

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

با توجه به گسترش روزافزون احداث تونل‌های مترو در سیستم‌های حمل‌ونقل شهری، ایمن نگاه داشتن این گونه سازه‌ها در برابر مخاطرات غیر طبیعی مانند انفجارهای بزرگ امری ضروری محسوب می‌گردد. به همین دلیل شبیه‌سازی و درک پاسخ دینامیکی این گونه مسائل از مفاهیم بسیار مهم در مهندسی پدافند غیرعامل به شمار می‌رود. در این راستا استفاده از روش‌های شبیه‌سازی عددی شیوه‌ای مناسب و ارزان برای تحلیل و مطالعه این دسته از مسائل می‌باشد. در مطالعه حاضر، تونل خط هفت مترو تهران به همراه توده خاک لایه‌بندی شده که تحت اثر انفجار سطحی خیلی بزرگ قرار دارد، توسط نرم‌افزار عددی المان محدود PLAXIS مدل‌سازی شده است. بارگذاری ناشی از انفجار توسط آیین‌نامه UFC محاسبه شده و محتوای فرکانسی سیگنال مربوطه توسط تبدیل فوریه به دست آمده است و سپس پاسخ تونل تحت اثر این بارگذاری به صورت پارامتریک بررسی و تنش‌های ایجاد شده در تاج و کف تونل محاسبه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که میرایی و نسبت پوآسون در بین پارامترهای مورد بررسی، به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر روی پاسخ تونل در برابر بارگذاری انفجاری دارند. همچنین ممکن است، تأثیر پارامترها در هر لایه بر روی پاسخ تونل متفاوت باشد.

واژگان کلیدی: انفجار سطحی، تونل مترو، مدل‌سازی عددی، سازه‌های زیرزمینی، تحلیل دینامیکی.

ارزیابی پاسخ دینامیکی تونل‌ها تحت اثر انفجار سطحی؛ مطالعه موردی: خط ۷ مترو تهران

محمد داودی

دانشیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

جمشید بغدادی (نویسنده مسئول)

همکار پژوهشی، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران،
Jamshid.baghdadi@gmail.com

جواد جلیلی

استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۱- مقدمه

آزمایشگاهی هزینه‌های چشمگیری را در بر خواهد داشت و همچنین انجام تحقیقات میدانی و صحرایی نیز از خطرات و محدودیت‌های زیادی برخوردار می‌باشد. از این رو بیشتر تحقیقات مرتبط با انفجار به صورت مدل‌سازی عددی انجام می‌پذیرد. لذا بررسی آثار انفجار به شیوه مدل‌سازی عددی بر روی سازه‌های زیرزمینی و ایمن نگاه داشتن آنها، توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، راهکارهای مختلفی برای حفاظت و کاهش خسارت به فضاهای زیرزمینی در برابر بارگذاری انفجاری توسط محققین زیادی پیشنهاد شده است. در این بین انجمن پدافند غیرعامل آمریکا در سال ۲۰۰۸ جهت نیل به این هدف سه روش مختلف را پیشنهاد نموده است. روش اول، محدود کردن مخاطرات زیان‌آور ناشی از انفجار می‌باشد که در این خصوص بایستی از آزادسازی مواد سمی و منفجره دیگر در نزدیکی محل

در سال‌های اخیر، با توجه به اهمیت استراتژیک ایران در منطقه غرب آسیا و همچنین نظر به گسترش سیستم‌های حمل‌ونقل مترو، بررسی پدیده‌های غیرطبیعی مانند انفجار و اثرات دینامیکی آن بر روی سازه‌های مدفون و با اهمیت زیاد مانند تونل‌های مترو، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است؛ لذا محافظت از این گونه سازه‌ها امری ضروری محسوب می‌گردد. در مناطق لرزه‌خیزی چون ایران، تمامی سازه‌ها (خصوصاً سازه‌های خاص) در برابر بار دینامیکی زلزله تحلیل و طراحی می‌شوند، اما به دلیل تفاوت‌های مهم در نوع بارگذاری ناشی از انفجار با بارگذاری زلزله، همچون دامنه ارتعاشات، محتوای فرکانسی، مدل رفتاری مصالح و مدت‌زمان اعمال بار، بررسی رفتار سازه‌ها از جمله سازه‌های زیرزمینی در چنین بارگذاری‌هایی، بررسی و تحلیل جداگانه‌ای می‌طلبد. جهت بررسی رفتار سازه‌ها در برابر امواج مکانیکی ناشی از انفجار انجام تست‌های

بحرانی که شامل منطقه تشکیل تغییر شکل‌های پلاستیک است، کمتر خواهد شد [۸]. بنابراین سنگ‌های سست و کم‌مقاومت گزینه مناسبی برای حفر فضاهای زیرزمینی امن در مقابل حمله‌های هوایی محسوب می‌شوند.

یکی دیگر از روش‌های محدود کردن مخاطرات زیان‌آور ناشی از انفجارها بر روی سازه‌های زیرزمینی، بهره‌بردن از مفاهیم میرایی (جذب و تضعیف انرژی موج)، امیدانس خاک و اصلاح پارامترهای دینامیکی خاک می‌باشد. خاک به‌عنوان یکی مهم‌ترین و مؤثرترین مصالحی است که قادر به میرایی و تضعیف انرژی موج ناشی انفجار می‌باشد. مفهوم امیدانس خاک نیز یکی از مشخصه‌های مهم دینامیکی خاک محسوب می‌شود که به‌صورت حاصل ضرب دانسیته خاک در سرعت موج برشی تعریف می‌گردد. به‌طور کلی، حداکثر دامنه تغییرات تنش یک سازه زیرزمینی مدفون در خاک‌های با امیدانس بزرگ‌تر، بیشتر خواهد بود. همچنین خاک‌های خشک دارای امیدانس کمتری نسبت به خاک‌های مرطوب می‌باشند؛ لذا مناسب است که سازه‌های مدفون امن در توده‌های خاکی نسبتاً خشک و با امیدانس کمتر ساخته شوند [۲].

از آنجایی که خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین مصالحی است که قادر به میرایی و تضعیف انرژی موج ناشی از انفجار محسوب می‌گردد [۵]، لذا جهت ساخت سازه‌های مدفون مانند لوله‌ها، شمع‌ها و تونل‌ها شناخت رفتار خاک‌های مختلف بر روی پاسخ این گونه سازه‌ها امری ضروری به‌شمار می‌رود. چنانچه دانسیته خاک تغییر یابد مقادیر سرعت صوت در خاک نیز دچار تغییر خواهد شد به‌نحوی که با افزایش دانسیته، سرعت صوت افزایش یافته و سپس با رسیدن در یک نقطه خاص، با افزایش دانسیته مقدار سرعت صوت ثابت باقی می‌ماند [۹]. همچنین در مورد پاسخ دینامیکی شمع‌ها در خاک‌های اشباع در برابر انفجار زیرزمینی تحقیقاتی در سال ۲۰۱۳ صورت گرفته است که نتایج آن نشان می‌دهد قسمت فوقانی شمع نسبت به قسمت تحتانی آن در برابر انفجار بسیار آسیب‌پذیرتر بوده و پاسخ شمع با افزایش فاصله از منبع انفجار به‌طور چشمگیر کاهش می‌یابد [۱۰]. این نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی پژوهشگران دیگر [۱۱] نیز مقایسه گردیده و

حادثه که پس از انفجار اصلی ممکن است آسیب‌زننده به سازه یا ساکنین آن باشد، جلوگیری به عمل آید؛ روش دوم، افزایش فاصله سازه مدفون از منبع انفجار می‌باشد به‌طوری که سازه مورد نظر می‌بایست به‌قدر کافی در فاصله‌ای دور از محل انفجار قرار داشته باشد و در روش سوم به احداث سازه‌های محافظ شامل پناهگاه‌های زیرزمینی، سازه‌های با المان‌های بسیار مقاوم و تعبیه سیستم‌های مقاوم بین سازه اصلی و عامل انفجار در اطراف و یا جلوی سازه‌های امن اشاره می‌گردد [۱]. فراهم کردن فاصله زیاد از منبع انفجار برای سازه‌های سطحی در صورت حملات ناگهانی قابل اجرا و پیش‌بینی نبوده و برای سازه‌های زیرزمینی نیز با افزایش عمق سازه در خاک، مستلزم هزینه زیاد می‌باشد؛ هرچند که با افزایش فاصله سازه از منبع انفجار، مقادیر پاسخ سازه کاهش خواهد یافت [۲-۴].

بسیاری از محققین جهت تحلیل انفجار بر روی فضاهای زیرزمینی، بررسی و تمرکز بر روی لایه‌بندی و نوع توده خاک در پیرامون سازه را پیشنهاد نموده‌اند که تأثیر چشمگیری بر روی پاسخ دینامیکی سازه خواهد داشت. نتایج پژوهشی در سال ۲۰۰۷ نشان می‌دهد که مقادیر حداکثر پاسخ بر روی سازه‌های مدفون در توده‌های سنگی و خاکی متفاوت است؛ زیرا نسبت میرایی در سنگ‌ها و خاک‌ها متفاوت می‌باشد به‌نحوی که نسبت میرایی در خاک‌ها بیشتر از سنگ‌ها در نظر گرفته می‌شود [۵-۶]. همچنین پژوهشی در سال ۲۰۱۰ به‌منظور بررسی تأثیر یک توده سنگی بر روی میرایی امواج صورت گرفته است که مشخص گردید در توده‌های سنگی معمولاً مفاصل طبیعی و ناپیوستگی‌هایی وجود دارد که به‌نوبه خود تأثیر قابل توجهی بر روی میرایی امواج خواهند داشت؛ به‌طوری که یک مفصل با سختی کمتر، درصد زیادی از امواج ناشی از انفجار را به علت قابلیت جذب انرژی بیشتر، منعکس می‌کند و سبب میرایی بیشتر در انرژی موج می‌گردد؛ اما چسبندگی و زاویه اصطکاک مفصل بر روی میرایی موج بی‌تأثیر هستند [۷]. در سال ۲۰۱۱ نتایج برخی پژوهشگران نشان می‌دهد که چنانچه فرض ناپیوسته بودن محیط‌های سنگی را بپذیریم، با کاهش پارامترهای مقاومتی توده سنگ مانند مدول ارتجاعی، تأثیر مخرب انفجار بمب سطحی بر روی توده سنگ و محیط اطراف کاهش یافته و عمق

مطابقت بسیار خوبی بین آنها مشاهده شده است. طی پژوهشی در سال ۲۰۱۰ رفتار لوله‌های مدفون در برابر انفجار مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن نشان می‌دهد که مقادیر جابه‌جایی در تاج لوله بیشتر از کف لوله می‌باشد؛ همچنین با تغییر زاویه اصطکاک خاک با توجه به جنس خاک، نتایج متفاوتی حاصل می‌گردد به نحوی که با افزایش زاویه اصطکاک در ماسه متراکم، جابه‌جایی تاج لوله کاهش می‌یابد؛ در حالی که با افزایش زاویه اصطکاک در ماسه نرم، جابه‌جایی در تاج لوله افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش مدول ارتجاعی خاک، مقدار تنش در لوله کاهش یافته اما با افزایش مدول ارتجاعی لوله، کرنش کم شده و باعث افزایش تنش در لوله می‌گردد [۱۲]. نتایج انفجارهای سطحی بر روی لوله‌های زیرزمینی از طریق آزمایش‌های ساترفیوژ نشان می‌دهند که مدلسازی با ساترفیوژ برای مطالعه ضربات ناشی از انفجار و به‌طور خاص جهت بررسی ابعاد گودال ایجاد شده در خاک و کرنش به وجود آمده در سازه‌ها بسیار سودمند است؛ نتایج مدل فیزیکی ساترفیوژ نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت لایه خاک پوششی بر روی لوله، مقدار کرنش در تاج لوله‌های مدفون در خاک کاهش می‌یابد [۳]. همچنین نتایج برخی محققین در سال ۲۰۱۲ در زمینه مقایسه نتایج فیزیکی ساترفیوژ و روش‌های عددی نشان می‌دهند که با افزایش وزن ماده منفجره اندازه قطر گودال ایجاد شده افزایش می‌یابد [۹]. نتایج پژوهشی در سال ۲۰۱۳ نشان می‌دهد که نوع خاک نیز بر روی قطر گودال و پاسخ سازه تأثیر گذار است به نحوی که حداکثر سرعت ذرات در خاک رس نرم نسبت به خاک رس سفت و خاک ماسه‌ای متراکم بسیار کمتر می‌باشد و به همین دلیل می‌توان بیان کرد که انفجار در خاک‌های ماسه‌ای متراکم خسارت‌های زیادی در ابنیه خاکی مانند شیروانی‌ها ایجاد می‌نماید و باعث ناپایداری آنها می‌گردد [۱۳].

پارامتری در برابر بارگذاری انفجاری و سطحی در توده خاک لایه‌بندی شده حقیقی که به‌عنوان یک طرح پژوهشی در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تعریف شده است، مورد بررسی قرار گیرد و در ادامه به معرفی خصوصیات توده خاک، مشخصات هندسی و پوشش بتنی تونل خط ۷ مترو تهران، نحوه مدلسازی، بررسی پارامتری برخی مشخصه‌های مهم و بحث در مورد نتایج به‌دست آمده، پرداخته می‌شود. شایان ذکر است که بارگذاری انفجاری سطحی که در این مطالعه مد نظر قرار گرفته است، لزوماً حادث‌ترین شرایط بارگذاری نیست و به دلیل استفاده از نرم‌افزار محیط پیوسته و عدم امکان مدلسازی ایجاد گسست در توده خاکی، به این مدل انفجار بسنده شده است.

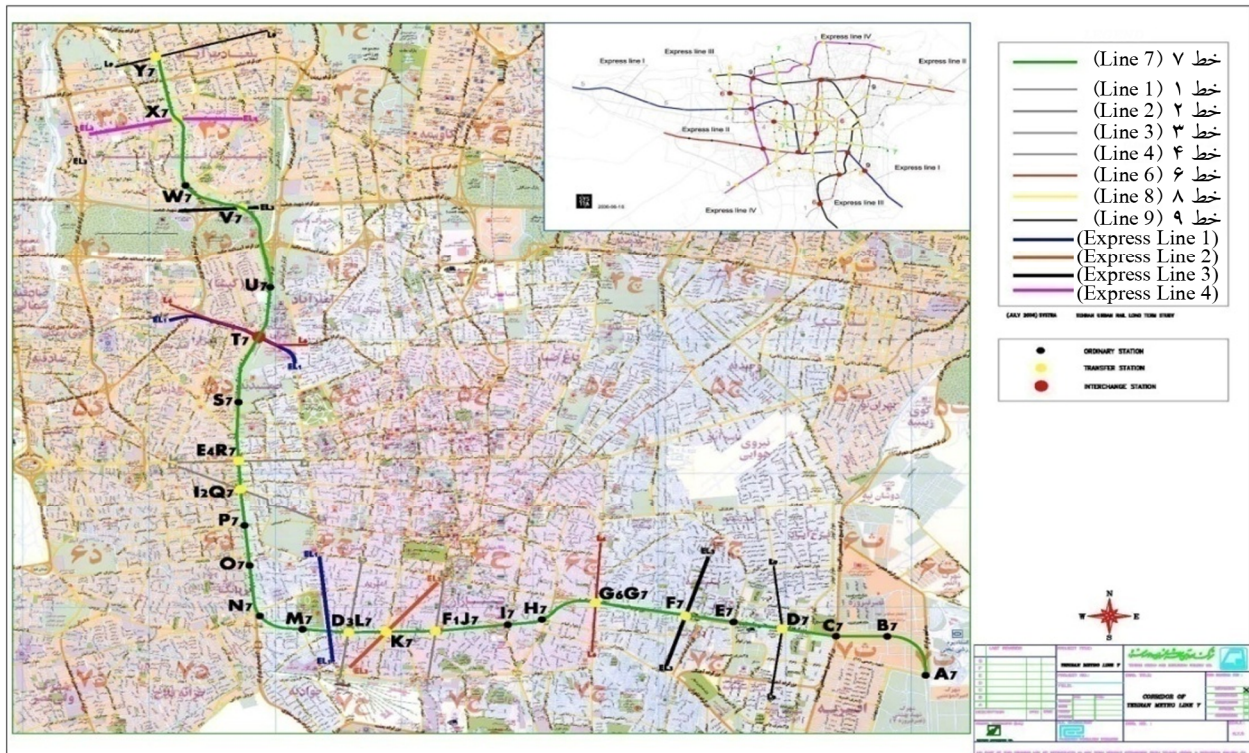
۲- معرفی مشخصات توده خاک و تونل

خط ۷ مترو تهران که در شکل (۱) مشخص است، از شهرک امیرالمؤمنین در شرق تهران شروع شده و پس از عبور از بزرگراه بسیج و امتداد یافتن در طول بزرگراه شهید محلاتی، مسیر آن در امتداد شمالی-جنوبی در طول بزرگراه نواب تغییر کرده و در نهایت تا میدان کاج ادامه می‌یابد. در این مطالعه خط ۷ مترو تهران حد فاصل ایستگاه Q7 و R7 در مسیر شمالی-جنوبی بزرگراه نواب مورد تحلیل دینامیکی در برابر بارگذاری انفجار قرار گرفته است. برای حفاری خط ۷ مترو تهران از ماشین حفاری تونل TBM استفاده شده و پس از انتقال در محل شفت ورودی، در عمق ۲۳ متری از زمین مونتاژ شده است. مشخصات مکانیکی و هندسی قطعات پیش‌ساخته بتنی (لاینینگ تونل) در جدول (۱) ارائه شده است. پروفیل خاک مطابق شکل (۲) مشخصات توده خاک منطقه در شرایط استاتیکی طی انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی تعیین و مطابق جدول (۲) می‌باشد.

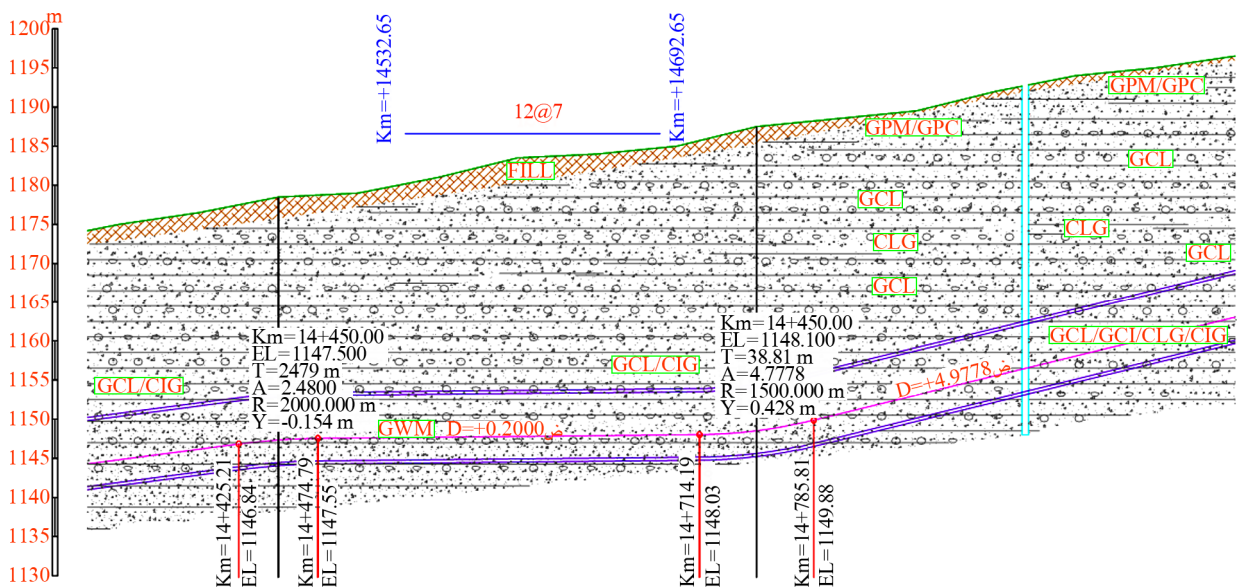
جدول (۱): مشخصات پوشش بتنی تونل.

پارامتر	مقدار
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	۳۰
چگالی (کیلو نیوتن بر متر مکعب)	۲۸
ضریب پواسون	۰/۲
قطر داخلی (متر)	۸/۱۵
قطر خارجی (متر)	۸/۸۵

چنانچه در پیشینه تحقیقات بیان شد، بیشتر مطالعات صورت گرفته در زمینه انفجار در توده‌های خاکی همگن و فرضی بوده و لذا بررسی انفجار در توده‌های خاکی لایه‌بندی شده و به‌صورت مطالعه موردی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق سعی شده است که پاسخ تونل خط ۷ مترو تهران به‌صورت



شکل (۱): نمای کلی خط هفت متروی تهران.



شکل (۲): نمای کلی پروفیل خاک.

دینامیکی خاک از روابط تجربی مربوط به خاک‌های دانه‌ای گرد گوشه همانند رابطه (۱) که وابسته به فشار همه‌جانبه و نسبت منافذ خاک می‌باشد و بر اساس نتایج آزمایش‌هایی مانند ستون تشدید و آزمایش‌های صحرایی مانند ژئوفیزیک سطحی تدوین گشته، استفاده شده است [۱۴].

از آنجایی که هدف این تحقیق، بررسی پاسخ دینامیکی تونل در برابر بارگذاری انفجاری است، پس استفاده از خصوصیات و پارامترهای دینامیکی خاک ضرورت بیشتری می‌یابد. از آنجایی که آزمایش‌های دینامیکی جهت تعیین مدول برشی خاک منطقه مورد نظر انجام نشده است، جهت به دست آوردن مدول برشی

جدول (۲): مشخصات استاتیکی خاک منطقه.

عمق لایه (متر)	۱۵-۰	۳۰-۱۵	۴۵-۳۰	۵۰-۴۵
جنس غالب لایه‌ها	خاک دستی، لایه‌های شنی	شنی با میان لایه‌های ماسه‌ای	شنی با میان لایه‌های ماسه‌ای	شنی و ماسه‌ای
چسبندگی (کیلونیوتن بر متر مربع)	۱۵	۲۵	۳۵	۴۰
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۴	۳۶	۳۸	۴۰
چگالی خشک (کیلونیوتن بر متر مکعب)	۱۷/۵	۱۸	۱۹	۱۹/۵
نسبت پواسون	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۳	۰/۳
مدول ارتجاعی (مگاپاسکال)	۱۳۰	۱۸۰	۲۵۰	۳۳۰

جدول (۳): مشخصات دینامیکی خاک منطقه [۱۴].

عمق لایه (متر)	۱۵-۰	۳۰-۱۵	۴۵-۳۰	۵۰-۴۵
جنس غالب لایه‌ها	خاک دستی، لایه‌های شنی	شنی با میان لایه‌های ماسه‌ای	شنی با میان لایه‌های ماسه‌ای	شنی و ماسه‌ای
چسبندگی (کیلونیوتن بر متر مربع)	۲۲/۵	۳۷/۵	۵۲/۵	۶۰
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۲	۳۴	۳۶	۳۸
چگالی خشک (کیلونیوتن بر متر مکعب)	۱۷/۵	۱۸	۱۹	۱۹/۵
نسبت پواسون	۰/۳۵	۰/۳۲	۰/۳	۰/۳
مدول ارتجاعی (مگاپاسکال)	۶۸۹	۹۵۱	۱۱۴۹	۱۹۸۵

۳- محاسبه بارگذاری ناشی از انفجار

در مطالعه حاضر، از انفجار محصور نشده در سطح زمین استفاده شده است و جهت محاسبه بارگذاری انفجاری از روابط نیمه تجربی ارائه شده در آیین نامه UFC 3-340-02 بهره گرفته شده است [۱]؛ این آیین نامه برای همه پروژه‌های مرتبط به حوزه پدافند کاربرد دارد و هدف اصلی آن ارائه روش‌های طراحی و تکنیک‌های ساخت سازه‌های مقاوم در برابر انفجار است. وزن محاسباتی ماده منفجره در این تحقیق ۵۱۰ پوند (۲۳۰ کیلوگرم) از نوع TNT در نظر گرفته شده است. با توجه به طبقه‌بندی شدت انفجار که در مراجع مختلف ارائه شده است [۱۵]، وزن ماده منفجره انتخابی در این تحقیق به عنوان انفجارهای خیلی بزرگ محسوب می‌گردد. وزن خرج ماده منفجره به نحوی انتخاب شده است که امکان مدل‌سازی بارگذاری ناشی از آن با توجه به محتوای فرکانسی حاصل شده مقدور باشد.

با به کارگیری روابط پیشنهاد شده در آیین نامه UFC مدت‌زمان تداوم انفجار ۱/۵۸ میلی ثانیه قابل محاسبه است. از

$$G = \frac{6908(2.17 - e)}{1 + e} \bar{\sigma}_0^{1/2} \quad (1)$$

در رابطه فوق G و $\bar{\sigma}_0$ به ترتیب مدول برشی دینامیکی و تنش محصور کننده بر حسب کیلو پاسکال و e نسبت منافذ می‌باشد. همچنین چسبندگی و زاویه اصطکاک دینامیکی مطابق روابط زیر محاسبه شده [۱۴] و همه خصوصیات دینامیکی لایه‌های خاکی مورد نظر در جدول (۳) قابل مشاهده است.

$$C_{Dynamic} \approx 1.5C_{Static} \quad (2)$$

$$\phi_{Dynamic} \approx \phi_{Static} - 2 \quad (3)$$

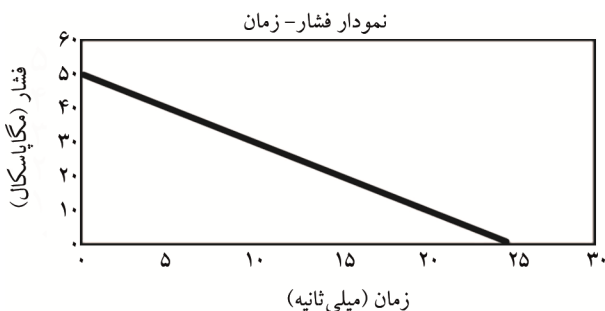
در روابط فوق $C_{Dynamic}$ و C_{Static} به ترتیب چسبندگی استاتیکی و دینامیکی خاک، $\phi_{Dynamic}$ و ϕ_{Static} نیز به ترتیب زاویه اصطکاک استاتیکی و دینامیکی خاک می‌باشند.

خاک منطقه مورد نظر تا عمق ۵۰ متری از چهار لایه خاک دانه‌ای مختلف تشکیل شده است که در این تحقیق تنها تغییر پارامترهای دو لایه فوقانی مورد توجه قرار گرفته است. شایان ذکر است که تونل خط ۷ مترو تهران در لایه دوم توده خاک قرار دارد.

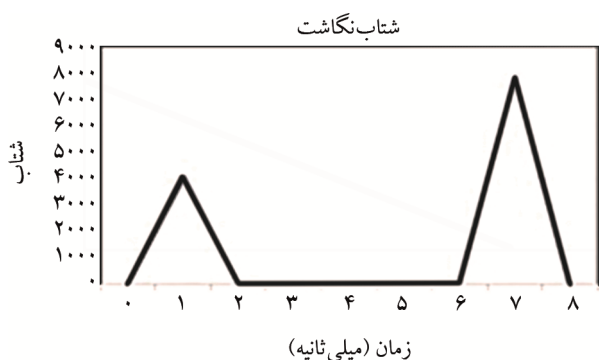
همچون UFC بر اساس روابط تحلیلی نبوده بلکه بر اساس روابط تجربی و آزمایش‌های متعدد تدوین شده است.

سیگنال ناشی از انفجار متشکل از دو فاز مثبت (فشار) و منفی (مکش) می‌باشد به طوری که اندازه فاز منفی در مقابل اندازه فاز مثبت انفجار بسیار ناچیز می‌باشد؛ لذا می‌توان از فاز منفی صرف نظر کرد.

با توجه به موارد بیان شده، می‌توان پالس مثلثی فشار-زمان ناشی از انفجار ۵۱۰ پوند TNT را مطابق شکل (۳) معرفی نمود. همچنین مطابق روابط ارائه شده در آیین‌نامه UFC شتاب‌نگاشت ناشی از انفجار شامل دو پیک شوک از هوا و شوک از زمین می‌باشد که ابتدا شوک از هوا رخ داده و پس از گذشت مدت زمانی اندک، شوک از زمین که دارای اندازه بیشتری می‌باشد، پدید می‌آید. مطابق پیشنهاد آیین‌نامه مدت زمان فرآز و فرود هر یک از این شوک‌ها یک میلی‌ثانیه می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان شتاب‌نگاشت ناشی از انفجار مورد نظر را همانند شکل (۴) ارائه نمود. شکل (۵) نیز محتوای فرکانسی بار ناشی از انفجار را نشان می‌دهد.



شکل (۳): بار محاسبه شده ناشی از انفجار [۱۷].



شکل (۴): منحنی شتاب-زمان ناشی از انفجار [۱۷].

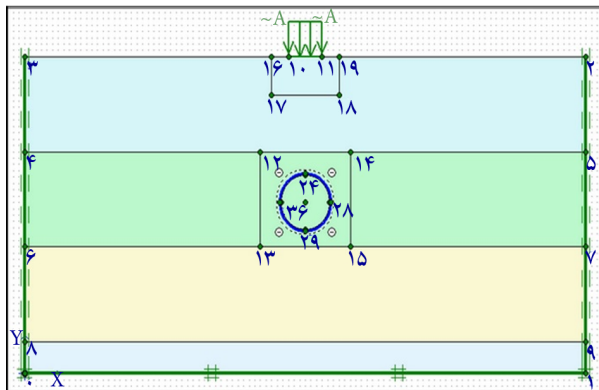
آنجایی که همواره بین مدت زمان تداوم سیگنال و حداکثر فرکانس موجود در آن سیگنال یک رابطه معکوس برقرار است، لذا در صورت کوچک بودن زمان تداوم، سیگنال دارای فرکانس بسیار بالایی خواهد بود. در این صورت برای انتقال صحیح موج در توده خاک، بایستی المان‌های بسیار کوچک ایجاد نمود که منجر به مدل‌های بسیار سنگین با زمان اجرای نامناسب با وسع زمانی این مطالعه می‌گردد. به عنوان مثال چنانچه مدت زمان تداوم سیگنال برابر با ۱/۵۸ میلی‌ثانیه انتخاب شود، سیگنالی با بیشینه محتوای فرکانسی در حدود ۲۵۰۰ هرتز ایجاد می‌گردد. با توجه به اینکه برای انتشار صحیح موج در مدل عددی بایستی حداکثر اندازه المان مش بندی برابر با یک‌دهم کوچک‌ترین طول موج سیگنال ورودی باشد [۱۶]؛ و با توجه به سرعت متوسط موج در توده خاک مورد بررسی در این مطالعه که برابر با ۴۰۸ متر بر ثانیه محاسبه شده است، حداکثر ابعاد مش بندی می‌بایست در حدود ۱/۶ سانتی‌متر انتخاب شود و با توجه به بزرگی ابعاد هندسه انتخاب شده در این مطالعه، تعداد المان‌های مش بندی بسیار زیاد بوده و برای انجام هر تحلیل زمان قابل توجهی مورد نیاز است؛ لذا جهت صرفه‌جویی زمانی در انجام تحلیل‌های متعدد، مقرون به صرفه است که به هر طریق ممکن و بدون ایجاد خطای فاحش در نتایج تحلیل، بتوان ابعاد مش‌ها را افزایش داد.

مطابق مطالعات پیشین در خصوص تأثیر مدت زمان تداوم سیگنال ناشی از انفجار سطحی، می‌توان دریافت که سیگنال‌های با مدت زمان تداوم بسیار کوتاه پاسخی بر روی سازه‌های زیرزمینی نخواهند داشت؛ لذا می‌بایست مدت زمان تداوم سیگنال به طور مناسب انتخاب گردد [۱۷].

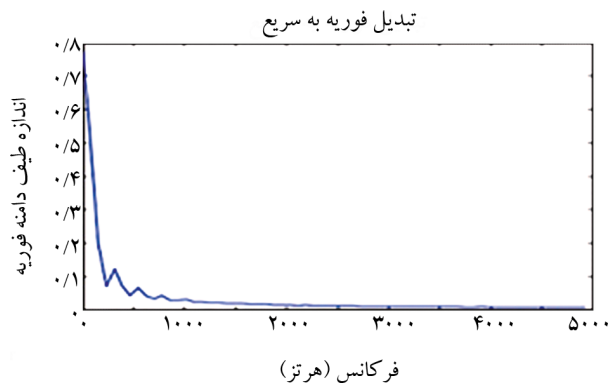
جهت حل مشکلات و محدودیت‌های ناشی از مدت زمان تداوم کوتاه، برخی از محققین پیشنهاد نموده‌اند که مناسب است مدت زمان تداوم سیگنال ناشی از انفجار در بررسی‌های عددی کمتر از ۲۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته نشود [۱۷]. هر چند این مقادیر با مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه UFC مطابقت ندارد، لیکن باید در نظر داشت که بخش عمده‌ای از مندرجات آیین‌نامه‌هایی

مطلوب، ممکن می‌گردد که در این صورت عرض مدل تقریباً ۱۲ برابر قطر تونل می‌باشد. جهت مدل‌سازی مسئله ابتدا لایه‌بندی توده خاک و مشخصات هر یک از لایه‌ها مطابق گزارش ژئوتکنیک معرفی گشته و سپس تونل مورد نظر در عمق ۲۳ متری از سطح زمین توسط دستگاه حفار (TBM) حفر شده است. با توجه به اینکه موج انفجار در هوای آزاد به صورت شعاعی منتشر می‌گردد، بنابراین تنها بخشی از این موج شعاعی با سطح زمین در تماس خواهد بود و مابقی در هوا منتشر می‌شود. در محدوده‌ای از سطح زمین که تحت اثر موج انفجار قرار می‌گیرد، گودالی ایجاد می‌گردد که قطر این گودال از رابطه (۴) قابل محاسبه است [۱۹].

در رابطه (۴)، D قطر گودال ایجاد شده در سطح زمین بر حسب متر و W وزن ماده منفجره بر حسب کیلوگرم می‌باشد. در این مطالعه از مدل‌سازی گودال ایجاد شده توسط موج انفجار صرف نظر شده و بارگذاری انفجار به صورت تاریخچه زمانی فشار همانند یک بار گسترده در محدوده‌ای از سطح زمین به اندازه قطر گودال اعمال شده است. علت صرف نظر کردن از مدل‌سازی گودال به صورت یک نیم‌دایره، فاصله زیاد از مرکز انفجار (تقریباً در سطح زمین) تا تونل مورد نظر است که تأثیر چندانی بر روی پاسخ تونل نخواهد داشت و لذا از رسم آن صرف نظر شده است. با توجه به رابطه (۴) و وزن محاسباتی ماده منفجره که در این تحقیق ۲۳۰ کیلوگرم است، قطر گودال ایجاد شده برابر با ۵ متر قابل محاسبه است که به صورت یک بار گسترده همانند شکل (۶) برای مدل تعریف شده است.



شکل (۶): شمایی از مدل عددی مسئله.



شکل (۵): محتوای فرکانسی سیگنال ورودی.

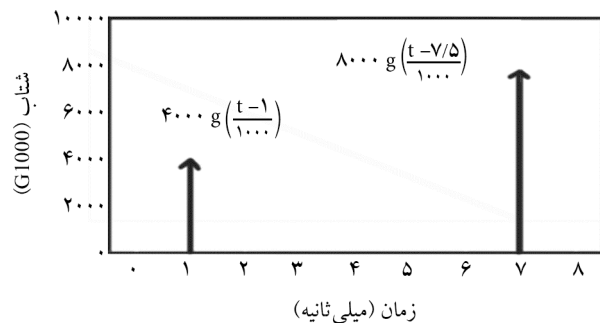
۴- نحوه مدل‌سازی عددی

برای تحلیل دینامیکی تونل خط ۷ مترو تهران از نرم‌افزار دو بعدی المان محدود پلکسیس PLAXIS که با نسخه اصلی ۲۰۱۶ صحت‌سنجی شده است و توانایی مدل کردن شرایط هندسی و مکانیکی مسئله مورد نظر را دارد، استفاده شده است. نرم‌افزار پلکسیس ابزاری توانمند و مفید برای بررسی پاسخ تونل‌ها در برابر بارها و پدیده‌های دینامیکی همچون انفجار می‌باشد [۱۸]. برای مدل‌سازی رفتار توده خاک نیز از مدل رفتاری الاستو پلاستیک موهر-کولمب که توان مدل‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیک را دارد، استفاده شده است.

$$D = 0.8W^{1/3} \pm 5\% \quad (4)$$

به دلیل نیاز به انجام تعداد زیاد تحلیل دینامیکی و زمان بر بودن تحلیل‌های دینامیکی سه‌بعدی، به تحلیل‌های دو بعدی اکتفا شده است. در واقع در تحقیق حاضر، مدل عددی تونلی با مشخصات ثابت هندسه مقطع و عدم تغییر مشخصات مصالح و بارگذاری در تونل مورد تحلیل قرار گرفته است. بدیهی است نتایج تحقیق حاضر برای حالت بارگذاری خطی انفجار دقت مناسب دارد در حالی که استفاده از این نتایج برای بارگذاری نقطه‌ای انفجار محافظه کارانه است. در این تحقیق جهت مدل‌سازی مسئله، ابتدا حساسیت ابعاد مدل بررسی شده است؛ به گونه‌ای که ابعاد هندسی مدل طوری انتخاب گشته که با افزایش آن، تغییرات چندانی در پاسخ تونل ایجاد نگردد و از تأثیر مرزهای مدل بر روی پاسخ کاسته شود. با انتخاب هندسه مسئله مورد نظر در ابعاد 100×50 متر شرایط

۸/۱۶ سانتی متر حاصل می‌گردد. به جهت صرفه‌جویی در زمان انجام تحلیل‌ها، در نواحی نزدیک به محل انفجار و تونل از مش با ابعاد ۲۰ سانتی متر بهره برده شده است. از آنجایی که محاسبه مساحت زیر نمودار شکل (۵) که بیانگر انرژی سیگنال است، بسیار دشوار می‌باشد، لذا جهت اطلاع یافتن از اینکه ابعاد مش ۲۰ سانتی متر حداکثر تا چه فرکانسی از سیگنال ورودی را به درستی از خود عبور می‌دهد و متعاقب آن چند درصد از انرژی کل سیگنال را پوشش می‌دهد، نیاز به روابط تحلیلی جهت بررسی محتوای فرکانسی می‌باشد. در این راستا جهت بررسی محتوای فرکانسی سیگنال شتاب-زمان که در شکل (۴) معرفی گشت، می‌توان از مفهوم ضربه استفاده نمود [۲۰-۲۱]. شبیه‌سازی این سیگنال به صورت ضربه منجر به نموداری همچون شکل (۷) می‌گردد.



شکل (۷): شبیه‌سازی سیگنال شتاب-زمان با ضربه [۲۰-۲۱].

بیان ریاضی نمودار شتاب-زمان شکل (۷) به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$a(t) = 4000\delta\left(\frac{t-1}{1000}\right) + 8000\delta\left(\frac{t-7.5}{1000}\right) \quad (۷)$$

از انتگرال‌گیری رابطه (۷) می‌توان انرژی کل سیگنال را در حوزه زمان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$E_{a(t)} = \int_{-\infty}^{+\infty} |a(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| 4000\delta\left(\frac{t-1}{1000}\right) + 8000\delta\left(\frac{t-7.5}{1000}\right) \right|^2 dt \quad (۸)$$

با حل انتگرال فوق مقدار انرژی کل سیگنال به صورت یک تابع زوج برابر با ۸۰ متر مربع بر ثانیه^۳ به دست می‌آید. واحد این

پس از اعمال بارگذاری ناشی از انفجار، مطابق پیشنهاد محققین پیشین، جهت کاهش انعکاس موج‌های تنشی از مرزهای مدل، از شرایط مرزی آرام یا ویسکوز، استفاده شده است [۱۶]. شایان ذکر است که مرزهای جاذب به تنهایی توانایی جذب کامل امواج برخوردی به آنها را ندارند و در عمل، امواج تقریباً موازی تابیده شده به مرزها به داخل مدل عددی منعکس می‌شوند. لذا با بزرگ نمودن هندسه مسئله، مشکل انعکاس موج‌ها از مرزهای جانبی کمتر در نتایج نمود پیدا می‌کند.

جهت انتشار صحیح موج در مدل، بایستی آنالیز حساسیت مش‌بندی نیز انجام پذیرد. چنانچه پیش‌تر نیز اشاره شد، کولمیر و لایزمر [۱۶] نشان دادند که برای حصول اطمینان از انتقال صحیح امواج، اندازه بزرگ‌ترین بعد المان ΔL ، به طور تقریبی بایستی کوچک‌تر از یک‌دهم تا یک‌هشتم طول موج مربوط به بزرگ‌ترین فرکانس بار ورودی باشد، به عبارتی:

$$\Delta L < \frac{\lambda}{10} \quad (۵)$$

که در آن λ طول موج ایجاد شده توسط بزرگ‌ترین مؤلفه فرکانس سیگنال ورودی به سیستم است که شامل انرژی بالایی می‌باشد. طول موج یک سیگنال را می‌توان مطابق رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\lambda = \frac{\bar{V}_s}{f} \quad (۶)$$

که در آن، \bar{V}_s سرعت متوسط موج برشی در توده خاک بر حسب متر بر ثانیه و f حداکثر فرکانس اثرگذار بار ورودی بر حسب هرتز است. از آنجایی که سرعت متوسط موج برشی در توده خاک برابر با ۴۰۸ متر بر ثانیه حاصل گردیده و با توجه به تبدیل فوریه مربوط به سیگنال شتاب-زمان ناشی از انفجار که در شکل (۵) ارائه شد، می‌توان بیان کرد که حداکثر فرکانس موجود در موج ناشی از انفجار که از دامنه تأثیرگذاری برخوردار می‌باشد، برابر با ۵۰۰ هرتز است؛ لذا تعیین ابعاد المان مش‌بندی، با توجه به حداکثر فرکانس ۵۰۰ هرتز صورت گرفته است. با توجه به روابط (۲) و (۳) طول موج سیگنال ورودی و حداکثر ابعاد المان مش‌بندی به ترتیب برابر با ۸۱/۶ و

۲۰۴ هرتز، ۴۴ درصد انرژی کل سیگنال را پوشش می‌دهد.

در روش اجزای محدود میرایی رایلی که وابسته به فرکانس است یک مدل مناسب محسوب می‌شود، زیرا اثرات میرایی را متناسب با جرم و سختی سیستم به مدل اعمال می‌نماید. این نوع میرایی در محدوده خاصی، مستقل از فرکانس می‌باشد. برای تعریف میرایی مصالح خاکی در مدل‌های عددی عموماً میرایی را در محدوده ۱ تا ۱۰ درصد میرایی بحرانی در نظر می‌گیرند [۲۲]. با توجه به نوع انفجار که به صورت بارگذاری سطحی به مدل اعمال شده است و نظر به اینکه محدوده قرارگیری تونل در عمق ۲۳ متری زمین می‌باشد و همچنین با اشاره به هدف گیری تحقیق حاضر که مبنی بر بررسی دقیق نتایج تحلیل دینامیکی در محیط اطراف تونل است (و نه در محدوده انفجار که تغییر شکل خاک به صورت پلاستیک می‌باشد)، لذا تغییر شکل خاک در این محدوده به صورت الاستیک خطی فرض شده است. از آنجایی که مقدار میرایی در محدوده رفتار خطی خاک بین ۳ تا ۵ درصد است، لذا میرایی خاک در این تحقیق برابر با ۳ درصد مفروض شده است.

۵- صحت‌سنجی نرم‌افزار

در بررسی‌های عددی، قبل از انجام تحقیق می‌بایست نرم‌افزار مورد نظر اعتبارسنجی گردد تا از صحت درست تحلیل کردن مسئله اطمینان حاصل شود. بهترین نوع صحت‌سنجی، بهره یافتن از روش‌های تحلیلی در حیطه مطالعاتی مد نظر می‌باشد. در این مطالعه جهت صحت‌سنجی نرم‌افزار پلکسیس علاوه بر مدل‌سازی یک مسئله خاص در زمینه انفجار [۲۴]، مدل‌سازی مسئله لمب نیز صورت گرفته است. لمب در سال ۱۹۰۴ بر روی انتشار موج در یک محیط الاستیک نیمه‌بی‌نهایت که تحت اثر یک نیروی دینامیکی از جنس ضربه در سطح زمین قرار دارد، مطالعه نموده است و حل تحلیلی آن با استفاده از معادلات تعادل دینامیکی توسط محققین زیادی صورت گرفته است [۲۳].

در این بخش نتایج حل تحلیلی مسئله لمب با نتایج عددی نرم‌افزار پلکسیس مورد مقایسه قرار گرفته است. ابعاد کلی مدل در نرم‌افزار پلکسیس به طول ۱۰۰ متر و به عمق ۳۰ متر می‌باشد.

مقدار مستقل از مفهوم انرژی فیزیکی بوده و استفاده از آن برای تعریف انرژی سیگنال مناسب است [۲۰]. چنانچه از رابطه شتاب-زمان در فرم ضربه تبدیل فوریه گرفته شود، نتیجه را می‌توان به فرم رابطه (۹) بیان نمود (در این رابطه فرکانس از هرتز به کیلوهرتز تبدیل شده است):

$$E_{a(t)} = \int_{-\infty}^{+\infty} |a(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} A(f) = 4000e^{-j2\pi f\left(\frac{1}{1000}\right)} + 8000e^{-j2\pi f\left(\frac{75}{1000}\right)} \quad (9)$$

در صورت ساده کردن رابطه فوق، رابطه (۱۰) حاصل می‌گردد:

$$A(f) = 4 * \sqrt{5 + \cos(13\pi f)} \quad (10)$$

حال می‌توان با مجذور اندازه طیف فوریه به تابع چگالی انرژی سیگنال به صورت زیر رسید:

$$|A(f)|^2 = 16 * (5 + 4 \cos(13\pi f)) \quad (11)$$

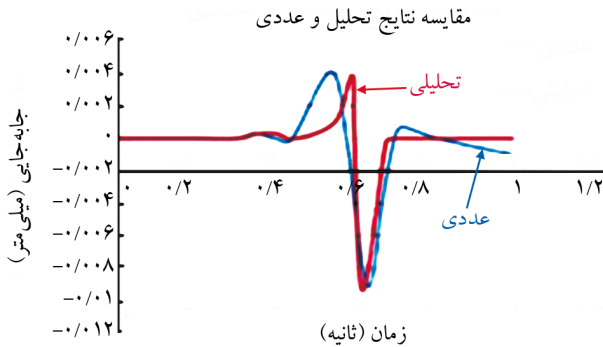
چنانچه از تابع چگالی انرژی در بازه صفر تا فرکانس مورد نظر به صورت زیر انتگرال گرفته شود، می‌توان مقدار انرژی سیگنال تا آن فرکانس مورد نظر را محاسبه نمود.

$$E_f = \int_0^f 16 * (5 + 4 \cos(13\pi f)) df \quad (12)$$

حاصل انتگرال فوق به صورت رابطه (۱۳) قابل محاسبه است (فرکانس بر حسب کیلوهرتز می‌باشد):

$$E_f = 16 * \left(5f + \frac{4}{13\pi} \sin(13\pi f) \right) \Big|_0^f \quad (13)$$

با شبیه‌سازی سیگنال شتاب-زمان به صورت یک پالس ضربه، شرایط سیگنال حادث می‌شود و انتظار می‌رود که مقدار انرژی تا یک فرکانس خاص که از رابطه فوق به دست می‌آید، بیشتر از واقعیت باشد. به کمک رابطه (۱۳) فرکانسی که شامل ۵۰ درصد انرژی سیگنال است برابر با ۲۵۰ هرتز محاسبه می‌شود. چنانچه از ابعاد مش ۲۰ سانتی‌متر استفاده گردد، این ابعاد مش، موج را تا محدوده فرکانسی ۲۰۴ هرتز به طور صحیح مطابق رابطه (۲) منتشر می‌نماید. با توجه به رابطه (۱۳)، سیگنال مورد بررسی تا محدوده فرکانسی



شکل (۱۰): مقایسه نتایج تحلیلی و نتایج پلکسیس.

۶- تحلیل دینامیکی خط ۷ مترو تهران

در تحقیق حاضر، مدول برشی دینامیکی خاک به دو صورت انتخاب شده است: در حالت اول از روابط نیمه تجربی موجود در ادبیات فنی برای مدول برشی دینامیکی استفاده شده است که دقیق ترین حالت ممکن می باشد. در حالت دوم از پارامترهای مدول برشی استاتیکی خاک استفاده شده که در واقع سعی شده فرض خطادار رایج در طراحی لرزه ای تونل ها توسط شرکت های مهندسی مشاور لحاظ شود. مقایسه فوق نشان می دهد که مقادیر مدول برشی دینامیکی بزرگ تر از مدول برشی استاتیکی است که توجه آن در بازه کرنش های مد نظر در اندازه گیری مدول خاک می باشد. نتایج تحلیل حاکی از اختلاف قابل توجه در حالت استفاده از دو سری پارامتر مدول برشی برای خاک است که لزوم توجه به محدوده کرنش مرتبط با مسئله مورد بررسی و استفاده از مدول حتی الامکان دقیق تر را تشدید می نماید.

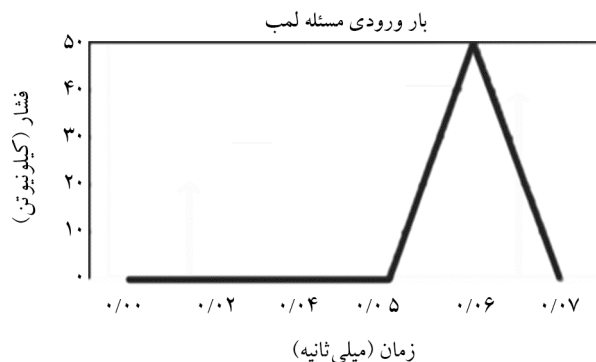
اطلاعات تکمیلی و نتایج مبسوط از این تحقیق علمی در پایان نامه کارشناسی ارشد که این مقاله از آن مستخرج شده است قابل مشاهده می باشد [۲۴].

۶-۱- بررسی دانسیته و مدول ارتجاعی خاک

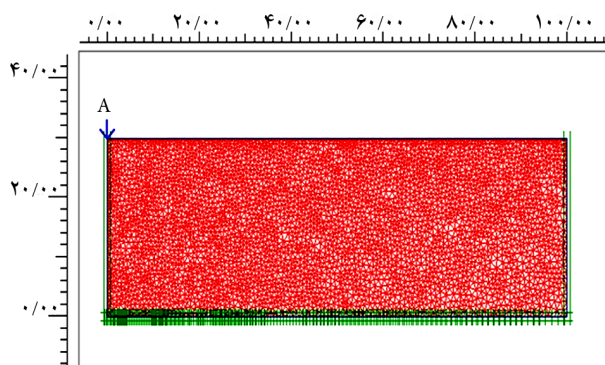
جهت بررسی تأثیر توده لایه بندی شده خاک به صورت پارامتری بر روی پاسخ تونل خط ۷ مترو تهران، تحلیل های عددی با لحاظ دو مقدار متناظر با حالت استاتیکی و دینامیکی برای مدول برشی خاک صورت گرفته است و نمونه ای از مقایسه این نتایج در شکل (۱۱) قابل مشاهده می باشد.

جهت تطبیق با شرایط حل تحلیلی، خاک به صورت الاستیک خطی با مدول یانگ ۵۰۰۰۰ کیلو پاسکال، نسبت پواسون ۰/۲۵، وزن مخصوص ۲۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب و ضرایب میرایی رایلی که متناسب با ماتریس جرم و سختی هستند به ترتیب برابر با ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۲ در نظر گرفته شده است. سطح خاک تحت اثر یک بار نقطه ای به صورت یک پالس مثلثی با دامنه ۵۰ کیلو نیوتن و مدت زمان تداوم ۲۵ میلی ثانیه قرار دارد. همان طور که در شکل (۸) مشخص است، محرک ورودی پس از گذشت ۵۰ میلی ثانیه به حداکثر مقدار خود که ۵۰ کیلو نیوتن است، می رسد. بعد از تعریف بار نقطه ای، مرزهای جاذب از نوع ویسکوز در قسمت پایین و سمت راست مدل، اعمال شده است.

شکل (۹) المان مش بندی و موقعیت نقطه A را جهت بررسی جابه جایی قائم که در سطح فوقانی خاک و در فاصله ۵۰ متری از محل بار گذاری قرار دارد را نشان می دهد. در شکل (۱۰) می توان مقایسه جابه جایی نقطه A ناشی از حل تحلیلی و حل عددی را مشاهده نمود که بیانگر تطابق بسیار خوب بین این دو روش است.



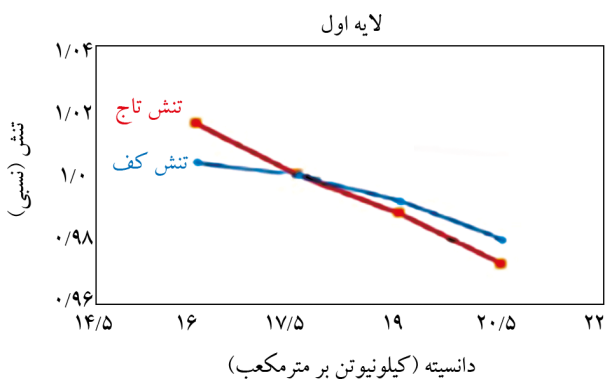
شکل (۸): بار ورودی برای مسئله لمب [۲۲].



شکل (۹): مش بندی مدل مسئله لمب.

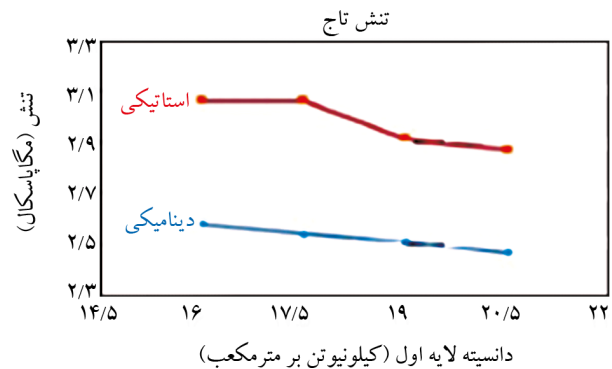
ارائه شده است. مقادیر پاسخ‌ها نیز نسبت به یک مقدار واحد بیان شده است که با تغییر در یک پارامتر خاص، تغییرات پاسخ تونل را بتوان به صورت درصد مشاهده نمود. در تمامی بررسی‌های صورت گرفته، با تغییر در خصوصیات خاک یک‌لایه مفروض، خصوصیات در دیگر لایه‌ها به طور کامل ثابت باقی مانده است.

مطابق شکل (۱۲) با افزایش دانسیته خاک لایه اول، تنش در تاج و کف تونل کاهش می‌باشد به طوری که کاهش تنش در تاج تونل با افزایش دانسیته خاک لایه اول بیشتر از کاهش تنش در کف تونل مشاهده می‌شود. این موضوع به علت تضعیف بیشتر موج در اثر عبور از تونل و توده خاکی در محدوده قطر تونل می‌باشد. از آنجایی که لایه اول که عموماً به عنوان لایه محافظ در برابر برخورد پرتابه و یا موج‌های ناشی از انفجار محسوب می‌شود [۵]، بنابراین هر چه این لایه به طریق افزایش دانسیته متراکم‌تر گردد، رفتار بهتری در میرایی موج دارد. هنگام برخورد موج به لایه اول، کرنش‌ها و جابه‌جایی‌های زیاد ایجاد می‌شود به نحوی که در لایه برخورد، گودال ناشی از موج انفجار شکل می‌گیرد. حال هر چه تراکم لایه اول بیشتر باشد انرژی بیشتری بایستی صرف ایجاد این تغییر شکل‌ها در خاک گردد، بنابراین با افزایش دانسیته لایه اول، بخش زیادی از انرژی موج تضعیف می‌شود.



شکل (۱۲): تأثیر دانسیته خاک لایه اول بر روی پاسخ تونل.

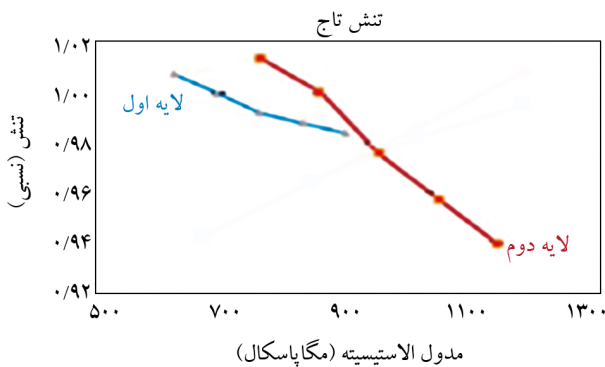
با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می‌گردد که با افزایش دانسیته خاک لایه دوم، مقدار تنش در تاج و کف تونل افزایش می‌یابد. از آنجایی که لایه خاک پیرامون تونل معمولاً جهت توزیع تنش عبور کرده از لایه اول به کار می‌رود؛ پس مناسب است که این لایه از



شکل (۱۱): مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی مدل عددی در دو حالت استفاده از مدول برشی استاتیکی و دینامیکی.

همان‌طور که در شکل مشخص است، روند تغییرات تنش کل بر حسب دانسیته خاک در هر دو مقدار استاتیکی و دینامیکی مدول خاک مشابه می‌باشد. با افزایش دانسیته خاک لایه اول، مقدار تنش کل در تاج تونل کاهش می‌یابد؛ با این تفاوت که مقادیر تنش در تاج تونل با پارامترهای استاتیکی بیشتر از پارامترهای دینامیکی است که این تفاوت ناشی از تفاوت مقادیر مدول ارتجاعی و برشی در این دو حالت می‌باشد. شایان ذکر است مقادیر مدول ارتجاعی و برشی خاک در حالت دینامیکی بیشتر از استاتیکی قابل محاسبه می‌باشد. این مقایسه نشان می‌دهد که در صورت انتخاب مقادیر نامناسب برای مدول تغییر شکل خاک، تونل بایستی برای تنش‌های بزرگ‌تری طراحی گردد که این موضوع در بارگذاری‌های انفجاری مقرون به صرفه نیست.

پارامتر دانسیته در مورد نوع خاک از حیث ریزدانه و یا درشت‌دانه بودن اطلاعاتی را در دسترس قرار می‌دهد، در حالی که مدول ارتجاعی بیشتر به سختی خاک مرتبط است؛ اما هر یک از این دو پارامتر بر روی تراکم‌پذیری خاک تأثیرگذار هستند، لذا اثر دانسیته و مدول ارتجاعی خاک بر روی پاسخ تونل به طور هم‌زمان بررسی خواهد شد. بدین منظور برای دانسیته و مدول ارتجاعی هر یک از دو لایه فوقانی خاک به ترتیب ۴ و ۵ مقدار مختلف در نظر گرفته شده است. در این حالت تمامی پارامترهای خاک ثابت بوده و تنها دانسیته و یا مدول ارتجاعی تغییر می‌نماید. جهت بیان نتایج از حداکثر پاسخ در هر تحلیل استفاده شده است و مجموعه این پاسخ‌ها در بررسی هر پارامتر به صورت یک نمودار

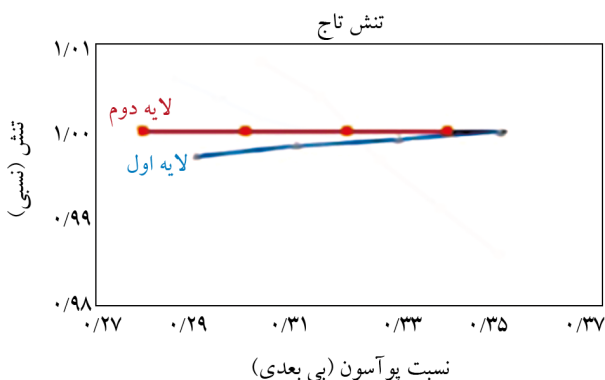


شکل (۱۴): تأثیر مدول ارتجاعی خاک لایه اول و دوم بر روی پاسخ تونل.

از آنجایی که با افزایش مدول ارتجاعی خاک، سختی خاک نیز افزایش می‌یابد لذا مقدار کرنش خاک کاهش می‌یابد؛ پس انتظار داریم با کاهش کرنش، تنش نیز کاهش یابد که این موضوع می‌تواند صحت نتایج عددی حاصل از بررسی مدول ارتجاعی خاک را تأیید نماید.

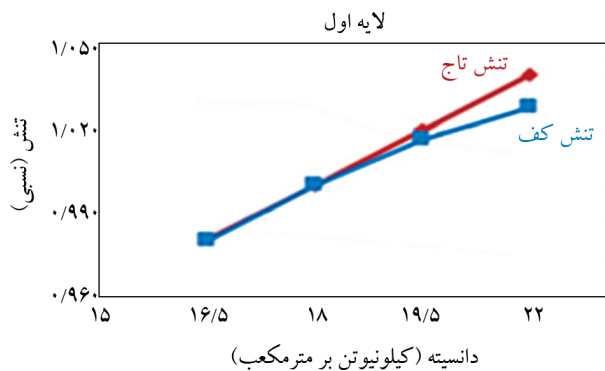
۲-۶- بررسی نسبت پواسون خاک

برای بررسی تأثیر نسبت پواسون خاک بر روی پاسخ تونل، برای هر یک از دو لایه فوقانی، چهار نسبت پواسون در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودار طیف پاسخ که در شکل (۱۵) قابل مشاهده است، با افزایش نسبت پواسون مقدار تنش در تاج تونل به‌طور جزئی افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده نمود که با افزایش نسبت پواسون لایه دوم خاک، مقدار تنش در تاج تونل ثابت باقی می‌ماند. همان‌طور که مشاهده می‌شود اثر نسبت پواسون بر روی پاسخ تونل بسیار ناچیز است.



شکل (۱۵): تأثیر نسبت پواسون خاک بر روی پاسخ تونل.

تراکم پذیری بیشتری برخوردار باشد تا بتواند در اثر تغییر شکل ذرات و متراکم شدن آن، توزیع تنش بهتر و استهلاک انرژی بیشتری داشته باشد؛ بنابراین افزایش تراکم پذیری خاک لایه دوم با کاهش دانسیته، گزینه مناسبی برای این لایه جهت افزایش میرایی موج و کاهش خسارت به تونل محسوب می‌شود. با توجه به شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت که رفتار لایه اول و دوم توده خاک در برابر موج ورودی متفاوت بوده به‌طوری‌که با افزایش دانسیته خاک لایه اول مقدار تنش بر روی تونل کاهش یافته در صورتی که با افزایش دانسیته خاک لایه دوم مقدار تنش بر روی تونل نیز افزایش می‌یابد.

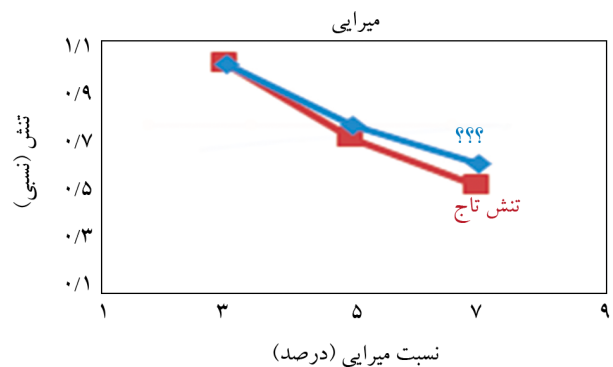


شکل (۱۳): تأثیر دانسیته خاک لایه دوم بر روی پاسخ تونل.

مدول ارتجاعی پارامتری است که از اهمیت بیشتری نسبت به دانسیته دارد. در شکل (۱۴) طیف پاسخ تاج تونل (تنش)، ارائه شده است. از طیف پاسخ کاملاً واضح است که با افزایش مدول ارتجاعی خاک لایه اول و دوم، تنش در تاج تونل کاهش می‌یابد. همچنین نتایج تحقیق صورت گرفته نشان می‌دهند که با افزایش مدول الاستیسیته خاک لایه دوم، مقدار تنش در تاج تونل کاهش بیشتری نسبت به تغییر مدول ارتجاعی لایه اول دارد؛ زیرا با افزایش مدول ارتجاعی خاک لایه دوم، امپدانس (حاصل ضرب دانسیته خاک در سرعت انتشار موج درون خاک) لایه دوم بیشتر می‌شود، در حالی که امپدانس لایه اول ثابت مفروض شده است، لذا در این حالت اختلاف امپدانس دو لایه افزایش یافته که این پدیده به مفهوم انعکاس بیشتر موج از لایه دوم می‌باشد. در نتیجه موج کمتری در لایه دوم منتشر شده و منجر به کاهش پاسخ بر روی تونل می‌گردد.

۳-۶- بررسی نسبت میرایی خاک

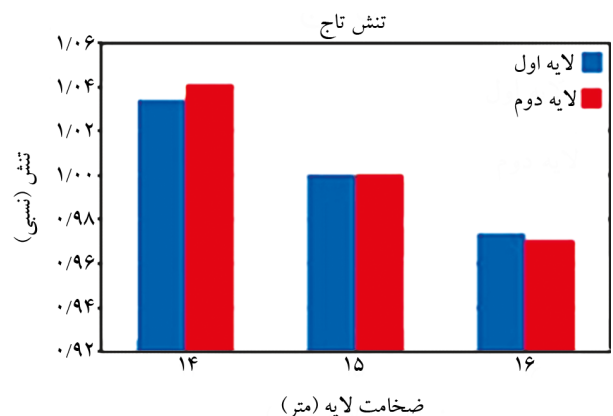
برای بررسی تأثیر میرایی توده خاک در محدوده خطی، سه نسبت میرایی ۳، ۵ و ۷ درصد در نظر گرفته شده است. با توجه به طیف پاسخ که در شکل (۱۶) ارائه شده است، مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت میرایی، مقدار تنش در تاج تونل به طور چشمگیر کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه با افزایش میرایی مصالح حاکی از ۳ به ۷ درصد، تنش در تاج و کف تونل به ترتیب ۵۰ و ۴۰ درصد کاهش می‌یابد.



شکل (۱۶): تأثیر میرایی خاک بر روی پاسخ تونل.

۴-۶- بررسی ضخامت لایه خاک

برای بررسی ضخامت لایه خاک، سه مقدار ۱۴، ۱۵ و ۱۶ متر برای دو لایه مورد بررسی در نظر گرفته شده است. یکی از شیوه‌های مرسوم و سنتی کاهش خسارت و ایمن نگاه داشتن ابنیه‌های زیرزمینی، افزایش ضخامت خاک لایه می‌باشد. از نتایج به دست آمده و مطابق شکل (۱۷) می‌توان بیان کرد که با افزایش ضخامت خاک لایه اول شاهد کاهش تنش در تاج تونل هستیم.



شکل (۱۷): تأثیر ضخامت خاک بر روی پاسخ تونل.

همچنین در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت خاک لایه دوم مقدار تنش در تاج تونل نیز به طور چشمگیر کاهش می‌یابد؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تغییر ضخامت خاک لایه دوم بر روی پاسخ تونل (تنش) تا حدودی بیشتر از تغییر ضخامت خاک لایه اول می‌باشد. به طور کلی افزایش ضخامت مصالح حاکی باعث میرایی بیشتر موج می‌گردد.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، رفتار دینامیکی تونل خط ۷ مترو تهران تحت بارگذاری انفجاری سطحی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا ۸۴ مدل عددی توسط یک نرم‌افزار المان محدود ساخته شد. محرک ورودی توسط آیین‌نامه ارتش آمریکا محاسبه و به صورت انفجار سطحی مدل‌سازی گشت. مدل‌سازی‌های مورد نظر هم با پارامترهای استاتیکی و هم با پارامترهای دینامیکی انجام شده و نتایج آنها نسبت به یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. به علاوه، تأثیر تغییر برخی پارامترهای مهم کلیدی در نحوه توزیع تنش و تغییر شکل بدنه تونل مورد مطالعه قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به طور خلاصه به شرح زیر می‌باشد:

۱. تأثیر برخی از خصوصیات خاک مانند دانسیته در هر یک از لایه‌های حاکی بر روی پاسخ تونل متفاوت و در برخی دیگر مانند مدول ارتجاعی یکسان می‌باشد. افزایش دانسیته خاک لایه اول و دوم به ترتیب باعث کاهش و افزایش پاسخ تونل می‌گردد اما با افزایش مدول ارتجاعی لایه اول و دوم خاک، پاسخ تونل در هر دو حالت کاهش می‌یابد.
۲. از بین مشخصه‌های خاک مورد بررسی از قبیل دانسیته، مدول ارتجاعی، نسبت پواسون، میرایی و ضخامت خاک، دو پارامتر میرایی و نسبت پواسون خاک به ترتیب بیشترین کمترین تأثیر را بر روی پاسخ تونل دارند.
۳. تغییر ضخامت خاک لایه مجاور تونل نسبت به تغییر ضخامت خاک لایه فوقانی تونل، تأثیر بیشتری بر روی پاسخ تونل دارد. علت این امر می‌تواند به خاطر نحوه توزیع تنش

محدودیت زمانی برای انجام این پژوهش نیز کاملاً محسوس بوده که منجر شد تا خیلی از بررسی‌ها و تحلیل‌های ارزشمند دیگر، مورد ارزیابی قرار نگیرد.

مراجع

1. DoD, U. (2008) *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*. US DoD, Washington, DC, USA. UFC 3-340-02.
2. Chen, H., et al. (2013) Dynamic responses of underground arch structures subjected to conventional blast loads: Curvature effects. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **13**(3), 322-333.
3. De, A., Zimmie, T.F., and Vamos, K.E. (2005) Centrifuge experiments to study surface blast effects on underground pipelines. ASCE. 362-370, De, A., Numerical simulation of surface explosions over dry, cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*, **43**, 72-79.
4. De, A. (2012) Numerical simulation of surface explosions over dry, cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*, **43**, 72-79.
5. Wang, Z.L., Li, Y.-C., and Wang, J. (2006) Study of stress waves in geomedia and effect of a soil cover layer on wave attenuation using a 1-D finite-difference method. *Computers and Geosciences*, **32**(10), 1535-1543.
6. Wang, Z.-l., et al. (2007) A study of tensile damage and attenuation effect of perforated concrete defense layer on stress waves. *Engineering Structures*, **29**(6), 1025-1033.
7. Wang, Z., Konietzky, H., and Shen, R. (2010) Analytical and numerical study of P-wave attenuation in rock shelter layer. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**(1), 1-7.
8. Qazvinian, A. and Rahmati, Sh. (2011) The effect of air bombs on underground structures. *Journal of Energetic Materials*, **VI**(2).
9. De, A. (2012) Numerical simulation of surface explosions over dry, cohesionless soil. *Computers and Geotechnics*, **43**, 72-79.
10. Jayasinghe, L.B., Thambiratnam, D.P., Perera, N.,

در لایه مجاور تونل باشد؛ زیرا لایه اول بیشتر به عنوان لایه محافظ رفتار می‌کند و وظیفه اصلی این لایه جلوگیری از نفوذ پرتابه یا نفوذ موج تنشی در توده خاک بوده در حالی که لایه دوم وظیفه توزیع تنش را به عهده دارد [۶].

۴. با افزایش اختلاف مدول الاستیسیته در دو لایه مجاور، می‌توان اختلاف امپدانس دو لایه را افزایش داد که در این صورت موج بیشتری از سطح مشترک دو لایه منعکس می‌شود؛ لذا موج کمتری وارد لایه دوم می‌گردد که منجر به کاهش پاسخ در سازه زیرزمینی خواهد شد.

۵. با توجه به نتایج حاصل شده در این تحقیق، می‌توان در بخش‌هایی از مسیر تونل متروهای شهری مانند ایستگاه‌ها که تردد و اجتماع افراد بسیار زیاد بوده و ایمن نگاه داشتن این فضاها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد، لایه‌بندی خاک پیرامون تونل را اصلاح نموده و از راهکارهای ارائه شده در این مقاله برای حفظ جان مسافران در برابر بارهای انفجاری استفاده نمود.

۸- محدودیت‌های پژوهشی در این مقاله

اولین و مهم‌ترین محدودیت پژوهشی در این مقاله، فقدان بانک‌های اطلاعاتی به شمار می‌رود. با توجه به مطالعه موردی در این مقاله (بررسی اثر انفجار بر روی تونل خط ۷ مترو تهران) اطلاعات دقیقی از مشخصات خاک خصوصاً مشخصات دینامیکی خاک در دسترس نبود. شرکت مشاوره مربوطه به دلیل حقوقی بودن قرارداد با کارفرمای خویش، از قرار دادن اطلاعات کامل از تست‌های آزمایشگاهی برای به دست آوردن مشخصه‌های دینامیکی خاک امتناع نموده که این محدودیت منجر شد تا برای به دست آوردن مشخصات دینامیکی خاک از روابط نیمه تجربی استفاده شود.

از دیگر محدودیت‌های این پژوهش، عدم امکان استفاده از نسخه اصلی نرم‌افزار پلکسیس می‌باشد. این موضوع حساسیت اعتماد نمودن به نرم‌افزار قفل شکسته را افزایش داده و لذا در روند صحت‌سنجی وقت و انرژی زیادی را به خود صرف نمود.

- layered half-spaces subjected to dynamic surfaceloads. *Wave Motion in Earthquake Engineering*, **192**.
24. Baghdadi, J. (Supervisors: Farrokhi, F., Davoodi, M., Advisor: Jalili, J.) (2015) *Investigations About the Effect of Modifying Soil Dynamic Parameters on the Seismic Response of Underground Holes Subjected to Blast Loads*. Master Thesis of Science in Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Zanjan University.
11. Shim, Hai-Shik (1996) *Response of Piles in Saturated Soil under Blast Loading*.
12. Olarewaju, A.J., Kameswara Rao, N., and Mannan, M.A. (2010) Response of underground pipes due to blast loads by simulation—an overview. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **15**, 831-852.
13. Sangroya, R. and Choudhury, D. (2013) Stability analysis of soil slope subjected to blast induced vibrations using FLAC3D. *ASCE, Reston, VA*, 472-481.
14. Das, Braja (2010) *Principles of Soil Dynamics*. Cengage Learning, second edition.
15. Bangash, M.Y.H. and Bangash, T. (2005) *Explosion-Resistant Buildings. Design, Analysis and Case Studies*. Springer Berlin Heidelberg New York.
16. Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. (1973) Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*
17. Olarewaju, A., Rao, N.K., and Mannan, M. (2011) Simulation and verification of blast load duration for studying the response of underground horizontal and vertical pipes using finite element method electronic. *Journal of Geotechnical Engineering*, **16**, 785-796.
18. de Jong, D.J. (2009) *Explosion Loads in Immersed Tunnels*. Thesis for M.Sc. Degree, Delft University of Technology.
19. Ambrosini, D. and Luccioni, B. (2007) *Craters Produced by Explosions above the Soil Surface*.
20. Chopra, A.K. (1995) *Dynamics of Structures*. Prentice Hall New Jersey.
21. Oppenheim, A.V., Willsky, A.S., Nawab, S.H. (1937) *Signals and Systems*. 2nd, Vol 1.
22. Hardin, B. (1992) The nature of damping in sands. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division (SM5, Proc Paper 490)*.
23. Foinquinos, R. and Roësset, J.M. (2001) Elastic

Evaluation of the Dynamic Response of Tunnels under the Effect of Surface Blast; Case Study: Line 7 of Tehran Metro

Mohammad Davoodi¹, Jamshid Baghdadi^{2*} and Javad Jalili³

1. Associate Professor, Geotechnical Engineering Faculty, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran
2. Research Fellow, Department of Geotechnical Engineering, Research Associate of International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran,
*Corresponding Author, email: Jamshid.baghdadi@gmail.com
3. Assistant Professor, Geotechnical Engineering Faculty, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

In a case study, behavior of an underground-railway tunnel of the Tehran metro subjected to tremendous explosive load was explored by numerical analysis. Blast wave propagation in the soil is studied by effective stress analysis in PLAXIS 2D finite element code. To assure reliability of the code in performing a robust dynamic calculation, Lamb Problem was modeled by the code and results were compared with analytical solutions, which was satisfactory. Due to the significant effect of the soil type and layering on the dynamic response of the buried structures in an explosive loading, care was taken in the study to resemble the real soil layering, relying on the available geotechnical investigations in the area. Based on the available data and also semi-empirical relations, HS Small soil model was calibrated to resemble soil behavior. In this regard, five parameters of density, elastic modulus, Poisson's ratio, damping ration and layer thickness were carefully defined for each layer. Semi-empirical relationships were used to calculate soil dynamic shear modulus, which were larger than the static shear modulus. HS Small model has the ability to resemble the cyclic behavior of the soil by applying Masing's rules in a load-unload-reload cycle. PLAXIS updates the stiffness matrix of the soil mass at each step of the analysis according to the strain and deformations that have been created in the soil, which increases the precision of the calculations. In this study, the Unified Facilities Criteria (UFC 3-340-03) manual was used to calculate the blast pressure. The weight of TNT explosive (charge weight) was considered 510 pounds (230 weight) in this regard. The type of explosion is assumed as an unconfined explosion, i.e., a surface burst. According to the UFC 3-340-03, the graph of changes of explosive pressure with time which is presented as a triangular pulse in the time domain, was defined in applied to the model geometry in the finite element code. Appropriate mesh dimensions relative to the transmitted wave-length in the numerical simulation play an important role in the precision of the results. Consequently, the frequency content of the pressure-time signal was probed in the frequency domain using the Fourier transform technique. To reduce the reflection of the waves from the model boundaries, viscous absorbent boundaries were defined in the model, as well as enlarging the model dimensions to reduce unwanted and unreal reflections from the boundaries of the model as much as possible.

After careful definition of the model geometry and loadings, both static and dynamic calculations were performed. The former simulated the construction of the underground tunnel, and the latter simulated the surface burst after tunnel construction, ignoring the crater caused by the explosion on the surface. The results show that the peak stress at the crown and bottom of the tunnel decreases as the soil density of the first layer increases, irrespective of static or dynamic values of the soil modulus. However, the stress values corresponding to the static parameters are greater than those of dynamic parameters. This comparison shows that if the static shear modulus values are preferred, the tunnel should be designed regarding larger stresses, which is not economical. Despite the decreasing effect of the first layer density on the stress magnitudes, the increase of the density of the second layer - that surrounds the tunnel- increases the stresses at the crown and bottom of the tunnel. The results also revealed that

the effect of Poisson's ratio of the soil on the tunnel's stresses are very small, but with the increase in the damping ratio, the amount of stress in the tunnel crown decreases dramatically. As the soil layers thicknesses increase, stress at the crown of tunnel decreases. These findings are useful to plan a safer design for crowded subway stations, regarding proper soil layering and properties.

Keywords: Surface Explosion, Subway Tunnel, Numerical Modeling, Underground Structures, Dynamic Analysis.