

مدلسازی عددی و بهینه سازی ترتیب لایه‌های سنگی به منظور کاهش اثر بارگذاری ضربه‌ای سطحی بر فضاهای زیرزمینی

محمدیاسر رادان کوهپائی^{۱*}، آراین مقدم^۲، سید احمد حسینی^۳

^۱ عضو هیأت علمی مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، radan@mut.ac.ir

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

^۳ عضو هیأت علمی مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

چکیده

امروزه کاربرد فضاهای مدفون برای حفاظت از تأسیسات و تجهیزات حساس بر کسی پوشیده نیست. از فضاهای امن مدفون بویژه تونل‌ها برای ایجاد انبارها، نگهداری از تجهیزات دفاعی و نظامی و همچنین ذخیره سازی برخی مواد و تجهیزات خاص استفاده می‌شود. علاوه بر آن استفاده از این فضاها بعنوان تونل‌های خدمات شهری مانند خطوط انتقال آب، مخابرات، انرژی و ... متداول است. تامین امنیت این فضاها در برابر بارگذاری‌های سطحی از موارد بسیار مهم در ساخت و طراحی آن‌ها می‌باشد. فضاهای مدفون در مقابل بارگذاری‌های مختلف قرار می‌گیرند که یکی از آن‌ها بارگذاری ضربه‌ای سطحی ناشی از انفجار است. در این مقاله، بارگذاری ضربه‌ای در محیط‌های مدفون با استفاده از روش کوپل اویلری - لاگرانژی (CEL)^۱ در محیط نرم‌افزار ABAQUS بصورت عددی مدل‌سازی شده است. بدین منظور با استفاده از چیدمان سنگ تک لایه، دولایه و سه لایه، بیشینه فشار ناشی از بار ضربه‌ای در مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این پژوهش، بیشترین میزان دمپ موج ضربه‌ای زمانی حاصل شد که لایه سنگی با بیشترین درجه هواز دگی (سنگ متخلخل) در نزدیک‌ترین موقعیت نسبت به فضای مدفون مورد نظر قرار گرفته باشد. بر این اساس، عمق ایمن فضای مدفون مدلسازی شده برای سنگ ضعیف یا متخلخل حدود ۱۲ متر، برای سنگ متوسط حدود ۱۴ متر و برای سنگ قوی یا بکر حدود ۱۸ متر بدست آمد. همچنین بر اساس نتایج حاصله، میزان تنش انتقالی از سنگ ضعیف به سنگ قوی افزایش و میزان تنش از سنگ قوی به سنگ ضعیف کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی

بارگذاری ضربه‌ای، مدلسازی عددی، لایه‌های محافظ، بهینه سازی، فضای مدفون

^۱ Coupled Eulerian-Lagrangian

مسئله مهم در رابطه با فضاهای مدفون تامین پایداری آن‌ها می باشد. موضوع تحقیق حاضر معطوف به مقاوم سازی فضاهای مدفون در برابر بارگذاری ناشی از عوامل خارجی است. تونل های مترو، تونل های ارتباطی، تاسیسات مهم نظامی و ... از جمله مهم ترین فضاهای زیرزمینی هستند که نیاز به محافظت دارند. بارگذاری ضربه‌ای می تواند بر روی سطح زمین باشد یا بعد از نفوذ در داخل زمین اعمال شود. سابقه بررسی پدیده بار ضربه‌ای و همچنین فضای های مدفون به جنگ جهانی برمی گردد. همچنین پس از آن بعد از حملات تروریستی انجام شده در نقاط مختلف توجه به بررسی این موضوع بیشتر شده است [۱]. در زمان جنگ جهانی دوم خسارت جدی به کشورهای مثل ژاپن و فرانسه و آلمان وارد شده است. علاوه بر آن در قرن بیستم حملات تروریستی مانند انفجار در مرکز تجارت جهانی لندن، انفجار در ساختمان مرکزی فدرال، حملات تروریستی به برج های دوقلو و همچنین به تبع آن خسارت های ناشی از حملات به کشورهای افغانستان و عراق بر اهمیت این موضوع افزوده است [۲]. مطالعات زیادی به منظور بررسی این موضوع انجام شده است. این مطالعات می تواند به گروه های مختلفی مثل مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات عددی تقسیم بندی کرد. در ادامه به بررسی این مطالعات پرداخته می شود. می توان گفت یکی از ابتدایی ترین و جامع ترین مطالعاتی که انجام شده است در قالب یک آیین نامه به عنوان TM5-1-85 منتشر شده است. در ادامه تمرکز بررسی مطالعات انجام شده بر روی دو بخش قرار دارد. بخش اول به بررسی پدیده بار ضربه‌ای و بخش دوم به بررسی مقاوم سازی تونل ها پرداخته می شود. در پژوهش حاضر، پدیده بار ضربه‌ای در محیط های مدفون با استفاده از روش کوپل اوپلری- لاگرانژی (CEL)^۱ در محیط نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده است. آلمان های اوپلری هوا و خاک در نظر گرفته شده اند و در صورت وجود فضای مدفون، از آلمان های لاگرانژی برای تعریف فضای استفاده شده است. با توجه به روش تحلیل که از نوع CEL می باشد، لازم است از حل گر صریح (Explicit) نرم افزار ABAQUS به منظور تحلیل های عددی استفاده شود [۳]. در روش اوپلری، مش بندی ثابت است و مصالح مربوط به بخش های مختلف مدل، درون این مش بندی ثابت می توانند حرکت کنند. بنابراین کل محدوده مورد نظر برای مساله توسط یک قطعه اوپلری تعریف می شود. سپس محل اولیه مصالح مربوط به بخش های مختلف مدل تعریف می شوند. بعنوان مثال محدوده قرارگیری ماده منفجره در قطعه اوپلری، توسط کسر حجمی اوپلری (EVF)^۲ مربوطه تعریف می شود. بنابراین نرم افزار، آلمان هایی را که در قطعه اوپلری متناظر با ماده منفجره هستند را شناسایی کرده و مصالح مربوطه را به آن اختصاص خواهد داد [۴]. در سال ۲۰۱۶ تیواری و همکاران [۵] با استفاده از مدلسازی عددی در نرم افزار ABAQUS به بررسی رفتار دو تونل مجاور در اثر بارگذاری ضربه‌ای پرداختند. در این مدلسازی از دو تونل به قطر های برابر و ۵ متری در عمق ۷/۵ متری استفاده شده است که فاصله مرکز به مرکز این تونل ها ۱۰ متر و ابعاد کل مدل ۲۰×۲۰×۱۵ متر انتخاب شده است. مرز های اطراف مدل در راستای عمود بر آن بسته شده اند تا پایداری مدل تامین شود. بار ضربه‌ای در یکی از تونل ها اتفاق افتاده و در تونل دیگر اطلاعات و رفتار آن بررسی می شود. این تونل به عنوان تونل دریافت کننده نام گذاری شده است. لاینینگ تونل ها با استفاده از بتن های مسلح مدلسازی شده اند. از آلمان های سه بعدی ۸ گره ای برای مدلسازی خاک و بتن مسلح استفاده شده است. در حالی که از آلمان های تیر برای مدلسازی تسلیح استفاده شده است. میزان شدت بار ضربه‌ای به میزان وزن مواد آن بستگی دارد. در این مدلسازی از بار ضربه‌ای به وزن ۵۰ کیلوگرم استفاده شده است. در مدلسازی مدل های رفتاری از مدل دراکر پراگر برای خاک و از مدل جانسون کوک برای فلز و بتن استفاده شده است. این مدل ها وابسته به نرخ کرنش می باشند و می توانند در بارگذاری دینامیکی مانند بار ضربه‌ای مورد استفاده قرار بگیرند. تغییر مکان و تنش های ایجاد شده در تونل مجاور از پارامترهایی هستند که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج نشان می دهد که فاصله تونل ها و وزن مواد منفجره از اهمیت زیادی برخوردار است. به وضوح میزان تغییر مکان و تنش ناشی از بار ضربه‌ای در اطراف تونلی که در آن بار ضربه‌ای اتفاق می افتد بیشتر از تغییر مکان و تنش است که در اطراف تونل دریافت کننده می باشد. در تحقیق مشابه در سال ۲۰۱۴ توسط فلدگان و همکارانش [۶] دو تونل به شکل هندسی مستطیلی مدلسازی شده است که بارگذاری ضربه‌ای درون تونل و تاثیر آن بر روی تونل مجاور بررسی شده است. در این تحقیق همه مراحل بار ضربه‌ای از جمله تشکیل جبهه گاز پرفشار درون تونل و فشار آن به دیوار تونل مدلسازی شده است. اندرکنش خاک و تونل در هنگام بارگذاری دینامیکی و انتشار

¹ coupled eulerian lagrangian² Eulerian volume fraction

موج ضربه‌ای در این دو محیط نیز در نظر گرفته شده است. در سال ۲۰۱۴ تحقیقی که توسط بازیار و همکاران [۲] انجام شد، از ماده ژئوفوم و هم چنین از خاک درشت دانه با درصد تراکمی پایین استفاده شد. خاک اصلی استفاده شده در این آزمایش درصد تراکم نسبی ۸۷ بوده و از یک لایه خاک درشت دانه با درصد تراکمی ۴۰ درصد به عنوان یک مانع برای کاهش اثرات مخرب بار ضربه‌ای استفاده شده است. هم چنین در حالت دیگر از این آزمایش از ژئوفوم با چگالی ۹ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان مانع بکار برده شده است. آزمایش سانتریفیوژ با شتاب ۷۰ برابر گرانش در حالی انجام شده است که از ۶ وسیله از جمله کرنش سنج و شتاب سنج و فشار سنج استفاده شده است. در آزمایشی دیگر که توسط وودز و همکاران [۷] انجام شد، محل قرار گیری مناسب مانع بین فاصله ماده منفجره و سازه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج در این آزمایش نشان می‌دهد بهترین تاثیر کاهش می‌دهد به محل قرار گیری مانع کنار سازه می‌باشد. ونگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۸] یک مدل عددی برای بررسی مانع بر روی توزیع تنش های ناشی از بار ضربه‌ای ساخته اند. بارگذاری در این مدل عددی بصورت مثلثی تخمین زده شده و بصورت گسترده بر روی سطح مدل اعمال شده است. مانعی که در این مدل عددی مورد استفاده قرار گرفته از ترکیب لایه های مختلف تشکیل شده است. هسته اصلی مانع از جنس ژئوفوم می‌باشد. در لایه های بالایی و زیرین این هسته نیز از ماده بتن استفاده شده است. در آن مدل سازی از مدل سازی سازه خودداری شده است و تنها توزیع و گسترش موج تنش در مدل در نقاط مختلف اندازه گیری شده است. نتایج نشان داده است که استفاده از این مانع به منظور کاهش موج های تنشی در مدل عددی موثر می‌باشد. ایرادی که به این تحقیق وارد است استفاده از بارگذاری مثلثی شکل و اعمال آن به صورت بار گسترده در سطح مدل می‌باشد. در سال ۲۰۰۶ نیز گویی و چن و [۹] با استفاده از برنامه FLAC یک مدل عددی دو بعدی برای بررسی و تحلیل اثر بار ضربه‌ای بر روی تونل موجود زیر فرودگاه تایپي ساخته است. سپس در این مدل عددی تحلیل پارامتریک انجام شده است. در شکل زیر نمای جایگاه فرودگاه و تونل زیر آن نشان داده شده است. هم چنین عدد SPT^۱ در این خاک کمتر از ۲۰ می‌باشد که نشان دهنده سست بودن خاک سایت است. در بارگذاری دینامیکی فرض شده است که بمب تا عمق ۱۲/۵ متری نفوذ کرده و وزن معادل ۲۰۹۰ پوند ماده منفجره داشته باشد. پائولا و مدونی در سال ۲۰۲۳ [۱۰] یک ابزار نوین برای طراحی خط ۴ متری بوداپست بر اساس GIS-BIM و شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشنهاد دادند. این ابزار به طور موثری تغییرات شکل زمین و آسیب‌های ناشی از حفاری مکانیزه را پیش‌بینی می‌کند. حفاری تونل مکانیزه یک روش کارآمد با تأثیر محدود بر محیط زیست در مناطق شهری است. دستگاه حفاری تونل (TBM) پیشروی سریع‌تر، کنترل بهتر تغییرات شکل سطحی و استانداردهای ایمنی بهتر را فراهم می‌کند. عالی پور و همکارانش در سال ۲۰۲۲ [۱۱] طی تحقیقاتشان در مورد خاک‌های مارن تبریز انجام دادند. مارن‌ها از خاک‌های مسئله دار هستند که در صورت قرار گرفتن در معرض جریان آب متورم می‌شوند و مشکلاتی در پایداری بستر پروژه‌های عمرانی ایجاد می‌کنند. خاک‌های مارن تبریز که به دلیل مقاومت کم و تورم زیاد مشکلاتی برای پروژه‌ها ایجاد می‌کنند، را با استفاده از افزودنی‌های نانوسیلیکا و نانوالومینا با موفقیت تثبیت کردند. این مطالعه تأثیر این افزودنی‌ها روی نمونه‌های بازسازی شده از خاک مارن تبریز را بررسی کرد و هدف آن کاهش تأثیرات محیط زیستی منفی نسبت به تثبیت کننده‌های سنتی مانند سیمان یا آهک بود. ارزیابی های آزمایشگاهی، از جمله محدوده‌های اتربرگ، فشار تورم، نسبت تحمل کالیفرنیا (CBR) و آزمون برش مستقیم، به بهبود قابل توجه رفتار خاک اشاره داشتند. به‌ویژه، نانوسیلیکا تأثیر بیشتری در افزایش استحکام خاک (CBR) داشت. این تحقیق رویکرد جدیدی برای رفع چالش‌های مرتبط با خاک‌های مارن ارائه می‌دهد. عالی پور و همکارانش در سال ۲۰۲۳ [۱۲] در یک مطالعه موردی، با استفاده از ریزشمع‌های تزریقی، عملیات بهسازی خاک زیر پی‌های منفرد یک سازه بتنی نشست کرده انجام شد. در این تحقیق، تأثیر استفاده از ریزشمع‌ها در کنترل میدان تنش-تغییر شکل خاک بستر سازه بتنی مورد بررسی قرار گرفت. برای ارزیابی نشست‌های رخ داده، اطلاعات مورد نیاز با انجام شناسایی زیرسطحی از طریق حفر گمانه‌های ژئوتکنیکی جمع‌آوری شد و همچنین عملیات پایش نشست‌ها انجام شد. نقشه‌های برداشت قبل از عملیات بهسازی خاک نشان دهنده نشست پی‌های منفرد و ادامه‌دار بودن نشست‌ها بود. اما پس از عملیات بهسازی خاک، این روند به صفر رسید. با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS، تحلیل‌های عددی روی سازه بتنی روی بستر سست که مستعد تغییر شکل‌های مخرب در اعضای باربر مانند ستون‌ها است، انجام شد. در این شبیه‌سازی‌ها، برای به‌دست آوردن

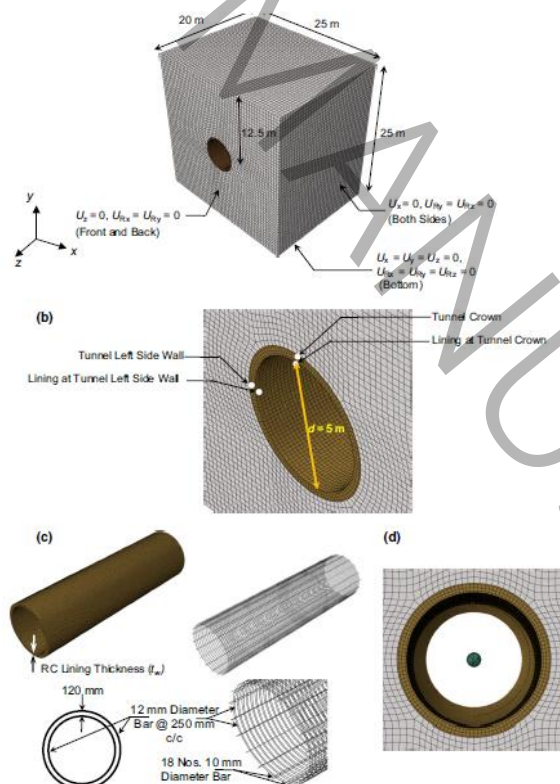
¹ Standard Penetration Test

عملکرد بهینه ریزشمع‌ها، پارامترهای عمق، قطر و تعداد ریزشمع مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق در خصوص تصمیم‌گیری برای بهسازی خاک یک سازه بتنی نشست کرده در نزدیکی گودبرداری انجام شده، از طریق روش ریزشمع یا تخریب سازه صورت گرفت. نتایج نشان داد که پارامترهای طول و تعداد ریزشمع بیشترین تأثیر را در کنترل میدان تغییر شکل و نشست سازه دارند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که تأثیر پارامتر وزن سازه در اندرکنش ریزشمع و سازه قابل توجه است. در این مقاله، بارگذاری ضربه‌ای در محیط‌های زیرزمینی با استفاده از روش کوپل اوپلری - لاگرانژی در محیط نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است. المان‌های اوپلری برای تعریف بار ضربه‌ای، هوا و خاک در نظر گرفته شده‌اند و برای مدلسازی سازه مدفون، از المان‌های لاگرانژی برای تعریف آن استفاده شده است. با توجه به روش تحلیل که از نوع CEL می‌باشد، در روش اوپلری (Eulerian)، مش بندی ثابت است و مصالح مربوط به بخش‌های مختلف مدل درون این مش بندی قابلیت حرکت دارد. بنابراین کل محدوده موردنظر برای مسئله درون یک قطعه اوپلری تعریف می‌شود. محدوده قرارگیری بار ضربه‌ای در قطعه اوپلری، به کمک کسر حجمی اوپلری (EVF) مربوطه تعریف می‌شود؛ در نتیجه نرم‌افزار، المان‌هایی متناظر با بار ضربه‌ای است را در قطعه اوپلری شناسایی کرده و مصالح مربوطه را به آن اختصاص می‌دهد. همین روند در معرفی هوا و خاک پیروی می‌گردد [۱۳].

۲- مدلسازی و صحت سنجی

مشخصات مصالح مصرفی برای صحت سنجی

به منظور صحت سنجی فضای مدفون مدل شده توسط تیواری و همکارانش [۴] که به صورت مدلسازی در نرم افزار ABAQUS انجام شده است مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد و کلیه مشخصات اعم از شرایط مرزی و میلگردهای این فضای در شکل ۱ ارائه شده است.

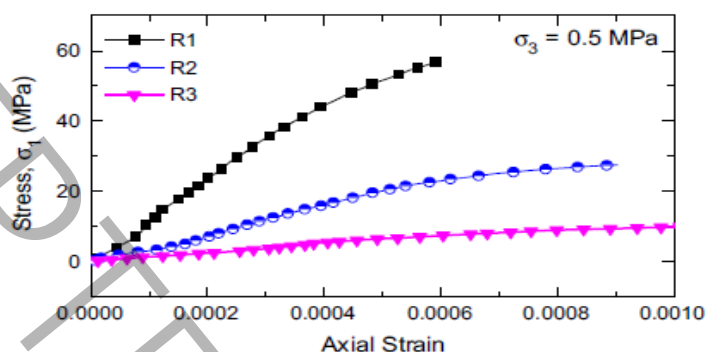


شکل ۱: مشخصات فضای مدفون مدلسازی شده [۴]

Fig.1: Characteristics of the modeled buried space [4]

مشخصات سنگ :

برای مدل سازی سنگ از معیار گسیختگی دراکر - پراگر استفاده شده است. معیار دراکر - پراگر^۱، معیاری است مبتنی بر آزمایش و عمل (مبتنی بر تجربه) یا به عبارت دیگر معیاری است عملی آزمایشگاهی که مشخصات سنگ را بر اساس انجام آزمایش های عملی نتیجه می دهد و گسیختگی آن به شکل موضعی غیر خطی است. خصوصیات سنگ مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲ نمودار تنش-کرنش سنگ [۴]

Fig.2: Rock stress-strain diagram [4]

جدول ۱: مشخصات سنگ [۴]

Table 1: Rock specifications [4]

۲۸ (GPa)	مدول یانگ
۰/۲۵	ضریب پواسون
۲۵۵۰ (Kg/m ³)	چگالی
$\varphi = 42$	زاویه اصطکاک
$\psi = 5$	زاویه اتساع
$C = 2/3$ (MPa)	چسبندگی

مشخصات بتن :

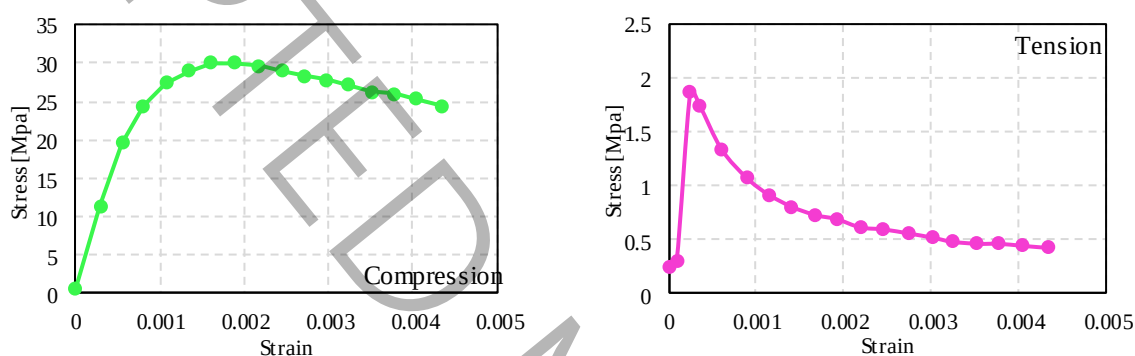
طبق مدل سازی بتن در مقاله تیواری و همکارانش [۵] از مدل Concrete damage plasticity model استفاده می کنیم. این مدل به این جهت است که چون ضعف بتن در کشش هست، رفتار فشاری را کاملاً الاستیک در نظر می گیرد. برای مدل سازی بتن از تحقیقات لی و همکارانش [۱۴] استفاده شده است. یکی از ویژگی های مهم مدل رفتاری ترک خوردگی، تعیین محل شروع شکست بر اساس گسیختگی مدل است. رفتار برشی مدل، بستگی به میزان باز شدن ترک ها دارد. به طور دقیق تر مدول برش ترک خوردگی با افزایش ترک ها کاهش می یابد. از این رو در نرم افزار ABAQUS سختی برشی پس از شکست به عنوان یک تابع از افت فشار در سراسر ترک خوردگی تعریف شده است. به طور کلی در نرم افزار ABAQUS روند حذف المان و خرابی به این شکل است که علاوه بر تعریف الاستیک و پلاستیک بایستی رفتار تکامل آسیب برای مصالح تعریف گردد. و مشخصات پارامتر های این مدل طبق جدول ۲ می باشد. همچنین نمودار های تنش و کرنش فشار و کشش در شکل ۳ ارائه شده است [۱۴].

¹ Drucker Prager

جدول ۲: مشخصات بتن [۴]

Table 2: Concrete specifications [4]

۲۷ (GPa)	مدول یانگ
۰/۲	ضریب پواسون
۲۴۰۰ (Kg/m ³)	چگالی
۳۰ (MPa)	مقاومت فشاری

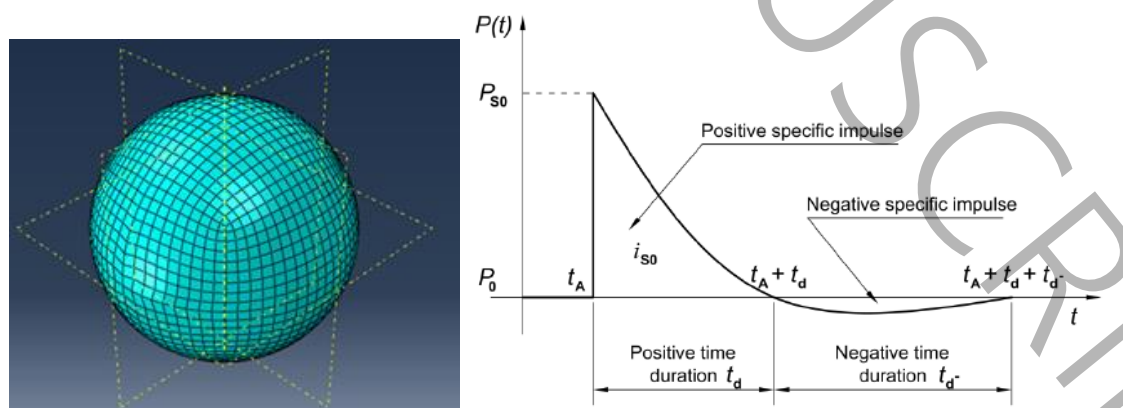


شکل ۳: نمودار تنش و کرنش بتن در فشار و کشش [۴]

Fig. 3: Stress and strain diagram of concrete in compression and tension [4]

مشخصات بارگذاری ضربه ای:

برای اعمال بار ضربه ای طبق مقاله تیواری و همکارانش [۵] از معادله Jones – Wilkins – Lee استفاده شده است. طبق مقاله مورد نظر از ۵۰ کیلوگرم TNT برای بار ضربه ای در مرکز فضای استفاده شده است. شکل ۴ نوع بارگذاری ضربه ای در نرم افزار ABAQUS را نشان می دهد که مطابق با آیین نامه بین المللی TM-5 می باشد [۱۵ و ۱۶].



شکل ۴: TNT معادل شده با کره (شکل سمت راست)، نمودار فشار موج بار ضربه ای - زمان در نرم افزار ABAQUS (شکل سمت چپ) [۱۵]

Fig 4: TNT equivalent to a sphere (right figure), shock load wave pressure-time diagram in ABAQUS software (left figure) [15]

شکل شماره ۴ (سمت راست) نحوه معادل سازی TNT ۵۰ کیلوگرمی معادل یک کره توپر و شکل ۵ (سمت راست) محل قرار گیری TNT در فضای زیرزمینی را نشان می‌دهد. به منظور اعمال بارگذاری ضربه‌ای TNT را معادل یک کره توپر در نظر گرفته که وزنی معادل ۵۰ کیلوگرم دارد و از روش JW-L که یک روش نوین است برای اعمال بارگذاری ضربه ای استفاده می شود که مشخصات و ضرایب TNT در جدول ۳ آورده شده است.

همانطور که توضیح داده شد برای مدل سازی TNT و پارامتر های آن از مدل JW-L-EOS استفاده شده است [۱۵]. معادله حاکم بر این مدل و پارامتر های مورد نظر در زیر ارایه شده است.

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{\rho}}) e^{R_1 \bar{\rho}} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{\rho}}) e^{R_2 \bar{\rho}} + \omega p_{e_{int}} \quad (1)$$

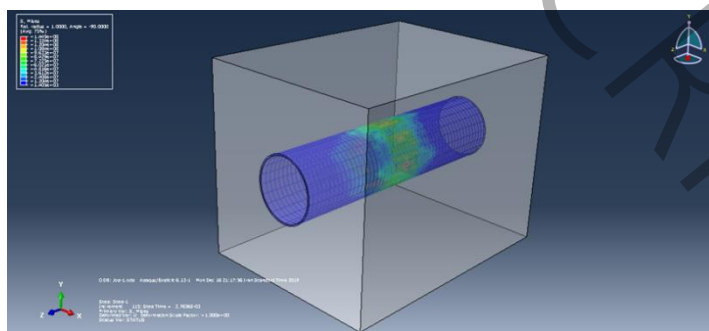
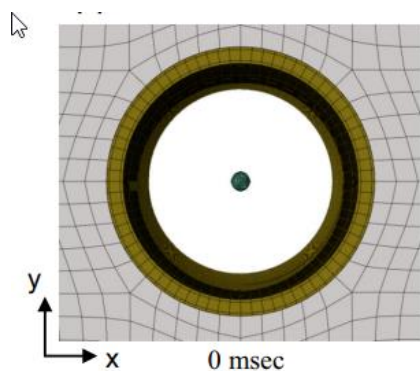
جدول ۳: مشخصات TNT [۴, ۱۷]

Table 3: Specifications of TNT [4, 17]

سرعت موج	۶۹۳۰ (m/s)
چگالی	۱۶۳۰ (Kg/m ³)
R1	۴/۱۵
R2	۰/۹
A	۳۷۳۸۰۰ (Mpa)
B	۳۷۴۷ (Mpa)
ω	۰/۳۵
چگالی انرژی	۳۶۸۰

۳- نتایج صحت سنجی:

محل قرار گیری TNT در فضای مدفون و فضای مونتاژ شده در نرم افزار ABAQUS به منظور صحت سنجی:

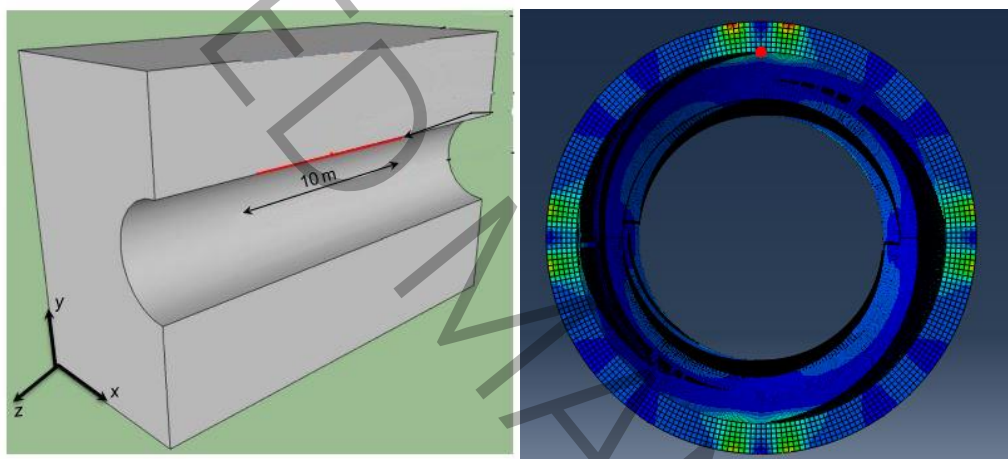


شکل ۵: محل قرارگیری TNT در فضای مدفون (شکل سمت راست) فضای مونتاژ شده در نرم افزار ABAQUS (شکل سمت چپ)

Fig. 5: Placement of TNT in the buried space (right figure) space assembled in ABAQUS software (left figure)

شکل ۵ محل قرارگیری TNT در فضای مدفون و فضای مونتاژ شده در نرم افزار ABAQUS را نشان می دهد که از روش CEL (کوپل اولیری-لاگرانژی) به منظور مدلسازی استفاده شده است. برای بالا بردن دقت مدلسازی از آنالیز حساسیت مش استفاده شده است یعنی سایز مش ها به قدری کوچک شوند تا نتایج خروجی از مدلسازی بعد از یک سایز مشخص از مش همگرا شوند که در این مدلسازی سایز مش ۴ سانتی متر در نظر گرفته شده و نتیجه آن تطابق خوبی با مقاله تیواری و همکارانش [۴] داشته باشد.

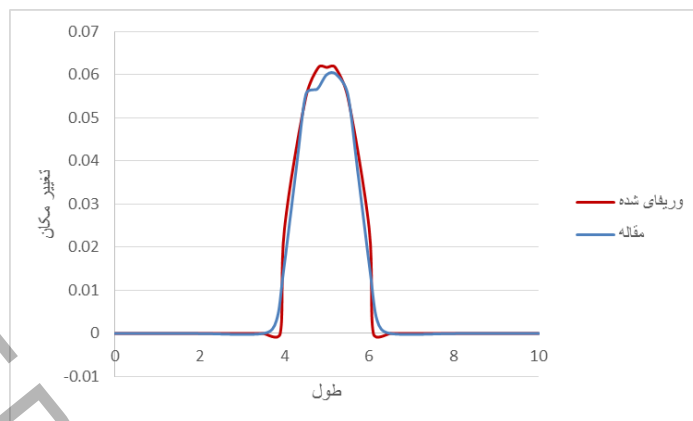
نمودار تغییر مکان تاج تونل در لاینینگ در زمان ۱,۲ میلی ثانیه:



شکل ۶: نمودار تغییر مکان تاج تونل در لاینینگ

Fig. 6: Diagram of tunnel crown change in lining

با توجه به شکل ۶ در راستای نشان داده شده در قسمت تاج تونل یک بازه به طول ۱۰ متر در نظر گرفته شده و مقادیر بیشینه تغییر مکان در این بازه استخراج شده اند. از مقایسه نتایج در نمودار شکل ۷ این نتیجه حاصل می شود که نتایج بیشینه تغییر مکان مدلسازی انجام شده در نرم افزار ABAQUS به منظور صحت سنجی با نتایج بیشینه تغییر مکان ارائه شده در مقاله تیواری و همکارانش [۴] تطابق خوبی دارد که این نشان می دهد مدل به درستی صحت سنجی شده است. مقایسه نتایج خروجی مدل مونتاژ شده در شکل ۵ با مقاله تیواری و همکارانش [۴] در شکل ۷ نشان داده است.



شکل ۷: مقایسه نمودارهای نمودارهای طول - تغییر مکان تاج تونل در لاینینگ در مقاله [۳] و مدلسازی

Fig. 7: Comparison of graphs of length graphs - change of location of tunnel crown in lining in article [3] and modeling

مشخصات سنگ مصرفی در مدلسازی

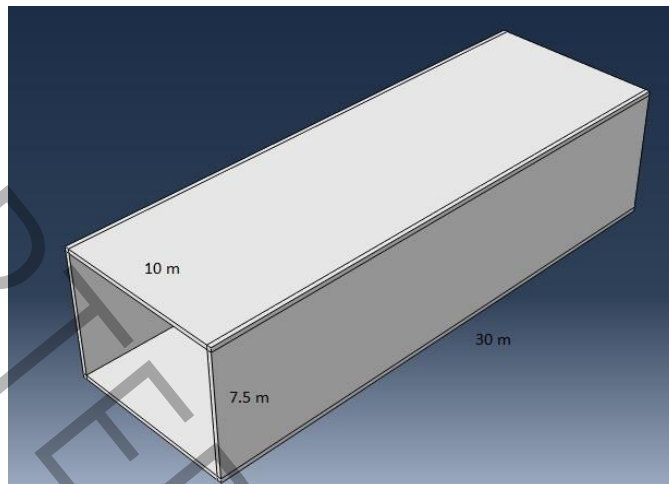
می توان سنگ ها را در برابر بار ضربه ای به ۳ دسته کلی قوی (H)، متوسط (M) و ضعیف (L) دسته بندی کنیم. که در جدول ۴ مشخصات آن ها آورده شده است. برای مدل سازی سنگ ها در نرم افزار ABAQUS از مدل رفتاری Drucker-Prager استفاده شده است. همچنین چگالی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسن، زاویه اصطکاک داخلی، RQD و RMR برای سه دسته سنگ در جدول ۴ قابل مشاهده هستند [۱۸].

جدول ۴: مشخصات سنگ های مدل سازی شده در نرم افزار ABAQUS [۱۸]

Table 4: Characteristics of rocks modeled in ABAQUS software [18]

مشخصات سنگ های مصرفی			
Weathering conditions	Highly to completely (H) or R1	Moderately to highly (M) or R2	Slightly to moderately (L) or R3
Specific gravity (G)	۲/۶۵	۲/۶۵	۲/۶۵
Density (qr) (kg/m3)	۲۵۵۰	۲۴۲۰	۲۳۵۰
Elastic modulus (ER) (GPa)	۲۸	۱۴	۴
Poisson's ratio (m)	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۴
Angle of internal friction (u)	۴۲	۳۹	۳۳
In situ stress ratio (K_0)	۰/۵	۰/۵	۰/۵
Dilation angle (w)	۵	۵	۵
Cohesion (c) (MPa)	۲/۳	۱/۵۴	۱/۴
f_c (MPa)	۴۰	۲۸	۱۰/۵
RQD range	۷۵-۹۰	۳۰-۴۰	۱۰-۲۰
RMR	۴۷	۳۳	۲۰

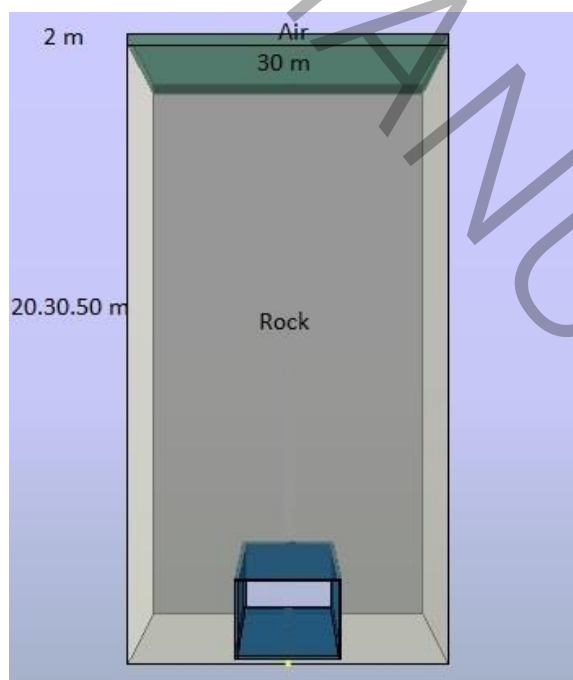
ابعاد فضای مدفون بر اساس تحقیقات براکس و لی [۱۹] در نرم افزار ABAQUS مدلسازی شده اند. همانطور که از شکل ۸ مشخص است فضای مدفون مدل سازی شده به طول ۱۰، عرض ۷،۵، عمق ۳۰ و ضخامت ۰،۲۵ متر در نرم افزار مدلسازی شده است.



شکل ۸ : مشخصات ابعاد فضای مدفون مدلسازی شده در نرم افزار ABAQUS [۱۹]

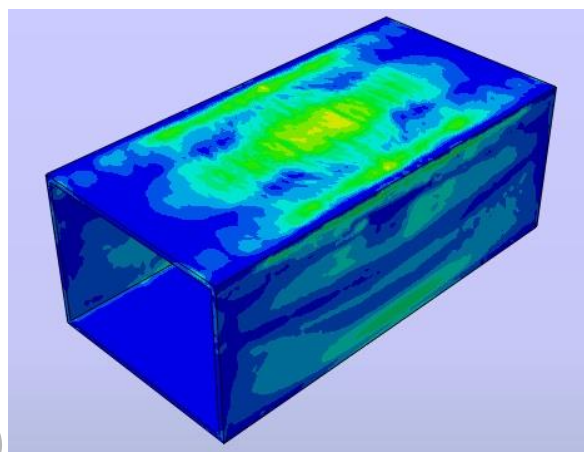
Fig. 8: Specifications of the dimensions of the buried space modeled in the ABAQUS software [19]

مشخصات بتن مصرفی نیز در جدول ۲ و شکل ۳ شرح داده شده است و از مدل Concrete damage plasticity model به منظور تعریف مشخصات بتن استفاده شده است که در بخش قبلی برای آن صحت سنجی انجام شد.



شکل ۹ : فضای مدفون زیر زمینی مدلسازی شده در نرم افزار ABAQUS در عمق ۳۰ متری

Fig. 9: The underground space modeled in ABAQUS software at a depth of 30 meters



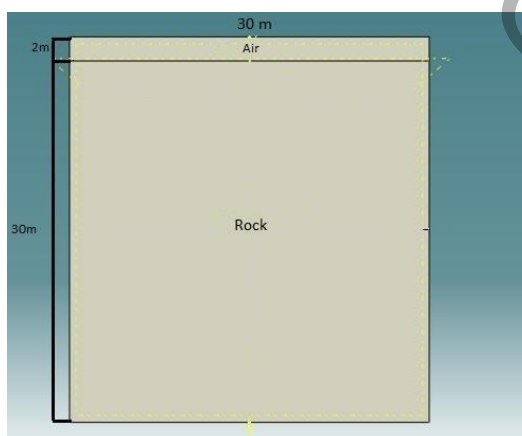
شکل ۱۰ : کانتور فشار وارده بر فضای مدفون در زمان بیشینه فشار وارده حاصل از بار ضربه‌ای

Fig. 10: The contour of the pressure on the buried space at the time of the maximum pressure resulting from the impact load

با توجه به مقایسه نتایج بالا این نتیجه حاصل می‌شود که حدوداً در عمق ۱۸ تا ۲۰ متر برای سنگ قوی (بکر) دوران دیوار بالایی تونل مربعی با ضخامت ۰٫۲۵ به مقدار حدود ۲ درجه نزدیک است. با توجه به نتایج آنالیز انجام شده میزان بیشینه فشار وارده به فضای مدفون در این حالت حدود ۱۰ تا ۱۲ مگاپاسکال می‌باشد. لذا این نتیجه حاصل می‌شود که هنگامی که بیشینه فشار وارده بر فضای مدفون حدود ۱۰ تا ۱۲ مگاپاسکال باشد میزان دوران دیوار بالایی تونل مربعی هم به ۲ درجه که بیشینه دوران مجاز دیواره تونل آیین نامه UFC 2014 است، می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده و طبق آیین نامه UFC 2014 میزان فشار وارده بر فضای مدفون حدوداً ۱٫۷ برابر بیشینه فشار وارده بر لایه خاک یا سنگ قرار گرفته بر روی خود می‌باشد که اصطلاحاً به آن ضریب انعکاس می‌گویند. که بیشینه فشار وارده بر خاک یا سنگ از تقسیم ۱۲ مگاپاسکال بر ۱٫۷ حدود ۷ مگاپاسکال تعیین می‌شود. در ادامه نتایج مدلسازی سنگ تک لایه، دولایه و سه لایه برای بارگذاری ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی را بررسی خواهیم کرد.

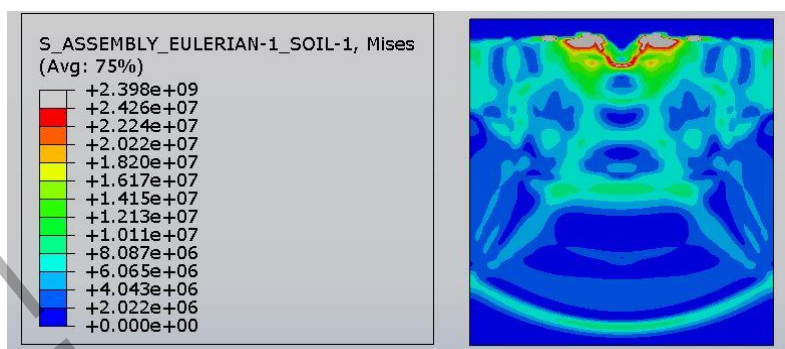
سنگ تک لایه با عمق ۳۰ متری برای بارگذاری ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، به ترتیب مدل خاک تک لایه و کانتور فشار وارده بر آن برای بار ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی برای عمق ۳۰ متر مشاهده می‌شود.



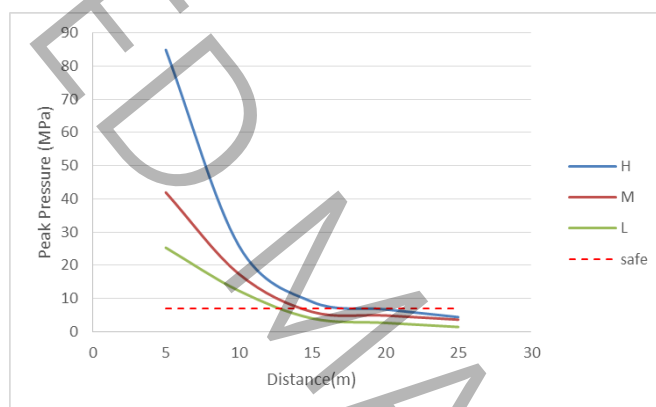
شکل ۱۱ : مدلسازی سنگ تک لایه با بار ضربه‌ای سطحی ۲۰۰۰ کیلوگرم در نرم افزار ABAQUS

Fig. 11: Modeling of single-layer rock with a surface impact load of 2000 kg in ABAQUS software



شکل ۱۲: کانتور فشار وارده بر سنگ تک لایه برای بار ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی برای عمق ۳۰ متر

Fig. 12: Contour of pressure on single-layer rock for 2000 kg surface impact load for 30 meters depth



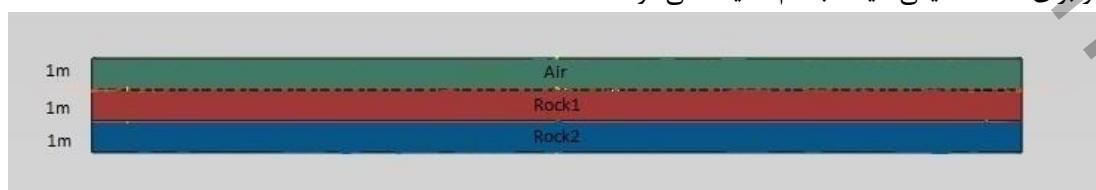
شکل ۱۳: مقایسه بیشینه فشار برای ۳ حالت سنگ ۳۰ متری تک لایه

Fig. 13: Comparison of the maximum pressure for 3 conditions of 30 m single-layer rock

عمق ایمن فضای مدفون با توجه به نمودار برای سنگ ضعیف یا متخلخل (L) حدود ۱۲ متر، برای سنگ متوسط (M) حدود ۱۴ متر و برای سنگ قوی یا بکر (H) حدود ۱۸ متر می‌باشد. پس از مدلسازی، بیشینه فشار برای قسمت میانی سنگ‌های تک لایه برای عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر خروجی گرفته شده و تحت نمودار فاصله-بیشینه فشار در شکل ۱۳ دیده می‌شوند. همان‌طور که از شکل ۱۳ مشهود است سنگ H نسبت به سنگ M و L بیشینه فشار بیشتری دارد. سنگ‌های M و L در عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۵ بیشینه فشار وارد بر سازه را نسبت به سنگ H به ترتیب به میزان ۵۰، ۶۶، ۳۲، ۵۲، ۲۳، ۵۴، ۱۷ و ۳۷ درصد کاهش می‌دهند.

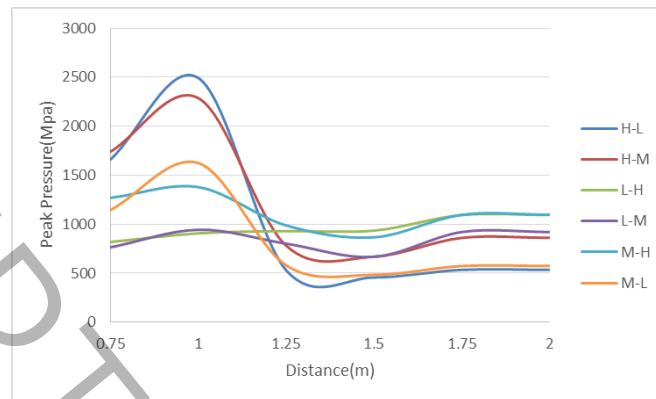
الگوی سنگ با چیدمان دو لایه برای بارگذاری ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی به منظور یافتن چیدمان بهینه لایه‌ها

مطابق شکل ۱۴، ۶ حالت H-L، H-M، L-H، L-M، M-H، M-L برای حالت سنگ با چیدمان دو لایه مدل سازی شده و نتایج بیشینه فشار برای قسمت میانی لایه‌ها با هم مقایسه می‌شوند.



شکل ۱۴ : مدلسازی سنگ دو لایه با بار ضربه‌ای سطحی ۲۰۰۰ کیلوگرم در نرم افزار ABAQUS

Fig. 14: Modeling of two-layer rock with a surface impact load of 2000 kg in ABAQUS software



شکل ۱۵ : مقایسه بیشینه فشار برای ۶ حالت سنگ با چیدمان دو لایه

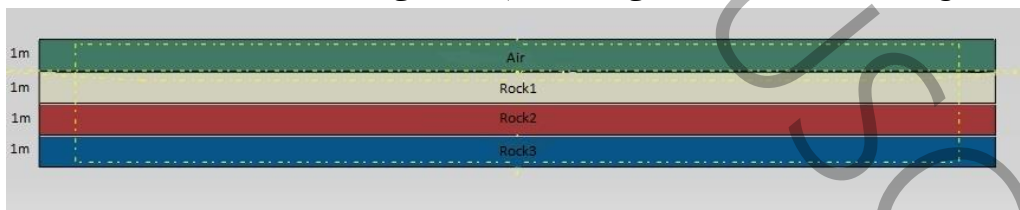
Fig. 15: Comparison of the maximum pressure for 6 types of rock with two layers arrangement

در لایه اول نامناسب ترین لایه که کمترین میزان دمپ بیشینه فشار حاصله از بار گذاری ضربه‌ای را دارد حالت H-L می‌باشد، همچنین L-H مناسب ترین حالت برای دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد. می‌توان نتیجه گرفت حالت H-M، M-L، M-H و L-M و L-H بیشینه فشار حاصل از بار ضربه‌ای را به ترتیب ۰.۸٪، ۰.۳۴٪، ۰.۴۴٪، ۰.۶۲٪ و ۰.۶۳٪ نسبت به حالت H-L که نامناسب ترین حالت برای لایه‌ی اول است را کاهش می‌دهد.

در لایه دوم نامناسب ترین لایه که کمترین میزان دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد حالت L-H و M-H می‌باشد، همچنین H-L مناسب ترین حالت برای دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد. می‌توان نتیجه گرفت حالت L-M، M-H و M-L و H-M و H-L بیشینه فشار حاصل از بار ضربه‌ای را به ترتیب ۰.۲٪، ۰.۱۶٪، ۰.۲۱٪، ۰.۴۷٪ و ۰.۵۱٪ نسبت به حالت L-H که نامناسب ترین حالت برای لایه‌ی اول است را کاهش می‌دهد.

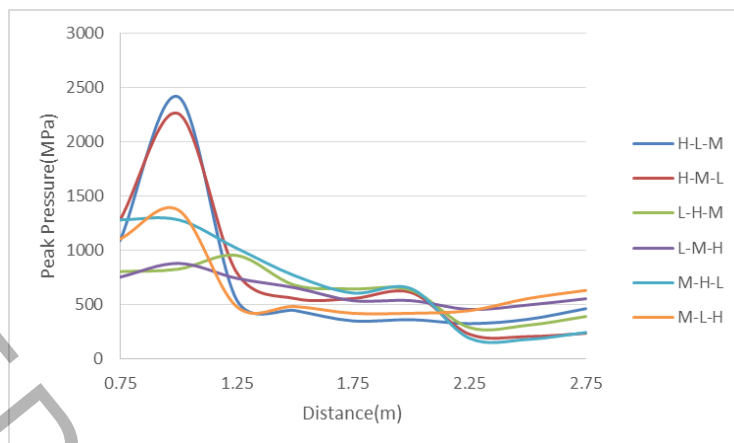
الگوی سنگ با چیدمان سه لایه برای بارگذاری ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی به منظور یافتن چیدمان بهینه لایه‌ها

مطابق شکل ۱۶، ۶ حالت H-L-M، H-M-L، L-H-M، L-M-H، M-H-L، M-L-H برای حالت سنگ با چیدمان سه لایه مدل سازی شده و نتایج بیشینه فشار برای قسمت میانی لایه‌ها با هم مقایسه می‌شوند.



شکل ۱۶ : مدلسازی سنگ سه لایه با بار ضربه‌ای سطحی ۲۰۰۰ کیلوگرم در نرم افزار ABAQUS

Fig. 16: Three-layer rock modeling with a surface impact load of 2000 kg in ABAQUS software



شکل ۱۷: مقایسه بیشینه فشار برای ۶ حالت سنگ با چیدمان سه لایه

Fig. 17: Comparison of maximum pressure for 6 types of rock with three layer arrangement

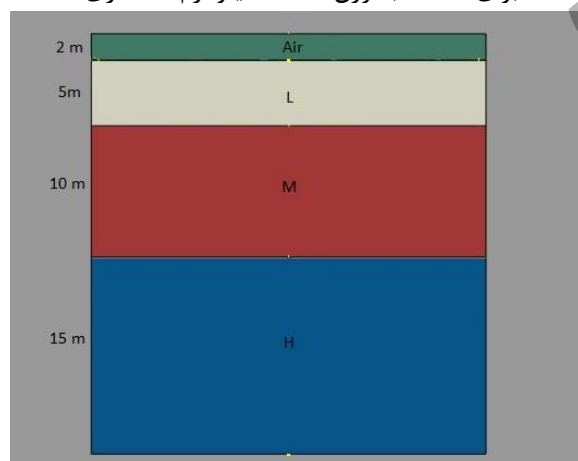
در لایه اول نامناسب ترین لایه که کمترین میزان دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد حالت H-L-M می‌باشد، همچنین L-H-M مناسب ترین حالت برای دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد. می‌توان نتیجه گرفت حالت H-M-L، M-L-H، M-H-L، L-M-H و L-H-M بیشینه فشار حاصل از بار ضربه‌ای را به ترتیب ۰.۶٪، ۰.۴۳٪، ۰.۴۶٪، ۰.۶۳٪ و ۰.۶۵٪ نسبت به حالت H-L-M که نامناسب ترین حالت برای لایه‌ی اول است را کاهش می‌دهد.

لایه دوم نامناسب ترین لایه که کمترین میزان دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد حالت M-H-L می‌باشد، همچنین H-L-M مناسب ترین حالت برای دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد. می‌توان نتیجه گرفت حالت L-H-M، H-M-L، L-M-H، M-L-H و H-L-M بیشینه فشار حاصل از بار ضربه‌ای را به ترتیب ۰.۲٪، ۰.۵٪، ۰.۱۶٪، ۰.۳۴٪ و ۰.۴۳٪ نسبت به حالت M-H-L که نامناسب ترین حالت برای لایه‌ی دوم است را کاهش می‌دهد.

در لایه سوم نامناسب ترین لایه که کمترین میزان دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد حالت M-L-H می‌باشد، همچنین H-M-L مناسب ترین حالت برای دمپ بیشینه فشار حاصله از بار ضربه‌ای را دارد. می‌توان نتیجه گرفت حالت L-M-H، H-L-M، L-H-M، M-H-L و H-M-L بیشینه فشار حاصل از بار ضربه‌ای را به ترتیب ۰.۱۲٪، ۰.۲۶٪، ۰.۳۷٪، ۰.۶۱٪ و ۰.۶۲٪ نسبت به حالت M-L-H که نامناسب ترین حالت برای لایه‌ی سوم است را کاهش می‌دهد.

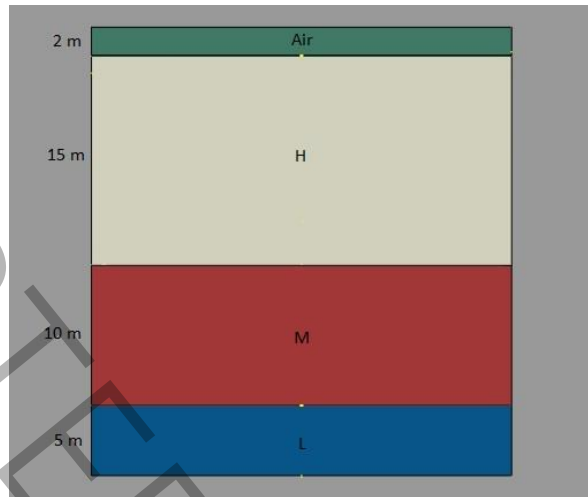
سنگ با چیدمان سه لایه برای عمق ۳۰ متر

با توجه به شکل ۱۸ چیدمان L-M-H به ترتیب با ضخامت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ متر و شکل ۱۹ چیدمان H-M-L به ترتیب با ضخامت‌های ۱۵، ۱۰ و ۵ متر در نرم افزار ABAQUS برای TNT به وزن ۲۰۰۰ کیلوگرم مدل‌سازی شده‌اند.



شکل ۱۸ : چیدمان سنگ سه لایه L-M-H با ضخامت ۵-۱۰-۱۵ متر

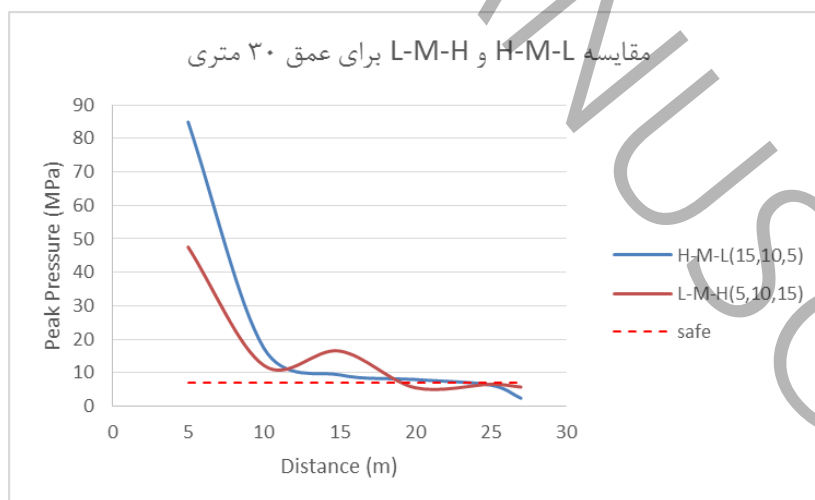
Fig. 18: Three-layer stone arrangement L-M-H with a thickness of 5m-10m-15m



شکل ۱۹ : چیدمان سنگ سه لایه H-M-L با ضخامت ۵-۱۰-۱۵ متر

Fig. 19: Three-layer stone arrangement H-M-L with a thickness of 15m-10m-5m

در شکل ۲۰ به مقایسه بیشینه فشار و درصد کاهش آن برای ۲ حالت در نظر گرفته شده بالا برای لایه‌ها در عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۷ متر در سنگ‌ها پرداخته شد. طبق نتایج به دست آمده انتقال تنش در مرز دو لایه میزان تنش انتقالی از سنگ ضعیف به سنگ قوی افزایش و میزان تنش از سنگ قوی به سنگ ضعیف کاهش می‌یابد.



شکل ۲۰ : مقایسه بیشینه فشار برای چیدمان H-M-L و L-M-H برای عمق ۳۰ متر

Fig. 20: Comparison of the maximum pressure for the H-M-L and L-M-H arrangement for a depth of 30 meters

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه با بررسی مطالعات پیشین بر روی نحوه طراحی فضای مدفون، با بهره جویی از مدل سازی عددی، رفتار فضای مدفون در برابر بار ضربه ای مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان با استفاده از خواص محیط دربرگیرنده آنها، اثر ضربه انتقالی بر فضای مدفون را کاهش داد. چیدمان سنگ لایه ای تک لایه، دولایه و سه لایه و همچنین لایه های سنگ با ضخامت متفاوت با استفاده از روش المان محدود مدل سازی شد. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که ترتیب چیدمان لایه های سنگ اثر قابل ملاحظه ای در کاهش بیشینه فشار حاصل از بارگذاری ضربه ای دارد، به شکلی که بیشترین میزان تضعیف موج از لایه سنگی با بیشینه هوازدهی حاصل شد. بیشترین میزان دمپ موج ضربه ای زمانی حاصل شده که لایه سنگی با بیشترین درجه هوازدهی (سنگ متخلخل) در نزدیک ترین موقعیت نسبت به فضای مدفون مورد نظر قرار گرفته باشد عمق ایمن فضای مدفون با توجه به نمودار برای سنگ ضعیف یا متخلخل (L) حدود ۱۲ متر، برای سنگ متوسط (M) حدود ۱۴ متر و برای سنگ قوی یا بکر (H) حدود ۱۸ متر می باشد. طبق نتایج به دست آمده انتقال تنش در مرز دو لایه میزان تنش انتقالی از سنگ ضعیف به سنگ قوی افزایش و میزان تنش از سنگ قوی به سنگ ضعیف کاهش می یابد.

نتایج بدست آمده در این پژوهش را می توان در کاربردهای مهندسی و اجرایی مختلفی برای دمپ انرژی امواج مکانیکی منتشر شده در زمین از منشأهایی نظیر ضربه و انفجار سطحی بکار گرفت. برخی از مهمترین این کاربردها عبارتند از:

- حفاظت از سازه های امن و فضاهای مدفون در برابر امواج حاصل از برخورد پرتابه ها و اجسام سنگین به سطح زمین
- جلوگیری از انتقال تکانه و موج ناشی از انفجارهای سطحی به اهداف زیرزمینی
- طراحی لایه های دمپر با استفاده از مصالح طبیعی (سنگ و خاک) برای سازه های مهندسی
- حفاظت از تأسیسات و تجهیزات مدفون و همچنین تونل های خدمات شهری در مقابل امواج انفجاری سطحی

۵- منابع

- [1] Buonsanti M, Leonardi G, Scopelliti F. 3-D Simulation of shock waves generated by dense explosive in shell structures. *Procedia Engineering*. 2011 Jan 1;10:1550-5.
- [2] Baziari MH, Salehzadeh H, Kazemi M, Rabeti Moghadam M. Centrifuge modeling of an underground structure subjected to blast loading. *Journal of Advanced Defense Science & Technology*. 2014 Apr 21;5(1):31-41. (in persian)
- [3] Abaqus/Explicit User's Manual, version 6.13 Dassault Systems Simulia Corporation, Providence. 2016.
- [4] Tiwari R, Chakraborty T, Matsagar V. Dynamic analysis of tunnel in weathered rock subjected to internal blast loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016 Nov;49(11):4441-58.
- [5] Tiwari R, Chakraborty T, Matsagar V. Dynamic analysis of tunnel in soil subjected to internal blast loading. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2017 Aug;35:1491-512.
- [6] Feldgun VR, Karinski YS, Edri I, Yankelevsky DZ. Prediction of the quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures. *International Journal of Impact Engineering*. 2016 Apr 1;90:46-60..
- [7] Feldgun VR, Kochetkov AV, Karinski YS, Yankelevsky DZ. Internal blast loading in a buried lined tunnel. *International Journal of Impact Engineering*. 2008 Mar 1;35(3):172-83.
- [8] Woods RD. Screening of surface wave in soils. *Journal of the soil mechanics and foundations division*. 1968 Jul;94(4):951-79.,
- [9] Gui MW, Chien MC. Blast-resistant analysis for a tunnel passing beneath Taipei Shongsan airport—a parametric study. *Geotechnical & Geological Engineering*. 2006 Apr;24:227-48.
- [10] Paoletta L, Ochmanski M, Modoni G. An Innovative Holistic GIS-BIM and Artificial Intelligence Based Approach to Manage Mechanized Tunnelling: The Back-Analysis of the Budapest Metro Line4. In *National Conference of the Researchers of Geotechnical Engineering 2023 Jun 17 (pp. 251-258)*. Cham: Springer Nature Switzerland.

- [11] Alipour, R., Heshmati A.A., Karimiazar, J., Esazadefar, N., Asghari-Kaljahi, E., Bahmani, S.H. "Resistance and swelling of Tabriz marl soils stabilised using nano-silica and nano-alumina." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering* (2022): 1-14. (in persian)
- [12] Alipour R, Aminpour H, Dehghanzadeh A. Investigating the effect of soil improvement by micropile method in marl soil: a case study of Bidboland, Khuzestan. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2023 Feb 20;54(12):4573-88. (in persian)
- [13] Khan S, Chakraborty T, Matsagar V. Parametric sensitivity analysis and uncertainty quantification for cast iron-lined tunnels embedded in soil and rock under internal blast loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016 Dec 1;30(6):04016062.
- [14] Lee J, Fenves GL. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of engineering mechanics*. 1998 Aug;124(8):892-900..
- [15] Larcher M, Casadei F. Explosions in complex geometries—a comparison of several approaches. *International journal of protective structures*. 2010 Jun;1(2):169-95..
- [16] TM5-1300 .Structures to resist the effects of accidental explosions. Technical Manual of the US Departments of the Army and Navy and the Air Force, USA .1990.
- [17] Tiwari R, Chakraborty T, Matsagar V. Analysis of curved tunnels in soil subjected to internal blast loading. *Acta Geotechnica*. 2020 Feb;15(2):509-28.
- [18] Yadav HR. Geotechnical evaluation and analysis of Delhi metro tunnels (Doctoral dissertation), 2005.
- [19] Brox DR, Lee KW. Yielding And Collapse Of Large Span Tunnels In Weak Rock. In *ISRM Congress 1995 Sep 25 (pp. ISRM-8CONGRESS)*. ISRM.

Numerical modeling and optimization of rock layers arrangement to reduce the effect of surface impact loading on underground spaces

M .Y. Radan^{1,*}; A. Moghadam²; S. A. Hoseini³

¹ Faculty Member of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, radan@mut.ac.ir

² MSc of Civil Engineering; Faculty of Passive Defense; Malek Ashtar University of Technology

³ Faculty Member of Passive Defense; Malek Ashtar University of Technology

ABSTRACT

Today, the use of buried spaces to protect sensitive facilities and equipment is not hidden from anyone. Buried safe spaces, especially tunnels, are used to create warehouses, maintain defense and military equipment, and also store some special materials and equipment. In addition, it is common to use these spaces as tunnels for urban services such as water transmission lines, telecommunications, energy, etc. Ensuring the security of these spaces against surface loads is one of the most important things in their construction and design. Buried spaces are exposed to various loadings, one of which is surface impact loading caused by explosion. In this article, impact loading in buried environments is numerically modeled using the Eulerian-Lagrangian (CEL) method in the ABAQUS software environment. For this purpose, using single-layer, double-layer and three-layer stone arrangement, the maximum pressure caused by impact load has been investigated in different models. According to the simulation results in this research, the highest amount of shock wave damping was obtained when the rock layer with the highest degree of weathering (porous rock) is located in the closest position to the buried space. Based on this, the safe depth of the modeled buried space was found to be about 12 meters for weak or porous rock, about 14 meters for medium rock, and about 18 meters for strong or pristine rock. Also, based on the results, the amount of transfer stress from weak rock to strong rock increases and the amount of stress from strong rock to weak rock decreases.

KEYWORDS

Impact load, Numerical modelling, Protective layers, Optimization, Buried space