

ارزیابی سامانه‌ی نگهداری تونل خط ۴ متروی تهران در تقاطع غیر هم‌سطح با تونل توحید و تونل خط ۷ متروی تهران در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زلزله

مهدی سعیدی عباس آباد^{۱*}؛ مهدی موسوی^۲؛ فرشاد نژاد شاه محمد^۳

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی معدن؛ گرایش مکانیک سنگ؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن؛ دانشگاه تهران

۲- دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن؛ دانشگاه تهران

۳- مربی؛ گروه مهندسی معدن؛ مرکز آموزش عالی شهید باکری میان‌دوآب؛ دانشگاه ارومیه

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۷/۱۸؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۰۳

واژگان کلیدی	چکیده
تفاضل محدود تحلیل دینامیکی تونل خط ۴ متروی تهران سامانه‌ی نگهداری بارگذاری زلزله تنش برشی	با توجه به کاربری روز افزون تونل‌ها و اهمیت آن‌ها در شبکه‌ی حمل و نقل بین شهری و درون شهری ضروری است پاسخ دینامیکی تونل‌های شهری در برابر بارهای دینامیکی زلزله مورد بررسی قرار گیرد. به منظور تحلیل دینامیکی تونل خط ۴ متروی تهران، تقاطع غیر هم‌سطح این خط با تونل توحید و خط ۷ در تقاطع خیابان آزادی با بزرگراه نواب انتخاب شده است. 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 نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ 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 احتمالی است. برای شبیه‌سازی بار زلزله‌ی منطقه، با در نظر گرفتن ملاحظات مختلف، سه شتاب‌نگاشت طیس، بم و چنگوره-آوج یا بیش‌ترین شتاب $0.35g$ ، بر اساس مبنای احتمالات زلزله‌ی مبنای طرح، انتخاب و به صورت تاریخچه‌ی تنش برشی به پایه‌ی مدل اعمال شده است. تحلیل‌های انجام شده در این مطالعه نشان می‌دهد آسیبی به سامانه‌ی نگهداری تونل خط ۴ مترو در بارگذاری زلزله وارد نمی‌شود و نیازی به تقویت سامانه‌ی نگهداری تونل نیست.

۱- پیشگفتار

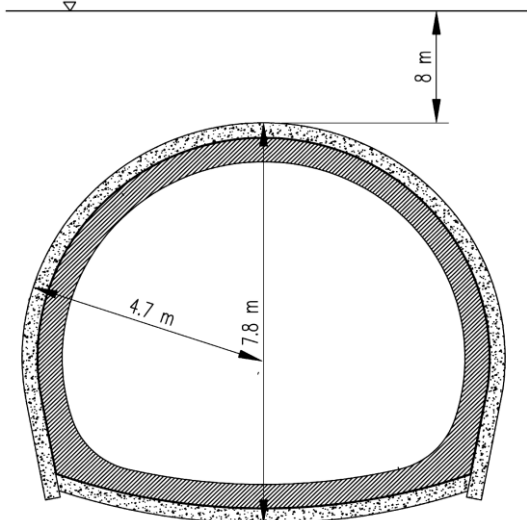
دینامیکی تونل‌ها در برابر بار زلزله ضروری به نظر می‌رسد. بر اساس اطلاعات ثبت شده، سازه‌های زیرزمینی نسبت به سازه‌های سطحی در برابر زلزله از ایمنی بالاتری برخوردار هستند؛ زیرا سازه‌های سطحی فقط در سطح تحتانی خود به زمین اتصال دارند و به صورت آزاد مرتعش می‌شوند، اما سازه‌های زیرزمینی، درگیری کاملی با محیط در برگیرنده داشته و در برابر لرزش مقاوم‌تر هستند [1]. با این حال گزارش‌هایی از خسارات جدی به فضاهای زیرزمینی در مقابل بارگذاری زلزله وجود دارد که حاکی از این است که این سازه‌ها در برابر امواج زلزله به طور مطلق

با توجه به توسعه و کاربری روز افزون تونل‌ها و اهمیت آن‌ها در شبکه‌ی حمل و نقل بین شهری و درون شهری لازم است پاسخ دینامیکی تونل‌های شهری در برابر بارهای دینامیکی زلزله مورد بررسی قرار گیرد. از طرفی ایران یکی از کشورهای لرزه‌خیز جهان است که در امتداد کمربند لرزه‌خیز آلپ-همالیای قرار دارد. فلات ایران در چند صد سال اخیر شاهد وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب و ویرانگری بوده که تلفات و خسارات سنگینی را به همراه داشته است. با توجه به موقعیت ایران و شواهد تاریخی ثبت شده، تحلیل

* تهران؛ خیابان کارگر شمالی؛ بعد از بزرگراه جلال آل احمد؛ دانشگاه تهران؛ پردیس ۲ دانشکده‌های فنی؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن؛ صندوق کدپستی:

۵۱۵-۱۴۳۹۵؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۲۰۴۰۳-۰۲۱؛ رایانامه: m.saeedi.a@gmail.com

دارد. حفاری تونل در محل تقاطع با استفاده از روش حفاری NATM انجام می‌شود. در شکل ۱ مقطع تونل خط ۴ مترو نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه‌ی تونل خط ۴ متروی تهران و وضعیت قرارگیری آن در عمق [۴]

شکل ۲ وضعیت قرارگیری سه پروژه در مجاورت همدیگر را نشان می‌دهد. با توجه به لزوم عبور سه طرح مذکور در تقاطع خیابان آزادی با بزرگراه نواب، رعایت مسایل ایمنی دارای اهمیت فراوانی است. تراز قرارگیری پروژه‌ها به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

- تراز خط ۴ مترو در عمق ۱۷ متری
- تراز تونل توحید در عمق ۳۰ متری
- تراز خط ۷ مترو در عمق ۵۰ متری

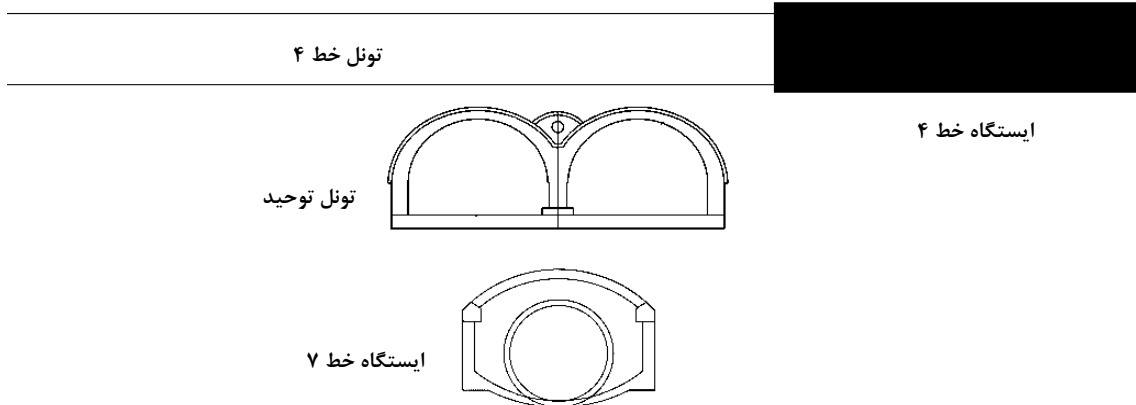
داده‌های ژئوتکنیکی سه پروژه‌ی تونل توحید و خط ۴ و ۷ متروی تهران حاصل از عمیق‌ترین گمانه‌های محدوده‌ی تقاطع در جدول ۱ آورده شده است. با بررسی‌های صورت گرفته در محدوده‌ی پروژه، سطح آب‌های زیرزمینی نسبتاً عمیق بوده و در مجموع هیچ‌گونه مشکلی از نظر آب‌های زیرزمینی تونل‌ها را تهدید نمی‌کند. به منظور لحاظ کردن اندرکنش سازه‌های مجاور و تاثیر آن‌ها در تحلیل دینامیکی، هر یک از تونل‌ها و ایستگاه‌های موجود در تقاطع غیر هم‌سطح مدل شده است. به دلیل ماهیت مسئله (وجود تقاطع غیر هم‌سطح و عمود بر هم) و پیچیدگی فضاهای

مصون نیستند و بروز آسیب‌ها و خسارت‌ها در آن‌ها محتمل است. به عنوان مثال می‌توان به صدمات وارد بر تونل‌های واقع در ژاپن اشاره نمود. اولین گزارش در مورد صدمات وارد بر تونل‌ها، مربوط به زلزله‌ی کانتو (Kanto) در سال ۱۹۲۳ بوده است. در این زلزله بیش از صد تونل آسیب دیدند [2]. در دهه‌ی ۶۰ میلادی، اولین تحقیقات در مورد پایداری دینامیکی مغارهای نیروگاه‌ها انجام گرفته است. همچنین در همین دهه، تحلیل دینامیکی متروی سان‌فرانسیسکو توسط کیوسل (Kuesel) انجام شد [3]. در ژاپن نیز تحقیقات مختلفی بر روی تحلیل لرزه‌ای تونل‌های عبور کرده از بستر دریا انجام و نتایج این مطالعات منجر به تدوین آیین‌نامه‌های طراحی برای این‌گونه سازه‌ها شده است. معمولاً در تونل‌های کم‌عمق تحت اثر زلزله به سبب کرنش‌های نسبی زمین اطراف، ترک‌هایی ناشی از لنگر خمشی در گوشه‌های سقف تونل ایجاد می‌شود که می‌تواند منجر به گسیختگی و یا کاهش ظرفیت باربری پوشش تونل شود. یکی از روش‌های تحلیل دینامیکی سازه‌های زیرزمینی روش اندرکنش سازه و زمین (Soil Structure Interaction Approach) است که به مطالعه‌ی تغییرات در نحوه‌ی انتشار امواج زلزله به سبب حضور سازه‌های زیرزمینی در محیط می‌پردازد. در این حالت سختی پوشش تونل به حدی است که نمی‌توان از اثر آن چشم‌پوشی نمود. در این حالت پوشش تونل در مقابل تغییر شکل‌های زمین مقاومت می‌کند و کرنش‌های القایی پوشش و زمین اطراف با یکدیگر برابر نیستند. تا کنون روش‌های حل بسته‌ای در این زمینه ارایه شده است. این روش‌ها بیش‌تر در مقاطع دایره‌ای که جنس مصالح زمین و پوشش تونل یکنواخت است، برقرار هستند. به همین دلیل در شرایط زمین‌شناسی پیچیده و مقاطع غیر دایره‌ای استفاده از روش‌های عددی ضروری است. روش‌های اجزای محدود، تفاضل محدود و روش اجزای مجزا از رایج‌ترین روش‌های عددی مورد استفاده در تحلیل دینامیکی سازه‌های زیرزمینی هستند [1].

۲- معرفی پروژه‌ی خط ۴ متروی تهران

پروژه‌ی 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 خط ۷ تقاطع غیر هم‌سطح

حفاری شده، مدل‌سازی‌ها به صورت سه‌بعدی و با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ انجام شده است.



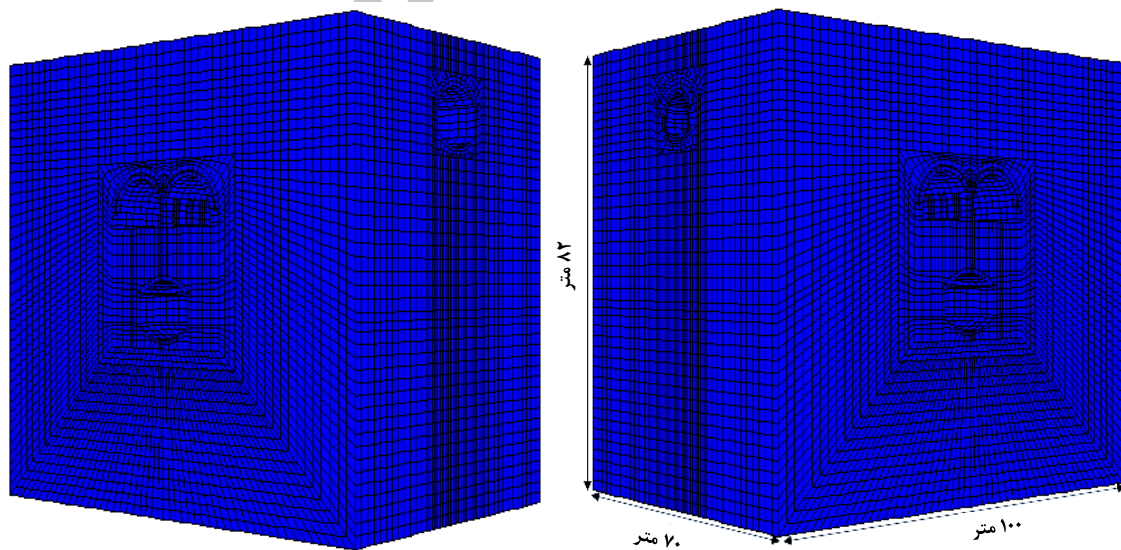
شکل ۲- وضعیت قرارگیری پروژه‌های خط ۴ و ۷ متروی تهران و تونل توحید [۴]

مناسب و اندازه‌ی المان است. در انتخاب مرزهای مدل، توزیع تنش‌ها در اثر حفاریات نباید تغییری در تنش‌های اولیه‌ی مرزها ایجاد کند. بنابراین فاصله‌ی مرزها از مرکز تونل ۴ تا ۵ برابر شعاع فضای زیرزمینی در نظر گرفته شده است. شکل ۳، نمای سه‌بعدی مدل را نشان می‌دهد. در این تحقیق ۷۰ متر از تونل توحید، تونل خط ۴ و ایستگاه خط ۷ و ۳۰ متر از ایستگاه خط ۴ مدل شده است. همچنین با توجه به اطلاعات و مدل‌های موجود در نرم‌افزار، مدل رفتاری موهر-کولمب برای مدل در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- پارامترهای ژئومکانیکی محیط در برگیرنده‌ی سه پروژه تونل توحید، متروی خط ۴ و ۷ تهران [۵]

ویژگی خاک	γ gr/cm ³	C KPa	ϕ Degree	E MPa	ν
خاک I	۱٫۹	۲۹٫۴۳	۳۵	۸۰	۰٫۲۷
خاک II	۱٫۹	۱۹٫۶۲	۳۸	۱۰۰	۰٫۲۷
خاک III	۱٫۹	۲۴٫۵۲	۳۶	۹۰	۰٫۲۷

یکی از نکات مهم در مدل‌سازی انتخاب محدوددهی



شکل ۳- نمای سه بعدی از مدل تونل‌های خط ۴ و ۷ متروی تهران و تونل توحید

پوشش نهایی پایداری لازم را خواهد داشت (شکل ۴).

جدول ۲- ممان خمشی و نیروی محوری در پوشش نهایی تونل خط ۴ متروی تهران

نقاط شاهد	سقف	دیواره‌ی راست	کف	دیواره‌ی چپ
ممان خمشی (KN.m/m)	-۴۹,۶۸	۶۶,۹۱	-۲۲,۷۷	۶۷,۰۳
نیروی محوری (KN/m)	-۲۶,۷۲	۱۱,۸۲	۱۶۲,۳	۱۲,۹۴

جدول ۳- خصوصیات پوشش نهایی مدل شده در نرم‌افزار Section Builder

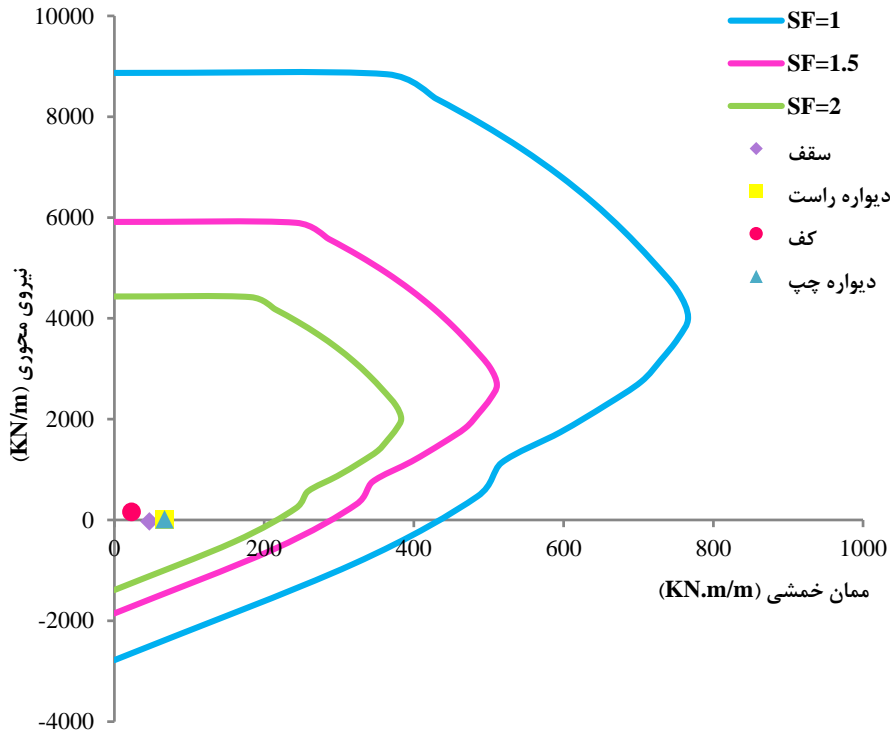
مقاومت	مقاومت	مدول یانگ	مدول یانگ
فشاری بتن f_c (MPa)	تسلیم فولاد f_y (MPa)	بتن E_c (GPa)	فولاد E_s (GPa)
۲۵	۴۰۰	۲۳,۸۸	۲۰۰

۳- تحلیل پایداری تونل خط ۴ متروی تهران

برای مدل‌سازی پوشش نهایی تونل خط ۴ متروی تهران از المان‌های پوسته‌ای استفاده شده است. ضخامت پوشش نهایی ۴۰ سانتی‌متر و خصوصیات پارامتریک آن شامل مدول کشسانی و نسبت پواسون به ترتیب برابر با ۲۳,۸۸ گیگاپاسکال و ۰,۲ در نظر گرفته شده است. پس از انجام تحلیل‌ها، نیروی محوری و ممان خمشی وارد بر سقف، دیواره و کف در جدول ۲ ارائه شده است.

برای تحلیل پایداری پوشش نهایی، مدلی به طول ۱ متر و عرض ۴۰ سانتی‌متر با توجه به آرایش میلگردهای درون بتن، با استفاده از نرم‌افزار Section Builder ایجاد شده است. به این ترتیب می‌توان نمودار اندرکنش بتن را به دست آورد. خصوصیات بتن و فولاد به عنوان داده‌های ورودی به نرم‌افزار در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به قرارگیری نیروی محوری و ممان خمشی وارد بر پوشش نهایی در محدوده‌ی درونی نمودار اندرکنش بتن حاصل از Section Builder، مشخص می‌شود که



شکل ۴- بررسی پایداری پوشش نهایی تونل خط ۴ متروی تهران

۴- تحلیل دینامیکی تونل خط ۴

پس از آن‌که خطر لرزه‌خیزی در منطقه شناسایی شد، لازم است اندازه‌ی زلزله‌ی طرح تعریف شود. برای تحلیل و طراحی سازه‌های حساس معمولاً دو زلزله ملاک محاسبات قرار می‌گیرد، این دو زلزله تحت عنوان بزرگ‌ترین زلزله قابل انتظار (*MCE: Maximum Credible Earthquake*) و زلزله‌ی مبنای طرح (*DBE: Design Base Earthquake*) نام‌گذاری شده‌اند. *MCE* بزرگ‌ترین زمین لرزه‌ای است که احتمال رویداد آن در ساختگاه و سازه قابل انتظار است. در روش تحلیل احتمالاتی، *MCE* به صورت زلزله‌ای با احتمال وقوع اندک در طول عمر سازه تعریف می‌شود. در این سطح امکان آسیب سازه وجود دارد، لیکن نباید سبب فروریختن آن شود. چنانچه سازه‌ای از اهمیت کمتری برخوردار باشد، مسایل اقتصادی سبب می‌شود که زلزله‌ای با سطح کمتر از *MCE* استفاده شود. *DBE* زمین لرزه‌ای است که حداقل یکبار در مدت عمر مفید سازه روی می‌دهد و نباید هیچ‌گونه خسارتی به سازه وارد کند. خطر وقوع چنین زلزله‌ای در تحلیل احتمالاتی بین ۳۷ تا ۶۴ درصد در نظر گرفته می‌شود [6].

از آن‌جا که هر زلزله حرکات منحصر به فردی را به وجود می‌آورد و مشخصات آن، به عوامل متعددی از جمله ساز و کار گسیختگی در منبع زلزله، محیط انتشار امواج و ویژگی‌های زمین‌شناسی ساختگاه بستگی دارد، پیش‌بینی حرکات ناشی از زلزله بسیار دشوار است و تا زمانی که زلزله‌ای به وقوع نپیوندد، نمی‌توان به درستی در مورد مشخصات و حرکات آن اظهار نظر نمود. ساز و کار گسیختگی گسل به حدی پیچیده است که طبیعت انتقال انرژی بین منبع تا ساختگاه نامعین است و بررسی آن برای کاربردهای معمول مهندسی عملی نیست. در تحلیل خطر زلزله نیز، تنها دامنه‌ی حرکات زمین مورد توجه قرار می‌گیرد و از سایر پارامترهای حرکات، اطلاعات چندانی به دست نمی‌آید. برای شبیه‌سازی بار زلزله‌ی منطقه، سه شتاب‌نگاشت طبس، بم و چنگوره-آوج با بیش‌ترین شتاب $0.35g$ ، بر اساس مبانی احتمالات *DBE* انتخاب شده است [۵]. زلزله‌ی طبس به عنوان یکی از قویترین زلزله‌ها با شتاب و مدت زمان حرکات نیرومند بالا، زلزله‌ی بم با شتاب زیاد و مدت زمان حرکات نیرومند متوسط و زلزله‌ی

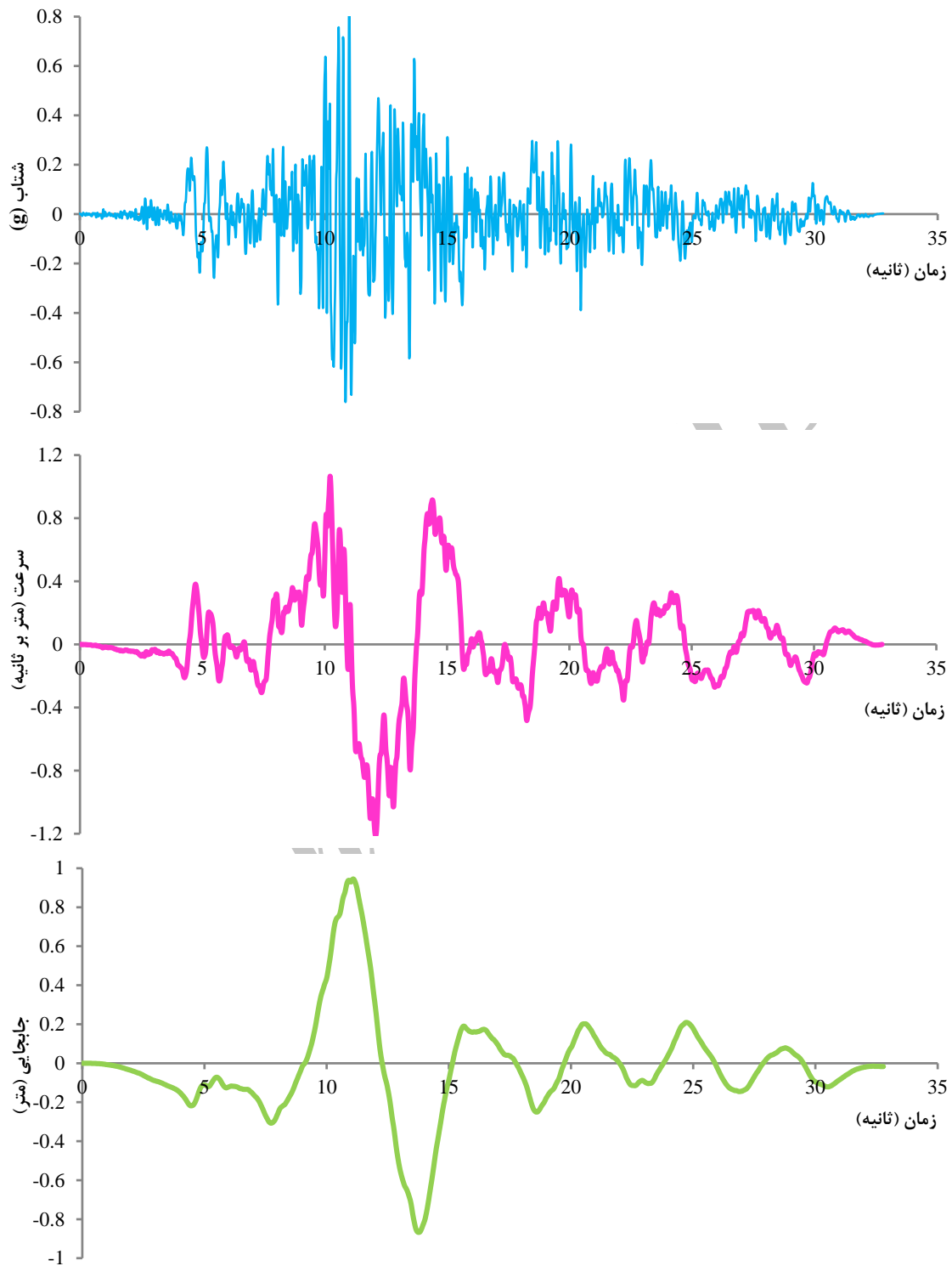
چنگوره-آوج با شتاب و مدت زمان حرکات نیرومند کم انتخاب شده است تا انواع زلزله با مشخصات مختلف مورد بررسی قرار گیرد. مشخصات مربوط به هر سه زلزله در جدول ۴ آورده شده است. شکل ۵ تاریخچه‌ی شتاب، سرعت و جابجایی زلزله‌ی طبس را نشان می‌دهد.

جدول ۴- دامنه‌ی حرکات زمین برای زلزله‌های اصلاح شده در مدل‌سازی

زمان حرکات نیرومند (s)	شتاب جابه‌جایی (m)	سرعت حرکت (m/s)	شتاب تیرگی (g)	زلزله‌ی طراحی
۱۵.۸	۰.۹۴۵	۱.۲۱۳	۰.۸۵۲	طبس
۹.۷	۰.۸۹۸	۱.۲۱۶	۰.۸۱۴	بم
۸	۰.۶۹۴	۰.۲۹۵	۰.۵۰۹	چنگوره-آوج

در تحلیل دینامیکی نیاز است اندازه‌ی المان‌ها برای انتقال صحیح موج زلزله، مجدداً مورد بررسی قرار گیرد تا از ایجاد اعوجاج موج زلزله در مدل پیشگیری شود. لایسمر و کالمیر (*Lysmer & Kuhlemeyer*) نشان دادند که پایداری مدل‌سازی عددی برای عبور موج در گرو ابعاد المان است. بر این اساس لازم است تا بزرگ‌ترین بعد المان (l)، کوچک‌تر از یک‌دهم تا یک‌هشتم طول موج بزرگ‌ترین فرکانس موج ورودی باشد [7]. بررسی طیف دامنه‌ی فوریه زلزله‌های مختلف نشان می‌دهد که بیش‌تر انرژی شتاب‌نگاشت در محدوده‌ی فرکانس‌های ۰.۱ تا ۱۰ هرتز قرار دارد [8]. با توجه به این‌که اغلب انرژی موج مربوط به فرکانس‌های پایین است، می‌توان فرکانس‌های بالاتر از ۱۰ هرتز را فیلتر و از المان‌های بزرگ‌تر استفاده نمود. پس از پایان تحلیل استاتیکی و تعیین ابعاد مدل و اندازه‌ی المان‌ها، باید تغییراتی در مدل به وجود آید تا آماده‌ی شبیه‌سازی شرایط دینامیکی شود. این تغییرات شامل اعمال شرایط مرزی جدید، اعمال بارگذاری دینامیکی و تبدیل میرایی سیستم به میرایی ریلای است. برای پیشگیری از انعکاس امواج به درون مدل از مرزهای ویسکوز استفاده شده است. بدین ترتیب امواج لرزه پس از برخورد با مرز بالای مدل (سطح زمین) به سمت پایین منعکس می‌شوند.

ارزیابی سامانه‌ی نگهداری تونل خط ۴ متروی تهران در تقاطع غیر هم‌سطح با تونل توحید و تونل خط ۷ در برابر بارهای دینامیکی: ص ۱-۱۱



شکل ۵- داده‌های ثبت شده‌ی شتاب، سرعت و جابجایی اصلاح شده برای زلزله‌ی طبس

این امواج پس از برخورد با پایه‌ی مدل توسط میراگرها جذب شده و از انعکاس مجدد آن ممانعت می‌شود. شکل ۶

کوچکی (۰.۵ درصد) برای میرایی بحرانی انتخاب شود [7]. در مدل‌سازی دینامیکی زلزله، با توجه به این‌که بیش‌تر فرکانس‌های زلزله پایین هستند و میرایی متناسب با جرم در فرکانس‌های پایین، میرایی غالب سیستم است، می‌توان برای کاهش زمان محاسبات تنها از میرایی متناسب با جرم استفاده نمود [7]. در این پژوهش از میرایی ریلای متناسب با جرم و نسبت میرایی بحرانی ۲ درصد در تحلیل عددی استفاده شده است.

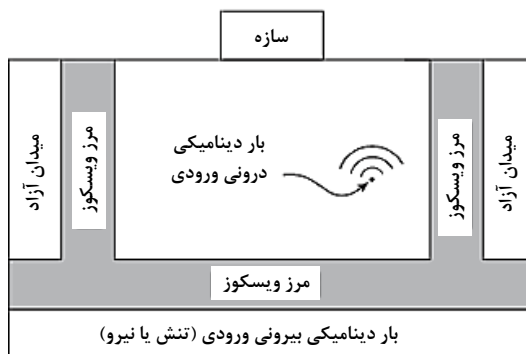
بارگذاری دینامیکی به صورت یک تاریخچه است که به مدل اعمال می‌شود. در $FLAC^{3D}$ بار ورودی دینامیکی را می‌توان به صورت تاریخچه‌ی سرعت، تنش و یا نیرو اعمال نمود. برای اعمال بارگذاری زلزله به پایه‌ی مدل و با توجه به وجود مرز ویسکوز در پایه‌ی مدل، می‌توان تاریخچه‌ی سرعت را با فرض شرایط موج صفحه‌ای به تاریخچه‌ی تنش تبدیل نمود [7]. با توجه به اینکه در هنگام رخداد زلزله، بیش‌ترین تخریب توسط تنش برشی عمود بر محور تونل ایجاد می‌شود، ابتدا تنش برشی محاسبه شده، سپس عمود بر محور تونل به پایه‌ی مدل اعمال شده است. مدت زمان حل برای هر مدل با توجه به مدت بارگذاری زلزله ۱۰ تا ۱۵ روز طول کشیده است.

ثبت رکوردهای پارامترهای مورد نظر در محدوده‌ی مرز تونل در تمامی مدل‌ها نشان داده است. همواره ممان خمشی، نیروی محوری و تنش برشی در نیمه‌ی بالایی تونل مقادیر بیش‌تری را نسبت به رکوردهای ثبت شده در نیمه‌ی پایینی نشان می‌دهد. بنابراین در تمامی مدل‌ها از نقاط شاهد در محدوده‌ی نیمه‌ی بالایی تونل برای بررسی و تحلیل پایداری تونل استفاده شده است. برای تحلیل سامانه‌ی نگهداری تونل‌ها در برابر زلزله، دو نقطه به عنوان حد بالا و پایین در نظر گرفته شده است. برای تحلیل پوشش نهایی تونل در برابر هر زلزله، بیش‌ترین ممان خمشی و نیروی محوری (فشاری و کششی) با توجه به تاریخچه‌ی ممان خمشی و نیروی محوری انتخاب شده است. همچنین با استفاده از تاریخچه‌ی تنش برشی، بیش‌ترین مقدار آن با تنش برشی بحرانی مقایسه شده است.

۴-۱- نیروی محوری-ممان خمشی

شکل ۷، تاریخچه‌ی ممان خمشی و نیروی محوری در گوشه‌ی نیمه‌ی بالایی تونل را تحت زلزله‌ی بم نشان

نحوه‌ی بارگذاری و شرایط مرزی موجود در $FLAC^{3D}$ برای پایه‌ی قابل انعطاف را نشان می‌دهد [7].



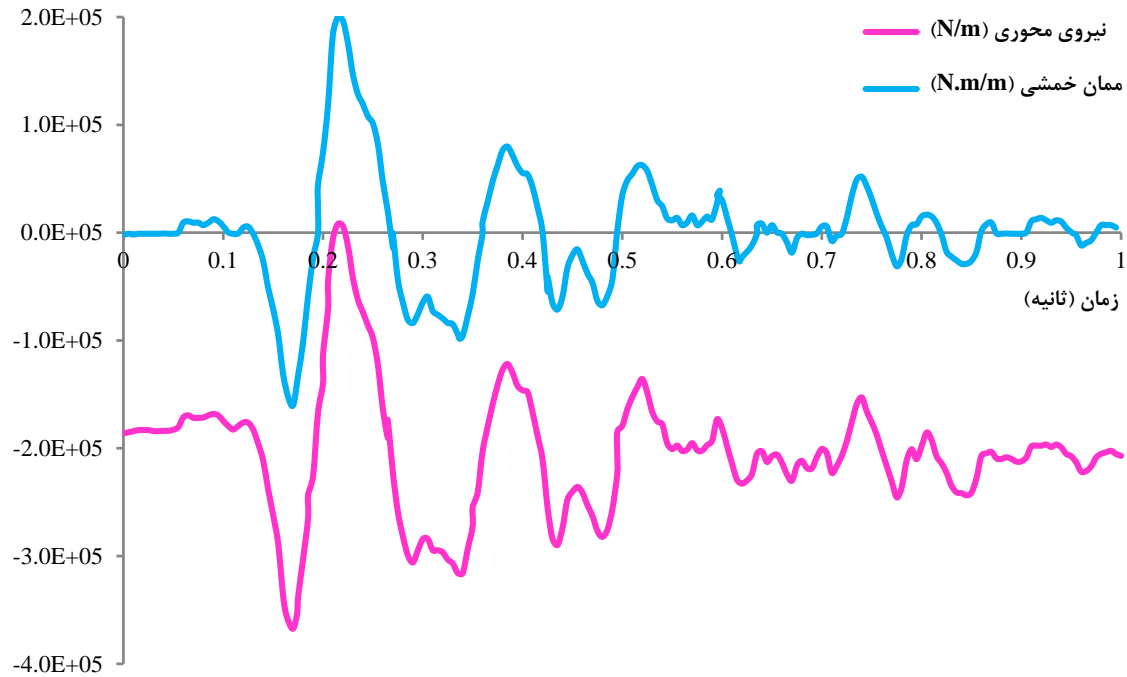
شکل ۶- نحوه‌ی بارگذاری و شرایط مرزی موجود در $FLAC^{3D}$ برای پایه‌ی قابل انعطاف [7]

با توجه به این‌که برای انتخاب میرایی مناسب در مدل، تعیین فرکانس طبیعی مدل ضروری است، باید پیش از بارگذاری زلزله در حالت بدون میرایی، فرکانس طبیعی مدل محاسبه شود. از آن‌جا که در این تحلیل میرایی وجود ندارد، مدل تحت فرکانس طبیعی خود شروع به نوسان خواهد کرد. با توجه به این‌که هر سیستم نوسانگر به تعداد درجات آزادی خود دارای فرکانس طبیعی است، فرکانس کوچک‌تر به عنوان فرکانس طبیعی اصلی در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه‌ی فرکانس‌های طبیعی مدل، مدل در مد دینامیکی با میرایی صفر و تحت اثر وزن خود بر روی بستر سخت رها می‌شود. با ثبت تاریخچه‌ی حرکت و یا سرعت در یک بازه‌ی زمانی دلخواه (مانند ۱ ثانیه) و شمارش تعداد نقاط راس بدست آمده می‌توان فرکانس طبیعی را تعیین نمود [7]. فرکانس طبیعی مدل برابر با ۰.۷۵ بدست آمده است.

برای استفاده از میراگر ریلای در $FLAC^{3D}$ علاوه بر فرکانس طبیعی، نسبت میرایی بحرانی نیز باید مشخص شود. در مصالح ژئومکانیکی نسبت میرایی بحرانی (ξ_{crit}) معمولاً ۲ تا ۵ درصد برای زمین و ۲ تا ۱۰ درصد برای پوشش در نظر گرفته می‌شود. در مدل‌هایی با رفتار مصالح کشسان-مومسان یا ناپیوستگی‌هایی با مقاومت برشی کم، بخش قابل توجهی از انرژی موج در طی جریان مومسان یا لغزش از بین می‌رود. از این‌رو، در مدل‌هایی که امکان وقوع جابجایی‌های بزرگ وجود دارد، باید تنها درصد

به دست آوردن تاریخچه‌ی ممان خمشی و نیروی محوری تونل خط ۴ برای زلزله‌های طیس، بم و چنگوره-آوج، نتایج تحلیل بار دینامیکی در جدول ۵ ارائه شده است.

می‌دهد. در این دو نقطه، ممان خمشی و نیروی محوری به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسند. محور افقی، زمان و محور قائم، نیروی محوری و ممان خمشی را نشان می‌دهد. پس از



شکل ۷- نیروی محوری و ممان خمشی در سقف تونل ۴ تحت زلزله‌ی بم (گوشه‌ی سمت چپ)

۴-۲- تنش برشی

شکل ۹، تاریخچه‌ی بیش‌ترین تنش برشی تحت زلزله‌ی بم را نشان می‌دهد. بیش‌ترین مقدار آن در گوشه‌ی نیمه‌ی بالایی اتفاق می‌افتد. برای محاسبه‌ی مقاومت برشی پوشش با استفاده از گزاره‌ی نیروی محوری (N) و نیروی برشی (Q) و دایره‌ی موهر می‌توان گزاره‌های زیر را به دست آورد [9]:

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} \quad (1)$$

$$\tau_{max} = \frac{3Q}{2A} \quad (2)$$

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_{max}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{max}}{2}\right)^2 + \tau_{max}^2} \quad (3)$$

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_1} = \frac{\sigma_t}{\sigma_3} \quad (4)$$

$$N = \frac{\sigma_c A}{FS} - \frac{9Q^2 FS}{4\sigma_c A} \quad (5)$$

$$N = \frac{\sigma_t A}{FS} - \frac{9Q^2 FS}{4\sigma_t A} \quad (6)$$

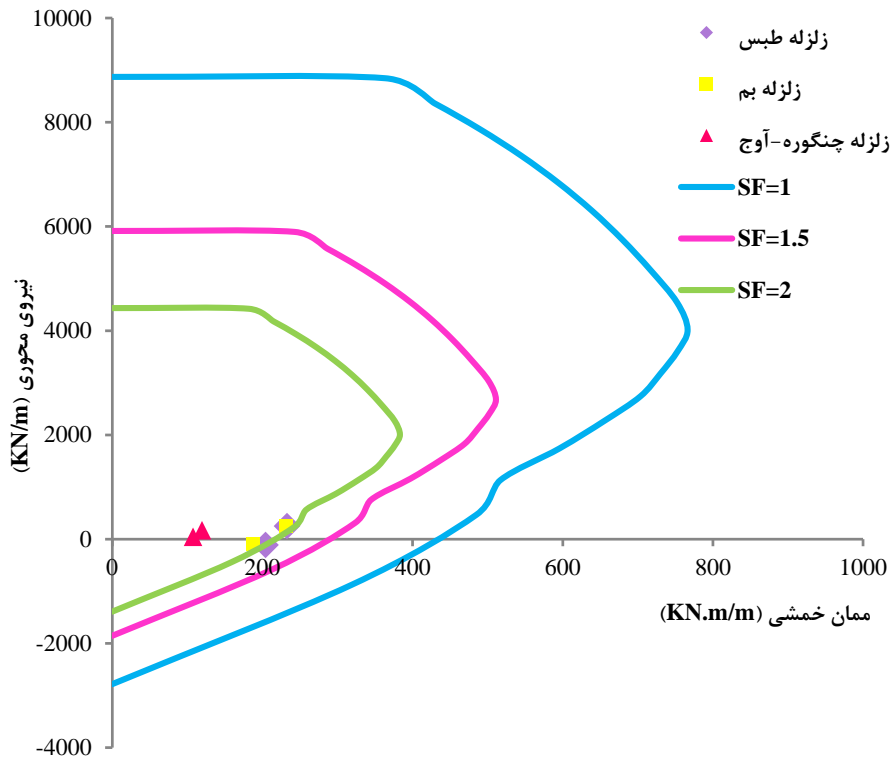
گزاره‌ی (۵) نیروی محوری را برای حالت شکست فشاری و

جدول ۵- مقادیر ممان خمشی و بیش‌ترین نیروی محوری در تونل خط ۴

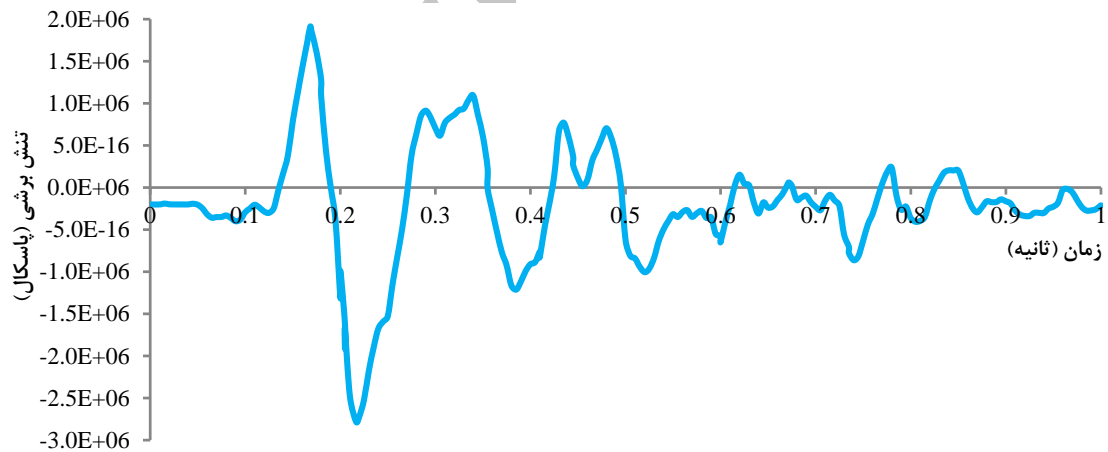
زلزله‌ی طراحی	ممان خمشی (KN.m/m)	نیروی محوری (KN/m)
چنگوره-آوج	-۱۱۹٫۶	۱۶۸٫۷
بم	۱۰۷٫۶	۴۴٫۵۴
	-۲۳۱٫۹	۲۴۵٫۹
طیس	۱۹۷٫۸	-۹۲٫۶۹
	-۲۳۲٫۷	۲۵۰٫۷
	۲۰۴٫۲	-۱۱۳٫۳

با توجه به شکل ۸، ممان خمشی و نیروی محوری در داخل نمودار اندرکنش بتن قرار گرفته است؛ بنابراین ضریب ایمنی پوشش نهایی تونل خط ۴ در برابر بارهای مختلف زلزله، بیش‌تر از ۱٫۵ است و سامانه‌ی نگهداری پایداری لازم را خواهد داشت.

گزاره‌ی (۶) نیروی محوری را برای حالت شکست کششی محاسبه می‌کنند.



شکل ۸- بررسی پایداری پوشش نهایی تونل خط ۴ تحت زلزله‌ی طبس، بم و چنگوره-آوج



شکل ۹- تاریخچه‌ی تنش برشی در سقف تونل خط ۴ تحت زلزله‌ی بم

روابط بالا A سطح مقطع، σ_c مقاومت فشاری و σ_t مقاومت کششی است [9].

$$Q_{cr} = \pm \frac{A}{FS} \sqrt{-\frac{4\sigma_c\sigma_t}{9}} \quad (7)$$

همچنین با استفاده از گزاره‌های (۵) و (۶)، نیروی برشی بحرانی Q_{cr} با توجه به ضریب ایمنی FS ، برای هر دو حالت شکست فشاری و کششی از گزاره‌ی (۷) به دست می‌آید. علامت تنش کششی در گزاره‌ی (۷)، منفی است.

زلزله‌های احتمالی است. برای شبیه‌سازی بار زلزله‌ی منطقه، با در نظر گرفتن ملاحظات مختلف، سه شتاب‌نگاشت طیس، بم و چنگوره-آوج با بیش‌ترین شتاب $0.35g$ ، بر اساس مبانی احتمالات زلزله‌ی مبنای طرح انتخاب شده است. ثبت رکوردهای پارامترهای مورد نظر در محدوده‌ی مرز تونل در تمامی مدل‌ها نشان داده است، همواره ممان خمشی، نیروی محوری و تنش برشی در نیمه‌ی بالایی تونل مقادیر بیش‌تری را نسبت به رکوردهای ثبت شده در نیمه‌ی پایینی نشان می‌دهد. در نتیجه در مدل‌های تحلیل شده‌ی این پژوهش از نقاط شاهد در محدوده‌ی نیمه بالایی تونل برای بررسی و تحلیل پایداری تونل استفاده شده است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- بر اساس تحلیل و با استفاده از نمودار اندرکنش بتن، آسیبی به سامانه‌ی نگهداری تونل خط ۴ وارد نمی‌شود؛ بنابراین ضرورتی برای تقویت نگهداری تونل وجود ندارد. ضریب ایمنی پوشش نهایی تونل خط ۴، برابر با ۱/۵ است.
- پوشش نهایی تونل مذکور در برابر تنش برشی اعمالی توسط هر سه زلزله‌ی طیس، بم و چنگوره-آوج دارای مقاومت کافی است. ضریب ایمنی پوشش نهایی تونل خط ۴، برابر با ۲/۸۹ است.

با استفاده از گزاره‌ی (۷) و با فرض این‌که مقاومت فشاری، توسط بتن ($\sigma_c = 25 \text{ MPa}$) و مقاومت کششی، توسط میلگردها تحمل می‌شود، می‌توان تنش برشی بحرانی را برای حالت $FS=1$ محاسبه نمود (گزاره‌ی (۸)). نیروی کششی با توجه به نمودار اندرکنش بتن هنگامی که مقدار ممان خمشی صفر است، از روی محور قایم به دست می‌آید و سپس تنش کششی قابل تحمل به وسیله‌ی مقطع محاسبه می‌شود. در جدول ۶، بیش‌ترین تنش برشی در پوشش نهایی تونل خط ۴ تحت زلزله‌های مختلف ارایه شده است.

$$\tau_{cr} = Q_{cr}/A = \pm \sqrt{-\frac{4\sigma_c\sigma_t}{9}} = \pm 8.787 \text{ MPa} \quad (8)$$

جدول ۶- بیش‌ترین تنش برشی در پوشش نهایی تونل خط ۴ متروی تهران

پارامتر	زلزله		
	چنگوره-آوج	بم	طیس
تنش برشی (MPa)	۱،۵۹۴	۳،۰۲۷	۳،۰۴۲

۵- نتیجه‌گیری

هدف از تحلیل دینامیکی تونل در برابر بار زلزله، بررسی پایداری تونل و نگهداری آن در برابر لرزش‌های ناشی از

۶- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
γ	gr/cm^3	وزن مخصوص	Q	N	نیروی برشی
C	KPa	مقاومت برشی	Q_{cr}	N	نیروی برشی بحرانی
φ	$Degree$	زاویه‌ی اصطکاک داخلی	FS	-	ضریب ایمنی
E	MPa	مدول کشسانی	A	m^2	سطح مقطع
ϑ	-	نسبت پواسون	σ_c	MPa	مقاومت فشاری بتن
f_c	MPa	مقاومت فشاری بتن	σ_t	MPa	مقاومت کششی بتن
f_y	MPa	مقاومت تسلیم فولاد	τ_{cr}	MPa	بیش‌ترین تنش برشی پوشش
E_c	GPa	مدول یانگ بتن	σ_{max}	MPa	بیش‌ترین تنش
E_s	GPa	مدول یانگ فولاد	τ_{max}	MPa	بیش‌ترین تنش برشی
ξ_{crit}	%	نسبت میرایی بحرانی	σ_1	MPa	بیش‌ترین تنش اصلی
N	N	نیروی محوری	σ_3	MPa	کمترین تنش اصلی

۷- منبع‌ها

- [1] Hashash, Y. M. A., Hook, J. J., Schmidt, B., & Yao, J. I. C. (2001). Seismic Design and Analysis of

- Underground Structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(4), 247-293. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(01\)00051-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00051-7).
- [2] Iwatate, T., Domon, T., & Nakamura, S. (1997). Earthquake Damage and Seismic Response Analysis of Subway Station and Tunnels During Great Hanshin-Awaji Earthquake. *World Tunnel Congress: Tunnels for People* (pp. 45-51). Rotterdam: Balkema. ISBN: 905410869X.
- [3] Kuesel, T. R. (1969). Earthquake Design Criteria for Subways. *Journal of the Structural Division*, 95(6), 1213-1231. <http://www.scribd.com/doc/86910890/Earthquake-Design-Criteria-for-Subways>.
- [۴] سعیدی عباس‌آباد، م. (۱۳۹۰). تحلیل پایداری تونل‌های شهری در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زلزله و حرکت قطار. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه تهران.
- [۵] مهندسین مشاور ایمن‌سازان. (۱۳۸۷). گزارش نهایی مکانیک خاک تونل‌های خط ۴ و ۷ متروی تهران و تونل توحید.
- [6] Krinitzsky, E. L. (2002). How to Obtain Earthquake Ground Motions for Engineering Design. *Engineering Geology*, 65(1), 1-16. [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00098-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00098-9).
- [7] ITASCA. (1995). *FLAC2D User's Manual, Version 4.0*. Minneapolis: ITASCA Consulting Group, Inc.
- [8] Hung, C. J., Monsees, J., Munfah, N., & Wisniewski, J. (2010). *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements*. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). ISBN: 1560514574. <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi09010/>.
- [9] Hoek, E., Carranza-Torres, C., Diederichs, D., & Corkum, B. (2008). Integration of Geotechnical and Structural Design in Tunneling. In Labuz, & Lin (Eds.), *Proceedings of the 56th Annual Geotechnical Engineering Conference*. Minnesota: University of Minnesota. <http://www.rocscience.com/assets/files/uploads/7696.pdf>.