

طراحی و ارزیابی تونل‌ها در مناطق شهری - دستاوردها و چالش‌های مدلسازی

علی اکبر گلشنی^{۱*}، احسان مرادآبادی^۲، امیرحسین رضائی^۳

۱. دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲. دکتر، مهندسی عمران، دانشگاه عالی دوبلین (یو سی دی)، ایرلند
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

Golshani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۳

چکیده

امروزه با پیشرفت فناوری، سهولت نسبی در حفاری و ساخت سازه‌های زیرزمینی، محدودیت‌های فضاها را سطحی، برای اجرای طرح‌های عمرانی و نیز به واسطه مسائل سیاسی و امنیتی، توجه بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه به احداث سازه‌های زیرزمینی برای کاربردهای عمرانی معطوف شده است. از میان آن‌ها، تونل‌های شهری علاوه بر کاهش تأثیر مخرب زیست محیطی، کوتاه‌تر نمودن مسیرها و بهبود کارایی ترافیک، به سبب استفاده عمومی و طولانی مدت از آن‌ها، باید دارای ایمنی بالایی باشند. تونل‌ها به عنوان پروژه‌های بزرگ ملی و سرمایه‌گذاری‌های زیربنایی در نظر گرفته می‌شوند و هزینه‌های هنگفتی در سراسر جهان برای ساخت این سازه‌ها هزینه می‌شود. با نگاه به گذشته، سازه‌های زیرزمینی نسبت به سازه‌های سطحی در برابر بارهای دینامیکی آسیب کمتری را متحمل شده‌اند. در سال‌های اخیر زلزله‌های بزرگی مانند زلزله ۱۹۹۵ کوبه^۱ در ژاپن، ۱۹۹۹ چی‌چی^۲ در تایوان، ۱۹۹۹ کوکالی^۳ در ترکیه و ۲۰۰۸ ونچوان^۴ در چین باعث شده‌اند سازه‌های زیرزمینی خطرهای قابل ملاحظه‌ای را تجربه کنند. شواهدی وجود دارد که نشان می‌دهد ایمنی تونل‌ها در مناطق فعال لرزه‌ای مسئله بسیار مهمی است اما این مسئله هنوز به صورت کامل شناخته نشده است یا حداقل در هنگام ارزیابی و طراحی به خوبی بررسی نشده است. زمین لرزه‌ها با وارد آوردن آسیب شدید یا تغییر شکل بیش از حد ساختار تونل، شاید به طور قابل توجهی روی کارایی تونل‌ها تأثیر می‌گذارند. در این مقاله ابتدا پاسخ‌های ثبت شده تونل‌های واقعی در هنگام زلزله‌های گذشته، سازوکار پاسخ لرزه‌ای تونل و پارامترهای موثر در پاسخ لرزه‌ای تونل‌ها بررسی می‌شود. در ادامه، خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته در ارتباط پاسخ لرزه‌ای تونل‌ها با آزمایش‌های فیزیکی (آزمایش سانتریفیوژ^۵، میز لرزش^۶ و آزمایش‌های استاتیکی) ارائه می‌دهد. به دنبال آن در مورد روش‌های تحلیلی، تجربی، شبه استاتیکی و عددی تحلیل دینامیکی تونل بحث می‌شود. در انتها نیز بحث ناهمگنی و کاربرد میدان

1. Kobe
2. Chi-Chi
3. Kocaeli
4. Wenchuan
5. Centrifuge tests
6. Shaking table tests

تصادفی برای تحلیل دینامیکی پرداخته شده است و دستاوردها چالش‌های موجود در این زمینه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله، خلاهای کلی موجود در درک پاسخ لرزه‌ای تونل‌ها در تلاش برای کار بیشتر در این موضوع‌ها توسط نویسندگان شناسایی شده است.

واژگان کلیدی: تونل، تحلیل دینامیکی، روش‌های تحلیلی، روش‌های آزمایشگاهی، مدل سازی عددی.

۱- مقدمه

زلزله یک مشکل ملی است، نه فقط یک مشکل منطقه‌ای. تأثیر اقتصادی یک زمین لرزه بزرگ در سراسر ایران احساس خواهد شد. به علاوه، شواهد نشان می‌دهد که زمین لرزه می‌تواند در هر نقطه از ایران رخ دهد. سازه‌های با اهمیت در همه نقاط ایران وجود دارد. پس نیاز ارزیابی سازه‌ها براساس اهمیت آن احساس می‌شود. انتخاب روش ارزیابی، وابسته به میزان اهمیت آن سازه است. از طرف دیگر، سازه‌های زیرزمینی از سطح ایمنی بالاتری نسبت به سازه‌های سطح زمین در برابر امواج لرزه‌ای برخوردار هستند، اما با توجه به تأثیر زلزله‌های اتفاق افتاده در سال‌های اخیر بر سازه‌های زیرزمینی و اهمیت اقتصادی و استراتژیک پروژه‌های زیرزمینی، ضرورت ارزیابی لرزه‌ای تونل‌ها در برابر بارگذاری‌های لرزه‌ای آشکار خواهد شد.

سازه‌های زیرزمینی جزء اجزای بسیار حیاتی و تأثیرگذار ساختارهای سیاسی و اقتصادی جوامع هستند. در صورت بروز هرگونه حادثه‌ای که منجر به خسارت به این سازه‌ها شود، ضررهای بسیار زیادی به افراد به صورت مستقیم و غیر مستقیم زده خواهد شد. با وجود هزینه بالای ساخت این سازه‌ها، در آیین‌نامه‌های طراحی توجه خاصی به طراحی لرزه‌ای این سازه‌ها نشده است. حتی تا اواسط دهه هفتاد میلادی گزارش‌هایی از خسارت به سازه‌های زیرزمینی به دلیل حوادث لرزه‌ای گزارش شده است [1, 2]، با این حال تحقیق مناسبی تا سال‌ها بعد صورت نگرفته است. در سال ۱۹۸۱ با استفاده از ۱۲۷ داده تونل نتیجه گرفته شده است که برای بیشترین شتاب زمین کمتر از ۰/۴ شتاب گران‌ش زمین در تونل‌های سنگی خسارت جزئی دیده شده است [3]. شکل (۱) خلاصه‌ای از نتایج این تحقیق را نشان می‌دهد.

شکل ۱. میزان آسیب دیدگی تونل‌ها بر اثر زمین لرزه به تفکیک نوع سازه

استفاده شده [3]

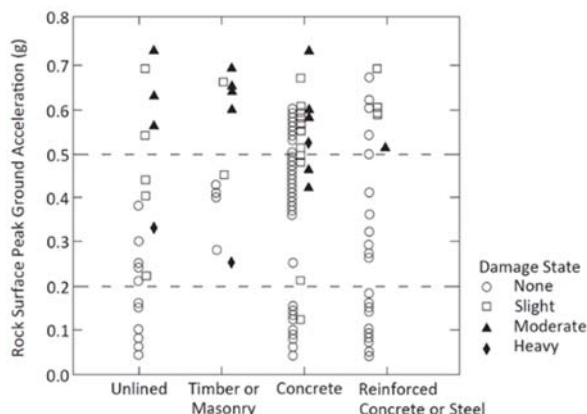


Fig. 1. The extent of tunnel damage due to earthquakes, depending on the type of structure [3]

۲- عملکرد و رفتار لرزه‌ای تونل‌ها

در مقایسه با ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی سطح زمین، تونل‌ها کمتر در معرض آسیب‌های ناشی از زلزله قرار گرفته‌اند. شرایط خاصی وجود دارد که به وضوح نشان می‌دهد خطر لرزه‌ای قابل توجهی برای یک تونل وجود دارد و به ارزیابی دقیق‌تر نیاز دارد. این شرایط عبارتند از: یک گسل فعال که تونل را قطع می‌کند، یک زمین لغزش که تونل را قطع می‌کند؛ چه فعال باشد چه غیرفعال، خاک‌های روان‌گرا نزدیک تونل، وجود حوادثی در تونل مانند ریزش‌های محلی، تغییرشکل‌های بزرگ، ترک خوردن و غیره، اما در صورتی که اقدامات مقاوم‌سازی برای تثبیت تونل انجام شده باشد، نگران کننده نخواهد بود.

پژوهشگران بسیاری تلاش کرده‌اند تا رابطه‌ای بین آسیب مشاهده شده و پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار لرزه‌ای، یعنی خواص هندسی پوشش تونل، شرایط ژئوتکنیکی و مشخصات زمین لرزه ایجاد شود. بر این اساس تونل‌های عمیق‌تر یا تونل‌های سنگی به طور کلی ایمن‌تر هستند، در حالی که با افزایش بزرگی زمین لرزه و کاهش فاصله کانون خسارت بیشتر بوده است [4].

شکل ۴. حالت‌های خرابی تونل‌های گزارش شده در هنگام زلزله ۱۹۹۹ چی‌چی در تایوان [8]

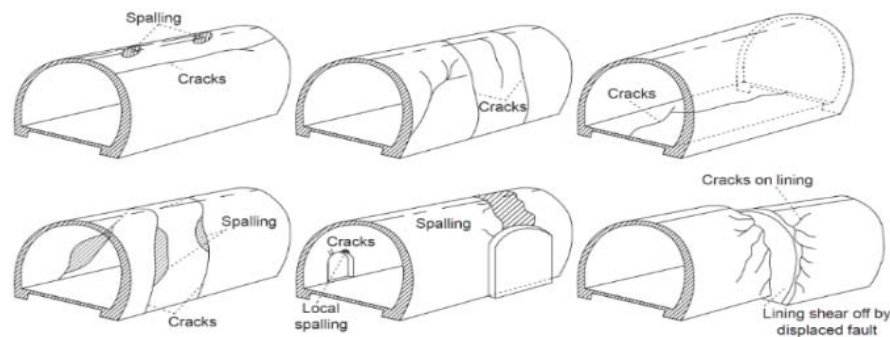


Fig. 4. Tunnel failure modes reported during the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan [8]

مختلفی از آسیب‌ها مشاهده شده است، از جمله: ترک‌های پوشش، خرابی درگاه، جوش خوردن پوشش بتنی، ورود آب زیرزمینی، نمایان شدن و کماتوش آرماتورها، جابه‌جایی پوشش تونل، ریزش سنگ، ریزش پوشش تونل ناشی از گسیختگی شیب و شکاف روسازی (شکل ۴). خسارت شدید نزدیک به دامنه‌های سطح یا دهانه‌های ورودی مشاهده شد، در حالی که مقطع‌های مدفون عمیق‌تر رفتار بهتری داشتند.

۲۵۴ گزارش از زلزله چی‌چی، زمین لرزه منطقه مید نیگاتا ۲۰۰۴ و زلزله ۲۰۰۸ ونچوان، جمع‌آوری و طبقه‌بندی شده‌اند که شرح مختصری از خسارت را برای هر سطح پیشنهادی ارائه داده شده است [9]. خسارت تونل تاواریاما^۷ ناشی از زمین لرزه ۲۰۱۶ کوماموتو^۸ را بررسی و گزارش داده شد که ترک‌های حلقوی در تونل با فاصله ۱۰ متر در حدود ۲۰٪ دهانه تونل پیدا شده است. این مشاهده به تعامل بین انتشار موج لرزه‌ای و شرایط زمین‌شناسی در محل نسبت داده شد [10]. به تازگی با هدف ارزیابی توانایی روش‌های تجزیه و تحلیل موجود برای پیش‌بینی عملکرد لرزه‌ای، تجزیه و تحلیل برگشتی از خسارت وارد شده به تونل سن بندیتو^۹ در هنگام زلزله ۲۰۱۶ نورسیا^{۱۰} در ایتالیا انجام داده شد. روش‌های ساده، که در آن بارگذاری لرزه‌ای به روش

با استفاده از داده‌های موجود، روابط پیش‌بینی حرکت زمین و گسترش داده‌های قبلی با گزارش خسارت تونل‌ها در هنگام زلزله ۱۹۹۵ هیوگوکن-نامبو^۱ در کوبه، ژاپن، خسارت جزئی در تونل‌ها را برای مقادیر بیشترین شتاب زمین کمتر از ۰/۲ شتاب گرانش زمین و خسارت جزئی تا سنگین را برای بیشترین شتاب زمین بیشتر از ۰/۲ شتاب گرانش زمین مشاهده شد [5]. زمین لرزه هیوگوکن-نامبو یک رویداد مخرب برای تونل‌ها بود، زیرا بیش از ۱۲٪ از تونل‌ها در منطقه مرکزی به شدت آسیب دیده بودند.

نمونه دیگر از خسارات گسترده ناشی از آثار ترکیبی زمین لرزه و تغییر شکل دائمی زمین، ریزش تونل دوقلوی بولو^۲ در هنگام زلزله ۱۹۹۹ کوچالی^۳ است [6, 7]. این ریزش در حین ساخت و ساز در قسمت ناتمام تونل رخ داد که به شکل بیضی تغییرشکل داده بود که باعث خرد شدن شاتکریت و کماتوش دنده‌های فولادی در شانه و زانو‌ها شد.

در هنگام زلزله ۱۹۹۹ چی‌چی در تایوان، تعداد زیادی از تونل‌های کوهستانی خسارت کمی^۴ متحمل شدند. ۲۶٪ از ۵۰ تونل واقع در ۲۵ کیلومتری گسل زلزله به شدت^۵ آسیب دیده‌اند، در حالی که بیش از ۲۰٪ از تونل‌ها متوسط^۶ آسیب دیده‌اند. انواع

۶. ترک خوردگی پوشش تونل، نمایان شدن آرماتورها، جابه‌جایی پوشش تونل، ورود آب زیرزمینی و کمی اختلال در ترافیک عبوری.

7. Tawarayama

8. Kumamoto

9. San Benedetto

10. Norcia

1. Hyogoken-Nambu

2. Bolu

3. Kocaeli

۴. آسیب کم که در بازرسی بصری شناسایی شدند و تاثیری بر ترافیک عبوری نداشتند.

۵. شکست شیب در دهانه‌ها، فروریختن سازه اصلی تونل، آسیب دیدگی سیستم تهویه و روشنایی و اختلال کامل ترافیک عبوری.

خرابی‌های زمین ناشی از لرزه، به عنوان نمونه خرابی‌های ناشی از روانگرایی، حرکات گسل یا خرابی شیب شکل (۶)، ممکن است باعث تغییر شکل دائمی زمین در تونل‌ها شود. در واقع، تعداد زیادی از خرابی‌های تونل‌ها به تغییر شکل زمین ناشی از زمین لرزه نسبت داده شده است [12].

شکل ۶. نمونه‌هایی از آثار خرابی زمین لرزه‌ای در تونل‌ها [8]

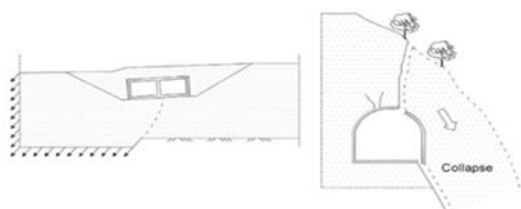


Fig. 6. Examples of the effects of seismically-induced ground failures on tunnels [8] earthquake in Taiwan [8]

به دلیل حالت‌های تغییر شکل متمایز تونل‌ها و سطح بالقوه آسیب ناشی از لرزش زمین در جهات طولی و عرضی و همچنین خرابی‌های زمینی ناشی از زلزله، تجزیه و تحلیل این سازه‌ها در برابر آثار لرزه‌ای فوق، معمولاً به حالت‌های مختلف تفکیک شده است. در این زمینه، روش‌های مختلفی برای تجزیه و تحلیل تونل‌ها در برابر لرزش زمین در جهات عرضی و طولی و همچنین خرابی‌های زمین لرزه‌ای استفاده می‌شود. برخی از این روش‌ها در راهنماهای مربوط به طراحی معرفی شده‌اند [13]. همچنین، مطالعات تجربی و عددی مربوطه بیشتر روی یکی از آثار لرزه‌ای فوق جداگانه متمرکز شده است.

۲- پارامترهای موثر در پاسخ لرزه‌ای تونل

مطالعات صورت گرفته در مورد رفتار لرزه‌ای تونل‌ها، با تعیین نقش پارامترهای تاثیرگذار بر پاسخ تونل نیز همراه بوده است. پاسخ لرزه‌ای یک تونل بسیار تحت تاثیر آثار متقابل ساختار خاک است که در هنگام لرزش زمین اتفاق می‌افتد. از این رو، ویژگی‌های زمین اطراف و واکنش آن در هنگام لرزش زمین، ویژگی‌های هندسی و عمق دفن تونل، سختی نسبی خاک به تونل، ویژگی‌های برهم‌کنش خاک و تونل و همچنین ویژگی‌های حرکت زمین، پارامترهای مهمی هستند که پاسخ را تحت تاثیر قرار می‌دهند [6, 14-16]. تغییر عمق تونل هیچ تاثیری در پاسخ شتاب حداکثر روی سطح خاک ندارد، اما با افزایش عمق، نیروهای بیشتری به پوشش تونل وارد می‌شوند و لنگر خمشی

ایستایی معادل معرفی می‌شود، پیش‌بینی‌های معقولی را ارائه می‌دهند، در حالی که پاسخ‌های دقیق‌تر توسط تجزیه و تحلیل‌های دینامیکی مطالعه موردی ارائه می‌شود.

۳-۱ سازه‌کارهای پاسخ لرزه‌ای

پاسخ لرزه‌ای تونل‌ها در مقایسه با سازه‌های روی زمین کاملاً متفاوت است، زیرا بارگذاری حرکتی ناشی از زمین اطراف بیش از بارهای اینرسی ناشی از نوسان تونل است [6, 11]. مشاهده خسارات ناشی از زلزله‌های گذشته نشان داد که تونل‌ها در مناطق لرزه‌خیز، باید به طور کلی برای مقابله با لرزش زمین به دلیل انتشار موج یا تغییر شکل دائمی زمین به دلیل خرابی زمین ناشی از لرزه مانند روان‌گرایی، تغییر مکان جانبی، رانش زمین و گسیختگی گسل طراحی شوند.

انتظار می‌رود که لرزش زمین در امتداد محور طولی یک تونل تغییر شکل محوری و خمش طولی ایجاد کند، در حالی که برای لرزش در جهت عرضی، تونل بیضی شکل (برای مقاطع دایره‌ای) یا یک اعوجاج ترکیبی با تغییر شکل زیاد (برای مقاطع مستطیلی) دچار شود (شکل ۵).

شکل ۵. حالت‌های تغییر شکل سازه‌های زیرزمینی در معرض امواج لرزه‌ای [8]

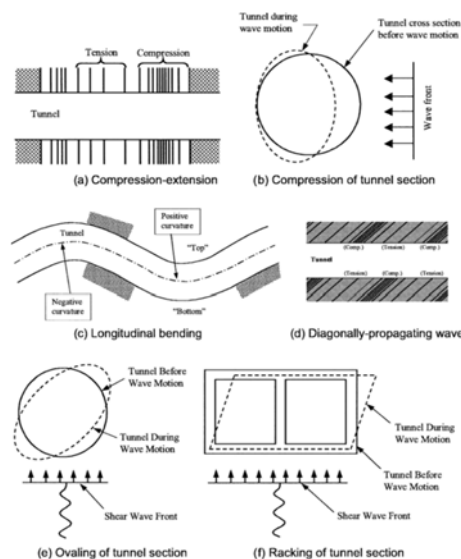


Fig. 5. Modes of deformation of underground structures exposed to seismic waves [8] earthquake in Taiwan [8]

را بر اساس کارهای نیومارک^۳ پیشنهاد کرد [56]. در آن زمان، این راه‌حل‌ها ابزار بسیار مفیدی را برای تخمین رفتار لرزه‌ای تونل‌های تحت لرزش زمین در دو جهت طولی و عرضی فراهم کردند. پژوهشگران از روش تغییرشکل میدان آزاد برای تخمین کرنش‌ها و انحنای تونل برای حرکت زمینی که با یک زاویه نسبت به محور تونل پخش می‌شود، استفاده کردند و برخی اصلاحات را در راه‌حل‌های تحلیلی آن‌ها برای محاسبه آثار متقابل خاک و تونل ارائه دادند. وانگ^۴ بیشتر آثار متقابل تونل-خاک را در چارچوب یک مطالعه مروری جامع بررسی کرد، که حاوی عناصر جدیدی نیز بود [14]. پنزیان^۵ راه‌حل‌های بسته‌ای را برای تجزیه و تحلیل لرزه‌ای تونل‌های عمیق مستطیلی و دایره‌ای، با بارگذاری لرزه‌ای به صورت ساده شبیه‌سازی شده، به عنوان یک توزیع یکنواخت برش-کرنش اعمال شده بر مرزهای سیستم خاک-تونل به دور تونل ارائه داد [57] (شکل ۱۱). با این حال، راه‌حل‌های پنزیان، اثر تنش‌های عمودی ایجاد شده در هنگام بارگذاری در برهم کنش خاک-تونل نادیده می‌گیرد. او فرض کرد که تغییرشکل تونل ممکن است با تغییرشکل یک حفره دایره‌ای (به عنوان نمونه با در نظر گرفتن پارامتر β) (شکل ۱۱) تقریبی زده شود.

شکل ۱۱. تغییر شکل تونل مستطیلی $W \times H$ در معرض یک توزیع یکنواخت برش-کرنش. شکل سمت چپ: با توزیع تنش برشی میدان آزاد که روی سطح حفره اعمال می‌شود. شکل سمت راست: با توزیع تنش برشی میدان آزاد، از

سطح حفره برداشته شود $(\beta = \frac{\gamma_c}{\gamma_{ff}})$ [57]

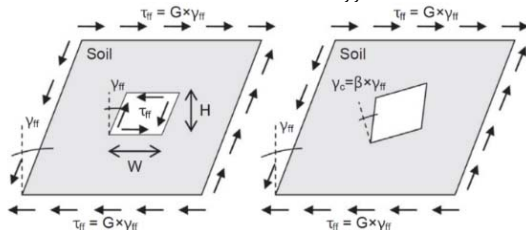


Fig. 11. Deformation of $W \times H$ rectangular cavity subjected to a uniform shear strain distribution. γ_{ff} : (Figure left) with free-field shear stress distribution applied to cavity surface; (Figure right) with free-field shear stress distribution removed from cavity surface $(\beta = \frac{\gamma_c}{\gamma_{ff}})$ [57]

ایجاد شده روی پوشش تونل نیز افزایش می‌یابد. جابه‌جایی پوشش نیز با افزایش عمق کاهش می‌یابد [17, 18]. گشتاور خمشی در پوشش تونل با ضخامت آن افزایش می‌یابد به طوری که با افزایش ابعاد تونل، سختی خمشی افزایش می‌یابد و توانایی تحمل نیروهای بیشتری را دارد [17, 19]. شرایط برهم کنش خاک-تونل همچنین به کاهش تغییرشکل در پوشش تونل کمک می‌کند، که در آن اعوجاج در شرایط برهم کنش با لغزش کامل ۶-۱۸٪ بیشتر از شرایط برهم کنش بدون لغزش است [20]. شکل تونل، پاسخ کلی سیستم تونل خاک تحت بارهای دینامیکی را تعیین می‌کند. تونل‌های دایره‌ای عملکرد بهتری نسبت به سایر اشکال تونل در برابر بارهای لرزه‌ای نشان می‌دهند [17, 20]. با مطالعه رفتار لرزه‌ای به نظر می‌رسد که شدت آریاس^۱ موج ورودی بیشتر از بیشینه شتاب موج ورودی تعیین کننده است، به طوری که برای دو موج زلزله اعمال شده با بیشینه شتاب برابر، موج با شدت آریاس بیشتر، تخریب بیشتری داشت [18].

به طور خلاصه عمق تونل، ضخامت پوشش تونل و شدت آریانس رابطه مستقیم با نیرو زلزله و آسیب‌های ناشی از آن دارند، اما شرایط برهم کنش خاک-تونل رابطه معکوس با نیرو و آسیب زلزله دارد. همچنین در بین اشکال مختلف تونل، تونل دایره‌ای بهترین عملکرد را در هنگام زلزله دارد.

۳- روش‌های تحلیلی و تجربی

بسیاری از پژوهشگران راه‌حل‌های تحلیلی را برای تخمین نیروهای داخلی لرزه‌ای پوشش‌های تونل، تحت پیش‌فرض‌ها و شرایط خاص مانند پاسخ الاستیک خاک و پوشش تونل و شبیه‌سازی بار لرزه‌ای به حالت نیمه ایستا ارائه داده‌اند. راه‌حل‌های تحلیلی با استفاده از فرضیات و ساده‌سازی‌ها، برای طراحی لرزه‌ای مقدماتی تونل‌ها مفید، سریع و آسان هستند. از این رو، در مراحل اولیه طراحی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. اساس طراحی لرزه‌ای برای سازه‌های زیرزمینی برای اولین بار توسط سنت جان^۲ پایه‌گذاری شد [55]، او راه‌حل‌های ساده بسته

4. Wang
5. Penzien

1. Arias intensity
2. St John
3. Newmark

می‌شوند. کورتزیز^۴ مجموعه‌ای از روابط را برای تونل‌های تحت فشار امواج P نیز ارائه داد [63-65]. به دنبال توسعه سریع در توانایی‌های قدرت محاسباتی در دو دهه گذشته، پژوهشگران شروع به اعتبارسنجی نتایج حاصل از راه‌حل‌های تحلیلی در برابر پیش‌بینی‌های مدل‌های عددی پیچیده، به منظور شناسایی کاستی‌های این راه‌حل‌های تحلیلی کردند. به عنوان نمونه، کنتو^۵ چهار مدل تحلیلی مختلف را مقایسه کرد [62، 61، 57، 14] و آن‌ها را در برابر شبیه‌سازی‌های المان محدود^۶ تأیید کرد [66].

کاربرد راه‌حل‌های تحلیلی با فرض‌هایی که بر اساس آن‌ها محدود شده‌اند، به طور خلاصه در جدول (۱) آمده‌اند. از آنجا که پاسخ خاک همیشه کنش خطی در نظر گرفته می‌شود، به جز روش بابت در سال ۲۰۰۸، راه‌حل‌ها فقط هنگامی که زمین تغییرشکل‌های کوچک را تجربه می‌کند، دقیق‌تر هستند. راه‌حل‌های پاسخ لرزه‌ای عرضی در شرایط کرنش صفحه‌ای به دست می‌آیند و از این رو نمی‌توان از آن‌ها برای طرح‌های پیچیده استفاده کرد. برهم کنش در بیشتر موارد به دو شرایط کامل یا بدون لغزش محدود می‌شود، در حالی که پوشش مداوم فرض می‌شود. بر اساس بحث فوق، پس از شناسایی راه‌حل‌های قابل استفاده برای تونل مورد نظر، با توجه به سختی نسبی خاک-تونل، ماهیت برهم کنش خاک-تونل، شرایط محل پروژه و نوع موج لرزه‌ای که به احتمال زیاد توسط تونل تجربه می‌شود، باید از راه‌حل‌های تحلیلی استفاده شود. نتایج حاصل از راه‌حل‌های تحلیلی، در بیشتر موارد باید توسط شبیه‌سازی‌های عددی، که نمایانگر بهتر پدیده‌های برهم کنش تونل و زمین هستند، تأیید شود.

در مقاله رشیددل، چهار روش تحلیلی وانگ، پنزن، پارک و بابت بر اساس طراحی لرزه‌ای تونل دایره‌ای در خط ۶ مترو تهران ارزیابی شدند [67]. برای این منظور، یک روش عددی نیمه استاتیک در چارچوب روش تفاضل محدود تحت همان فرضیات استفاده شد. در ابتدا، مقایسه نتایج تجزیه و تحلیل عددی شبه استاتیک یک محیط شهری با راه‌حل‌های تحلیلی است. نتایج این

هو^۱ با در نظر گرفتن الگوی تغییرشکل واقعی تونل‌های مستطیلی شکل و محاسبه تنش‌های عمودی و برشی در برهم کنش خاک-تونل، راه‌حل‌های بهبود یافته‌ای ارائه داد [58].

شکل ۱۲. ساختار مستطیلی در محیط نامحدود [58]

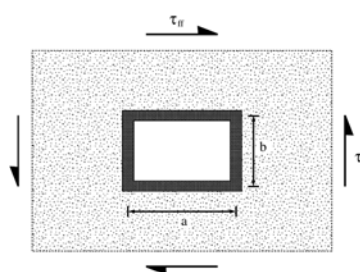


Fig. 12. Rectangular structure in an infinite medium [58]

راه‌حل‌های تحلیلی معمولاً رفتار الاستیک خطی خاک را در نظر می‌گیرند و بنابراین، آن‌ها به طور ضمنی برای مدول برشی خاک، مستقل از هم حساب نمی‌شوند. بابت^۲ این کاهش مدول برشی را با استفاده از یک روش تکرار شونده برای تنظیم مدول برشی زمین، بسته به سطح کرنش برشی تا رسیدن به همگرایی کرنش برشی، در نظر گرفت [59].

همه راه‌حل‌های بسته فوق بدون توجه به اثر اشباع خاک ایجاد شده‌اند. بابت راه‌حل‌هایی را برای تونل‌های دایره‌ای در خاک اشباع شده با فرض برهم کنش بدون لغزش پیشنهاد داد [60]. در مطالعه بعدی بابت راه‌حل‌های قبلی را برای تجزیه و تحلیل پاسخ تونل‌های مستطیل شکل تحت شرایط برهم کنش بدون لغزش و لغزش کامل و همچنین تحت شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده خاک گسترش داد [61]. پارک^۳ با مرور مجدد راه‌حل‌های فوق، روش جدیدی را برای محاسبه لغزش احتمالی (حالت‌های بدون لغزش، لغزش اصطکاکی و لغزش کامل) در برهم کنش خاک-تونل معرفی کرد [62].

بیشتر روابط تحلیلی پیشنهادی خلاصه شده در بالا مربوط به امواج برشی S است که در جهت عرضی تونل به سمت بالا پخش

5. Kontoe

6. Finite Element

1. Huo

2. Bobet

3. Park

4. Kouretzis

بخش ضعیف روش‌های پنژن و بابت را در برآورد نیروی محوری و گشتاور در شرایط بدون لغزش نشان داد. پس از آن، یک سری اعتبار سنجی تحت سرعت موج های برشی مختلف برای بررسی عملکرد روش تحلیلی پنژن و تعیین کلیات راه حل تحلیلی وانگ و پارک انجام شد. نتایج نشان داد که در شرایط بدون لغزش، راه حل تحلیلی پنژن برای تخمین نیروی محوری نتایج مشابهی را فقط برای $F \leq 1$ در روش های عددی ارائه می دهد. همچنین، راه حل بابت برای تخمین گشتاور خمشی در شرایط بدون لغزش برای $F \leq 2.79$ نتایج مشابه روش های عددی و سایر راه حل های تحلیلی را ارائه می دهد. بنابراین روش های تحلیلی وانگ و پارک در تمام سناریوهای زلزله و نسبت های مختلف انعطاف پذیری، با تجزیه و تحلیل عددی شبه استاتیک نتایج بسیار دقیقی دارند. همچنین برای نشان دادن تأثیر لغزش بین پوشش تونل و خاک در برآورد نیروهای داخلی در هنگام بارگذاری لرزه ای و همچنین ضریب اطمینان از انعطاف پذیری روش پارک از نظر شرایط لغزش، یک تجزیه و تحلیل عددی شبه استاتیک تحت شرایط لغزش واقعی بین پوشش و خاک صورت گرفت. نتایج کاهش قابل توجهی در نیروی محوری و گشتاور خمش را نشان داد. علاوه بر این، نتایج تجزیه و تحلیل عددی هماهنگی خوبی با نتایج راه حل تحلیلی پارک داشت. با توجه به نتایج ارائه شده می توان نتیجه گیری کلی کرد که از راه حل های پنژن نباید در طراحی تونل بدون لغزش تحت بارگذاری لرزه ای استفاده شود و از راه حل های تحلیلی وانگ به عنوان برآورد اولیه با احتیاط استفاده شود. با این حال، راه حل تحلیلی پارک، به دلیل توانایی شبیه سازی لغزش در رابط پوشش داخلی و هماهنگی نتایج آن با استفاده از روش های عددی در انواع مختلف خاک (طیف گسترده ای از F)، تخمین دقیق تری را در بارگذاری لرزه ای نسبت به روش های دیگر فراهم می کند. در نتیجه، روش پارک در انواع زلزله، خاک و شرایط لغزش بین پوشش و خاک قابل استفاده است [67].

شکل ۱۳. خروجی بیشترین نیروی محوری در مقابل نسبت نرمی در شرایط بدون لغزش [67]

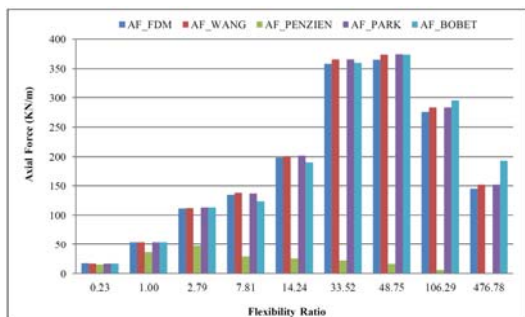


Fig. 13. Maximum axial force output versus flexibility ratio in no-slip condition [67]

شکل ۱۴. خروجی بیشترین ممان خمشی در مقابل نسبت نرمی در شرایط بدون لغزش [67]

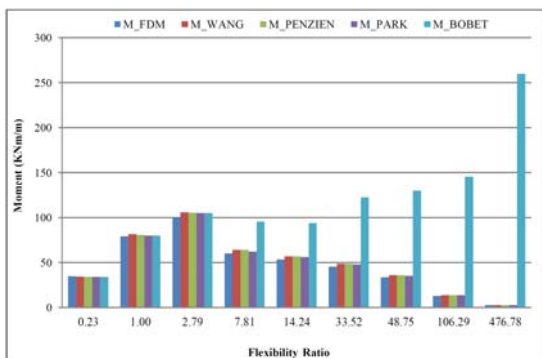


Fig. 14. Maximum moment output versus flexibility ratio in no-slip condition [67]

اطلاعات موجود در ارتباط با سازه های زیرزمینی در مقایسه با سازه های سطحی بسیار کمتر است. با این وجود، تحقیقاتی در ارتباط با خسارات ناشی از زلزله بر روی سازه های زیرزمینی صورت گرفته است. در ارتباط با درصد خسارات وارده به تونل در اثر زلزله می توان به داودینگ^۱ و روزن^۲ در سال ۱۹۷۸، مطالعات اون^۳ و شول^۴ در سال ۱۹۸۱ و شارما^۵ و جود^۶ در سال ۱۹۹۱ اشاره کرد. اون پاسخ تونل را در شرایط زلزله به سه

4. Scholl
5. Sharma
6. Judd

1. Dowding
2. Rozan
3. Owen

تغییر شکل محوری، تغییر شکل انحنای تونل و تغییر شکل بیضوی در تونل‌های دایره‌ای و کج شدن در تونل‌های مستطیلی بیان کرد [3]. در اشکال (۱۵ و ۱۶) خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته، ارائه شده است.

شکل ۱۵. اثر عمق روباره بر تخریب [4]

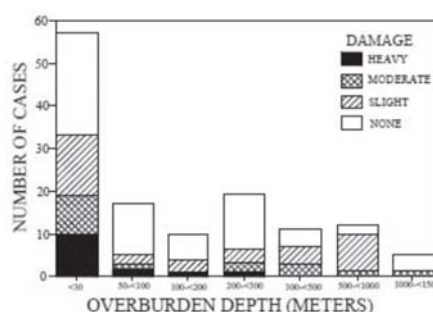


Fig. 15. Effects of overburden depth on damage [4]

شکل ۱۶. اثر بیشینه شتاب سطح زمین بر تخریب [4]

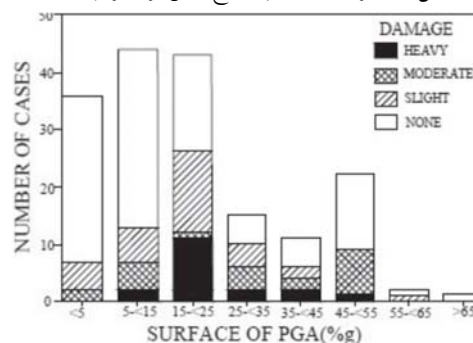


Fig. 16. Influence of expected surface peak ground acceleration (PGA) values on damage [4]

بیضی شدن تونل دایره‌ای در درجه اول ناشی از انتشار امواج لرزه‌ای در صفحات عمود بر محور تونل است. بیشتر این امواج برشی انتشار یافته عمودی هستند که اعوجاج بیضی شکل پوشش را ایجاد می‌کنند. همان‌گونه که در شکل (۵) نشان داده شده است، این اعوجاج‌های برشی تولید شده توسط زمین می‌توانند باعث تغییر شکل یک تونل مستطیل شکل (حرکت پهلوی) شوند. همان‌طور که اشاره شد، وانگ یک روش تحلیل ساده قابل استفاده برای برآورد اولیه تغییر مکان ناشی از زلزله در تونل‌های دایره‌ای و مستطیلی شکل ارائه داد [11].

۴- روش‌های شبه استاتیکی

با توجه به حالت‌های تغییرشکل متمایز تونل‌ها و سطح بالقوه مربوط به آسیب ناشی از لرزش زمین در جهات طولی و عرضی، تجزیه و تحلیل لرزه‌ای تونل‌ها بیشتر با استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل‌های مختلف در دو جهت جدا بررسی می‌شود [57, 68, 69]. [6, 14, 16, 55]

در جهت عرضی، ساده کردن تجزیه و تحلیل با استفاده از یک روش استاتیک معادل کاملاً معمول است. به عنوان نمونه، برای تونل‌های مستطیلی می‌توان، همان‌گونه که اشاره شد، از روش پیشنهادی وانگ استفاده کرد که به معنی تجزیه و تحلیل ساده استاتیک قاب پوشش تونل است [14]. تغییرشکل لرزه‌ای تونل از تغییرشکل میدان آزاد در عمق تونل که در ضریب اثر برهم کنش خاک و تونل، ضرب می‌شود. ضریب اثر برهم کنش خاک و تونل به نسبت نرمی مربوط می‌شود (شکل ۱۷). تغییرشکل لرزه‌ای تونل، به عنوان یک بار استاتیک معادل در بالای گوشه قاب یا به عنوان یک توزیع فشار مثلی در دیوارهای جانبی قاب، به قاب پوشش وارد می‌شود (شکل ۱۷).

شکل ۱۷. مدل‌های تجزیه و تحلیل قاب ساده: شکل سمت چپ: نیروی متمرکز، شکل سمت راست: توزیع مثلی [8]

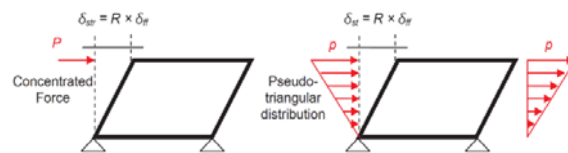


Fig. 17. Simplified frame analysis models, (Figure left) concentrated force, (Figure right) triangular distribution [8]

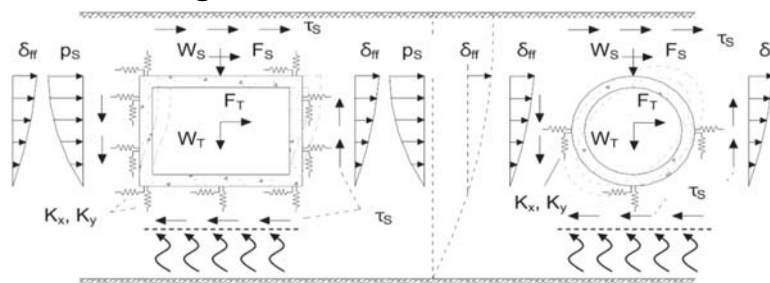
امکان مدل‌سازی تونل در جهت عرضی با استفاده از مدل قاب-فنر نیز وجود دارد (شکل ۱۸). در این حالت، ساختار با المان‌های تیر مدل می‌شود در حالی که خاک از طریق فنرهای مناسب شبیه‌سازی می‌شود. بار لرزه‌ای معادل به ۳ روش معرفی می‌شود: (۱) بارهای استاتیکی معادل (ناشی از ساختار و جرم خاک رویاره)، (۲) تنش‌های برشی لرزه‌ای در امتداد محیط ساختار و (۳) فشار زمین لرزه‌ای یا تغییر شکل زمین، که به دیوارهای جانبی سازه وارد می‌شود. اگرچه این روش به راحتی قابل استفاده است، اما دارای کاستی‌های بسیار مهمی است. تعریف و شبیه‌سازی فشارهای واقعی زمین لرزه‌ای و توزیع تنش‌های برشی در اطراف تونل برای تونل‌ها کار

جدول ۱. خلاصه فرضیات و کاربرد راه‌حل‌های تحلیلی برای تجزیه و تحلیل تونل‌های تحت لرزش زمین (R: روش آن را پوشش نمی‌دهد / S: روش آن را پوشش می‌دهد). [8]

Solution	Tunnel lining		Soil type		Saturation conditions		Soil layering		Soil-tunnel interface			Cross-section		Section	
	Elastic	Plastic	Elastic	Plastic	Dry	Saturated	Homogeneous	Layered	No-slip	Frictional slip	Full slip	Circular	Rectangular	Transversal	Longitudinal
St. John (1984)	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	S	R	S	S
Wang (1993)	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	S	R	S	R
Penzien and Wu (1990)	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	S	R	S	R
Penzien (2000)	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	S	R	S	R
Bobet (2003)	S	R	S	R	S	S	S	R	S	R	S	S	R	S	R
Huo (2006)	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	S	R
Park (2009)	S	R	S	R	S	R	S	R	S	S	S	S	R	S	R
Bobet (2010)	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	S	R	S	R
Kouretzis (2006)	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	S	R	R	S
Kouretzis (2011)	S	R	S	R	S	R	S	R	R	R	S	S	R	S	R
Kouretzis(2014)	S	R	S	R	S	R	S	R	R	R	S	S	R	S	R

Table 1. Summary of assumptions and applicability of analytical solutions for the analysis of tunnels under ground shaking (R - the method does not cover it / S - the method covers it.) [8]

ساده‌ای نیست. علاوه بر این، شبیه‌سازی خاک با استفاده از فنرهای



به طور کلی، پاسخ غیرخطی خاک در هنگام زلزله با استفاده از ویژگی‌های معادل خاک در چارچوب تقریب خطی محاسبه می‌شود. این رویکرد که از پایه یک تجزیه و تحلیل الاستاتیکی است که در مقایسه با تجزیه و تحلیل تاریخیچه زمان، مقرون به صرفه است. با این وجود، مواردی وجود دارد که می‌تواند در این روش تأثیر بگذارد. از جمله: مدل‌سازی پاسخ غیرخطی خاک و انتخاب اندازه شبکه^۱ مناسب برای خاک. با توجه به نکته اول، روش‌های تجزیه و تحلیل الاستاتیک ساده نمی‌توانند تاریخیچه بارگذاری خاک را در هنگام لرزش به اندازه کارآمدی تجزیه و تحلیل دینامیکی مدل کنند. این تاریخیچه بارگیری به طور قابل توجهی بر واکنش تسلیم زمین اطراف تونل و پاسخ تونل تأثیر می‌گذارد. با توجه به نکته دوم، برای از بین بردن هرگونه آثار مرزی بالقوه، باید اندازه شبکه به درستی انتخاب شود [16, 72].

خاک کاملاً یک مسئله پیچیده است، زیرا در ادبیات فنی پیشنهادهای زیادی برای این نوع سازه‌ها ارائه نشده است [8]. برای جلوگیری از مشکلات مربوط به شبیه‌سازی زمین با استفاده از فنرها، روش‌های عددی که زمین اطراف را به عنوان یک محیط پیوسته تلقی می‌کنند، توسعه یافته‌اند. به عنوان نمونه در چارچوب تجزیه و تحلیل الاستاتیک معادل یا روش تغییر شکل ضریب لرزه‌ای شبه‌الاستاتیکی، خاک-تونل از طریق یک مدل عددی دو بعدی شبیه‌سازی می‌شود. بار لرزه‌ای، به عنوان یک نیروی جسم اینرسی معادل در کل مدل عددی، معرفی می‌شود (شکل ۱۹). مشخصات شتاب ممکن است از طریق تجزیه و تحلیل پاسخ یک بعدی خاک (خطی، خطی معادل یا غیر خطی) حاصل شود. بدیهی است که این روش برای هر دو تونل دایره‌ای و مستطیلی قابل استفاده است. به عنوان یک جایگزین برای این روش، بار لرزه‌ای معادل به عنوان الگوی تغییر شکل زمین در مرزهای مدل عددی (شکل ۱۹ سمت

شکل ۱۸. روش الاستاتیک معادل ساده برای تجزیه و تحلیل لرزه ای عرضی در تونل‌های مستطیل و دایره‌ای [8]

Fig. 18. Simplified equivalent static method for the transversal seismic analysis of rectangular and circular tunnels [8]

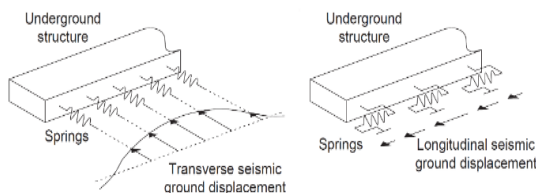


Fig. 20. Simplified equivalent static analysis method for tunnels: (Figure left) transversal analysis (Figure right) longitudinal analysis [8]

در روش‌های واکنش زیرزمینی، مدل‌سازی تونل به عنوان یک تیر روی فنرهای الاستیک برای تجزیه و تحلیل لرزه‌ای تونل‌ها در جهت طولی ارائه شده است. در این نوع تجزیه و تحلیل‌ها، به عنوان تجزیه و تحلیل‌های الاستاتیک معادل ساده یا تجزیه و تحلیل‌های دینامیکی

شکل ۱۹. تجزیه و تحلیل الاستاتیک معادل: شکل سمت چپ: بارهای اینرسی توزیع شده، شکل سمت راست: تغییر شکل زمین در مرزها وارد می‌شود [8]

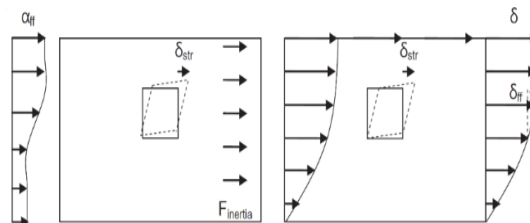


Fig. 19. Detailed equivalent static analysis: (Figure left) distributed inertial loads (Figure right) imposed ground distortions at the boundaries [8]

شکل ۲۰. روش تحلیل الاستاتیک معادل ساده برای تونل‌ها، شکل سمت چپ: تحلیل عرضی، شکل سمت راست: تحلیل طولی [8]

ساده ذکر شده است، بار لرزه‌ای، به عنوان تغییر شکل ثابت استاتیکی زمین که می‌تواند تغییرات مکانی حرکت زمین را محاسبه کند، به فنرها اعمال می‌شود (شکل ۲۰). پارامتری که ممکن است به طور قابل توجهی روی پاسخ محاسبه شده تأثیر بگذارد، فاصله بین فنرها است که به طول موج غالب و دامنه فرکانس مورد نظر بستگی دارد. مشابه تحلیل استاتیک معادل ساده، تحلیل دینامیکی ساده است. در این حالت، بارگذاری لرزه‌ای به عنوان تاریخچه زمان جابه‌جایی معرفی می‌شود که ممکن است تغییرات مکانی حرکت زمین لرزه‌ای را در برداشته باشد. این روش اجازه می‌دهد تا مدل‌سازی ویژگی‌های مکانیکی کارآمد پیچیده (به عنوان نمونه رفتار برهم کنش خاک-تونل، رفتار اتصالات و غیره) امکان پذیر شود. یک مسئله اساسی برای اجرای روش‌های فوق، برآورد عملکردهای مقاومتی خاک (فنرها و میراگرها) است [68].

روش‌های ساده برای طراحی لرزه‌ای تونل‌های طولانی معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد. به راحتی می‌توان از آن‌ها برای بدست آوردن پاسخ کلی سازه تونل تحت بارگذاری لرزه‌ای استفاده کرد. دو مدل ساده، مدل جرم-فنر-تیر و مدل تیر-فنر و راه حل تحلیلی آن برای تجزیه و تحلیل لرزه‌ای تونل‌های طولانی توسط یو^۱ مورد بحث قرار گرفته است [73]. در مدل جرم-فنر-تیر، لایه سطحی خاک در امتداد محور تونل به تعدادی برش خاک تقسیم می‌شود. هر برش توسط یک سیستم معادل جرم-فنر نشان داده شده است که متشکل از یک جرم، یک فنر و یک میراگر است که جرم را به سنگ پایه متصل می‌کند. سپس توده‌های مجاور در امتداد محور تونل با فنرها و میراگرها به یکدیگر متصل می‌شوند تا اتصال بین برش‌های خاک مجاور را شبیه‌سازی کنند. با حل معادله تعادل دینامیکی مدل، می‌توان جابه‌جایی‌های زمین در موقعیت توده‌های خاک و تونل را ارزیابی کرد (شکل ۲۱). در مدل تیر-فنر، تونل به عنوان یک تیر که تکیه گاه آن زمین است، توسط فنرهای خاک و میراگرها، که نشان دهنده برهم کنش خاک و سازه است، فرض می‌شود (شکل ۲۲).

در جدول (۲) خلاصه‌ای از دامنه کاربرد روش‌های شبه‌استاتیکی در بالا آمده است.

شکل ۲۱. مدل جرم-فنر-تیر برای میدان آزاد [73]

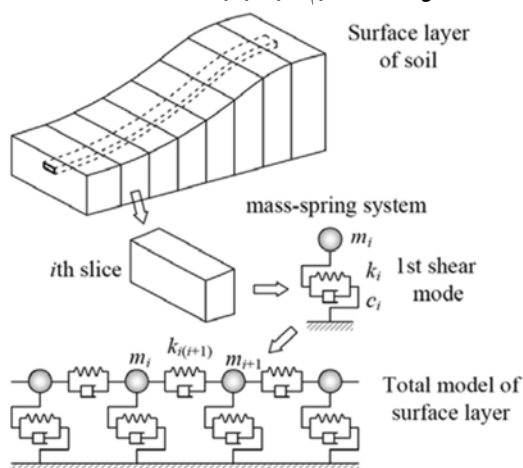


Fig. 21. Mass-spring model for free field [73]

شکل ۲۲. مدل تیر-فنر برای تجزیه و تحلیل لرزه‌ای طولی تونل‌های

طولانی، [73]

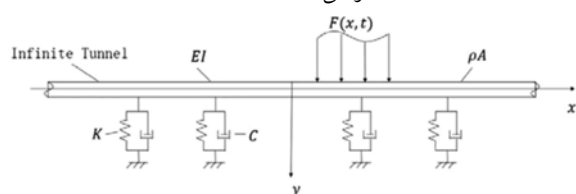


Fig. 22. Long lined tunnel on a viscoelastic foundation subjected to dynamic loads [73]

۵- تحلیل عددی دینامیکی

راه حل‌های تحلیلی و روش‌های ساده تجزیه و تحلیل برای اهداف اولیه طراحی بسیار مفید هستند. با این حال، برای پیش‌بینی دقیق‌تر، ممکن است به تجزیه و تحلیل کامل دینامیکی، با استفاده از مدل‌های عددی، نیاز باشد. تجزیه و تحلیل تاریخیچه زمان دینامیکی همراه با مدل‌سازی خاک-تونل دقیق‌ترین روش برای تجزیه و تحلیل لرزه‌ای تونل‌ها است. تجزیه و تحلیل عددی می‌تواند ذاتاً جنبه‌های حرکتی و اینرسی اثر متقابل خاک و ساختار را توصیف کند. روش‌های عددی می‌توانند به اندازه کافی هندسه‌های پیچیده و ناهمگنی‌های خاک و همچنین آثار سایر ساختارهای موجود، که در منطقه قرار دارند، را شبیه‌سازی کنند. با استفاده از مدل رفتاری مناسب، می‌توان رفتار غیرخطی خاک و ساختار و برهم کنش خاک و ساختار را مدل‌سازی کرد. بی‌گمان، روش‌های عددی دو بعدی یا سه بعدی، براساس روش اجزای محدود یا تفاضل محدود، بیشترین استفاده را برای محاسبات مربوط به سازه‌های مدفون شده در یک محیط بیوسته، یعنی خاک

جدول ۲. خلاصه فرضیات و کاربرد راه حل های شبه استاتیکی

برای تجزیه و تحلیل تونل های تحت لرزش زمین (R: روش آن را پوشش نمی دهد / S: روش آن را پوشش می دهد).

Solution	Tunnel lining		Soil type		Saturation conditions		Soil layering		Cross-section		Section	
	Elastic	Plastic	Elastic	Plastic	Dry	Saturated	Homogeneous	Layered	Circular	Rectangular	Transversal	Longitudinal
St. John (1984)	S	R	S	R	S	S	S	R	S	S	R	S
	S	R	S	R	S	S	S	R	S	R	S	R
Hashash (2010)	S	R	S	R	S	S	S	R	S	S	S	R
	S	R	S	R	S	S	R	S	S	S	S	S

Table 2. Summary of assumptions and applicability of quasi-static solutions for the analysis of tunnels under ground shaking (R - the method does not cover it / S - the method covers it.)

و سنگ، دارند در حالی که روش المان گسسته برای تجزیه و تحلیل محیط‌های ناپیوسته، یعنی سنگ شکسته، استفاده شده است. روش‌های جدید تجزیه و تحلیل، مانند مدل‌های چند مقیاسی المان محدود [73-75] و آمیختن المان محدود با المان مرزی [76] به تازگی مورد بررسی قرار گرفته است تا محاسبات را بهبود بخشد. بدیهی است که استفاده از مدل‌های مختلف خاک ممکن است منجر به پاسخ‌های متمایز پیش‌بینی شده عددی برای تونل‌های مورد بررسی شود [77, 78]. علاوه بر این، کنتو [79] و سان [80]، اهمیت تنظیم منطقی میرایی خاک را در تجزیه و تحلیل عددی تونل‌های تحت لرزش زمین برجسته کردند، در حالی که آندروتی [81] و کامپاس [82]، تأثیر رویکرد مدل‌سازی (خطی یا غیرخطی) پوشش تونل را در پاسخ پیش‌بینی شده برجسته کردند. همچنین بائو، به بررسی رفتار لرزه‌ای یک تونل مستطیل شکل در خاک روانگرا پرداخته است که براساس آن افزایش دامنه شتاب عمودی باعث افزایش سطح روان‌گرایی، تغییر شکل سطح زمین و بالارفتن ساختار تونل می‌شود، اما تأثیر کمی بر نیروی داخلی ساختار تونل دارد. [83].

تونل‌ها بیشتر با فرض شرایط میدان آزاد تحت بارگذاری لرزه‌ای طراحی می‌شوند. با این حال، در مناطق درون شهری این سازه‌ها از زیر ساختمان‌ها عبور می‌کنند که بیشتر بلند مرتبه هستند یا در نزدیکی آن‌ها واقع شده‌اند. در طول زمین لرزه، سازه‌های بالای زمین ممکن است آثار متقابل پیچیده‌ای با تونل ایجاد کنند و پاسخ لرزه‌ای آن را در مقایسه با شرایط میدان آزاد تغییر دهند. از این رو به تازگی پژوهش‌هایی در این مورد صورت گرفته است. تجزیه و تحلیل‌ها نشان دادند که پارامترهایی که به طور قابل توجهی بر این پدیده تأثیر می‌گذارند عبارتند از: انعطاف پذیری نسبی خاک-تونل، ابعاد تونل، عمق دفن تونل و ویژگی‌های خاک و غیرخطی بودن در هنگام لرزش. پس از بررسی مشخص شد،

وجود سازه‌های سطح زمین بر میدان موج برشی تأثیر می‌گذارد و منجر به افزایش نیروهای دینامیکی می‌شود. این اثر برای حالت کم عمق مشهودتر است. همچنین آثار در مورد نوع خاک C^۱ به دلیل کاهش مقاومت در مقایسه با نوع خاک B^۲ قابل توجه‌تر است (طبقه بندی خاک براساس یوروکد ۸ است) [22].

انعطاف پذیری لایه خاک و ارتفاع ساختمان تأثیری در ترتیب مودهای لرزشی ندارد، اما با افزایش ارتفاع ساختمان و در نظر گرفتن انعطاف پذیری بستر، دوره‌های ارتعاشی طولانی‌تر شدند [84]. وجود ساختمان باعث کاهش نسبت تشدید^۵ در مقایسه با شرایط میدان آزاد می‌شود [85]. تجزیه و تحلیل سیستم ساختمانی تونل-خاک-سطح زمین تا بیشترین عمق تونل ۱۸ متر و بیشترین فاصله ساختمان ۲۰ متر ضروری است [86]. براساس نتایج، نیروهای محوری تونل، بین شرایط لغزش کامل و عدم لغزش متفاوت است. راه‌حل‌های تحلیلی برای شرایط بدون لغزش^۶ محافظه کارانه‌تر و نزدیک به نتایج عددی به دست آمده در شرایط بدون لغزش هستند [86]. برای بیشتر موارد بررسی شده، در نظر گرفتن سازه‌های زمینی منجر به افزایش پاسخ دینامیکی تونل از نظر تغییر شکل و نیروهای پوشش تونل، با اهمیت بیشتر برای تونل‌های کم عمق می‌شود. با توجه به تعداد زیادی از پارامترهای درگیر و عدم قطعیت‌های مرتبط، بسیار دشوار است که با یک مقدار دقیق، پاسخ را اصلاح کرد. با این حال، برای محافظه کارانه‌ترین نتایج این مطالعات، ممکن است نتیجه بگیریم که برای سازه‌های زیرزمینی، منجر به افزایش ۲۵٪ برای ممان خمشی پوشش و ۳۰٪ برای نیروی محوری پوشش در مقایسه با شرایط میدان آزاد است [22].

چائو^۶ با استفاده از مورد مطالعاتی ریزش ایستگاه دایکای^۷، افزایش ظرفیت لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی با استفاده از ستون‌های ایزوله لغزشی^۸، که در میراگر بین تیر و ستون نصب می‌شود تا

۱. رسوبات ماسه متراکم یا متوسط، شن یا خاک رس سفت

۲. رسوبات ماسه، شن یا خاک رس بسیار سفت

۵. فرض می‌شود که در هنگام وقوع یک رویداد لرزه ای، هیچ لغزشی در طول

رابط بین خاک و پوشش رخ نمی‌دهد.

6. Chao

7. Daikai Station

8. Sliding Isolation Bearing:

3. Eurocode 8

4. Amplification ratio

پوشش برای حالت موج S بسیار ناچیز است [91]. یو^{۱۰} با یک مدل سه بعدی از تونل لانگسی^{۱۱}، پیش‌بینی‌های عددی و خسارت گزارش شده از زلزله ۲۰۰۸ ونچوان در چین را مقایسه کرده است [92]. همچنین چن^{۱۲} به بررسی تأثیر عمق بر آسیب لرزه‌ای تونل‌ها پرداخته است [93]. آموروسی^{۱۳} مجموعه‌ای از تجزیه و تحلیل‌ها با هدف مطالعه پاسخ عرضی لرزه‌ای یک تونل کم عمق در دو نوع خاک رس متفاوت ارائه داد [94]. سینیدیس پاسخ لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای را در شن و ماسه خشک بحث و کارایی روش‌های تجزیه و تحلیل لرزه‌ای فعلی را در انعطاف‌پذیری پوشش بررسی کرده است. طبق نتایج آن، شرایط برهم کنش خاک و تونل به طور قابل توجهی بر عملکرد خاک در اطراف تونل و همچنین روی نیروهای محوری دینامیکی تأثیر می‌گذارد. این اثر برای ممان‌های خمشی دینامیکی پوشش ناچیز بوده است [78]. سان^{۱۴} اثر یک لایه خاک نرم در پاسخ لرزه‌ای سایت و رفتار لرزه‌ای تونل برجسته کرده است که لایه خاک نرم تمایل داشت دامنه شتاب طیفی را در دوره‌های طولانی تقویت کند در حالی که پاسخ را در دوره کوتاه مدت کاهش می‌داد [95]. حلبیه^{۱۵} به منظور بررسی واکنش خاک و تونل تحت بارگذاری لرزه‌ای، یک شبیه‌سازی عددی از یک تونل تعبیه شده در شن و ماسه متراکم ارائه کرده است [96]. آرگیرویدیس^{۱۶} یک روش عددی برای ساخت منحنی شکنندگی برای تونل‌های کم عمق در رسوب‌های آبرفتی، که تحت بارگذاری لرزه‌ای عرضی قرار می‌گیرد، ارائه کرده است [97].

پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی را تضعیف کند، بررسی کرده است که تحلیل عددی مدل‌سازی نشان می‌دهد که وسیله موثری برای بهبود ظرفیت لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی است چون باعث کاهش تغییر شکل دیواره‌های جانبی می‌شود. [87]. سالمی برای اطمینان از پایداری طولانی مدت سازه‌های زیرسطحی در مناطق آبرفتی و شهری و کمربند لرزه‌ای، تحلیل دینامیکی و طراحی لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۱ بر اساس نیروی محوری، گشتاور خمشی و نیروی برشی برای دو نوع بار لرزه‌ای انجام داده است که نتایج حاکی از توانایی این روش در طبقه بندی قطعات پوشش در طول بارهای استاتیک و دینامیکی را دارد [88]. هوانگ^۲ واکنش لرزه‌ای و حساسیت به خسارت تونل‌ها در زلزله با بیشترین شتاب^۳، سرعت^۴ و جابه‌جایی مختلف زمین^۵ را بررسی کرده است و نشان داده است نسبت به PGV و PGA، PGD تأثیر کمی در پاسخ لرزه‌ای تونل دارد [89]. سینیدیس^۶ به شبیه‌سازی عددی آزمایش رود رابین^۷ روی تونل‌ها و مقایسه پیش‌بینی‌های عددی با داده‌های تجربی ارائه داده است که با توجه به انواع عدم قطعیت‌های موجود، مدل‌های عددی ممکن است پاسخ ثبت شده در سانتیفریوژ را کاملاً راضی کننده، ایجاد کنند [90]. سیلینگیر^۸ روی تأثیر ویژگی‌های حرکت ورودی بر رفتار لرزه‌ای تونل‌های دایره‌ای و مربعی متمرکز شده است [34]. کورتزیس^۹ اثر خواص برهم کنش پوشش داخلی بر نیروی داخلی در پوشش یک تونل دایره‌ای، برای انتشار موج P و S را به صورت عددی بررسی کرده است که براساس آن هنگامی که بارهای توده خاک اطراف، توسط پوشش تونل تکیه گاه موقت تحمل می‌شود، اثر اصطکاک روی پاسخ ساختاری

مجموعه ای از المان‌های سازه ای هستند که یک روبنا را از زیربنای آن که بر روی زمین تحت زمین لرزه قرار دارد، جدا کرده و از این طریق از یکپارچگی ساختاری ساختمان محافظت می‌کند.

8. Cilingir
9. Kouretzis
10. Yu
11. Longxi tunnel
12. Chen
13. Amorosi
14. Sun
15. Hleibieh
16. Argiroudīs

1. Genetic Algorithm
2. Huang
3. Peak Ground Acceleration (PGA)
4. Peak Ground Velocity (PGV)
5. Peak Ground Displacement (PGD)
6. Tsiniadis
7. Round Robin test

۶- مدل سازی ناهمگنی

تاکنون روش هایی که برای تجزیه و تحلیل پایداری تونل پیشنهاد شده بود، به عنوان نمونه، روش های تحلیلی، روش های تجربی، روش های شبه استاتیکی و روش های عددی، بررسی شدند. با این حال در میان آن ها، یک محدودیت مشترکی وجود دارد که راه حل های پیش بینی شده با این فرض بدست می آیند که پارامترهای خاک مقادیر معین هستند، این بدان معنی است که از تنوع ویژگی های خاک چشم پوشی می شود. روش های تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان، با استفاده از تنوع مکانی ویژگی های خاک، راه حل منطقی تری نسبت به روش های قطعی ارائه می دهند.

پارک^۱ پاسخ تونل تحت حرکت زمین با تغییر سه بعدی ویژگی های خاک مدل سازی کرد. نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد که زمین لرزه با در نظر گرفتن ناهمگنی زمین، باعث خم شدن طولی تونل و ایجاد تنش محوری قابل توجهی در پوشش تونل می شود. این اثر می تواند در مرزی که در آن خواص زمین در جهت طولی تغییر می کند، قابل توجه باشد [62]. برای ارزیابی تحلیلی آثار ناهمگنی جانبی خاک، به ویژه نوسانات تصادفی فرکانس غالب لایه خاک، لایب^۲ یک مدل احتمالی پیشنهاد داد. کاربرد این روش به سایت هایی محدود می شود که می توانند توسط لایه های خاک افقی نشان داده شوند. براساس این روش هرچه ناهمگنی خاک بیشتر باشد، جابه جایی های دینامیکی و نیروهای برشی بزرگتر هستند. همچنین نتایج نشان دادند که آثار ناهمگنی جانبی خاک باعث کاهش مقادیر عملکرد چسبندگی کل می شود [98].

چن^۳ نقش اساسی تأثیر ویژگی های تصادفی خاک و اثر عبور موج را بر عملکرد لرزه ای تونل بررسی کرده است [99]. با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل میدان آزاد مشخص شد که اثر عبور موج می تواند بیشترین شتاب زمین را کاهش دهد و باعث تاخیر زمانی در ورود موج شود، اما خواص تصادفی خاک بیشترین شتاب زمین را به شدت بزرگ می کند. همچنین خواص تصادفی خاک ممان های خمشی را کمی تغییر می دهد، اما می تواند نیروهای

محوری را تا ۲۳۰٪ بزرگ تر کنند. از آن جا که رفتار دینامیکی رس و اثر متقابل لرزه ای و سازه پیچیده است، عملکرد تونل های مستطیل شکل نصب شده در رس های نرم هنوز کاملاً درک نشده است. ژانگ^۴ عملکرد یک تونل مستطیل شکل که تحت یک حرکت زمینی میدان دور قرار دارد، به صورت عددی با استفاده از روش المان محدود همراه با میدان های تصادفی بررسی کرده است. در این پژوهش مدول کرنش برشی رس به عنوان یک میدان تصادفی در نظر گرفته شد. نتایج تجزیه و تحلیل نشان می دهد که مدول کرنش برشی تصادفی می تواند به طور قابل توجهی روی پاسخ های لرزه ای ممان خمشی، نیروی برشی و تغییر شکل جانبی دیواره های تونل مستطیل شکل در درجات مختلف تأثیر بگذارد. اثر تصادفی بودن در بیشترین مدول برشی خاک روی پاسخ لرزه ای تونل را می توان با معرفی یک ضریب ایمنی که با احتمال خرابی هماهنگی دارد، محاسبه کرد. به همین ترتیب، در مرحله طراحی می توان به طور قابل توجهی از زمان و تجزیه و تحلیل تصادفی دینامیکی جلوگیری کرد. [100].

در جدول (۳) خلاصه ای از مطالعات ذکر شده، آمده است.

۷- نتیجه گیری

با وجود تلاش و پیشرفت قابل توجهی که تا به امروز در درک و پیش بینی رفتار لرزه ای تونل ها صورت گرفته، هنوز کار بیشتری لازم است. به طور خاص، پاسخ تونل ها به خرابی های زمینی ناشی از زلزله به طور کامل بررسی نشده است. بیشتر کارهای انجام شده روی پاسخ زمین لرزه ای عرضی تونل ها با فرض شرایط کرنش مسطح و یا بررسی سطح مقطع تونل با ورودی لرزه ای به شکل امواج S بوده است. به نظر می رسد این روش می تواند نیروهای لرزه ای تحت بارگذاری عرضی را به خوبی پیش بینی کند [77]، اما همان طور که در آزمایش های میز لرزش نشان داده شده است [101-103]، بارهای ناهم زمان می تواند پاسخ تونل را به طور قابل توجهی تغییر دهد.

جدول ۳. خلاصه مطالعات و فرضیات مدلسازی ناهمگنی پروفیل خاک به منظور بررسی آثار زلزله بر سازه تونل (R: روش آن را پوشش نمی دهد. / S: روش آن را پوشش می دهد. / ۱: مدل زمینه تصادفی گوسی نرمال / ۲: مدل زمینه تصادفی گوسی لگاریتم نرمال)

Output results	Fragility curve				
		R	R	R	R
	Resonant frequency	R	S	R	R
		S	R	S	S
	Shear force Moment /	S	R	S	S
Heterogeneity method					
Stochastic model of ground motion		R	1	1	2
		S	S	R	R
Random soil parameters	Static	R	S	S	R
	Dynamic	R	R	R	S
Cross-section	Rectangular	R	S	S	S
	Circular	S	S	R	R
Model	3D	S	R	R	R
	2D	R	S	S	S
Solution	numerical	S	R	S	S
	Analytical	R	S	R	R
Researcher		Park (2009)	Laib (2015)	Chen (2017)	Zhang (2020)

Table 3. Summary of assumptions and applicability of modeling heterogeneity of soil profiles to investigate the effects of earthquakes on tunnel structures (R - the method does not cover it / S - the method covers it / 1: Gaussian Normal Random Field / 2: Gaussian Lognormal Random Field)

رویکردهای سه بعدی، با استفاده از مدل‌های تیر و فنر، می‌توانند برای بررسی حرکت زمین در امتداد محور طولی تونل‌ها استفاده شوند [62]. با این حال، چنین روش‌هایی در حال حاضر بر اساس رفتار کشش خطی زمین است و برای رفتار غیر خطی، می‌توان با تجزیه و تحلیل‌های المان محدود، شبیه‌سازی کرد و آنالیزهای غیرخطی کاملاً سه بعدی را انجام داد [79, 104].

بهبود مداوم در مدلسازی پاسخ ساختاری تونل نیز مورد نیاز است. بیشتر روش‌ها به روش‌های کشش خطی معادل متکی هستند که شناسایی صحیح سختی نسبی ساختار خاک مهم است [78, 105]. در حالی که مدلسازی دقیق می‌تواند به جزئیات لرزه‌ای و طراحی انعطاف‌پذیر تونل‌های جدید کمک کند، اما یک مشکل مهم مربوط به رفتار تونل‌های قدیمی فراتر از عمر طراحی اولیه آن‌ها است، که قرار گرفتن در معرض خطرات لرزه‌ای افزایش می‌یابد و تکیه‌گاه آن‌ها ممکن است به طور قابل توجهی پیر یا تخریب شده باشد. برای چنین مشکلاتی، مقاومت نسبی نیز برای درک آسیب ساختاری تونل [82, 106] و تولید منحنی‌های شکنندگی مناسب [107] نیز مهم است.

پژوهش‌های جدید با استفاده از مدل‌های الاستیک خاک معادل [85, 9] یا مدل‌های الاستو پلاستیک [22] بوده است. این مطالعات روی آثار سازه‌های سطحی بر پاسخ تونل متمرکز است. از آن‌جا که بسیار نادر است که سازه‌های ساخته شده در شرایط زمین سبز ساخته شوند، آثار متقابل دینامیکی بین تونل‌ها و ساختمان‌های مجاور یک موضوع تحقیقاتی مهم است که خواستار تحقیقات بیشتر است.

از آن‌جا که تونل‌ها در خاک‌های ناهمگن حفر می‌شوند، برای بررسی ناهمگنی خاک، مدل‌های تصادفی ارائه شدند [98, 108-110] و تحقیقاتی نیز برای درک اثر ناهمگنی خاک بر موج عبوری [99] و تغییرشکل سطح [111] نیز انجام شده است، که آثار ترکیبی خصوصیات تصادفی خاک و اثر عبور موج چشمگیر است و برای ایمنی لرزه‌ای تونل‌ها بهتر است اثر ناهمگنی لحاظ شود.

در ارتباط با چشم‌انداز تحقیقات آتی می‌توان به مطالعات موردی بیشتری از تونل‌ها تحت بار لرزه‌ای برای درک بهتری از

تنش های برشی لرزه ای در اطراف محیط تونل	τ_s	رفتار تونل ها در هنگام زلزله، بررسی های عددی و آزمایشگاهی
(Nm^{-2})		نقش ناهمگنی خاک و تاثیر متقابل آن بر پاسخ تونل تحت لرزش،
وزن خاک سرباره (N)	W_s	اثر ویژگی های حرکت زمین لرزه مانند فرکانس، مدت زمان زلزله
نیروهای اینرسی خاک سرباره (N)	F_s	و امواج سطحی، اثر تجمعی زلزله روی تونل ها و بهبود مدل های
وزن تونل (N)	W_T	فیزیکی موجود برای نزدیک شدن به پاسخ واقعی تونل تحت
نیروهای اینرسی تونل (N)	F_T	زلزله اشاره کرد.
فقر های عمودی خاک در امتداد محیط پوشش تونل	K_x	
(Nm^{-1})		

فقر های برشی خاک در امتداد محیط پوشش تونل	K_y	کرنش برشی میدان آزاد (kgm^{-3})	γ_{ff}
(Nm^{-1})		تنش برشی میدان آزاد (kNm^{-2})	τ_{ff}
شتاب زمین در میدان آزاد (ms^{-2})	a_{ff}	مدول برشی خاک (kNm^{-2})	G
نیروی اینرسی شتاب زمین (N)	$F_{inertia}$	کرنش برشی حفرة بدون اعمال توزیع تنش برشی در	γ_c
		اطراف حفرة (kgm^{-3})	
		سختی دال های بالا و پایین تونل (kNm^2m^{-1})	$E_s I_s$
		تغییر شکل سازه تونل (m)	$\Delta_{stru.}$
		تغییر شکل میدان آزاد تونل (m)	Δ_{ff}
		بیشترین سرعت ذرات موج S در عمق تونل (ms^{-1})	V_s
		سرعت موج برشی موثر در زمین اطراف تونل (ms^{-1})	C_{se}
		نسبت پواسون زمین اطراف تونل	ν_m
		قطر تونل (m)	D
		نسبت نرمی	F
		مدول الاستیک سازگار با کرنش زمین اطراف تونل	E_m
		(kNm^{-2})	
		شعاع اسمی پوشش تونل (m)	R_l
		نسبت پواسون پوشش تونل	ν_l
		ممان اینرسی پوشش در واحد عرض تونل (m^4m^{-1})	$I_{l,1}$
		(1)	
		ضریب	k_1
		ارتفاع ساختار (m)	H
		عرض ساختار (m)	L
		سختی ساختار (Nm^{-1})	k_s
		متوسط مدول برش سازگار با کرنش زمین اطراف	G_m
		تونل (kNm^{-2})	
		نسبت نرمی در تونل های مستطیلی	F_{rec}
		ضریب اثر برهم کنش خاک و تونل	R
		بار نقطه ای استاتیکی معادل (N)	P
		بار فشار مثلثی استاتیکی معادل (N)	p
		فشارهای زمین لرزه ای روی دیواره های جانبی سازه	P_s
		مستطیل شکل (Nm^{-2})	

۸- فهرست علائم

۹- مراجع

- [1] Dowding, C.H. and A.J.A.J.G.E.D. Rozan, Damage to rock tunnels from earthquake shaking. ASCE J Geotech Eng Div, 1978. 104(2): p. 175-191.
- [2] Yoshikawa, K., G.J.A.i.t.t. Fukuchi, and s. use, Earthquake damage to railway tunnels in Japan. Advances in tunnelling technology subsurface use, 1984. 4(3): p. 75-83.
- [3] Owen, G.N. and R.E. Scholl, Earthquake engineering of large underground structures. 1981.
- [4] Sharma, S. and W.R.J.E.g. Judd, Underground opening damage from earthquakes. Engineering geology, 1991. 30(3-4): p. 263-276.
- [5] Power, M., et al., Summary and evaluation of procedures for the seismic design of tunnels. Final report for task, 1998.
- [6] Hashash, Y.M., et al., Seismic design and analysis of underground structures. Tunnelling underground space technology, 2001. 16(4): p. 247-293.

- [19] Tsiniadis, G., K.J.S.D. Pitilakis, and E. Engineering, Improved RF relations for the transversal seismic analysis of rectangular tunnels. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2018. 107: p. 48-65.
- [20] Patil, M., et al., Behavior of shallow tunnel in soft soil under seismic conditions. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2018. 82: p. 30-38.
- [21] Kutter, B.L., J.-C. Chou, and T. Travasarou, Centrifuge testing of the seismic performance of a submerged cut-and-cover tunnel in liquefiable soil, in *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*. 2008. p. 1-29.
- [22] Pitilakis, K., et al., Seismic behaviour of circular tunnels accounting for above ground structures interaction effects. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2014. 67: p. 1-15.
- [23] Chian, S., S.J.S.D. Madabhushi, and E. Engineering, Effect of buried depth and diameter on uplift of underground structures in liquefied soils. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2012. 41: p. 181-190.
- [24] Onoue, A., H. Kazama, and H. Hotta. Seismic response of a stacked-drift-type tunnel in dry sand. in *Centrifuge 98*. 1998.
- [25] Yamada, T., et al. Centrifuge model tests on circular and rectangular tunnels subjected to large earthquake-induced deformation. in *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*. 2002.
- [26] Ito, Y. and K.J.G.R.L. Obara, Very low frequency earthquakes within accretionary prisms are very low stress-drop earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 2006. 33(9).
- [27] Shibayama, S., et al., Observed behaviour of a tunnel in sand subjected to shear deformation in a centrifuge. *Soils Foundations*, 2010. 50(2): p. 281-294.
- [28] Tohda, J., et al., Centrifuge model tests on the dynamic response of sewer trunk culverts: J. Tohda H. Yoshimura, in *Physical Modelling in Geotechnics, Two Volume Set*. 2010, CRC Press. p. 677-682.
- [29] Gillis, K., et al. Seismic response of a cut-and-cover underground structure in dry sand: centrifuge modeling. in *8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, ICPMG 2014*. 2014.
- [30] Abuhajar, O., et al., Experimental and numerical investigations of the effect of buried box culverts on earthquake excitation. *Soil*
- [7] Kontoe, S., et al., Case study on seismic tunnel response. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008. 45(12): p. 1743-1764.
- [8] Tsiniadis, G., et al., Seismic behaviour of tunnels: From experiments to analysis. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2020. 99: p. 103334.
- [9] Wang, Z., Z.J.S.D. Zhang, and E. Engineering, Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2013. 45: p. 45-55.
- [10] Zhang, X., et al., Seismic damage assessment of mountain tunnel: A case study on the Tawarayama tunnel due to the 2016 Kumamoto Earthquake. *Tunnelling underground space technology*, 2018. 71: p. 138-148.
- [11] Wang, J.-N. and G. Munfakh, *Seismic design of tunnels*. Vol. 57. 2001: WIT Press.
- [12] Power, M., D. Rosidi, and J.J.N.C.f.E.E.R. Kaneshiro, Buffalo, New York, Vol. III Strawman: screening, evaluation, and retrofit design of tunnels. Report Draft. National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, 1996.
- [13] Institute, N.H., et al., Technical manual for design and construction of road tunnels--civil elements. 2010: AASHTO.
- [14] Wang, J.J.P., Brinckerhoff, Quade and N.Y. Douglas Inc, *Seismic design of tunnels: a state-of-the-art approach*, monograph, monograph 7. Parsons, Brinckerhoff, Quade Douglas Inc, New York, 1993.
- [15] Chen, J. and X.J.I.T.o.S.p. Huo, Theoretical results on sparse representations of multiple-measurement vectors. *IEEE Transactions on Signal processing*, 2006. 54(12): p. 4634-4643.
- [16] Pitilakis, K. and G. Tsiniadis, Performance and seismic design of underground structures, in *Earthquake geotechnical engineering design*. 2014, Springer. p. 279-340.
- [17] Asheghabadi, M.S. and X.J.A.S. Cheng, Analysis of Undrained Seismic Behavior of Shallow Tunnels in Soft Clay Using Nonlinear Kinematic Hardening Model. *Applied Sciences*, 2020. 10(8): p. 2834.
- [18] Golshani, A., M.J.G. Rezaeibadashiani, and G. Engineering, A Numerical Study on Parameters Affecting Seismic Behavior of Cut and Cover Tunnel. *Geotechnical Geological Engineering*, 2020. 38(2): p. 2039-2060.

- [42] Chen, Z., et al., Dynamic centrifuge tests on effects of isolation layer and cross-section dimensions on shield tunnels. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2018. 109: p. 173-187.
- [43] Xu, H., et al., Shaking table tests on seismic measures of a model mountain tunnel. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2016. 60: p. 197-209.
- [44] Chen, J., et al., Shaking table test of utility tunnel under non-uniform earthquake wave excitation. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2010. 30(11): p. 1400-1416.
- [45] Jiang, L., et al., Seismic response of underground utility tunnels: shaking table testing and FEM analysis. *Earthquake engineering and engineering vibration*, 2010. 9(4): p. 555-567.
- [46] Xin, C., et al., Shaking table tests on seismic behavior of polypropylene fiber reinforced concrete tunnel lining. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2019. 88: p. 1-15.
- [47] Ohtomo, K., et al., Research on Streamlining Seismic Safety Evaluation of Underground Reinforced Concrete Duct-Type Structures in Nuclear Power Stations.-Part-2. Experimental Aspects of Laminar Shear Sand Box Excitation Tests with Embedded RC Models. 2001.
- [48] Chen, J., et al., Numerical simulation of shaking table test on utility tunnel under non-uniform earthquake excitation. *Tunnelling underground space technology*, 2012. 30: p. 205-216.
- [49] Zou, Y., et al., A pseudo-static method for seismic responses of underground frame structures subjected to increasing excitations. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2017. 65: p. 106-120.
- [50] Sun, T., et al., Model test study on the dynamic response of the portal section of two parallel tunnels in a seismically active area. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2011. 26(2): p. 391-397.
- [51] Wang, G., et al., Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2018. 76: p. 145-159.
- [52] Kiyomiya, O.J.T. and U.S. Technology, Earthquake-resistant design features of immersed tunnels in Japan. *Tunnelling Dynamics Earthquake Engineering*, 2015. 79: p. 130-148.
- [31] Yang, D., et al., Numerical model verification and calibration of George Massey Tunnel using centrifuge models. *Canadian geotechnical journal*, 2004. 41(5): p. 921-942.
- [32] Cao, J. and M. Huang. Centrifuge tests on the seismic behavior of a tunnel. in *Proceedings of 7th international conference on physical modelling in geotechnics, ICPMG*. 2010.
- [33] Chen, Z., H.J.T. Shen, and U.S. Technology, Dynamic centrifuge tests on isolation mechanism of tunnels subjected to seismic shaking. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2014. 42: p. 67-77.
- [34] Cilingir, U., S.G.J.S.D. Madabhushi, and E. Engineering, A model study on the effects of input motion on the seismic behaviour of tunnels. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2011. 31(3): p. 452-462.
- [35] Tsiniadis, G., et al., Physical modeling for the evaluation of the seismic behavior of square tunnels, in *Seismic evaluation and rehabilitation of structures*. 2014, Springer. p. 389-406.
- [36] Tsiniadis, G., et al., Centrifuge modelling of the dynamic behavior of square tunnels in sand, in *Experimental Research in Earthquake Engineering*. 2015, Springer. p. 509-523.
- [37] Tsiniadis, G., et al., Dynamic response of shallow rectangular tunnels in sand by centrifuge testing, in *Experimental Research in Earthquake Engineering*. 2015, Springer. p. 493-507.
- [38] Tsiniadis, G., K. Pitilakis, and G.J.E.S. Madabhushi, On the dynamic response of square tunnels in sand. *Engineering Structures*, 2016. 125: p. 419-437.
- [39] Tsiniadis, G., et al., Seismic response of box-type tunnels in soft soil: experimental and numerical investigation. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2016. 59: p. 199-214.
- [40] Hashash, Y.M., et al., Influence of tall buildings on seismic response of shallow underground structures. *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 2018. 144(12): p. 04018097.
- [41] Adalier, K., et al., Centrifuge modelling for seismic retrofit design of an immersed tube tunnel. *International journal of physical modelling in geotechnics*, 2003. 3(2): p. 23-35.

- [64] Kouretzis, G.P., et al., Seismic verification of long cylindrical underground structures considering Rayleigh wave effects. *Tunnelling underground space technology*, 2011. 26(6): p. 789-794.
- [65] Kouretzis, G.P., et al., Analysis of circular tunnels due to seismic P-wave propagation, with emphasis on unreinforced concrete liners. *Computers Geotechnics*, 2014. 55: p. 187-194.
- [66] Kontoe, S., et al., Numerical validation of analytical solutions and their use for equivalent-linear seismic analysis of circular tunnels. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2014. 66: p. 206-219.
- [67] Rashidell, A., et al., *Numerical investigation of closed-form solutions for seismic design of a circular tunnel lining by quasi-static method*. *Civil Engineering Journal*, 2018. 4(1): p. 239.
- [68] St John, C., T.J.A.i.t.t. Zahrah, and s. use, Seismic design considerations for underground structures. *Advances in tunnelling technology and subsurface use*, 1984. 4(3): p. 105-112.
- [69] Kawashima, K. Seismic design of underground structures in soft ground: a review. in *Geotechnical aspects of underground construction on soft ground*. 2000.
- [70] Gil, L., et al., Simplified transverse seismic analysis of buried structures. *Soil dynamics earthquake engineering*, 2001. 21(8): p. 735-740.
- [71] Tateishi, A.J.S.E.E.E., A study on seismic analysis methods in the cross section of underground structures using static finite element method. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, 2005. 22(1): p. 41s-54s.
- [72] Hashash, Y.M., et al. Seismic design considerations for underground box structures. in *Earth Retention Conference 3*. 2010.
- [73] Yu, H., Y. Yuan, and A.J.U.S. Bobet, Seismic analysis of long tunnels: a review of simplified and unified methods. *Underground Space*, 2017. 2(2): p. 73-87.
- [74] Ding, J.-H., et al., Numerical simulation for large-scale seismic response analysis of immersed tunnel. *Engineering Structures*, 2006. 28(10): p. 1367-1377.
- [75] Yu, H., et al., Seismic analysis of a long tunnel based on multi-scale method. *Engineering Structures*, 2013. 49: p. 572-587.
- [53] Jin, Y., et al., Experimental investigation of the nonlinear behavior of segmental joints in a water-conveyance tunnel. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2017. 68: p. 153-166.
- [54] Yu, H., et al., Seismic mitigation for immersion joints: Design and validation. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2017. 67: p. 39-51.
- [55] St John, C., T.J.T. Zahrah, and u.s. technology, Aseismic design of underground structures. *Tunnelling underground space technology*, 1987. 2(2): p. 165-197.
- [56] Newmark, N.M. Problem in wave propagation in soil and rock. in *Proceedings of Int. Symp. Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*. 1968. Univ. New Mexico Press.
- [57] Penzien, J.J.E.E. and S. Dynamics, Seismically induced racking of tunnel linings. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 2000. 29(5): p. 683-691.
- [58] Huo, H., et al., Analytical solution for deep rectangular structures subjected to far-field shear stresses. *Tunnelling underground space technology*, 2006. 21(6): p. 613-625.
- [59] Bobet, A., et al., A practical iterative procedure to estimate seismic-induced deformations of shallow rectangular structures. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008. 45(7): p. 923-938.
- [60] Bobet, A.J.T. and U.S. Technology, Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2003. 18(4): p. 377-393.
- [61] Bobet, A.J.T. and U.S. Technology, Drained and undrained response of deep tunnels subjected to far-field shear loading. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2010. 25(1): p. 21-31.
- [62] Park, D., et al., Simulation of tunnel response under spatially varying ground motion. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2009. 29(11-12): p. 1417-1424.
- [63] Kouretzis, G.P., et al., 3-D shell analysis of cylindrical underground structures under seismic shear (S) wave action. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2006. 26(10): p. 909-921.

- coupled tunnel-soil-aboveground building systems by numerical modelling. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017. 15(1): p. 443-467.
- [87] Ma, C., et al., Seismic performance upgrading for underground structures by introducing sliding isolation bearings. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2018. 74: p. 1-9.
- [88] Salemi, A., R. Mikaeil, and S.S.J.K.J.o.C.E. Haghshenas, Integration of finite difference method and genetic algorithm to seismic analysis of circular shallow tunnels (Case study: Tabriz urban railway tunnels). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018. 22(5): p. 1978-1990.
- [89] Huang, J., et al., Effect of peak ground parameters on the nonlinear seismic response of long lined tunnels. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2020. 95: p. 103175.
- [90] Tsiniadis, G., K. Pitilakis, and A.D.J.A.G. Trikaloti, Numerical simulation of round robin numerical test on tunnels using a simplified kinematic hardening model. *Acta Geotechnica*, 2014. 9(4): p. 641-659.
- [91] Kouretzis, G.P., et al., Effect of interface friction on tunnel liner internal forces due to seismic S-and P-wave propagation. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2013. 46: p. 41-51.
- [92] Yu, H., et al., Damage observation and assessment of the Longxi tunnel during the Wenchuan earthquake. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2016. 54: p. 102-116.
- [93] . Chen, C.-H., et al., Mechanisms causing seismic damage of tunnels at different depths. *Tunnelling underground space technology*, 2012. 28: p. 31-40.
- [94] Amorosi, A., D.J.S.D. Boldini, and E. Engineering, Numerical modelling of the transverse dynamic behaviour of circular tunnels in clayey soils. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2009. 29(6): p. 1059-1072.
- [95] Sun, Q., et al., Impact of an underlying soft soil layer on tunnel lining in seismic conditions. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2019. 90: p. 293-308.
- [96] Hleibieh, J., D. Wegener, and I.J.A.G. Herle, Numerical simulation of a tunnel surrounded by sand under earthquake using a hypoplastic [76] Zhou, S., et al., Dynamic response of a segmented tunnel in saturated soil using a 2.5-D FE-BE methodology. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2019. 120: p. 386-397.
- [77] Bilotta, E., et al., A numerical Round Robin on tunnels under seismic actions. *Acta Geotechnica*, 2014. 9(4): p. 563-579.
- [78] Tsiniadis, G., K. Pitilakis, and C.J.B.o.E.E. Anagnostopoulos, Circular tunnels in sand: dynamic response and efficiency of seismic analysis methods at extreme lining flexibilities. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016. 14(10): p. 2903-2929.
- [79] Kontoe, S., et al., On the relative merits of simple and advanced constitutive models in dynamic analysis of tunnels. *Géotechnique*, 2011. 61(10): p. 815-829.
- [80] Sun, Q., D.J.S.D. Dias, and E. Engineering, Significance of Rayleigh damping in nonlinear numerical seismic analysis of tunnels. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2018. 115: p. 489-494.
- [81] Andreotti, G. and C.J.B.o.E.E. Lai, A nonlinear constitutive model for beam elements with cyclic degradation and damage assessment for advanced dynamic analyses of geotechnical problems. Part II: validation and application to a dynamic soil-structure interaction problem. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017. 15(7): p. 2803-2825.
- [82] Kampas, G., et al., The effect of tunnel lining modelling approaches on the seismic response of sprayed concrete tunnels in coarse-grained soils. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2019. 117: p. 122-137.
- [83] Bao, X., et al., Numerical analysis on the seismic behavior of a large metro subway tunnel in liquefiable ground. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2017. 66: p. 91-106.
- [84] Mohsenian, V., et al., An investigation into the effect of soil-foundation interaction on the seismic performance of tunnel-form buildings. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2019. 125: p. 105747.
- [85] Abate, G. and M.R.J.B.o.E.E. Massimino, Numerical modelling of the seismic response of a tunnel-soil-aboveground building system in Catania (Italy). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017. 15(1): p. 469-491.
- [86] Abate, G. and M.R.J.B.o.E.E. Massimino, Parametric analysis of the seismic response of

- [108] Hu, X., et al., A real-life stability model for a large shield-driven tunnel in heterogeneous soft soils. *Frontiers of Structural Civil Engineering*, 2012. 6(2): p. 176-187.
- [109] Cheng, H., et al., Comparison of modeling soil parameters using random variables and random fields in reliability analysis of tunnel face. *International Journal of Geomechanics*, 2019. 19(1): p. 04018184.
- [110] Gholampour, A., A.J.C. Johari, and Geotechnics, Reliability-based analysis of braced excavation in unsaturated soils considering conditional spatial variability. *Computers Geotechnics*, 2019. 115: p. 103163.
- [111] Cheng, H., J. Chen, and J.J.I.J.o.G. Li, Probabilistic analysis of ground movements caused by tunneling in a spatially variable soil. *International Journal of Geomechanics*, 2019. 19(12): p. 04019125.
- model. *Acta Geotechnica*, 2014. 9(4): p. 631-640.
- [97] Argyroudis, S., K.J.S.D. Pitilakis, and E. Engineering, Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2012. 35: p. 1-12.
- [98] Laib, A., et al., Modeling of soil heterogeneity and its effects on seismic response of multi-support structures. *Earthquake Engineering Engineering Vibration*, 2015. 14(3): p. 423-437.
- [99] Chen, Z., et al., Seismic performance of an immersed tunnel considering random soil properties and wave passage effects. *Structure Infrastructure Engineering*, 2018. 14(1): p. 89-103.
- [100] Zhang, L. and Y.J.U.S. Liu, Numerical investigations on the seismic response of a subway tunnel embedded in spatially random clays. *Underground Space*, 2020. 5(1): p. 43-52.
- [101] Yan, X., et al., Multi-point shaking table test design for long tunnels under non-uniform seismic loading. *Tunnelling Underground Space Technology*, 2016. 59: p. 114-126.
- [102] Bao, Z., et al., Multi-scale physical model of shield tunnels applied in shaking table test. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2017. 100: p. 465-479.
- [103] Yu, H., et al., Multi-point shaking table test of a long tunnel subjected to non-uniform seismic loadings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018. 16(2): p. 1041-1059.
- [104] Anastasopoulos, I. and G.J.B.o.E.E. Gazetas, Analysis of cut-and-cover tunnels against large tectonic deformation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2010. 8(2): p. 283-307.
- [105] Nam, S.-H., et al., Seismic analysis of underground reinforced concrete structures considering elasto-plastic interface element with thickness. *Engineering Structures*, 2006. 28(8): p. 1122-1131.
- [106] Hatzigeorgiou, G.D., D.E.J.S.D. Beskos, and E. Engineering, Soil-structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels. *Soil Dynamics Earthquake Engineering*, 2010. 30(9): p. 851-861.
- [107] Argyroudis, S., et al., Effects of SSI and lining corrosion on the seismic vulnerability of shallow circular tunnels. *Soil dynamics earthquake engineering*, 2017. 98: p. 244-256.

Seismic Design and Assessment of Urban Tunnels- A Literature Review on Modelling Studies

AliAkbar Golshani^{1*}, Ehsan Moradabadi², Amirhossein Rezaei³

1- Associate Professor, Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran

2- PhD, Civil Engineering, University College Dublin (UCD), Ireland

3- Master student, Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran

Golshani@modares.ac.ir

Abstract

Advancements in tunnelling technologies and ease of implementation of drilling methods in addition of other political and security issues made the construction of underground structures as an important alternative for answering the demands of population growth and the limitations of surface spaces in urban areas. Underground roads and highways, various types of tunnels and urban subway networks are the examples of underground structures being constructed and rapidly implemented in different countries. Meanwhile, for reducing negative effects to the environment, shortening the routes and improving traffic efficiency, urban tunnels should have high level of safety standards in design, construction and operation. Tunnels are considered major national projects and infrastructure investments, and huge costs are incurred around the world to build these structures. In countries located in highly active seismic zone, such as Iran, seismic researches for such important underground structures should not be ignored. The safety of such structures should be provided with respect to all loading demands and hazards issues associated with the site, including seismic loads. Reviewing seismic events in the past shows that underground structures have suffered less damage than above ground structures against seismic loads. However, in recent years, major earthquakes such as the 1995 Kobe earthquake in Japan, the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan, the 1999 Kocaeli earthquake in Turkey, and the 2008 Wenchuan earthquake in China have caused underground structures to experience significant damage. There is evidence to conclude that the structural vulnerability of a tunnel in seismically active areas is an important issue but is either not yet well understood or not well assessed at the time of construction, emphasising that dynamic analysis of these structures against seismic loads is necessary. Earthquakes are likely to significantly affect tunnel performance by causing severe damage or excessive deformation of the tunnel structure. To understand the seismic-induced behaviour and performance of urban tunnels, this paper provides the state of the art in modelling studies of seismic design and assessment of tunnels. The review includes an investigation in seismic responses of real tunnels reported during past seismic events, the probable mechanisms caused damages in tunnels and physical and numerical methods used until now to either investigate those mechanisms or implemented in new designs. As an introduction, the seismic performance of tunnels affected by previous seismic events discusses first, emphasising the effective parameters in evaluation of tunnel seismic response and the relationship between the parameters, and the damage levels caused during earthquakes. Subsequently, the paper continues with a comprehensive literature review on the experimental methods used to investigate seismic-induced response in tunnels including physical testing, centrifuge tests, shaking table tests, and static tests. Analytical, quasi-static and numerical methods of dynamic analysis of tunnels and the accuracy of these methods are discussed then in details referring to some examples. The paper also reviews the effects of soil heterogeneity in the seismic response of tunnel and application of the random field for dynamic analysis of underground structures. Examining the achievements and challenges remained in the field, the paper concludes with the existing gaps in the field to stimulate readers for doing more relevant researches.

Keywords: Tunnel, dynamic analysis, analytical methods, physical methods, numerical modelling