عمق‌های مختلف برش [۹]



شکل ۱۹: مدلسازی ایجاد ریز ترک‌ها بعد از حفاری سنگ به وسیله سرمته [۱۴]

آماده‌سازی شد. نسبت گچ به آب، ۲ است. برای هر زاویه‌داری سرمته، ۳ نمونه گچ تحت آزمایش قرار گرفت. نمونه گچ بالای سرمته‌ها نصب شده و مجموعه‌ها تحت آزمایش تک محوره قرار گرفتند. نرخ بارگذاری 0.1 mm/min است. همزمان با تست‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی به وسیله نرم‌افزار کد جریان ذره انجام شد. به این ترتیب که ابتدا نرم‌افزار PFC برای گچ کالیبره شد. در مرحله دوم، مدل عددی با ابعاد $11 \text{ cm} * 14 \text{ cm}$ آماده شد، سپس هفت جفت سرمته با زاویه‌داری، ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه شبیه‌سازی شد و در قسمت تحتانی مدل عددی قرار گرفت. سرمته‌ها با نرخ 0.1 mm/sec به سمت مدل حرکت کرده و باعث شکست مدل می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که:

- زمانی که زاویه برنده صفر درجه است، ترک‌های کششی کوچک مقیاس زیادی در زیر برنده ایجاد شده و به طور عمودی رشد می‌کنند و زون خرد شده را تشکیل می‌دهند. همچنین دو و یا سه شکستگی کششی بزرگ مقیاس در طرفین زون خرد شده ایجاد شده و به سمت یکدیگر پیشروی می‌کنند. این شکستگی‌ها سرانجام به یکدیگر متصل می‌شوند. به طور کلی، دو ناحیه آسیب

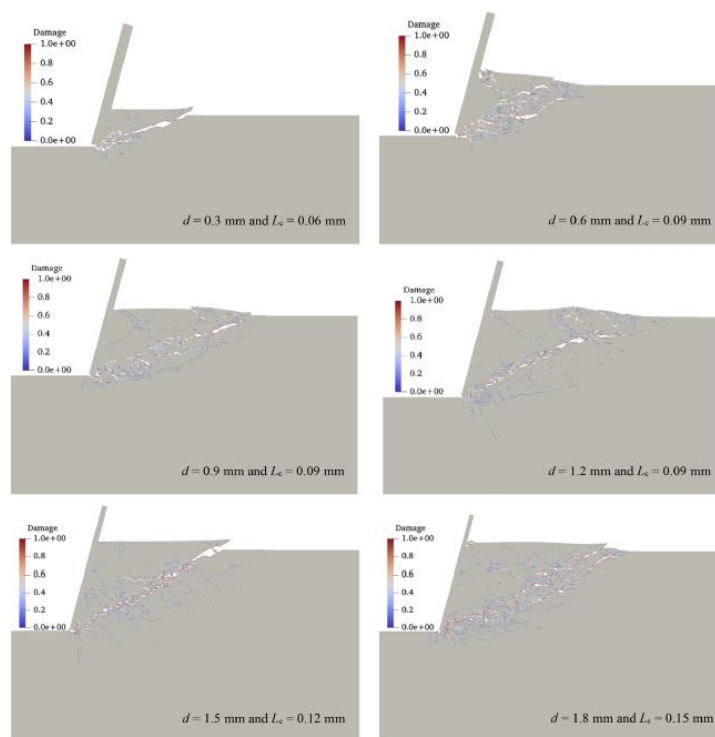
شکل ۱۹ می‌توان دریافت که در زاویه برنده ۶۰ درجه، الگوی شکست مشابهی در مدل کد جریان ذره، مدل PFC و مطالعات آزمایشگاهی ایجاد شده است.

۴-۸- اعتبارسنجی نتایج عددی PFC و نتایج روش ترکیبی المان محدود- المان مجزا حاصل از تحقیقات محمد نژاد [۲۶]

محمد نژاد [۲۶]، با استفاده از روش‌های ترکیبی المان محدود- المان مجزا، تاثیر عمق نفوذ برنده را بر خردایش سنگ به وسیله برنده PDC را مطالعه کرد (شکل ۲۰). مطالعه وی نشان داد که با افزایش عمق نفوذ، اندازه تراشه افزایش می‌یابد. شکل تراشه V شکل در این تحقیقات در تطابق مناسبی با مطالعات این تحقیق است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، تاثیر زاویه‌داری سرمته PDC بر مکانیزم شکست نمونه‌های شبه سنگی بررسی شده است. به این منظور، سه جفت سرمته PDC با زاویه برنده صفر، ۳۰ و ۶۰ درجه ساخته شد. ۹ نمونه شبه سنگی گچ با ابعاد $5 \text{ cm} * 11 \text{ cm} * 14 \text{ cm}$



شکل ۲۰: تاثیر عمق نفوذ برنده بر مکانیزم شکست سنگ [۲۶]

کششی قائم. میزان زون خرد شده در این آرایش بیشتر از زون خرد شده در برنده ۳۰ درجه و کمتر از زون خرد شده در برنده‌های صفر و ۱۵ درجه است.

- زمانی که زاویه برنده ۶۰ درجه است، ترک‌های کششی کوچک مقیاس اندکی در زیر برنده ایجاد شده و به طور عمودی رشد می‌کنند و زون خرد شده را تشکیل می‌دهند. همچنین دو و یا سه شکستگی کششی بزرگ مقیاس در بالای زون خرد شده ایجاد می‌گردد و به صورت عمودی پیشروی می‌کنند. به طور کلی، دو ناحیه آسیب دیده قابل شناسایی است. (۱) ناحیه خرد شده زیر برنده و (۲) گوه‌های ستونی حاصل از شکستگی‌های کششی قائم. میزان زون خرد شده در این آرایش کمتر از سایر آرایش‌ها است.
- با افزایش زاویه‌داری نمونه، نیروی شکست کاهش می‌یابد. بیشترین نیروی شکست مربوط به زاویه‌داری صفر درجه است. زیرا در این زاویه‌داری، بیشترین تماس صفحه بارگذاری با نمونه اتفاق می‌افتد. کمترین نیروی شکست مربوط به زاویه‌داری ۶۰ درجه است، زیرا در این زاویه‌داری کمترین تماس صفحه بارگذاری با نمونه اتفاق می‌افتد.

۶- مراجع

- [1] Carpinteri, M. P. (2007). "Numerical analysis of fracture mechanisms and failure modes in bi-layered structural components". *Finite Elements in Analysis and Design*, 43: 941-953.
- [2] Franca, L. F. P. (2011). "A bit-rock interaction model for rotary-percussive drilling". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48: 827-832.
- [3] Zhu, L., and Bai, Y. (2012). "Numerical simulation on rock failure under combined static and dynamic loading during SHPB tests". *International Journal of Impact Engineering*, 24(3): 142-157.
- [4] Sloan, W. (2013). "Three-Dimensional Numerical Investigations of the Failure Mechanism of a Rock Disc with a Central or Eccentric Hole". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39(1): 58-97.
- [5] Entacher, E. (2014). "Rock Failure and Crack Propagation Beneath Disc Cutters". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42(3): 111-124.

دیده قابل شناسایی است. (۱) ناحیه خرد شده زیر برنده و (۲) گوه حاصل از شکستگی‌های کششی مورب. در این شرایط، زون شکست تقریباً به اندازه ۵۰٪ حجم مدل است.

- زمانی که زاویه برنده ۱۵ درجه است، ترک‌های کششی کوچک مقیاس زیادی در زیر برنده ایجاد شده و به طور عمودی رشد می‌کنند و زون خرد شده را تشکیل می‌دهند. همچنین دو و یا سه شکستگی کششی بزرگ مقیاس در طرفین زون خرد شده ایجاد می‌شوند و به سمت یکدیگر پیشروی می‌کنند. این شکستگی‌ها سرانجام به یکدیگر متصل می‌شوند. به طور کلی، دو ناحیه آسیب دیده قابل شناسایی است. (۱) ناحیه خرد شده زیر برنده و (۲) گوه حاصل از شکستگی‌های کششی مورب. در این شرایط، زون شکست تقریباً به اندازه ۴۰٪ حجم مدل است. یعنی مساحت زون شکست و گوه در این آرایش کمتر از مساحت زون شکست حاصل برنده صفر درجه است.

- زمانی که زاویه برنده ۳۰ درجه است، ترک‌های کششی کوچک مقیاس اندکی در زیر برنده ایجاد شده و به طور عمودی رشد کرده و زون خرد شده را تشکیل می‌دهند. همچنین دو و یا سه شکستگی کششی بزرگ مقیاس در بالای زون خرد شده ایجاد می‌گردد و به صورت عمودی پیشروی می‌کنند. به طور کلی، دو ناحیه آسیب دیده قابل شناسایی است. (۱) ناحیه خرد شده زیر برنده و (۲) گوه‌های ستونی حاصل از شکستگی‌های کششی قائم. در این شرایط، زون شکست تقریباً به اندازه ۳۰٪ حجم مدل است. یعنی مساحت زون شکست و گوه در این آرایش کمتر از مساحت زون شکست حاصل برنده صفر و ۱۵ درجه است.

- زمانی که زاویه برنده ۴۵ درجه است، ترک‌های کششی کوچک مقیاس اندکی در زیر برنده ایجاد شده و به طور عمودی رشد می‌کنند و زون خرد شده را تشکیل می‌دهند. همچنین دو و یا سه شکستگی کششی بزرگ مقیاس در بالای زون خرد شده ایجاد می‌گردد و به صورت عمودی پیشروی می‌کنند. به طور کلی، دو ناحیه آسیب دیده قابل شناسایی است. (۱) ناحیه خرد شده زیر برنده و (۲) گوه‌های ستونی حاصل از شکستگی‌های

- In: Proceedings of the SPE/ISRM conference on rock mechanics in petroleum engineering*. Trondheim, Norway: Society of Petroleum Engineers, 111-124.
- [19] Richard, T., Dagrain, F., Poyol, E., and Detournay, E. (2012). "Rock strength determination from scratch tests". *Engineering Geology*, 147e148: 91-10.
- [20] He, X., and Xu, C. (2015). "Discrete element modelling of rock cutting: from ductile to brittle transition". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39: 1331-51.
- [21] He, X., and Xu, C. (2016). "Specific energy as an index to identify the critical failure mode transition depth in rock cutting". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49: 1461-78.
- [22] He, X., Xu, C., Peng, K., and Huang, G. (2017). "Simultaneous identification of rock strength and fracture properties via scratch test". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50: 2227-34.
- [23] Huang, H., and Detournay, E. (2008). "Intrinsic length scales in tool-rock interaction". *International Journal of Geomechanics*, 8(1): 39-44.
- [24] Huang, H., and Detournay, E. (2013). "Discrete element modeling of tool-rock interaction. II: rock indentation". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37: 1930-47.
- [25] Huang, H., Lecampion, B., and Detournay, E. (2013). "Discrete element modeling of tool-rock interaction. I: rock cutting". *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37: 1913-29.
- [26] Mohammadnejad, M. (2020). "GPGPU-parallelised hybrid finite-discrete element modelling of rock chipping and fragmentation process in mechanical cutting". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12: 310-325.
- [27] Potyondy, D. O., and Cundall, P. A. (2004). "A bonded-particle model for rock". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41: 1329-1364.
- [6] Gui, Y., Bui, H. H., Kodikara, J., Zhang, Q., and Zhao, J. (2015). "International Journal of Impact Engineering Modelling the dynamic failure of brittle rocks using a hybrid continuum-discrete element method with a mixed-mode cohesive fracture model". *International Journal of Impact Engineering*, 32(3): 1-10.
- [7] Tian, J. (2015). "Rock-breaking analysis model of new drill bit with tornado-like bottomhole model". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(4): 1745-1752.
- [8] Xu, J., Sheikh, A. H., and Xu, C. (2017). "Diamond & Related Materials 3-D Finite element modelling of diamond pull-out failure in impregnated diamond bits". *Diamond and Related Materials*, 71: 1-12.
- [9] Li, B. (2018). "The rock breaking mechanism analysis of rotary percussive cutting by single PDC cutter". *Arabian Journal of Geosciences*, 11(192): 33-45.
- [10] Cheng, Z., and Li, G. (2018). "PDC tools for cutting of rocks". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 43(4): 66-81.
- [11] Liu, H. (2018). "An overview on advances in computational fracture mechanics of rock". *Geosystem Engineering*, 9328: 1-24.
- [12] Skea, S. (2018). "An approach for wellbore failure analysis using rock cavings and image processing". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 33(3): 1-14.
- [13] Yari, N., and Kapitaniak, M. (2018). "Calibrated FEM modelling of rock cutting with PDC cutter". 16006: 1-4.
- [14] Yingxin, Y., and Lin, M. (2018). "Research on Rock-breaking Mechanism of Cross-cutting PDC Bit 2". *Journal of Science and Engineering*, 41(3): 22-35.
- [15] Menezes, P. L., and Lovell, M. R. (2014). "Studies on the formation of discontinuous rock fragments during cutting operation". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 71: 131-142.
- [16] Joodi, B., Sarmadivaleh, M., Rasouli, V., and Nabipour, A. (2012). "Simulation of the cutting action of a single PDC cutter using DEM". *Petroleum and Mineral Resources*, 81: 143-150.
- [17] Richard, T. (1999). "Determination of rock strength from cutting tests". MSc Thesis, University of Minnesota.
- [18] Richard, T., Detournay, E., Drescher, A., Nicodeme, P., and Fourmaintraux, D. (1998). "The scratch test as a means to measure strength of sedimentary rocks.

¹ Polycrystalline diamond compact

² Thermally Stable Polycrystalline

³ Rock Fracture Process Analysis



Influence of Pdc Cutter Angle on the Failure Mechanism of Rock Like Material Using Experimental Test and Numerical Simulation

Sarfarazi V.^{1*}, Dehghani H.², Jahanmiri Sh.³

1- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran
Sarfarazi@hut.ac.ir

2- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran
dehghan.hesam@gmail.com

3- M.Sc, Dept. of Mining Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran
miningengineering91@gmail.com

(Received: 23 Jun. 2020, Accepted: 07 Feb. 2021)

Abstract: In this paper, the effect of PDC cutter angle on the failure mechanism of rock like materials was investigated using experimental test and numerical simulation. For this purpose, three PDC cutter with different angle were built, i.e. 0°, 30° and 60°. Nine gypsum sample with dimension of 14cm*11cm*5cm were prepared. The ratio of gypsum to water was equal to 2. For each PDC angle, three similar gypsum blocks were tested. The blocks were situated above the PDC cutters and these assemblies were fixed in Uniaxial test machine. The loading rate was 0.05 mm/min. concurrent with experimental test, numerical simulation was performed using particle flow code in two dimension. Firstly calibration of PFC was done using experimental results. Secondly, numerical model with dimension of 14cm*11cm was prepared. Then, five PDC cutter angles were built, i.e. 0°, 15°, 30°, 45° and 60°. These cutters were situated at lower part of the model and move in positive side of y direction by rate of 0.01 mm/min. the results show that failure patterns were affected by PDC angle. Also maximum failure load was controlled by failure pattern. The maximum failure load was decreased by increasing the PDC cutter angle. The maximum failure load was related to angle of 0. The minimum failure load was related to angle of 60. The experimental results were similar to numerical simulations out puts.

Keywords: PFC2D, Cutter angle, Tensile crack.

INTRODUCTION

Drill bit is a practical tool for rock drilling. Tian [1] developed a new drill bit for rock cutting. Xu [2], developed a diamond drill bit for rock cutting. Li et al [3], studied the effect of bit angle on the failure mechanism.

EXPERIMENTAL TEST

The mixture of gypsum and water was used for model preparation. Uniaxial strength and tensile strength



of model material were 10.5 MPa and 1.3 MPa, respectively (Figure 2). Figure 3 shows rectangular box for model preparation. Figure 4 shows the stain less steel box for bit testing. The testing was performed using uniaxial test machine under 0.01 mm/sec (Figure 5).

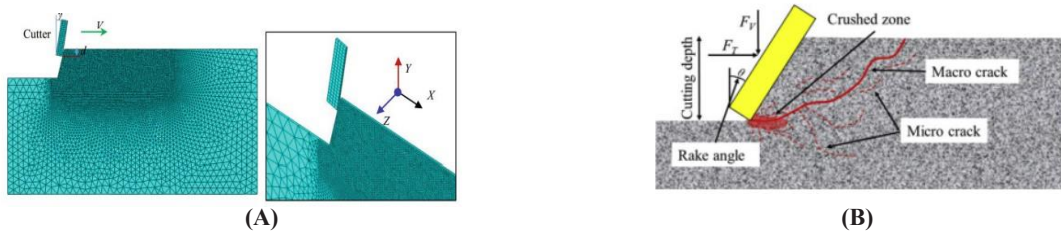


Figure 1. The effect of bit angle on the failure mechanism



Figure 2. Model under uniaxial compression and Brazilian test



Figure 3. Rectangular box

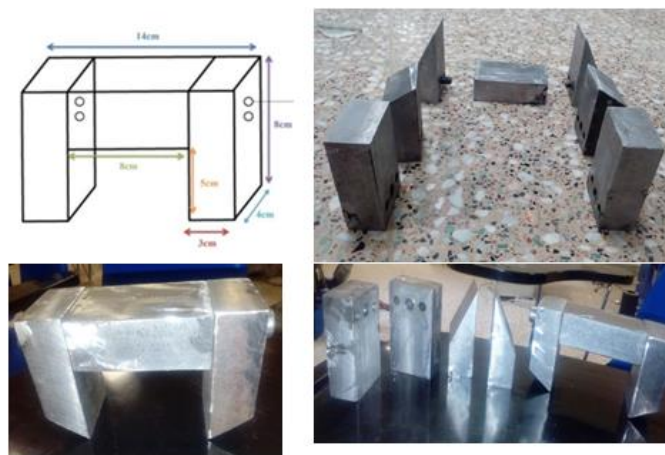


Figure 4. The stain less steel box for bit testing



Figure 5. Uniaxial test machine

FINDINGS AND ARGUMENT

Figure 6 shows the failure pattern occurred in the model with cutter angle of 0° . The tensile crack was initiated beneath the cutter and was propagated parallel to loading axis till coalesced to sample edge.

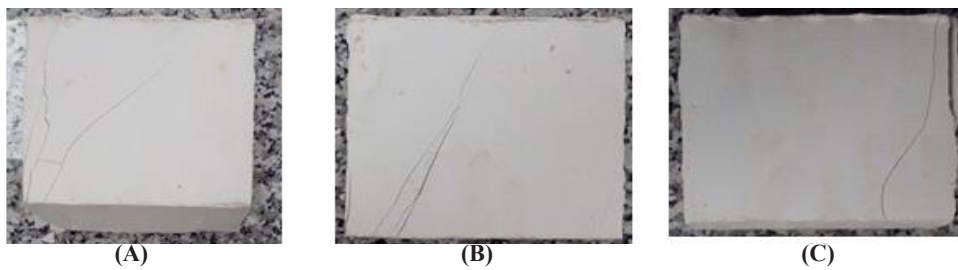


Figure 6. The failure pattern occurred in model with cutter angle of 0°

Figure 7 shows the failure pattern occurred in the model with cutter angle of 30° . The tensile crack was initiated beneath the cutter and propagated parallel to loading axis till coalesced to sample edge.

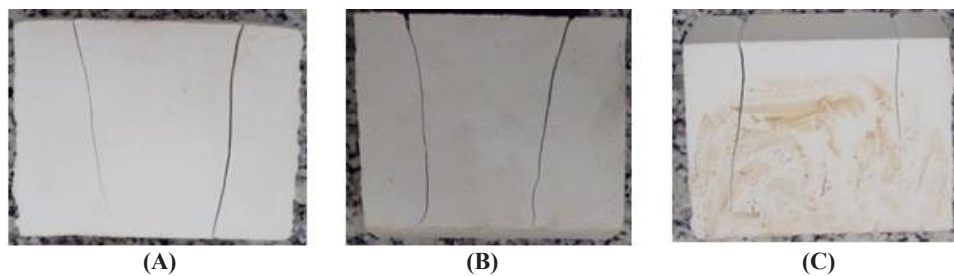


Figure 7. The failure pattern occurred in model with cutter angle of 30°

Figure 8 shows the failure pattern occurred in the model with cutter angle of 60° . The tensile crack was initiated beneath the cutter and propagated parallel to loading axis till coalesced to sample edge.

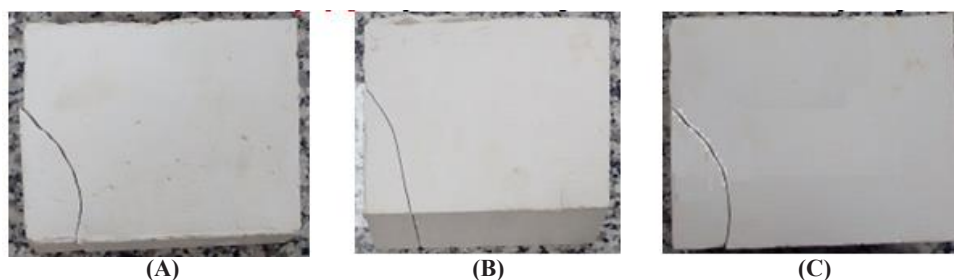


Figure 8. The failure pattern occurred in model with cutter angle of 60°

Figure 9 shows the effect of cutter angle on the failure load. The failure load was decreased by increasing the cutter angle.

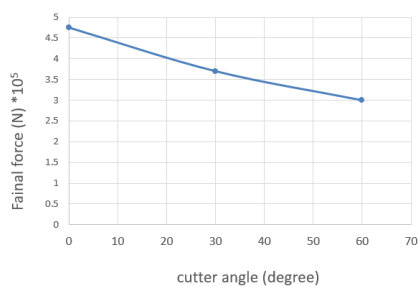


Figure 9. The effect of cutter angle on the failure load

PFC2D SOFTWARE

Figure 10 shows particle generation processes. Figure 11 shows model calibration results. The outputs of numerical simulation was similar to experimental one. Figure 12 show the rectangle model with dimension of 100 mm*100mm for indentation test.

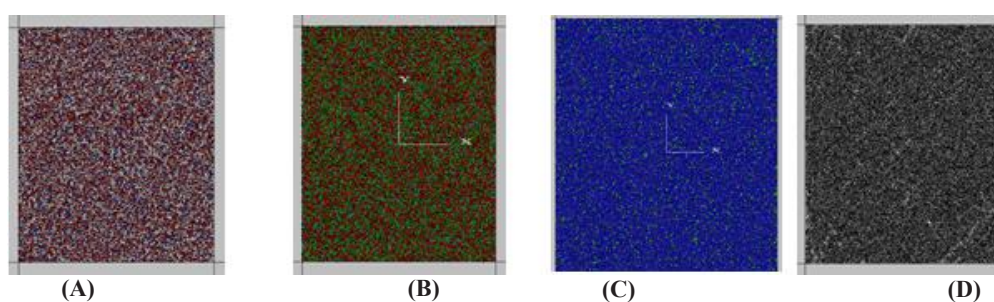


Figure 10. Particle generation processes

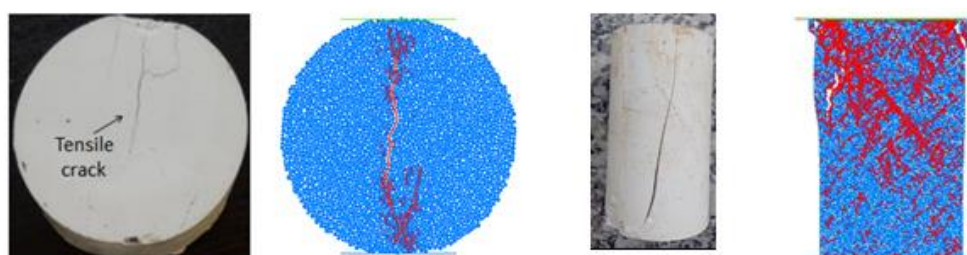


Figure 11. Model calibration results

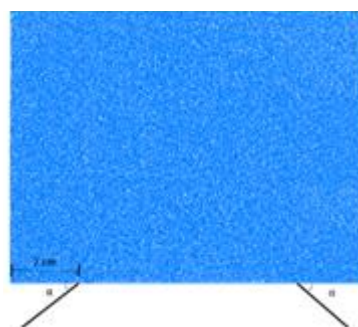


Figure 12. The rectangle model with dimension of 100 mm*100mm for indentation test

Figure 13 A-D shows the failure pattern occurred in the model with cutter angle of 0° , 15° , 30° , 45° and 60° . The tensile crack was initiated beneath the cutter and propagated parallel to loading axis till coalesced with sample edge.

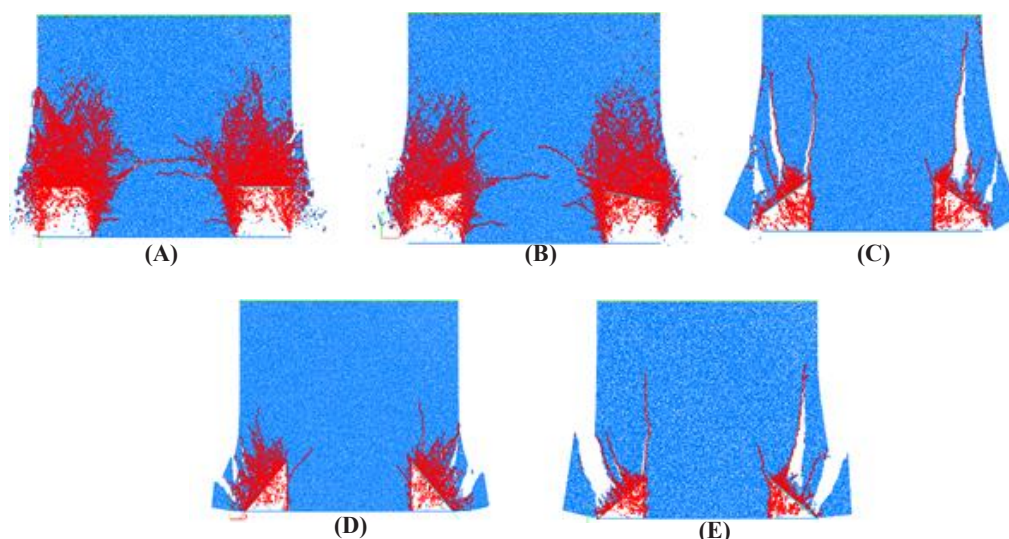


Figure 13. The failure pattern occurred in the model with cutter angle of A: 0° , B: 15° , C: 30° , D: 45° and E: 60°

Figure 14 shows the effect of cutter angle on the failure load. The failure load was decreased by increasing the cutter angle.

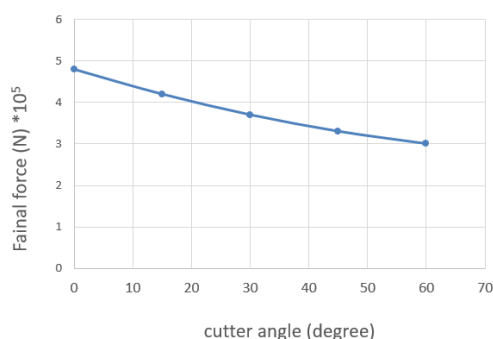


Figure 14. The effect of cutter angle on the failure load

CONCLUSIONS

In this paper, the effect of PDC cutter angle on the failure mechanism of rock like materials was investigated using experimental test and numerical simulation. For this purpose, three PDC cutters with different angle were built, i.e. 0° , 30° and 60° . Nine gypsum sample with dimension of $14\text{cm} \times 11\text{cm} \times 5\text{cm}$ were prepared. The ratio of gypsum to water was equal to 2. For each PDC angle, three similar gypsum blocks were tested. The blocks were situated above the PDC cutters and these assemblies were fixed in Uniaxial test machine. The loading rate was 0.05 mm/min . concurrent with experimental test; numerical simulation was performed using particle flow code in two dimensions. Firstly calibration of PFC was done using experimental results. Secondly, numerical model with dimension of $14\text{cm} \times 11\text{cm}$ was prepared. Then, five PDC cutter angles were built, i.e. 0° , 15° , 30° , 45° and 60° . These cutters were situated at lower part of the model and move in positive side of y direction by rate of 0.01 mm/min . the results show that failure patterns were affected by PDC angle. Also maximum failure load were controlled by failure pattern. The maximum failure load was decreased by increasing the PDC cutter angle. The maximum failure load was

related to angle of 0. The minimum failure load was related to angle of 60. The experimental results were similar to numerical simulations out puts.

REFERENCES

- [1] Tian, J. (2015). “*Rock-breaking analysis model of new drill bit with tornado-like bottomhole model*”. Journal of Mechanical Science and Technology, 29(4): 1745-1752.
- [2] Xu, J., Sheikh, A. H., and Xu, C. (2017). “*Diamond & Related Materials 3-D Finite element modelling of diamond pull-out failure in impregnated diamond bits*”. Diamond and Related Materials, 71: 1-12.
- [3] Li, B. (2018). “*The rock breaking mechanism analysis of rotary percussive cutting by single PDC cutter*”. Arabian Journal of Geosciences, 11(192): 33-45.