

تحلیل عددی اثر لایه‌های خاکی در جلوگیری از انتقال انرژی مکانیکی امواج ضربه‌ای سطحی در زمین با روش المان محدود

پژوهشی

محمدیاسر رادان کوهپائی*؛ سید احمد حسینی^۲؛ آریین مقدم^۲

۱- استادیار؛ مجتمع دانشگاهی پدافندغیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، radan@mut.ac.ir

۲- استادیار؛ مجتمع دانشگاهی پدافندغیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، hoseini@mut.ac.ir

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد؛ عمران-زلزله، دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)، arian.moghadam94@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۱/۰۱/۱۸

شماره صفحات: ۲۵۷ تا ۲۶۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2022.11548.1443

واژگان کلیدی	چکیده
بارگذاری ضربه‌ای مدل‌سازی عددی لایه‌های محافظ خاکی سازه‌های زیرزمینی آباکوس	امروزه اهمیت استفاده از سازه‌های زیرزمینی برای حفاظت از زیرساخت‌های ملی حیاتی و حساس مانند تونل‌های قطار شهری، تأسیسات زیرزمینی شهری، پناهگاه‌ها بر هیچ‌کسی پوشیده نیست. در تحقیق حاضر، ضمن بررسی مطالعات گذشته بر روی نحوه طراحی سازه‌های امن زیرزمینی، با استفاده از مدل‌سازی عددی، رفتار سازه‌های زیرزمینی در برابر بار ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است تا طرحی ارائه شود که با استفاده از خواص محیط دربرگیرنده این‌گونه سازه‌ها، اثر ضربه انتقال‌یافته در محیط بر روی سازه زیرزمینی کاهش داده شود. در این راستا، مدل‌سازی چیدمان خاک تک‌لایه، دولایه و سه لایه و همچنین لایه‌های ترکیبی از خاک و سنگ، در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS انجام شده است. بیشینه فشار ناشی از بار ضربه‌ای، در مدل‌های مختلف مورد مقایسه و در نهایت با مقایسه نتایج مدل‌های بکار گرفته شده در این مطالعه نشان داده شد که ترتیب چیدمان لایه در خاک‌ها در کاهش بیشینه فشار حاصل از بارگذاری ضربه‌ای مؤثر است، به صورتی که به بیشترین میزان دمپ موج ضربه‌ای زمانی حاصل شده که لایه سنگی با بیشترین درجه هوازدگی و یا خاک ماسه‌ای (مشابه خاک تیپ ۲ در آیین‌نامه TMS-855) در نزدیک‌ترین موقعیت نسبت به سازه زیرزمینی موردنظر قرار گرفته باشد.

۱- مقدمه

در مسائل علمی و مهندسی عمدتاً روش‌های حل و بررسی یک مسئله به سه دسته کلی تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی تقسیم‌بندی می‌شود. روش تحلیلی به دلیل پیچیده بودن هندسه و گستردگی مسئله راه‌حل مناسبی نیست. از سوی دیگر استفاده از روش‌های آزمایشگاهی باتوجه به بارگذاری ضربه‌ای و همچنین هزینه‌بر بودن آزمایش نیز منطقی به

نظر نمی‌رسد.

علی‌رغم اینکه این روش نتایج قابل‌اعتمادی را می‌دهد اما محدودیت‌هایی نیز دارد. از جمله این محدودیت‌ها عدم قابلیت تکرار برای حالت‌های مختلف است؛ بنابراین روش عددی باتوجه به پیشرفت‌های اخیر ابزار مناسبی برای استفاده در این تحقیق است (Buonsanti, et al, 2011). کارآیی سازه‌های زیرزمینی و تأمین امنیت آن از اهمیت زیادی برخوردار است. کاربرد سازه‌های زیرزمینی در

نوع *CEL* می‌باشد، در روش اویلری (*Eulerian*)، مش بندی ثابت است و مصالح مربوط به بخش‌های مختلف مدل درون این مش‌بندی قابلیت حرکت دارد. بنابراین کل محدوده موردنظر برای مسئله درون یک قطعه اویلری تعریف می‌شود.

محدوده قرارگیری بار ضربه‌ای در قطعه اویلری، به کمک کسر حجمی اویلری (*EVF*) مربوطه تعریف می‌شود؛ بنابراین نرم‌افزار، المان‌هایی متناظر با بار ضربه‌ای است را در قطعه اویلری شناسایی کرده و مصالح مربوطه را به آن اختصاص می‌دهد. همین روند در معرفی هوا و خاک پیروی می‌گردد (*Khan, et al., 2016*).

در سال ۱۹۹۴ دیویس و همکاران (*Davies, 1994*) با استفاده از آزمایش‌های سانتریفیوژی به بررسی روش‌های کاهش اثر بار ضربه‌ای بر سازه‌های زیرزمینی پرداختند. در این آزمایش‌ها از چهار نوع مانع برای بهسازی استفاده شد، که مانع اول از جنس فوم پلی استرن (*Poly stren foam*) با ضخامت ۱۲ میلی‌متر و مانع دوم نیز از جنس بتن با ضخامت ۱۵ میلی‌متر بود. در حالت سوم نیز ترکیب این دو مانع بررسی شد. برای حالت چهارم از یک سازه باز برای جداسازی استفاده گردید.

در سال ۲۰۱۳ آزمایش‌هایی مشابه توسط دی و همکارانش (*De & Morgante, 2013*) انجام شد که در آن اثر موانع صلب نیز بررسی گردید. آزمایش‌ها روی یک لوله زیرزمینی و با بارگذاری ضربه‌ای سطحی بود. ایشان ابتدا آزمایش خود را بدون مواد مسلح کننده انجام و سپس نتایج را برای موارد گوناگون مسلح سازی مقایسه کردند. آزمایش‌ها در عمق‌های زیرزمینی ۱٫۸، ۲٫۷ و ۳٫۶ متری انجام شد. افت تنش در لوله‌های عمیق از نتایج مشخص بود. لی و همکارانش (*Li, et al., 2013*) در تحقیقی با مدل‌سازی عددی به بررسی تأثیر بار ضربه‌ای بر روی یک تونل در محیط خاکی اشباع پرداختند. در این تحقیق یک تونل در عمق ۱۵ متر و به شعاع ۲٫۹ متر در محیطی خاکی و متخلخل ایجاد و بارگذاری ضربه‌ای درون تونل مدل‌سازی شد. در مدل‌سازی لاینینگ، زاویه اصطکاک ۴۵ درجه میان قطعات مختلف استفاده گردید. مدول الاستیسیته المان‌های بتنی برابر ۴۰ مگاپاسکال انتخاب شده است. در بازه‌ای از بارگذاری ضربه‌ای تنش منفی می‌شود که این نشان دهنده

موارد مختلف باعث شده است که تحقیقات متنوعی بر روی جنبه‌های مختلف آن صورت گیرد. یکی از جنبه‌های سازه‌های زیرزمینی، پایداری آن‌ها در برابر بارگذاری ضربه‌ای است.

مساله اصلی موردبحث در این تحقیق، رفتار سازه‌های زیرزمینی در برابر بارگذاری ضربه‌ای و به دست آوردن لایه محافظتی مناسب برای این سازه‌ها است. مدل‌سازی عددی یکی از روش‌های مناسب برای بررسی این‌گونه مسائل است. نرم‌افزار المان محدود *ABAQUS* برای مدل‌سازی سازه‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (*Cimo, 2007*).

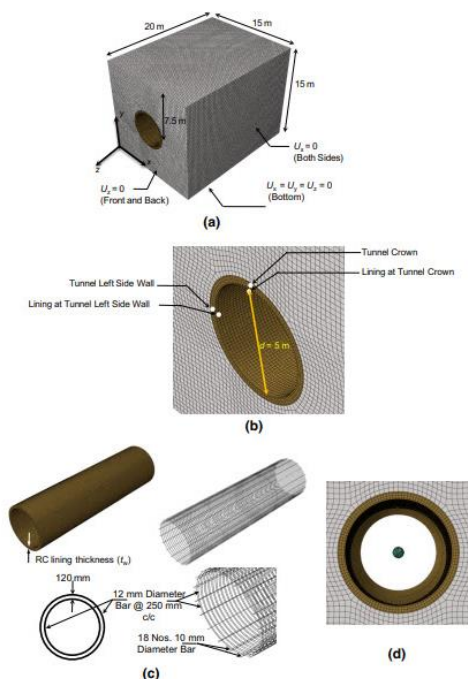
روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی عددی بارگذاری ضربه‌ای و تحلیل پاسخ خاک و سازه‌های زیرزمینی تحت بارگذاری ضربه‌ای وجود دارد. باتوجه به نوع مسئله و امکانات محاسباتی در دسترس، ممکن است هر کدام از این روش‌ها مورد استفاده قرار بگیرند.

در مورد مدل‌سازی عددی بارگذاری ضربه‌ای، سرعت وقوع تغییر شکل‌ها و تنش‌های وارد شده در محدوده اطراف منشأ بارگذاری، بسیار زیاد بوده و باعث می‌شود که مدل‌سازی عددی این پدیده با پیچیدگی‌هایی همراه باشد (*Suazo & Villavicencio, 2018*).

روش *LBE (Load Blast Enhanced)* با استفاده از حلگر لاگرانژی (*Lagrangian*)، مسائل مربوط به بارگذاری ضربه‌ای روی سطوح را حل می‌کند. در این روش که به عنوان روش *Conventional weapons* نیز شناخته می‌شود، مقدار فشارهای ناشی از بار ضربه‌ای در هوا، در هر فاصله‌ای از محل انفجار با استفاده از روابط تجربی موجود به صورت تابعی از زمان محاسبه و روی سطح برابر اعمال می‌شود. از این روش، به عنوان روش غیر کوپل (*Uncoupled*) نیز یاد می‌شود (*Jayasinghe, et al., 2014*).

در تحقیق حاضر، بارگذاری ضربه‌ای در محیط‌های زیرزمینی با استفاده از روش کوپل اویلری - لاگرانژی (*Coupled-Eulerian-Lagrangian*) در محیط نرم‌افزار *ABAQUS* مدل‌سازی شده است. المان‌های اویلری برای تعریف بار ضربه‌ای، هوا و خاک در نظر گرفته شده‌اند و در صورت وجود سازه زیرزمینی، از المان‌های لاگرانژی برای تعریف سازه استفاده شده است. باتوجه به روش تحلیل که از

شرایط مرزی و میلگردهای این سازه در شکل ۱، ارائه شده است.



شکل ۱- مشخصات سازه زیرزمینی مدل‌سازی شده در محیط خاکی (Tiwari, et al., 2017)

۲-۲- مشخصات خاک

برای مدل‌سازی خاک ماسه‌ای از مدل رفتاری دراکر - پراگر (*Drucker-prager*) استفاده شده است. این معیار مبتنی بر یافته‌های آزمایشگاهی و تجربی توسعه یافته که در آن مشخصات خاک بر اساس انجام آزمایش‌های عملی تعریف می‌شود. خصوصیات خاک مصرفی جهت انجام صحت‌سنجی در جدول ۱ و نمودار تنش- کرنش خاک در شکل ۲، ارائه شده است. معادلات حاکم بر این مدل به شرح ذیل است (Veyera & Ross, 1995):

$$F = \frac{q}{2} \left[1 + \frac{1}{k} - \left(1 - \frac{1}{k} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] - p' \tan \beta - d = 0 \quad (1)$$

$$q = \sqrt{3/2} \sqrt{s_{ij} : s_{ij}} \quad (2)$$

$$p' = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 \quad (3)$$

پدیده حفره‌زایی (*Cavitation*) در محیط خاکی است. پدیده حفره‌زایی در خاک اشباع باعث کاهش شدید مدول حجمی خاک می‌گردد که خود این پدیده منجر به تغییر مکان‌های بزرگ در مدل عددی خواهد شد.

فلدگان و همکارانش (*Feldgun, et al., 2014*) در سال ۲۰۱۴ به مدل‌سازی دو تونل مستطیلی شکل با بارگذاری ضربه‌ای درون تونل پرداختند تا تأثیر انفجار روی تونل مجاور را بررسی کنند. در این مدل‌سازی اندرکنش خاک و تونل طی بارگذاری دینامیکی و انتشار موج بار ضربه‌ای در محیط نیز در نظر گرفته شد. برای افزایش دقت نتایج شبیه‌سازی مدول‌های حجمی و برشی، تنش تسلیم و چگالی خاک بعنوان تابعی از فشار مدل‌سازی شد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که وجود تونل دوم اثری قابل ملاحظه روی تغییر مکان سطح خاک مدل دارد. از سوی دیگر محل بارگذاری ضربه‌ای درون تونل نیز بر روی نتایج و تغییر مکان در لاینینگ تونل نیز تأثیرگذار است.

در سال ۲۰۱۴ در مطالعاتی توسط بازیار و همکارانش (*Baziar, et al., 2014*) از ماده ژئوفوم و همچنین از خاک درشت دانه با درصد تراکمی پایین استفاده شد. در این آزمایش خاک اصلی با درصد تراکم نسبی ۸۷ درصد استفاده گردیده و از یک لایه خاک درشت دانه با درصد تراکمی ۴۰ درصد به عنوان یک مانع برای کاهش اثرات مخرب بار ضربه‌ای بهره‌برداری شد. هم‌چنین در حالت دیگری از این آزمایش، ژئوفوم (*Geofoam*) با چگالی ۹ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان مانع مورد استفاده قرار گرفت.

در سال ۲۰۰۶ نیز گویی و چن (*Gui & Chien, 2006*) با استفاده از نرم‌افزار *FLAC* یک مدل عددی دوبعدی برای بررسی و تحلیل اثر بار ضربه‌ای بر روی تونل موجود زیر فرودگاه تایپه توسعه داده و به تحلیل پارامتریک آن پرداختند.

۲- روش تحقیق و مدل‌سازی

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی برای صحت

سنجی

به‌منظور صحت‌سنجی سازه زیرزمینی در محیط خاکی مدل شده توسط تیواری و همکارانش (*Tiwari, et al., 2017*) از *ABAQUS* استفاده شد. ابعاد و کلیه مشخصات اعم از

۲-۳- مشخصات بتن و میلگرد

از مدل پلاستیسیته آسیب بتن بر اساس مدل‌سازی بتن در تحقیق تیواری و همکارانش (Tiwari, et al., 2017) استفاده می‌کنیم. استفاده از این مدل جهت تعریف ضعف بتن در کشش بوده و رفتار فشاری کاملاً الاستیک در نظر گرفته می‌شود. برای مدل‌سازی بتن از تحقیقات لی و همکارانش (Lee & Fenves, 1998) استفاده گردید. یکی از ویژگی‌های مهم مدل رفتاری ترک، تعیین محل شروع شکست بر اساس مدل گسیختگی است. رفتار برشی مدل وابسته به میزان بازشدگی ترک است. به‌طور دقیق‌تر مدول برشی ترک‌خورده با افزایش ترک‌ها کاهش می‌یابد. سختی برشی پس از شکست به عنوان تابعی از افت فشار در سراسر ترک خوردگی در ABAQUS تعریف شده است. برای حذف المان در کنار تعریف رفتار الاستیک و پلاستیک، بایستی رفتار تکامل آسیب مصالح نیز تعریف گردد که مشخصات پارامترهای این مدل مطابق جدول ۲، است. همچنین نمودارهای تنش و کرنش فشار و کشش در شکل ۳، ارائه شده است (Tiwari, et al., 2017). برای مدل‌سازی میل‌گردها از مدل خرابی جانسون و کوک (Johnson, 1983) استفاده شده است که مشخصات میل‌گرد مصرفی در جدول ۳، ذکر شده است.

جدول ۲- مشخصات بتن (Tiwari, et al., 2017)

پارامتر	واحد	مقدار
مدول یانگ	GPa	۲۷
ضریب پواسون	-	۰٫۲
چگالی	Kg/m ³	۲۴۰۰
مقاومت فشاری	MPa	۳۰

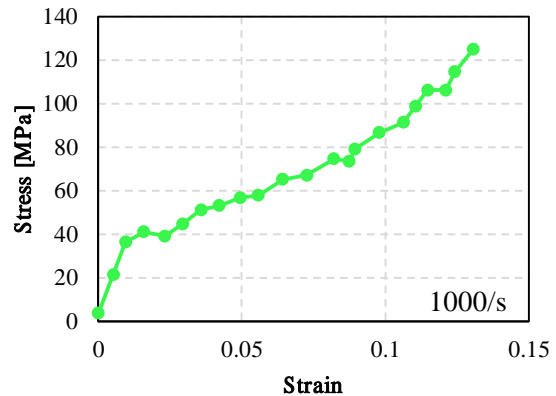
برای اعمال بار ضربه‌ای طبق مقاله تیواری و همکارانش (Tiwari, et al., 2017) از معادله Jones - Lee. استفاده شده است. در این مطالعه خرج ۵۰ کیلوگرم TNT برای بار ضربه‌ای در مرکز هندسی سازه استفاده شده است. شکل ۴، نمودار فشار-زمان بارگذاری ضربه‌ای در نرم‌افزار ABAQUS را نشان می‌دهد که مطابق با آیین‌نامه بین‌المللی TM 5-855 است (Larcher & Casadei, 2010)

$$\tan \beta = \frac{\sqrt{3} \sin \phi}{\sqrt{1 + (1/3) \sin^2 \phi}} \quad (۴)$$

$$\frac{d}{c} = \frac{\sqrt{3} \cos \phi}{\sqrt{1 + (1/3) \sin^2 \phi}} \quad (۵)$$

$$G_p = \frac{q}{2} \left[1 + \frac{1}{k} - \left(1 - \frac{1}{k} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] - p' \tan \psi_p \quad (۶)$$

$$\tan \psi_p = \frac{\sqrt{3} \sin \psi}{\sqrt{1 + (1/3) \sin^2 \psi}} \quad (۷)$$



شکل ۲- نمودار تنش-کرنش خاک (Veyera & Ross, 1995)

جدول ۱- مشخصات خاک (Tiwari, et al., 2017)

پارامتر	واحد	مقدار
مدول یانگ	GPa	۰٫۲۸
ضریب پواسون	-	۰٫۲
چگالی	Kg/m ³	۱۵۶۰
زاویه اصطکاک (ϕ)	درجه	۳۰
زاویه اتساع (ψ)	درجه	۵

برای مدل‌سازی TNT و پارامترهای آن از مدل JWL-EOS که مشخصات آن در جدول ۴، استفاده شده است (Larcher & Casadei, 2010) که معادله حاکم بر این مدل و پارامترهای موردنظر در ادامه ارائه شده است:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \rho}\right) e^{R_1 \bar{p}} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{p}}\right) e^{R_2 \bar{p}} + \omega \rho e_{int} \quad (8)$$

جدول ۴- مشخصات TNT (Tiwari, et al., 2017)

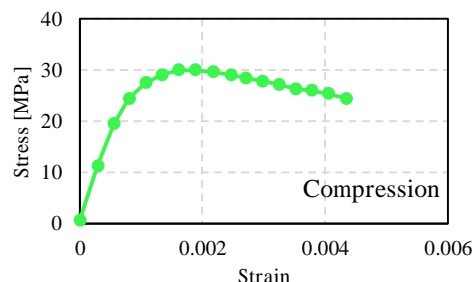
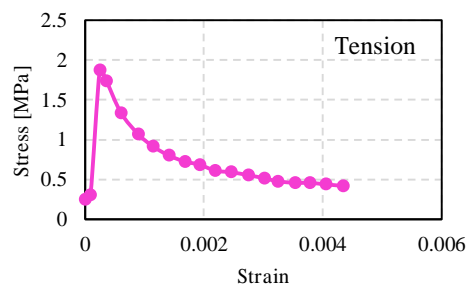
پارامتر	واحد	مقدار
سرعت موج	m/s	۶۹۳۰
چگالی	Kg/m ³	۱۶۳۰
R1	-	۴,۱۵
R2	-	۰,۹
A	MPa	۳۷۳۸۰۰
B	MPa	۳۷۴۷
ω	-	۰,۳۵
چگالی انرژی	KJ/Kg	۳۶۸۰

۲-۴- مشخصات خاک‌های مورد استفاده در

مدل‌سازی

به‌منظور بررسی اثر لایه‌بندی در گسترش موج بار ضربه‌ای، خاک‌هایی با مشخصات مکانیکی مختلف که ویژگی‌های انتشار موج بار ضربه‌ای مشابه انواع خاک‌های مورد اشاره در استاندارد TM 5-855 دارند، در نظر گرفته شده است. این راستا، مدل‌سازی خاک تیپ ۱ که بیشترین میزان استهلاک موج بار ضربه‌ای را دارد، به دلیل رفتار غیرخطی شدید، با استفاده از مدل‌های رفتاری موجود در نرم‌افزار ABAQUS امکان‌پذیر نیست.

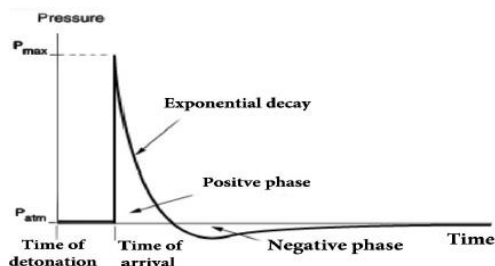
همچنین در مورد خاک‌های تیپ ۳ و ۴، از آنجا که ویژگی‌های استهلاکی این دو تیپ خاک در مقابل انتشار موج بار ضربه‌ای تا حد زیادی مشابه یکدیگر است، تنها پارامترهای مکانیکی مربوط به خاک تیپ ۳ ارائه شده است. جدول ۵، مشخصات مکانیکی انواع تیپ‌های خاک در نظر گرفته شده در تحلیل‌های حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار تنش و کرنش بتن در فشار و کشش (Tiwari, et al., 2017)

جدول ۳- مشخصات میلگرد (Tiwari, et al., 2017)

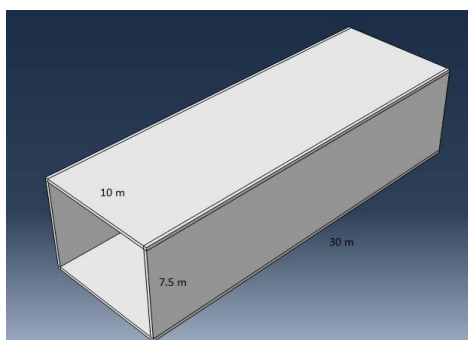
پارامتر	واحد	مقدار
مدول یانگ	GPa	۲۱۰
ضریب پواسون	-	۰,۳
چگالی	Kg/m ³	۷۸۰۰
تنش کششی (f _s)	MPa	۳۰۰
A	MPa	۳۶۰
B	MPa	۶۳۵
n	-	۰,۱۱۴
C	-	۰,۰۷۵



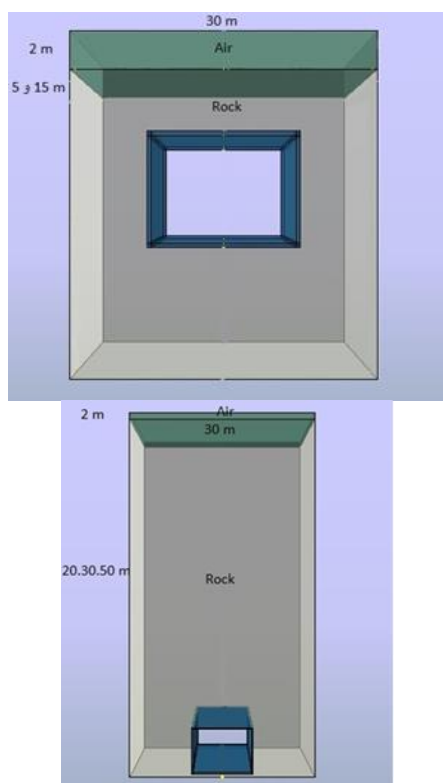
شکل ۴- نمودار فشار موج بار ضربه‌ای - زمان در نرم‌افزار (TM5-855-1, 1986) ABAQUS

جدول ۵- مشخصات خاک‌هایی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS | (TM5-855-1, 1986)

Soils types	unit weight (kg/m ³)	K (MPa)	ν	E (MPa)	K_0	ϕ (deg.)	c (kPa)
Type 5	۱۸۷۲	۴۳۴۷٫۸۶	۰٫۴۷	۷۸۲٫۶۲	۰٫۲۹	۴۵	۷۵
Type 3	۱۹۶۰	۵۹۰٫۷۵	۰٫۳۵	۵۳۱٫۶۷	۰٫۴۳	۳۵	۲۰
Type 2	۱۵۲۰	۵۰٫۹۰	۰٫۳	۶۱٫۰۸	۰٫۵	۳۰	۵



شکل ۵- مشخصات ابعاد سازه زیرزمینی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS (Mussa, et al., 2017)



شکل ۶- سازه زیرزمینی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS در عمق‌های ۵، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ متری

در تحقیق حاضر خاک‌ها به سه دسته، خاک ۲ (خاک ماسه خشک)، خاک ۳ (خاک ماسه با تراکم بالا) و خاک ۵ (خاک رس) دسته‌بندی می‌شوند و در ادامه نیز همین دسته خاک برای تحلیل نتایج به کار برده می‌شوند.

۲-۵- مشخصات سنگ مورد استفاده در مدل‌سازی

می‌توان سنگ‌ها را در برابر بار ضربه‌ای به ۳ دسته کلی مقاوم (H)، متوسط (M) و سست (L) دسته‌بندی کرد. برای مدل‌سازی سنگ در این مقاله تنها از سنگ مقاوم با مدل رفتاری دراکر-پراگر استفاده شده است. همچنین چگالی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسن، زاویه اصطکاک داخلی برای سنگ مقاوم یا کمی تا متوسط هوازده در جدول ۶، قابل مشاهده است (Tiwari, et al., 2016).

جدول ۶- مشخصات سنگ (Tiwari, et al., 2016)

پارامتر	واحد	مقدار
مدول یانگ	GPa	۲۸
ضریب پواسن	-	۰٫۲۵
چگالی	Kg/m ³	۲۵۵۰
زاویه اصطکاک (ϕ)	درجه	۴۲
زاویه اتساع (ψ)	درجه	۵
چسبندگی	MPa	۲٫۳

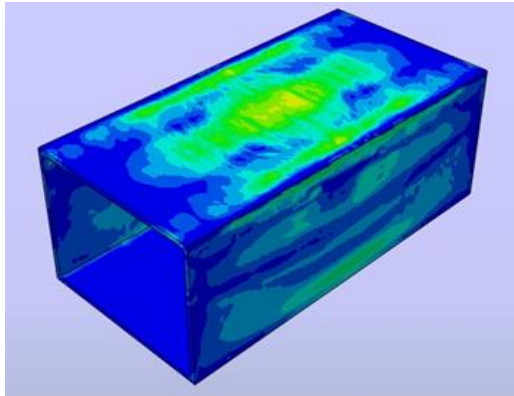
۲-۶- ابعاد و مشخصات مصالح مورد استفاده برای تحلیل پاسخ سازه زیرزمینی در محیط خاک

ابعاد سازه زیرزمینی بر اساس تحقیقات موسی و همکارانش (Mussa, et al., 2017) مانند شکل ۵، مدل‌سازی شده است. شکل ۶، شماتیک سازه زیرزمینی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار ABAQUS در عمق‌های مختلف را نشان می‌دهد.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- نتایج صحت‌سنجی

نمودار تغییر مکان دیواره چپ لاینینگ تونل در زمان ۱۶ میلی‌ثانیه در شکل ۷، آمده است.

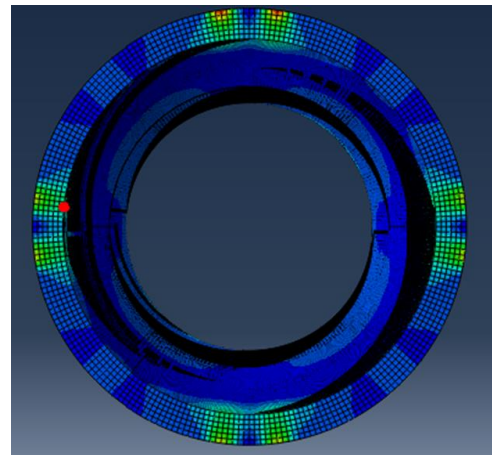
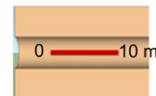


شکل ۹- کانتور فشار وارده بر سازه زیرزمینی حاصل از بار ضربه‌ای

مطابق با شکل ۱۰، برای سازه زیرزمینی در عمق ۱۵ متری از سطح، با خرج سطحی ۲۰۰۰ کیلوگرم، تغییرشکل و دوران سقف تونل مربعی با ضخامت ۰/۲۵ متر به ترتیب برابر ۰/۲۵ متر و ۲/۷ درجه است. با ثابت نگاه داشتن خرج و مقطع در عمق ۲۰ متری از سطح، تغییرشکل و دوران سقف برابر ۰/۱۴ متر و دوران آن برابر ۱/۸ درجه و در عمق ۳۰ متری از سطح، تغییرشکل سقف این مقطع برابر ۰/۱ متر و دوران آن برابر ۱/۲ درجه، همچنین در عمق ۵۰ متری، تغییرشکل و دوران به ترتیب برابر ۰/۰۲ متر و ۰/۲۴ درجه حاصل شد.

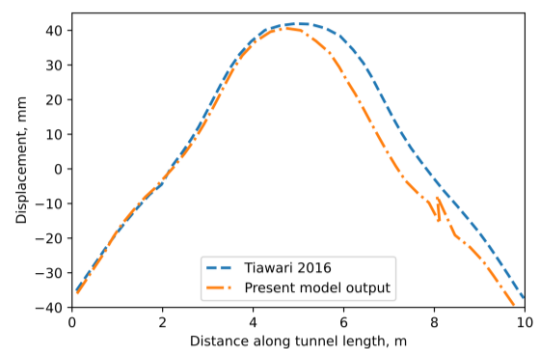
با مقایسه نتایج بالا می‌توان ادعا کرد که در عمق ۱۸ تا ۲۰ متر در محیط خاکی دوران سقف این نوع مقطع تونل مربعی با ضخامت ۰/۲۵ متر در حدود ۲ درجه خواهد بود. باتوجه به خروجی مدل‌سازی، میزان بیشینه فشار وارده به سازه زیرزمینی در این حالت حدود ۱۰ تا ۱۲ مگاپاسکال است. در نتیجه هنگامی که بیشینه فشار وارده بر سازه زیرزمینی حدود ۱۰ تا ۱۲ مگاپاسکال باشد میزان دوران سقف این مقطع تونل مربعی هم به ۲ درجه که بیشینه دوران مجاز دیواره تونل آیین‌نامه *UFC 2008* است نزدیک می‌شود.

باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده و طبق آیین‌نامه *UFC 2008* میزان فشار وارده بر سازه زیرزمینی حدوداً ۱/۷ برابر بیشینه فشار وارده بر لایه خاک یا سنگ قرار گرفته بر روی سازه می‌باشد که اصطلاحاً به آن ضریب انعکاس می‌گویند. بیشینه فشار وارده بر خاک با تقسیم ۱۲ مگاپاسکال بر ۱/۷،



شکل ۷- نحوه خروجی گرفتن تغییر مکان دیواره چپ تونل

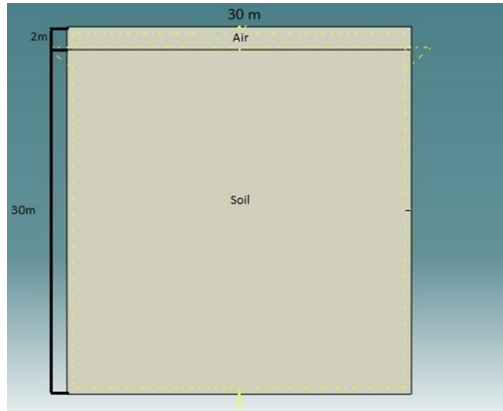
باتوجه به شکل ۷ در راستای نشان داده شده در قسمت دیواره چپ تونل یک بازه به طول ۱۰ متر در نظر گرفته شده و مقادیر تغییر مکان در این بازه استخراج شده‌اند که مقایسه نتایج در شکل ۸، قابل مشاهده است همچنین کانتور فشار وارده بر سازه زیرزمینی در شکل ۹، نمایش داده شده است.



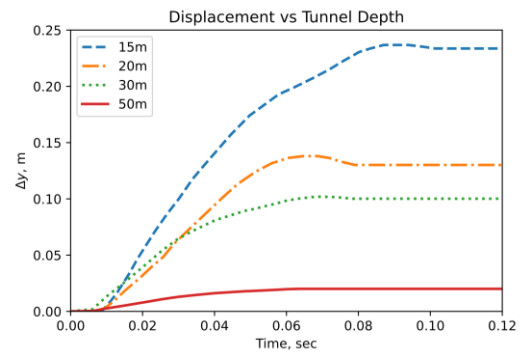
شکل ۸- مقایسه نمودارهای طول-تغییر مکان در لاینینگ دیواره چپ تونل در مقاله (Tiwari, et al., 2017) و مدل‌سازی توسط نرم‌افزار *ABAQUS*

به خاک ۳ و خاک ۲ بیشینه فشار بیشتری دارد. خاک‌های ۲ و ۳ در عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۵ بیشینه فشار وارد بر سازه را نسبت به خاک ۵ به ترتیب به میزان ۵۶، ۸۳، ۷۱، ۸۸، ۹۵، ۱۰۰، ۵۵ و ۱۰۰ درصد کاهش می‌دهند.

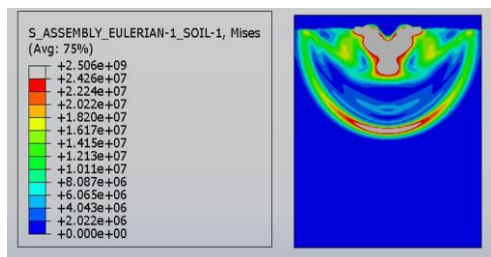
حدود ۷ مگاپاسکال تعیین می‌شود. در ادامه نتایج مدل‌سازی خاک تک‌لایه، دولایه و سه لایه و ترکیب محیط خاکی و سنگی برای بارگذاری ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی بررسی شده است.



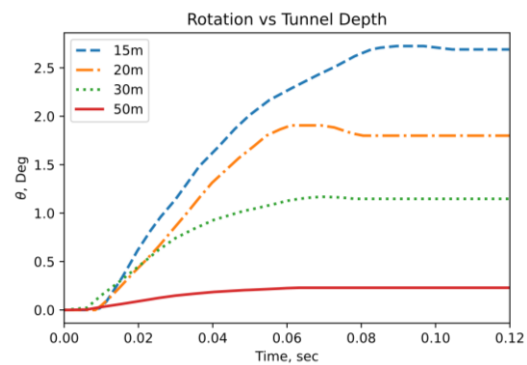
شکل ۱۱- مدل‌سازی خاک تک‌لایه با بار ضربه‌ای سطحی ۲۰۰۰ کیلوگرم در نرم افزار ABAQUS



الف

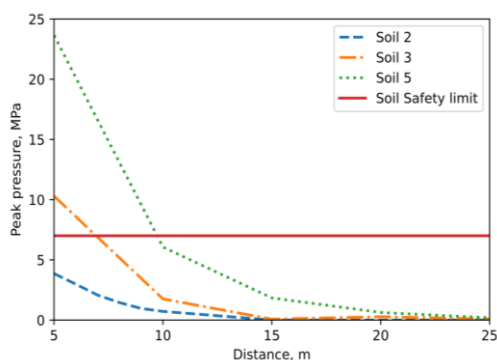


شکل ۱۲- کانتور فشار وارده بر خاک تک‌لایه برای بار ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی برای عمق ۳۰ متر



ب

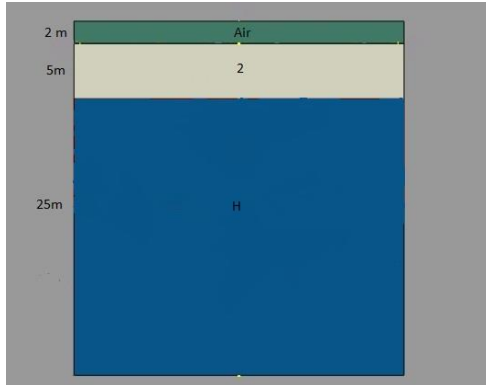
شکل ۱۰- الف) تغییر شکل دیوار بالایی سازه‌ی زیرزمینی مربعی، و ب) دوران دیوار بالایی سازه‌ی زیرزمینی مربعی با عمق ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ متر و ضخامت ۰/۲۵ متر در اثر بار ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرمی سطحی



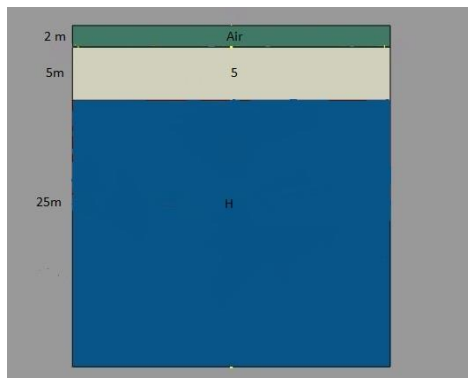
شکل ۱۳- مقایسه بیشینه فشار برای ۳ حالت خاک ۳۰ متری تک‌لایه

۲-۳ نتایج مدل‌سازی
۳-۲-۱- خاک تک‌لایه با عمق ۳۰ متری برای بارگذاری ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی در شکل ۱۱ و شکل ۱۲، به ترتیب مدل خاک تک‌لایه و کانتور فشار وارده بر آن برای بار ضربه‌ای ۲۰۰۰ کیلوگرم سطحی برای عمق ۳۰ متر مشاهده می‌شود. همان‌طور که از شکل ۱۳، مشهود است خاک ۵ نسبت

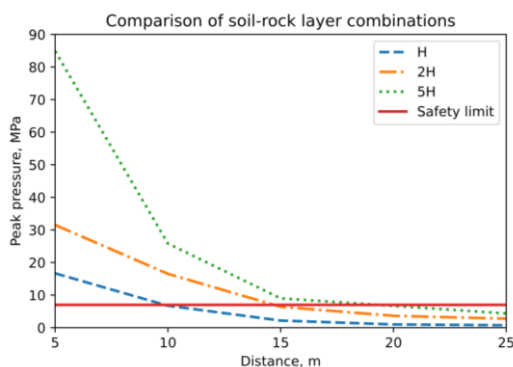
ترتیب ۸۲٪ و ۳۶٪ بیشینه فشار وارده را نسبت به سنگ تک‌لایه H کاهش می‌دهد.



شکل ۱۹- چیدمان ترکیب خاک و سنگ دولایه $H-2$ با ضخامت ۵ و ۲۵ متر

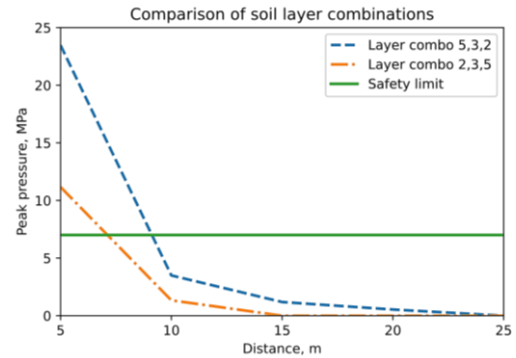


شکل ۲۰- چیدمان ترکیب خاک و سنگ دولایه $H-5$ با ضخامت ۵ و ۲۵ متر



شکل ۲۱- مقایسه بیشینه فشار برای چیدمان $H-5$ و $H-2$ با عمق ۳۰ متر

بر اساس نمودار شکل ۱۸، عمق ایمن برای چیدمان خاک سه‌لایه ۲-۳-۵ حدود ۹ متر و برای چیدمان ۲-۳-۵-۵ حدود ۶٫۵ متر است. چیدمان خاک ۲-۳-۵، در عمق ۵ متری ۵۲٪، در عمق ۱۰ متری ۶۱٪، در عمق ۲۰ متری ۹۹٪ و در عمق ۳۰ متری چیدمان خاک بیشینه فشار وارده را نسبت به چیدمان خاک ۲-۳-۵، ۱۰۰٪ کاهش می‌دهد.



شکل ۱۸- مقایسه بیشینه فشار برای چیدمان ۲-۳-۵ و ۲-۳-۵ برای عمق ۳۰ متر

۳-۲-۴- ترکیب خاک و سنگ کمی تا متوسط هوازده برای عمق ۳۰ متر

باتوجه به شکل ۱۹، چیدمان $H-2$ با ضخامت‌های ۵ و ۲۵ متر در نرم افزار *ABAQUS* برای *TNT* به وزن ۲۰۰۰ کیلوگرم مدل‌سازی شده‌اند. در ادامه بیشینه فشار و درصد کاهش آن برای ۲ حالت در نظر گرفته‌شده بالا برای لایه‌ها در عمق‌های ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۵ متر در ترکیب خاک و سنگ مقایسه شده است.

مطابق با نمودار شکل ۲۱، عمق ایمن برای ترکیب چیدمان خاک و سنگ دولایه $H-2$ حدود ۹ متر و برای ترکیب با چیدمان $H-5$ حدود ۱۴ متر و برای سنگ مقاوم یا کمی تا متوسط هوازده (H) حدود ۱۸ متر می‌باشد.

در عمق ۵ متری ترکیب چیدمان خاک و سنگ ۲- H و $H-5$ به ترتیب ۸۰٪ و ۶۲٪، در عمق ۱۰ متری ترکیب چیدمان خاک و سنگ $H-2$ و $H-5$ به ترتیب ۷۳٪ و ۳۵٪، در عمق ۱۵ متری چیدمان خاک و سنگ $H-2$ و $H-5$ به ترتیب ۷۵٪ و ۲۸٪، در عمق ۲۵ متری ترکیب چیدمان خاک و سنگ $H-2$ و $H-5$ به

دربرگیرنده این‌گونه سازه‌ها، اثر ضربه انتقالی بر سازه را کاهش داد. چیدمان خاک لایه‌ای تک‌لایه، دولایه و سه لایه و همچنین لایه‌های ترکیبی از خاک و سنگ با استفاده از روش المان محدود مدل‌سازی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که ترتیب چیدمان لایه‌های خاک اثر قابل ملاحظه‌ای در کاهش بیشینه فشار حاصل از بارگذاری ضربه‌ای دارد، به شکلی که بیشترین میزان تضعیف موج از لایه سنگی با بیشینه هوازدگی، و یا خاک ماسه‌ای (مشابه خاک تیپ ۲ در آئین‌نامه TM5-855) حاصل شد. همچنین هرچه لایه ماسه‌ای به سازه نزدیک‌تر باشد میزان تضعیف موج تنش ضربه افزایش می‌یابد.

در آخر می‌توان نتیجه گرفت لایه‌های خاکی ماسه و رس نقش بسیار زیادی در دمپ امواج بار ضربه‌ای برای لایه سنگی تک‌لایه مقاوم دارند و می‌توان از این دولایه به‌عنوان دمپ کننده امواج بار ضربه‌ای برای پروژه‌های باهدف دمپینگ بار ضربه‌ای در محیط‌های سنگی استفاده کرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با بررسی مطالعات پیشین بر روی نحوه طراحی سازه امن زیرزمینی، با بهره جویی از مدل‌سازی عددی، رفتار سازه‌های زیرزمینی در برابر بار ضربه‌ای موردبررسی قرارگرفت تا بتوان با استفاده از خواص محیط

۵- مراجع

- Ahmad, S., & Al-Hussaini, T. (1991). Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches. *Journal of geotechnical engineering*, 117(1), 67-88.
- Baziar, M., Salehzadeh, H., Kazemi, M., & Rabeti Moghadam, M. (2014). Centrifuge Modeling of an Underground Structure Subjected to Blast Loading. *Underground Structure*.
- Buonsanti, M., Leonardi, G., & Scopelliti, F. (2011). 3-D Simulation of shock waves generated by dense explosive in shell structures. *Procedia Engineering*.
- Choi, S., Wang, J., Munfakh, G., & Dwyre, E. (2006). 3D nonlinear blast model analysis for underground structures. In *GeoCongress. Geotechnical Engineering in the Information Technology*, (pp. 1-6).
- Cimo, R. (2007). Analytical modeling to predict bridge performance under blast loading. *University of Delaware*.
- Davies, M. (1994). Dynamic soil structure interaction resulting from blast loading In *Centrifuge. Balkema Rotterdam*, Vol. 94, pp. 319-324.
- De, A. (2012). Numerical simulation of surface explosions over dry, cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*, 43, 72-79.
- De, A.; Morgante, A.N.; (2013). Mitigation of blast effects on underground structure using compressible porous foam barriers. In *Poromechanics V: Proceedings of the Fifth Biot Conference on Poromechanics*, pp. 971-980.
- Duffy, M. (1983). *Tunnels: Planning, design, construction. vols. 1 & 2: by TM Megaw and JV Bartlett, Ellis Horwood, Chichester, Vol. 1: ISBN 0-85312-223-7, 284 pages.*
- Feldgun, V., Karinski, Y., & Yankelevsky, D. (2014). The effect of an explosion in a tunnel on a neighboring buried structure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44, pp.42-55.
- Gui, M., & Chien, M. (2006). Blast-resistant analysis for a tunnel passing beneath Taipei Shongsan airport—a parametric study. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24(2), 227-248.

- Jayasinghe, L., Thambiratnam, D., Perera, N., & Jayasooriya, R. (2014). *Effect of soil properties on the response of pile to underground explosion. Structural Engineering International, 24(3), 361-370.*
- Johnson, G. (1983). *A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures. Proc. 7th Int. Sympo. Ballistics, 541-547.*
- Khan, S., Chakraborty, T., & Matsagar, V. (2016). *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, 30(6), 0.*
- Larcher, M., & Casadei, F. (2010). *Explosions in complex geometries a comparison of several approaches. International journal of protective structures, 1(2), 169-195.*
- Lee, J., & Fenves, G. (1998). *Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. Journal of engineering mechanics.*
- Li, J., Li, H., Ma, G., & Zhou, Y. (2013). *Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion. Tunnelling and Underground Space Technology, 35, pp.227-234.*
- Mussa, M., Mutalib, A., Hamid, R., Naidu, S., Radzi, N., & Abedini, M. (2017). *Assessment of damage to an underground box tunnel by a surface explosion. Tunnelling and Underground Space Technology.*
- Suazo, G., & Villavicencio, G. (2018). *Numerical simulation of the blast response of cemented paste backfilled stopes. Computers and Geotechnics.*
- Tiwari, R.; Chakraborty, T.; Matsagar, V. (2016). *Dynamic analysis of tunnel in weathered rock subjected to internal blast loading. Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(11), 4441-4458.*
- Tiwari, R.; Chakraborty, T.; Matsagar, V. (2017). *Dynamic analysis of tunnel in soil subjected to internal blast loading. Geotechnical and Geological Engineering, 35(4), 1491-1512.*
- TM5-855-1. (1986). *Fundamentals of protective design for conventional weapons. US. Department of the Army.*
- UFC 3-340-02. (2008). *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Unified Facilities Criteria .*
- Veyera, G., & Ross, C. (1995). *High strain rate testing of unsaturated sands using a split-Hopkinson pressure bar.*

Numerical analysis of the effect of soil layers on preventing the mechanical energy transfer of surface shock waves on the ground by finite element method

M. Y. Radan¹; A. Moghadam²; S. A. Hosseini³

1- Assistant Professor; Malek Ashtar University of Technology, radan@mut.ac.ir

2- MSc of Civil Engineering; Malek Ashtar University of Technology, arian.moghadam94@gmail.com

3- Assistant Professor; Malek Ashtar University of Technology, hoseini@mut.ac.ir

Received: 8 Jan 2022; Accepted: 7 Apr 2022

DOI: 10.22044/TUSE.2022.11548.1443

Keywords

*Impact loading
Numerical modeling
Soil protective layers
Underground spaces
Abaqus*

Extended Abstract

Summary

Underground structures have been the main structures to provide shelter to vital infrastructure and protect other resources. Underground structures include urban tunnels, strategic centers, underground facilities and military complexes. Structural instability is the single major threat to these structures that is caused by impulsive loads applied via different load paths as a seismic or impact load. This loading in turn has drawn a great amount of focus during the last couple of decades that should be considered in the design and construction of blast resistant underground structures.

Introduction

Nowadays, the importance of using underground structures to protect vital and sensitive national infrastructure such as urban train tunnels, strategic item storage centers, urban underground facilities, shelters, as well as military uses is not hidden from anyone. One of the most important loads in terms of intensity and time on these underground structures is seismic loading.

Methodology and Approaches

Finite element modeling and analysis were performed using the commercial software package ABAQUS. The package was selected due to its diverse library of material behavior models and ease of explicit/implicit solution procedures. In this paper, seismic or impact load on underground structures is numerically modeled using the coupled-Eulerian-Lagrangian (CEL) method in the ABAQUS software. In this regard, modeling of single-layer, two-layer and three-layer soil arrangements, as well as a combination of soil and rock layers, has been carried out using the ABAQUS finite element software.

Results and Conclusions

The maximum pressure due to seismic or impact load has been compared in different models. Comparison of the results of the models in this study shows that the arrangement of the soil layers is effective in reducing the maximum pressure due to the impact load so that the maximum amount of shock wave damping is achieved when the rock layer with the highest degree of weathering, or sandy soil (similar to type 2 soil in Regulation TM5-855) is in the closest position to the desired underground space.
