

مروری بر طراحی دینامیکی تونل‌ها به روش‌های تحلیلی و عددی

مقاله علمی - پژوهشی

واحد قیاسی، استادیار، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
شهاب کریمی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران
اسماعیل موسی پور، استادیار، گروه عمران، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: v.ghiasi@malayeru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

صفحه ۱۶۸-۱۵۵

چکیده

طراحی دینامیکی تونل‌ها و پاسخ دینامیکی آن‌ها تحت انواع بارهای لرزه‌ای و ارتعاشی یکی از موضوعات مهمی است که در چند سال اخیر توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. مناسب‌ترین روش برای بررسی اثرات بارهای لرزه‌ای و ارتعاشی بر تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی، روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی می‌باشند. در روش‌های عددی مانند روش اجزای محدود یا روش المان‌های مرزی ابتدا مسأله مدل‌سازی می‌شود و سپس مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. با مقایسه نتایج پژوهش‌ها در این زمینه می‌توان به این نتیجه رسید که به دلیل انعطاف‌پذیری پایین روش‌های تحلیلی در حل مسائل با هندسه و مشخصات مصالح پیچیده، ضرورت استفاده از روش‌های عددی به دلیل مزایای آن در حل مسائل پیچیده بیشتر احساس می‌گردد. هدف از انجام این تحقیق بررسی وضعیت پایداری تونل‌ها و سایر سازه‌های زیرزمینی در اثر ارتعاشات است که در هنگام طراحی باید به آن دقت ویژه‌ای شود.

واژه‌های کلیدی: طراحی دینامیکی تونل، روش‌های تحلیلی، مدل‌سازی عددی، تحلیل استاتیکی، تحلیل دینامیکی

۱- مقدمه

تونل‌ها موجب تحقیقات وسیع‌تری در زمینه ارزیابی اثر زلزله بر روی تونل‌ها شده است (آموروسی و بولدینی، ۲۰۰۹). تعدادی از تونل‌های ساخته شده، در نواحی لرزه خیز بنا شده‌اند. سه نوع از تغییرشکل‌ها پاسخ تونل به زمین‌لرزه را طبقه‌بندی می‌کنند که شامل تغییرشکل‌های فشاری و کششی محوری، تغییرشکل‌های خمشی طولی و تغییرشکل‌های بیضوی یا تخم مرغی می‌باشند (قیاسی و همکاران، ۲۰۱۴، ۲۰۱۲، ۲۰۱۱، ۲۰۱۰، ۲۰۲۲، ۲۰۲۱، ۲۰۱۸، ۲۰۱۷ و اسکول، ۱۹۸۱). پارامتری که بیشترین تاثیر را بر پوشش تونل تحت بارهای لرزه‌ای دارد، به استثنای مواردی که تونل مستقیماً تحت اثر گسلش دچار تغییرشکل برشی شود، تغییرشکل‌های بیضوی یا تخم مرغی است (پنزن، ۲۰۰۰). اصولاً ارتعاشات فقط بر اثر زلزله ایجاد نمی‌شوند، هرچند که زلزله سهم بیشتری در این ارتعاشات را دارا می‌باشد، ولی

تأسیسات زیرزمینی جز لاینفک جامعه‌ی مدرن بوده و برای کاربردهای متعددی شامل متروها، خطوط راه‌آهن، بزرگراه‌ها، انبار مصالح و انتقال آب و فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند (باباگلی، وحدانی، قدرتی امیری، ۲۰۱۳). تونل‌های انتقال آب، نیاز کلان شهرها به آب را برطرف ساخته یا در سدها به کار گرفته می‌شوند (عبادی و امیرافشاری، ۲۰۰۹). امروزه در اکثر شهرهای پرجمعیت احداث و توسعه گذرگاه‌های زیرزمینی نظیر متروها به عنوان راه‌حلی مناسب برای حل مشکل ترافیکی مورد توجه قرار گرفته است (علی‌اللهی، آدامپیرا، عسگری، ۲۰۱۶). سازه‌های زیرزمینی با توجه به شرایط گسترش و توسعه شهرها، به طور فزاینده‌ای ساخته شده و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. تونل‌ها یکی از مهمترین سازه‌های زیرزمینی هستند. خرابی‌های متعدد تونل‌ها تحت بارگذاری زلزله و به ویژه خسارات وارد بر

روانگرایی نیز زمانی رخ می‌دهد که تونل در رسوبات سست حاوی درصد بالایی ماسه و سیلت حفر شده باشد. این نوع آسیب بیشتر در رابطه با تونل‌های مترو که داخل رسوبات منفصل حفر شده‌اند دیده می‌شود. در شکل زیر نمونه‌هایی از این نوع خسارات مشاهده می‌شود. نمونه‌هایی از این نوع شکست در شکل ۱ نشان داده شده است (عبادی و امیرافشاری، ۲۰۰۹).

ج) ارتعاشات زمین: که معمولاً توسط زلزله ایجاد می‌شوند، صدمات سنگینی را به ورودی و خروجی تونل‌ها وارد می‌کنند. پاسخ تونل به ارتعاشات زمین (ناشی از زلزله) به متغیرهایی از قبیل شکل، ابعاد، عمق حفاری و خواص محیط در برگیرنده تونل وابسته می‌باشد. از عوامل مؤثر دیگر در بروز خسارات ناشی از زلزله، فاصله کانون زلزله تا تونل، شتاب زلزله و شدت یا بزرگی زلزله است (عبادی و امیرافشاری، ۲۰۰۹).

۳- تغییر شکل تونل‌ها در اثر ارتعاشات زلزله

تغییر شکل‌های ایجاد شده در تونل‌ها شامل سه نوع می‌باشد:

الف) تغییر شکل‌های محوری

ب) تغییر شکل‌های انحنایی

ج) تغییر شکل‌های بیضوی یا جانبی

تغییر شکل محوری با کرنش‌های فشاری و کششی همراه بوده و با عبور موج در طول محور تونل، جابجایی انجام می‌گیرد. تغییر شکل‌های انحنایی باعث ایجاد انحناهای مثبت و منفی در امتداد تونل می‌گردند. تغییر شکل‌های بیضوی یا جانبی نیز در اثر برخورد امواج به صورت عمودی یا تقریباً عمودی نسبت به محور تونل ایجاد می‌گردند. این نوع از تغییر شکل‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است (هشاش و همکاران، ۲۰۰۱).

جارامیلو در سال ۲۰۱۷ تونل‌های ساخته شده در ساختارهای سنگی تحت بارهای ناشی از زلزله را مورد بررسی قرار داده است (جارامیلو، ۲۰۱۷). جارامیلو از دو روش حل شکل‌های بسته و حل عددی برای آنالیز تونل در برابر بارهای ناشی از زلزله استفاده کرده است. با استفاده از نرم‌افزار FLAC6 (Itasca 1995) یک تحلیل دوبعدی برای تخمین پاسخ نگهدارنده تونل در برابر بارهای زلزله

حرکت قطارها در تونل‌های مترو و یا حرکت ماشین‌آلات در سطح زمین یا داخل تونل‌های راه و یا انفجارات سطحی و زیرزمینی ارتعاشاتی را به همراه دارد که در صورت عدم در نظر گرفتن آنها خسارت‌هایی از قبیل نشست سطح زمین را به دنبال خواهد داشت (عبادی و امیرافشاری، ۲۰۰۹). از طرفی بررسی وضعیت پایداری تونل‌ها و سایر سازه‌های زیرزمینی در اثر ارتعاشات، یکی از مسائل مهمی است که در هنگام طراحی باید به آن دقت ویژه‌ای شود (عبادی و امیرافشاری، ۲۰۰۹). مطالعات انجام گرفته در این زمینه به مطالعات آزمایشگاهی، میدانی، روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی دسته‌بندی می‌شوند. با توجه به اینکه آزمایش‌های مربوط به بارهای ارتعاشی مستلزم صرف هزینه‌های زیاد و تجهیزات خاصی است، امکان این مطالعات بسیار محدود است. با توجه به این محدودیت‌ها، روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های عددی مناسب‌ترین روش برای بررسی اثر بارهای ارتعاشی وارد بر تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی است (ناگی، محمد و بووت، ۲۰۱۰). این مقاله مروری است بر تحقیقات صورت گرفته در رابطه با طراحی دینامیکی تونل‌ها و پاسخ دینامیکی آنها تحت انواع بارهای لرزه‌ای و بررسی نتایج و یافته‌های به دست آمده که در چند سال اخیر توسط محققان صورت گرفته است.

۲- عوامل ایجاد خسارت ناشی از زلزله

عوامل ایجاد خسارت ناشی از زلزله بر تونل‌ها به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند (عبادی و امیرافشاری، ۲۰۰۹).

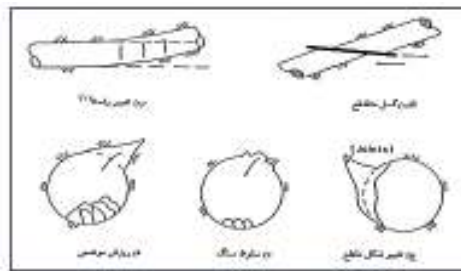
الف) لغزش گسل (ب) شکست زمین (ج) ارتعاشات زمین
الف) لغزش زمین: در این حالت خرابی زمانی رخ می‌دهد که تونل از منطقه گسلی عبور کند. در چنین وضعیتی خرابی به ناحیه گسلی محدود شده و خسارت ممکن است از ترک‌خوردگی جزئی پوشش تونل تا ریزش کامل سقف و دیواره‌های تونل تغییر کند (عبادی و امیرافشاری، ۲۰۰۹).

ب) شکست زمین: این حالت ممکن است منجر به پدید آمدن لغزش توده سنگ یا خاک، روانگرایی، فرونشست و پدیده‌هایی از این قبیل گردد. شکست زمین با ایجاد ناپوستگی در سنگ‌ها باعث کاهش مقاومت و چسبندگی در سنگ شده و ریزش و لغزش قطعات سنگ را به همراه دارد.

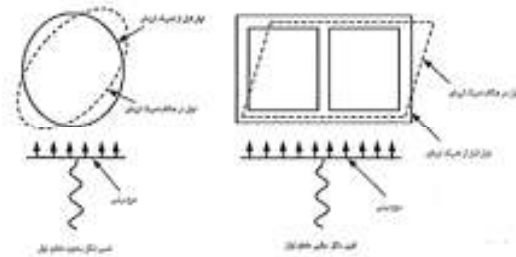
ارزش‌های فراوان مادی و معنوی آن‌ها چندین برابر خواهد بود (نوده‌فراهانی و همکاران، ۲۰۱۹). در اثر تنش‌های دینامیکی امواج لرزه‌ای این تنش‌ها به تنش‌های استاتیکی موجود افزوده می‌شوند و باعث ایجاد تنش‌ها و تغییر شکل‌های بیشتری در محیط پیرامون مقطع حفاری می‌گردند. چنانچه این موج به یک حفره زیرزمینی مانند تونل برخورد کند، به دلیل تغییر مشخصات خاک، قسمتی از موج تغییر مسیر داده و بخش دیگر در آن محیط انتشار می‌یابد، این پدیده را تفرق می‌گویند. به طور کلی روش‌ها برای تحلیل تفرق امواج زلزله به دو دسته کلی روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی تقسیم می‌شوند (نوده‌فراهانی، ۲۰۱۹).

انجام شده است که نتایج زیر بدست آمد: تخمین کرنشهای برشی و مقایسه آن با کرنشهای برشی بدست آمده از روش‌های تحلیلی و تعیین شکل بیضوی تونل که شامل کرنشهای بیضوی می‌باشد (جارامیلو، ۲۰۱۷).

حفر تونل و دیگر فضاهای زیرزمینی منجر به حذف بخشی از توده خاک و بروز تغییرات قابل توجهی در وضعیت تنش به خصوص در هنگام وقوع زلزله می‌گردد. از جمله نتایج این دست‌خوردگی‌ها وقوع کرنش‌هایی در توده خاک است. با این تفاسیر بررسی تأثیرات تونل‌ها چه در زمان حفاری و چه در زمان بهره برداری و به ویژه به هنگام وقوع زلزله بر روی سازه‌های مجاور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که این اهمیت در نزدیکی ابنیه تاریخی با توجه به



شکل ۱. نمونه‌هایی از خسارات ناشی از شکست زمین (عبادی و امیرافشاری، ۲۰۰۹)



شکل ۲. تغییر شکل حلقه‌ای (هشاش و همکاران، ۲۰۰۱)

۴- تحلیل دینامیکی تونل‌ها و بررسی اندرکنش پوشش تونل‌ها و محیط اطراف تحت بارگذاری لرزه‌ای

گرفتن اندرکنش پوشش بتنی و توده سنگ اطراف در دو شرایط لغزش کامل و بدون لغزش نیروی محوری و لنگر خمشی وارد بر مقطع تونل مورد ارزیابی واقع می‌شود (عبادی و امیرافشاری، ۲۰۰۹). اندرکنش بین پوشش بتنی و توده سنگ توسط دو نسبت تراکم‌پذیری و انعطاف‌پذیری در محاسبات اعمال می‌شود. پاسخ سیستم نگهداری تونل در برابر بارهای لرزه‌ای، تابعی از نسبت انعطاف‌پذیری، نسبت

پیش‌بینی نیروی محوری و لنگر خمشی در پوشش تونل در اثر تغییر شکل تا شدگی تحت تحریک لرزه‌ای برای ارزیابی پایداری سازه‌های پوشش در هنگام زلزله امری ضروری است. در تحقیقی که توسط عبادی و امیرافشاری انجام شده است تأثیر زلزله بر سازه‌های زیرزمینی و طراحی نگهداری بر اساس بارهای دینامیکی انجام شده است که با روش ساده‌شده حل شکل‌های بسته و روابط ونگ و با در نظر

هستند به ترتیب توسط روابط (۱) و (۲) تعریف می‌شوند (هشاش و همکاران، ۲۰۰۱).

$$F = \frac{E_s(1-\nu_f^2)r^3}{6E_I l(1+\nu_s)} \quad (۱)$$

$$C = \frac{E_s(1-\nu_f^2)r}{E_I t(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \quad (۲)$$

دست می‌آید. سپس با جایگزین کردن بار زلزله به صورت تنش برشی خالص (γ_{max}) روابط مربوط به تغییرشکل، نیروی محوری و لنگر خمشی در پوشش به دست می‌آیند. روابط ونگ برای دو حالت لغزش کامل و بدون لغزش به صورت زیر نوشته می‌شود (ونگ، ۱۹۹۳).

الف) حالت لغزش کامل: با در نظر گرفتن خواص خیلی پایین (چسبندگی و زاویه اصطکاک کم) برای سطح تماس، بیشترین مقدار نیروی محوری (T) از رابطه (۳) و لنگر خمشی (M) از رابطه (۴) بدست می‌آیند (ونگ، ۱۹۹۳).

$$T = \frac{1}{6} K_1 \frac{E_s}{(1+\nu_s)} r \gamma_{max} \cos^2 \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (۳)$$

$$M = \frac{1}{6} K_1 \frac{E_s}{(1+\nu_s)} r^2 \gamma_{max} \cos^2 \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (۴)$$

در روابط (۳) و (۴)، θ زاویه المان موردبررسی بر روی پوشش با جهت محور X ها است. K_1 به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$K_1 = \frac{12E_s(1-\nu_s)}{2F+5-6\nu_s} \quad (۵)$$

ب) حالت بدون لغزش: با در نظر گرفتن خواص خیلی بالا (چسبندگی و زاویه اصطکاک بالا) برای سطح تماس، بیشترین مقدار نیروی محوری (T) از رابطه (۶) و لنگر خمشی (M) از رابطه (۷) بدست می‌آیند (ونگ، ۱۹۹۳).

$$T = K_2 \tau_{max} r = K_2 \frac{E_s}{2(1+\nu_s)} r \gamma_{max} \cos^2 \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (۶)$$

$$M = \frac{1}{6} K_1 \frac{E_s}{(1+\nu_s)} r^3 \gamma_{max} \cos^2 \left(\theta + \frac{\pi}{4} \right) \quad (۷)$$

در رابطه (۶) K_2 به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود:

$$K_2 = 1 + \frac{F[(1-2\nu_s)(1-2\nu_s)C] - 0.5(1-2\nu_s)^2 + 2}{F[(3-2\nu_s) + (1-2\nu_s)C] + C \left[\frac{5}{2} - 8\nu_s + 6\nu_s^2 \right] + 6 + 8\nu_s} \quad (۸)$$

۴۲/۶ و ۸۵/۲ و برای شرایط بدون لغزش، ۷۱/۴ و ۸۵/۲ به دست آوردند (عبادی و امیرافشاری، ۲۰۰۹). نسبت

قابلیت فشرده‌شدن سازه، فشار برجای روبراه (γh) و متغیرهای دیگر می‌باشد. نسبت انعطاف‌پذیری (F) و نسبت قابلیت فشرده‌شدن (C) که از کمیت‌های موثر در روابط

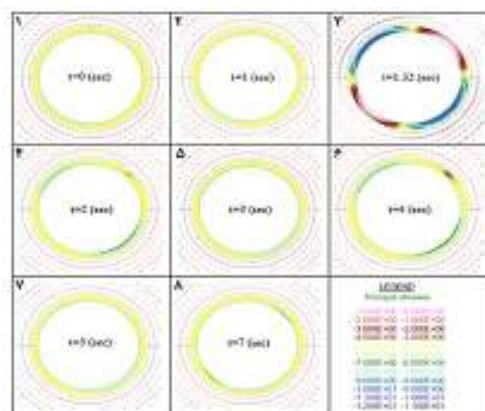
در روابط (۱) و (۲)، E_I مدول الاستیسیته پوشش، ν_I نسبت پواسون پوشش، E_s مدول الاستیسیته محیط اطراف، ν_s نسبت پواسون محیط اطراف، I ممان اینرسی پوشش تونل (در واحد عرض) و t ضخامت پوشش است. ضریب انعطاف‌پذیری F بیانگر تفاوت سختی بین زمین و پوشش بوده و در واقع بیانگر قابلیت اندرکنش پوشش با محیط پیرامون می‌باشد (هشاش و همکاران، ۲۰۰۱).

به عنوان نمونه، روش تحلیلی ونگ بر اساس حل روابط ایری برای پوشش دایروی در شرایط استاتیکی به

عبادی و افشاری با استفاده از روابط ونگ، نیروی محوری و لنگر خمشی را برای حالت لغزش کامل به ترتیب

به بررسی انعطاف پذیری پوشش تونل با محیط اطراف بر تنش‌های ایجاد شده در بارگذاری زلزله با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی پرداخته شده است. تونل مورد مطالعه در این تحقیق تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه خانه شماره ۶ تهران به منظور تامین آب شرب تهران می‌باشد (بصیرت، سالاری راد و ملاداوودی، ۲۰۱۵). در بررسی تغییرات تنش، پس از اتمام بارگذاری لرزه‌ای مشاهده شد که حالت تنش در اطراف فضای حفاری و در پوشش یکپارچه تغییر چندانی نکرده است، بلکه فقط مقدار تنش‌ها تغییر یافته است. این موضوع در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳-۱ تا ۳-۸ تغییرات تنش در اطراف فضای حفاری در هر یک ثانیه و همچنین زمان اوج بارگذاری در حالت واقعی نشان می‌دهد (بصیرت، سالاری راد و ملاداوودی، ۲۰۱۵).

انعطاف‌پذیری نمایان‌گر توانایی پوشش بتنی در برابر ارتعاش حاصل از زلزله می‌باشد. در حقیقت میزان نسبی سختی تونل نسبت به محیط اطراف خود توسط نسبت‌های تراکم‌پذیری (C) و انعطاف‌پذیری (F) در روابط گنجانده شده است. آن‌ها دریافتند که هرچه نسبت انعطاف‌پذیری کمتر باشد، میزان انحراف و شکست در تونل بالا رفته و این امکان وجود دارد که تغییرشکل حاصل از شکست تونل تا سطح زمین ادامه یابد. می‌توان درکل این نتیجه را گرفت که پوشش بتنی تونل در مقاوم سازی سازه در برابر ارتعاشات زلزله بسیار مهم است (عبادی و امیرافشاری، ۲۰۰۹). در تحقیق مشابه دیگری که توسط بصیرت و همکاران انجام شده است اندرکنش سیستم نگهداری تونل‌ها با محیط اطراف تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است (بصیرت، سالاری راد و ملاداوودی، ۲۰۱۵). در این تحقیق



شکل ۳. تغییرات تنش در پوشش یکپارچه تحت بارگذاری لرزه‌ای در حالت واقعی (بصیرت، سالاری راد و ملاداوودی، ۲۰۱۵)

بدون لغزش و در نتیجه انعطاف‌پذیری کمتر آن است. در نهایت با توجه به شکل دایره‌ای تونل مورد بررسی، تغییرشکل بیضوی در آن مشاهده شد. به عبارت دیگر در دو قطر متعامد، کرنش‌های نرمال اعمالی از نظر جهت متفاوت بوده و لذا تونل به شکل بیضی تغییرشکل می‌دهد (بصیرت، سالاری راد و ملاداوودی، ۲۰۱۵). باباگلی و همکاران راه حل‌های تحلیلی برای نیروی محوری و لنگرخمشی در پوشش تونل مدور به علت تغییرشکل ناشدگی تحت بارگذاری لرزه‌ای را مورد بررسی قرار دادند و اختلاف در میان راه‌حل‌های موجود در نیروی محوری و لنگرخمشی برای شرایط فصل مشترک بدون لغزش مورد ارزیابی قرار

مقایسه نتایج روش عددی و تحلیلی: در نهایت برای اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی عددی، این نتایج با روش‌های تحلیلی ونگ (ونگ، ۱۹۹۳) و پارک (پارک و همکاران، ۲۰۰۹) مقایسه شده‌اند. بر اساس تحلیل دینامیکی انجام شده، نتایج روش‌های تحلیلی ونگ و پارک و روش عددی مطابقت خوبی تحت شرایط لغزش کامل و بدون لغزش در حالت پوشش یکپارچه داشتند. همچنین سایر نتایج حاکی از آن است که تنش‌های اصلی ناشی از بارگذاری لرزه‌ای تا ۲/۷ برابر در حالت بدون لغزش بیشتر از حالت لغزش کامل در پوشش یکپارچه است (بصیرت، سالاری راد و ملاداوودی، ۲۰۱۵). این امر به دلیل سختی بیشتر سطح تماس در حالت

نیروی محوری و لنگر خمشی پوشش در اثر تغییر شکل تاشدگی تحریک لرزه‌ای در شرایط فصل مشترک بدون لغزش تشریح شده است (باباگلی، وحدانی و قدرتی امیری، ۲۰۱۳).

برای ارزیابی کرنش زاویه‌ای یا اعوجاج سازه، نسبت اعوجاج (تاشدگی) پوشش-خاک به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود (هشاش و همکاران، ۲۰۰۱).

$$R = \frac{\Delta_{structure}}{\Delta d_{free-field}} \quad (9)$$

که R نسبت تغییر شکل قطری پوشش به تغییر شکل نظیر در حالت میدان آزاد است.

احتمالی است (سعیدی عباس‌آباد، موسوی و نژاد شاه‌محمد، ۲۰۱۳).

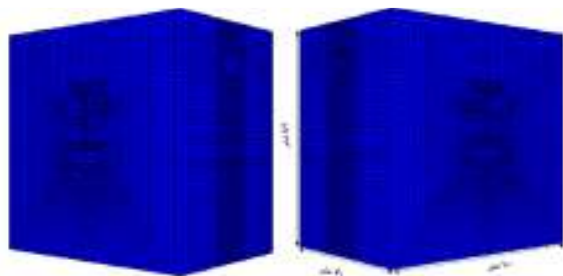
پروژه خط ۴ متروی تهران در راستای شرقی-غربی، تهران-پارس را به شهرک اکباتان متصل می‌کند. این تونل در مسیر خود با تونل توحید و تونل خط ۷ مترو تقاطع غیرهم‌سطح دارد. حفاری تونل در محل تقاطع با استفاده از روش حفاری NATM انجام می‌شود (سعیدی عباس‌آباد، موسوی و نژاد شاه‌محمد، ۲۰۱۳). به منظور لحاظ کردن اندرکنش سازه‌های مجاور و تاثیر آن‌ها در تحلیل دینامیکی، هر یک از تونل‌ها و ایستگاه‌های موجود در تقاطع غیرهم‌سطح مدل شده است. به دلیل ماهیت مسأله (وجود تقاطع غیرهم‌سطح و عمود بر هم) و پیچیدگی فضاهای حفاری شده، مدل‌سازی‌ها به صورت سه بعدی و با استفاده از نرم افزار FLAC 3D انجام شده است. در شکل ۴ نمای سه بعدی مدل نشان داده شده است. همچنین با توجه به اطلاعات و مدل‌های موجود در نرم افزار، مدل رفتاری موهر-کولمب برای مدل در نظر گرفته شده است (سعیدی عباس‌آباد، موسوی و نژاد شاه‌محمد، ۲۰۱۳). تحلیل دینامیکی تونل خط ۴: برای شبیه‌سازی بار زلزله‌ی منطقه، سه شتاب نگاشت طبس، بم و چنگوره-آوج با بیشترین شتاب ۰/۳۵ گرانس انتخاب شده است. شکل ۵ نحوه‌ی بارگذاری و شرایط مرزی موجود در FLAC 3D برای پایه قابل انعطاف را نشان می‌دهد (سعیدی عباس‌آباد، موسوی و نژاد شاه‌محمد، ۲۰۱۳).

گرفته است. در تحلیل‌های انجام شده تاثیر پارامترهای مختلف مانند مدول کشسانی، نسبت پواسون و ضخامت پوشش، سرعت موج برشی خاک، نسبت پواسون خاک و شعاع تونل، بر نیروی محوری و لنگر خمشی پوشش تونل بررسی شده است (باباگلی، وحدانی و قدرتی امیری، ۲۰۱۳). در این پژوهش سه راه‌حل تحلیلی پنزن (پنزن، ۲۰۰۰)، ونگ (ونگ، ۱۹۹۳) و بوبت (بوبت، ۲۰۰۳) برای برآورد بیشترین

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که روش ونگ لنگر خمشی بزرگتری را نسبت به سایر روش‌ها تخمین می‌زند. همچنین روش پنزن بیشترین نیروی محوری را بصورت غیرمعمولانه‌ای پایین‌تر از سایر روش‌ها برآورد می‌کند، بنابراین، پیشنهاد می‌شود، روش پنزن برای برآورد نیروی محوری پوشش تونل در شرایط بدون لغزش بکار برده نشود (باباگلی، وحدانی، قدرتی امیری، ۲۰۱۳).

در تمامی تحلیل‌ها با افزایش مدول کشسانی پوشش، ضریب پواسون پوشش، ضخامت پوشش و سرعت موج برشی خاک، نسبت انعطاف‌پذیری و نسبت تاشدگی کاهش می‌یابد، اما با افزایش شعاع تونل نسبت انعطاف‌پذیری و نسبت تاشدگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت پواسون خاک، این نسبت ثابت می‌ماند (باباگلی، وحدانی، قدرتی امیری، ۲۰۱۳).

در تحقیقی دیگر تحلیل دینامیکی تونل خط ۴ متروی تهران در تقاطع غیرهم‌سطح با تونل توحید و تونل خط ۷ مترو تهران در برابر بارهای ناشی از زلزله مورد بررسی قرار گرفته است (سعیدی عباس‌آباد، موسوی و نژاد شاه‌محمد، ۲۰۱۳). از آنجا که این تونل‌ها در محیطی خاکی قرار دارند، محیط اطراف تونل به صورت محیط معادل پیوسته در نظر گرفته شده و تحلیل‌های عددی این پژوهش با استفاده از نرم افزار FLAC 3D انجام شده است. هدف از تحلیل دینامیکی تونل در برابر بار زلزله بررسی پایداری تونل و سامانه‌ی نگهداری آن در برابر لرزش‌های ناشی از زلزله‌های



شکل ۴. نمای سه بعدی از مدل تونل‌های خط ۴ و ۷ متروی تهران و تونل توحید (سعیدی عباس‌آباد، موسوی و نژاد شاه‌محمد، ۲۰۱۳)



شکل ۵. نحوه بارگذاری و شرایط مرزی موجود در **FLAC 3D** برای پایه قابل انعطاف

(سعیدی عباس‌آباد، موسوی و نژاد شاه‌محمد، ۲۰۱۳)

زلزله‌های طرح طیس، بم و چنگوره-آوج محاسبه شده است. مشخصات مربوط به هر ۳ زلزله طرح در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین بیشترین تنش برشی در پوشش نهایی تونل خط ۴ متروی تهران برای زلزله‌های طرح چنگوره آوج، بم و طیس به ترتیب ۱/۵۹۴، ۳/۲۰۷ و ۳/۰۴۲ محاسبه شده است (سعیدی عباس‌آباد، موسوی و نژاد شاه‌محمد، ۲۰۱۳).

در **FLAC 3D** بار ورودی دینامیکی را می‌توان به صورت تاریخچه‌ی سرعت، تنش و یا نیرو اعمال نمود. برای اعمال بارگذاری زلزله به پایه‌ی مدل و با توجه به وجود مرز ویسکوز در پایه‌ی مدل، می‌توان تاریخچه‌ی سرعت را با فرض شرایط موج صفحه‌ای به تاریخچه‌ی تنش تبدیل نمود (Itasca 1995). نیروی محوری - لنگرخمشی : در این تحقیق نتایج لنگرخمشی و نیروی محوری تونل خط ۴ برای

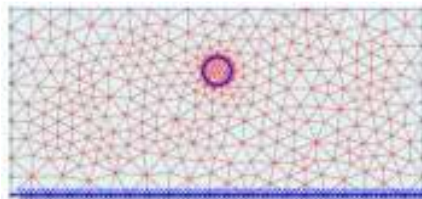
جدول ۱. دامنه حرکات زمین برای زلزله‌های اصلاح شده در مدل‌سازی (سعیدی عباس‌آباد، موسوی و نژاد شاه‌محمد، ۲۰۱۳)

زلزله طراحی	بیشترین شتاب (g)	بیشترین سرعت ($\frac{m}{s}$)	بیشترین جابجایی (m)	زمان حرکات نیرمند (s)
طیس	۰/۸۵۲	۱/۲۱۳	۰/۹۴۵	۱۵/۸
بم	۰/۸۱۴	۱/۲۱۶	۰/۸۹۸	۹/۷
چنگوره - آوج	۰/۵۰۹	۰/۲۹۵	۰/۶۹۴	۸

تونل خط ۴ برابر ۱/۵ است. پوشش نهایی تونل مذکور در برابر تنش برشی اعمالی توسط هر سه زلزله طیس، بم و چنگوره آوج دارای مقاومت کافی است. ضریب ایمنی پوشش نهایی تونل خط ۴ برابر ۲/۸۹ می‌باشد (سعیدی عباس‌آباد، موسوی و نژاد شاه‌محمد، ۲۰۱۳).

نتایج بدست آمده در این تحقیق حاکی از آن است که همواره لنگرخمشی، نیروی محوری و تنش برشی در نیمه بالایی تونل مقادیر بیشتری را نسبت به رکوردهای ثبت شده در نیمه پایینی بدست می‌دهند (سعیدی عباس‌آباد، موسوی و نژاد شاه‌محمد، ۲۰۱۳). همچنین، بر اساس تحلیل و با استفاده از نمودار اندرکنش بتن، ضریب ایمنی پوشش نهایی

شده که تونلی با قطر ۶/۶ متر و ضخامت ۳۰ سانتیمتر در عمق ۱۵ متری از سطح قرار گرفته است. جهت جلوگیری از بازگشت امواج، خصوصیت مرزهای جاذب به مرزهای قائم اختصاص داده شده است. نمای کلی از این مدل در شکل ۶ نشان داده شده است (بشارت و بلوری بزاز، ۲۰۱۴). جهت مدلسازی زلزله در مدل عددی از تاریخچه زمانی بدست آمده از تحلیل سایت متروی تبریز استفاده شده که برای تحلیل دینامیکی موجود، ۱۰ ثانیه اول این شتابنگاشت مورد استفاده قرار گرفته است (بشارت و بلوری بزاز، ۲۰۱۴). جهت تحلیل دینامیکی تونل از نرم افزار PLAXIS V8.2 استفاده شده است. در این تحقیق ابتدا تونل مینا که مشخصات آن از تونل متروی تبریز گرفته شده تحلیل شده و سپس بر روی پارامترهای موثر خاک و سازه، آنالیز حساسیت انجام گرفته است (بشارت و بلوری بزاز، ۲۰۱۴).



شکل ۶. نمای کلی مدل تونل در تحلیل عددی به همراه نحوه المان بندی (بشارت و بلوری بزاز، ۲۰۱۴)

$a_{max} = 0.5g$ اختلافی بین نتایج تحلیل مشاهده نمی‌شود ولی با افزایش a_{max} این اختلاف بیشتر می‌شود. نتایج تحلیل برای دو مدل رفتاری موهر کولمب و خطی ارتجاعی در آنالیز حساسیت نسبت میرایی نشان می‌دهد که اختلاف موجود بین دو روش با افزایش میرایی کاهش می‌یابد به طوری که بیشترین اختلاف در میرایی ۵ درصد است (بشارت و بلوری بزاز، ۲۰۱۴).

در آنالیز حساسیت پارامتر زاویه اصطکاک داخلی مشخص گردید که نرخ کاهش نیروهای دینامیکی با افزایش زاویه اصطکاک، با کاهش مواجه است و از $\theta = 30^\circ$ به بعد، تغییرات نیروی برشی و لنگر خمشی ناشی از بارگذاری دینامیکی تقریباً ثابت شده است. با بررسی تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در دو عمق ۱۵ و ۷ متری نیز مشخص گردید که هر چه عمق دفن تونل کمتر و یا به عبارتی تونل سطحی‌تر باشد، درصد تغییرات و ارزش پارامتر زاویه اصطکاک داخلی خاک کمتر خواهد بود (بشارت و بلوری بزاز، ۲۰۱۴).

بشارت و بلوری بزاز تحلیل دینامیکی تونل‌های دایروی شهری و اثر عوامل محیطی بر رفتار متفاوت این سازه‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند (بشارت و بلوری بزاز، ۲۰۱۴). در این تحقیق، ابتدا به چگونگی انتخاب پارامترهای دینامیکی خاک همچون مدول برشی دینامیکی و نیز میرایی پرداخته شده است و سپس نحوه انجام تحلیل دینامیکی تونل‌های دایروی توسط مدل عددی توضیح داده شده است. تحلیل دینامیکی برای تونلی خاص برای دو مدل رفتاری خطی ارتجاعی و نیز موهر کولمب انجام گرفته و نتایج با هم مقایسه شده‌اند و اثرات تغییرات زاویه اصطکاک داخلی خاک، مدول برشی حداکثر و نیز میرایی خاک مورد بررسی قرار گرفته است (بشارت و بلوری بزاز، ۲۰۱۴).

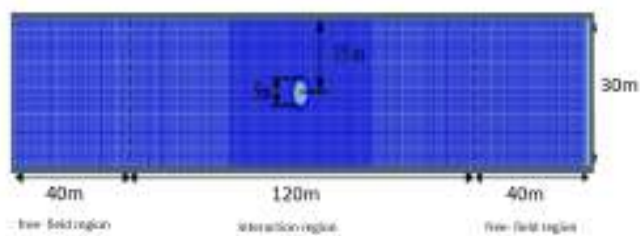
برای ایجاد یک مدل جهت تحلیل دینامیکی از هندسه‌ای با ابعاد 40×100 متر برای عرض و ارتفاع استفاده

مدول برشی به دست آمده در این مطالعه 44818 کیلو نیوتن بر متر مربع محاسبه شده است که با کرنش 0.162 درصد سازگاری دارد. همچنین از یک میرایی یکسان برابر ۵۰ درصد در نظر گرفته شده در طراحی تونل مینا استفاده شده است. همچنین در تحلیل دینامیکی تونل مینا مقادیر نیروها و لنگر ایجاد شده در پوشش نهایی تونل که فقط توسط بارگذاری دینامیکی ایجاد شده، در دو حالت مدل رفتاری خطی و مدل رفتاری موهر کولمب محاسبه شده است (بشارت و بلوری بزاز، ۲۰۱۴). در این تحقیق اثر تغییرات شتاب حداکثر بر پوشش نهایی تونل، تغییرات خصوصیات خاک بر رفتار لرزه‌ای تونل، تاثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر مقادیر تحلیل و همچنین ضخامت پوشش نهایی تونل بر رفتار لرزه‌ای آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده به شرح ادامه می‌باشد.

با مشاهده نتایج تحلیل برای دو مدل رفتاری موهر کولمب و خطی ارتجاعی در حالت تغییرات شتاب حداکثر، مشخص گردید که برای مدل مینای این محاسبات تا حدود

با روش‌های تحلیلی مقایسه شده‌اند (روزی‌طلب و همکاران، ۲۰۱۷). در این تحقیق تاثیر نقش لایه‌بندی زمین بر پاسخ لرزه‌ای لاینینگ تونل‌های با مقطع دایره‌ای در یک توده‌ی خاک با ضخامت ۳۰ متر در شرایط کرنش صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۷). نتایج مشخص می‌کند که شرایط لایه بندی زمین، به ویژه تعداد لایه‌ها، نقش مهمی در شرایط تاثیر نیروهای زلزله برخوردارند به لاینینگ تونل ایفا می‌کند. مدل‌ها نشان دادند زمانی که تونل به طور کامل در یکی از دو لایه‌ی خاک همگن متوالی قرار گرفته باشد، نیروی لرزه‌ای ایجاد شده در لاینینگ تونل در مقایسه با حالتی که فقط یک لایه خاک داشته باشیم، بسیار متفاوت است. همچنین اگر تونل از درون هر دو لایه‌ی همگن بگذرد، بیشترین شدت نیروی وارد بر پوشش تونل زمانی اتفاق می‌افتد که لایه‌ی خاک همگن پایینی میزان سختی بالایی داشته باشد (روزی‌طلب و همکاران، ۲۰۱۷).

۳- با مقایسه‌ی نتایج حاصل از آنالیز حساسیت بر روی پارامتر ضخامت پوشش، مشخص گردید که با افزایش ضخامت پوشش، نیروهای ایجاد شده در آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی نمودار تغییرات نیروهای دینامیکی ایجاد شده در پوشش نسبت به تغییرات نسبت انعطاف‌پذیری، مشخص گردید که با افزایش نسبت انعطاف‌پذیری یعنی کاهش سختی پوشش، نرخ کاهش نیروهای دینامیکی نیز کاهش می‌یابد. همچنین مشخص گردید که همواره با افزایش عمق دفن تونل، مقادیر تنش و کرنش کلی افزایش می‌یابد بررسی مقادیر نیروهای دینامیکی در این تحقیق نشان می‌دهد که هر چه تونل عمیق‌تر باشد در برابر نیروهای زلزله امن‌تر است (بشارت و بلوری بزاز، ۲۰۱۴). در تحقیقی دیگر پاسخ لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای کم عمق در زمین‌های لایه‌ای همگن با استفاده از نرم افزار ABAQUS به صورت عددی مدلسازی شده است و نتایج



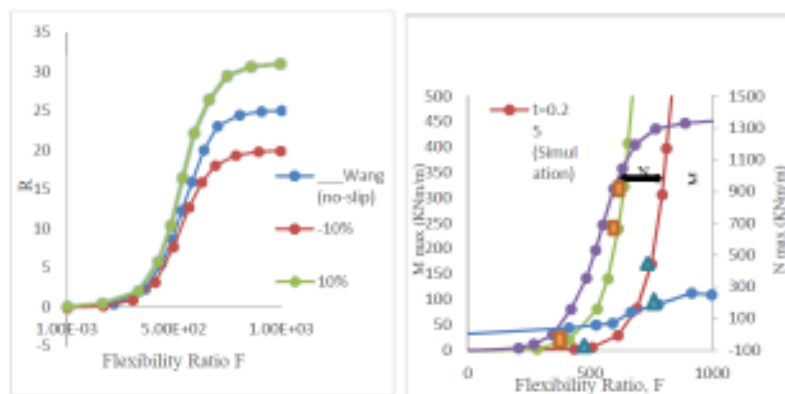
شکل ۷. شبکه اجزا محدود (روزی‌طلب و همکاران، ۲۰۱۷)

زمین حاکی از آن است که خاک از درجه بندی نرم تا سفت متغیر است (روزی‌طلب و همکاران، ۲۰۱۷). در این تحقیق، برای مقایسه‌ی مدل عددی با راه‌حل تحلیلی ونگ، نیروی برشی استاتیکی از طریق اعمال یک بار استاتیکی افقی در گره‌های سطح، بر مدل وارد می‌شود. شکل ۸ نتایج آنالیزهای عددی و تحلیلی مورد مقایسه نتایج حداکثر لنگر خمشی، حداکثر نیروی محوری و تغییر شکل پوشش تونل (R) در زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور افقی را با یکدیگر مقایسه کرده است (روزی‌طلب و همکاران، ۲۰۱۷).

مدل اجزا محدود از یک ناحیه مرکزی برای شبیه سازی اندرکنش تونل و زمین و نیز دو ناحیه‌ی جانبی که پاسخ سطح آزاد زمین را شبیه‌سازی می‌کند، تشکیل شده است. در سطح آزاد زمین تمام گره‌ها در عمق‌های یکسان دارای جابجایی افقی یکسانی هستند و جابجایی عمودی مقید شده است. ناحیه‌ی برهم‌کنش جایی است که خاک و تونل بر هم اثر می‌کنند. بنابراین، درجه آزادی حرکتی در گره‌ها در دو جهت قائم و افقی کاملاً آزاد می‌باشد. زمین و تونل هردو با استفاده از مدل الاستیک خطی تک فازی شبیه‌سازی شده‌اند. خواص مواد در جدول (۲) آورده شده است. خواص مصالح

جدول ۲. خصوصیات مصالح (روزی‌طلب و همکاران، ۲۰۱۷)

پوشش	زمین	
۲۴۸۰۰	۱۰۰۰-۵۰۰۰-۲۵۰-۱۰۰-۵۰-۱۰	مدول یانگ (مگا پاسکال)
۰.۲	۰.۳	نسبت پواسون
۲/۵	۲	جرم واحد حجم



شکل ۸. نیروی برشی استاتیکی (قطر تونل = ۵ متر و $E = 10MPa$ تا

$E = 500MPa$ و فرض عدم لغزش زمین و پوشش) (روزی طلب و همکاران، ۲۰۱۷)

انفجار داخلی کمتر می‌شود. همچنین 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 تنش بسیار بیشتر از سایر خاک‌ها است. در خاک‌های نرم پیرامون تونل، مقاومت و سختی زمین باید بهسازی شود. با افزایش ضخامت ۱ متری خاک پیرامون تونل، مقدار بیشینه تنش ۴۴ درصد کاهش می‌یابد (مؤمن‌زاده، منصوری و عظیمی‌نژاد، ۲۰۱۹). علی‌الهی و همکاران در تحقیقی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های واقع بر تونل‌های دوقلو در اثر انتشار امواج برشی درون صفحه را مورد بررسی قرار دادند (علی‌الهی، آدامپیرا و عسگری، ۲۰۱۶). در این تحقیق با بکارگیری روش عددی اجزای مرزی دو بعدی در حوزه زمان در یک محیط همگن و همسان به بررسی پاسخ لرزه‌ای و الگوی بزرگنمایی سطح زمین واقع بر روی تونل‌های زیرزمینی دوقلو و منفرد تحت تاثیر امواج مهاجم برشی درون صفحه‌ای در فرکانس‌های مختلف پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن است که وجود تونل‌های زیرزمینی دوقلو می‌تواند مولفه‌های افقی و قائم جابجایی سطح زمین را $\frac{2}{3}$ برابر در مقایسه با حالت تونل منفرد و $\frac{2}{6}$ برابر سطح میدان آزاد، تحت تاثیر قرار دهد. در مقاطع مختلف هندسی تونل‌ها با شکل‌های دایره‌ای، نعل اسبی و مربعی، الگوی بزرگنمایی یکسانی مشاهده می‌شود و صرفاً تفاوت اصلی در اندازه مقادیر بزرگنمایی لرزه‌ای است (علی‌الهی، آدامپیرا و عسگری، ۲۰۱۶). در تحقیقی دیگر که توسط که توسط نصیری‌وند و همکاران انجام شده است برای تحلیل پایداری تونل، بار

نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر این است که پاسخ مدل زمین تک‌لایه‌ای بدست آمده با تحلیل دینامیکی نتایجی نسبتاً مشابه با حل ونگ که بر اساس بارگذاری برش ساده‌ی استاتیکی است، بدست می‌دهد. تحلیل زمین دو لایه‌ای نشان داد که طبقه‌بندی نقش مهمی در نیروهای لرزه‌ای پوشش دارد. در کل هنگامی که تونل به‌طور کامل فقط در یکی از لایه‌ها محاط شده باشد، مثل زمانی که سطح مشترک لایه‌ها در سقف یا کف تونل باشد، زمانی که لایه‌ی محیطی نرم‌تر باشد افزایش قابل‌توجهی در بارهای لرزه‌ای اتفاق می‌افتد. در وضعیت عکس، نیروهای لرزه‌ای پوشش از حالت زمین تک‌لایه‌ای کمتر یا برابر هستند. همچنین وقتی تونل از دو لایه می‌گذرد، حداکثر لنگر خمشی عموماً بیشتر می‌شود. درحالی که حداکثر نیروی محوری فقط اگر لایه‌ی پایینی سخت‌تر باشد، زیاد می‌شود (روزی طلب و همکاران، ۲۰۱۷). مومن زاده و همکاران پاسخ های ایجاد شده در تونل‌های دوقلوی دایره‌ای تحت بارگذاری انفجار را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش با بهره‌گیری از نرم افزار المان محدود ABAQUS6-11-1، خاک و تونل‌های دوقلو را به صورت سه بعدی مدل‌سازی کردند (مؤمن‌زاده، منصوری و عظیمی‌نژاد، ۲۰۱۹). همچنین خاک با مدل رفتاری دراگرپراگر (Drucker prager) و پوشش تونل با مدل رفتاری پلاستیک آسیب دیده بتن شبیه‌سازی شد (مؤمن‌زاده، منصوری و عظیمی‌نژاد، ۲۰۱۹). آن‌ها دریافتند که افزایش ارتفاع روباره باعث کاهش تنش‌ها و تغییرشکل‌ها در پوشش تونل‌ها می‌شود. به عبارت دیگر هرچه ارتفاع روباره خاک بیشتر باشد، خسارت ایجادشده در پوشش تونل‌ها تحت

یکدیگر داشته‌اند. از طرفی، روش‌های تحلیلی دارای نقاط وضعی نیز می‌باشد. راه‌حل‌های تحلیلی، اندرکنش بین پوشش و خاک را شبه استاتیکی و بدون لحاظ اندرکنش اولیه در نظر می‌گیرند. همچنین، دیگر فرض این راه‌حل‌ها آن است که نیروی برشی به صورت شبه استاتیکی با لحاظ نمودن ثابت کرنش برشی و عمق به سطح وارد می‌شود. همچنین زمانی که محیط اطراف تونل شامل خاک ته‌نشین شده‌ی طبیعی باشد اغلب لایه‌بندی آن به صورت افقی است، اما راه‌حل‌های تحلیلی، روش محاسبه‌ای برای محاسبه‌ی سختی بین دو لایه‌ی متوالی به‌دست نمی‌دهد. به همین دلیل پاسخ لرزه‌ای در تونل‌های دایره‌ای پیچیده‌تر می‌شود. بنابراین، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی برای پیش‌بینی رفتار تونل‌ها به عنوان مهم‌ترین روش جایگزین افزایش می‌یابد. در نهایت، استفاده روز افزون از مدل‌های عددی با استفاده از نرم افزارهایی از قبیل FLAC 3D، UDEC، ABAQUS، PLAXIS، Phase2 و FLAC 3D در اکثر پروژه‌های ژئوتکنیکی استفاده می‌شود.

دینامیکی حاصل در اثر حرکت قطار شبیه‌سازی شده و تابع بار دینامیکی این حرکت به دست آمده است. این تابع توسط نرم افزار FLAC3D بر روی مدل عددی ساخته شده از تونل اعمال و وضعیت پایداری تونل با استفاده از پارامترهای سرعت حرکت قطار، وزن واگن، تعداد واگن و میرایی محیط مقایسه شده است (صمیمی نمین، شهریار و تاکی، ۲۰۱۷).

۵ - نتیجه‌گیری

این مقاله مروری است بر تحقیقات صورت گرفته در رابطه با طراحی دینامیکی تونل‌ها و پاسخ دینامیکی آن‌ها تحت انواع بارهای لرزه‌ای و ارتعاشی که در چند سال اخیر توسط محققین صورت پذیرفته است. با توجه به اینکه وضعیت پایداری تونل‌ها در برابر بارهای ارتعاشی یکی از مهمترین مسائلی است که در طراحی باید مدنظر قرار گیرد، بیشتر محققین از روش‌های تحلیلی و عددی برای بررسی نیروهای ارتعاشی ناشی از زلزله استفاده کرده‌اند. در بعضی از تحقیقات نتایج روش‌های تحلیلی و عددی مطابقت خوبی با

۶- مراجع

-Besharat, Vahab, And Jafar Boluri Bazaz, (2014), "Dynamic Analysis Of Circular Urban Tunneling And Effects Of Different Parameters On Response Of Tunnels", Tunneling & Underground Space Engineering, 3, pp.173-82.
 -Bobet, A., (2003), "Effect Of Pore Water Pressure On Tunnel Support During Static And Seismic Loading", Tunnelling And Underground Space Technology, 18, pp.377-93.
 -Ebadi, K , And M Amir Afshari, (2009), "Earthquake Effects On Underground Structures Designing And Maintenance Based On Dynamic Loads", Journal Of Earth And Resources, pp.2-3.
 -Ghiasi, V., & Mozafari, V., (2018), "Seismic Response Of Buried Pipes To Microtunnelling Method Under Earthquake Loads", Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 113, pp.193-201.
 -Ghiasi, V., Ghiasi, S., & Prasad, A., (2012), Evaluation Of Tunnels Under Squeezing Rock Condition, Journal Of Engineering, Design And Technology.

-Alielahi, Hamid, Mohammad Adampira, And Morteza Asgari., (2016), "Seismic Response Assessment Of The Ground Surface Induced By Twin Tunnels Subjected To Incident In-Plane Shear Waves", Tunneling & Underground Space Engineering, 5, pp.35-52.
 -Amorosi, A, And D Boldini, (2009), "Numerical Modelling Of The Transverse Dynamic Behaviour Of Circular Tunnels In Clayey Soils", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29, pp.1059-72.
 -Babagoli, Razi, Reza Vahdani, And Gholam Reza Ghodrati Amiri, (2013), "Analytical Evaluation Of The Impact Of Various Parameters On The Forces Acting On A Circular Tunnel Lining Under Seismic Loads", Tunneling & Underground Space Engineering, 2, pp. 27-35.
 -Basirat, Ruhollah, Hosein Salari Rad, And Hamed Molladavoodi, (2015), "Interaction Between Tunnel Supporting System And Rock Or Soil Medium Under Seismic Loading", Tunneling & Underground Space Engineering, 4, pp.59-70.

- Ghiasi, V., Koushki, M., (2021), "Numerical Investigation Of Ground Surface Settlement Due To Circular Tunnelling Influenced By Variations Of Geometric Characteristics Of Tunnel And Mechanical Properties Of Saturated Soil And Its Prediction In The Artificial Neural Network", *Journal Of Modeling In Engineering*, 19(64), pp.27-39. Doi: 10.22075/Jme.2019.18022.1735.
- Ghiasi, V., (2012), "Effects Of Weak Rock Geomechanical Properties On Tunnel Stability", Ph.D Thesis.
- Ghiasi, V., Omar, H., Kazemian, S., Ghiasi, S., Huat, B. K., Muni, R., & Safaei, M. (2011), "Subway Station Seismic Consideration Based On Geotechnical Study: A Case Study Approach", *Scientific Research And Essays*, 6(9), pp.1940-1956.
- Ghiasi, V., Omar, H., Ghiasi, S., Huat, B. K., Muni, R., Baharv, M., & Kazemian, S. (2011), "Urban Rail Network Connectivity In Locating Transfer Stations: A Case Study Of Tehran Urban Railway", *Scientific Research And Essays*, 6(9), pp.1891-1899.
- Hashash, Youssef Ma, Jeffrey J Hook, Birger Schmidt, I John, And Chiang Yao. (2001), "Seismic Design And Analysis Of Underground Structures", *Tunnelling And Underground Space Technology*, 16, pp.247-93.
- Itasca, Flac2d., (1995), "Version 4 Users Manuals", Itasca Consulting Group, Minneapolis, Nm.
- Jaramillo, Carlos A., (2017), "Impact Of Seismic Design On Tunnels In Rock-Case Histories", *Underground Space*, 2, pp. 106-14.
- Momenzadeh, Mohammad Reza, M.R. Mansouri, And A. Aziminejad., (2019), "Assessing The Damages Created In The Twin Circle Tunnels Under Explosive Loading And Their Responses", *Tunneling & Underground Space Engineering*, 8, pp.89-108.
- Nagy, N, M Mohamed, And Jc Boot., (2010), "Nonlinear Numerical Modelling For The Effects Of Surface Explosions On Buried Reinforced Concrete Structures", *Geomechanics And Engineering*, 2, pp.1-18.
- Nodefarahani, Mohammadali, Hamidreza Vosoughifar, Behnam Parmas, And Babak Afshinfar, (2019), "Upgraded Dynamic Stress Concentration Factor For Twin Tunnels Dispersed By New Method Fem-Scattering Method", *Tunneling &*
- Ghiasi, V., Ghiasi, S., Omar, H., Ebrahimi, B., & Ghiasi, M., (2010), "A Review Of Metro Tunnel Safety Parameters And Role Of Risk Management, Tehran Metro", In *Fourth International Symposium On Tunnel Safety And Security, Frankfurt Am Main, Germany* pp. 511-515.
- Ghiasi, V., & Koushki, M., (2020), "Numerical And Artificial Neural Network Analyses Of Ground Surface Settlement Of Tunnel In Saturated Soil.", *Sn Applied Sciences*, 2(5), pp.1-14.
- Ghiasi, V., Omar, H., Rostami, J., Yusoff, Z. B. M., Ghiasi, S., Huat, B. K., & Muni, R. (2011), "Geotechnical And Geological Studies Of Nwct Tunnel In Iran Focusing On The Stabilization Analysis And Design Of Support: A Case Study", *Scientific Research And Essays*, 6(1), pp.79-97.
- Ghiasi, V., Smaeili, K., & Arzjani, D., (2021), "Pile-Tunnel Interaction In Subway Tunnels Under Seismic Loads", *Journal Of Civil and Environmental Engineering*, 51(104), pp.149-157.
- Ghiasi, V., & Omar, H., (2011), "Analysis Of Shotcrete Lining Of Underground Tunnels", *Pertanika Journal Of Science & Technology*, 19(2), pp.249-257.
- Ghiasi, V., Omar, H., Huat, B. B. K., Muniandi, R., & Zainuddin, B., (2011), "Risk Management Overview Of Tunnels Using Numerical Modeling", *Journal Of Engineering, Design And Technology*, 9(1), pp.110-124.
- Ghafari, M., Nahazanan, H., Yusoff, Z. M., & Ghiasi, V., (2021), "Effect Of Soil Cohesion And Friction Angles On Reverse Faults. *Earthquake Engineering And Engineering Vibration*", 20(2), pp.329-334.
- Ghiasi, V., Jalalvand, A., & Saeidijam, S., (2014), "Diaphragm Wall-Tunnel Interaction In Saturated Soil", *The Electronic Journal Of Geotechnical Engineering*, 19.
- Ghiasi, V., Najafi, F., (2022), "Investigation Of Liquefiable Soils Improvement Methods", *Road*, 30(110), pp.41-56. Doi: 10.22034/Road.2023.112863.
- Ghiasi, V., Fathi, R., Shirkhani Cheshmeh Shafie, M., (2021), "Evaluation On Effect Of Modulus Of Elasticity, Shear Modulus, Damping Ratio And Shear Wave Velocity On Soil Dynamic", *Road*, 29(108), pp.87-100. Doi: 10.22034/Road.2021.107905.

- Saeedi Abbas Abad, Mahdi, Mehdi Moosavi, and Farshad Nejad Shah.
- Mohammad, (2013), "Evaluation Of The Support System In Line 4 Tunnel Of Tehran Metro At Intersection With Tohid Tunnel And Line 7 Tunnel Of Tehran Metro", Tunneling & Underground Space Engineering, 2, pp.1-11.
- Samimi Namin, Farhad, Kourosch Shahriar, And Reza Takey, (2017), "3d Simulation Of Shallow Tunnels Under Dynamic Load Of Train and Determination Of Construction Method - a Case Study, Tunnel Of Line 3 Of Tehran Subway", Tunneling & Underground Space Engineering, 5, pp.49-61.
- Wang, Jaw-Nan., (1993), "Seismic Design Of Tunnels, A Simple State-Of-The-Art Design Approach Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas".
- Underground Space Engineering, 7, pp.29-49.
- Owen, G Norman, And Roger E Scholl. (1981), "Earthquake Engineering Of Large Underground Structures", Federal Highway Administration And National Science Foundation, pp.279.
- Park, Kyung-Ho, Kullachai Tantayopin, Bituporn Tontavanich, And Adisorn Owatsiriwong. (2009), "Analytical Solution For Seismic-Induced Ovaling Of Circular Tunnel Lining Under No-Slip Interface Conditions: A Revisit", Tunnelling And Underground Space Technology, 24, pp.231-35.
- Penzien, Joseph, (2000), "Seismically Induced Racking Of Tunnel Linings", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 29, pp.683-91.
- Roozitalab, Ali, Seyed Amin Asghari Pari, Seyed Ali Asghari Pari, and Sasan Motaghed. (2017), "Numerical Modeling Of The Seismic Response Of Shallow Circular Tunnels In Homogenous Layered Ground Using Fem Code Abaqus and Compare The Results With The Analytical Solutions", Tunneling & Underground Space Engineering, 6, pp.17-26.

An Overview of the Dynamic Design of Tunnels by Analytical and Numerical Methods

*Vahed Ghiasi, Assistant Professor, Department of Engineering, Malayer University,
Malayer, Iran.*

*Shahab Karimi, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and
Architecture Engineering, Malayer University, Malayer, Iran.*

*Esmail Mousapoor, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ramsar Branch,
Islamic Azad University, Ramsar, Iran.*

E-mail: v.ghiasi@malayeru.ac.ir

Received: October 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT

The dynamic design of tunnels and their dynamic response under various seismic and vibration loads is an essential issue that researchers have studied in recent years. The most suitable methods for investigating the effects of seismic and vibrational loads on tunnels and underground structures are analytical methods and numerical simulations. The problem is first modeled and then analyzed in numerical methods such as the finite element method or boundary element method. Based on comparing the research results in this field, it can be concluded that due to the low flexibility of analytical methods in solving problems with geometry and properties of complex materials, the need to use numerical methods is more felt because of its advantages in solving complex problems. This study aimed to investigate the effect of vibrations on tunnels and underground structures, which are special considerations in the design.

Keywords: Tunnel Dynamic Design, Analytical Methods, Numerical Modeling, Static Analysis, Dynamic Analysis