



(مقاله پژوهشی)

تعیین ضریب آسیب هوک و براون ناشی از انفجار در اطراف تونل‌ها با استفاده از مدل‌سازی عددی

فرهاد چینائی^۱، کاوه آهانگری^{۱*}، رضا شیرین‌آبادی^۲

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(دریافت: خرداد ۱۴۰۱، پذیرش: مرداد ۱۴۰۱)

چکیده

برآورد ناحیه آسیب حاصل از عملیات انفجار در سازه‌های زیرزمینی بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله اثر پارامتر آسیب در تونلی به قطر ۵ متر و توده‌سنگی با مقاومت متوسط در محیط پیوسته مطالعه شده است. در این راستا، مدل‌سازی سه‌بعدی المان محدود برای انفجار هم‌زمان چال‌ها در دو حالت ۲۶ و ۳۶ چال، قطر چال در دو نوع ۴۱ و ۵۱ میلی‌متر و عمق تونل برای وضعیت کم‌عمق و عمیق بررسی شده است. فشار چال ناشی از انفجار آنفو نیز بر اساس معادله حالت JWL در هیدروکد LS_DYNA شبیه‌سازی شده است. مرزهای بیرونی مدل برای جلوگیری از بازگشت موج به صورت انعکاس ناپذیر در نظر گرفته شده است. از المان‌های لاگرانژی برای توده سنگ و المان‌های ALE برای ماده منفجره، هوا و توده سنگ محل انفجار بهره‌گیری شده است. با توجه به اینکه در هیدروکد مورد استفاده مدل شکست هوک و براون تعریف نشده است از مدل موهرکولمب استفاده و نتایج با مقایسه ویژگی‌های توده سنگ مورد استفاده در برنامه RocLab برای تبدیل مدل شکست موهرکولمب به مدل هوک و براون استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوی انفجار تأثیر به‌سزایی در میزان آسیب خواهد داشت به طوری که با افزایش تعداد چال انفجاری در یک تأخیر مقدار ضریب آسیب هوک و براون (D) افزایش و با کاهش قطر چال مقدار آن به شدت کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عمق تونل ضریب آسیب کاهش خواهد یافت و برای خردشدگی بهتر سنگ نیاز به ماده منفجره قوی‌تر و یا افزایش تراکم ماده منفجره خواهد بود.

کلمات کلیدی

آتش‌کاری تونل، معیار شکست هوک و براون، ضریب آسیب، روش اجزای محدود، هیدروکد LS-DYNA.

*عهده‌دار مکاتبات: kaveh.ahangari@gmail.com

DOI: [10.22034/ANM.2022.2738](https://doi.org/10.22034/ANM.2022.2738)

۱- مقدمه

علیرغم مزایای اقتصادی استفاده از مواد منفجره جهت حفاریات زیرزمینی، آسیب ناشی از انفجار توده سنگ دربرگیرنده فضاهای زیرزمینی به علت تغییر در ویژگی‌های مکانیکی توده سنگ، باعث ایجاد مشکلات اجتناب‌ناپذیری مثل افزایش هزینه نگهداری، کاهش سرعت پیشروی، ناپایداری توده سنگ و تأخیرهای حاصل از توقف کاری در پروژه و افزایش هزینه‌های نگهداری پس از ساخت می‌شود. بنابراین نیاز است که آسیب ناشی از آتش‌کاری در سنگ اطراف تونل‌های استخراج‌شده از نظر ضخامت و میزان به‌صورت دقیق‌تر مشخص شود. این در حالی است که پژوهش‌هایی که در زمینه میزان آسیب ناشی از انفجار در اطراف تونل‌ها شده، به‌ویژه در مورد ضریب آسیب^۱ معیار شکست هوک و براون^۲ بسیار کم است.

تحقیقات متعدد مهمی بر روی پارامترهای طراحی انفجار بر روی آسیب سنگ صورت پذیرفته است که برخی از آن‌ها تشریح می‌شوند. هلمبرگ و پرسون^۳ (۱۹۸۰) با استفاده از روش حداکثر سرعت ذره (PPV^۴)، اضافه حفاری در اثر انفجار یا گسترش میزان آسیب ناشی از انفجار مورد ارزیابی قرار دادند [۱].

لُبر^۵ (۱۹۹۰) در ارائه سیستم رده‌بندی توده سنگ به‌جای (IRMR) سیستم رده‌بندی توده سنگ تعدیل‌شده (MRMR) بنیواسکی^۶، تأثیرات نامطلوب انفجار را به‌صورت فاکتور تعدیل با محدوده ۰/۸ الی ۱ اعمال نموده است [۲]. سینگ^۷ (۱۹۹۲) ارتباط بین RQD را با آسیب ناشی از انفجار بررسی و مشخص کرد که مقدار RQD به کمتر از ۷۰ درصد کاهش خواهد یافت و این نشان می‌دهد که توده سنگ مستعد آسیب است [۳]. نجم و همکاران (۲۰۰۲) به بررسی لرزش زمین به‌عنوان یکی از تأثیرات جانبی انفجار پرداخته‌اند. از دیدگاه آن‌ها لرزش زمین می‌تواند باعث اتلاف انرژی مواد منفجره، کاهش میزان تولید و حتی تنزل و کاهش در فعالیت‌های توسعه‌ای معادن شود [۴]. سایانگ^۸ (۲۰۰۸) در رساله دکتری خود، عمق آسیب و ویژگی‌های ذاتی، نظیر مقاومت و سفتی محدوده آسیب‌دیده را با استفاده از نرم‌افزارهای FLAC و PFC(2D) بررسی کرده است و کاهش ۱۰ تا ۵۰ درصدی خواص محدوده آسیب را بسته به قطر چال‌های انفجاری نتیجه گرفته است [۵]. مالمرگن،

سایانگ، توپرا و بُدار^۹ (۲۰۰۶) یک سری اندازه‌گیری‌های لرزه‌ای در معدن آهن شیریناوارا^{۱۰} سوئد جهت ارزیابی میزان آسیب ناشی از انفجار انجام دادند که مشخص گردید روش به‌کارگیری شده از کارایی مناسبی برخوردار نیست [۶]. سایانگ و نردلند^{۱۱} (۲۰۰۷) تحلیل‌های عددی تأثیر انفجار روی تونل‌های کم‌عمق (کمتر از ۲۰ متر) در سنگ بریتل انجام دادند و بیان داشتند که حضور محدوده آشفته ناشی از انفجار در اطراف تونل (که مقاومت و سختی آن کاهش یافته است) اجرای عمومی تونل در ساخت و نگهداری را تحت تأثیر قرار خواهد داد [۷]. تأثیر و میزان اهمیت موضوع آسیب توسط وارنک^{۱۲} و همکاران (۲۰۰۷) مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. اینورسن^{۱۳} و همکاران (۲۰۰۹) گسترش آسیب ناشی از انفجار را با استفاده از یک مدل فیزیکی انفجار تک چال در یک بلوک بتونی آزمایشگاهی بررسی کردند و پس از اندازه‌گیری توسط کرنش‌سنج سه ناحیه مختلف دایره‌های حد ترک^{۱۴}، دایره‌های حد خرد^{۱۵} و محدوده آسیب عملی^{۱۶} اش تعدیل‌شده، مشخص شد و با به‌کارگیری چهار مدل گوناگون تئوری آتش‌کاری، ناحیه آسیب را از ۲۶ سانتی‌متر تا ۳۹۶ سانتی‌متر تخمین زدند [۹]. دهقان (۲۰۱۰) آزمایش‌های انفجاری روی یک چال با نمونه‌های آزمایشگاهی از دو نوع سنگ گرانیت انجام داد و نتایج را با مدل عددی AUTODYN مقایسه کرد. او در نتایج آزمایش‌های خود فقط ترک‌های ایجادشده ناشی از موج ضربه انفجار را توسط الگوهای ترک و نرم‌افزار تحلیل تصویری پیشرفته برداشت نمود و با توجه به میزان خردشدگی^{۱۷}، سه محدوده در اطراف چال مشخص کرد. او در مدل خود از معیار شکست هوک و براون برای سنگ استفاده کرد و متوجه شد که هرچه چگالی و سرعت انفجار ماده منفجره بیشتر باشد موج ضربه آن بیشتر و ترک‌های بیشتری ایجاد می‌کند [۱۰]. جایانگ و هاو^{۱۸} (۲۰۱۲) و دنگ^{۱۹} و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزارهای LS_DYNA و UDEC پاسخ سازه‌های زیرزمینی در برابر انفجار و آسیب توده سنگ را بر اساس نواحی پلاستیک ایجادشده ناشی از انفجار و اندازه‌گیری حداکثر سرعت ذره (PPV) مشخص کرده‌اند [۱۱]. جایاسینگه^{۲۰} و همکاران (۲۰۱۳) پاسخ شمع فونداسیون یک ماسه اشباع را در برابر انفجار با استفاده از تحلیل اجزای محدود غیرخطی در نرم‌افزار LS_DYNA با در نظر گرفتن رفتار پیچیده اندرکنش خاک و خاک‌سنگ بررسی و تغییر شکل افقی شمع و تنش‌های مؤثر آن را

مشخص کردند [۱۲]. واندررا^{۲۱} و همکاران (۲۰۱۳) آسیب ناشی از انفجار را در چال‌هایی با جفت‌شدگی^{۲۲} کامل مدل‌سازی عددی انجام داده‌اند. آن‌ها مدل انفجار تنش هیبریدی را جهت شبیه‌سازی انفجار، انتشار موج، خردشدگی سنگ و هندسه کپه^{۲۳} سنگ خردشده در نرم‌افزار FLAC توسعه داده‌اند [۱۳]. بیلماز^{۲۴} در سال ۲۰۱۳ با تحلیل عددی سه‌بعدی خود روی محدوده آسیب ناشی از انفجار توسط نرم‌افزار FLAC فقط بار حاصل از ضربه انفجار را روی تخریب سنگ در نظر گرفت و از اثرات ناشی از فشار انبساط گاز چشم‌پوشی کرد [۱۴]. جیانگ^{۲۵} و همکاران (۲۰۱۴) ویژگی‌های آسیب سنگ دربرگیرنده در اثر ضربه آتش‌کاری در استخراج معادن به روش پس‌روی کیفی قائم^{۲۶} را به روش عددی بررسی کرده و توانستند رابطه بین شعاع آسیب سنگ دربرگیرنده و میزان ماده منفجره را با استفاده از هیدروکد LS_DYNA و نرم‌افزار FLAC3D تعیین کنند. همچنین نتیجه گرفتند میزان آسیب وارد به سنگ در معرض بار انفجار در ۱/۵ میلی‌ثانیه اول بیشتر از ۱/۵ میلی‌ثانیه دوم بعد از انفجار توسعه می‌یابد [۱۵]. میتلمن^{۲۷} (۲۰۱۴) در مقاله‌ای آسیب ناشی از انفجار بر روی تونل‌ها را با استفاده از مدل ترکیبی اجزای محدود^{۲۸} و مجزا^{۲۹} و با بهره‌گیری از معیار شکست ترک چرخش رانکین^{۳۰} مدل‌سازی کرده و بار انفجار ایجادشده را ابتدا توسط هیدروکد AUTODYN تخمین زد و پس‌از آن با کد ELFEN تحلیل را تکمیل کرد. او برای اعتبارسنجی مدل خود از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط شرکت همکاران پژوهشی مهندسی (۱۹۵۳) (ERA^{۳۱}) استفاده کرد و چهار محدوده از فروریزش کامل تا آسیب سبک برحسب فاصله ماده منفجره از تونل تعریف کرد [۱۱]. سای^{۳۲} و همکاران (۲۰۱۶) در ارزیابی مکانیسم آسیب سنگ ناشی از انفجار چال‌های برش در تونل‌های عمیق توسط هیدروکد LS_DYNA متغیر آسیب D را به صورت نسبت المان‌های آسیب‌دیده به کل المان‌ها تعریف کردند. این آسیب به صورت کششی برای شرایط کرنش حجمی منفی و به صورت فشاری در وضعیت کرنش حجمی مثبت در نظر گرفته شده است. پس‌از آن مقادیر آسیب را در دو حالت بر اساس روابط یانگ^{۳۳} و همکاران (۲۰۱۵) و کاً^{۳۴} و همکاران (۱۹۹۸) تعیین و میزان آسیب را در مدل عددی خود بررسی و نتایج را با نتایج تجربی مقایسه و تطابق بسیار بالایی را ملاحظه کردند به‌عنوان مثال جایی که در نتایج تجربی شعاع محدوده آسیب ۶/۸۰ متر برآورد شده است، نتایج عددی

۶/۸۵ متر حاصل شده است [۱۶]. زنگ^{۳۵} و همکاران (۲۰۱۶) برای بهینه‌سازی پارامترهای آتش‌کاری روی فضای اطراف ستون‌های آکند سیمانی در معادن به علت صرف هزینه و زمان زیاد و همچنین محدودیت‌ها و پیچیدگی‌های اندازه‌گیری فیزیکی از روش عددی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار LS_DYNA استفاده کردند. آن‌ها در شبیه‌سازی خود برای معادله حالت ماده منفجره از JWL^{۳۶}، برای مدل‌سازی رفتار ماده از سینماتیک خمیری، جهت نرخ کرنش از مدل کاپر-سیموند^{۳۷} و شرایط مرزی بیرونی خود را غیر بازتابنده^{۳۸} فرض کردند. آن‌ها در تحقیق خود برای ارزیابی آسیب ستون آکند سیمانی با کمک معیار تجربی داودینگ^{۳۹} برای چهار مدل آرایش چال و آرایش شارژ ماده منفجره در یک چال را انجام داده‌اند، مقایسه نتایج نشان دادند زمانی که ماده منفجره به صورت منقطع و در پایین‌ترین و بالاترین قسمت چال و با فاصله ردیفی بیشتر قرار داده می‌شود، خردشدگی یکنواخت‌تر و آسیب کمتری به سنگ اطراف چال انفجار وارد خواهد شد [۱۷]. لی^{۴۰} و همکاران (۲۰۱۷) شبیه‌سازی لرزش انفجار و اثر تشکیل ترک تیر مهارسنگ^{۴۱} را در استخراج مغاره‌های^{۴۲} عمیق توسط کد مدل‌سازی اجزای محدود LS_DYNA بررسی کردند. آن‌ها ماده منفجره همراه با هوا را به‌عنوان سیال با الگوریتم اوپلری^{۴۳} شبیه‌سازی کرده و ساختارهای توده سنگ را به صورت الگوریتم لاگرانژی^{۴۴} و برهم‌کنش بین سیال و جامد را به وسیله کوپل کردن سازه - سیال مدل کردند [۱۸]. بنا بر پیشنهاد هوک برای تخمین میزان آسیب و همچنین خواص سنگ در این محدوده، روش‌های عددی می‌تواند راهگشا باشد [۱۹]. ورما و همکاران^{۴۵} (۲۰۱۸) با استفاده از رفتار نگاری لرزش زمین حاصل از انفجار با تأکید بر روی ضریب ماده منفجره چال‌های محیطی^{۴۶} که بستگی به عامل‌های پیشروی^{۴۷} و محصوریت^{۴۸} و حداکثر ماده منفجره بر تأخیر^{۴۹} دارد، محدوده آسیب توده سنگ پیرامون فضای زیرزمینی را تخمین زدند [۲۰]. حق نژاد و همکاران (۱۳۹۶) تأثیر خصوصیات توده سنگ و نوع ماده منفجره را بر آسیب انفجار روی شیب‌های سنگی مورد بررسی قرار دادند آن‌ها ابتدا محدوده‌های احتمالی شکست را به صورت کیفی شناسایی کرده و سپس با روش عددی توسط نرم‌افزار 3DEC و با استفاده از مقادیر ثبت‌شده حداکثر سرعت ذرات انفجارهای مختلف، ارزیابی کمی انجام دادند، در نتایج آن‌ها، مشخص شد که ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی و مقاومت توده

فشاری تک‌محوری ۸۰ مگاپاسکال، چگالی ۲/۵ و GSI برابر ۵۰ منظور شد و در سینه‌کار تونل تعداد ۲۶ چال انفجاری ۴ متری به قطر ۵۱ میلی‌متر به صورت بخش مجازی و از جنس ماده منفجره آنفو با چگالی ۰/۷۸۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و مقدار ماده منفجره هر چال ۶/۵ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. آنفو، هوا و سنگ اطراف آن ALE و سنگ دور از محل انفجار به صورت لاگرانژی مدل‌سازی شد. معادله حالت JWL برای مدل‌سازی رفتار ماده منفجره و معیار رفتاری موهر کولمب^{۵۱} برای سنگ اختصاص یافت. شرایط مرزی غیر بازتابنده و با مفصل محدود و با توجه به تقارن مسئله، یک‌چهارم از کل فضا مدل‌سازی و تحلیل شده است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق یک تونل سنگی تحت بار انفجار به کمک مدل عددی اجزای محدود تهیه و تأثیر پارامترهای مختلف مانند عمق تونل، تعداد و قطر چال‌های انفجاری بر ضریب آسیب در معیار شکست هوک و براون مورد بررسی قرار گرفته است.

یکی از نرم‌افزارهای المان محدود کارآمد در شبیه‌سازی مسائل با نرخ کرنش بالا، نرم‌افزار LS_DYNA با توانایی شبیه‌سازی پدیده‌های ضربه و پدیده‌های نفوذ و انفجار است. در اینجا، الگوریتم روش حل لاگرانژی اولیری اختیاری (ALE)^{۵۲} و لاگرانژی به ترتیب برای مواد منفجره و مواد سنگی به کار رفته است.

در این تحقیق، ابتدا مدل سه‌بعدی المان محدود توسط برنامه LS_DYNA تهیه و برنامه اجرا شد. در شبیه‌سازی مدل سیستم یکای سانتی‌متر، گرم، میکروثانیه انتخاب شده است. مدل از تونلی با مقطع دایره به قطر ۵ متر در امتداد محور Z تشکیل شده است و تا ۲۰ متر در راستای X و Y از هر طرف سنگ دربرگیرنده شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی‌ها برای دو قطر چال ۴۱ و ۵۱ میلی‌متر، در دو حالت ۲۶ و ۳۶ چال و در دو وضعیت تونل کم‌عمق و عمیق انجام شده است. شکل ۱ به‌طور شماتیک هندسه و ابعاد مدل را برای تونلی کم‌عمق با تعداد ۲۶ چال به قطر ۵۱ میلی‌متر نمایش می‌دهد.

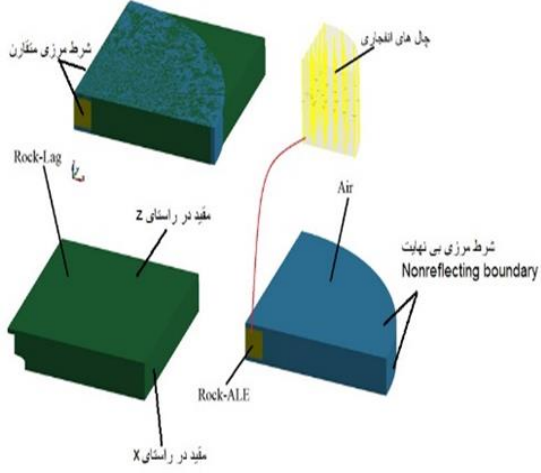
برای اعمال بارهای استاتیکی، با توجه به تطابق بهتر تحلیل ضمنی^{۵۳} با واقعیت از آن استفاده می‌شود و با توجه به اینکه زمان حل روش ضمنی نسبت به تحلیل صریح^{۵۴}

سنگ باعث کنترل جریان پلاستیک شکست‌های کششی و برشی می‌گردند و ناپیوستگی‌های با راستای موافق شیب شیروانی نقش مؤثرتری در کاهش آسیب انفجار بازی می‌کنند و لذا استفاده از ناپیوستگی‌های مصنوعی مانند آنچه در انفجار پیش شکافی ایجاد می‌شود، روش مناسبی برای کاهش آسیب و جلوگیری از ایجاد ناپایداری در شیب‌ها خواهد بود [۲۱]. افراسیابی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش دیگری روی سنگ‌های گرانیت و دیوریت مشخص نمودند که مقادیر PPV ثبت‌شده با افزایش کیفیت توده سنگ، بالا می‌رود. همچنین تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد با افزایش قطر چال مقدار PPV افزوده می‌شود که مقدار آن برای دیوریت بیشتر از گرانیت است. از طرف دیگر آن‌ها اثر میزان انسداد چال، خرج بر تأخیر، فاصله از چال انفجاری، مقدار بار سنگ و فاصله چال‌ها را بر روی PPV بررسی کرده و مشخص کردند میزان تأثیر عوامل مذکور روی PPV بستگی زیادی به نوع سنگ و کیفیت آن خواهد داشت [۲۲]. تعاریف آستانه محدوده آسیب در مراجع مختلف، متفاوت است. به‌عنوان مثال گریدی و کیپ^{۵۰} (۱۹۸۰) این آستانه را ضریب آسیب ۰/۲ به بالا فرض کرده‌اند [۱۶]؛ در تعریف دیگری این آستانه را فاصله نقطه‌ای از محل انفجار مشخص کرده‌اند که مقدار PPV در حدی است که نتواند باعث شکست توده سنگ شود [۲۳]. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که با توجه به رابطه بین GSI و PPV، طبقه‌بندی مهندسی سنگ، در شناسایی محدوده شکست بسیار کارآمد است و بنابراین در شرایط GSI یکسان، ضریب آسیب هوک و براون (D) در برآورد محدوده آسیب ناشی از انفجار نقش اساسی خواهد داشت [۲۴].

در این پژوهش، ضریب آسیب هوک و براون در اطراف تونل‌ها با استفاده از مدل‌سازی عددی جهت تخمین محدوده آسیب ناشی از انفجار بررسی شده است.

برای انجام تحقیق مورد اشاره با توجه به پیچیدگی موضوع از نظر متغیرهای گوناگونی که در این مهم نقش دارند توده سنگ به صورت الاستیک و پیوسته فرض شد و از شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده گردید. با توجه به کارآمدی نرم‌افزار LS_DYNA در شبیه‌سازی مسائل با نرخ کرنش بالا و سرعت بالای تحلیل‌گر آن در مسائل سه‌بعدی استفاده شد. بدین منظور تونل دایروی شکل به قطر ۵ متر انتخاب و سنگ اطراف آن تا ۲۰ متر المان بندی شد. نوع سنگ دربرگیرنده در مدل اولیه، ماسه‌سنگ با مقاومت

مطابق شکل ۲ مدل از سه بخش حقیقی شامل سنگ با رابطه لاگرانژی، سنگ با رابطه ALE، هوا با رابطه ALE و یک جزء^{۵۵} مجازی شامل چال‌های انفجاری (آنفو) تشکیل شده است.



شکل ۲: اجزای مدل و شرایط مرزی اعمال شده در LS-DYNA

ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ به‌عنوان یک سنگ متوسط فرضی در جدول ۱ نمایش داده شده است [۲۵].

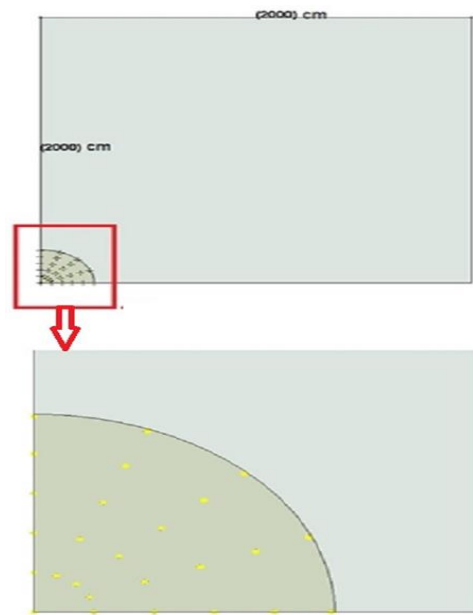
جدول ۱: ویژگی‌های مکانیکی سنگ بکر [۲۵]

m_i	مدول	مقاومت فشاری	چگالی	لیتولوژی نمونه
	پانگ	تک‌محوری		
	(MPa)	(MPa)	(gr/cm^3)	
۱۵	۲۲۰۰۰	۸۰	۲٫۵	ماسه‌سنگ

جهت تعیین ویژگی‌های توده سنگ از مشخصات ماسه‌سنگ بکر جدول ۱ و به‌کارگیری نرم‌افزار RocLab برای شرایط فرضی مختلف GSI و ضریب آسیب برای تونلی با تنش جانبی فرضی دو مگاپاسکال استفاده شده است. نتایج مذکور برای ماسه‌سنگ در جدول ۲ ملاحظه می‌شود.

بیشتر است و همچنین در شبیه‌سازی پدیده‌های دینامیکی با سرعت‌های بالا مانند انفجار و ضربه، همگرایی جواب در روش ضمنی به‌سختی رخ می‌دهد استفاده از تحلیل صریح کارآمدتر خواهد بود. تحلیل ضمنی - صریح در هیدروکد LS_DYNA مزایای هر دو روش صریح و ضمنی را به‌صورت یکجا خواهد داشت [۱۶].

از آنجایی‌که انفجار ماده منفجره باعث ایجاد تغییر شکل‌های بسیار بزرگ در سنگ پیرامون خود می‌شود، استفاده از رویکرد ALE مناسب است. بدین ترتیب که نواحی نزدیک ماده منفجره با رویکرد اویلری و نواحی دورتر و سنگ با رویکرد لاگرانژی مدل می‌شوند و اندرکنش بین این دو محیط با اعمال قید تماس در نرم‌افزار میسر می‌شود. برای شبیه‌سازی سنگ با توجه به عدم وجود مدل شکست هوک و براون در نرم‌افزار LS_DYNA، مدل رفتاری موهرکولمب استفاده شده است.



شکل ۱: هندسه و ابعاد مدل در مدل‌سازی عددی آتش‌کاری تونل به قطر ۵ متر با ۲۶ چال توسط نرم‌افزار LS_DYNA

جدول ۲: ویژگی‌های توده سنگ

$G(MPa)$	$K(MPa)$	$E_{rm}(MPa)$	$\sigma_{cm}(MPa)$	$\sigma_t(MPa)$	$\varphi(^{\circ})$	$C(MPa)$	a	S	Mb	D	GSI
۲۷۰۰	۴۵۰۰	۶۷۰۰	۱۷	۰٫۱۲	۵۲	۱٫۱	۰٫۵۰۶	۰٫۰۰۳۹	۲٫۵	۰	۵۰
۶۰۰	۱۰۰۰	۱۴۶۸	۶٫۸	۰٫۰۵	۳۸	۰٫۵۵	۰٫۵۰۶	۰٫۰۰۰۲	۰٫۴	۱	۵۰
۵۰۰	۹۰۰	۱۳۱۷	۹٫۴	۰٫۰۲	۴۴	۰٫۶	۰٫۵۳۱	۰٫۰۰۰۲	۱٫۰۳	۰	۲۵
۲۰۰	۴۰۰	۵۵۵	۲٫۳	۰٫۰۰۴	۲۱	۰٫۲۳	۰٫۵۳۱	۰٫۰۰۰۰۰۴	۰٫۰۷	۱	۲۵
۷۰۰۰	۱۲۰۰	۱۷۹۶۰	۳۰	۰٫۸	۵۷	۲٫۷	۰٫۵۰۱	۰٫۰۶۲۲	۶٫۱	۰	۷۵
۲۴۰۰	۴۰۰۰	۵۹۴۰	۱۸٫۳	۰٫۴۹	۵۱	۱٫۷	۰٫۵۰۱	۰٫۰۱۵۵	۲٫۵	۱	۷۵

که در آن RO: چگالی، GMOD: مدول برشی الاستیک، RNU: ضریب پواسون، PHI: ضریب اصطکاک (رادیان)، CVAL: مقدار چسبندگی (مقاومت برشی در تنش قائم صفر)، PSI: زاویه اتساع (رادیان).

از آنجایی که در پژوهشی اثر انفجار تک چال شارژ شده با آنفو روی یک دیواره بتنی در یک معدن روباز توسط LS_DYNA مدل‌سازی شده است، ویژگی‌های ماده منفجره و معادله حالت آن در این پژوهش از نتایج آن تحقیق استفاده و در جدول‌های ۴ و ۵ و ۶ آورده شده است [۲۶].

جدول ۴: ویژگی‌های ماده منفجره مورد استفاده [۲۶]

نوع ماده منفجره	چگالی (kg/m ³)	سرعت انفجار (m/s)	فشار چپمن ژوگت (Gpa)	ضریب A معادله حالت	ضریب B معادله حالت (Gpa)	ضریب R1 معادله حالت	ضریب R2 معادله حالت	ضریب W معادله حالت	انرژی واحد حجم (Gpa)
آنفو	۷۸۲	۵۰۸۰	۵٫۵	۸۷٫۶۱	۷٫۹۸	۴٫۳۰۵۷	۰٫۸۹۰۷	۰٫۳۵	۲٫۹۰

چند جمله‌ای خطی^{۵۹} با مشخصات جدول ۷ استفاده شده است:

جدول ۷: مشخصات هوا در LS_DYNA

*MAT_NULL									
RO	PC	MU							
1.23E-03	-1.00E+05	0							
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL									
C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	E ₀	V ₀	
-1.00E-06	0	0	0	0.4	0.4	0	2.58E-06	1.00E+00	

برای ارتباط بین میزان آسیب مدل ماده موهرکولمب حاصل از مدل‌سازی LS_DYNA و ضریب آسیب معیار شکست هوک و براون، از شبیه‌سازی ریاضی انجام شده به روش تفاضلات مربعی (DQM) با داده‌های یکسان استفاده شد [۲۷]. نتایج نشان داده است مقدار جذر میانگین مربعات (RMSE^{۶۰}) برای شرایط مختلف این پژوهش بین ۰٫۱۰۹۷ تا ۰٫۱۴۷ است و بنابراین مطابق استانداردهای آماری انطباق خوبی بین میزان آسیب موهرکولمب و ضریب آسیب هوک و براون وجود دارد.

۳- نتیجه و بحث

جهت مشخص شدن تنش‌های اولیه و جابجایی‌ها قبل از شروع تحلیل دینامیکی لازم است وضعیت تنش در حالت تعادل استاتیکی مشخص شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد برای تحلیل استاتیکی و یا شبه استاتیکی، تحلیل ضمنی می‌تواند پاسخ دقیق‌تری ارائه دهد. در LS_DYNA برای انجام تحلیل ضمنی با انتخاب گزینه "آرامش پویا"^{۶۱} می‌توان تحلیل مدل را در حالت تعادل استاتیکی انجام داد. برای

برای توده سنگ همان‌طور که قبلاً اشاره شد از مدل‌سازی رفتار ماده موهرکولمب در نرم‌افزار LS_DYNA استفاده شد که با توجه به نتایج جدول ۲، مقادیر آن در جدول ۳ مربوط به نرم‌افزار اعمال شده است.

جدول ۳: مشخصات سنگ در LS_DYNA

*MAT_MOHR_COULOMB_(TITLE) (173) (1)							
TITLE							
MID	RO	GMOD	RNU	PHI	CVAL	PSI	
4	2.5000000	0.0270000	0.2500000	0	0.9070000	1.100e-05	0.0

برای آنفو از مدل ماده "سوختن سرعت بالای ماده منفجره"^{۵۶} با مشخصات جدول ۵ استفاده شده است:

جدول ۵: مشخصات آنفو در LS_DYNA [۲۶]

*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN_(TITLE) (008) (1)									
TITLE									
MID	RO	D	PCJ	BETA	K	G	SIQY		
1	0.7820000	0.5080000	0.0550000	0.0	0.0	0.0	0.0		

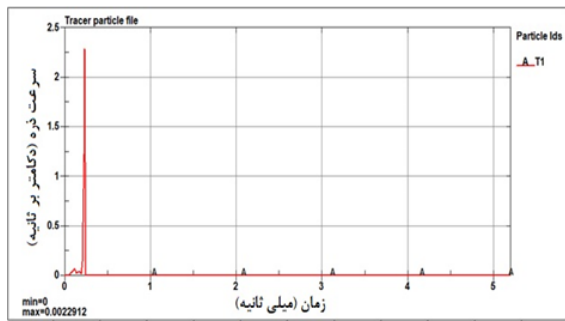
پارامترهای نشان داده شده در جدول ۵ به شرح ذیل هستند: Ro: چگالی سنگ، D: سرعت انفجار، PCJ: فشار چپمن-ژوگت^{۵۷}.

همچنین با توجه به تاریخچه تحقیقات ذکر شده سازگارترین معادله حالت ماده منفجره برای شبیه‌سازی، معادله JWL است که مقادیر آن طبق جدول ۶ است.

جدول ۶: مقادیر معادله حالت آنفو در LS_DYNA [۲۶]

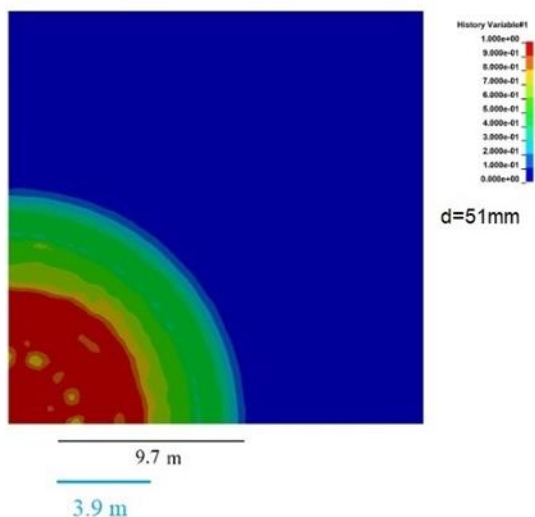
*EOS_JWL_(TITLE) (1)							
TITLE							
EOSID	A	B	R1	R2	OMEG	E0	V0
1	0.8761100	0.0798000	4.3056598	0.8967100	0.3500000	0.0290000	0.0

برای هوا از مدل "ماده خنثی"^{۵۸} با دانسیته ۰٫۰۰۱۲۳۰۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب و معادله حالت



شکل ۵: نمودار تاریخچه سرعت ذره انتخابی روی دیوار تونل

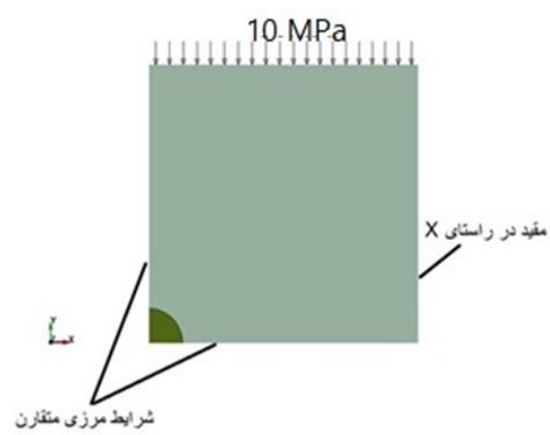
همان‌طور که از نمودار ملاحظه می‌شود در زمانی حدود ۰/۲۵ میلی‌ثانیه سرعت ذره به حداکثر مقدار خود رسیده است و پس از آن مدل به حالت پایدار خود نائل می‌شود؛ بنابراین جهت اطمینان بیشتر از شرایط پایدار، زمان اجرای مدل در شرایط تحلیل دینامیکی حدود ۵ میلی‌ثانیه است. خط فاصل‌های^{۶۴} میزان آسیب مطابق تاریخچه خروجی نرم‌افزار LS_DYNA برای سینه کار با چال‌هایی به قطر ۵۱ میلی‌متر برای ۲۶ چال در شکل ۶ ملاحظه می‌شود. با توجه به مرجع تعیین فاصله نرم‌افزار تا فاصله ۳/۹ متری از دیواره تونل میزان آسیب بین ۰/۸ تا ۱ و به عبارتی میزان آسیب شدید است و در فاصله ۹/۷ متری از دیواره تونل این میزان به صفر خواهد رسید و به عبارتی گسترش ترک‌ها به‌طور کامل پایان یافته است.



شکل ۶: میزان آسیب و محدوده آن در شرایط انفجار ۲۶ چال با قطر ۵۱ میلی‌متر

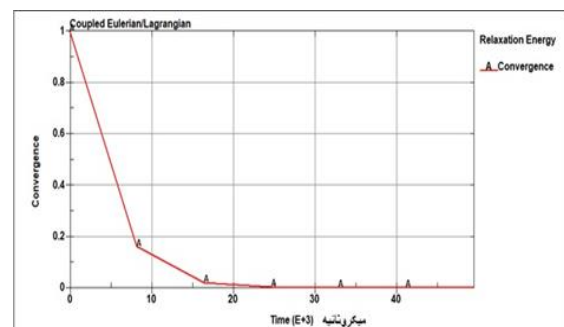
مطابق شکل ۷ اگر تعداد چال انفجاری به ۳۶ حلقه برسد محدوده آسیب تا شعاع ۱۱/۶۶ متر از دیواره تونل ادامه خواهد داشت که در حدود ۷/۵ متر از آن میزان آسیب شدید خواهد بود.

تونل‌های عمیق که بار استاتیکی ناشی از روباره سنگ قابل صرف‌نظر کردن نیست، نیاز است تنش‌های درجا ناشی از وزن توده سنگ نیز قبل از تحلیل دینامیکی مشخص شوند. بدین منظور جهت تونل فرضی، باری با ضخامت حدود ۴۰۰ متر ناشی از وزن سنگ بر آن اعمال می‌شود بار گسترده ۱۰ مگاپاسکالی مطابق شکل ۳ روی مدل اعمال و تحلیل استاتیکی انجام شده است.



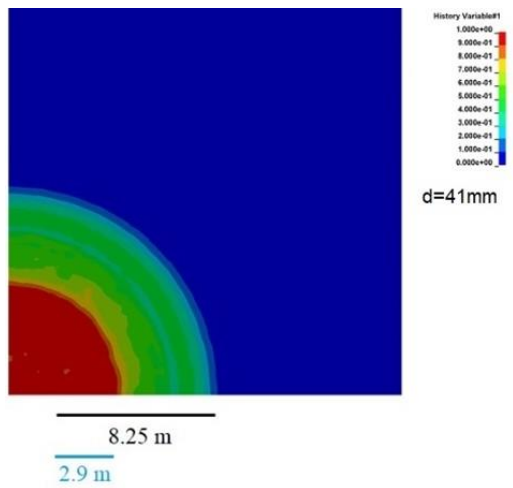
شکل ۳: مدل تونل در عمق با بار گسترده ۱۰ مگاپاسکال

تحلیل استاتیکی پس از زمان حدود ۱۶ میلی‌ثانیه مطابق شکل ۴ به همگرایی رسید و با توجه به تثبیت تنش‌ها در این زمان تحلیل دینامیکی ناشی از انفجار سنگ آغاز شده است. جهت انجام تحلیل دینامیکی از حل‌گر صریح استفاده می‌شود. پایداری در روش صریح مشروط به انتخاب گام‌های زمانی^{۶۲} کوچک است، لذا به‌منظور پایداری حل در این روش، بر اساس راهنمای نرم‌افزار، جهت بارهای ناشی از انفجار گام زمانی ۰/۶۷ انتخاب شده است.



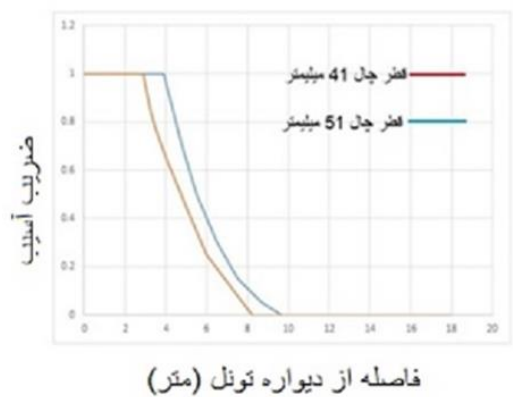
شکل ۴: نمودار همگرایی مدل آرامش پویا

برای تعیین زمان تحلیل دینامیکی، تاریخچه^{۶۳} سرعت برحسب زمان ذره‌ای در موقعیت مکانی دیواره تونل مطابق نمودار شکل ۵ ردیابی شده است.



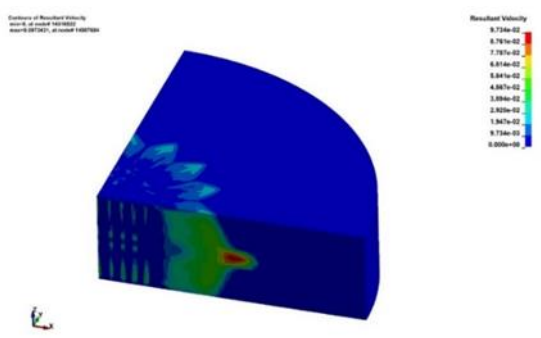
شکل ۹: میزان آسیب و محدوده آسیب در شرایط انفجار ۲۶ چال با قطر ۴۱ میلی‌متر

مقایسه ضریب آسیب برحسب فاصله از دیوار تونل برای دو سینه کار آتش‌کاری شده با تعداد انفجار ۲۶ چال به قطر ۴۱ و ۵۱ میلی‌متر در شکل ۱۰ ارائه شده است.

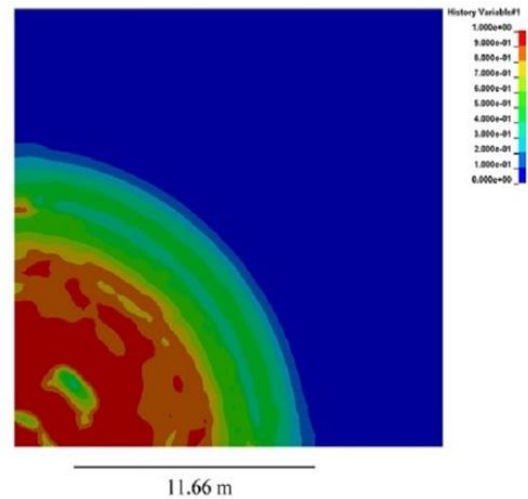


شکل ۱۰: مقایسه ضریب آسیب و محدوده آن در شرایط آتش‌کاری چال با قطرهای ۴۱ و ۵۱ میلی‌متر

خط فاصل سرعت انتشار موج برای مدل‌های بالا در لحظه آخر به صورت شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است.

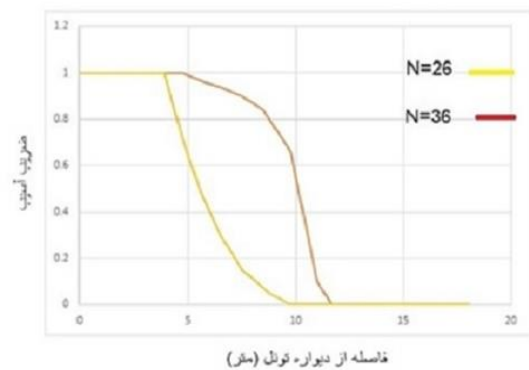


شکل ۱۱: مدل انتشار موج در سنگ برای ۲۶ چال به قطر ۵۱ میلی‌متر



شکل ۷: میزان آسیب و محدوده آن در شرایط انفجار ۳۶ چال با قطر ۵۱ میلی‌متر

بر اساس شکل‌های ۶ و ۷ و همچنین نتایج مقایسه‌ای که بین پارامترهای ورودی معیار شکست هوک و براون و مقادیر خروجی معیار شکست موهر کولمب در نرم‌افزار RocLab و روش DQM مورد اشاره در بخش روش تحقیق انجام شده است، مقادیر آسیب خروجی نرم‌افزار مطابقت قابل قبولی با ضریب آسیب معیار شکست هوک و براون دارد و بنابراین ضریب آسیب برای آتش‌کاری سینه کار با چال‌های به قطر ۵۱ میلی‌متر برحسب فاصله از دیوار تونل در نمودار شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸: مقایسه ضریب آسیب و محدوده آن در شرایط آتش‌کاری ۲۶ و ۳۶ چال

همان‌طور که از شکل ۹ ملاحظه می‌شود برای چال‌های به قطر ۴۱ میلی‌متر تا شعاع حدود ۲/۹ متر میزان آسیب جدی بین ۰/۸ تا ۱ است، به عبارتی دیگر میزان آسیب شدید بوده و در فاصله حدود ۸/۲۵ متر کاملاً از بین می‌رود و مقدار آن به صفر می‌رسد.

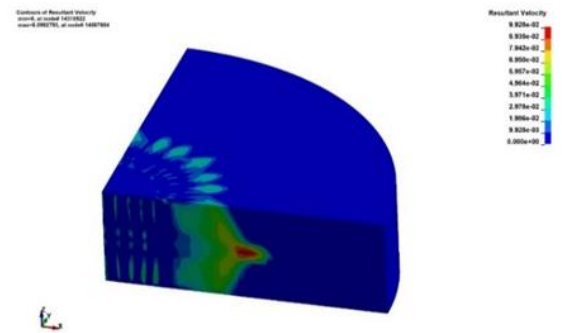
و مورد تناقضی به چشم نمی‌خورد. در همین راستا نتایج این پژوهش با نتایج روش عددی تفاضلات مربعی (DQM) ارائه‌شده توسط چینایی و همکاران [۲۷] از تطابق قابل قبولی برخوردار است. در جدول ۸ میزان همبستگی متغیرهای مختلف با فاصله از دیواره تونل در کمترین مقدار ۸۳ درصد برای تونل عمیق و بیشترین آن برای ۳۶ چال با مقدار ۹۲ درصد ملاحظه می‌شود، همان‌طور که از نتایج مشخص است وابستگی زیاد منفی بین میزان آسیب و فاصله از دیواره تونل وجود دارد؛ در این جدول تأثیر مقادیر ضریب آسیب به ترتیب برای پارامترهای تعداد چال و یا فاصله چال‌ها، قطر چال و نهایتاً عمق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

طبق تئوری‌های موجود میزان آسیب، شدیداً به میزان ریزترک‌ها، نرخ کرنش انفجار و در نتیجه مقاومت دینامیکی سنگ بستگی خواهد داشت. یکی از عواملی که نقش محسوسی در میزان آسیب خواهد داشت عمق معدن و در نتیجه فشار جانبی سنگ‌ها خواهد بود که هرچه فشار جانبی افزایش یابد مقاومت دینامیکی سنگ بالاتر رفته و بنابراین میزان آسیب و شعاع محدوده آن کاهش خواهد یافت در این بررسی نیز ملاحظه شد که با افزایش عمق تونل، محدوده شدیداً آسیب‌دیده از ۴ متر به حدود ۱ متر تقلیل می‌یابد البته میزان تأثیر با زیاد شدن فشار جانبی کمتر خواهد بود. لازم به ذکر است در مورد تمام پارامترهای بررسی‌شده، مقدار آسیب با شیب بسیار زیاد کاهش می‌یابد. البته شکل هندسی، تعداد، فاصله و مواد پرکننده ناپیوستگی‌ها به‌اندازه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ناپیوستگی‌ها در گسترش منطقه آسیب ناشی از انفجار نقش مهمی بازی خواهند کرد [۲۸].

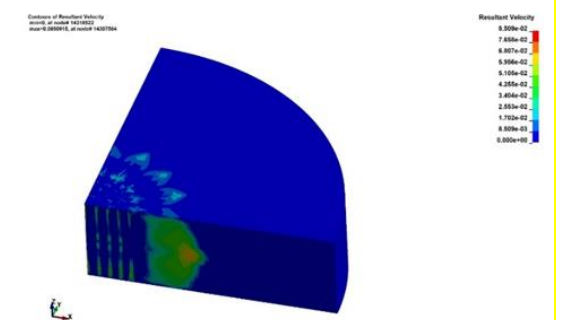
جدول ۸: میزان همبستگی متغیرهای پژوهش

قطر ۴۱ میلی‌متر	قطر ۵۱ میلی‌متر	کم‌عمق	عمیق	n=۲۴	n=۳۶
۰,۸۳۲	۰,۸۷۰	۰,۸۷۱	۰,۸۳۰	۰,۸۷۱	۰,۹۲۱

با توجه به اینکه تحقیقات زیادی در مورد میزان آسیب و ضخامت محدوده‌های آسیب اطراف تونل در فواصل مختلف انجام نشده است لذا امکان تطابق دقیق با پژوهش سایرین میسر نشد، به‌طور کلی می‌توان گفت روندهای حاصل‌شده با اکثر تحقیقات مشابه که در پیشینه تحقیق این رساله آمده است همه موارد به‌طور نسبی سازگار است، با این حال میزان محدوده آسیب در مقایسه با تحقیقات سایرین بزرگ‌تر به

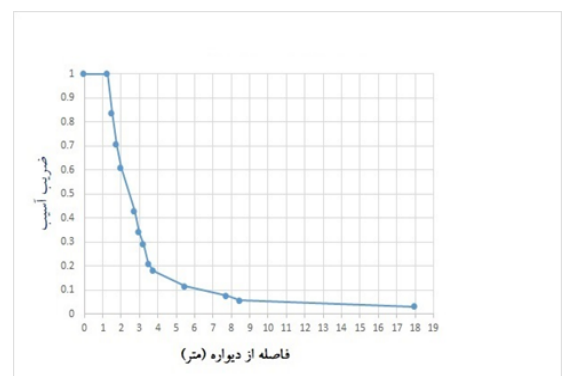


شکل ۱۲: مدل انتشار موج در سنگ برای ۳۶ چال به قطر ۵۱ میلی‌متر



شکل ۱۳: مدل انتشار موج در سنگ برای ۲۶ چال به قطر ۴۱ میلی‌متر

همچنین، در رابطه با تأثیر عمق بر مقدار ضریب آسیب نیز بررسی‌ها انجام گرفت. با فرض اینکه ضخامت سنگ ایجادکننده تنش اولیه ۴۰۰ متر و وزن مخصوص آن ۲۵۰۰۰ نیوتن بر مترمکعب باشد، بار گسترده ۱۰ مگاپاسکال بجای وزن ناشی از روباره برای یک تونل عمیق در نظر گرفته شده که نتایج در شکل ۱۴ آورده شده است.



شکل ۱۴: ضریب آسیب در تونل عمیق

روند کلی نتایج با اصول مکانیک سنگ از نظر تأثیر قطر چال، تعداد چال انفجاری در یک تأخیر آتش‌کاری، نحوه میرایی موج انفجار و همچنین تأثیر عمق تونل بر مقاومت سنگ و میزان خردشدگی سنگ به‌طور کلی همخوانی داشته

محدوده آسیب شدید از ۴ متر به ۱ متر تقلیل می‌یابد و به عبارتی به ۲۵ درصد مقدار خود خواهد رسید. علت آن می‌تواند افزایش مقاومت دینامیکی در اعماق بیشتر باشد بنابراین نیاز است در معادن عمیق برای خردشدگی بهتر سنگ از ماده منفجره قوی‌تر بهره‌مند شد.

پیشنهادها

با توجه به قابلیت‌های مناسب برنامه LS_DYNA در تحلیل‌های سه‌بعدی ضربه و انفجار سازه‌ها، تلاش شود تا معیار شکست هوک و براون در آن کد نویسی شود و عوامل مؤثر دیگر در ضربه آسیب انفجار از جمله نسبت قطر ماده منفجره به قطر چال (ضربه جفت شوندگی)، تأخیرهای انفجار و نحوه خرج‌گذاری^{۶۵} با به‌کارگیری ستون هوا به‌صورت مدل‌های مناسب، موردبررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] Holmberg, R. and Persson, P. A., 1980. Design of Tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage, *Transc. Inst. Min. Metall.*: A37-A40.
- [2] Laubscher, D.H. 1990. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. *Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy*, 90(10), p. 279-293.
- [3] Singh, S.P., 1992. Mining Industry and Blast Damage. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, p. 465-471.
- [4] Najm, K., Javaherian, A., & Bakhshandeh, Amnieh, H., 2002. Study of blasting vibrations in Sarcheshmeh copper mine, *Acta Seismologica Sinica*, 15(6), p. 683-690.
- [5] Saiang D., 2008. Behaviour of Blast-Induced Damaged Zone Around Underground Excavations in Hard Rock Mass. Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, Luleå University of Technology, Doctoral Thesis.
- [6] Malmgren, L., et al. 2007. The excavation disturbed Zone (EDZ) at Kiirunavaara mine. Sweden by seismic measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 61(1), p.1-15.
- [7] Saiang, D. and Nordlund, E., 2007. Failure Mechanisms around shallow tunnels in Brittle rock. In: R.E. Sousa, Olalla and Grossman (Editors), 11th International Society of Rock Mechanics Symposium. Taylor and Francis, Lisbon, Portugal, p. 883-890.
- [8] Warneke, J., Dwyer, J.G. and Orr, T., 2007. Use of a 3-D scanning laser to quantify drift geometry and overbreak due to blast damage in underground manned entries, In: Eberhardt, E., Stead, D., Morrison, T. (Eds.), *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*, Taylor & Francis Group. London, Vancouver, Canada, p. 93-100.
- [9] Iverson, S.R. et al., 2009. The extent of blast damage from a fully coupled explosive charge, NIOSH

نظر می‌رسد. از عوامل این اختلاف می‌توان به اختلاف تعریف مسئله از نظر تعداد چال منفجرشده در یک تأخیر زمانی و تفاوت پارامترهای خروجی تحلیلی سایر پژوهشگران اشاره کرد [۲۹، ۳۰].

نتایج به‌دست‌آمده، ابزار مناسبی در شبیه‌سازی انفجار برای شرایط مشابه در تعیین ضخامت محدوده آسیب و مقدار ضربه آسیب معیار شکست هوک و براون است بدین ترتیب که مشخصات مکانیکی توده سنگ مانند مدول تغییر شکل‌پذیری در طراحی‌های مکانیک سنگی می‌تواند به‌جای تخصیص یک ضربه آسیب برای کل محدوده آسیب‌دیده پیرامون تونل و در نتیجه اختصاص فقط یک مقدار برای مشخصه مکانیکی آن، به‌صورت دقیق‌تر ویژگی‌های مکانیکی توده سنگ برای هر محدوده با توجه به میزان آسیب همان محدوده اختصاص یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش شده است اثر پارامتر آسیب در تونلی به قطر ۵ متر و با ویژگی‌های توده‌سنگ متوسط در محیط پیوسته مطالعه شود. بر این اساس از مدل‌سازی سه‌بعدی المان محدود استفاده شده است و فشار چال ناشی از انفجار نیز بر اساس معادله حالت JWL در هیدروکود LS_DYNA مدل‌سازی انجام شده است. در این راستا تأثیر پارامترهای مختلف مانند عمق تونل، تعداد و قطر چال‌های انفجاری بر ضربه آسیب معیار شکست هوک و براون موردبررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد چال‌های انفجاری، ضربه آسیب افزایش می‌یابد، زیرا موج دینامیکی ناشی از بار انفجار افزایش می‌یابد به‌عنوان مثال با افزایش چال‌هایی که به‌طور هم‌زمان در یک تأخیر منفجر می‌شوند، از ۲۶ چال به ۳۶ چال محدوده آسیب شدید، از حدود ۴ متر به ۷/۵ متر یا نزدیک به ۹۰ درصد افزایش یابد. با افزایش قطر چال انفجار، از ۴۱ به ۵۱ میلی‌متر محدوده آسیب شدید از ۲/۹ متر به ۳/۹ متر و یا نزدیک به ۴۰ درصد افزایش یافته است که نشان‌دهنده نقش بسیار مؤثر قطر چال در آتش‌کاری کنترل شده است؛ بنابراین برای چال‌های دیواره لازم است تا حد ممکن از قطر چال و وزن ماده منفجره کاسته شود. با افزایش عمق تونل، از ضربه آسیب کاسته شده است، در صورتی که فشار سنگ محصورکننده از ۰ به ۱۰ مگاپاسکال رسانده شود، ضخامت

- [21] Haghnejad, A., et al. 1396. Numerical study of rock mass characteristics and type of explosive in blast damage to rock slopes. *Journal of Rock Mechanics*. Vol.1. No. 4, p. 11-22, (In Persian).
- [22] Afrasiabian, B., et al. 2020. Study on the effects of blast damage factor and blast design parameters on the ground vibration using 3D discrete element method. *Innovative Infrastructure Solutions*, 5:37. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-0286-0>.
- [23] Afrasiabian, B., et al. 2021. Study on the effect of air deck on ground vibration and development of blast damage zone using 3D discrete element method. *Arabian Journal of Geosciences*, 14:1267. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07648-5>.
- [24] Kaveh Ahangaran, D., et al. 2022. Numerical analysis of blast-induced damage in rock slopes. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7:83. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00684-w>.
- [25] Haghnejad, A., Ahangari, K., Moarefvand, P., and Goshtasbi, K., 2017. Numerical investigation of the impact of geological discontinuities on the propagation of the ground vibrations. *Geomechanics and Engineering*.
- [26] Moradi Rogoshouieh, S., 1396. Simulation of the effects of open pit mine production blasting on adjacent structures using LS_DYNA software. Master Thesis in Mining Engineering. Faculty of Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, (In Persian).
- [27] Chinaei, F et al. 2021. Hoek-Brown failure criterion for damage analysis of Tunnels subjected to blast load. *Geomechanics and Engineering*, Vol. 26, No. 1 (2021) 41-47. <https://doi.org/10.12989/gae.2021.26.1.041>.
- [28] Haghnejad A., et al. 2019. Numerical investigation of the impact of rock mass properties on propagation of ground vibration. *Natural Hazards* 96:587-606.
- [29] Wenfeng Tu., et al., 2021. Thickness Calculation of Accumulative Damaged Zone by Rock Mass Blasting Based on Hoek-Brown Failure Criterion, *American Society of Civil Engineers*.
- [30] Zareifard, M.R., 2020. A new semi-numerical method for elastoplastic analysis of a circular tunnel excavated in a Hoek-Brown strain-softening rock mass considering the blast induced damaged zone. *Journal of Computers and Geotechnic*
- Spokane Research Laboratory. Spokane, WA, USA *Rock Fragmentation by Blasting*, Sanchidrián (editor) © 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48296-7, p. 459-468.
- [10] Dehghan Banadaki, M.M., 2014. Stress-wave induced fracture in rock due to explosive action. Graduate Department of Civil Engineering University of Toronto, Doctoral Thesis.
- [11] Mitelman, A. and Elmo, D., 2014. Modelling of blast-induced damage in tunnels using a hybrid finite-discrete numerical approach, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6 565e573.
- [12] Jayasinghe, L.B et al., 2013. Computer simulation of underground blast response of pile in saturated soil. *Computers and Structures* 120, p.86-95.
- [13] Onederra I. A., et al, 2013. Modelling Blast Induced Damage from a Fully Coupled Explosive Charge. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 58, p. 73-84.
- [14] Yilmaz, O. and Unlu, T., 2013. Three-dimension numerical rock damage analysis under blasting load. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, p. 266-278.
- [15] Jiang, N., et al., 2014. Damage Characteristics of Surrounding Rock Subjected to VCR Mining Blasting Shock. *Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration Volume 2015*, Article ID 373021, 8 pages.
- [16] Xie, L.X., et al., 2016. Damage evolution mechanisms of rock in deep tunnels induced by cut blasting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 58, p. 257-270.
- [17] Zeng, Q.T., et al., 2016. Blasting Parameter Optimization for Room Adjacent to Cemented Filling Pillar, *Journal of Engineering Science and Technology Review* 9 (4), p. 185 - 191.
- [18] Li, X.P., et al., 2017. Numerical Simulation of Blast Vibration and Crack Forming Effect of Rock-Anchored Beam Excavation in deep underground caverns. *Hindawi Shock and Vibration Volume*.
- [19] Haghnejad, A., et al. 2018 Numerical investigation of the impact of geological discontinuities on the propagation of ground vibrations. *Geomechanics and Engineering*, Vol. 14, No.6: p.545-552.[doi](https://doi.org/10.12989/gae.2018.14.6.545),
- [20] Vermaa, H.K., et al., 2018. Blast induced rock mass damage around tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 71, p.149-158.

^۱ Kiirunavara^{۱۱} Nordlund^{۱۲} Warneke^{۱۳} Inverson^{۱۴} Crack Limit Circles^{۱۵} Crush Limit Circles^{۱۶} Ash^{۱۷} Fragmentation^{۱۸} Jiang & Zhou^۱ Damage Factor^۲ Hoek and Brown Failure Criterion^۳ Holmberg - Persson^۴ Peak Particle Velocity^۵ Laubscher^۶ Bieniawski^۷ Singh^۸ Saiang^۹ Malmgren, Saiang, Toyra, Bodare

-
- ^{۱۹} Deng
^{۲۰} Jayasinghe
^{۲۱} Vandra
^{۲۲} Decoupling Charge
^{۲۳} muck pile
^{۲۴} Yilmaz
^{۲۵} Jiang
^{۲۶} Vertical Crater Retreat (VCR)
^{۲۷} Mitelman
^{۲۸} Finite Element
^{۲۹} discrete element
^{۳۰} Rankin rotating crack
^{۳۱} Engineering Research Associates
^{۳۲} Xie
^{۳۳} Yang
^{۳۴} Cao
^{۳۵} Zeng
^{۳۶} Jones-Wilkins-Lee
^{۳۷} Cowper-Symonds model
^{۳۸} Non-reflecting boundary conditions
^{۳۹} Dowding
^{۴۰} Li
^{۴۱} Crack Forming Effect of Rock-Anchored
^{۴۲} Caverns
^{۴۳} Eulerian
^{۴۴} Lagrangian
^{۴۵} Verma et al.
^{۴۶} Perimeter Charge Factor
^{۴۷} Advancement Factor
^{۴۸} Confinement Factor
^{۴۹} Maximum Charge per Delay
^{۵۰} Grady & Kipp
^{۵۱} Mohr-Coulomb
^{۵۲} Arbitrary Lagrangian-Eulerian
^{۵۳} Implicit
^{۵۴} Explicit
^{۵۵} Part
^{۵۶} MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN
^{۵۷} Chapman-Jouguet pressure
^{۵۸} MAT_NULL
^{۵۹} Linear Polynomial Equation of State
^{۶۰} Root mean square error
^{۶۱} Dynamic Relaxation
^{۶۲} Time Step
^{۶۳} History
^{۶۴} contours
^{۶۵} hole charging