

بررسی اثر بارگذاری انفجار بر روی پناهگاه‌های شهری

اصغر اشرف‌پور

دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

سعید جواهرزاده^۱

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران

اصغر رسولی

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴

چکیده

طراحی پناهگاه پدیده جدی است که امروزه بیش از هر زمانی اهمیت آن درک می‌شود. پاسخ دینامیکی سازه پناهگاه که از نزدیک، بدون تماس با بارگذاری انفجاری، در معرض انفجار قرار می‌گیرد، بسیار پیچیده است. این پیچیدگی به دلیل اندرکنش نسبی بین خاک اطراف و سازه؛ و تضعیف موج انفجار در محیط خاک است. در مطالعه حاضر، تجزیه و تحلیل المان محدود با استفاده از بسته نرم افزاری اجزای محدود ABAQUS به طور صریح انجام شده است. سازه با استفاده از عناصر پوسته‌ای، که در آن، اثر اندرکنش خاک-سازه با استفاده از مدل فنر - ضربه گیر - جرم ولف (Wolf) مدل شده است. انفجار با استفاده از مدل خطی تاریخچه فشار-زمان بر اساس تری نیتروتولویین (TNT) معادل و فاصله تا محل انفجار مدل‌سازی شده است. برای نرخ حساسیت کرنش مواد، مدل مواد جانسون کوک (JC) استفاده شده است. بررسی اثر فاصله پیمایش، نوع خاک و عمق دفن مورد مطالعه قرار داده شده است. نتایج نشان دهنده آن است که اندرکنش خاک-سازه و نوع خاک نقش مهمی را در رفتار دینامیکی سازه ایفا می‌کند. متوسط خاک اطراف به کاهش پاسخ سازه که در معرض انفجار نزدیک، بدون تماس است، کمک می‌کند.

کلیدواژه‌گان: انفجار، سازه پناهگاه، اندرکنش خاک-سازه، پاسخ دینامیکی.

مقدمه

انفجار یکی از عمومی‌ترین روشهای کاوشهای عمیق زیرزمینی در حوزه معدن، انفجارهای هسته‌ای و برخی کارهای عمرانی در توده‌های سنگی می‌باش (Gou *etal.*, 2019). این انفجارهای زیرزمینی به طور اجتناب‌ناپذیری آشفته‌گی‌های لرزه‌ای در توده‌های سنگی اطراف به وجود می‌آورد و همیشه تاثیر منفی بر ایمنی و ثبات سازه‌های زیر زمینی مانند، تونلها، سقف و ستونهای معدن‌های زیر زمینی می‌گذارد (Wang *etal.*, 2018).

در سال ۲۰۲۰ کیانگ ژو و همکاران به ارزیابی قابلیت مقابله با انفجار تونل‌های شهری مدفون در عمق کم پرداختند (Zhou *etal.*, 2021). در سال ۲۰۲۰ یونگانگ ژو و همکاران در باره ارزیابی کاهندگی ارتعاشات انفجار حاصل از انهدام مین زیر زمینی تحقیق نمودند (Gou *etal.*, 2020). با توسعه سریع اقتصادی چین، سازه‌های تونل‌های زیرزمینی بیشتر و بیشتری در شهرهای چین ساخته شد (Valdenebro *etal.* 2019). بین و همکارانش چارچوبی بر پایه مدلسازی اطلاعات ساختمان (BIM)، برای تعمیر و نگه‌داری تونل‌های زیرزمینی ارائه دادند. علاوه بر ایفای نقش به عنوان خطوط زندگی شهری، تونل‌های زیرزمینی پتانسیل اجرا به عنوان یک سازه عمرانی دفاعی را نیز دارند. از این رو، مقاومت انفجاری تونل‌های زیر زمینی بایستی مورد مطالعه و بررسی قرار بگیرد. برخی از تحقیقات و پژوهش‌های صورت گرفته بر عملکرد و کارایی دفاعی تونل‌های زیر زمینی، بحث کرده‌اند در صورتی که تعداد بسیار زیادی از پژوهش‌ها درباره پاسخ به انفجار در سازه‌های مدفون بوده است (Yin *etal.*, 2020).

لی و همکارانش (Chee *etal.*, 2020)، یک روش عددی جهت تحلیل دینامیکی باکس‌های بتن مسلح مدفون پیشنهاد دادند. که شامل رفتار سازه در خمش، اثرات پوسته‌ای و برش مستقیم می‌بود. نتایج عددی در محدوده زمان و محدوده P-I با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و صحت‌سنجی شدند. آقای ژو و همکارانش (etal., 2020) پاسخ الاستیک تونل‌های زیرزمینی را تحت انفجار مطالعه کردند. آنها همچنین از میلگردهای کامپوزیت به جای میلگردهای فولادی جهت مسلح کردن تونل‌های زیرزمینی استفاده کردند (Zhou *etal.*, 2020) تمامی این پژوهش‌ها منابعی را برای مطالعه مقاومت انفجاری تونل‌های زیر زمینی مهیا کردند. همچنین، در سال ۲۰۰۲ علی‌رضا رشید دل و همکاران به تحلیل عددی انفجار روی سطح پوشش قطعه‌ای تونل‌ها پرداختند (etal., 2020) Rashidell بحران در سازه زلزله یک امر جدی است که موجب مرگ افراد زیادی شده بنابراین از منظر سازه بسیار حیاتی است (آزادی و همکاران، ۱۳۹۸).

استفاده از روشهای عددی جهت تحلیل انفجار، هزینه و زمان کمتری را نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی یا درجا در محل صرف می‌کند. چندین محقق نیز روشهای عددی جهت اندرکنش خاک و سازه و سازه‌های سخت تحت بارهای دینامیکی ارائه دادند (Li *etal.*, 2020)، (Tash *etal.*, 2020). در سال ۲۰۲۰ گوانگ یانگ و همکاران به شبیه‌سازی عددی پاسخ دینامیکی و خرابی غارهای زیر زمینی تحت منابع انفجاری چندگانه پرداختند (etal., 2021) (Wang

نفوذ، قدرت انفجار و دقت سلاح‌های نفوذی زمینی در دهه‌های اخیر پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند (تاریقلیزاده و همکاران، ۱۳۹۵) و چالش‌های جدیدی را برای پروژهای دفاعی زیرزمینی به ارمغان آورده‌اند. توده‌های سنگ می‌توانند به واسطه انفجار به طر کلی تکه تکه و پخش بشوند و بر ایمنی و اطمینان این پروژه‌ها تاثیر

بگذارد (Xie *et al.*, 2020) زو و همکارانش نیز تنش توزیع توده های سنگی محیطی را تحت بارهای انفجاری تحلیل و بررسی کردند. (Xu *et al.*, 2019) در سال ۲۰۲۰ هیروشی ایچونو و همکاران به ارزیابی عملکرد ورق EPS در تقلیل اثر انفجار روی سازه های زیر زمینی محافظ پرداختند (Ichino *et al.*, 2021) تاثیر مصالح فوم در سیستم های تخفیفی جهت محافظت از اعضای سازه ای تحت خسارت های انفجاری نیز مورد بررسی قرار گرفته است (Langdon *et al.*, 2010) در سال ۲۰۲۰ مینگ چن و همکاران روشی ارتقا یافته برای محاسبه بیشینه فشار انفجار در گمانه دیوار هنگام تجزیه چاشنی انفجار پرداختند (Chen *et al.*, 2020)

روش بروت-فورس یا بی رحمانه قابلیت محاسبات با تمام توان سری های زمانی را دارد و از آنها می توان در پردازش های پیچیده و غیر خطی استفاده کرد. عمده ترین مشکل محاسبات این است که نتایج به شکل قابل ملاحظه ای تحت تاثیر پارامترهای محاسباتی بوده و نیازمند تلاش محاسباتی بسیار زیادی جهت ارائه یک محاسبه صریح و روشن می باشد. از روش بیزی میتوان جهت کاهش تاثیر عدم قطعیت پارامترهای ورودی بر نتایج محاسبات عددی بهره برد (Hamdia *et al.*, 2019)، (Guangkun *et al.*, 2020) آبروزینی و همکارانش (Army *et al.*, 1986) از روش عددی جهت تحلیل تنش و توزیع تنش آزاد در خاک تحت اثر چاشنی های انفجاری زیرزمینی استفاده کردند. و دریافتند که نتایج بدست آمده همگرایی مناسبی با آیین نامه دفاعی 1-855-TM5 دارد (Ambrosini *et al.*, 2020) ژیا و همکارانش (Xia *et al.*, 2019) توزیع تنش موثر لوله های زیرزمینی را تحت فشار آب تحت بارهای انفجاری کاوش های زیرزمینی مترو بررسی کردند و دریافتند که تعمیر و نگهداری فشار مناسب آب نسبت به محافظت از لوله ها بهینه تر می باشد.

زو و همکارانش (Xu *et al.*, 2019) رابطه بین سرعت و فرکانس ارتعاش انفجار در زمان، فاصله افقی و عمق و توزیع تنش شرح داده شده در توده های سنگی محیطی به وسیله آزمایش های درجا و شبیه سازی های عددی را بررسی کردند. یک آیین نامه ایمنی جدید مربوط به ارتعاشات انفجار در توده های سنگی عمیق ارائه شد. نتایج نشان داد که توده سنگی عمیق خسارتهای بیشتری را نسبت به توده های سنگی مدفون شده سطحی تحت اثر نیروهای انفجاری تجربه می کند. به علاوه، تنش توده های سنگی محیطی، تمایل به انتقال از کمان پایینی در سمت انفجار به دیوار مستقیم سمت دیگر دارد و تنش برشی از تنش کششی پیشی می گیرد. بنابر تحلیل نتایج شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی، یک روش عمومی جهت تعیین بار سطحی یک دال سازه ای داده شد که جهت تحقیق و پژوهش در حوزه مودهای خرابی دال های سازه ای مناسب می باشد (WANG *et al.*, 2019).

ژانگ و همکارانش (Zhang *et al.*, 2020) دریافتند که پیک و قله فشار بیش از اندازه در دیوار زمانی اتفاق می افتد که مقدار سوخت مورد نیاز و مناسب تامین باشد. منگ و همکارانش (Meng *et al.*, 2020) مقاومت تونل های مدفون که با بتنهای ژئوپلیمر تقویت شده بودند را تحت انفجار گاز مطالعه کردند و پاسخ دال بتنی ژئوپلیمر را تحت انفجار گاز تحلیل کردند. اگرچه پژوهش های مربوط به مقاومت تونل های حفر شده نسبت به بارهای انفجار گاز محدود مانده و جهت ارائه یک راهنمای طراحی سازه ای مناسب نیست. بنابراین، بسیار اهمیت دارد که سازه ای طراحی شود که بتواند در مقابل تهدیدات انفجار گاز مقاومت بکند. بنا بر مشخصات سازه های پیش تنیده بتنی، مطالعه مقاومت این نوع از سازه ها در برابر انفجار گاز اهمیت بسیار دارد (Li *et al.*, 2020).

ژو و همکارانش (Zhu *etal.*, 2020) نشان دادند که اگر موانعی که در مسیر موج انفجار قرار دارند افزایش یابند از سرعت انفجار می‌کاهند. اگرچه مشخصات مکانیکی سازه‌های بتنی پیش‌تینده عالی هستند، اما نفوذ آنها عموماً پیچیده‌تر از سازه‌های بتنی معمولی هستند. اعضای بتنه‌ای پیش‌تینده مهار نشده می‌توانند بدون دخالت پروسه اضافه‌ای در کارخانه به‌طور پیش‌ساخته آماده شوند که این موضوع باعث ساده‌تر شدن فرآیند ساخت و سازه‌های بتنی می‌شود (Tran *etal.*, 2020). لی و همکارانش (Lee *etal.*, 2020) نیز پژوهشی را در مورد سازه‌های بتنی پیش‌تینده مدفون انجام دادند. فلدگان و همکارانش (Feldgun *etal.*, 2014)، یک رویکرد جامع برای شبیه‌سازی اثرات انفجار در داخل یک تونل زیرساخت مدفون بر روی سطح خاک و در نزدیکی تونل ارائه کرده است. این روش تمام مراحل فرآیند پیچیده را در نظر می‌گیرد: انفجار بار منفجرشونده داخلی، انتشار موج شوک از طریق هوا در تونل و تعامل آن با پوشش حفره، پس از آن به بررسی تعامل پویا خاک-سازه می‌پردازد، که شامل انتشار موج در محیط خاک اطراف و تعامل آنها با تونلهای نزدیک است. مدل خاک به دو صورت توده و رفتار پلاستیک الاستیک برشی، شامل اثر فشار خاک روی استحکام محصول برای منحرف‌شونده تانسور تنش به حساب می‌آید. روش تفاوت‌تغییرات برای حل این مشکل در خاک و در حوزه پوشش استفاده می‌شود. رویکرد توسعه داده شده اجازه می‌دهد تا اثر خاک و خواص پوشش در اندرکنش خاک-تونل و همچنین اثر انفجار در رفتار تونل در نزدیکی و در پاسخ سطح خاک مطالعه شود. در سال ۲۰۱۵ یک شبیه‌سازی عددی برای بررسی رفتار بدنه فشار کامپوزیت بیضوی قابل فرو رفتن در آب بهینه شده، انفجار در زیر آب (INDEX) غیر تماسی انجام شده است و اثر حباب پالس یافت شده است. وزن مواد منفجره‌های مختلف و فاصله انفجار برای تعیین وزن بحرانی و فاصله امن بررسی شد. فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از زبان طراحی پارامتریک ANSYS (APDL) انجام شده است. پس از آن بسته‌المان محدود ABAQUS برای مدل UNDEX و پدیده‌های FSI استفاده شد. تاریخ زمان جابجایی سطح مرطوب، سرعت و شاخص شکست Tsai-Hill برای لایه‌های کامپوزیت مختلف ارائه شده است. همه این نتایج می‌تواند یک مرجع ارزشمند برای طراحی وسایل نقلیه در زیر آب برای مقاومت UNDEX باشد (Fathallah *etal.*, 2015).

ولامیدیر اوسنیو و همکاران (Osinov *etal.*, 2019) در سال ۲۰۱۹ پیرامون اندرکنش خاک تونل تحت انفجار درون تونل تحقیق نمودند. مدلسازی عددی توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام گرفت. شکل مقطع تونل آن‌ها دایره‌ای و جنس آن بتنی بوده است. تونل در عمق ۱۵ متری درون خاک دانه‌ای اشباع مدلسازی شده است. احتمال ایجاد فشار حفره‌ای در نظر گرفته شده است. مسئله در محیط کرنش صفحه‌ای دوبعدی حل گشته است. تغییر مکان‌ها و تنش‌ها در لایه بتنی آستر تونل و خاک بررسی شده‌اند. نتایج این تحقیق تغییرات غیرخطی چشمگیری در رفتار خاک به جهت فشار حفره‌ای کاویتاسیون نشان دادند.

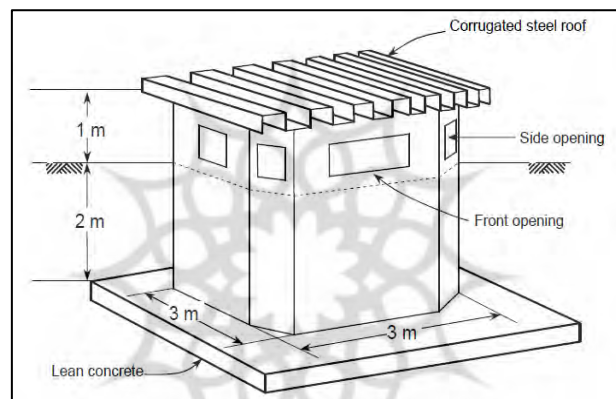
لی و همکاران (Li *etal.*, 2013) در سال ۲۰۱۳ به بررسی پایداری تونل مدفون تحت انفجار در تونل‌های مجاور پرداختند. روش آن‌ها برای بررسی روشی تئوری بود که بیشینه سرعت ذرات و تنش در تونل را بررسی می‌کرد. ابتدا بر اساس قانون انتشار امواج، معادلات حرکت برای سطح تونل مجاور نوشته شد. مطالعات پارامتریک با توجه به اثر طول جداشدگی و شدت بارگذاری در شکست ترد تونل مجاور نیز بررسی گردید. در نهایت فاصله مناسب بین دو تونل مجاور پیش‌بینی گردید.

مینگ سانگ و همکاران (Song et al., 2013) در سال ۲۰۱۳ به بررسی رفتار دینامیکی پوسته مرکب تحت انفجار محوری در تونل پرداختند. پوسته مرکب که در بردارنده یک استوانه و یک قسمت نیم کره ای است با استفاده از شبیه سازی و آزمایش بررسی شده است. مدل عددی در نرم افزار DYTRAN ساخته شده است و شبیه سازی و آزمایش تطابق بسیار خوبی باهم دارند. روش تحقیق در این پژوهش بر اساس مدل سازه که برای مطالعه انتخاب شده است از پانل های فولادی با ضخامت ۳۰ میلی متر ساخته شده است. سازه ها با عمق های متفاوت خاک زیر زمین دفن شده اند. دیوار سازه به سادگی بر روی سطح سخت با استفاده از بتن سبک نگه داشته شده است. دهانه های باز برای تهویه ارائه شده است.

۲- مبانی نظری

طراحی سازه پناهگاه

مسیر پیش روی از سمت عقب ارائه شده است. به ویژه طراحی شیارها و فرورفتگی، سقف فولادی که رو دیوار قرار گرفته ارائه شده است. جزئیات هندسه مدل انتخابی برای مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱. مشخصات هندسی مدل سازه پناهگاه

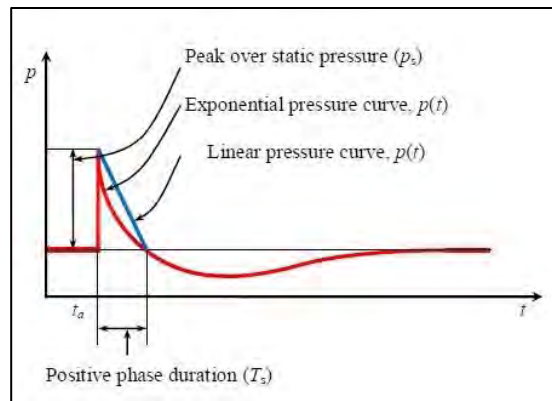
منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱

ویژگی موج انفجار

مواد منفجره پس از آغاز، با انتشار میزان بالایی از گرما و گازها در فشار بسیار بالا، خیلی سریع تجزیه می شود. این گازها بلافاصله منبسط شده و هوای اطراف را مجبور به انتشار به سمت خارج از حجم آن می کند و در نتیجه جبهه موج هوای فشرده انفجار که به خارج منتشر می شود شکل می گیرد. متقابلاً بلافاصله فشار موج انفجار از فشار هوای محیط افزایش یافته و به اوج بیشینه حد فشار استاتیک می رسد و سپس به صورت نمایی با زمان کاهش می یابد. این مرحله به عنوان فاز مثبت شناخته شده است. شکل (۲) مشخصات موج انفجار نمایی را نشان می دهد. فروپاشی فشار استاتیک مازاد بستگی به خواص انتشار متوسط، مانند؛ چگالی، سرعت صوت و فشار هوای محیط دارد. فشار گازهای گسترش یافته مازاد در طول خنک شدگی به زیر فشار اتمسفر می رسد. بنابراین، فاز مثبت جلوی موج انفجار است که همیشه با فاز منفی که شدت بسیار کمی و مدت زمان بزرگ دارد، دنبال می شود. فاز مثبت در مطالعات اثرات موج انفجار بر روی سازه، به دلیل آن که دامنه بلند است و فشار بیش از حد و ضربه متمرکز شده است، وابسته تر می باشد. بنابراین، فاز منفی موج انفجار، به طور کلی نادیده گرفته میشود. تاریخچه فشار- زمان یک موج انفجار هوای ایده آل، توسط معادله فریدلندر به صورت زیر است:

$$P(t) = P_{s0} \left(1 - \frac{t}{t_{0+}}\right) \exp\left(\frac{b(t-t_a)}{t_{0+}}\right) \quad (1)$$

که در آن، P_{s0} فشار اوج حادثه، T زمان سریع و t_{0+} مدت زمان فشار مثبت است پالس، T_a زمان ورود و b ضریب پوسیدگی بسته به اوج، P_s موج شوک است. Z فاصله پیمایش است.



شکل ۲. مشخصات نمایی موج انفجار

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱

مدلسازی هندسی خاک متوسط

پی متوسط یک منطقه یکنواخت عمیق و سطح تماس بین تکیه گاه سازه و خاک است که به عنوان صفحه صلب در نظر گرفته می شود و خاک به عنوان نیم فضای الاستیک در نظر گرفته می شود. رفتار سازه‌ی نیم فضای الاستیک با مجموعه ای از درجات آزادی به نمایندگی از جابجایی پایه سازه سفت و سخت و اجزای نیروی حاصل مربوط به مقاومت خاک، نشان داده می شود. رفتار استاتیکی خاک-سازه همچنین می تواند توسط مجموعه ای از فنرهای خطی که در درجه آزادی پایه سفت و سخت کار می کنند، مدل سازی شود. رفتار دینامیکی خاک در طول انفجار شامل لختی و اثرات نوسانات علاوه بر سختی استاتیکی فنر است. رفتار دینامیکی نیم فضای الاستیک را می توان در هر درجه آزادی با مدل های دستگاه فنر-میراگر و داشتن خواص وابسته به فرکانس، مدلسازی نمود. با این حال، برای تجزیه و تحلیل پیچیدگی خاک-سازه، و اندرکنش که شامل تعداد زیادی از درجات آزادی است، مدل را می توان مستقل از فرکانس فرض کرد با آن را راحت تر می توان مشکل پویا در حوزه زمان را که همچنین به رفع مشکلات غیر خطی کمک میکند، حل نمود. پی می تواند با دقت برای تمام حرکات با استفاده از یک مدل فنر-میراگر-جرم با ضرایب مستقل از فرکانس و چند درجه آزادی داخلی به کار رود (Wolf et al., 1987)

در دو مورد مدل در یک سایت، نیم فضا همگن و لایه همگن ثابت در پایه، ضرایب مشخص برای ساخت این مدل فنر-میراگر-جرم، برای پارامترهای مختلف مانند نسبت ابعاد و نسبت پواسون، موجود هستند. کل دامنه خاک به عنوان بدنه پیوسته برای تمام حرکات با استفاده از مدل فنر-میراگر-جرم ولف با ضرایب مستقل از فرکانس و سه درجه آزادی داخلی، در تمام گره های دیوارهای سازه نشان داده شده است. در اینجا، اندرکنش خاک-سازه برای شرایط خاک مدفون تجزیه و تحلیل شده و به صورت زیر است:

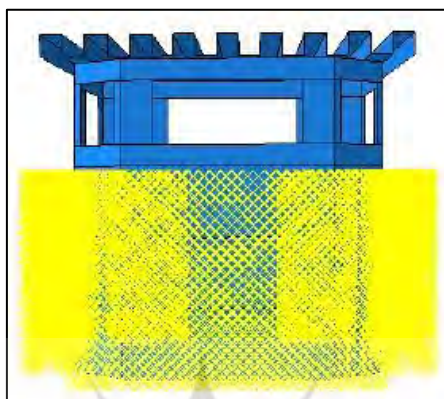
(الف) سازه بالای سطح زمین سطح

(ب) یک سوم ارتفاع به خاک سپرده شده،

(ج) نیمه ارتفاع به خاک سپرده،

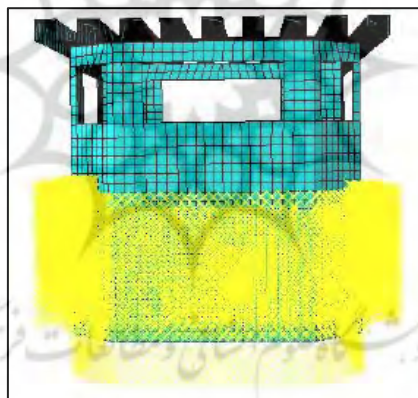
(د) دو سوم ارتفاع به خاک سپرده شد.

این چهار حالت به خاک سپرده شدن در شکل (۳) نشان داده شده است. سازه ای که خاک سپرده نشده است در معرض مشخصات هوای موج انفجار، که در معادله ۳ با عامل $1/7$ برای انفجار در سطح داده شده و برای سازه مدفون بخش مشخصات موج انفجار در معادله ۶ داده شده است.



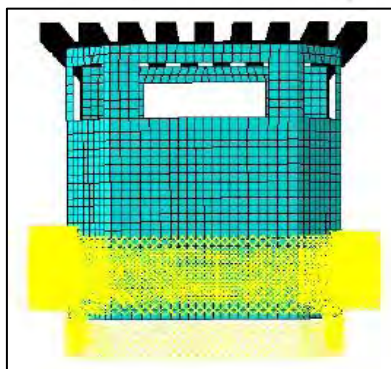
شکل ۳. عمق دو سوم به خاک سپرده شد

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱



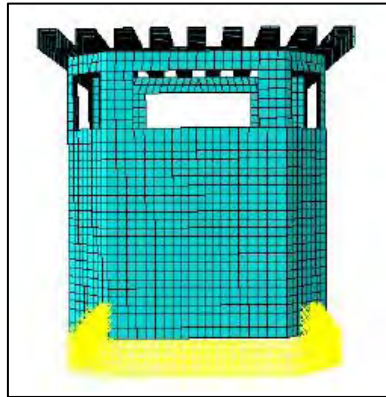
شکل ۳. نیمه به خاک سپرده عمق

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱



شکل ۳. یک سوم عمق مدفون

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱

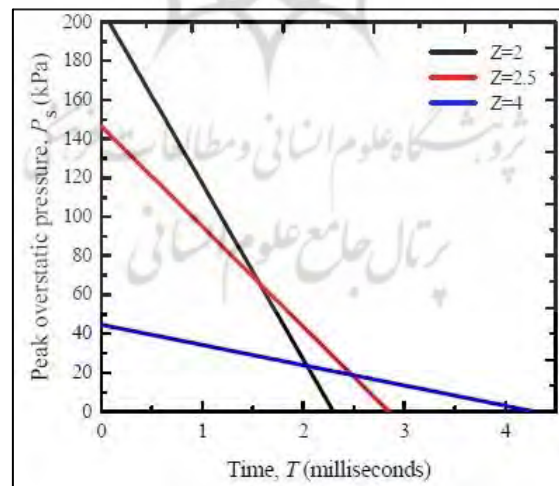


شکل ۳. سازه بالای سطح زمین

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱

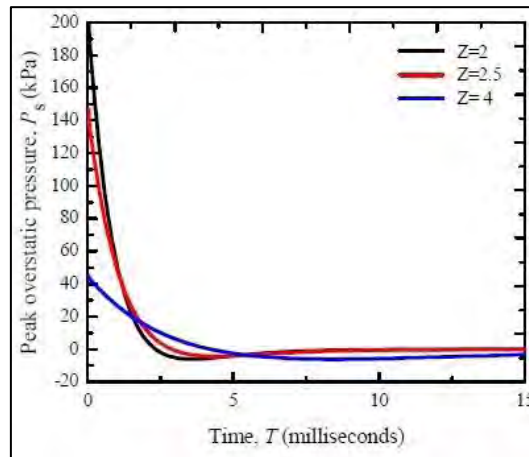
تجزیه و تحلیل دینامیکی

تجزیه و تحلیل دینامیکی برای پیدا کردن یک حداکثر تنش فون میزس (ب) خیز اوج نقطه مرکز در سطح باز جلویی در 2/1 متری از پایین سازه انجام شده است، که پس از این آن را نقطه مشاهده می‌نامیم. سازه است در سطح انفجار با فواصل و مقدار مواد منفجره مختلف قرار گرفته است. اثر ترکیبی هر دو پارامتر بر اساس فاصله پیمایش، مشخص شده است. مشخصات موج انفجار برای فاصله پیمایش مختلف داده شده است که در شکل (۴) نشان داده شده است. تجزیه و تحلیل المان محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS صریح انجام شده است. سه مدل مختلف شامل شبکه های عناصر پوسته ای با اندازه جهانی 0/05، 0/01 و 0/15 به ترتیب نماینده مش ریز، متوسط و درشت به منظور بررسی و مقایسه دقت و صحت مدل المان محدود هستند. همگرایی در نتایج در مش بندی جهانی با اندازه 0/05 (مش ریز) به دست آمد.



شکل ۴. مشخصات موج انفجار برای فواصل مدرج مختلف

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱

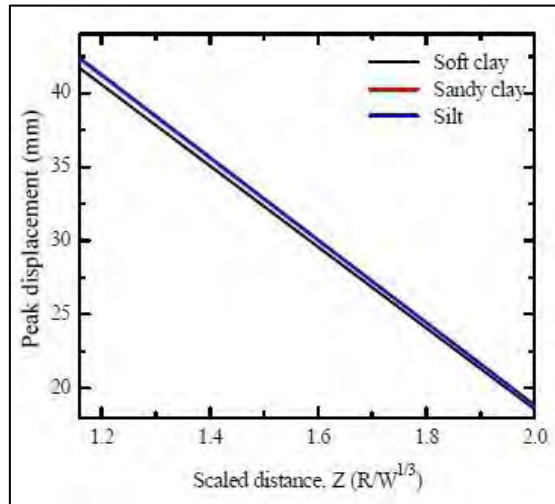


شکل ۴. مشخصات موج انفجار برای فواصل مدرج مختلف

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱

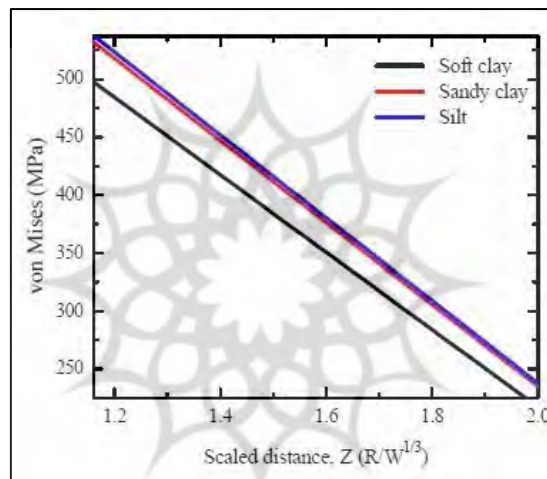
اثر متقابل خاک-سازه

سه نوع مختلف از مواد خاکی در مجاورت دیواره های سازه برای مطالعه به کار رفتند که عبارتند از: خاک رس نرم اشباع نشده، خاک رس شنی و گل و لای. ویژگی های فیزیکی خاک ها نشان داده شده است. سازه مدفون که 1/5 متر در زیر زمین در خاک های مزبور قرار داده شده است، در معرض بارگذاری انفجاری، ۱۰ کیلوگرم TNT در 2 متری و 2/5 متر، ۸ کیلوگرم در ۵ متری با فاصله پیمایش متناظر، Z از 1/16، 2/32 و 2/5 بوده است. تغییرات اوج جابجایی نقطه مشاهده و استرس فون میزس با فاصله پیمایش برای خاک های مختلف در شکل های (۶) و (۷) داده شده اند. مشاهده شده است که با افزایش اوج فاصله پیمایش، جابجایی و استرس فون میزس کاهش می دهد. خاک رس اشباع نشده نرم با کمترین مدول برشی، فاصله جابجایی و استرس فون میزس پایین تری نسبت به خاک رس شنی و گل و لای که مدول برشی بالاتری دارند به نمایش گذاشته است. در عمق خاک پایین تر از ۰.۵ متر، جابجایی و تنش بالاتری نسبت به سازه قرار داده شده بر روی سطح که بدون اندرکنش با خاک-سازه است، مشاهده گردید، پس از آن، با افزایش عمق دفن شده، کاهش در پارامترهای خروجی مشاهده می شود تغییر مکان 0/5 میلی متر برای خاک رس نرم در عمق دفن ۲ متر نسبت به جابجایی حداکثر 14/1 میلی متر در عمق دفن 0/5 متر، ناچیز است، با این حال آن 68/1 درصد و 73/8 درصد بالاتر از خاک رس شنی و گل و لای است. به طور مشابه، تنش با نسبت یک به سه با افزایش عمق دفن از 0/5 متر تا ۲ متر برای هر سه خاک همان طور که در جدول (۴) می بینید، کاهش می یابد. تغییرات جابجایی و استرس ناشی از خاک های مختلف داده شده، نیز تا حد زیادی تحت تاثیر افزایش اندرکنش خاک-سازه با افزایش عمق دفن قرار دارد. تغییر درصد جابه جایی برای خاک رس شنی و گل و لای در مقابل خاک رس اشباع نشده نرم، حداکثر در عمق دفن ۲ متری و برای تنش در عمق دفن 1/5 متری است.



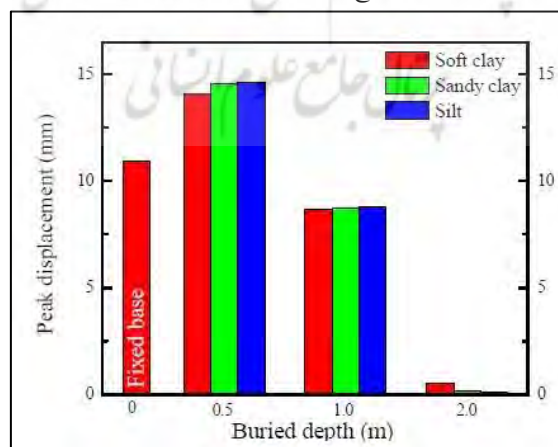
شکل ۵. قله جابجایی با فاصله پیمایش برای خاک های مختلف

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱



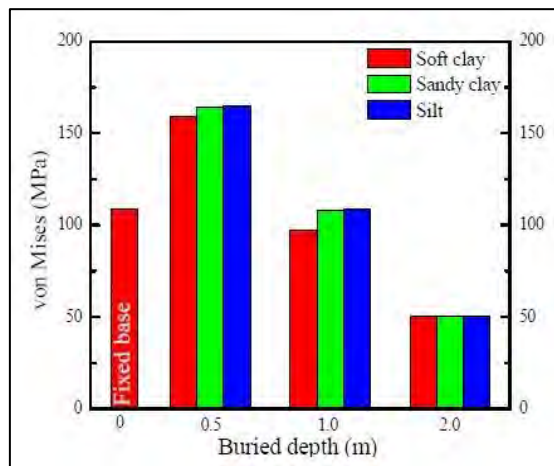
شکل ۶. استرس فون میزس با فاصله پیمایش برای خاک های مختلف

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱



شکل ۷. قله جابجایی با عمق دفن برای خاک های مختلف

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱



شکل ۸. استرس فون میزس با عمق دفن برای خاک های مختلف

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۱

نتیجه گیری و دستاورد علمی پژوهشی

تأثیر بارگذاری انفجار بر سازه پناهگاه فولادی بررسی شده است. مطالعه اثر فاصله پیمایش، اندرکنش خاک-سازه و نوع خاک انجام گرفته است. از مطالعه حاضر، نتایج زیر حاصل می شود.

(الف) اندرکنش خاک-سازه بین خاک اطراف و سازه نقش مهمی در تحلیل بار انفجار بازی می کند.

(ب) با افزایش عمق دفن در خاک، جابجایی و استرس فون میزس در سازه کاهش می یابد.

(ج) خاکهای با سرعت موج برشی پایین بالاتر، جابجایی اوج و استرس فون میزس بالاتری، در هر فاصله پیمایش داده شده به نمایش گذاشتند.

(ت) برای شرایط بالای سطح زمین، پاسخ سازه بستگی به شرایط مرزی در پی سازه دارد. در عمق مدفون کم تر، جابجایی و فون میزس بالاتری نسبت به سازه قرار داده شده در بالای سطح زمین با شرایط مرزی ثابت در پی، بدون اثر متقابل خاک-سازه، مشاهده می شود.

منابع

آزادی، نیلوفر، میر حسینی، سید محمد علی، ترکفر، احمد. (۱۳۹۸). طراحی مجتمع صنفی ورزشی با رویکرد پدافند غیرعامل جهت تأمین پناهگاه در زمان زلزله در استان کرمان. *فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه ای*، 10(1)، 1-22.

تاریقلیزاده، هادی، حسینی امینی، حسن، جباری، اسماعیل. (۱۳۹۵). مکان یابی پناهگاه های اضطراری در سطح شهر، با رویکرد پدافند غیرعامل (مطالعه موردی شهرستان کاشمر). *فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه ای*، 7(1)، 243-255.

Gou, Y., Shi, X., Huo, X., Zhou, J., Yu, Z., Qiu, X. 2019. "Motion Parameter Estimation and Measured Data Correction Derived from Blast-Induced Vibration: New Insights," *Measurement*, 135, 213-230.

Wang, M., Shi, X., Zhou, J. 2018, "Charge Design Scheme Optimization for Ring Blasting Based on the Developed Scaled Heelan Model," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 110, 199-209.

Zhou, Q., He, H., Liu, S., Wang, P., Zhou, Y., Zhou, J., Fan, H., Jin, F., 2021, "Evaluation of

Blast-Resistant Ability of Shallow-Buried Reinforced Concrete Urban Utility Tunnel," *Engineering Failure Analysis* 119, 105003.

Gou, Y., Shi, X., Zhou, J., Qiu, X., Chen, X., Huo, X. 2020, "Attenuation Assessment of Blast-Induced Vibrations Derived from an Underground Mine," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 127, 104220.

Valdenebro, J.-V., Gimena, F. N., López, J. J. , 2019, "Construction Process for the Implementation of Urban Utility Tunnels in Historic Centres," *Tunnelling and Underground Space Technology* 89, 38-49.

Yin, X., Liu, H., Chen, Y., Wang, Y., Al-Hussein, M. 2020, "A Bim-Based Framework for Operation and Maintenance of Utility Tunnels," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 97, 103252.

Chee, K. H., Krauthammer, T., Astarlioglu, S. 2020, "Shallow Buried Rc Structures Behavior under Airblast in the Time and Pi Domains," *Engineering Structures*, 203, 109885.

FAN, H., ZHOU, Y., CHEN, X., ZHOU, J., ZHOU, Q., JIN, F. 2020, "Field Test and Elastic Dynamic Response Analysis of Shallow-Buried Utility Tunnel under Explosion Load," *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 50, no. 2, 024608.

Zhou, Q., He, H.-g., Liu, S.-f., Chen, X.-s., Tang, Z.-x., Liu, Y., Qiu, Z.-y., Li, S.-s., Wang, H., Zhou, Y.-z. 2021, "Blast Resistance Evaluation of Urban Utility Tunnel Reinforced with Bfrp Bars," *Defence Technology*, 17, no. 2, 512-530.

Rashidell, A., Kharghani, M., Dias, D., Hajihassani, M. 2020, "Numerical Study of the Segmental Tunnel Lining Behavior under a Surface Explosion-Impact of the Longitudinal Joints Shape," *Computers and Geotechnics*, 128, 103822.

Li, Y.-C., Feng, S.-J., Chen, H.-X., Chen, Z.-L., Zhang, D.-M., Huang, H.-W. 2020, "Dynamic Response of a Stratified Transversely Isotropic Half-Space with a Poroelastic Interlayer Due to a Buried Moving Source," *Applied Mathematical Modelling*, 82, 45-71.

Tash, F. Y.; Neya, B. N. , 2020, "An Analytical Solution for Bending of Transversely Isotropic Thick Rectangular Plates with Variable Thickness," *Applied Mathematical Modelling* 77, 1582-1602.

Wang, G., Cao, A., Wang, X., Yu, R., Huang, X., Lin, J. 2021, "Numerical Simulation of the Dynamic Responses and Damage of Underground Cavern under Multiple Explosion Sources," *Engineering Failure Analysis*, 120, 105085.

Xie, H., Zhu, J., Zhou, T., Zhang, K., Zhou, C. 2020, "Conceptualization and Preliminary Study of Engineering Disturbed Rock Dynamics," *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 6, no. 2, 1-14.

Xu, J., Kang, Y., Wang, X., Feng, G., Wang, Z. , 2019, "Dynamic Characteristics and Safety Criterion of Deep Rock Mine Opening under Blast Loading," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 119, 156-167.

Ichino, H., Beppu, M., Williamson, E. B., Haraguchi, N. 2021, "Performance and Evaluation of an Eps Plate to Mitigate Blast on Underground Protective Structures," *International Journal of Impact Engineering*, 148, 103758.

Langdon, G., Karagiozova, D., Theobald, M., Nurick, G., Lu, G., Merrett, R. 2010, "Fracture of Aluminium Foam Core Sacrificial Cladding Subjected to Air-Blast Loading," *International Journal of Impact Engineering*, 37, no. 6, 638-651.

Chen, M., Ye, Z., Lu, W., Wei, D., Yan, P. 2020, "An Improved Method for Calculating the Peak Explosion Pressure on the Borehole Wall in Decoupling Charge Blasting," *International Journal of Impact Engineering*, 146, 103695.

H Hamdia, K., Msekh, M., Silani, M., Thai, T., Budarapu, P., Rabczuk, T. 2019, "Assessment of Computational Fracture Models Using Bayesian Method," *Engineering Fracture Mechanics*, 205, 387-398.

Guangkun, L., Wei, W., Ruichao, L., Weiming, Z., Qiang, Z. 2020, "Deriving Formulas of Loading Distribution on Underground Arch Structure Surface under Close-in Explosion," *Engineering Failure Analysis*, 115, 104608.

Army, U. S. D. o. t., 1986. *Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons*.

Headquarters, Department of the Army, Ambrosini, D.; Luccioni, B. 2020, "Effects of

- Underground Explosions on Soil and Structures," *Underground Space*, 5, no. 4, 324-338.
- Xia, Y., Jiang, N., Zhou, C., Luo, X. 2019, "Safety Assessment of Upper Water Pipeline under the Blasting Vibration Induced by Subway Tunnel Excavation," *Engineering Failure Analysis*, 104, 626-642.
- Xu, J., Kang, Y., Wang, X., Feng, G., Wang, Z. 2019, "Dynamic Characteristics and Safety Criterion of Deep Rock Mine Opening under Blast Loading," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 119, 156-167.
- WANG, W., LIU, G.-K., ZHAO, Q., LIU, R.-C., WU, B., ZHOU, S.-B. 2019, "Study on Load Distributing Function of Square Slab Surface under Close-in Blast Loading," *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 50, no. 2, 024615.
- Zhang, S., Ma, H., Huang, X., Peng, S. 2020, "Numerical Simulation on Methane-Hydrogen Explosion in Gas Compartment in Utility Tunnel," *Process Safety and Environmental Protection*, 140, 100-110.
- Meng, Q., Wu, C., Hao, H., Li, J., Wu, P., Yang, Y., Wang, Z. 2020, "Steel Fibre Reinforced Alkali-Activated Geopolymer Concrete Slabs Subjected to Natural Gas Explosion in Buried Utility Tunnel," *Construction and Building Materials*, 246, 118447.
- Li, L., Zhang, Z., Liu, P., Wang, K., Zhang, J., Li, X. 2020, "Experimental Study of Low-Concentration Gas Explosion in Large-Scale Pipeline," *Energy Science & Engineering*, 8, no. 6, 2129-2140.
- Zhu, Y., Wang, D., Shao, Z., Zhu, X., Xu, C., Zhang, Y. 2020, "Investigation on the Overpressure of Methane-Air Mixture Gas Explosions in Straight Large-Scale Tunnels," *Process Safety and Environmental Protection*, 135, 101-112.
- Tran, D. T., Phan-Vu, P., Pham, T. M., Dang, T. D., Nguyen-Minh, L. 2020, "Repeated and Post-Repeated Flexural Behavior of Unbonded Post-Tensioned Concrete T-Beams Strengthened with CFRP Sheets," *Journal of Composites for Construction*, 24, no. 2, 04019064.
- Lee, Y.-J., Kim, H.-G., Kim, M.-J., Kim, D.-H., Kim, K.-H. 2020, "Shear Performance for Prestressed Concrete Hollow Core Slabs," *Applied Sciences*, 10, no. 5, 1636.
- 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, 42-55.
- Fathallah, E., Qi, H., Tong, L., Helal, M. 2015, "Numerical Investigation of the Dynamic Response of Optimized Composite Elliptical Submersible Pressure Hull Subjected to Non-Contact Underwater Explosion," *Composite Structures*, 121, 121-133.
- O Osinov, V. A., Chrisopoulos, S., Triantafyllidis, T. 2019, "Numerical Analysis of the Tunnel-Soil Interaction Caused by an Explosion in the Tunnel," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 122, 318-326.
- Li, J., Li, H., Ma, G., Zhou, Y. 2013, "Assessment of Underground Tunnel Stability to Adjacent Tunnel Explosion," *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 227-234.
- Song, M.; Ge, S. 2013, "Dynamic Response of Composite Shell under Axial Explosion Impact Load in Tunnel," *Thin-Walled Structures*, 67, 49-62.
- Wolf, J. P., 1987 "Soil-Structure-Interaction Analysis in Time Domain," in *Structural Mechanics in Reactor Technology*.