

بررسی پاسخ‌های ایجادشده در تونل‌های دوقلوی دایره‌ای تحت بارگذاری انفجار

محمدرضا مؤمن زاده^{۱*}؛ محمدرضا منصوری^۲؛ آرمین عظیمی نژاد^۲

۱- دانشجوی دکتری؛ گروه مهندسی زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
 ۲- استادیار؛ گروه مهندسی زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۴/۰۷/۲۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۸/۰۴/۱۷
 شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2019.3478.1238

چکیده	واژگان کلیدی
با توجه به رشد روزافزون استفاده از تونل‌های متروی شهری و از سویی اهمیت استراتژیک ایران در منطقه خاورمیانه، لزوم بررسی و تحلیل این سازه‌ها تحت بار انفجار حائز اهمیت است. مطالعات انجام‌گرفته در این زمینه به سه دسته، مطالعات آزمایشگاهی، میدانی و شبیه‌سازی‌های عددی دسته‌بندی می‌شوند. با توجه به اینکه آزمایش‌های مربوط به پدیده انفجار مستلزم صرف هزینه‌های زیاد و تجهیزات خاصی است، امکان این مطالعات بسیار محدود و تنها در انحصار چند کشور است. با توجه به این محدودیت‌ها شبیه‌سازی‌های عددی مناسب‌ترین روش برای بررسی اثر انفجار بر سازه‌های زیرزمینی است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار المان محدود <i>ABAQUS6-II-1</i> ، خاک و تونل به صورت سه‌بعدی تحت بار انفجار داخل زمین قرار گرفته‌اند. بار انفجار با استفاده از روابط تجربی فشار ناشی از انفجار بر سازه زیرزمینی تخمین زده شده است. همچنین رفتار خاک و پوشش تونل غیرخطی در نظر گرفته شده است. در این پژوهش بحرانی‌ترین سناریوی توزیع خسارت در پوشش تونل، ناشی از انفجار <i>TNT</i> بررسی شده است. همچنین به بررسی اثر ارتفاع روباره خاک و مقدار ماده منفجره بر بیشینه تنش‌ها و تغییرشکل‌های ایجادشده در پوشش تونل‌های دوقلو تحت ۴ بار انفجاری ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ کیلوگرم <i>TNT</i> پرداخته شده است. در نهایت اثر بهسازی خاک‌های نرم بر بهبود پاسخ پوشش تونل‌ها تحت بار انفجار بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ضخامت ۱ متری خاک نرم پیرامون تونل، مقدار بیشینه تنش ۴۴٪ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش وزن ماده منفجره، بیشینه تنش ایجادشده در پوشش تونل افزایش یافته است؛ اگرچه نرخ افزایش برای خاک‌های مختلف، متفاوت است. بحرانی‌ترین سناریوی توزیع خسارت در مقطع تونل‌ها در ارتفاع روباره ۱۰ متر و تحت بار انفجاری ۶۰ کیلوگرم <i>TNT</i> و بیشترین عرض ترک ایجادشده ۹۱ میلی‌متر است.	بهسازی خاک آسیب پوشش تونل تحلیل دینامیکی اندرکنش خاک و تونل تهدیدات تروریستی ماده منفجره <i>TNT</i> پالس ضربه‌ای

۱- مقدمه

پدیده انفجار مستلزم صرف هزینه‌های زیاد و تجهیزات خاصی است، امکان این مطالعات بسیار محدود و تنها در انحصار چند کشور است. با توجه به این محدودیت‌ها، شبیه‌سازی‌های عددی مناسب‌ترین روش برای بررسی اثر انفجار بر تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی است (*Nagy, Boot* 2000)، (*UFC*, 2008).

یانگ و همکاران در سال ۱۹۹۷ پاسخ سازه زیرزمینی را تحت اثر بار انفجار سطحی بررسی کردند (*Yang, et al.*, 1997). چیلی و همکاران در سال ۱۹۹۸، پاسخ‌های

بعد از حوادث انفجاری سال ۲۰۰۴ در مترو لندن و در سال ۲۰۱۰ در مترو مسکو که منجر به کشته شدن ۴۰ نفر شد، تحلیل پایداری تونل‌ها تحت بار انفجار در داخل تونل‌ها مورد توجه قرار گرفت. لزوم بررسی و تحقیق در خصوص ارزیابی دینامیکی تونل‌های مترو تحت اثر بار انفجار ضروری به نظر می‌رسد. مطالعات انجام‌گرفته در این زمینه به سه دسته، مطالعات آزمایشگاهی، میدانی و شبیه‌سازی‌های عددی دسته‌بندی می‌شوند. با توجه به اینکه آزمایش‌های مربوط به

* تهران؛ میدان پونک؛ انتهای بزرگراه اشرافی اصفهانی به سمت حصارک؛ میدان دانشگاه آزاد اسلامی؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ گروه مهندسی زلزله؛ طبقه دوم؛ کدپستی: ۱۴۷۷۸۹۳۸۵۵؛ صندوق پستی: ۱۴۵۱۵/۷۷۵؛ شماره تلفن: ۰۲۱-۴۴۸۶۸۴۲۸-۰۲۱؛ نمابر: ۰۲۱-۴۴۸۶۵۱۰۵؛ آدرس پست الکترونیک: mr.momenzadeh@srbiau.ac.ir

دینامیکی یک کارخانه الکتریکی زیرزمینی را تحت بار انفجار داخلی با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی بررسی کردند (Chille, et al., 1998). چوی و همکاران در سال ۲۰۰۶ با انجام تحلیل غیرخطی، به بررسی پاسخ سازه‌های زیرزمینی تحت انفجار پرداختند (Choi, et al., 2006). در سال ۲۰۰۶، گی و همکارانش به مطالعه تأثیر انفجار در سطح زمین بر تونل فرودگاه *Taipei Shongsan* پرداختند. حل دوبعدی مسئله توسط گی و همکارانش در راستای ساده‌سازی حل آن است (Gui, et al., 2004). در سال ۲۰۰۹، لیو به بررسی اثر انفجار در داخل متروی نیویورک پرداخت. وی دلیل کمتر پرداختن محققین و کمبود منابع در این زمینه را در کمتر بودن اقدامات تروریستی در گذشته عنوان کرده بود. وی رفتار خاک و پوشش تونل را خطی فرض کرده بود. وی جهت برآورد میزان آسیب وارده بر تونل، تنش فون مایسز را به‌عنوان معیار کاهش یا افزایش خسارت مورد استفاده قرار داده است (Liv, et al., 2009).

تیهار و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی پاسخ‌های انفجاری روی تونل‌های دوقلو در نرم‌افزار آباکوس پرداختند. همچنین این نویسندگان به بررسی پاسخ‌های تونل‌های زیرزمینی تحت انفجار داخلی نیز پرداختند (Tiwari, et al., 2016).

انیربان دی بر روی شبیه‌سازی عددی انفجار سطحی بر روی خاک خشک غیر چسبنده (ماسه خشک) مطالعه نموده است (De, 2012). این محقق سعی کرده است که از طریق روش مناسبی یک سری تغییرشکل‌ها و کرنش‌های بزرگ را بر روی سازه‌های زیرزمینی مانند تونل شبیه‌سازی کند. لذا از پدیده انفجار برای این مطلوب استفاده کرده است تا تأثیر شوک و ضربه ناگهانی به همراه کرنش‌های بزرگ بر روی سازه‌های زیرزمینی را مورد بررسی قرار دهد. از این رو کرنش‌های ایجادشده تحت اثر انفجار در موقعیت‌های مختلف سازه زیرزمینی محاسبه شده است. این تحقیق به‌صورت آزمایشگاهی توسط دستگاه سانتریفیوژ و به‌صورت عددی در نرم‌افزار انسیس برای انفجار ۶۰۰ کیلوگرم ماده منفجره *TNT* صورت گرفته است. مدل‌سازی انفجار توسط آزمایش سانتریفیوژ کارآمد و مفید است. در این راستا افرادی همچون کوتر و همکاران و دیویز و همکاران از مدل

سانتریفیوژ برای مطالعه تأثیر انفجار بر روی تونل‌ها استفاده کرده‌اند (Kutter, et al., 1998). (Davies, et al., 1994) و (Davies et al., 1998). گودینگز بیش از ۱۰۰ آزمایش در سطوح شتاب بین ۱g تا ۱۰۰g برای فرمول کردن قطر چاله ایجادشده در اثر انفجار (کراتر) برای خاک ماسه‌ای خشک انجام داده است (Goodings, et al., 1998). فراگزی و همکاران مدل‌های دیوار خاک مسلح در برابر بارگذاری انفجار را توسط آزمایش‌های سانتریفیوژ مطالعه کرده است (Fragaszy, et al., 1994). بهره بردن از مدل‌های عادی نیز توسط وانگ و همکاران با استفاده از نرم‌افزار *LS-DYNA 3D* به‌منظور شبیه‌سازی تأثیر انفجار زیرزمینی بر روی یک سازه در سطح زمین صورت گرفته است (Wang, et al., 2001). همچنین چوی و همکاران از برنامه کامپیوتری *Autodyn* برای مدل کردن تأثیر انفجارها بر روی سازه‌های زیرزمینی استفاده نموده است (Choi, et al., 2006). لوچینی نیز از نرم‌افزار *Autodyn* برای مدل کردن اندازه کراتر ایجادشده در اثر انفجار در خاک ماسه‌ای خشک استفاده نموده است (Luccioni, et al., 2009). گروچسک نیز مدل‌های عادی را برای انفجارهای زیرزمینی در درون خاک توسعه داده است (Grujicic, et al., 2009). بخش عمده تحقیقات عددی صورت گرفته در این زمینه به‌صورت دوبعدی انجام شده است. به عقیده بسیاری از محققین در بحث انفجار، فرض کرنش مسطح در مدل‌سازی، به‌شدت محافظه‌کارانه است؛ زیرا در مدل‌سازی بار انفجار، بعد سوم سازه به علت قابلیت مدل‌سازی صحیح بارگذاری، اهمیت دارد و در نتیجه دقت نتایج کاهش می‌یابد. همچنین رفتار خاک و پوشش تونل در بسیاری از تحقیقات، الاستیک فرض شده است. در این پژوهش همچنین از روابط تجربی فشار ناشی از انفجار بر سازه زیرزمینی استفاده شده است.

اهمیت و پیچیدگی بحث بررسی انفجار در سازه‌های زیرزمینی به دلایل ذیل است (Lu, et al., 2005):

الف) این مسائل، دامنه گسترده‌ای از دینامیک خاک و اندرکنش خاک و سازه را در بر می‌گیرد.

ب) در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک و پوشش تونل، برای رسیدن به پاسخ‌های واقعی در عمل و همچنین بررسی آسیب (*Damage*) در پوشش تونل اجباری است.

۲- مبانی و مدل‌سازی بارگذاری انفجار در سازه‌های زیرزمینی

به‌طور کلی بار انفجار از نظر موقعیت خرج مطابق شکل ۱ به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شود. در این پژوهش انفجار داخل زمین مورد مطالعه قرار گرفته است. سازه‌های موجود در داخل خاک، به علت انتشار امواج ناشی از انفجار در داخل زمین می‌توانند آسیب ببینند. در این نوع انفجار، انرژی به‌صورت امواج فشاری و برشی، درون زمین منتشر می‌شود و شوک‌های شدیدی ایجاد می‌کند که می‌تواند اثرات تخریبی قابل ملاحظه‌ای روی سازه‌های زیرزمینی داشته باشد. میزان نفوذ سلاح در داخل زمین وابسته به وزن آن، سرعت برخورد، سختی سلاح و سختی زمین است. در نفوذهای کم‌عمق، آثار مشابه انفجار سطحی است، اما در نفوذهای عمیق، شوک انفجار بزرگی در زیرزمین به وجود می‌آید. انفجار درون زمین برحسب درجه اتصال می‌تواند شوک‌های قابل توجهی ایجاد کند. قوی‌ترین شوک زمین از انفجار در داخل زمین ناشی می‌شود و اثر آن هنگامی که هیچ‌گونه حفره هوا در اطراف ماده منفجره موجود نباشد و اتصال خوبی برقرار باشد، قابل ملاحظه خواهد بود (UFC, 1991).

۲-۱- پارامترهای اصلی شوک زمین در انفجار داخل زمین

پارامترهای اصلی شوک زمین شامل حداکثر فشار، حداکثر سرعت ذرات خاک، حداکثر جابجایی ذرات خاک و تکانه ویژه است. این پارامترها با افزایش فاصله از انفجار کاهش می‌یابند. نرخ میرا شدن با افزایش فاصله تابع نوع خاک بوده و با ضریب کاهندگی (n) مشخص می‌شود (UFC, 1990).

۲-۱-۱- حداکثر جابجایی ذرات خاک

حداکثر جابجایی ذرات خاک (x) ناشی از انفجار، در محلی با فاصله (R) از محل انفجار با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید.

پارامتر c_s (سرعت موج برشی در خاک برحسب $\frac{m}{s}$) با استفاده از رابطه (۲) تعیین می‌شود:

$$\frac{x}{w^{1/3}} = 60 \frac{f_c}{c_s} \left(\frac{2.52R}{w^{1/3}} \right)^{1-n} \quad (1)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

ج) در نظر گرفتن رفتار همبسته سیال (موج انفجار) - سازه (مدل المان محدود خاک و تونل) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

د) ضربه‌ای (پالسی) و فوق‌سریع بودن (چند میلی‌ثانیه) بودن بارگذاری انفجار از مهم‌ترین عوامل در پیچیدگی این مسائل است.

ه) هنگام تأثیر بارهای استاتیکی و دینامیکی، توده خاک می‌تواند تا اندازه‌ای تنش‌ها را در خود توزیع کند و از طریق تنش اصطکاکی بین دانه‌ها، از نقطه‌ای به نقطه دیگر انتقال دهد که به آن عملکرد قوسی خاک اطلاق می‌شود.

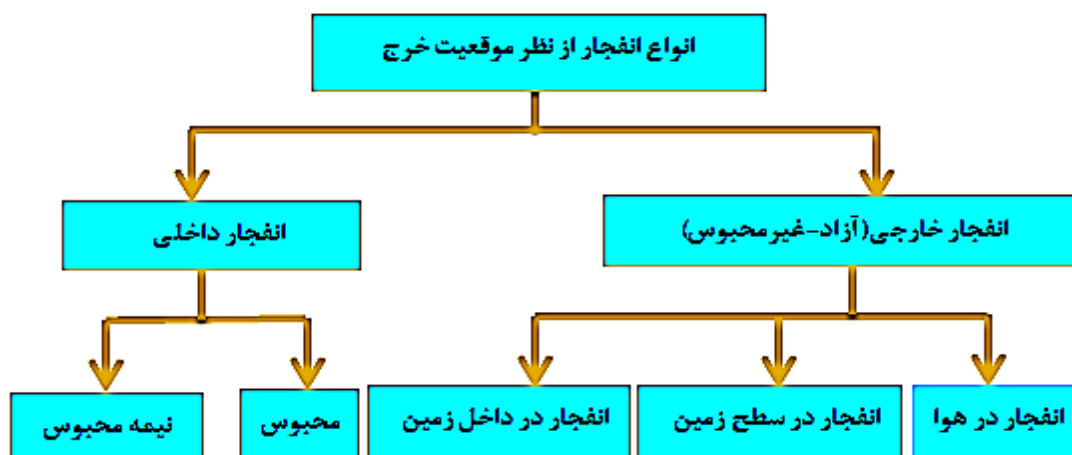
و) توانایی خاک در میرا نمودن انرژی موج انفجار برای انواع خاک‌ها قابل استخراج است و بایستی از طریق مطالعات مستقل و با تست‌های آزمایشگاهی تعیین شود.

در این پژوهش با بهره‌گیری از نرم‌افزار المان محدود *ABAQUS6-11-1*، خاک و تونل‌های دوقلو به‌صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده است. همچنین خاک با مدل رفتاری دراگرپراگر (*Drucker Prager*) و پوشش تونل با مدل رفتاری پلاستیک آسیب‌دیده بتن (*Concrete Damage Plasticity*) شبیه‌سازی شده است. یکی از اهداف این مقاله بررسی آسیب‌های ایجادشده در پوشش تونل تحت بار انفجار است که با استفاده از تعریف آسیب (*Damage*) در مدل رفتاری پلاستیک آسیب‌دیده بتن این امکان فراهم شده است (Mirzainali Yazdi, et al., 2010).

برای مدل‌سازی بار انفجار با استفاده از روابط تجربی، حداکثر فشار ناشی از انفجار تخمین زده شده است. برای انجام آنالیز حساسیت و مقایسه نتایج، تونل‌ها در پنج ارتفاع روباره ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متری سطح زمین تحت بارگذاری انفجاری قرار می‌گیرند. در این پژوهش بحرانی‌ترین سناریوی توزیع خسارت در پوشش تونل ناشی از انفجار *TNT* مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به بررسی اثر ارتفاع روباره خاک و مقدار ماده منفجره بر بیشینه تنش‌ها و تغییرشکل‌های ایجادشده در پوشش تونل‌های دوقلو تحت ۴ بار انفجاری ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ کیلوگرم *TNT* پرداخته شده است. در نهایت به بررسی اثر بهسازی خاک‌های نرم بر بهبود پاسخ پوشش تونل‌ها تحت بار انفجار پرداخته شده است.

بررسی پاسخ‌های ایجادشده در تونل‌های دوقلوی دایره‌ای تحت بارگذاری انفجار: ص ۸۹-۱۰۸

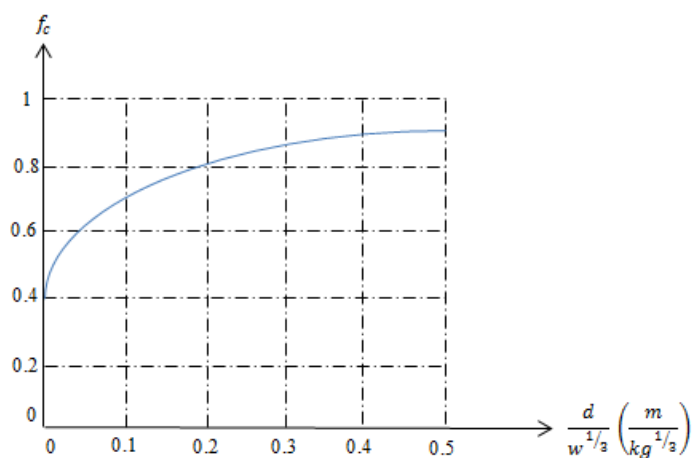
پارامتر n (ضریب کاهندگی) بر اساس جدول ۱ تعیین می‌شود. ضریب اتصال (f_c)، با تعیین عمق مقیاس شده انفجار از سطح زمین ($\frac{d}{w^{1/3}}$) با استفاده از شکل ۲ به دست می‌آید.



شکل ۱- انواع انفجار از نظر موقعیت خرج (UFC, 1991)

جدول ۱- میزان ضریب کاهندگی و k برای انواع خاک‌ها (UFC, 1991)

ضریب k	ضریب کاهندگی (n)	نوع خاک
۳۰۰۰۰	۱٫۵	رس اشباع
۲۰۰۰۰	۲٫۵	لای و رس نیمه اشباع
۱۰۰۰۰	۲٫۵	ماسه خیلی متراکم، خشک و مرطوب
۵۰۰۰	۲٫۷۵	ماسه متراکم، خشک و مرطوب
۲۰۰۰	۳	ماسه سست، خشک و مرطوب
۱۰۰۰	۳٫۲۵	ماسه خیلی سست، خشک و مرطوب



شکل ۲- تعیین ضریب اتصال (UFC, 1991)

۲-۱-۲- حداکثر سرعت ذرات خاک

حداکثر سرعت ذرات خاک (u) ناشی از انفجار، در محلی با فاصله (R) از محل انفجار با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$u = 48.8 f_c \left(\frac{2.52R}{w^{1/3}} \right)^{-n} \quad (3)$$

۲-۱-۳- حداکثر فشار انفجار در میدان آزاد (درون زمین)

میدان آزاد، حرکت موج بدون برخورد به مانع است. حداکثر فشار انفجار در میدان آزاد P_g برحسب N/m^2 از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_g = \rho \cdot C \cdot u \quad (4)$$

سرعت بارگذاری موج انفجار (C) برحسب سرعت موج برشی در خاک (c_s)، ضریب کاهندگی (n) و حداکثر سرعت ذرات (u) برای خاک‌های مختلف با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$C = c_s \quad \text{خاک‌های رسی کاملاً اشباع} \quad (5)$$

$$C = 0.6c_s + \left(\frac{n+1}{n-2} \right) u \quad \text{خاک‌های رسی اشباع} \quad (6)$$

$$C = c_s + \left(\frac{n+1}{n-2} \right) u \quad \text{خاک‌های ماسه‌ای} \quad (7)$$

۲-۲- فشار ناشی از انفجار بر سازه زیرزمینی

حداکثر فشار (P_{go}) ناشی از انفجار بر سازه زیرزمینی از رابطه تجربی زیر به دست می‌آید (UFC, 1991):

$$P_{go} = 36.71 \times \frac{k^{1/3}}{4060} \times z^{-3} \quad (8)$$

ضریب k برای خاک‌های مختلف با استفاده از جدول ۱ تعیین می‌شود. ضریب z (فاصله مقیاس شده) به صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود:

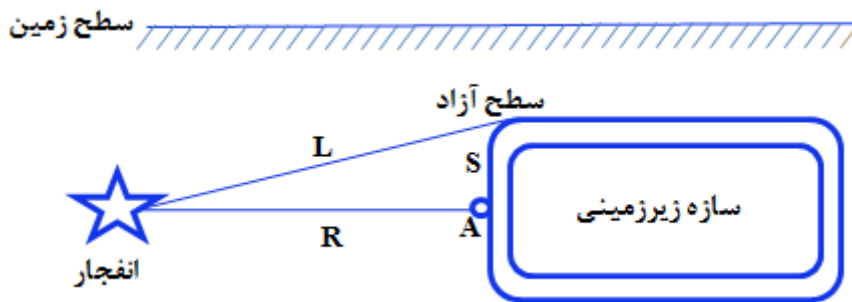
اگر در اثر انفجار ماده منفجره با وزنه‌های w_1 و w_2 در فواصل R_1 و R_2 حداکثر فشار (P_{go}) مشابه ایجاد شود، نسبت زیر برقرار خواهد بود:

$$\frac{R_1}{w_1^{1/3}} = \frac{R_2}{w_2^{1/3}} = z \quad (9)$$

به عبارت بهتر حداکثر فشار معین (*Pressure Peak*)، در فاصله‌ای مشخص، متناسب با ریشه سوم انرژی آزادشده انفجار ایجاد خواهد شد.

برای محاسبه مدت‌زمانی که فشار بازتابی بر ذره‌ای از سازه زیرزمینی مانند نقطه A در شکل ۳، اثر می‌کند از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$t_d = 3.22 \times 10^{-3} \times w^{0.1} \times R^{1/3} \times k^{1/6} \quad (10)$$



شکل ۳- معرفی پارامترهای زمان تسطیح موج انفجار (UFC, 1991)

باید در طراحی لحاظ شود.

۲-۳- تکانه ویژه انفجار (*Specific Impulse*)

سطح زیر منحنی فشار-زمان را تکانه ویژه انفجار برای محل معین می‌گویند که به دو جزء ضربه مثبت و منفی تقسیم می‌شود. معمولاً به دلیل کوچک بودن مقدار تکانه بخش منفی از آن صرف‌نظر می‌شود (UFC, 1991).

در شکل ۴ تاریخچه انتقال فشار انفجار وارده بر نقطه A از سازه زیرزمینی به صورت شماتیک رسم شده است. به منظور در نظر گرفتن تأثیر بازتاب انفجار مقدار P_{go} در ۱.۵ ضرب شده است. هنگامی که سازه زیرزمینی در زیر خاک تحت موج انفجار قرار می‌گیرد، مرتعش می‌شود. این ارتعاش روی تجهیزاتی که داخل سازه وجود دارند، اثر می‌گذارد و

1990 (TM 5-1300).

فشارهای فعال در ناحیه دوم (یک متر طول)، در ناحیه سوم (۶ متر طول) و در ناحیه چهارم (۸ متر طول) در نظر گرفته شده است. همچنین زاویه حادث (Incident Angle) از مرکز هر ناحیه به فاصله از انفجار بستگی دارد. طبق نظر (Smith and Hetherington, 1994)، بعد از ناحیه چهارم که بیشتر از ۱۴ متر دورتر از محل انفجار بوده و زاویه حادث بیشتر از ۸۰ درجه در یک تونل به قطر ۵ متر است، فشار انفجار تقریباً خیلی کوچک خواهد بود؛ بنابراین، سطح داخلی تونل در ناحیه پنجم، سطح آزاد فرض شده است (Smith, et al 1994).

منحنی فشار-زمان انفجار در این پژوهش با استفاده از روابط تجربی ارائه شده برای سازه‌های زیرزمینی در بخش‌های ۲-۲ و ۳-۲ تعیین شده است. چهار مقدار برای وزن ماده منفجره، ۱۵ کیلوگرم TNT، ۳۰ کیلوگرم TNT، ۴۵ کیلوگرم TNT، ۶۰ کیلوگرم TNT در این مطالعه در نظر گرفته شده است. با توجه به روابط ۸ تا ۱۱ حداکثر فشار انفجار، حداکثر فشار نرمال منعکس شده، ضریب فاصله مقیاس شده Z، زمان تداوم انفجار (t_d) و تکانه ویژه انفجار (i) در جدول‌های ۲ تا ۵ برای نواحی چهارگانه سطح داخلی تونل تعیین شده است.

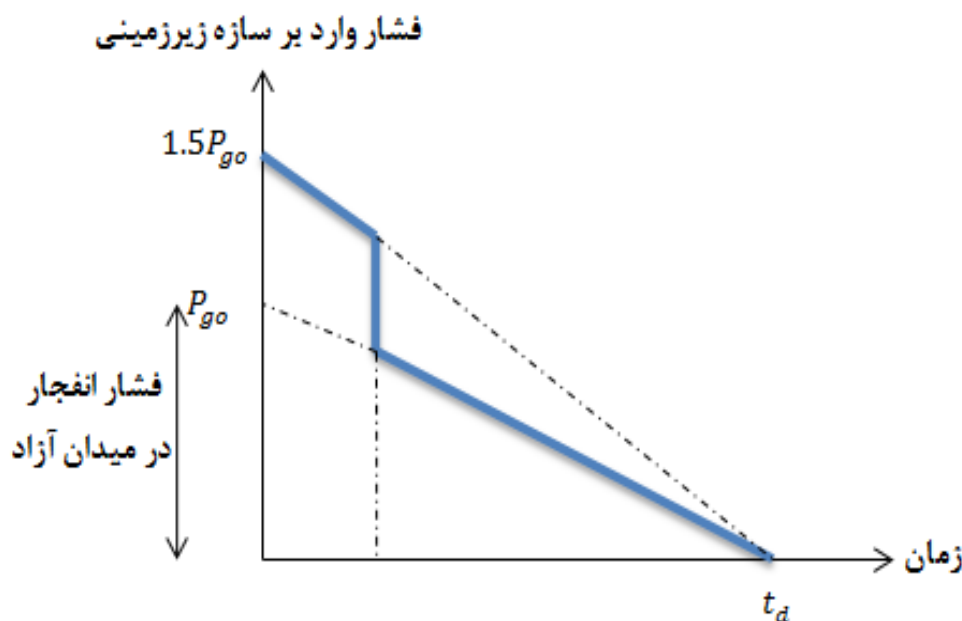
مقدار تکانه ویژه برای موج‌های ضربه از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$i = 0.5 \times P_{go} \times t_d \quad (9)$$

۲-۴- مدل‌سازی بار انفجار (Modeling of Blast Loading)

در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی بار انفجار، اثر اندرکنش سیال-سازه (Coupled Fluid-Solid) Interaction ناشی از انفجار داخلی تونل در نظر گرفته شده است. اندرکنش هوا و سیال در محیط تعامل خواص انفجار در هوا به همراه مقدار ماده تی‌ان‌تی در بخش Incident Wave Property وارد شده و با ایجاد دو نقطه مرجع به‌عنوان شروع و پایان انفجار، پروسه حل نیز به‌صورت کانوپ در نظر گرفته شده است. موج انفجار به‌صورت کروی (Spherical) و محل انفجار در مرکز یکی از تونل‌ها فرض شده است. سطح داخلی تونل به پنج ناحیه تقسیم شده است.

ناحیه اول که محفظه اصلی انفجار است و در مجاورت مرزهای مدل المان محدود قرار دارد، به طول یک متر در جهت طولی در نظر گرفته شده است. در این ناحیه، فشار ضربه (Impulse Pressure) به‌طور نرمال، فشار انعکاسی (Reflected Pressur) فرض شده است



شکل ۴- منحنی فشار- زمان انفجار وارد بر نقطه A از سازه زیرزمینی (UFC, 1991)

جدول ۲- پارامترهای منحنی فشار- زمان انفجار زیرزمینی برای ناحیه ۱

تکانه ویژه i ($N.s/mm^2$)	حداکثر فشار نرمال P_r (Mpa)	حداکثر فشار P_{go} (Mpa)	زمان تداوم t_d (ثانیه)	ضریب Z	وزن ماده منفجره (کیلوگرم TNT)
۰٫۰۲۹۷	۳٫۳۹	۲٫۲۶	۰٫۱۷۵	۰٫۴۰۵	۱۵
۰٫۰۶۳۱	۶٫۷۵	۴٫۵۰	۰٫۱۸۷	۰٫۳۲۲	۳۰
۰٫۰۹۹۱	۱۰٫۱۶	۶٫۷۷	۰٫۱۹۵	۰٫۲۸۱	۴۵
۰٫۱۳۶۶	۱۳٫۵۹	۹٫۰۶	۰٫۲۰۱	۰٫۲۵۵	۶۰

جدول ۳- پارامترهای منحنی فشار- زمان انفجار زیرزمینی برای ناحیه ۲

تکانه ویژه i ($N.s/mm^2$)	حداکثر فشار نرمال P_r (Mpa)	حداکثر فشار P_{go} (Mpa)	زمان تداوم t_d (ثانیه)	ضریب Z	وزن ماده منفجره (کیلوگرم TNT)
۳٫۳۹	۰٫۴۲۵	۰٫۲۸۳	۰٫۲۱۹	۰٫۸۱	۱۵
۶٫۷۵	۰٫۸۴۵	۰٫۵۶۳	۰٫۲۳۵	۰٫۶۴۴	۳۰
۱۰٫۱۶	۱٫۲۷	۰٫۸۴۷	۰٫۲۴۵	۰٫۵۶۲	۴۵
۱۳٫۵۹	۱٫۷	۱٫۱۳۳	۰٫۲۵۲	۰٫۵۱	۶۰

جدول ۴- پارامترهای منحنی فشار- زمان انفجار زیرزمینی برای ناحیه ۳

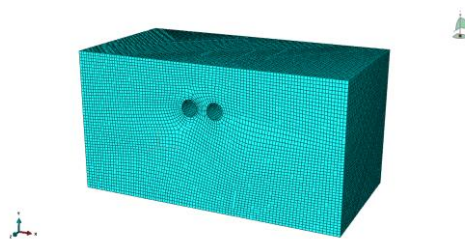
تکانه ویژه i ($N.s/mm^2$)	حداکثر فشار نرمال P_r (Mpa)	حداکثر فشار P_{go} (Mpa)	زمان تداوم t_d (ثانیه)	ضریب Z	وزن ماده منفجره (کیلوگرم TNT)
۳٫۳۹	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۴	۰٫۳۴۷	۳٫۲۴	۱۵
۶٫۷۵	۰٫۰۱۴	۰٫۰۰۹	۰٫۳۷۲	۲٫۵۷۶	۳۰
۱۰٫۱۶	۰٫۰۱۹	۰٫۰۱۳	۰٫۳۸۷	۲٫۲۴۸	۴۵
۱۳٫۵۹	۰٫۰۲۷	۰٫۰۱۸	۰٫۳۹۸	۲٫۰۴	۶۰

جدول ۵- پارامترهای منحنی فشار- زمان انفجار زیرزمینی برای ناحیه ۴

تکانه ویژه i ($N.s/mm^2$)	حداکثر فشار نرمال P_r (Mpa)	حداکثر فشار P_{go} (Mpa)	زمان تداوم t_d (ثانیه)	ضریب Z	وزن ماده منفجره (کیلوگرم TNT)
۳٫۳۹	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۲	۰٫۴۸۴	۹	۱۵
۶٫۷۵	۰٫۰۰۶	۰٫۰۰۴	۰٫۵۱۹	۷٫۱۶۱	۳۰
۱۰٫۱۶	۰٫۰۰۹	۰٫۰۰۶	۰٫۵۴۰	۶٫۲۶۴	۴۵
۱۳٫۵۹	۰٫۰۱۲	۰٫۰۰۸	۰٫۵۵۶	۵٫۶۹۷	۶۰

۳- مشخصات هندسی و مصالح مدل المان محدود

مدل المان محدود سه‌بعدی خاک و تونل‌های دوقلو در شکل ۵، نشان داده شده است. قطر داخلی هر یک از تونل‌ها ۶ متر و فاصله مرکز تا مرکز آنها ۸ متر است. برای انجام آنالیز حساسیت و مقایسه نتایج، تونل‌ها در پنج ارتفاع ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متری زیر سطح زمین تحت بار انفجار قرار می‌گیرند. ابعاد مدل المان محدود خاک و تونل $100 \times 50 \times 50$ است. پروسه تحلیل در این پژوهش، تحلیل دینامیکی صریح *(Dynamic, Explicit)*، مخصوص محاسبات مدل‌های بزرگ با زمان‌های پاسخ دینامیکی کوتاه (مثل انفجار) و برای فرآیندها یا ناپیوستگی‌های به شدت زیاد است. در گام اول تحلیل، مدل المان محدود تحت بار ثقلی قرار می‌گیرد و در گام بعدی بار انفجار اعمال می‌شود *(Asheghabadi, et al., 2011)*.



شکل ۵- هندسه مدل المان محدود خاک و تونل

قبل از مش‌بندی باید آنالیز همگرایی مش انجام شده و ابعاد مش بهینه تعیین شود. پس از انجام آنالیز همگرایی مش روی تغییر مکان‌ها ابعاد مش بهینه برای المان‌های *Soil and Tunnel* به ترتیب ۰/۱ و ۱ به دست آمد. اندرکنش بین خاک و سازه به صورت اصطکاکی که متشکل از دو رفتار نرمال و برشی است، در نظر گرفته شده است. روش اصطکاکی تعریف شده در مدل‌ها روش کلمب است که در آن ضریب اصطکاک را با تقریب خوبی برابر $0.6 \tan \varphi$ در نظر گرفته است و از طرفی کشش بین خاک و تونل حذف می‌شود. ضریب میرایی مصالح که منجر به زوال انرژی امواج انفجار می‌شود، برای خاک ۵٪ و برای پوشش تونل ۲٪ در نظر گرفته شده است *(Asheghabadi, et al., 2011)*.

شرایط ویژه‌ای برای به حساب آوردن واقعیتی که خاک

یک محیط نیمه بی‌نهایت است تعریف می‌شود. بدون این شرایط مرزی ویژه، امواج روی مرزهای مدل به خاطر اغتشاش بازتاب خواهد کرد. برای جلوگیری از این بازتاب‌های کاذب، مرزهای جاذب، مشخص می‌شوند. روش‌های مختلفی برای اعمال مرز جاذب انرژی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، مرز ویسکوز است (میرایی هندسی). در این روش المان‌های میراگر در مرزها قرار داده می‌شود که ضریب این المان‌های میراگر به شکل رابطه زیر است *(Chopra, et al., 1995)*

$$F_d = C_d \cdot \dot{u} \quad C_d = \rho \cdot C_{se} \cdot A \quad (11)$$

مدل دراگرپراگر به عنوان اصلاحی بر معیار ون میسرز، تقریبی از قانون کلمب جهت تأثیر تنش هیدرواستاتیک در تسلیم منظور شده و تابع تسلیم آن در روابط زیر و شکل ۶، ارائه شده است *(Asheghabadi, et al., 2011)*.

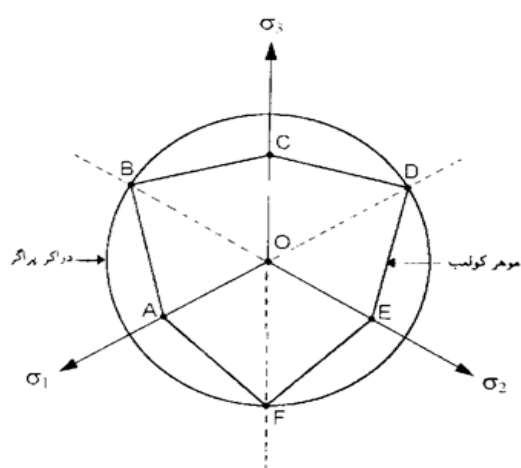
$$F = 3\alpha \cdot \sigma_m + \sqrt{J_2} - \dot{K} = 0 \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (13)$$

$$\dot{K} = \frac{6c \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)} \quad (14)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} \quad (15)$$

$$\sqrt{J_2} = \left[\frac{1}{2} (\bar{\sigma}_{xx}^2 + \bar{\sigma}_{yy}^2 + \bar{\sigma}_{zz}^2) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \right]^{0.5} \quad (16)$$



شکل ۶- سطح تسلیم معیارهای موهر کلمب و دراگرپراگر در صفحه اکتاهدرال (هشت‌وجهی) *(Drucker, et al., 1952)*

بررسی شرایط ژئولوژیکی سایت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش تونل‌های زیرزمینی در چندین لایه خاک تحت آنالیز قرار گرفته‌اند. مشخصات لایه‌های سنگ و خاک مطابق مدل دراگرپراگر در جدول ۶ آمده است.

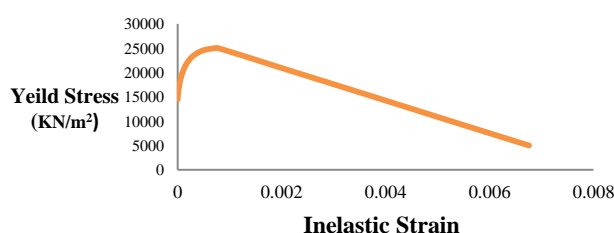
جدول ۶- پارامترهای مدل دراگرپراگر برای لایه‌های سنگ و خاک سایت

ارتفاع لایه (m)	نوع خاک	مدول الاستیسیته E (Mpa)	ضریب پواسون ν	چسبندگی (kpa) C	زاویه اصطکاک ϕ (درجه)	زاویه اتساع ψ (درجه)	وزن واحد γ (KN/m ³)
۱۰	Manhattan Schist	۳۳۶۰۰	۰٫۱۲۸	۶۶	۵۰	۱۲٫۵	۲۴
۱۰	Average-quality rock	۹۰۰۰	۰٫۲۵	۳٫۵	۳۳	۴	۲۴
۵	Dense sandy soil	۱۴۰۰	۰٫۳	۰٫۵۵	۲۴	۰	۲۴
۵	Saturated-soft soil-Layer1	۵٫۶	۰٫۴۹۵	۳۸	۰	۰	۲۰
۵	Saturated-soft soil-Layer2	۱۰	۰٫۴۹۵	۹۰	۰	۰	۲۰
۵	Saturated-soft soil-Layer3	۱۶	۰٫۴۹۵	۱۵۰	۰	۰	۲۰
۵	Saturated-soft soil-Layer4	۲۳	۰٫۴۹۵	۱۷۰	۰	۰	۲۰
۵	Saturated-soft soil-Layer5	۳۱	۰٫۴۹۵	۲۹۶	۰	۰	۲۰

فشاری بتن باید تنش‌های فشاری را به صورت تابعی از کرنش‌های غیر الاستیک تعریف کرد. برای تنش‌های فشاری و کرنش باید مقادیر مثبت به کار رود. این مدل توانایی شبیه‌سازی رفتار چرخه‌ای بتن را نیز به خوبی داراست. معیار خرابی این مدل رفتاری، *Drucker Prager* و تابع تسلیم آن *Lubliner* است (*Drucker, et al., 1952*).

منحنی تنش تسلیم فشاری برحسب کرنش غیرخطی بتن در شکل ۷، مشخصات غیرخطی کششی بتن در جدول ۷ و مشخصات پلاستیک بتن پوشش تونل در جدول ۸ آمده است. همچنین مشخصات الاستیک مصالح فولاد و بتن پوشش تونل، در جدول ۹ آمده است.

برای تعریف مشخصات غیرخطی بتن پوشش تونل از مدل رفتاری (*Concrete Damage Plasticity*) استفاده شده است. این مدل رفتاری پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل برای بتن در نرم‌افزار *Abaqus* است. در مکانیسم آسیب فرض بر این است که کاهش سختی در اثر ایجاد و گسترش ترک‌های ریز (*Micro Crack*) بوده است، به طوری که بتوان این کاهش سختی را با پارامتری به نام آسیب (*Damage*) اندازه‌گیری و مشخص کرد. در مدل پلاستیک آسیب‌دیده بتن با استفاده از مفاهیم الاستیک آسیب‌دیده ایزوتروپیک و پلاستیک کششی و فشاری، رفتار غیرخطی بتن بیان می‌شود. در این مدل مکانیسم اصلی شکست خرد شدن فشاری بتن است. برای تعریف رفتار



شکل ۷- منحنی تنش کرنش غیر الاستیک فشاری بتن (*Asheghabadi, et al., 2011*)

۴-۱- اثر ارتفاع روباره خاک بر پاسخ‌های ایجادشده در پوشش تونل

همان‌گونه که ذکر شد، تونل‌ها در پنج ارتفاع ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متری زیر سطح زمین تحت چهار بار انفجاری پالسی مطابق جداول ۲ تا ۵ با وزن ماده منفجره ۱۵۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ کیلوگرم TNT قرار می‌گیرند.

در شکل ۸ تأثیر ارتفاع روباره بر بیشینه تنش‌های ایجادشده در پوشش تونل‌ها نشان داده شده است. بیشترین میزان تنش مایسز ایجادشده در پوشش تونل ۱۹۵ Mpa در ارتفاع روباره ۱۰ متر و تحت بار انفجاری ۶۰ کیلوگرم TNT است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش ارتفاع روباره باعث کاهش تنش‌ها در پوشش تونل‌ها می‌شود. به عبارت بهتر هرچه ارتفاع روباره خاک بیشتر باشد، خسارت ایجادشده در پوشش تونل‌ها تحت انفجار داخلی کمتر می‌شود. همچنین بررسی شکل ۸ نشان می‌دهد که مقدار بیشینه تنش در تونل‌ها در ارتفاع روباره ۴۰ و ۵۰ متر بسیار به هم نزدیک هستند.

در شکل ۹ اثر ارتفاع روباره بر بیشینه تغییرشکل‌های ایجادشده در پوشش تونل نشان داده شده است. بیشترین میزان تغییرشکل ایجادشده در پوشش تونل ۹۸mm در ارتفاع روباره ۱۰ متر و تحت بار انفجاری ۶۰ کیلوگرم TNT است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش ارتفاع روباره باعث کاهش تغییرشکل در پوشش تونل‌ها می‌شود. در ارتفاع روباره ۵۰ متر مقادیر بیشینه تغییرشکل ایجادشده در پوشش تونل‌ها در حالات مختلف میزان ماده منفجره بسیار به هم نزدیک است. به عبارت دیگر هنگامی که محیط پیرامون تونل بستر سنگی باشد، تأثیر مقدار ماده منفجره بر میزان تغییرشکل‌ها اندک است.

۴-۲- اثر مقدار ماده منفجره بر پاسخ‌های ایجادشده در پوشش تونل

با توجه به جدول ۲ در هر عمقی خصوصیات مصالح خاک تغییر می‌کند. در شکل ۱۰ برای انواع خاک‌ها، اثر مقدار ماده منفجره بر بیشینه تنش‌های ایجادشده در پوشش تونل نشان داده شده است. همان‌گونه که قابل مشاهده است با افزایش وزن ماده منفجره، بیشینه تنش ایجادشده در پوشش تونل افزایش یافته است؛ اگرچه نرخ افزایش برای خاک‌های مختلف، متفاوت است. در خاک‌های نرم اشباع نرخ افزایش

جدول ۷- مشخصات غیرخطی کششی بتن در مدل آسیب پلاستیسیته (Asheghabadi, et al., 2011)

کرش پلاستیک	تنش کششی (KN/m^2)
۰	۲۵۰
۰/۰۰۱	۲/۵

جدول ۸- مشخصات پلاستیک بتن پوشش تونل در مدل رفتاری پلاستیسیته آسیب‌دیده (Asheghabadi, et al., 2011)

پارامتر	مقدار	واحد
Ψ (زاویه اتساع بتن)	۳۰	درجه
ϵ (خروج از مرکزیت بتن)	۰/۱	mm
f_{bol}/f_{co} (نسبت تنش تسلیم فشاری دومحوره به تک‌محوره)	۱/۱۶	-
K (نسبت تنش ثانویه به ماکزیمم مقدار کشش)	۰/۶۶۷	-
μ (پارامتر ویسکوزیته در معادلات تعادل بتن)	۰/۰۱	-

جدول ۹- مشخصات الاستیک بتن مسلح پوشش تونل (Asheghabadi, et al., 2011)

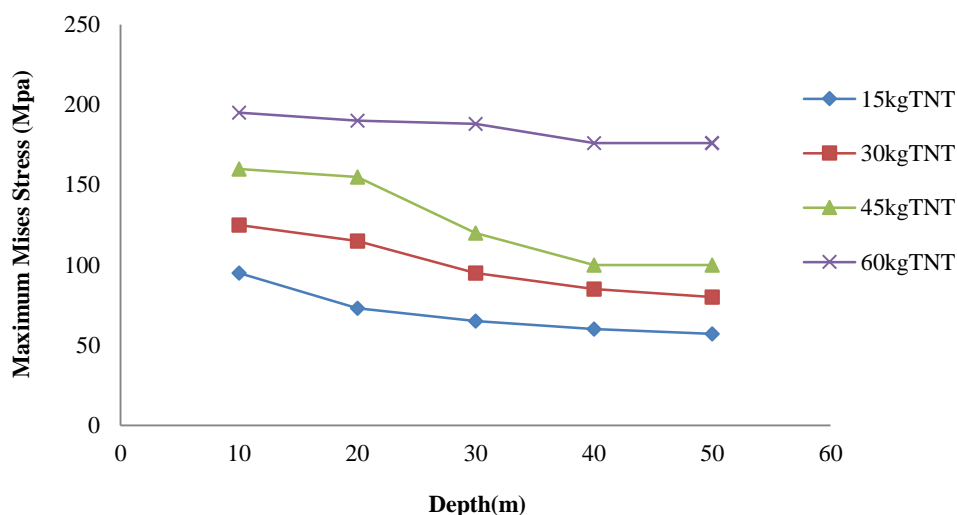
پارامتر	واحد	بتن	آرما تورها
ν_{tining} (ضریب پواسون)	-	۰/۲	۰/۳
ρ_{tining} (جرم مخصوص)	(kg/m^3)	۲۲۵۰	۷۸۵۰
E_{tining} (مدول الاستیسیته)	(GN/m^2)	۲۰/۶۴	۲۱۰

۴- نتایج تحلیل‌های انفجاری و مشاهدات

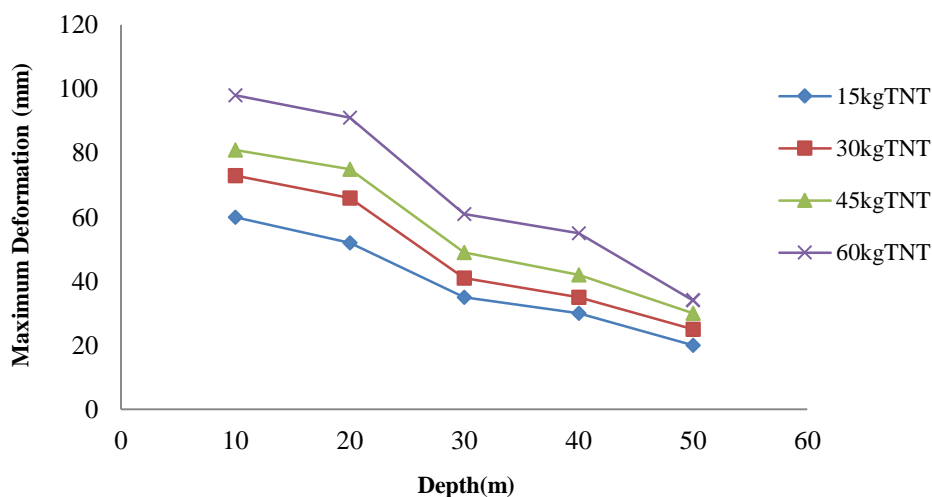
در این بخش به بررسی اثر عوامل مختلف بر بیشینه پاسخ‌ها (تغییرشکل، تنش) و خسارات (عرض ترک) ایجادشده در پوشش تونل‌های دوقلو تحت بار انفجار داخلی پرداخته شده است. همچنین به بررسی بهسازی خاک پیرامون تونل بر کاهش پاسخ‌ها و خسارات ایجادشده در پوشش تونل تحت بار انفجار پرداخته شده است.

به‌شدت محصور شده‌اند، بیشتر تهدیدهای تروریستی در تونل‌ها با مقدار ماده منفجره زیاد انجام می‌شود؛ بنابراین ارزیابی خسارت ایجادشده در پوشش تونل‌ها در خاک‌های نرم تحت انفجار قوی، محتمل‌ترین سناریوی دشمن است.

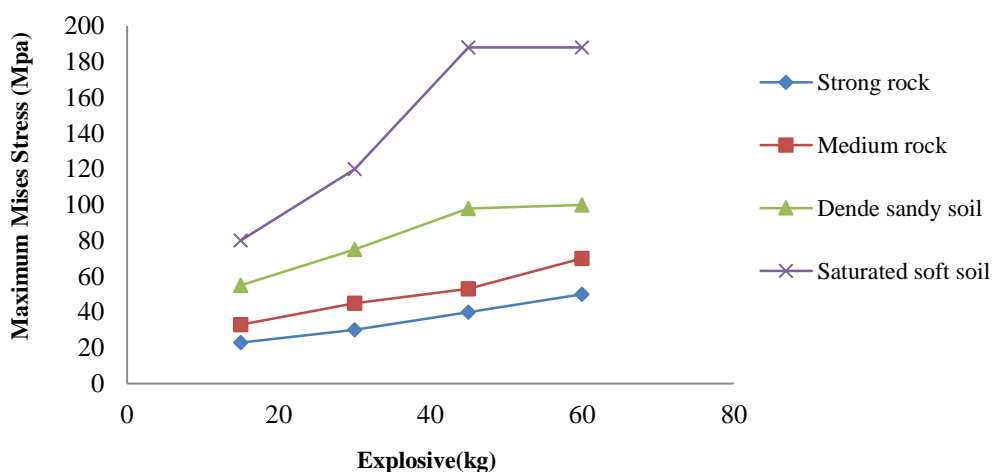
تنش بسیار بیشتر از سایر خاک‌ها است. بیشترین میزان تنش ایجادشده در پوشش تونل 188Mpa در خاک نرم اشباع و تحت بار انفجاری ۶۰ کیلوگرم TNT است. از آنجایی که سازه‌های زیرزمینی توسط محیط خاک و سنگ



شکل ۸- تأثیر ارتفاع روباره خاک بر بیشینه تنش‌های ایجادشده در پوشش تونل



شکل ۹- تأثیر ارتفاع روباره خاک بر بیشینه تغییرشکل‌های ایجادشده در پوشش تونل



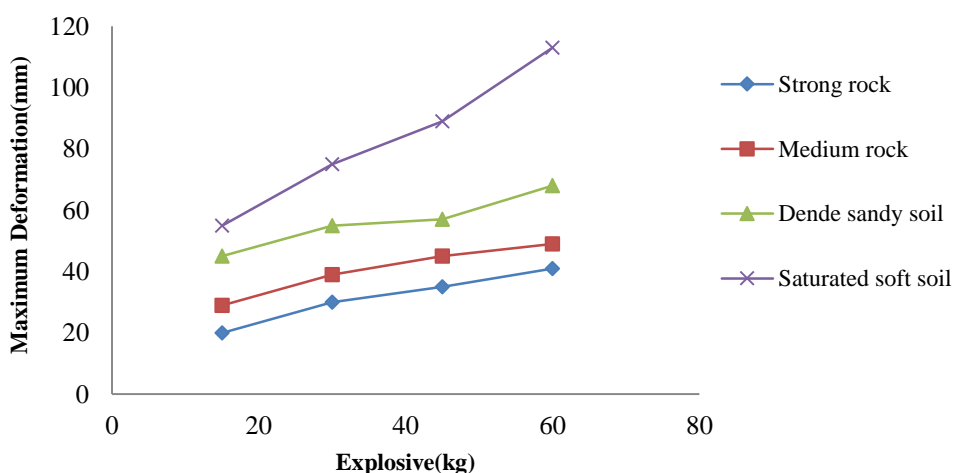
شکل ۱۰- تأثیر مقدار ماده منفجره بر بیشینه تنش‌های ایجادشده در پوشش تونل

۳-۴- بررسی توزیع و مقدار خسارت در مقطع

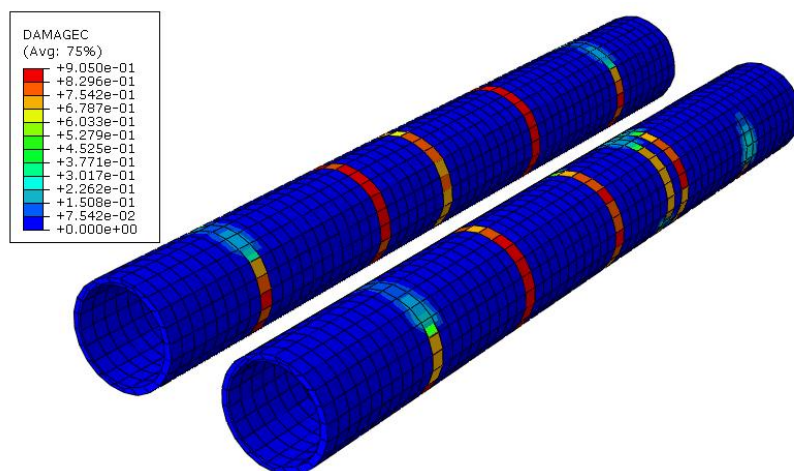
تونل‌ها

همان‌گونه که در بخش ۳ ذکر شد برای بررسی خسارت در تونل‌ها باید از یک مدل رفتاری که قابلیت تعریف خسارت (*Damage*) داشته باشد، استفاده کرد. در این مقاله با استفاده از مدل رفتاری پلاستیک آسیب‌دیده بتن (*Concrete Damage Plasticity*) این امکان فراهم شده است. در شکل ۱۲، بحرانی‌ترین سناریوی توزیع خسارت در مقطع تونل‌ها در ارتفاع روباره ۱۰ متر و تحت بار انفجاری ۶۰ کیلوگرم TNT نشان داده شده است.

در شکل ۱۱ اثر مقدار ماده منفجره بر بیشینه تغییرشکل‌های ایجادشده در پوشش تونل نشان داده شده است. بیشترین میزان تغییرشکل ایجادشده در پوشش تونل *mm113* در خاک نرم اشباع و تحت بار انفجاری ۶۰ کیلوگرم TNT است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان افزایش تغییرشکل پوشش تونل با مقدار ماده منفجره تقریباً در همه انواع خاک‌ها به‌جز نرم اشباع خطی است. در صورت وقوع انفجار در این خاک، باید تدابیر ویژه‌ای برای کاهش خسارت در پوشش تونل اتخاذ شود.



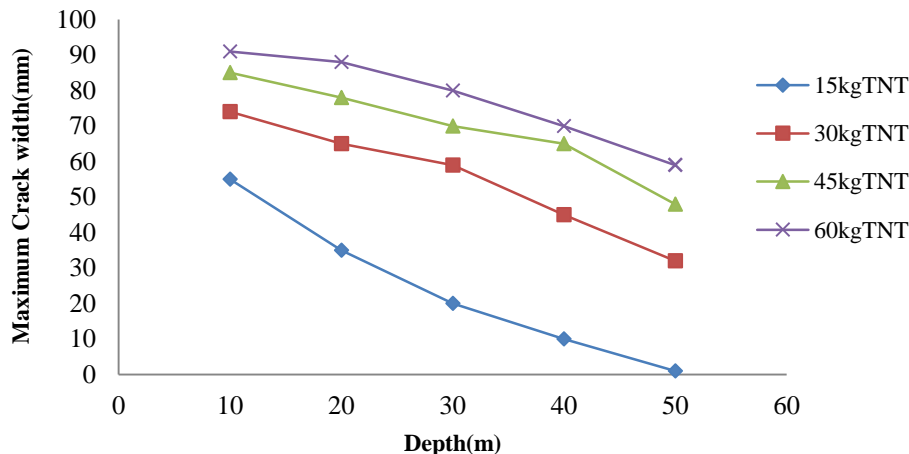
شکل ۱۱- تأثیر مقدار ماده منفجره بر بیشینه تغییرشکل‌های ایجادشده در پوشش تونل



شکل ۱۲- بحرانی‌ترین سناریوی توزیع خسارت در مقطع تونل‌ها در ارتفاع روباره ۱۰ متر و تحت بار انفجاری ۶۰ کیلوگرم TNT

مشاهده می‌شود افزایش ارتفاع روباره باعث کاهش عرض ترک در پوشش تونل‌ها می‌شود. به عبارت بهتر هرچه ارتفاع روباره خاک بیشتر باشد، خسارت ایجادشده در پوشش تونل‌ها تحت انفجار داخلی بیشتر می‌شود.

در شکل ۱۳ تأثیر ارتفاع روباره بر بیشینه عرض ترک ایجادشده در پوشش تونل‌ها نشان داده شده است. بیشترین عرض ترک ایجادشده ۹۱mm در ارتفاع روباره ۱۰ متر و تحت بار انفجاری ۶۰ کیلوگرم TNT است. همان‌گونه که

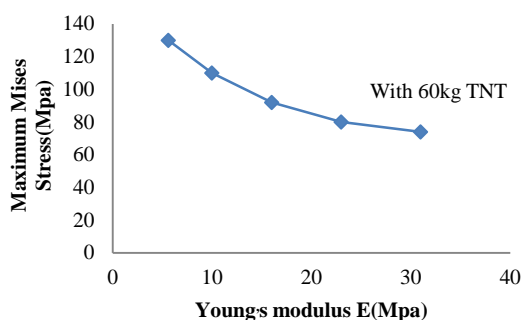


شکل ۱۳- تأثیر ارتفاع روباره خاک بر بیشینه عرض ترک ایجادشده در پوشش تونل

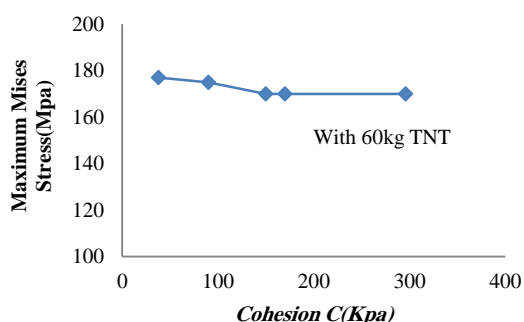
محیط پیرامون تونل (خاک یا سنگ) بستگی دارد. برای تونل‌های در خاک نرم و ارتفاع روباره کم، احتمال خسارت پوشش تونل بسیار زیاد است؛ در نتیجه همیشه می‌تواند مورد تهدیدات تروریستی قرار گیرد.

۴-۴ اثر بهسازی خاک بر مقدار خسارت در پوشش تونل
همان‌گونه که در بخش‌های ۱-۴ تا ۳-۴ مشاهده شد، خسارت پوشش تونل تحت بارگذاری انفجار به‌شدت به

بنابراین تزریق (*Grouting*) خاک، در تونل‌های احداث‌شده در زمین‌های نرم باعث بهبود مقاومت تونل در برابر انفجار می‌شود. اگرچه اجرای این روش پرهزینه است؛ اما می‌تواند باعث طراحی سودمند چندعملکردی (مثل طراحی مقاوم در برابر زلزله و انفجار) شود.



شکل ۱۵- تأثیر افزایش سختی خاک بر بهبود پاسخ تنش پوشش تونل تحت بار انفجاری ۶۰ کیلوگرم TNT



شکل ۱۶- تأثیر افزایش مقاومت خاک بر بهبود پاسخ تنش پوشش تونل تحت بار انفجاری ۶۰ کیلوگرم TNT

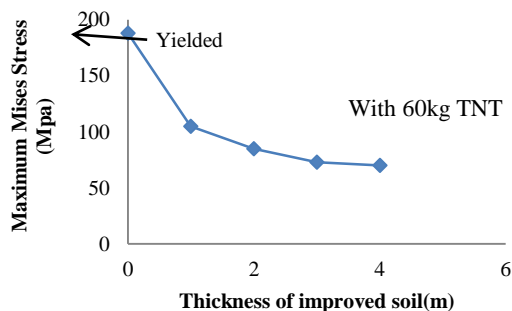
با دقت در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ می‌توان فهمید:

- ۱- با افزایش سختی خاک بیشینه تنش ایجادشده در پوشش تونل‌ها کاهش می‌یابد. به عبارت بهتر، در حالتی که سختی خاک کم باشد، احتمال اینکه پوشش تونل تحت بار انفجار خسارت شدید ببیند، زیاد است.
- ۲- با تغییرات مقاومت خاک، بیشینه تنش ایجادشده در پوشش تونل تقریباً در محدوده ثابتی قرار دارد. به عبارت دیگر در خاک‌های نرم، سختی زمین به مراتب

انواع روش‌های بهسازی و تثبیت زمین‌های نرم: بهسازی سطحی: اصلاح خواص طبیعی خاک جهت اصلاح شالوده سطحی و عملیات اجرایی سطحی بهسازی لایه‌های عمیق: اصلاح خاک و افزایش باربری آن در لایه‌های عمیق

شیوه‌های متداول بهسازی سطحی بستر خاک، تثبیت با سنگ‌دانه، مصالح مخلوط، مواد افزودنی و لایه‌های ژئوتکستال است

در خاک‌های نرم پیرامون تونل، مقاومت (*Strength*) (چسبندگی زهکشی نشده) و سختی (*Stiffness*) (مدول الاستیسیته) زمین باید بهسازی (*Improve*) شود. در شکل ۱۴ اثر افزایش ضخامت خاک بر بهبود پاسخ تنش پوشش تونل تحت بار انفجاری نشان داده شده است. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ اثر افزایش مقاومت و سختی خاک بر بهبود پاسخ تنش پوشش تونل تحت بار انفجاری نشان داده شده است. فرضیات شکل‌های ۱۴ تا ۱۶، بر مبنای بار انفجاری داخلی ۶۰ کیلوگرم TNT و خاک *Saturated-soft Soil* مطابق جدول ۶ است.



شکل ۱۴- تأثیر افزایش ضخامت خاک بر بهبود پاسخ تنش پوشش تونل تحت بار انفجاری ۶۰ کیلوگرم TNT

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت ۱ متری خاک پیرامون تونل، مقدار بیشینه تنش ۴۴٪ کاهش می‌یابد. این کاهش پاسخ تنش، در حالت افزایش ضخامت ۳ متر به ۴ متر متوقف می‌شود؛

نرخ افزایش برای خاک‌های مختلف، متفاوت است. در خاک‌های نرم اشباع نرخ افزایش تنش بسیار بیشتر از سایر خاک‌ها است.

۳- بحرانی‌ترین سناریوی توزیع خسارت در مقطع تونل‌ها در ارتفاع روباره ۱۰ متر و تحت بار انفجاری ۶۰ کیلوگرم TNT و بیشترین عرض ترک ایجادشده ۹۱mm است.

۴- در خاک‌های نرم پیرامون تونل، مقاومت و سختی زمین باید بهسازی شود. با افزایش ضخامت ۱ متری خاک پیرامون تونل، مقدار بیشینه تنش ۴۴٪ کاهش می‌یابد. این کاهش پاسخ تنش، در حالت افزایش ضخامت ۳ متر به ۴ متر متوقف می‌شود؛ بنابراین تزریق خاک، در تونل‌های احداث شده در زمین‌های نرم باعث بهبود مقاومت تونل در برابر انفجار می‌شود. اگرچه اجرای این روش پرهزینه است؛ اما می‌تواند باعث طراحی سودمند چندان عملکردی (مثل طراحی مقاوم در برابر زلزله و انفجار) شود.

۵- با افزایش سختی خاک، بیشینه تنش ایجادشده در پوشش تونل‌ها کاهش می‌یابد. با تغییرات مقاومت خاک، بیشینه تنش ایجادشده در پوشش تونل تقریباً در محدوده ثابتی قرار دارد. در نتیجه در طراحی مقاوم در برابر تهدیدات تروریستی در تونل‌های زیرزمینی توجه به مدول الاستیسیته خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۶- فهرست نمادها

در جدول ۱۰، فهرست نمادها آمده است.

مهم‌تر از مقاومت زمین است. در نتیجه در طراحی مقاوم در برابر تهدیدات تروریستی در تونل‌های زیرزمینی توجه به مدول الاستیسیته خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بهره‌گیری از نرم‌افزار المان محدود *ABAQUS6-11-1*، خاک و تونل‌های دوقلو به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده است. بار انفجار با استفاده از روابط تجربی فشار ناشی از انفجار بر سازه زیرزمینی تخمین زده شده است. همچنین رفتار خاک و پوشش تونل غیرخطی در نظر گرفته شده است. برای انجام آنالیز حساسیت و مقایسه نتایج، تونل‌ها در پنج ارتفاع روباره ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ متری سطح زمین، تحت ۴ بار انفجاری ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ کیلوگرم TNT قرار می‌گیرند. با انجام آنالیزهای انفجاری روی مدل‌های المان محدود خاک و تونل نتایج زیر قابل حصول است:

۱- افزایش ارتفاع روباره باعث کاهش تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در پوشش تونل‌ها می‌شود. به عبارت بهتر هرچه ارتفاع روباره خاک بیشتر باشد، خسارت ایجادشده در پوشش تونل‌ها تحت انفجار داخلی کمتر می‌شود. هنگامی که محیط پیرامون تونل بستر سنگی باشد، تأثیر مقدار ماده منفجره بر میزان تغییر شکل‌ها اندک است.

۲- با افزایش وزن ماده منفجره، بیشینه تنش ایجادشده در پوشش تونل افزایش یافته است؛ اگرچه

جدول ۱۰- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
n	-	ضریب کاهندگی	W_1	kg	وزن ماده منفجره ۱
x	m	حداکثر جابجایی ذرات خاک	W_2	kg	وزن ماده منفجره ۲
R	m	فاصله از محل انفجار	R_1	m	فاصله ۱ از محل انفجار
w	kg	وزن ماده منفجره	R_2	m	فاصله ۲ از محل انفجار
f_c	-	ضریب اتصال	t_d	s	زمان تداوم انفجار
c_s	m/s	سرعت موج برشی خاک	i	N.s/m	تکانه ویژه انفجار
G	N/m ²	مدول برشی خاک	φ	درجه	زاویه اصطکاک داخلی خاک
ρ	Kg/m ³	جرم مخصوص خاک	F_d	N	نیروی میرایی ویسکوز
$\frac{d}{w^{1/3}}$	m/kg ^{0.33}	عمق مقیاس شده انفجار از سطح زمین	C_d	N.s/m	ضریب میرایی ویسکوز
u	m/s	حداکثر سرعت ذرات خاک	\dot{u}	m/s	سرعت در میرایی ویسکوز
P_g	N/m ²	حداکثر فشار انفجار در میدان آزاد	A	m ²	سطح مقطع میراگر
C	m/s ²	سرعت بارگذاری موج انفجار	F	-	تابع تسلیم دراگر پراگر
P_{go}	Mpa	حداکثر فشار ناشی از انفجار بر سازه زیرزمینی	$\alpha, k, \sigma_m, \sqrt{f_2}$	-	پارامترهای مدل دراگر پراگر
Z	-	فاصله مقیاس شده	$\bar{\sigma}_{xx}, \bar{\sigma}_{yy}, \bar{\sigma}_{zz}$	N/m ²	میانگین تنش عمودی دوجهته
E	Mpa	مدول الاستیسیته خاک	$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	N/m ²	میانگین تنش برشی دوجهته
γ	kN/m ³	وزن واحد خاک	f_{bo}	N	تنش تسلیم فشاری دومحوره
ψ	درجه	زاویه اتساع خاک	f_{co}	N	تنش تسلیم فشاری تک‌محوره
C	kpa	چسبندگی	K	-	نسبت تنش ثانویه به ماکزیمم مقدار کشش
ν	-	ضریب پواسون خاک	ν_{lining}	-	ضریب پواسون پوشش
ψ	degree	زاویه اتساع بتن	ρ_{lining}	Kg/m ³	جرم مخصوص پوشش
ϵ	-	خروج از مرکزیت بتن	E_{lining}	N/m ²	مدول الاستیسیته پوشش

۷- منابع

- Abaqus 6.11.1. (2012). User's Manual. Hibbitt, Karlson and Sorenson, Inc.
- Choi, S., Wang, J., Munfakh, G., & Dwyre, E. (2006). 3D Nonlinear Blast Model Analysis for Underground Structures. Proceedings of Geocongress.
- Chopra, A.K. (1995). DYNAMICS OF STRUCTURES .Theory And Applications To Earthquake Engineering(B. Stenquist, Ed). United States of America:Prentice-Hall.
- Clough, RW., & Penzien J. (2000) . Dynamics of Structures. Second ed. New York, NY: McGraw-Hill Book Co.
- Chille, F., Sala, A. & Casadei, F. (1998). Containment of Blast Phenomena in Underground Electrical Power Plants. Advances in Engineering Software,7-12.

- Departments of the Army, the Navy, & the Air Forces. (1990). Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. US Army Technical Manual TM 5-1300.
- Davies, M., & Williams, A. (1992). Centrifuge Modelling the Protection of Buried Structures Subjected to Blast Loading. In Proceeding of the International Conference on Structures Under Shock and Impact, England:[sn].
- Davies, M. (1994). Dynamic Soil Structure Interaction Resulting from Blast Loading. Leung, Lee and Tan (Eds.), Centrifuge, 94: 319-324.
- De, A. (2012). Numerical Simulation of Surface Explosions over Dry, Cohesionless Soil. Computers and Geotechnics. 43: p. 72-79.
- Drucker D. C., & Prager W. (1952). Soil Mechanics and Plastic Analysis for Limit Design, Quarterly of Applied Mathematics, vol. 10, no. 2, pp. 157-165.
- Fragaszy, R., Purcell, M., Olen, K., & Brownell, K. (1994). Assessing the Reliability of Results in a Dynamic Centrifuge Test. In Comptes rendus De La Conference Centrifuge.
- Grujicic, M., Pandurangan, B., Coutris, N., & Cheeseman, B. (2009). Derivation and Validation of Material Model for Clayey Sand for Use in Landmine Detonation Computational Analysis. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 5(4) : p. 311-344.
- Goodings, D.J., Fourney, W. & Dick, R.D. (1998). Geotechnical Centrifuge Modelling of Explosion Induced Craters-A Check for Scaling Effects., DTIC Document.
- Gui, M. W. & Chien, M. C. (2004). Blast Resistant Analysis for a Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan Airport – A Parametric Study, Geotechnical and Geological Engineering, 24, 227–248.
- Hoseini Ranjbar, H., & Esmaeili, M. (2010). Investigation of Structural Stability of Tunnel Casing Located in Jointed Rock Mass Against the Effects of Rockets Explosions-case study: 500 + 345 km Ardabil-Miyane Railway Tunnel. In Proc. of the 5th National Congress on Civil Engineering, (InPersian).
- Huabei Liu, Ph.D. (2009). Dynamic Analysis of Subway Structures under Blast Loading.
- Hosseini, S.M.A. (2012). Study of Mechanical Behavior of Salt Caverns under Cyclic Loading. Ph.D.
- Kutter, B.L. Oleary, L., Thompson, P., & Lather, R. (1998) Gravity-Scaled Tests on Blast Induced Soil-Structure Interaction. Journal of Geotechnical engineering, 114(4): p. 431-447
- Liu, H. (2009). Dynamic Analysis of Subway Structures under Blast Loading. Geotechnical and Geological Engineering 27:699-711.
- Lu, Y. (2005). Underground Blast Induced Ground Shock and its Modelling Using Artificial Neural Network. Computers and Geotechnics 32:164-178.
- Luccioni, B., Ambrosini, D. Nurick, G., & Snyman, L. (2009). Craters Produced by Underground Explosions. Computers & Structures, 87(21) : p. 1366-1373
- Mirzeinali Yazdi, S. H., Baziar, M. H., Rabeti Moghaddam, M., & Hashemi, H. R. (2010). Determination

- of Maximum Free Field Explosion Pressure of Conventional Projectiles in Soil for Modeling of Blast Loading Effect on the Underground and Above Ground Structures using FLAC Software. In Proc. of the 1st Conf. on Passive Defence and Resistance Structures, Babol Noshirvani University of Technology, (In Persian.)
- Nagy, N. M., Mohamed, M. & Boot, J.C. (2010). Nonlinear Numerical Modelling for the Effects of Surface Explosions on Buried Reinforced Concrete Structures, *Journal of Geomechanics and Engineering*, 1-18.
- Rohit, T. (2016). Dynamic Analysis of a Twin Tunnel in Soil Subjected to Internal Blast Loading, *Indian Geotechnical*.
- Rosengren, L., Olofsson, S.O., & Svedbjork, G. (1999). Modeling of Ground-Shock Wave Propagation in Soil Using FLAC. *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, A.A Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, 401-405.
- Smith, PD., & Hetherington, JG. (1994). *Blast and Ballistic Loading of Structures*. Butterworth Heinemann Oxford.
- Thesis, Shahrood University, Shahrood, (In Persian) Asheghabadi, M. S., & Matinmanesh, H. (2011). Finite Element Seismic Analysis of Cylindrical Tunnel in Sandy Soils with Consideration of Soil-Tunnel Interaction. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (pp.3162-3169). Doi:10.1016/j.proeng. 2011.07.399.
- Unified Facilities Criteria (UFC). (1990). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, UFC 4-23-03.
- Unified Facilities Criteria (UFC). (1991). Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons, UFC 3-340-1.
- Unified Facilities Criteria (UFC). (2008). Structure to Resist the Effects of Accidental Explosions, UFC.
- Wang, J. (2001). Simulation of Landmine Explosion Using LS-DYNA3D Software: Benchmark Work of Simulation of Explosion in Soil and Air., DTIC Document.
- Yang, Z. (1997). Finite Element Simulation of Response of Buried Shelters to Blast Loadings, *Finite Elements in Analysis and Design*, 24, 113-132.

Assessment of the Damages Created in the Twin Circle Tunnels under Explosive Loading and Their Responses

M. R. Momenzadeh¹; M. R. Mansoori²; A. Aziminejad²

1. PhD Candidate in Earthquake Engineering; Department of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University

2. Assistant Professor; Department of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University

Received: 18 Oct 2015; Accepted: 08 July 2019
DOI: 10.22044/TUSE.2019.3478.1238

Keywords

Soil Rehabilitation
Tunnel Covering Damage
Dynamic Analysis
Tunnel- Soil Interaction
Terroristic Threats
TNT Explosive Material
Impact Pulse

Extended Abstract

Summary

Metropolitan underground tunnels are increasingly used these days. Besides, Iran has strategic importance in the Middle East and is always under the risk of military attacks by hegemonic countries and local terroristic activities. Concerning these points, it is crucial to investigate and analyze such structures under explosive loadings. This research focuses on the most critical scenario of damage distribution in the tunnel covering cause by TNT

explosion. Moreover, the effects of soil overburden height as well as the amount of explosive material is studied on the maximum stresses and deformations created in the covering of twin tunnels under 4 explosive loadings of 15, 30, 45 and 60 Kg TNT. Finally, the effect of soft soil rehabilitation on the improvement of tunnels covering response under explosive loading is assessed.

Introduction

Chio et.al. (2006) studied the response of underground structures subjected to the explosion through nonlinear analysis. Gui et. al. (2006) also investigated the effects of ground surface explosion on the tunnel of Taipei Shongsan airport. Two-dimensional solution of the problem given by Gui et. al. (2006) has been in the line of its simplification. They focused on the effects of explosion in New York subway.

Methodology and Approaches

In this research, soil and tunnel have been subjected to the inside ground explosive loading in three- dimensional form using ABAQUS6-11-1 finite element software. The explosive loading has been estimated through empirical relations of compression applied to the underground structures due to the explosion. Besides, the soil has been simulated by Druker Prager and the tunnel covering by concrete damage plasticity behavior models. Here, the effects of different parameters are investigated on the responses of twin tunnels under explosive loadings.

Results and Conclusions

The brief results of this investigation are as follows:

- 1- Increasing in the overburden height will cause the reduction of stresses and deformations in the covering of tunnels;
- 2- The most critical scenario of damage distribution in the tunnel section is in the overburden height of 10 m under 60 Kg TNT of explosive loading; the highest width of created crack is 91 mm, the higher the height of soil overburden, the more the created damage is in the tunnels covering under internal explosion;
- 3- The strength and stiffness of the ground should be rehabilitated in the soft soil surrounding the tunnel. The maximum stress is reduced to 44% with increasing the thickness of tunnel surrounding soil to 1 m;

- 4- The maximum stress created in the tunnels covering is reduced by increasing the stiffness of soil. This reduction in the stress response is stopped in the status of increasing the thickness from 3 m to 4 m.
 - 5- The stresses created in the tunnels covering are reduced with increasing the soil stiffness. The maximum stress remains approximately in a constant range for different values of soil strength.
-