

اثر میرایی و نسبت فاصله داری به بارسنگ چال بر مکانیزم خردشدگی سنگ با استفاده از نرم افزار PFC2D و Wipfrog

وهاب سرفرازی^{۱*}؛ حسام دهقانی^۲؛ بهنام ظاهری^۳

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

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

۳- کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۱

چکیده

در این مقاله با استفاده از نرم افزار PFC2D بر پایه روش اجزای مجزا، به بررسی اثر پارامترهای هندسی چال (فاصله داری) بر مکانیزم خردشدگی سنگ پرداخته شده است. به این منظور مدلی با ابعاد 1000×1000 میلی متر در محیط نرم افزار ساخته شد. سپس میکروپارامترهای کالیبره شده در مدل اعمال شد. میکروپارامترها بعد از شبیه سازی مقاومت کششی سنگ و مقایسه با نمونه آزمایشگاهی کالیبره گردیدند. به منظور بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر روی مکانیزم شکست، چالهایی با نسبت فاصله داریها به بردن های مختلف در مدل عددی حفاری گردید (نسبت فاصله داری به بردن برابر $1/15$ ، $1/3$ و $1/45$). با بررسی زونهای مختلف شکست در حالت های مختلف در نرم افزارهای PFC2D و Wipfrog، نسبت فاصله داری به بردن برابر با $1/3$ به عنوان مطلوب ترین آرایش برای خردایش پیشنهاد گردید. به بیان دیگر در این نسبت بهینه ترین ابعاد دانه ها بدست می آید. همچنین اثر میرایی های مختلف بر روی مکانیزم شکست بررسی شد. با افزایش میرایی میزان خردشدگی کاهش پیدا می کند که بیشترین میزان خردشدگی مربوط به دمپینگ $0/5$ است.

واژگان کلیدی

مکانیزم شکست، پارامترهای هندسی چال، نرم افزار عددی PFC2D، Wipfrog

۱- مقدمه

طراحی الگو و مدیریت انفجار در معدنکاری با هدف دستیابی به درجه خردشدگی مناسب برای سامانه ی بارگیری، باربری و سنگ شکنی و کاهش پدیده های ناخواسته ای چون لرزش زمین، انفجار هوا، آسیب های وارده به دیواره ی پله ها و پرتاب بیش از حد سنگ ها با شرط امکان پذیری اجرایی و اقتصادی عملیات صورت می پذیرد. خردایش نامناسب سنگ علاوه بر ایجاد مشکلات یاد شده منجر به تحمیل هزینه های اضافی در قالب خردایش ثانویه، توقف، تولید وغیره می شود. به منظور رفع این مشکل لازم است ابتدا میزان خردایش حاصل از انفجار پیش بینی گردد. روش های متعددی توسط

پژوهشگران برای پیش بینی خردایش پیشنهاد شده است. وی و همکاران [۱] با استفاده از روش ترکیبی المان محدود-مجزا به شبیه سازی انفجار در معادن زیرزمینی پرداخته اند. هدف از این تحقیق را بررسی استفاده از یک برنامه ترکیبی المان محدود-مجزا، برای شبیه سازی و پیش بینی خطرات شکست در ذخایر پرکننده به علت تاثیر فشار انفجار در معادن زیرزمینی بیان کردند. انتشار شکستگی در سنگ، خردایش در سنگ و رفتار مواد پرکننده توسط مدل پیشنهادی ارائه و مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل ارائه شده را می توان به عنوان یک ابزار موثر برای شبیه سازی فرایند شکستگی دینامیکی در طول انفجار و تخمین خطرات شکست ناشی از پر کردن با استفاده از حداکثر سرعت ذرات بکار برد. سرعت

*نویسنده مسئول: دانشیار دانشگاه صنعتی همدان،

پست الکترونیک: Sarfarazi@hut.ac.ir

ماده پر کننده مشخص شده، برای بررسی پایداری محلی و منطقه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. ژو و همکاران [۲] تحقیقی را تحت عنوان بررسی عددی آسیب‌های انفجار در سنگ‌های استوانه‌ای ارائه کردند. در این تحقیق به منظور بررسی شکستگی‌های سنگ و مکانیزم خردایش تحت بارهای دینامیکی یک مدل سنگی استوانه‌ای با یک چال در مرکز آن با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN توسعه داده شد. بر طبق ویژگی‌های مواد و شرایط بارگذاری چهار نوع ماده حالت خطی، شوک، فشرده و گاز ایده‌آل برای مدل‌سازی بکار گرفته شد. یک معیار شکست تنش اصلی اصلاح شده برای اعمال حالت‌های مواد، رفتار ماده منفجره PETN، سنگ‌های آذرین نسبتاً همگن و دیوریت در این مدل سنگی استفاده شد. تک منبع خطی مواد منفجره که در مرکز مدل جا گرفته است، برای تولید بارهای دینامیکی بر روی سنگ‌های اطراف بصورت عددی آتش زده شد. مدل‌سازی عددی در شرایط واقعی انفجار نیز اعمال شد. ابتدا مکانیزم شکست سنگ تحت بارهای دینامیکی تجزیه و تحلیل شده و سپس تأثیر پارامترهای کوپلینگ متوسط، سلول بکار رفته، شرایط مرزی، موقعیت اولیه انفجار در ستون ماده منفجره و فاصله هوایی بر شکستگی سنگ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تمامی پارامترها تأثیر ویژه‌ای بر شکستگی سنگ تحت بارهای دینامیکی دارند. کیو و همکاران [۳] تحقیقی را با عنوان شبیه‌سازی عددی انفجار چال‌های موازی برشی با چال‌های خرج‌گذاری نشده را ارائه کردند. در این تحقیق شکل‌گیری حفرات و فرایند انتشار امواج تنش ناشی از انفجار چال‌های موازی برشی با استفاده از نرم‌افزارهای غیرخطی المان مجزای ANSYS/LS-DYNA شبیه‌سازی شد. توزیع تنش بخش پلاستیک، سرعت گره‌ها، سابقه شتاب-زمانی گره‌ها و نسبت حجم کارتریج انفجار در طول فرایند آنالیز شد. نتایج نشان داد که انفجار چال‌های خرج‌گذاری شده سبب ایجاد اندرکنش بین امواج تنش با دیواره‌های چال‌های خرج‌گذاری نشده می‌شود. ترک‌های اولیه سنگ و جابجا شدن چال‌های مجاور نیز به مکانیزم اصلی شکل‌گیری حفرات در مراحل اولیه کمک می‌کند. روی و همکاران [۴] تحقیقی را تحت عنوان آنالیز عددی از انفجار چال و بکارگیری در معدن زغال‌سنگ با سقف ضعیف ارائه کردند. روی و همکارانش انفجار چال را مدل‌سازی کرده و با استفاده از نرم‌افزار AUTODYN برای شبیه‌سازی چال انفجاری اقدام کردند. سپس شبیه‌سازی انجام شده با آنالیزهای تجربی و نظری مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج این تحقیق را تایید نمود. بر این اساس انفجار با چال‌های عمیق را در سقف‌های ضعیف پیشنهاد دادند. لوی و همکاران نه تنها شبیه‌سازی انجام شده را موثر دانستند بلکه انفجار چال عمیق در سقف ضعیف معادن زغال‌سنگ را نیز موثر و شدنی دانستند. وانگ و کونیتزکی [۵] تحقیقی را با عنوان مدل‌سازی شکستگی ناشی از انفجار در توده‌سنگ‌های درزه‌دار ارائه کردند. این

تحقیق بر روند شکستگی دینامیکی در سنگ‌های درزه‌دار ناشی از انفجار متمرکز بوده و برای اولین بار از دو روش LS-DYNA و UDEC برای این امر استفاده شد. گسترش شکستگی در دو توده‌سنگ درزه‌دار مطالعه گردید. علاوه بر این اثر تراکم بارگذاری مواد منفجره بر روی تکامل تدریجی شکستگی‌ها و اثر تنش‌های موجود در زمین و سطح‌آزاد بر روند شکستگی توده‌سنگ نیز پرداخته شد. نتایج نشان دادند که روش‌های عددی یک ابزار مناسب برای شبیه‌سازی انفجار در توده‌سنگ‌های درزه‌دار می‌باشد. نرم‌افزار LS-DYNA برای مدل کردن مواد منفجره و فراهم کردن بارگذاری انفجار در محیط UDEC که شامل شبیه‌سازی امواج تنش و فرایند شکستگی در توده‌سنگ می‌باشد، به تصویب رسیده و استفاده شد. انفجار در توده‌سنگ‌های با ساختار درزه‌داری متفاوت، رفتار متفاوتی خواهد داشت. در توده‌سنگ‌های با درزه‌داری متعامد، تکامل درزه‌ها، همسانگردی قوی را نشان داد. برای شبیه‌سازی مناسب از ایجاد ترک در توده‌سنگ از مولد ترک ورونویی استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد که شکستگی زمانی اتفاق می‌افتد که مقاومت درزه‌ها بین بلوک‌های ورونویی فراتر رفته است. تراکم بار مواد منفجره اثر قابل توجهی بر الگوی شکست دارد. تراکم بالا باعث ایجاد یک منطقه شکستگی بزرگ با ترک‌های کوتاه می‌شود و شکستگی کمتر در بارگذاری‌های کمتر اتفاق می‌افتد. وجود تنش تأثیر قابل توجهی بر شکستگی داشته و باعث می‌شود که شکستگی‌ها غیر یکنواخت شود. شکستگی‌ها بیشتر تمایل به گسترش در جهت تنش اصلی نشان دادند. علاوه بر این در نزدیکی سطح آزاد، موج تنش منعکس شده و در نتیجه پدیده پوسته پوسته شدن سطحی در توده‌سنگ رخ می‌دهد. لو و همکاران [۶] تحقیقی را با عنوان یک روش معادل برای شبیه‌سازی لرزش حاصل از انفجار ارائه کردند. روند فشار دینامیکی انفجار از طریق بررسی و آنالیز گسترش حجم چال، رشد ترک‌ها، حرکت گل‌گذاری و فوران گازهای ناشی از انفجار انجام شد. نتایج نشان دادند که روش شبیه‌سازی معادل برای پاسخ دینامیکی در زمین‌های در معرض انفجار قابل اجرا بوده و انتخاب خواص توده‌سنگ در نزدیکی مرز الاستیک معادل تأثیر قابل توجهی در نتایج شبیه‌سازی دارد. علی‌آبادیان و همکاران [۷] تحقیقی را تحت عنوان شبیه‌سازی دینامیکی شکستگی پیوسته سنگ در معدنکاری روباز ارائه کردند. به همین منظور جهت بررسی مکانیزم شکستگی دینامیکی مربوط به شکست ناشی از انفجار از گمانه و انتشار ترک، کد المان مجزای دو بعدی مورد استفاده قرار گرفت. بارگذاری بر روی دیواره چال‌های انفجاری نیز اعمال شده و بر این اساس انتقال انرژی مواد منفجره به توده سنگ از طریق فشار چال انفجاری بصورت تابعی از زمان مورد بررسی قرار گرفت. برای سنگ میزبان از مدل ماده موهر کولمب برای محاسبه شکست پلاستیکی استفاده شد. با توجه به نتایج ارائه شده، مطالعه عددی انجام شده نقش تنش‌های

کامل توده سنگ با ترکیب تغییر شکل‌های بزرگ، توزیع خسارات و لرزش انفجار با تک مدل شبیه‌سازی شده باشد، انجام دادند. یک الگوریتم هیدرودینامیکی ذرات (SPH) و یک مدل توسعه یافته از خسارات انفجار در نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA به منظور توسعه توام شبیه‌سازی‌های عددی SPH-DAM-FEM کد شد. مدل آسیب توسعه یافته همراه با فناوری SPH برای شبیه‌سازی زون‌های نزدیک در فرایند انفجار و FEM برای نشان دادن واکنش‌های میدانی سنگ استفاده شد. به این ترتیب واکنش دینامیکی از انفجار کامل یک پله قبل و بعد از انفجار همراه با مدل توسعه یافته در دو مطالعه موردی از شیب‌های سنگی در چین مورد بررسی قرار گرفت. ویژگی ناپیوستگی‌ها در فرایند انفجار، تغییر شکل‌های بزرگ و آسیب‌ها و خسارات به دقت مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه لرزش‌ها و آسیب‌های باز تولید شده با اندازه‌گیری‌های انجام شده در سایت مقایسه شد. تجزیه و تحلیل‌های انجام‌شده نشان داد که نتایج مدل توسعه یافته توافق خوبی با مشاهدات میدانی دارد و این قابلیت مدل ترکیبی ارائه شده را نشان می‌دهد. هو و همکاران [۱۱] تحقیقی را با عنوان مطالعه عددی روی انتشار ترک با استفاده از نرم‌شدگی تحت انفجار ارائه کردند. در این تحقیق یک معیار مختلط که ترکیبی از معیار تنش اصلی اصلاح شده و مدل آسیب نرم شدن ترک‌های کششی است، برای شبیه‌سازی انتشار ترک از سنگ تحت شرایط انفجار توسعه داده شد. به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی مجموعه‌ای از طول‌های انفجاری با یک ترک و یک چال با زاویه‌های مختلف از ترک ایجاد شد. با استفاده از این مدل احتمال انتشار ترک در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. معادله خطی حالت برای سنگ مورد استفاده قرار گرفت و برای مواد منفجره نیز معادله حالت JWEEOS استفاده شد. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی، آزمایشاتی با یک ترک و یک چال با استفاده از PMMA (پلی متاکریلات) انجام شد. نتایج نشان داد که ساختار انفجار و خرج‌گذاری‌ها و زاویه انفجار مشابه مدل‌های عددی می‌باشد و نتایج آزمایشات نیز در توافق با نتایج شبیه‌سازی بدست آمد. زی و همکاران [۱۲] تحقیقی را تحت عنوان مکانیزم تکامل تدریجی آسیب سنگ در تونل‌های عمیق ایجاد شده با انفجار برشی ارائه کردند. در این تحقیق ابتدا مدل آسیب کششی و فشاری-برشی توسعه داده شد سپس مدل ساخته شده در نرم‌افزار LS-DYNA به عنوان تعریف یک مدل ماده توسط کاربر اجرا شد. برای اعتبارسنجی مدل ساخته شده مقایسه‌ای بین نتایج عددی و نتایج آزمون‌های میدانی انجام شد. در این مقایسه‌ها تاثیر شرایط مرزی و سطح آزاد، تنش‌های برجا و ضرایب فشارهای جانبی روی انفجار برشی در عمق زیاد در نظر گرفته شد. نتایج مدل‌سازی عددی در این تحقیق نشان داد که موج تنش و موج انعکاس یافته از سطح آزاد به اتصال شکستگی‌های اطراف چال کمک می‌کند. همچنین تنش‌های برجای

دینامیکی در انفجار را در یک روش کیفی توصیف می‌کند. اندرا و همکاران [۸] تحقیقی با عنوان مدلسازی شکستگی، آشفته‌گی و اندرکنش زون‌های اطراف چال‌های انفجاری تمام خرج‌گذاری شده را ارائه کردند. به منظور به دست آوردن یک دید بهتر نسبت به مکانیزم‌های پیچیده در انفجار تحت شرایط کاملاً محدود در برنامه‌های کاربردی معادن، چند مدل ساخته شد و توسط مدل تنش ترکیبی انفجار مورد بررسی قرار گرفت. یک معیار آشفته یا میکرو آسیب دیده پیشنهاد و در تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی استفاده شد. این مدل با شبکه با معیار پیوند گسیختگی کششی و یک رویکرد مبتنی بر حداکثر سرعت ذرات ترکیب شد. میزان شکستگی، آشفته‌گی و زون‌های اندرکنش از چال‌های انفجاری بالای ۱۸ متر و همراه با پرایمر ۸ متر تخمین زده شد. اندرکنش مستمر و متوالی در ستون ماده منفجره در فواصل ۱۵ متری مشهود بود. زمانی که چال انفجاری در فاصله ۱۸ متری قرار گرفت، موج تنش تنها اندرکنش جزئی یا محدودی را در امتداد ستون انفجار نشان داد. با توجه به اینکه تأثیر مقادیر تنش برجا در محدوده ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر است، نتایج مدل‌سازی تاثیر زون‌های شدیداً خرد شده را نمایش داد. در عمق ۱۲۰۰ متری و بالاتر میزان اندرکنش متوالی در سطح پرایمرهای اولیه کاهش یافته بود. برای شبیه‌سازی شرایط ژئوتکنیکی، جهت شکستگی‌های شعاعی با توجه به جهت تنش اصلی در نسبت ناهمسانگردی بیشتر از دو مصداق دارد. با این حال شکل منطقه آشفته بنظر نمی‌رسد که بوسیله ناهمسانگردی تأثیر پذیرد. ییلماز و اونلو [۹] تحقیقی را تحت عنوان تجزیه و تحلیل سه بعدی آسیب سنگ تحت شرایط فشار انفجار ارائه کردند. در این مطالعه رفتار توده سنگ تحت شرایط فشار انفجار با استفاده از مدل‌سازی عددی سه بعدی المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. در این ارزیابی معیار شکست موهر کولمب برای توصیف مقاومت توده سنگ استفاده شد. تنش اعمال شده روی مرز چال توسط تابع $\exp$ که مقدار حداکثر آن در یک زمان کوتاه بوده و سپس در یک دوره قابل توجهی به صفر می‌رسد، شبیه‌سازی شد. اثر نرخ کرنش بر روی خواص مکانیکی ماده سنگ نیز در تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که بیشترین تاثیر در انفجار سنگ را مواد منفجره با محتوای فرکانس پایین اما فشار دیواره چال کافی دارا خواهد بود. علاوه بر این تأثیر جهت و بزرگی تنش‌های اصلی بر توسعه منطقه ترک‌دار در اطراف چال تأیید شد. در نهایت معادله ارائه شده برای مقاومت فشاری دینامیکی برای ماده سنگ تناسب خوبی را نشان داد. هو و همکاران [۱۰] تحقیقی را با موضوع شبیه‌سازی عددی انفجار کامل سنگ با استفاده از تکنیک SPH-DAM-FEM ارائه کردند. انفجار سنگ فرایند پیچیده‌ای است که شامل حالت‌های کوبی پیوسته و گسسته می‌باشد. این تحقیق را هو و همکاران با هدف ارائه یک شبیه‌سازی عددی که قادر به نمایش تمام واکنش‌های انفجار

می‌باشد. مقادیر دانسیته و اصطکاک سطح تماس دیسک‌ها برابر با $2630 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$ و 0.5 انتخاب شد. از آنجایی که مدل عددی در این شبیه‌سازی بایستی نماینده نمونه سنگ طبیعی باشد، لذا از اتصال‌های موازی که مشخصه سیمان‌شدگی سنگ هستند، استفاده می‌شود.

۲- نرم افزار PFC2D

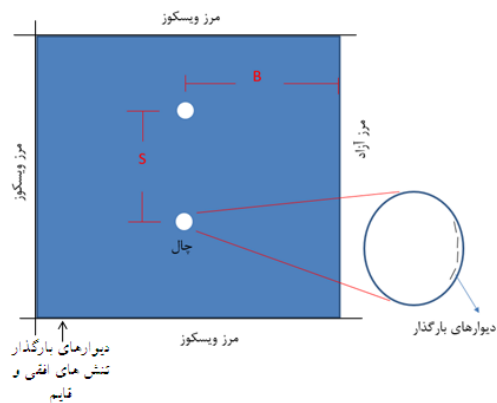
نرم افزار PFC2D، محیط سنگ را مانند مجموعه فشرده از ذرات با اندازه‌های غیریکنواخت و اشکال کروی و دایره‌ای مدل‌سازی می‌کند که ذرات در نقاط اتصال خویش با پیوندهای موازی به هم چسبیده‌اند. فرآیند تولید مصالح، این سیستم را طوری تولید می‌کند که ذرات به‌خوبی به هم وصل شده و نیروهای بین دانه‌ای اندک خواهد بود. نیروهای بین دانه‌ای و فشردگی مجموعه ذرات، در مقیاس ماکروسکوپیک دلخواه و ایزوتروپ می‌باشد. 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 دارای پنج مرحله است که در زیر شرح داده می‌شود (Itasca Consulting [13] Group In فشردگی اولیه ذرات، اعمال تنش ایزوتروپیکی، کاهش تعداد ذرات معلق در مدل، ایجاد پیوندهای موازی و حذف دیواره‌های مدل).

٢-١- انتخاب مسک و خصوصیات

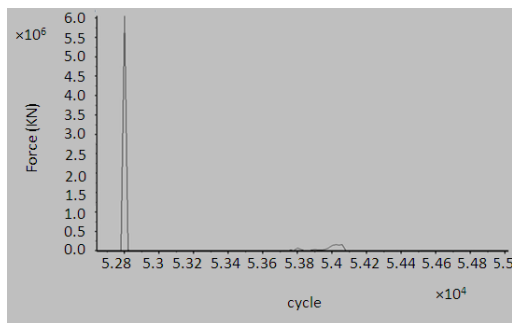
در مدل‌سازی‌های عددی توسط نرم‌افزار PFC امکان اعمال مستقیم داده‌های آزمایشگاهی به مدل وجود ندارد. در این شرایط، بایستی خصوصیات مکانیکی مدل را با انتخاب صحیح میکروخصوصیات آن برآورد نمود. در حقیقت، با انتخاب صحیح میکروخصوصیات، مدل به‌گونه‌ای کالیبره می‌شود که رفتارش با رفتار مکانیکی نمونه فیزیکی مشابه گردد. همان‌گونه که از شکل ۱ مشاهده می‌شود، نوع ذره دیسکی بوده و نسبت قطر بزرگترین دانه به قطر کوچکترین دانه بزرگتر از ۱ 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 می‌باشد. نسبت تخلخل مدل $0/1$ انتخاب شده است تا سیستم متراکم شده‌ای از ذرات مهیا گردد. $\bar{\alpha}$ برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. این نشان می‌دهد که سیمان به‌طور کامل فضای بین ذرات به‌هم چسبیده را اشغال کرده است. چنانچه $\bar{\alpha}$ برابر صفر انتخاب گردد، رفتار به سمت مواد دانه‌ای میل می‌کند. ضریب میرایی (α) برابر با $0/5$ انتخاب شده که گویای شرایط دینامیک، آنالیز

۲-۳-مدلسازی اصلی

۲۳



(الف)



(ب)

شکل ۲-الف) مرزهای آزاد و ویسکوز، بار سنگ و فاصله داری چالها،
(ب) نمودار اعمالی هر دیوار بارگذار در برخورد با دیواره چال.

۲-۴- بررسی نمودار نیروی اعمالی هر دیوار بارگذار در

برخورد با دیواره چال

هر دیوار بارگذار اعمال شده در مدل دارای جهت حرکت مشخص و سرعت انفجاری معادل ماده منفجره آنفو می باشد که در برخورد با دیواره های چال انرژی مشخصی را به مدل اعمال می کند. در سیکل اول بارگذاری، پیک اصلی به صورت مثلثی با بالاترین توان بوده و در سیکل های بعدی به شدت از انرژی موج کاسته شده و نهایتاً انرژی موج تخلیه خواهد شد (شکل ۲-ب).

۳- نتیجه گیری

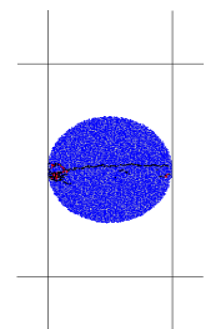
۳-۱- بررسی اثر میرایی مختلف بر میزان رشد ترک ها

شکل ۳-الف، ب و ج الگوی رشد ترک را در سه مدل با میرایی های مختلف ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ نشان می دهد. در این شکل الگوی رشد ترک در سیکل دهم مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین شکل ۳-الف، ب و ج الگوی رشد ترک را در سه مدل با میرایی های مختلف ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ نشان می دهد. در این شکل الگوی رشد ترک در سیکل پانصدم مورد بررسی قرار گرفته است. ترک های قرمز رنگ و

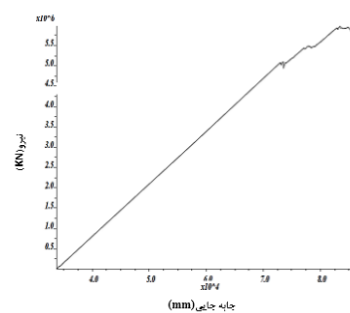
مدل عددی را بر عهده دارند. با اعمال بار به دیسک های قرار داده شده به عنوان ماده منفجره، به دیسک ها اجازه داده شد تا با سرعت معینی دیوارهای چال را به حرکت در آورند. به این ترتیب می توان با بررسی پروسه شکست سنگ، تاثیر هندسه چال ها را بر میزان خردایش تحت شرایط متفاوت به دست آورد. به این منظور مدلی با ابعاد $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ با حفاری چال با قطر ۹۰ میلی متر با نسبت فاصله داری به بردن های (S/B) ۱/۱۵، ۱/۳۰ و ۱/۴۵ طراحی گردید (شکل ۲-الف). دیواره های نصب شده در چال با سرعت ۵۰ متر بر ثانیه در جهت عمود بر چال به حرکت درآمده و پروسه انفجار مدل سازی شد. مرز جاذب انرژی در مدل مرز ویسکوز می باشد. دیوارهای اطراف مدل نیز وظیفه اعمال تنش های افقی و قائم را برعهده دارند (شکل ۲-الف). میزان تنش های افقی و قائم اعمال شده به مدل ۲۰ مگاپاسکال و ۶ مگاپاسکال می باشد. این مقادیر مشابه تنش های افقی و قائم معدن ساری گونی قروه می باشد. لازم به ذکر است که جهت بررسی تاثیر میرایی بر مکانیزم خردایش، میزان میرایی موج در مدل در سه مقدار ۰/۵ و ۰/۷ و ۰/۹ انتخاب گردید.



(ب)



(الف)



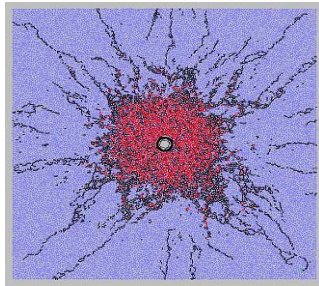
(ج)

شکل ۳-۲-الف) الگوی شکست مدل PFC2D تحت آزمایش برزیلی؛ ب- الگوی شکست نمونه آزمایشگاهی تحت آزمایش برزیلی، ج- نمودار عددی نیروی شکست بر اساس جابجایی

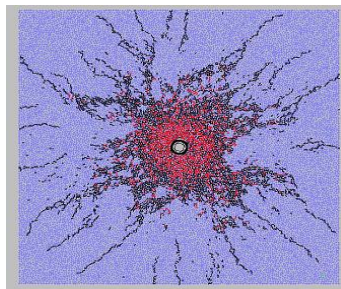
جدول ۲ مقادیر مقاومت کششی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی

مقاومت کششی آزمایشگاهی (MPa)	۶
مقاومت کششی عددی (MPa)	۶/۲

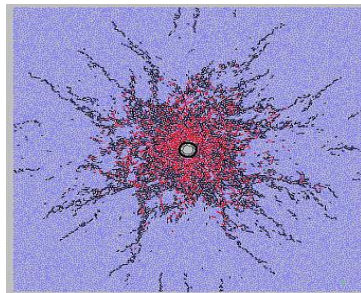
سیاه رنگ به ترتیب بیانگر ترک های کششی و برشی می باشند. شکل ۳ و ۴ نشان می دهند که با افزایش میزان میرایی موج، شدت رشد ترک ها کاهش می یابد. همچنین در اطراف چال انفجاری ترک های کششی رشد می کنند و با افزایش فاصله از آن ترک های برشی توسعه می یابند.



(الف)

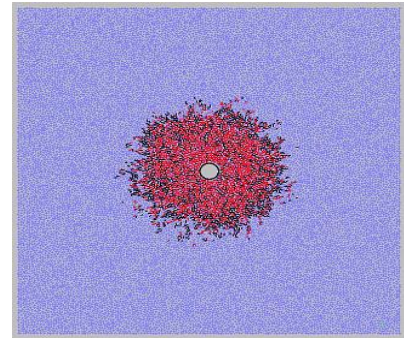


(ب)

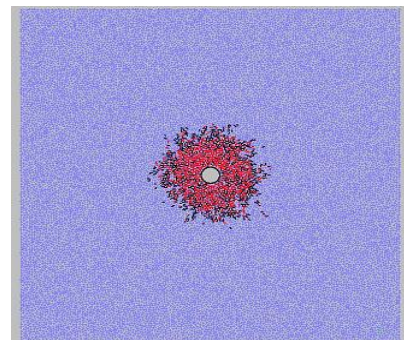


(ج)

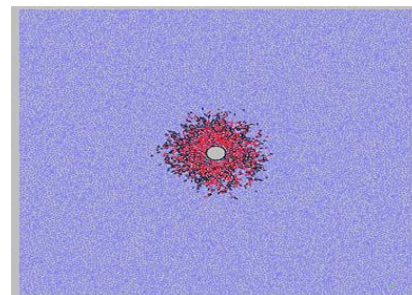
شکل ۴- الگوی رشد ترک در سه مدل با دمپینگ های مختلف الف)
۰/۵، ب) ۰/۷ و ج) ۰/۹؛ در سیکل ۵۰۰۰



(الف)

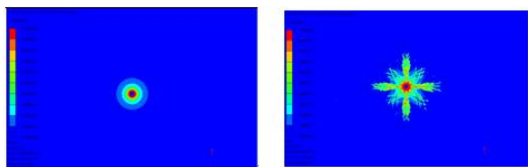


(ب)



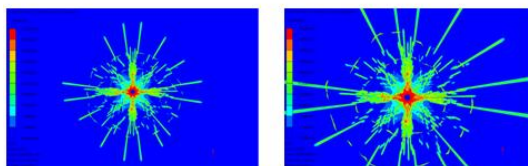
(ج)

شکل ۳- الگوی رشد ترک در سه مدل با دمپینگ های مختلف الف)
۰/۵، ب) ۰/۷ و ج) ۰/۹؛ در سیکل ۱۰۰



(الف)

(ب)



(ج)

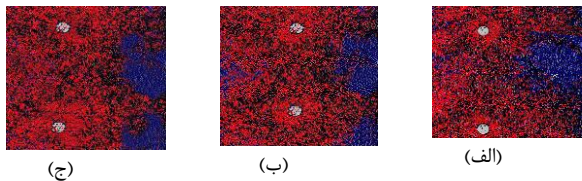
(د)

شکل ۵- فرآیند انفجار سنگ تک گمانه ای [۴]

شکل ۶ فرایند انفجار سنگ تک گمانه ای حاصل از تحقیقات علی آبادیان و همکارانش در سال ۲۰۱۳ را نشان می دهد. این مطالعه که توسط نرم افزار UDEC انجام شده است در تطابق مناسبی با شکل ۲ و ۳ است.

شکل ۵ فرایند انفجار سنگ تک گمانه ای حاصل از تحقیقات روی و همکاران در سال ۲۰۰۹ را نشان می دهد. این مطالعه که توسط نرم افزار AUTODYN انجام شده است، تطابق مناسبی با شکل ۲ و ۳ دارد.

(شکل ۸). در هر آرایش، مدل ها تحت ۵۰۰۰ سیکل بارگذاری قرار می گیرند. ترک های قرمز رنگ و سیاه رنگ به ترتیب بیانگر ترک های کششی و برشی می باشند. در این مدلها ترک های کششی بطور شعاعی رشد کرده و در نهایت شکستگی های کششی از انتهای زون خرد شده رشد می کنند. در مدل های شکل ۸-الف و ج یعنی در نسبت فاصله داری به بردن های (S/B) ۱/۱۵ و ۱/۴۵ بیشتری ابعاد بولدرها ایجاد می شود.

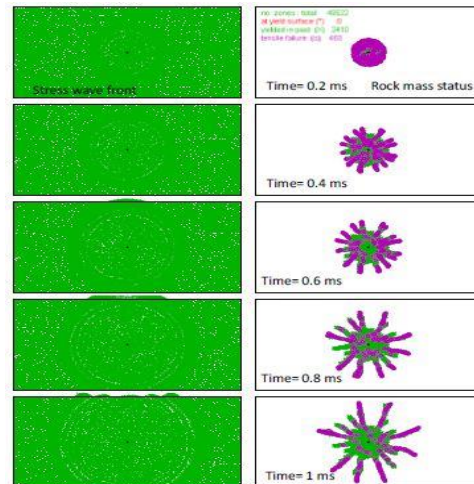


شکل ۸- نسبت فاصله داری به بارسنگ های (S/B) الف) ۱/۱۵، ب) ۱/۳۰ و ج) ۱/۴۵

۳-۴- تحلیل نتایج حاصل از نرم افزار PFC با آنالیز دانه

بندی توسط Wipfrog

با استفاده از نرم افزار Wipfrog می توان از خروجی نرم افزار PFC به طور دقیق ابعاد ذرات تولید شده بعد از انفجار را تجزیه و تحلیل نمود و بهینه ترین الگوی انفجار را پیشنهاد داد. پس از انتشار ترک های محیطی در سنگ، از سطح سنگ شکسته شده در نرم افزار PFC تصویری تهیه شد و این تصویر به عنوان ورودی به نرم افزار Wipfrog ارسال شد. در این نرم افزار قطعات خرد شده سنگ به دو صورت خودکار و دستی مرز بندی شدند. در نهایت نرم افزار با استفاده از اصول آنالیز تصویر، نمودار دانه بندی سنگ خردشده را ارائه می کند. پیش از استفاده از نرم افزار Wipfrog، به منظور حصول اطمینان از نتایج بدست آمده، کارکرد نرم افزار در خصوص نمونه های آزمایشگاهی که نمودار دانه بندی واقعی آنها در اختیار می باشد، راستی آزمایی شده است. نرم افزار Wipfrog از توانایی خوبی در تشخیص نمودار دانه بندی قطعات خرد شده سنگ برخوردار است. به منظور بررسی میزان خردایش ناشی از انفجار با نرم افزار Wipfrog، ابتدا یک مدل با ابعاد $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ در PFC ساخته شد. سپس یک چال به عمق ۵/۵ متر و قطر ۹۰ میلی متر حفاری شد و با همان سرعت ۵۰ m/s که در مدل های عددی قبل اعمال شده بود، اعمال گردید. آتشباری چال از سمت چپ به راست انجام می شود. شکل ۹-الف و ب رشد ترک های حاصل از انفجار در سیکل ۱۰۰ بارگذاری و در سیکل ۵۰۰۰ بارگذاری را نشان می دهد. ترک های قرمز رنگ و سیاه رنگ به ترتیب بیانگر ترک های کششی و برشی می باشند. همانگونه که از شکل ۹ مشاهده می شود، در سیکل ۱۰ بارگذاری ترک های کششی از سمت راست چال شروع شده و طول پیشروی آنها یکسان می باشد (شکل

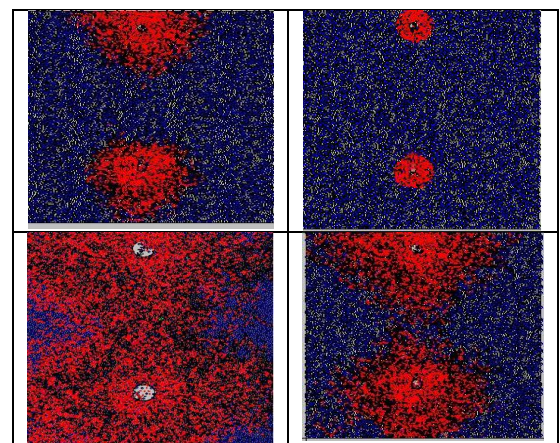


شکل ۶- فرآیند انفجار سنگ تک گمانه ای [۷]

۳-۲- بررسی نحوه ی رشد ترک ها در سیکل های مختلف

بارگذاری

شکل ۷ الگوی رشد ترک ها در پیرامون دو چال انفجاری در سیکل های ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ را نشان می دهد. ترک های قرمز رنگ و سیاه رنگ به ترتیب بیانگر ترک های کششی و برشی می باشند. این شکل نشان می دهد که ترک های کششی به صورت شعاعی در اطراف چال شروع به رشد می نمایند و زون شکسته شده را شکل می دهند. با افزایش سیکل بارگذاری میزان رشد ترک ها افزایش می یابد. گفتنی است که ترک های برشی در انتهای زون شکسته شده ایجاد شده است.

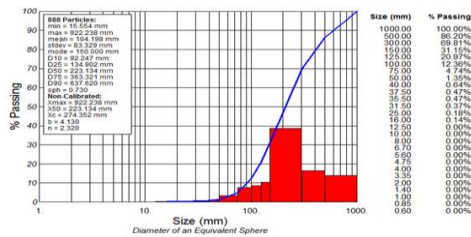


شکل ۷ الگوی رشد ترک ها در پیرامون دو چال انفجاری در سیکل های، الف) ۱۰۰، ب) ۱۰۰۰، ج) ۲۰۰۰ و د) ۵۰۰۰.

۳-۳- بررسی تاثیر هندسه چال ها (فاصله بین چال ها و

فاصله تا سطح آزاد) بر روی مکانیزم شکست

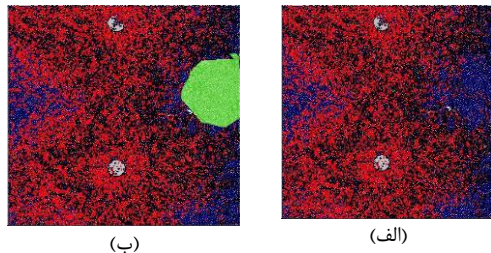
در این بخش اثر نسبت فاصله داری به بارسنگ های (S/B) ۱/۱۵، ۱/۳۰ و ۱/۴۵ بر مکانیزم شکست سنگ، مورد ارزیابی قرار می گیرد



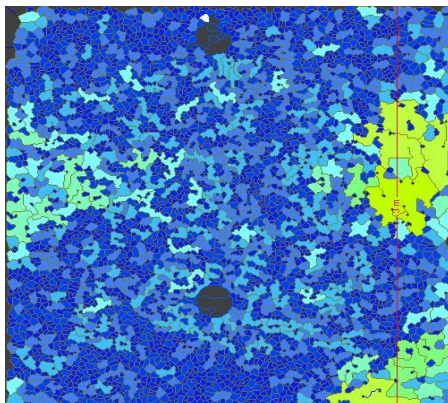
شکل ۱۱ نمودار مربوط به توزیع دانه بندی قطعات بعد از انفجار

۳-۵- تعیین محل ایجاد قطعات بزرگ بعد از انفجار

شکل ۱۲ و ۱۳ نتایج به دست آمده از طراحی مدل انفجار از نرم افزار PFC و همچنین تحلیل های حاصل از نرم افزار Wipfrog را نشان می دهد. بزرگترین قطعات ایجاد شده بعد از انفجار در نقطه ی ما بین دو چال حفاری شده رخ می دهد که با اعمال راه حل هایی همچون تغییر صحیح مقدار S/B می توان از ایجاد این قطعات جلوگیری کرد. در شکل های ۱۲ و ۱۳ محل بولدرها در نقطه مرکز دو چال کناری تعیین گردیده است.



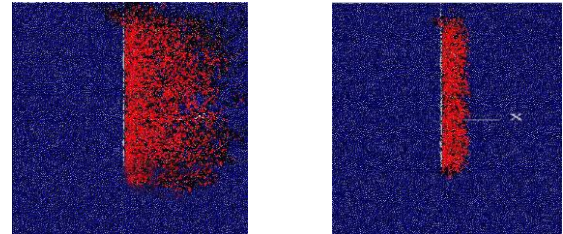
شکل ۱۲ محل قرارگیری بزرگترین قطعه ی تولید شده در نرم افزار PFC2D



شکل ۱۳ محل قرارگیری بزرگترین قطعه ی تولید شده در نرم افزار Wipfrog

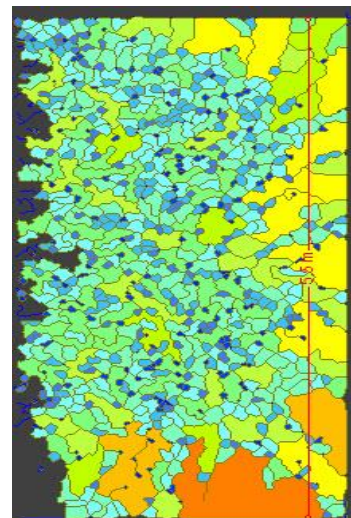
قطعات ایجاد شده در شبیه سازی با نسبت S به b برابر با ۱/۳ دارای کوچکترین ابعاد می باشند که نشان دهنده این است که الگوی حفاری با نسبت $S/B=1.3$ دارای بهینه ترین آرایش می باشد و سبب کاهش هزینه های ثانویه سنگ شکنی خواهد شد. همچنین مدلسازی با Wipfrog نشان می دهد که افزایش میزان فاصله داری سبب ایجاد قطعات بزرگتر خواهد شد. افزایش فاصله تا سطح آزاد

۹-الف). با افزایش سیکل بارگذاری کرده تا ۵۰۰۰ سیکل (شکل ۹-ب)، طول رشد ترک های کششی بیشتر شده و همچنین ترک های برشی در انتهای ناحیه شکسته شده ایجاد می شود.



شکل ۹- الف) شروع رشد ترک ها در یک چال قائم در سیکل ۱۰۰ بارگذاری، ب) انتشار ترک ها در سیکل ۵۰۰۰ بارگذاری

با توجه به الگوی شکست به دست آمده از مدل انفجاری در سیکل ۵۰۰۰ بارگذاری، آنالیز توسط نرم افزار Wipfrog انجام شد (شکل ۱۰). از شکل ۱۰ می توان سایزهای مختلف از جمله بزرگ-ترین سایز و کوچک ترین سایز ایجاد شده همچنین متوسط میزان ابعاد قطعات خرد شده را مشخص کرد.



شکل ۱۰ اندازه ابعاد قطعات ایجاد شده بعد از انفجار توسط نرم افزار Wipfrog

با توجه به خروجی نرم افزار می توان تحلیل دقیق از قطعات داشت. شکل ۱۱ نشان می دهد بیشترین ابعاد قطعات ایجاد شده ۹۲ سانتی متر، کمترین ابعاد قطعات ایجاد شده ۱۵ سانتی متر و متوسط دانه بندی ابعاد ۱۰/۴ سانتی متر می باشد.

۶- افزایش فاصله تا سطح آزاد سبب ایجاد قطعات بزرگتر خواهد شد. چراکه با افزایش فاصله داری تا سطح آزاد، میرایی موج بیشتر شده و این مهم سبب کاهش خردایش سنگ می شود.

۷- با کاهش فاصله داری میزان تولید نرمه ها افزایش می یابد. چراکه با کاهش فاصله داری، میرایی موج کمتر شده و این مهم سبب افزایش تولید نرمه می شود.

۸- با کاهش میزان فاصله تا سطح آزاد تولید نرمه ها افزایش می یابد. چراکه با کاهش فاصله داری تا سطح آزاد، میرایی موج کمتر شده و این مهم سبب افزایش تولید نرمه می شود.

۹- با شناسایی و مدل سازی پیش از انفجار می توان وجود یا عدم وجود بولدرهای سنگی و همچنین نرمه های تولید شده را پیش بینی کرد و نهایتاً با مشاهده این مهم می توان سیستم خردایش را بر مبنای سایزهای ایجاد شده طراحی کرد.

۱۰- نرم افزار PFC توانایی خوبی در مدلسازی انفجار دارد. مقایسه الگوی شکست حاصل از نرم افزار PFC و سایر نرم افزار های موجود در این مقاله گواهی بر این واقعیت است.

۴- نتیجه گیری

سبب ایجاد قطعات بزرگتر خواهد شد. با کاهش فاصله داری میزان تولید نرمه ها افزایش می یابد. و با کاهش میزان فاصله تا سطح آزاد تولید نرمه ها افزایش می یابد.

۱- با افزایش میرایی، میزان رشد ترک ها کاهش می یابد. چراکه با افزایش میرایی انرژی موج سریعتر کاهش می یابد که کاهش انرژی منجر به کاهش تعداد ترک ها می شود.

۲- رشد ترک ها به صورت شعاعی در چال های انفجاری گسترش می یابد. این مهم بدلیل توزیع شعاعی انرژی انفجار پیرامون چال می باشد.

۳- با تعیین و طراحی صحیح S/B می توان به عنوان یک پارامتر بسیار مهم از تشکیل بولدرهای بزرگ سایز و همچنین تولید نرمه جلوگیری کرد. این مهم با استفاده از نرم افزار PFC و Wipfrog به اثبات رسیده است.

۵- افزایش میزان فاصله داری سبب ایجاد قطعات بزرگتر خواهد شد. چراکه با افزایش فاصله داری، میرایی موج بیشتر شده و این مهم سبب کاهش خردایش سنگ می شود.

۵- مراجع:

- in Open Pit Mining. *Geomaterials*, 2013 (3): 82-89.
- [8] Onederra I., Catalan A., Chitombo G. Modelling fracturing, disturbed and interaction zones around fully confined detonating charges. *Mining Technology*, 2013 (122): 20-32.
- [9] Yilmaz O., Unlu T. Three dimensional numerical rock damage analysis under blasting load. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013 (38): 266-278.
- [10] Hu Y., Lu W., Chen M., Yan P., Zhang Y. Numerical simulation of the complete rock blasting response by SPH-DAM-FEM approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2015 (56): 55-68.
- [11] Hu R., Zhu Zh., Xie J., Xiao D. Numerical Study on Crack Propagation by Using Softening Model under Blasting. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015 (1): 1-9.
- [12] Xie L.X., Lu W.B., Zhang Q.B., Jiang Q.H., Wang G.H., Zhao J. Damage evolution mechanisms of rock in deep tunnels induced by cut blasting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016 (58): 257-270.
- [13] Itasca Consulting Group Inc., 2004/2005. PFC2D/3D (Particle Flow Code in 2/3Dimensions) User's Guides, Minneapolis, MN, USA.

- [1] Wey R., Zhang SH., Karunasena W., Sivakugan N., Zhang H. Blast Simulation in Underground Mines Using the Combined Finite-Discrete Element Method. *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Simulation, Modelling and Optimization*, Beijing, China, September 15-17, 2007 (1):256-261.
- [2] Zhu Zh., Xiea H., Mohanty B. Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2008 (45): 111-121.
- [3] Qu Sh., Zheng X., Fan L., Wang Y. Numerical simulation of parallel hole cut blasting with uncharged holes. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008 (15): 209-214.
- [4] Rui L.Ch., Jun K.L., Xing Q.Q., Bing M.D., Ming L.Q., Gang X. The numerical analysis of borehole blasting and application in coal mine roof-weaken. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009 (1): 451-459.
- [5] Wang Z.L., Konietzky H., Modelling of blast-induced fractures in jointed rock masses. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009(76):1945-1955.
- [6] Lu W., Yang J., Chen M., Zhou Ch. An equivalent method for blasting vibration simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2011 (19): 2050-2062.
- [7] Aliabadian Z., Sharafisafa M., Nazemi M. Simulation of Dynamic Fracturing of Continuum Rock