

تحلیل عددی و میدانی مکانیزم انفجار تک چال در توده سنگ کنگلومرای سد گتوند علیا

حسن بخشنده امنیه^{*}، استادیار، معین بهادری^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد
دانشکده مهندسی - گروه مهندسی معدن - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

bakhshandeh@kashanu.ac.ir

^۲دانشکده مهندسی - گروه مهندسی معدن - دانشگاه کاشان - کاشان - ایران

moein.bahadori@gmail.com

ارسال مقاله: ۹۰/۴/۱۹ اصلاحیه: ۹۰/۹/۱۲

پذیرش مقاله: ۹۱/۱/۱۹

چکیده: در بررسی‌های تحلیلی، میدانی و آزمایشگاهی، برای تشریح چگونگی بارگذاری دینامیکی حاصل از انفجار، روابط متفاوتی توسط محققان مختلف ارائه شده است. نحوه بارگذاری دینامیکی، مقدار حداکثر فشار و نحوه افت فشار پس از خیز می‌تواند بر نتایج شبیه‌سازی عددی مؤثر باشد. بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که لرزش‌های حاصل از انفجار، ناحیه خرد شده و طول ترک‌های شعاعی اطراف چال، به سه فاکتور حداکثر فشار، زمان اعمال بارگذاری و نوع تابع تشریح‌کننده پالس انفجار که در مجموع بیانگر سطح زیر منحنی فشار-زمان است، وابسته‌اند. در این مقاله، روابط مختلف بارگذاری دینامیکی در نرم‌افزار عددی المان مجزای UDEC شبیه‌سازی شده و نتایج آن با آزمایش میدانی انفجار PETN در توده سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا مقایسه گردیده است. با توجه به خصوصیات متقابل ماده منفجره و توده سنگ، حداکثر فشار انفجار اعمال شده به دیواره چال با استفاده از روابط نیمه تجربی لیو و تیدمان و رابطه گاما، برابر ۴/۵۹ گیگا پاسکال در نظر گرفته شده است. در آزمایش‌های میدانی، طول ترک‌های شعاعی ۱ متر و لرزش‌های ناشی از انفجار در فواصل ۵ و ۱۲ متری به ترتیب، برابر با ۴۲/۳۶ و ۷/۹۱ میلی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد. نتایج بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که تابع پیشنهادی یون و ژنون، انطباق مناسبی با اندازه‌گیری‌های میدانی دارد.

واژه‌های کلیدی: انفجار، بارگذاری دینامیکی، شبیه‌سازی عددی، PETN، کنگلومرا.

۱. مقدمه

نحوه بارگذاری دینامیکی ناشی از انفجار، از اوایل دهه ۵۰ میلادی توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعات به سه دسته کلی بررسی‌های میدانی و آزمایشگاهی [۱-۷]، بررسی‌های تحلیلی [۸-۱۴] و مدل‌سازی‌های عددی [۱۵ و ۱۶] تقسیم می‌شوند.

شارپ با اجرای آزمایش انفجار با فرض حفره استوانه‌ای، فضای نیمه بی‌نهایت، الاستیک و هموزن، فشار انفجار وارد بر جداره چال را به عنوان متغیری از زمان $P(t)$ در نظر گرفته است [۶]. پاچ و استانفورس با انجام دو آزمایش بزرگ مقیاس در توده‌سنگ گرانیت، نتایج انفجار را بررسی کرده‌اند. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که تخریب‌های ناشی از انفجار مانند توسعه ترک‌های ریز میکروسکوپی و انتشار ترک‌های شعاعی در توده‌سنگ، موجب افزایش ۲ تا ۳ برابری هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ گرانیت شده است [۵]. یو و همکاران با تکیه بر نتایج مطالعات آزمایشگاهی، تأثیر ویژگی‌های ساختاری گرانیت را در نتایج انفجار بررسی کرده‌اند [۷]. چن و همکاران، چگونگی انتشار امواج حاصل از انفجار در یک توده‌سنگ درزه‌دار را با استفاده از آزمایش میدانی بررسی کرده‌اند. بر اساس نتایج این بررسی، برای حالت رفتار غیرخطی، ضریب انتقال موج از سطح ناپیوستگی به مقدار طول موج وابسته است، در حالی که در حالت رفتار خطی، هیچ ارتباطی بین این دو پارامتر وجود ندارد [۱۷]. اسن و همکاران در بررسی‌های آزمایشگاهی - تحلیلی، نتایج انفجار ماده منفجره آنفو در بتن را بررسی کرده‌اند. در این بررسی، نتایج ۹۲ آزمایش میدانی انفجار به کمک پارامتر اندیس منطقه پودر شده (CZI^1) تشریح شده است [۲]. ایورسون و همکاران، نتایج آزمایش انفجار ماده منفجره آنفو را در یک بلوک بتنی، با روابط نیمه تجربی مقایسه کرده‌اند. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که در برآورد شعاع منطقه آسیب‌دیده اطراف چال انفجاری، رابطه نیمه‌تجربی اش دقت بالایی دارد [۴].

علاوه بر بررسی‌های میدانی، برخی از محققان با بررسی‌های تحلیلی، چگونگی بارگذاری دینامیکی حاصل از انفجار و نتایج آن، مانند خردشدگی و ترک‌های شعاعی اطراف چال را بررسی کرده‌اند. در بررسی بارگذاری ناشی از مواد منفجره ستونی، استارفیلد و پاگلیس از روش‌های انطباقی تحلیلی - آزمایشگاهی استفاده کرده‌اند. در این بررسی، بارگذاری حاصل از انفجار به صورت پالس با رابطه فشار - زمان پیشنهاد شده است [۱۴]. فاورایو، چگونگی توزیع تنش‌های ناشی از انفجار مواد منفجره ستونی در اطراف چال انفجاری را بررسی کرده است [۱۰]. سیمها با توجه به عکس‌العمل الاستودینامیکی ناحیه اطراف

چال، چگونگی تشکیل زون‌های پودر شده و ترک‌خوردگی‌های اطراف چال را با استفاده از رابطه TPL^2 تشریح کرده است [۱۳ و ۱۸]. پابین و پلیز مدلی را برای پیش‌بینی ترک‌های شعاعی اطراف چال ارائه داده‌اند [۱۲]. به منظور بررسی افت بارگذاری دینامیکی حاصل از انفجار، هونگتائو و همکاران، با بررسی‌های تحلیلی - آزمایشگاهی، تابع خیز بارگذاری حاصل از انفجار را خطی فرض کرده‌اند [۱۱]. کیم و همکاران، در بررسی انفجار در سطح مقطع تونل به روش چال‌های بلند، از روابط پیشنهادی استارفیلد و پاگلیس استفاده کرده‌اند. نتایج مدل‌سازی عددی آن‌ها در توده‌سنگ‌های متفاوت، نشان‌دهنده افزایش درصد ترک‌های کششی تولید شده و کاهش میزان لرزش‌های ناشی از انفجار در توده‌سنگ سخت، بین ۲۴ تا ۳۹ درصد و در توده‌سنگ نرم، بین ۱۶ تا ۵۱ درصد است [۱۹]. شبیه‌سازی‌های عددی فرآیند انفجار را می‌توان به روش‌های المان محدود [۲، ۱۵ و ۲۰، ۲۵] المان مجزا [۲۶-۲۸] و روش‌های المان مرزی [۲۹] تقسیم‌بندی کرد. یون و ژئون، با استفاده از نرم افزار PFC^{2D} برای کنترل آسیب‌های ناشی از انفجار چال‌های محیطی در یک تونل راه، رابطه پیشنهادی سیمها را تعدیل کردند [۳۰].

در این مقاله، نتایج آزمایش میدانی انفجار ماده منفجره $PETN^4$ در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا با نتایج روابط مختلف بارگذاری دینامیکی انفجار در نرم‌افزار المان مجزای $UDEC^5$ بررسی و مقایسه شده است. مقدار حداکثر فشار انفجار ماده منفجره $PETN$ با استفاده از رابطه نیمه‌تجربی لیو و تیدمان ۱۲/۵ گیگا پاسکال تعیین شده است. از طرفی، مقدار حداکثر فشار انفجار با توجه به عدم جفت‌شدگی ماده منفجره مذکور و چال انفجاری با استفاده از رابطه گاما، ۴/۵۹ گیگاپاسکال برآورد شده است. زمان خیز فشار، ۱ میکروثانیه و زمان افت فشار پس از این خیز، ۹ میکروثانیه در نظر گرفته شده است.

۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی سد گتوند

سد گتوند علیا در استان خوزستان در ۳۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان شوشتر و ۱۲ کیلومتری شهر گتوند واقع شده و آخرین سدی است که بر روی رودخانه کارون در حال احداث است. بدنه سد از نوع سنگ‌ریزه‌ای با هسته رسی، طول تاج ۷۶۰ متر، عرض تاج ۱۵ متر، ارتفاع از پی ۱۸۰ متر و عرض پی از قاعده ۱۱۰۰ متر است و دارای حجم مخزن ۴۵۰۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. سازندهای زمین‌شناسی محدوده سد گتوند علیا شامل دو سازند اصلی بختیاری و آغاجاری می

2. Tailored Pulse Loading

3. Particle Flow Code in 2 Dimensions

4. Pentaerythritol Tetranitrate

5. Universal Distinct Element Code

1. Crushed Zone Index

(۱)، خرج گذاری چال انفجاری با ماده منفجره PETN را نشان می دهد. لرزش های ناشی از انفجار به وسیله دو دستگاه لرزه نگار VIBROLOC با لرزه سنج های سه مؤلفه ای در سه امتداد متعامد شعاعی، مماسی و قائم که در فواصل ۵ و ۱۲ متری از چال انفجاری نصب شده اند، برداشت و پردازش شده است. مقدار حداکثر سرعت ذرات برداشت شده در فواصل ۵ و ۱۲ متری به ترتیب، برابر ۴۲/۳۶ و ۷/۹۱ میلی متر بر ثانیه می باشد. به منظور بررسی چگونگی بارگذاری دینامیکی حاصل از انفجار سه فشنگ ماده منفجره PETN با چاشنی الکتریکی آبی، به صورت ستونی به هم متصل شد. در جدول (۳)، ویژگی های فیزیکی ماده منفجره PETN و در جدول (۴)، نتایج لرزه نگاری حاصل از انفجار PETN در تک چال انفجاری بیان شده است.



شکل (۱): خرج گذاری تک چال با ماده منفجره PETN در توده سنگ کنگلومرا در منطقه سد گتوند علیا

جدول (۱): ویژگی های ژئومکانیکی توده سنگ کنگلومرای سد گتوند علیا

مقدار	خصوصیات
۲۴۶۰	چگالی (Kg/m ³)
۳۲	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)
۳/۷	مقاومت کششی (MPa)
۶/۴	چسبندگی (MPa)
۴۳	زاویه اصطکاک داخلی
۳۲	مدول الاستیک (GPa)
۰/۲۴	نسبت پواسون

باشد. به طور کلی، از نظر سنگ شناسی سازند بختیاری از رسوبات کنگلومرای با ضخامت زیاد و تشکیل دهنده تکیه گاه ها در کناره های سد با ارتفاع بیش از ۳۰۰ متر می باشد. سازند آجاجاری، تناوبی از لایه بندی های گل سنگ، سیلت استون و ماسه سنگ با لایه های کنگلومراست. در این سازند، از لحاظ ساختاری دو سیستم درزه اصلی و یک سیستم درزه غیر سیستماتیک دیده می شود. وجود ناپوستگی در سطوح لایه بندی سازند آجاجاری، همراه سیستم درزه های موجود در این تشکیلات و مقاومت ذاتی پایین آن سبب شده که عملیات حفاری در این سازند با مشکلاتی همراه باشد. محدوده ورودی تونل های آبرسان و مخازن ضربه گیر در سمت چپ سد واقع شده است که در محدوده سازند بختیاری می باشد.

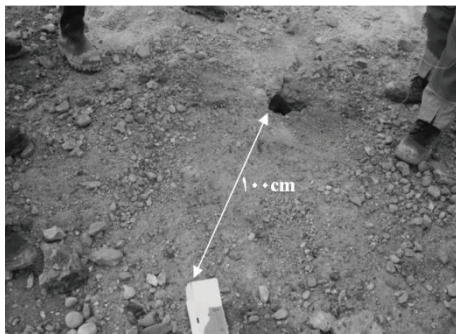
۳. روش تحقیق

به طور کلی، فرآیند خردایش سنگ در اثر انفجار را می توان به دو بخش اصلی مرحله بارگذاری ناشی از انتشار امواج و مرحله انبساط گازهای حاصل از انفجار تقسیم کرد. فرآیند انفجار را می توان به خوبی به کمک منحنی توزیع انرژی ناشی از انفجار یودی و لوندز تشریح کرد. در این مدل، فرض بر آن است که توده سنگ، رفتار الاستیک داشته و انفجار یک فرآیند انبساط گازی آدیاباتیک است. به کمک این فرضیه ها، عکس العمل متقابل هر نوع توده سنگ و ماده منفجره، قابل تحلیل خواهد بود [۳۱]. در اولین مرحله، سنگ های مجاور ستون ماده منفجره به شدت در حال انبساط است و فشار ناشی از انبساط گازها به صورت یک موج ضربه عمل می کند و موجب انتشار امواج ضربه در اطراف چال می شود. محققان بر این اساس، توابع مختلفی در تشریح چگونگی بارگذاری فشارهای دینامیکی ناشی از انفجار پیشنهاد کرده اند. از آنجا که شعاع های سه گانه نواحی اطراف چال (پودر شده، ترک خورده و الاستیک) وابستگی زیادی به میزان انرژی کرنشی موج ضربه حاصل از انفجار دارند، توابع با سطح منحنی فشار- زمان بزرگ تر، مقدار انرژی کرنشی و تکانه بیشتری دارند؛ در نتیجه، شعاع های نواحی پودر شده و ترک خورده و لرزش های ناشی از انفجار را بزرگ تر برآورد می کنند.

به منظور بررسی نتایج انتشار ترک های اطراف چال و لرزش های ناشی از انفجار، تک چال انفجاری به عمق ۲ متر و قطر ۷۶ میلی متر در یک توده سنگ کنگلومرا حفر شد. در جدول های (۱) و (۲)، ویژگی های ژئومکانیکی توده سنگ کنگلومرای منطقه سد گتوند علیا و خصوصیات هندسی تک چال حفاری شده بیان گردیده است. شکل

$$\frac{P_h}{P_{max}} = \left(\frac{D_e}{D_h} \right)^r \quad (2)$$

که در آن، P_h فشار اعمال‌شده به جداره چال، P_{max} حداکثر فشار به دست آمده از رابطه (۱)، D_e قطر ماده منفجره، D_h قطر چال انفجاری و r ثابت انبساط آدیاباتیک گازها هستند [۳۳]. معادله فوق، به معادله گاما مشهور است و با جای‌گذاری مقادیر معلوم و با فرض مقدار $1/2$ برای ثابت آدیاباتیک انبساط گازها، حداکثر فشار اعمال‌شده به جداره چال، $4/59$ گیگا پاسکال تعیین شد. شکل (۲)، ترک‌های شعاعی ناشی از انفجار تک‌چال با ماده منفجره PETN در توده سنگ کنگلومرای سد گتوند علیا را با حداکثر طول 100 سانتی‌متر نشان می‌دهد.



شکل (۲): ترک‌های شعاعی ناشی از انفجار تک‌چال با ماده منفجره PETN در توده سنگ کنگلومرای با حداکثر طول 100 سانتی‌متر

۱.۳. روابط مختلف بارگذاری ناشی از انفجار مواد منفجره صنعتی

استارفیلد و پاگلیس در اعتبارسنجی مدل‌های کامپیوتری با اندازه‌گیری‌های میدانی حاصل از امواج فشاری تولید شده در اثر انفجار ماده منفجره ستونی، رابطه (۳) را برای بارگذاری دینامیکی موج حاصل از انفجار پیشنهاد داده‌اند:

$$\begin{aligned} P(t) &= 0 & \text{for } t < 0 \\ P(t) &= Be^{-\beta t} \sin \omega t & \text{for } 0 \leq t \leq 3\pi/2\omega \\ P(t) &= -Be^{-\beta t} & \text{for } t > 3\pi/2\omega \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن، β و ω مقادیر ثابت و B کمیت وابسته به حداکثر فشار است. استارفیلد و پاگلیس، برای انطباق نتایج تحلیلی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده میدانی، مقادیر ثابت β و ω را 0.18 بر میکروثانیه در نظر گرفته‌اند. شکل (۳)، منحنی پیشنهادی استارفیلد و پاگلیس را برای حداکثر فشار $4/59$ گیگاپاسکال ناشی از انفجار PETN در توده سنگ کنگلومرای سد گتوند علیا که توسط نرم‌افزار المان مجزای UDEC شبیه‌سازی شده، نشان می‌دهد [۱۴].

جدول (۲): خصوصیات هندسی تک‌چال انفجاری

مقدار	خصوصیات
۷۶	قطر چال (mm)
۲	ارتفاع چال (m)

جدول (۳): خصوصیات فیزیکی ماده منفجره PETN

مقدار	خصوصیات
۱۶۰۰	چگالی (Kg/m^3)
۷۰۰۰	سرعت انفجار (m/s)
۱۲/۵	فشار انفجار (رابطه نیمه‌تجربی لیو و تیدمان، GPa)
۴/۵۹	فشار اعمال‌شده به جداره چال (رابطه گاما، GPa)
۵۰	قطر ماده منفجره (mm)
۱۲۵	ارتفاع ماده منفجره (mm)

جدول (۴): نتایج لرزه‌نگاری تک‌چال انفجاری با ماده منفجره PETN در توده سنگ کنگلومرای در منطقه سد گتوند علیا

ایستگاه	فاصله (m)	حداکثر سرعت ذرات (mm/s)
St1	۵	۴۲/۳۶
St2	۱۲	۷/۹۱

حداکثر فشار اعمال‌شده به جداره چال از رابطه نیمه‌تجربی لیو و تیدمان، محاسبه شده است. در این رابطه، با توجه به اثر متقابل ویژگی‌های توده سنگ و ماده منفجره، حداکثر فشار انفجار قابل محاسبه است [۳۲]:

$$P_{max} = 1.62 \times (\rho_e \times VOD^2) \times \left(\frac{\rho_r \times V_p}{\rho_e \times VOD} \right) \quad (1)$$

که در آن، ρ چگالی ماده منفجره، (Kg/cm^3)، VOD سرعت انفجار ماده منفجره، (Km/s)، ρ_r چگالی کنگلومرا، (Kg/cm^3)، V_p سرعت موج تراکمی در توده سنگ کنگلومرا، (Km/s) و P_{max} حداکثر فشار دینامیکی روی دیواره چال (Kbar) هستند [۳۲]. با توجه به خصوصیات ذکر شده در جدول‌های (۱) و (۳) و رابطه نیمه‌تجربی (۱) (رابطه لیو و تیدمان) مقدار حداکثر فشار $12/5$ گیگاپاسکال برآورد می‌شود. از آنجا که قطر چال و ماده منفجره یکسان نیست، این مقدار فشار باید توسط رابطه (۲) به مقدار واقعی آن تقلیل یابد:

تابع پیشنهادی سیمها برای مفهوم تئوری TPL به صورت رابطه (۶) است [۱۳]:

$$P_{TPL} = Ae^{-at} + Be^{-bt} + A_1te^{-at} + B_1te^{-bt} \quad (6)$$

که در آن، مقادیر ثابت a , b , A , B , A_1 و B_1 همگی بر اساس مقدار زمان برآمدگی فشار و از روابط زیر به دست می‌آیند.

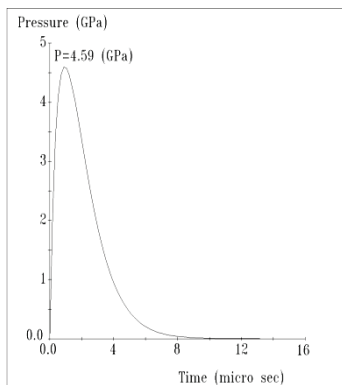
$$a - b = 1$$

$$A = -B = 1 + b^2$$

$$B_1 = b^2 + b + 1$$

$$A_1 + B_1 = A + 1$$

همان‌طور که بیان شد، تمامی پارامترهای ثابت رابطه سیمها با تعیین مقدار b معلوم می‌شوند و با تغییر در این مقدار، منحنی‌های متفاوتی از TPL به دست می‌آیند. در شکل (۴)، منحنی سیمها برای انفجار PETN در توده سنگ کنگلومرا با حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال، زمان خیز ۱ میکروثانیه و زمان افت فشار، ۹ میکروثانیه نشان داده شده است.



شکل (۴): رابطه پیشنهادی سیمها [۱۳] با حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال، زمان خیز ۱ میکروثانیه و زمان افت فشار ۹ میکروثانیه

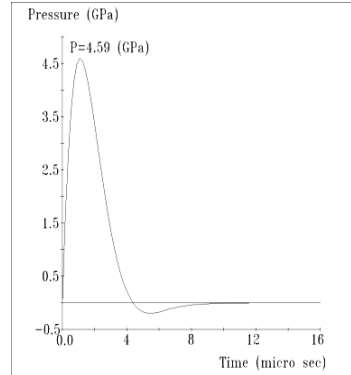
هونگتائو و همکاران، با جمع‌آوری روابط و تئوری‌های پیشنهادی انفجار، مسئله بارگذاری دینامیکی را از دو روش تحلیلی در فضای تک‌بعدی و روش عددی بررسی کرده‌اند. در بررسی‌های عددی، بارگذاری دینامیکی ناشی از انفجار تا زمان برآمدگی فشار به صورت خطی فرض شده و برای مرحله افت بار، از سه رابطه استفاده شده است. رابطه خطی به کار رفته در بررسی‌های هونگتائو و همکاران، به شکل رابطه (۷) است. این خیز فشار با سه رابطه نمایی منفی، هارمونیک و خطی که به ترتیب در روابط (۸) تا (۱۰) ارائه شده، با افت بار دنبال می‌شود [۱۱]:

$$P(t) = P_h \cdot (t/t_r) \quad (7)$$

$$P(t) = P_h e^{-\beta(t-t_r)} \quad (8)$$

$$P(t) = P_h \cos \omega(t-t_r) \quad (9)$$

$$P(t) = P_h [1 - (t-t_r)/(t_s - t_r)] \quad (10)$$



شکل (۳): رابطه پیشنهادی استارفیلد و پاکلیس [۱۴] با حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال، زمان خیز ۱ میکروثانیه و زمان افت فشار ۹ میکروثانیه

سیمها با توجه به عکس‌العمل الاستودینامیکی نواحی اطراف چال، برای تشریح چگونگی ایجاد زون‌های پودر شده و ترک‌خوردگی‌های چندگانه اطراف چال در آزمایش شارپ، رابطه TPL را ارائه کرده است. سیمها در محاسبات خود از نتایج آزمایش شارپ استفاده کرده است [۶ و ۱۳].

سیمها، معادله دیفرانسیلی (۴) را به کمک تئوری امواج ضربه در یک ماده منفجره استوانه‌ای به شعاع c را که توسط گراف ارائه شده، با استفاده از تابع جابجایی شعاعی ($u = -f/r^2 - f'/rc_1$) پیشنهاد کرد [۱۳] و [۱۸]:

$$f'' + \frac{4fc_2^2}{cc_1} + \frac{4fc_2^2}{c^2} = \frac{P_{\max}c^3}{4\mu} \quad (4)$$

که در آن، μ مدول برشی میانگین و P_{\max} بیشینه موج فشاری ناشی از انفجار ماده منفجره و c_1 و c_2 به ترتیب، سرعت امواج طولی و عرضی هستند. در این بررسی‌ها، سرعت سیر امواج طولی، دو برابر سرعت سیر امواج عرضی فرض شده است [۱۳].

سیمها، روابط پیشنهادی خود را تابعی دو متغیره از «زمان خیز فشار» و «مقدار بیشینه فشار» فرض کرد و سایر پارامترهای مرتبط را وابسته به مقدار این دو فاکتور دانست. برای دستیابی به این هدف، استفاده از یک تابع تک‌جمله‌ای پله‌ای یا نمایی کافی نیست و تابع مورد نظر باید پس از صعود ناگهانی فشار با یک تابع افت‌نمایی از فشار دنبال شود. شکل عمومی تابع افت‌نمایی فشار به صورت رابطه (۵) است [۱۳]:

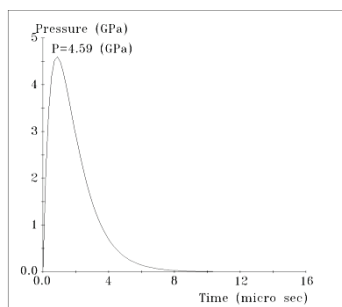
$$P_{RE} = te^{-bt} \quad (5)$$

که در آن، P_{RE} تابع افت‌نمایی فشار پس از رسیدن به حداکثر مقدار فشار انفجار و b ضریبی از معکوس زمان برآمدگی فشار است. به کمک این تابع، نقص صعود ناگهانی فشار برطرف خواهد شد. نهایتاً با حل معادله دیفرانسیل فوق و با تکیه بر فرضیه‌های عنوان‌شده، شکل

کیم و همکاران، برای مدل‌سازی انفجار در سطح مقطع تونل، به روش چال‌های بلند از رابطه (۱۱) استفاده کرده‌اند [۱۹]:

$$P(t) = 4P_h \left(\exp\left(\frac{-Bt}{\sqrt{2}}\right) - \exp(-\sqrt{2}Bt) \right) \quad (11)$$

که در آن، $P(t)$ رابطه فشار انفجار متغیر با زمان، P_h حداکثر فشار انفجار (که از رابطه ۲ محاسبه شده t زمان و B مقدار ثابت است. کیم و همکاران، در بررسی‌های خود مقدار پارامتر B را ۱۶۳۳۸ در نظر گرفته‌اند. در شکل (۸)، رابطه پیشنهادی کیم و همکاران برای حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال، زمان خیز فشار ۱ میکروثانیه و زمان افت فشار ۹ میکروثانیه شبیه‌سازی شده است [۱۹].

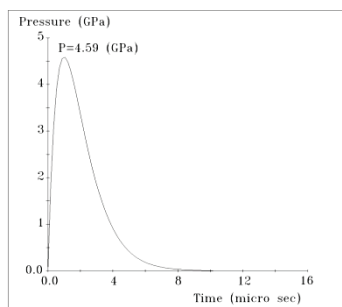


شکل (۸): منحنی پیشنهادی کیم و همکاران [۱۹] با حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال، زمان خیز ۱ میکروثانیه و زمان افت فشار ۹ میکروثانیه

یون و ژنون با تقلیل در رابطه سیمها برای شبیه‌سازی شکست سنگ در یک تونل راه با کنترل تخریب‌های ناشی از انفجار چال‌های محیطی، رابطه (۱۲) را پیشنهاد کرده‌اند [۳۰]:

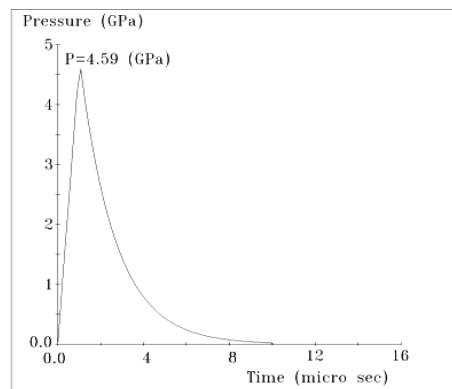
$$P(t) = P_h \frac{e^{-t/t_r}}{t_r} \times e^{\left(\frac{t}{t_r}\right)} \quad (12)$$

که در آن، P_h حداکثر فشار ناشی از انفجار و t_r زمان برآمدگی فشار است. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده، مقدار حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال، زمان خیز فشار ۱ میکروثانیه و زمان افت فشار ۹ میکروثانیه که توسط نرم‌افزار المان مجزای UDEC شبیه‌سازی شده، در نظر گرفته شده است.

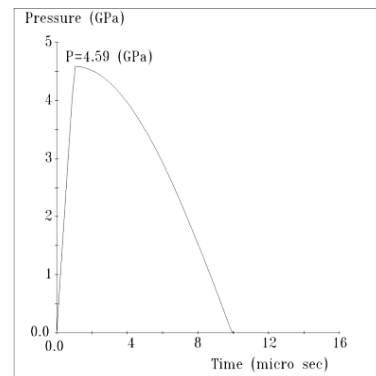


شکل (۹): منحنی پیشنهادی یون و ژنون [۳۰] با حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال، زمان خیز ۱ میکروثانیه و زمان افت فشار ۹ میکروثانیه

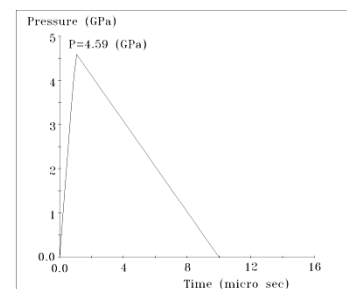
در این روابط، $P(t)$ فشار به عنوان تابعی از زمان، P_h حداکثر فشار ناشی از انفجار، t_r زمان خیز فشار، t_s کل زمان بارگذاری دینامیکی انفجار و β و ω پارامترهای ثابتی که بیانگر سرعت افت بار دینامیکی ناشی از انفجار هستند [۱۱]. در شکل‌های (۵) تا (۷)، منحنی روابط پیشنهادی هونگتائو و همکاران که توسط نرم‌افزار المان مجزای UDEC شبیه‌سازی شده، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، مقدار حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال، زمان خیز فشار ۱ میکروثانیه و زمان افت فشار ۹ میکروثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل (۵): رابطه‌ی نمای پیشنهادی هونگتائو و همکاران [۱۱] با حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال، زمان خیز ۱ میکروثانیه و زمان افت فشار ۹ میکروثانیه



شکل (۶): رابطه‌ی هارمونیک پیشنهادی هونگتائو و همکاران [۱۱] با حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال، زمان خیز ۱ میکروثانیه و زمان افت فشار ۹ میکروثانیه



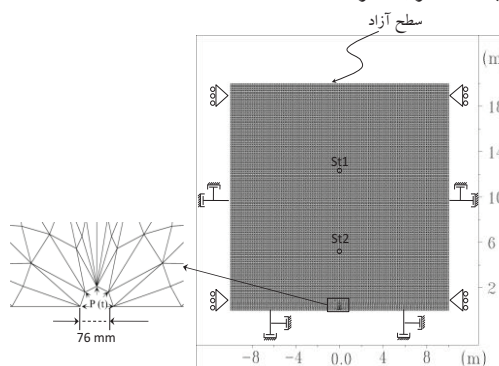
شکل (۷): رابطه‌ی خطی پیشنهادی هونگتائو و همکاران [۱۱] با حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال، زمان خیز ۱ میکروثانیه و زمان افت فشار ۹ میکروثانیه

۲.۳. تحلیل عددی مکانیزم انتشار ترک اطراف چال انفجاری

۱.۲.۳. هندسه مدل و شرایط مرزی

به منظور تحلیل عددی انتشار ترک اطراف تک چال و تشکیل امواج حاصل از انفجار در توده سنگ کنگلومرا، محدوده‌ای به ابعاد ۲۰ در ۴۰ متر در نظر گرفته شد. مدل‌سازی عددی با فرض خرج استوانه‌ای و با توجه به طول زیاد چال نسبت به قطر آن، به صورت کرنش صفحه‌ای تحلیل شده است. به منظور کاهش حجم محاسبات و با توجه به تقارن در دو طرف تک چال، نصف محدوده مورد نظر شبیه سازی شده است.

ابعاد مدل با اعمال شرایط مرزی محدود شده است. برای جلوگیری از انعکاس ناخواسته امواج از مرزها به داخل مدل، از شرایط مرزی نامحدود استفاده شده و به منظور جلوگیری از جابجایی‌های برشی، مرزهای جانبی ساکن شده‌اند. مرز بالا فاقد هر گونه محدودیتی است و مانند سطح آزاد رفتار می‌کند. در شکل (۱۰)، هندسه و ابعاد مدل، ابعاد و موقعیت چال و شرایط مرزی نشان داده شده است.



شکل (۱۰): هندسه مدل شامل ابعاد، موقعیت و ابعاد چال، شرایط مرزی و موقعیت دستگاه‌های لرزه‌نگار

برای تحلیل درست و منطقی انتشار امواج در فضای عددی، اندازه المان استفاده شده برای المان‌بندی محیط، Δl بایستی کوچکتر از $0/1$ تا $0/125$ طول موج منتشر شده در محیط باشد [۳۴]:

$$\Delta l \leq \left[\frac{\lambda}{10}, \frac{\lambda}{8} \right] \quad (13)$$

که در آن، λ طول موج تحریک وارد شده به مدل است. از طرفی با توجه به پارامترهای ژئومکانیکی محیط، سرعت موج فشاری از رابطه (۱۴) به دست می‌آید. [۳۵]:

$$C_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4G}{3}}{\rho}} \quad (14)$$

با قرار دادن خصوصیات محیط الاستیک در رابطه اخیر، سرعت موج فشاری برابر ۳۹۰۰ متر بر ثانیه برآورد شده و ابعاد بهینه المان‌ها در مدل ۱۶ سانتی‌متر انتخاب گردیده است.

۲.۲.۳. انتخاب مدل رفتاری

مدل رفتاری استفاده شده برای محدوده مورد مطالعه در این تحقیق، مدل موهر-کولمب است. این مدل با یک سطح تسلیم برشی، زاویه اصطکاک و چسبندگی داخلی تعیین می‌شود. پارامترهای مورد نیاز برای استفاده از مدل موهر-کولمب در جدول (۱) بیان شده است.

۳.۲.۳. انتخاب ضرایب میرایی

در هر سیستم طبیعی، بخشی از انرژی امواج لرزشی انتشار یافته، میرا می‌شود. این پدیده برای یک سیستم با نوسانات نامحدود (درجات آزادی نامحدود) هنگامی که تحت یک نیروی محرک (مانند انفجار) قرار می‌گیرد، به خوبی قابل درک است. عموماً میرایی به علت افت انرژی در عکس‌العمل داخلی مواد و لغزش‌های درونی در طول سطوح مشترک ناپیوستگی‌های ساختاری است.

در بررسی‌های دینامیکی در نرم‌افزار UDEC، برای اعمال میرایی مکانیکی از یک الگوریتم دوگانه شبه استاتیکی-دینامیکی استفاده شده است. در توده سنگ و خاک طبیعی، عمل میرایی شدید است و عموماً برای میرا ساختن نوسانات طبیعی سیستم از معادلات میراکننده رایلی استفاده می‌شود. معادله میراگر رایلی به صورت یک ماتریس است و در آن ماتریس سختی C از ترکیب خطی دو مؤلفه ماتریسی M (مؤلفه جرمی) و K (مؤلفه سختی) تشکیل شده است:

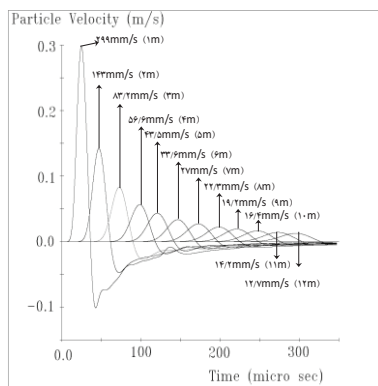
$$C = \alpha M + \beta K \quad (15)$$

که در آن، α : متناسب با جرم میراگر و β متناسب با سختی میراگر هستند. مؤلفه جرمی میرایی در بسامدهای زاویه‌ای کم و مؤلفه سختی میرایی در بسامدهای زاویه‌ای زیاد، سهم بیشتری در میرایی کل دارند [۳۵].

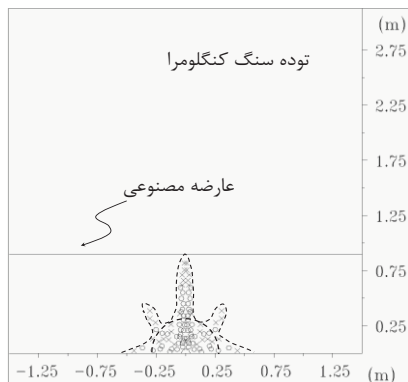
۴. نتایج حاصل از تحلیل عددی

در این بخش، نتایج ارائه شده از اجرای نرم‌افزار UDEC با استفاده از معیار رفتاری موهر-کولمب برای روابط مختلف بارگذاری پالس انفجار بررسی و مقایسه شده است. بر این اساس، حداکثر طول ترک شعاعی ناشی از انفجار و حداکثر سرعت ذرات برای این روابط بررسی و مقایسه شده و نتایج آن در جدول (۵) بیان شده است. همان

شکل نشان داده شده، تعداد ترک‌های اطراف چال ۵ عدد، و زاویه متوسط بین این ترک‌ها ۴۵ درجه است. از طرفی، مقادیر حداکثر سرعت ذرات شبیه‌سازی شده در فواصل ۵ متری و ۱۲ متری به ترتیب، برابر ۴۳/۵ میلی‌متر بر ثانیه و ۱۲/۷ میلی‌متر بر ثانیه برآورد شده که بسیار نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی است. بر اساس نظر دووال و اتکینسون، محدوده ناحیه کاملاً پلاستیک در توده‌سنگ‌های سخت، بین ۲ تا ۴ برابر قطر چال است [۳۶]. در این شبیه‌سازی، محدوده ناحیه کاملاً پلاستیک در توده‌سنگ کنگلومرا که تحت تابع پیشنهادی پالس انفجار یون و ژئون و حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال قرار گرفته، ۲۶ سانتی‌متر و محدوده ترک‌های شعاعی از حاشیه چال انفجار ۹۰ سانتی‌متر برآورد شده است. بر اساس یک قائده سرانگشتی، محدوده ترک‌های انفجار، ۱۵ تا ۲۰ برابر شعاع چال انفجار برآورد می‌شود [۳۳]. این مقدار با استفاده از روش عددی ۲۳ برابر شعاع چال برآورد شده که به معیار تجربی فوق نزدیک است.

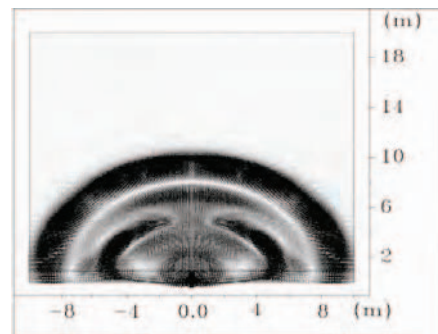


شکل (۱۳): تغییرات مقادیر حداکثر ذرات ناشی از انفجار تک‌چال با ماده منفجره PETN در توده‌سنگ کنگلومرای منطقه سد گوند علیا در فواصل ۱ تا ۱۲ متری



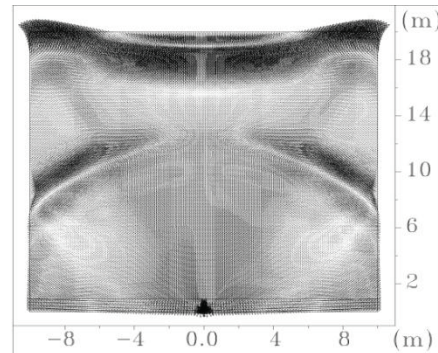
شکل (۱۴): ترک‌های شعاعی اطراف چال انفجاری به طول ۹۰ سانتی متر، محدوده کاملاً پلاستیک به صورت یک نیم‌دایره و ترک‌های شعاعی خارج این محدوده قرار دارند.

طور که از جدول (۵) ملاحظه می‌شود، تابع پیشنهادی یون و ژئون انطباق مناسبی با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داده و از آنجا که این رابطه، شباهت زیادی با رابطه پیشنهادی سیمها دارد، نتایج مدل‌سازی عددی پالس‌های فشار به رابطه سیمها و یون و ژئون بسیار نزدیک هستند. در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، نحوه انتشار امواج ناشی از انفجار PETN با استفاده از رابطه پیشنهادی یون و ژئون در محیط توده‌سنگ کنگلومرا و ترک‌خوردگی‌های شعاعی اطراف چال در زمان‌های ۲/۲۵ میلی‌ثانیه و ۵/۴۶ میلی‌ثانیه پس از شروع انفجار را نشان می‌دهد. در شکل (۱۲)، نحوه برخورد و انعکاس امواج به سطح آزاد نشان داده شده است.



توده سنگ کنگلومرا

شکل (۱۱): انتشار امواج حاصل از انفجار PETN با حداکثر فشار ۴/۵۹ گیگاپاسکال در توده‌سنگ کنگلومرا در زمان ۲/۲۵ میلی‌ثانیه پس از آغاز انفجار



توده‌سنگ کنگلومرا

شکل (۱۲): انعکاس امواج حاصل از انفجار PETN در سطح آزاد در توده‌سنگ کنگلومرا در زمان ۵/۴۶ میلی‌ثانیه پس از آغاز انفجار

در شکل (۱۳)، تغییرات مقادیر حداکثر سرعت ذرات ناشی از انفجار تک‌چال با ماده منفجره PETN در فواصل ۱ تا ۱۲ متری و در شکل (۱۴)، محدوده پلاستیک ناشی از انتشار موج حاصل از انفجار با استفاده از رابطه پیشنهادی یون و ژئون، پس از گذشت زمان ۵/۵۶ میلی‌ثانیه از آغاز انفجار نشان داده شده است. همان‌طور که در این

جدول (۵): مقایسه نتایج عددی حاصل از انفجار تک چال در توده سنگ کنگلومرا با طول ترک شعاعی اندازه گیری شده ۱۰۰ سانتی متر در منطقه سد گوند علیا

نام رابطه	طول حداکثر ترک شعاعی (cm)	اختلاف طول ترک شعاعی (cm)	حداکثر سرعت ذرات در فاصله ۵ متری (mm/s)	اختلاف حداکثر سرعت ذرات در فاصله ۵ متری (mm/s)	حداکثر سرعت ذرات در فاصله ۱۲ متری (mm/s)	اختلاف حداکثر سرعت ذرات در فاصله ۱۲ متری (mm/s)
استارفیلد و پاکلیس [۱۴]	۹۰	۱۰	۳۴/۲	۸/۱۶	۱۰	۲/۰۹
سیمها [۱۳]	۹۰	۱۰	۴۴/۳	۱/۹۴	۱۲/۹	۴/۹۹
هونگتائو، نمایی [۱۱]	۹۰	۱۰	۳۲/۳	۱۰/۰۶	۹/۴۸	۱/۵۷
هونگتائو، هارمونیک [۱۱]	۱۳۰	۳۰	۹۹/۹	۵۷/۵۴	۳۰/۷	۲۲/۷۹
هونگتائو، خطی [۱۱]	۱۰۵	۵	۸۱/۸	۳۹/۴۴	۲۴/۸	۱۶/۸۹
کیم و همکاران [۱۹]	۹۰	۱۰	۴۶/۸	۴/۴۴	۱۳/۷	۵/۷۹
یون و ژئون [۳۰]	۹۰	۱۰	۴۳/۵	۱/۱۴	۱۲/۷	۴/۷۹

فواصل ۵ و ۱۲ متری به ترتیب، ۴۳/۵ میلی متر بر ثانیه و ۱۲/۷ میلی متر بر ثانیه اندازه گیری شده است. نتایج بررسی های عددی نشان می دهد هرچه سطح زیر منحنی فشار زمان بزرگ تر باشد، انرژی کرنشی ذخیره شده در توده سنگ بیشتر و در نتیجه، لرزش های ناشی از انفجار و ترک های شعاعی حاصل از آن بزرگ تر خواهند بود. از میان روابط بررسی شده، رابطه پیشنهادی یون و ژئون، انطباق مناسبی با نتایج آزمایش میدانی نشان می دهد. از آنجا که رابطه پیشنهادی یون و ژئون بر پایه رابطه پیشنهادی سیمها ارائه شده، لذا مقادیر اندازه گیری شده با نتایج این دو رابطه از انطباق مناسبی برخوردار است.

۵. نتیجه گیری

در تحلیل عددی، شدت لرزش های ناشی از انفجار و طول ترک های شعاعی حاصل از آن، به حداکثر فشار اعمال شده به جداره چال و نحوه بارگذاری دینامیکی پالس انفجار وابسته است. به منظور بررسی مکانیزم انتشار ترک های اطراف تک چال انفجاری، از نرم افزار عددی المان مجزای UDEC استفاده شده است. در این تحلیل، روابط مختلف بارگذاری دینامیکی موج ضربه حاصل از انفجار مدل سازی شده و نتایج آن با مقادیر آزمایش میدانی انفجار ماده منفجره PETN در توده سنگ کنگلومرا منطقه سد گوند علیا مقایسه شده است. در آزمایش میدانی، طول ترک شعاعی برابر با ۹۰ سانتی متر و حداکثر سرعت ذرات در

مراجع

- [1] Bohloli, B., "Effects of the geological Parameters on rock blasting using the Hopkinson Split Bar", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 34 (3-4), 630, 1997.
- [2] Esen, S., Onederra, I., & Bilgin, H. A., "Modeling the size of crushed zone around a blast hole", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 40 (4), pp. 485-495, 2003.
- [3] Hustrulid, W. A., & Johnson, J. C., "A Gas Pressure-based Drift Round Blast Design Methodology", H. Schunnesson, & E. Nordlund (Ed.), 5th International Conference & Exhibition on Mass Mining, Sweden, Lulea: Lulea University of Technology, pp. 657-669, 2008.
- [4] Iverson, S. R., Hustrulid, W. A., Johnson, J. C., & Akbarzadeh, Y., "The Extent of Blast Damage from a Fully Coupled Explosive Charge", Rock Fragmentation by Blasting, London: Taylor & Francis Group, pp. 459-468, 2010.
- [5] Pusch, R., & Stanfors, R., "Zone of Disturbance around Blasted Tunnels at Depth". International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 29 (5), pp. 447-456, 1992.
- [6] Sharpe, J. A., "The Propagation of Elastic Waves by Explosives Pressure". Geophysics, 7, 144-154, 1942.
- [7] Yu, B., Liu, D., Qiao, H., & Wang, S., "Experimental Study of granite's constitutive relation under blasting loads". Journal of China University of Mining and Technology, 28 (6), pp. 552-555, 1999.
- [8] Miklowitz, J., *The Theory of Elastic Waves and Waveguides*, New York: North-Holland Publishing Company,

1990.

- [9] Achenbach, J. D., *Wave Propagation in elastic solids*. Amsterdam, New York, American Elsevier Pub. Co.: North-Holland Pub. Co., 1973.
- [10] Favreau, R. F., "Generation of strain waves in rock by explosion in a spherical cavity". *Journal of Geophysics Resource*, 74, pp. 4267-4280, 1968.
- [11] Hongtao, X., Wenbo, L., & Chaungbing, Z., "Effect of Dynamic Unloading during the Process of Rock Fragmentation by Blasting", *Int. Proc. of Rock Fragmentation by Blasting, Fragblast-8, Santiago-chile*, pp. 175-181, 2006.
- [12] Paine, A. S., & Please, C. P., "Improved model of fracture Propagation by Gas during Rock Blasting-Some Analytical Results", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 31 (6), pp. 699-706, 1994.
- [13] Simha, K. R., "Stress Wave Patterns in Tailored Pulse Loading", H. P. Rossmannith (Ed.), *Rock Fragmentation by Blasting*, Balkema Rotterdam, pp. 79-85, 1993.
- [14] Starfield, A. M., & Pugliese, J. M., "Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: A comparison between a computer model and filed measurements", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 5, pp. 65-77, 1974.
- [15] Mortazavi, A., & Salmi, E. F., "A Numerical Investigation of the Effect of Blast hole Delay in Rock Fragmentation". *Rock Fragmentation by Blasting*, London: Taylor & Francis Group, pp. 363-369, 2010.
- [16] You-jun, N., & Jun, Y., "Numerical Simulation of the Blasting Process in Bedded and Jointed Rock Mass with 2D-DDA Method". *Rock Fragmentation by Blasting, Chile, Santiago*. pp. 119-123, 2006.
- [17] Chen, S. G., Zhao, J., & Zhao, Y. X., "UDEC modeling of field explosion test". *Fragblast* 4, 4, pp. 447-456, 2000.
- [18] Graff, K. *Wave Motion in Elastic Solids*. Oxford: Clarendon Press, 1975.
- [19] Kim, D., Noh, S., Lee, S., Park, B., & Jeon, S., "Development of a new center-cut method: SAV-cut (Stage Advance V-cut)", *Underground Space*. In Barták, Hrdina, Romancov, & Zlámál (Ed.), *the 4th Dimension of Metropolises*, London: Taylor & Francis Group, pp. 493-499, 2007.
- [20] Cho, S. H., & Kanko, K., "Influence of the applied pressure waveform on the dynamic fracture process in rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 41 (5), pp. 771-784, 2004.
- [21] Hao, H., Ma, G. W., & Zhou, Y. X., "Numerical simulation of underground explosion". *FRAGBLAST-International Journal for Blasting and Fragmentation*, 2 (4), pp. 383-395, 1996.
- [22] Liu, L., & Katsabanis, P. D., "Development of a continuum damage model for blasting analysis", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 34 (2), pp. 217-231, 1997.
- [23] Wu, C. Q., Lu, Y., & Hao, H., "Numerical prediction of blast-induced stress wave from large-scale underground explosion", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28 (1), pp. 93-109, 2004.
- [24] Yang, R., Bawden, W. F., & Katsabanis, P. D., "New constitutive model for blast damage". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 33 (3), pp. 245-254, 1996.
- [25] Zhang, Y. Q., Hao, H., & Lu, Y., "Anisotropic dynamic damage and fragmentation of rock materials under explosive loading". *International Journal of Engineering Science*, 41 (9), pp. 917-929, 2003.
- [26] Fan, S. C., Jiao, Y. Y., & Zhao, J., "On modeling of incident boundary for wave propagation in jointed rock masses using discrete element method", *Computers and Geotechnics*, 31 (1), pp. 57-66, 2004.
- [27] Mortazavi, A., & Katsabanis, P. D., "Modeling the effects of discontinuity orientation, continuity, and dip on the process of burden breakage in bench blasting", *FRAGBLAST*, 4 (3-4), pp. 175-197, 2000.
- [28] Munjiza, A., Owen, D., & Roger, J., "Discrete element methods of rock blasting", *International Journal of Engineering Modeling*, 5 (3-4), 65-72, 1992.
- [29] Cao, Z. Y., & Zheng, S. P., "Nonlinear dynamic interaction between underground structure and surrounding medium under blast loading", *Explosion and Shock Waves*, 23 (5), pp. 385-390, 2003.
- [30] Yoon, J., & Jeon, S., "Use of a Modified Particle-Based Method in Simulating Blast-Induced Rock Fracture". *Rock Fragmentation by Blasting*, London: Taylor & Francis Group, pp. 371-380, 2010.
- [31] Udy, L. L., & Lownds, C. M., "The Partition of Energy in Blasting with non-ideal Explosives". In *Proc. 3rd Int. Symp. On Rock Fragmentation by Blasting*, Australia, Brisbane, pp. 37-43, 1990.
- [32] Liu, Q., & Tidman, P., "Estimation of the dynamic pressure around a fully loaded blast hole". Retrieved from *Canmet Mrl Experimental Mine*: <http://www.nrcan.gc.ca>, 1995.
- [33] Hustrulid, W., *Blasting Principles for Open Pit Mining*, (Vol. 1). Balkema, Roterdam, 1999.
- [34] Kuhlmeier, R. L., & Lysmer, J., "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems". *J. Soil Mech. & Foundations Div.*, pp. 421-427, 1973.
- [35] Itasca Consulting Group, Inc., *Universal Distinct Element Code, Version 4.01*. Minneapolis, Minnesota, 2004.
- [36] Duval, W. I., & Atchison, T. C., "Rock Breakage with Confined Concentrated Charges". *Mining Engineering*, 11, pp. 605-611, 1959.