

آنالیز لرزه‌ای تونل‌های دوقلو در خاک‌هایی با قابلیت روانگرایی

حسین صالح زاده، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمد پرچمی*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Parchami.m@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۱۵ - پذیرش: ۱۳۹۳/۰۷/۲۰

چکیده

سازه‌های زیرزمینی بخش جدایی‌ناپذیر زیرساخت‌های شهرنشینی امروزی را تشکیل می‌دهند. در صورتی که این سازه‌ها در مناطق زلزله خیز احداث شوند، کنترل پایداری آنها ضروری خواهد بود. در مطالعه حاضر، تحلیل دینامیکی تونل‌های دوقلوی مترو تبریز با استفاده از نرم افزار FLAC2D مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین مسأله در تحلیل دینامیکی این پروژه قرار گرفتن تونل در زیر سطح آب زیرزمینی و همچنین دارا بودن قابلیت روانگرایی خاک پیرامون تونل در قسمت‌هایی از مسیر تونل‌ها می‌باشد که در نظر گرفتن همزمان بارهای دینامیکی و فشار آب منفذی با انتخاب مدل رفتاری مناسب برای خاک را ملزم می‌سازد. مدل رفتاری موهر-کولمب برای مصالح در شرایط استاتیکی و مدل رفتاری فین برای مدل سازی اضافه فشار حفره‌ای دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی دینامیکی از دو سطح زلزله MCL و DBL و همچنین از سه شتابنگاشت دوزچه، لوماپریتا استفاده شده است. پایداری سیستم نگهداری تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی بررسی شده است. نتایج به دست آمده، نشان می‌دهند که شرایط مختلف بار ورودی زلزله، توزیع فشار آب حفره‌ای و تنش‌های پوشش را تحت تأثیر قرار می‌دهند. افزایش فرکانس غالب بارگذاری، موجب کاهش نیروهای داخلی پوشش و فشار آب حفره‌ای شد. همچنین با کاهش ماکزیمم شتاب بارگذاری، نیروهای داخلی پوشش و فشار آب حفره‌ای اضافی، کاهش یافتند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل دینامیکی، تونل‌های دوقلو، مترو تبریز، روانگرایی، سطح زلزله، مدل فین، FLAC2D

۱- مقدمه

تأثیر زلزله بر سازه‌های زیرزمینی مهم نبوده و فرض می‌شد که آنها قادر به تحمل خسارت‌های زمین لرزه می‌باشند. با وجود این، در سال‌های اخیر به دنبال وقوع چندین زلزله شدید آسیب‌های قابل توجهی به تعدادی از این سازه‌ها وارد شده است. زمانی که این نیروی زلزله در یک خاک روانگرا رخ دهد، به دلیل پدیده روانگرایی و ایجاد تغییر شکل‌های غیر قابل کنترل، تغییرات نیروها و تغییر شکل‌ها می‌تواند، به مقدار قابل توجهی تغییر نماید. با مرور موارد تاریخی اثرات زلزله روی این گونه سازه‌ها،

تونل‌های شهری از جمله تونل‌های مترو از سازه‌های پر اهمیت شهری هستند که عملکرد مناسب آنها به‌خصوص در زمان زلزله جهت برقراری شریان‌های حیاتی شهری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این سازه‌ها در طول عمر خود در برابر بارهای دینامیکی مختلفی قرار می‌گیرند و باید جهت این گونه بارگذاری‌ها تحلیل و طراحی شوند. یکی از این بارگذاری‌ها که بسیاری از سازه‌های مدفون در طول عمر خود تجربه می‌کنند، بارهای ناشی از زلزله می‌باشد. زمانی عقیده کلی بر این بود که

پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۳

ملاحظه می‌شود که نرخ خرابی آنها نسبت به سازه‌های زیرزمینی پایین‌تر است. با این حال در زلزله‌های اخیر مانند زلزله سال ۱۹۹۵ کوبه^۱ ژاپن، زلزله ۱۹۹۵ چی‌چی^۲ تایوان، زلزله ۱۹۹۹ کوجالی^۳ ترکیه، سازه‌های زیرزمینی دچار خسارت عمده‌ای شده‌اند (Hashash et al., 2001). همچنین می‌توان به گسیختگی‌های متعدد پوشش بتنی تونل‌های راه در زلزله ۲۰۰۴ ژاپن اشاره کرد (Yashiro et al., 2007). خرابی‌های سازه‌های زیرزمینی بر اثر روانگرایی به علت کمبود این اتفاقات و مشکلات برآورد آن کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بعضی از نقاط جهان خرابی‌های وسیعی بر اثر روانگرایی خاک‌ها در سازه‌های زیرزمینی مشاهده شده است. به عنوان مثال؛ در زلزله چی‌چی تایوان خیلی از سازه‌های سطحی مانند پل، راه و ساختمان‌ها به دلیل روانگرایی لطمه دیدند و این پدیده باعث ایجاد خرابی‌هایی مانند کج شدگی و واژگونی سازه‌های سطحی شد. در این زلزله بعضی از سازه‌های زیرزمینی نیز صدمات جدی دیدند. از دیگر حوادثی که روانگرایی باعث خرابی سازه‌های زیرزمینی گردیده است می‌توان به زلزله نیگاتای^۴ ژاپن (۱۹۶۴)، نیهونکای چوبو^۵ (۱۹۸۳)، لوژن^۶ فیلیپین (۱۹۹۰)، کُشیرو-اکی^۷ (۱۹۹۳) اشاره کرد (Azadi and Mir Mohammad Hosseini, 2010). خشنودیان و شهرو، (Chang et al., 2002)، چانگ و همکاران، (Xia et al., 2010)، آزادی و میرمحمد حسینی، (al., 2008)، خیا و همکاران، (Azadi and Mir Mohammad Hosseini, 2010) با استفاده از روش‌های عددی، رفتار لرزه‌ای تونل مدور در خاک اشباع با قابلیت روانگرایی را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج آن‌ها، با افزایش فشار آب حفره‌ای، سختی و مقاومت خاک به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین، ممان خمشی پوشش تونل نیز با اشباع شدن محیط افزایش می‌یابد. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش دامنه بارگذاری و کاهش فرکانس بارگذاری موجب می‌شود که ممان خمشی به مقدار قابل توجهی افزایش یابد. همچنین اثر زلزله به ویژگی‌های تحریک بستگی دارد و با افزایش عمق سازه‌های زیرزمینی، ایمنی در برابر زلزله افزایش می‌یابد. چیان و مادابوشی تأثیر عمق و قطر سازه‌های زیرزمینی بر روی بالا روی در خاک‌های با قابلیت روانگرایی

بررسی کردند. برای این بررسی، از آزمایش‌های ساترفیوژ استفاده گردید. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش عمق سازه از مقدار بالاروی کاسته می‌شود و قطر سازه رابطه مستقیم با بالاروی دارد. همچنین، آنها برای مطالعه تغییر شکل‌های اطراف تونل در خاک‌های روانگرا از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV)^۸ استفاده کردند (Chian and Madabhushi, 2010). پژوهش حاضر، آنالیز لرزه‌ای تونل‌های دوقلو در خاک‌هایی با قابلیت روانگرایی را مورد بررسی قرار می‌دهد. برای این منظور قسمتی از مسیر خط یک مترو تبریز در نظر گرفته شده است. مهم‌ترین مسأله در تحلیل دینامیکی این پروژه، قرار گرفتن تونل در زیر سطح آب زیرزمینی و همچنین دارا بودن قابلیت روانگرایی خاک پیرامون تونل در قسمت‌هایی از مسیر تونل‌ها می‌باشد. در این تحقیق، با در نظر گرفتن اثرات افزایش آب حفره‌ای و کاهش تنش مؤثر به بررسی روانگرایی خاک اطراف تونل و نیروهای داخلی پوشش تونل‌ها در دو سطح طراحی لرزه‌ای و با استفاده از شتابنگاشت‌های مختلف پرداخته می‌شود. برای این منظور از نرم افزار FLAC2D که قابلیت مدل‌سازی روانگرایی، با استفاده از مدل‌های پیشرفته خاک را دارا می‌باشد، استفاده می‌شود.

۲- معرفی ساختگاه زمین‌شناسی مسیر تونل‌ها

خط یک قطار شهری تبریز از سال ۱۳۸۰ بر اساس طرح جامع حمل و نقل شهر تبریز آغاز شده است. این خط به طول ۱۶/۵ کیلومتر بوده و دارای ۱۸ ایستگاه می‌باشد که از جنوب غربی شهر به سمت مرکز و سپس جنوب شرقی شهر امتداد می‌یابد. این مسیر از لحاظ فیزیکی به صورت هم‌سطح، نیمه‌عمیق، عمیق و در ارتفاع طراحی شده است. در بخش عمیق به صورت دو تونل (تک خطی) دوقلو به قطر تمام شده ۶ متر می‌باشد که از ایستگاه شماره ۷ تا ۱۷ می‌باشد. عملیات حفاری تونل‌ها با قطر حفاری ۶/۸ و به طول ۸ کیلومتر با استفاده از دو دستگاه ماشین حفار تونل سپردار (TBM)^۹ به روش فشار تعادل زمین (EPB)^{۱۰} انجام می‌پذیرد. جداره تونل‌ها از قطعات پیش ساخته بتنی مسلح می‌باشد. ضخامت قطعات بتنی پیش ساخته ۳۰ سانتی‌متر و هر حلقه آن از ۵ قطعه و یک قطعه کلید تشکیل شده است (سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۲). با وجود گستردگی

پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۳

۳- معرفی نرم افزار استفاده شده

نرم افزار FLAC2D یک برنامه تفاضل محدود غیر ضمنی دو بعدی می باشد که می تواند، رفتار سازه های ساخته شده از خاک، سنگ یا دیگر موادی را که ممکن است، پس از رسیدن به حدود پلاستیک دچار جریان پلاستیک شوند، شبیه سازی کند. این بر یک طرح محاسباتی صریح لاگرانژی استوار است که مناسب مدل سازی تغییر شکل های بزرگ می باشد و این اطمینان را می دهد که شکست و جریان پلاستیک را با دقت زیادی مدل کند (Itasca Consulting Group Inc, 2005).

۴- توصیف مدل ساخته شده

هر تغییری که در محیط ایجاد می شود توزیع تنش را در محدوده ای از محیط به نام ناحیه تأثیر، تغییر می دهد. وقتی یک سازه در دل زمین حفر می شود، قسمتی از خاک و سنگ های پیرامون آن دچار تغییر شکل الاستیک و یا پلاستیک می شوند. اندازه و ابعاد مدل عددی باید به گونه ای باشد که این تأثیرات در آن قابل مشاهده و بررسی باشد. با آنالیز حساسیت مدل های مختلف، مدل با ابعاد ۱۰۰ متر طول و ۴۰ متر ارتفاع در نظر گرفته شد. شکل ۱ ابعاد مدل ساخته شده را با تعداد ۷۱۲۵ المان نشان می دهد. همچنین از مدل موهر کولمب برای تحلیل استاتیکی استفاده می شود. تونل ها به صورت دوقلو و با فاصله خارجی ۶/۷ متر است قطر حفاری تونل ها ۶/۸ متر، قطر خارجی سگمنت ها ۶/۶ متر و قطر داخلی تونل ها ۶ متر می باشد. ضخامت سگمنت های به کار رفته ۳۰ سانتی متر است. مشخصات سگمنت ها در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به شرایط موجود در خط یک قطار شهری تبریز، فرض شده است که فضای باقیمانده نیز توسط تزریق دوغاب ریزدانه با عیار سیمان بالا، پر می شود. اما از آنجایی که ناحیه تزریق شده عملاً نقش مقاومتی خاصی در پایدارسازی زمین نداشته و فقط به عنوان انتقال دهنده و توزیع کننده تنش در اطراف پوشش بتنی عمل می کند، بنابراین، در مدل های ساخته شده، بخش یاد شده جزئی از زمین پیرامون تونل فرض شده است. همچنین بر روی مرز بالایی، بار ترافیکی و بار ناشی از سازه های سطحی به صورت بار گسترده و برابر با ۲۵ کیلونیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده است.

زمانی و تنوع پدیده های زمین شناسی آذربایجان، واحدهای زمین شناسی تبریز و پیرامون از لحاظ زمین شناسی دارای گستردگی زمانی زیادی نبوده و سازندهای موجود متعلق به بعد از کرتاسه هستند. از نظر زمین شناسی ریخت کنونی جلگه ای که شهر در آن واقع شده است، حاصل پدیده های تکتونیکی و فعالیت گسل ها، آتشفشان ها و همچنین فرسایش می باشد. شهر در جلگه های که به صورت شرقی - غربی است، واقع شده و از سمت شمال به کوه های عون بن علی با برون زد سازندهای قرمز بالایی و پایینی محدود شده و حد فاصل جلگه و این کوه ها را گسل تبریز با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی تشکیل می دهد. قسمت جنوبی نیز با تپه های کوچک که قسمت شمالی آتشفشان های سهند را تشکیل می دهند، محدود شده است (سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۲). در سنگ بستر شهر تبریز گسل های کوچک فراوانی وجود دارد که این گسل ها در برون زدهای شمالی و جنوبی شهر قابل مشاهده است. از نظر لرزه خیزی، شهر تبریز با واقع شدن بر روی کمربند آلپ هیمالیا و عبور گسل تبریز از شمال شهر و همچنین نزدیکی چند گسل از جمله گسل های شمال و جنوب میشو، گسل شرفخانه، گسل تسوج از جمله نقاط لرزه خیز می باشد. زلزله های تاریخی و شکستگی های فراوان در رسوبات کواترنری شاهد این مدعا می باشد. گسل شمال تبریز یکی از مهم ترین و فعال ترین گسل های منطقه است. این گسل دارای راستای شمال غربی - جنوب شرقی بوده و مکانیزم آن فشاری و با شیب زیاد به سوی شمال شرقی است. طول این گسل را معمولاً ۲۰۰ کیلومتر در نظر می گیرند و زلزله های سهمگینی در ارتباط با فعالیت گسل شمال تبریز روی داده است (سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۲).

در این مطالعه قسمتی از مسیر خط یک مترو تبریز، بین ایستگاه های ۱۳ تا ۱۴ بررسی شده است. خصوصیات ژئومکانیکی لایه های خاکی مقطع مورد مطالعه، در جدول ۱ نشان داده شده است. تراز آب در عمق ۵/۵ متری از سطح زمین قرار دارد. در مورد برآورد پارامترهای جنش نیرومند زمین برای سطوح طراحی لرزه ای سطح حداکثر طراحی (MDL) ۱۱ و سطح مبنای طراحی (DBL) ۱۲ از روش احتمالاتی و برای سطح طراحی لرزه ای سطح حداکثر پذیرفتنی (MCL) ۱۳ نیز از روش تعیینی استفاده شده است (سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۲).

جدول ۱. خصوصیات ژئومکانیکی لایه‌های خاکی مقطع مورد مطالعه (سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۲)

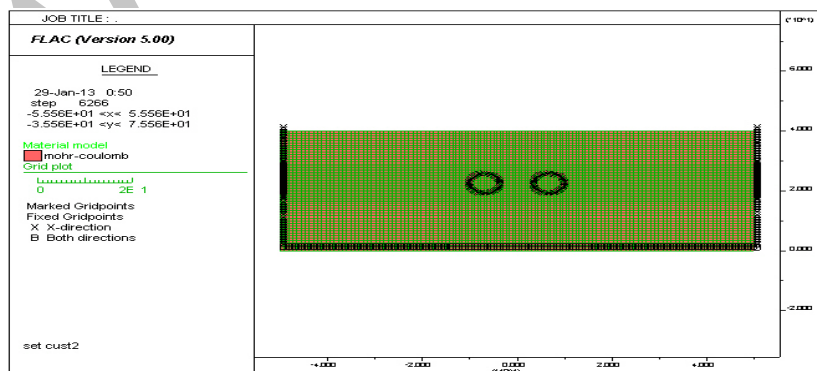
ضخامت لایه (متر)	چگالی (کیلو نیوتن)	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	مدول الاستیسیته (MPa)
۱۱	۱۹۰۰	۰	۳۲	۱۱
۱۹	۱۹۰۰	۰	۳۳	۱۶
۱۰	۲۰۰۰	۱۰	۲۶	۳۰

جدول ۲. پارامترهای جنبش نیرومند زمین برای سطوح مختلف طراحی لرزه‌ای (سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۲)

سطح طراحی لرزه‌ای	دوره بازگشت (سال)	PGA(g)	
		مؤلفه افقی	مؤلفه قائم
سطح مبنای طراحی (DBL)	۵۰۰ سال (۱۹٪ احتمال خطر در ۱۰۰ سال عمر مفید سازه)	۰/۳۵	۰/۲۴
سطح حداکثر طراحی (MDL)	۲۰۰۰ سال (۵٪ احتمال خطر در ۱۰۰ سال عمر مفید سازه)	۰/۵۴	۰/۳۹
سطح حداکثر پذیرفتنی (MCL)	-	۰/۵۷	۰/۴

جدول ۳. مشخصات سگمنت‌های به کار برده شده (سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۲)

ضخامت سگمنت (متر)	وزن مخصوص (کیلو نیوتن)	مدول الاستیسیته ($\frac{KN}{m^2}$)	ممان اینرسی (m^4)	ضریب پواسون
۰/۳	۲۴	۲۵/۲	۰/۰۰۲۲۵	۰/۲



شکل ۱. ابعاد و هندسه مدل ساخته شده

جدول ۴. ماکزیمم نیروهای داخلی در حالت استاتیکی

تونل سمت چپ	تونل سمت راست	
۸۶۲/۳	۹۱۵/۵	نیروی محوری (KN)
۱۲۱/۶	۱۶۴/۶	ممان خمشی (KN.m)
۷۵/۹۷	۱۰۶/۱	نیروی برشی (KN)

۵- تحلیل استاتیکی تونل

۱-۵- تعیین نیروی محوری و برشی و لنگر خمشی

القاء شده در پوشش

با توجه به تحلیل‌های انجام شده بر روی پوشش بتنی تونل‌های مورد مطالعه، نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی ایجاد شده در پوشش تونل‌ها در جدول ۴ آورده شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، نیروهای داخلی حداکثر در تونل اولی (تونل سمت راست) بیشتر از تونل دومی (تونل سمت چپ) می‌باشد.

۶- تحلیل دینامیکی تونل‌های قطار شهری تبریز

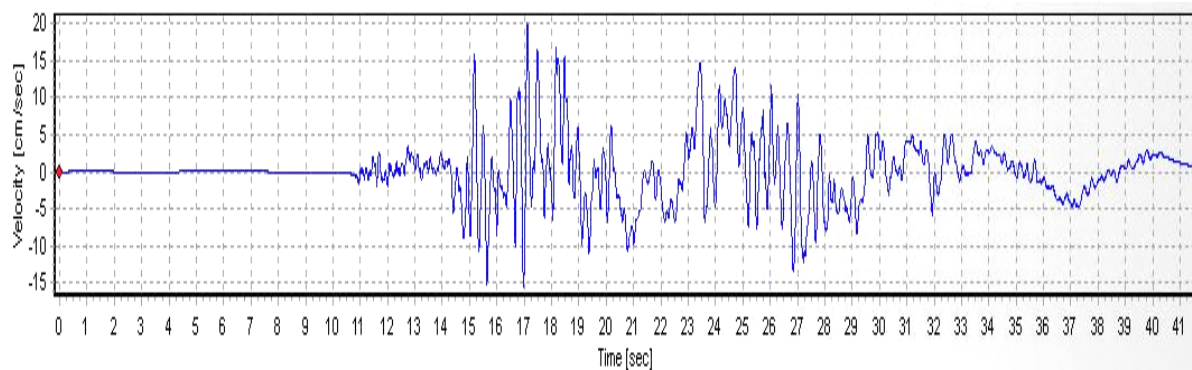
۱-۶- بررسی ابعاد المان‌های مدل

در مدل‌سازی عددی، برای تحلیل دینامیکی رفتار زمین و برای جلوگیری از اعوجاج در اثر انتشار موج در مدل، لازم است تا بزرگ‌ترین بعد المان کوچک‌تر از یک دهم تا یک هشتم طول موج بزرگ‌ترین فرکانس موج ورودی باشد.

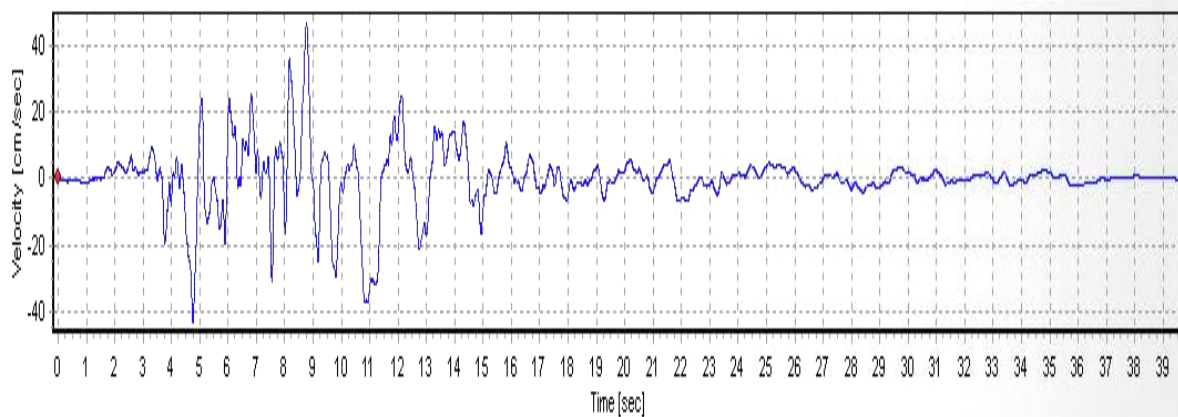
۶-۲- تدوین تاریخچه زمانی زلزله‌های طراحی

برای برآورد خطر زلزله در یک منطقه، تنها بزرگی زلزله احتمالی مورد توجه قرار گرفته و سپس بر اساس یک سری روابط تجربی دامنه حرکات زمین، معمولاً دامنه حداکثر شتاب تعیین می‌شود تا بر اساس آن بار زلزله احتمالی آن منطقه به صورت شتابنگاشت تعیین شود. به عبارت دیگر در برآورد خطر زلزله از سایر پارامترهای حرکات زمین، اطلاعات چندانی به دست نمی‌آید. بدین منظور تحلیل دینامیکی تونل با سه نوع شتابنگاشت با شرایط کاملاً متفاوت انجام شده است، که دو شتابنگاشت دارای شتاب حداکثر یکسان و محتوای فرکانسی متفاوت و شتابنگاشت دیگر نیز با دامنه شتاب کمتر از این دو شتابنگاشت می‌باشد. سه شتابنگاشت زلزله ۱۹۹۹ دوزچه ۱۴ ترکیه، زلزله ۱۹۸۹ لوماپریتا ۱۵ آمریکا و زلزله ۱۳۸۱ چنگوره- آوج (از توابع شهرستان بوئین زهرا، واقع در استان قزوین) استفاده شده است. شتابنگاشت دوزچه و لوماپریتا در سطح MCL و برای شتاب ماکزیمم ۰/۵g و شتابنگاشت چنگوره و آوج برای زلزله در سطح DBL و برای شتاب ۰/۳g مقیاس شدند. لازم به ذکر است که کلیه مراحل اصلاح شتابنگاشت‌ها اعم از مقیاس‌کردن، فیلترسازی و تصحیح خط مبنا، با استفاده از نرم افزار SeisSignal انجام شده است (SeisMosoft Ltd, 2011).

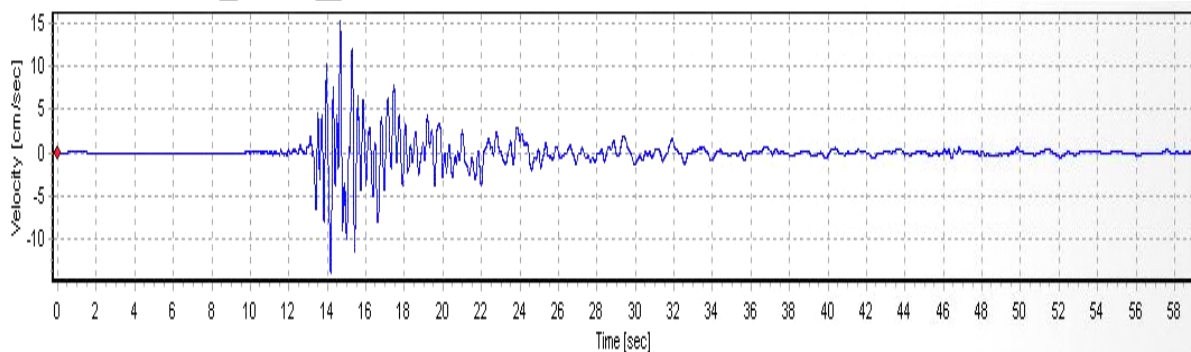
پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۳



شکل ۲. تاریخچه زمانی سرعت اصلاح شده زلزله دوزچه

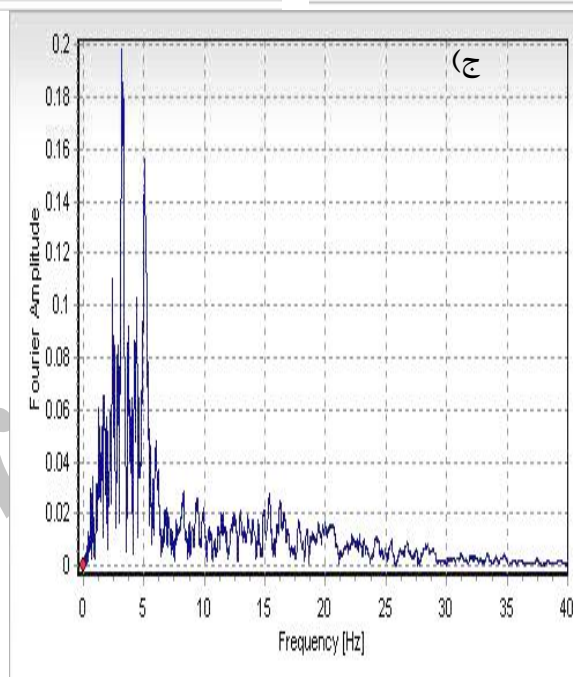
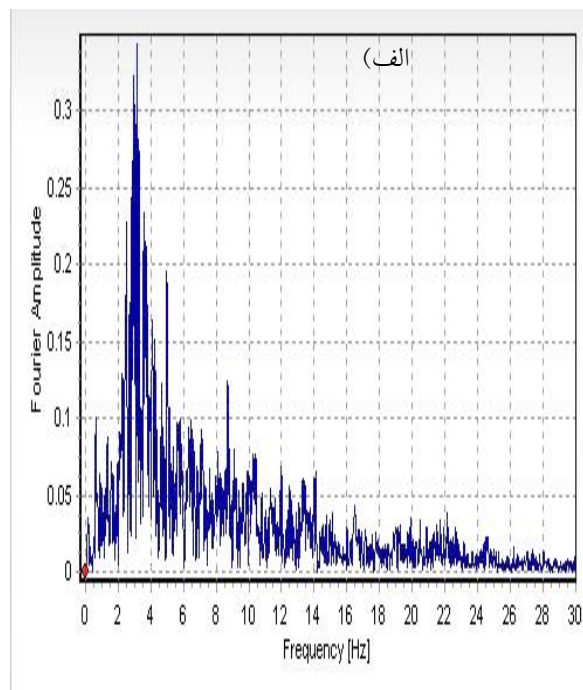
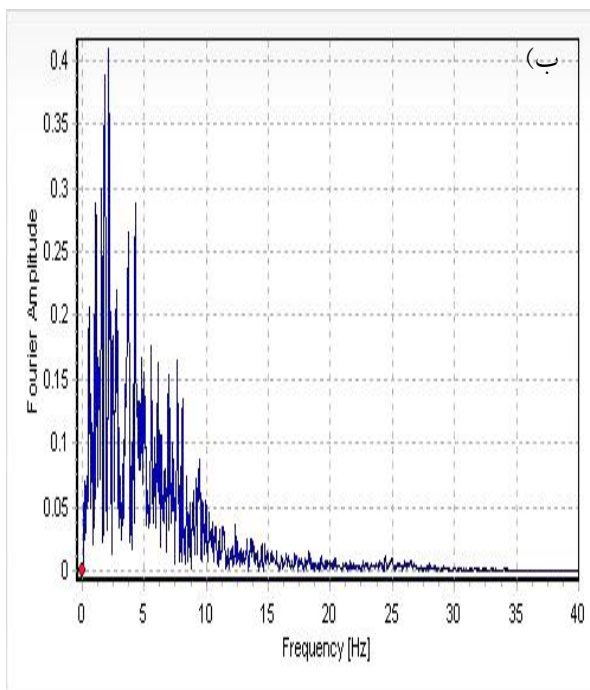


شکل ۳. تاریخچه زمانی سرعت اصلاح شده زلزله لوما پریتا



شکل ۴. تاریخچه زمانی سرعت اصلاح شده زلزله چنگوره - آوج

پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۳



شکل ۵. طیف فوریۀ متناظر با شتابنگاشت (الف) دوزچه - (ب) لوماپریتا - (ج) چنگوره - آوج

۶-۳- آنالیز دینامیکی مدل با استفاده از مدل رفتاری فین

که در این رابطه ضرایب C_1, C_2, C_3, C_4 و مقادیر ثابتی هستند که با استفاده از آزمایشات سه محوری سیکلی حاصل می‌شوند. توجه شود که زمانی که کرنش برشی صفر می‌شود مقدار کرنش حجمی نیز صفر می‌گردد بنابراین، اگر صفر شود، این حاکی از آن است که ثابت‌ها به شرح زیر در ارتباط هستند:

$$\Delta \varepsilon_{vd} = C_1(\gamma - C_2 \varepsilon_{vd}) + \frac{C_3 \varepsilon_{vd}^2}{\gamma + C_4 \varepsilon_{vd}} \quad (1)$$

مارتین و همکاران، ۱۹۷۵ سپس با فرض مدول معین و شرایط مرزی برای محاسبه تغییر در فشار منافذ ادامه دادند. فرمول جایگزین و ساده‌تر، توسط بایرن^{۱۷} (۱۹۹۱) پیشنهاد شده است:

$$C_1 C_2 C_4 = C_3 \quad (2)$$

که C_1 و C_2 ثابت‌هایی هستند که تفسیرهای مختلفی از معادله بالا می‌باشند. که به صورت زیر قابل محاسبه هستند:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp(-C_2 (\frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma})) \quad (3)$$

که D_r ، درجه تراکم خاک می‌باشد. در نرم افزار *FLAC* این دو مدل رفتاری زمانی که تحلیل دینامیکی فعال است، قابل دسترسی می‌باشند. بنابراین، می‌توان با توجه به خصوصیات این مدل‌های رفتاری از آنها برای مدل سازی روانگرایی که با کاهش تنش مؤثر و افزایش فشار آب حفره‌ای همراه است، استفاده نمود. شایان ذکر است که پایه هر دو مدل بیان شده، مدل موهر کولمب می‌باشد و این مدل‌های رفتاری قابلیت در نظر گرفتن تغییرات نمو کرنش حجمی و کاهش حجم در خلال اعمال بارهای دینامیکی را به مدل موهر کولمب داده اند.

$$C_1 = 7600 D_r^{-2.5} \quad (4)$$

از مدل رفتاری فین و روش بایرن استفاده شد. ضرایب C_1

و C_2 برای درجه تراکم ۵۰ درصد به ترتیب ۰/۴۳ و ۰/۹۳ محاسبه شدند.

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \quad (5)$$

۶-۴- بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی

برای نزدیک کردن مسأله مدل شده به واقعیت، باید انعکاس موج در مرزهای مدل را به حداقل رساند. این کار را می‌توان با استفاده از شرایط مرزی آرام (ویسکوز) انجام داد. بعد از تحلیل استاتیکی، شرایط مرزی ویسکوز اعمال می‌شود. در طرفین و کف مدل مرزهای آرام تعبیه شده است.

در نرم افزار *FLAC* ورودی دینامیکی را می‌توان به صورت یکی از تاریخچه‌های زمانی شتاب، سرعت، تنش (فشار یا نیرو)، می‌توان به کار برد. اما در صورت استفاده از ورودی شتاب یا سرعت، نمی‌توان در مرزهای مدل دینامیکی، شرایط مرزی را در طول مرز یکسانی مانند شرایط مرزی آرام (ویسکوز) به کار برد، زیرا اثر مرز آرام خنثی خواهد شد.

بر اساس این دو واقعیت، بارگذاری دینامیکی حاصل از زلزله، به صورت یک موج صفحه‌ای برشی در نظر گرفته شده است که از کف مدل در جهت قائم منتشر می‌شود. برای وارد کردن حرکات لرزه‌ای در مرز آرام، یک شرایط مرزی تنش دار استفاده می‌شود، به عبارت دیگر، یک رکورد سرعت به یک رکورد تنش تبدیل شده و بر روی مرز آرام به کار گرفته می‌شود. تاریخچه سرعت یک موج برشی را می‌توان با فرمول زیر به یک تاریخچه تنش برشی تبدیل کرد:

$$\sigma_s = -2\rho c_s v_s \quad (6)$$

که در این رابطه ρ چگالی خاک، C_s سرعت موج برشی و v_s سرعت حرکات زمین می‌باشد. ضرب ۲ در رابطه بالا به این دلیل است که نیمی از انرژی ورودی توسط مرزهای آرام جذب شده است و تنها نیمی از آن که مقدار واقعی بار دینامیکی است، به مدل اعمال می‌شود. برای کاربردی شدن تاریخچه‌ی تنش

حاصله و کاهش زمان اجرای برنامه‌ها، از برخی ارتعاشات خفیف صرف‌نظر کرده و تنها بخشی از ارتعاشات را که اهمیت بیشتری دارند، در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور بار زلزله در بازه‌های زمانی ۱۴ تا ۳۰، ۳ تا ۱۶ و ۱۳ تا ۲۳ ثانیه، به ترتیب از بار زلزله‌های دوزچه، لوماپریتا و چنگوره- آوج به صورت تنش برشی به پایه مدل و در راستای قائم به سمت بالا اعمال می‌شود.

۶-۵- میرایی

در برنامه‌های مربوط به حوزه زمان، معمولاً از میرایی رایلی، برای اعمال میرایی که تقریباً مستقل از فرکانس باشد، استفاده می‌شود. برای میرایی رایلی دو مقدار فرکانس مرکزی و نسبت میرایی بحرانی به مدل اعمال می‌شود اثرات وابسته به فرکانس به گونه‌ای آرایش می‌یابند تا فرکانس‌های مورد نظر را حذف کند. بنابراین می‌توان محدوده‌ای از فرکانس‌ها را یافت که در آن محدوده نسبت میرایی بحرانی مستقل از فرکانس باشد. فرکانس غالبی که در برنامه استفاده می‌شود، باید در این محدوده فرکانس واقع شده باشد.

فرکانس مناسب به صورت متوسط فرکانس غالب بار ورودی و فرکانس طبیعی سیستم تعیین می‌شود فرکانس غالب به ترتیب ۲، ۳ و ۳ هرتز برای شتابنگاشت‌های دوزچه، لوماپریتا و چنگوره- آوج است.

برای تعیین فرکانس طبیعی سیستم، یک مدل ساده از مسأله، تهیه می‌شود و بدون اعمال موج برشی، نیروی ثقل به طور ناگهانی و در حالت بدون میرایی به مدل اعمال می‌شود. در این شرایط مدل شروع به نوسان کرده و با ثبت تاریخچه جابجایی قائم نقطه‌ای از مدل، می‌توان فرکانس طبیعی را تعیین کرد. در این حالت، به صورت شکل تاریخچه جابه‌جایی آن نقطه نسبت به زمان رسم شده و دوره یک موج را حساب کرده و عکس این مقدار به عنوان فرکانس طبیعی مدل می‌باشد.

لازم به ذکر است که به سبب لایه‌ای بودن مقطع مدل شده، تاریخچه حرکت ثبت شده در این مدل قدری نامنظم می‌باشد. مقدار فرکانس طبیعی مدل ۰/۸۳ هرتز به دست می‌آید.

بنابراین با توجه به تحلیل‌های انجام یافته، فرکانس مرکزی را می‌توان به ترتیب ۱/۹، ۱/۴ و ۱/۹ هرتز برای شتابنگاشت‌های دوزچه، لوماپریتا و چنگوره- آوج انتخاب نمود. نسبت میرایی بحرانی دومین پارامتری است که باید مشخص شود.

اگرچه اندازه‌گیری در این زمینه انجام نشده است اما براساس تجربه برای مصالح ژئوتکنیکی، معمولاً میرایی بحرانی در محدوده ۲ تا ۵ درصد تعیین می‌شود.

۶-۶- بررسی روانگرایی در اطراف تونل

یکی از مشخصات عمده روانگرایی خاک‌ها کاهش تنش مؤثر و افزایش فشار آب حفره‌ای است. تغییرات تنش مؤثر و فشار آب حفره‌ای در خاک اطراف تونل را بعد از بارگذاری دینامیکی برای سه زلزله نشان می‌دهد.

با توجه به این شکل‌ها، با اعمال بار لرزه‌ای تنش مؤثر در منطقه کاهش یافته و میزان فشار آب حفره‌ای نیز افزایش می‌یابد سوق تنش مؤثر به سمت صفر، حاکی از روانگرایی خاک و افزایش فشار آب حفره‌ای در شرایط غیرزهکشی می‌باشد. به طور کلی، روانگرایی در زلزله لوماپریتا نسبت به زلزله دوزچه و چنگوره- آوج بیشتر است که این می‌تواند به دلیل نزدیک بودن فرکانس غالب بار زلزله لوماپریتا به فرکانس طبیعی زمین و همچنین بالا بودن محتوای فرکانسی آن نسبت به زلزله دوزچه باشد. همچنین کاهش دامنه شتاب در زلزله چنگوره- آوج باعث کاهش روانگرایی نسبت به دو زلزله دیگر شده است.

۶-۷- پاسخ دینامیکی تونل‌ها به زلزله‌های سطوح

طراحی

در این بخش پاسخ دینامیکی تونل‌های قطار شهری تبریز در مقابل زلزله سطوح طراحی مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به اینکه در زمان‌های مختلف، بارگذاری زلزله متفاوت می‌باشد لذا مقدار نیروهای داخلی در طول تاریخچه زمانی متغیر بوده و در نتیجه محل رخداد بیشینه نیروها با زمان تغییر می‌کند. تاریخچه زمانی حداکثر نیروهای محوری، نیروی برشی و لنگرهای خمشی ایجاد شده در پوشش تونل در طول مدت بارگذاری به ترتیب در شکل‌های نشان داده شده است. همچنین مقدار حداکثر نیروهای داخلی در جدول آورده شده است.

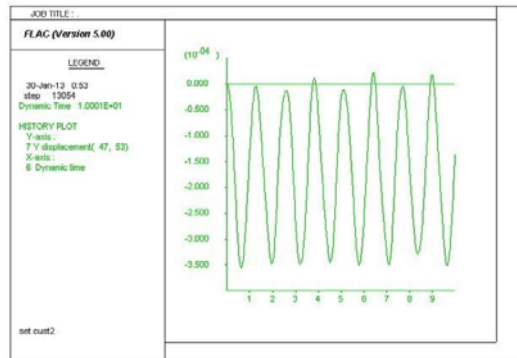
اگر چه، هر دو شتابنگاشت دوزچه و لوماپریتا به شتاب حداکثر یکسان مقیاس‌بندی شدند، حرکت ورودی لوماپریتا موجب پاسخ‌های بسیار بزرگتر در سیستم زمین- تونل نسبت به حرکت ورودی دوزچه بود.

اعتقاد بر این است که تفاوت به ویژگی‌های فرکانسی متفاوت این دو مجموعه از حرکات نسبت داده شده است. زلزله لوماپریتا با توجه به اینکه دارای محتوای فرکانسی بالا بوده و همچنین به دلیل نزدیک بودن فرکانس غالب زلزله لوماپریتا به فرکانس طبیعی زمین، منجر به ایجاد نیروهای داخلی بزرگتر در تونل‌ها می‌شود. همچنین این موضوع، نشان می‌دهد که در طراحی تونل‌های زیرزمینی، تعداد کافی از حرکات ورودی که سازگار با طیف طرح در منطقه هستند، باید با توجه به حساب آوردن عدم

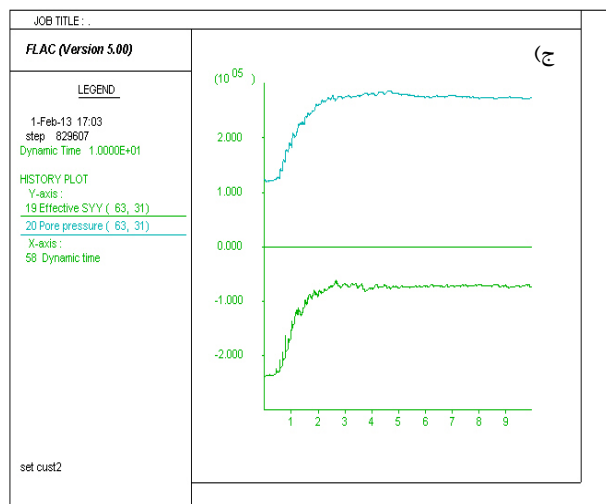
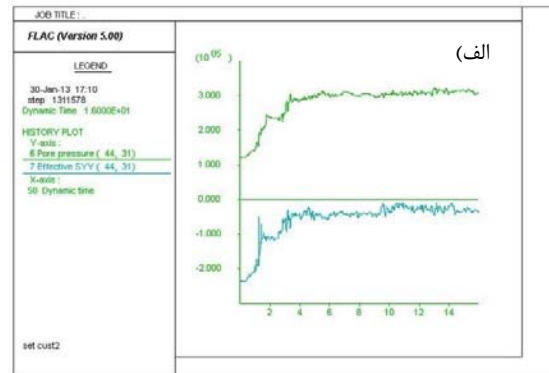
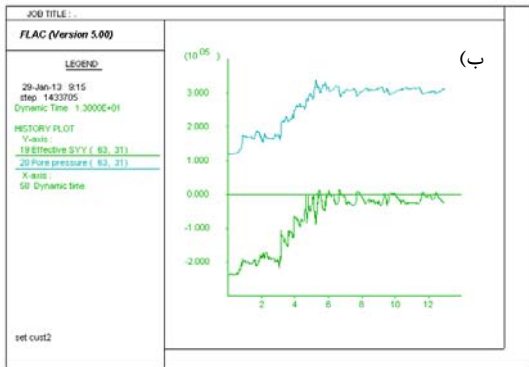
قطعیت حرکت زمین، آنالیز شوند.

زلزله چنگوره- آوج نیز با توجه به اینکه دارای دامنه شتاب ماکزیمم کمتری نسبت به دو زلزله دیگر می‌باشد، در نتیجه مقدار نیروهای داخلی کمتری در تونل ایجاد می‌کند.

برخلاف اغلب بارهای دینامیکی، پیش بینی حرکات ناشی از زلزله بسیار دشوار بوده و تا زمانی که زلزله‌ای به وقوع نپیوندد، نمی‌توان به درستی در مورد مشخصات و حرکات آن اظهار نظر کرد. هر زلزله پاسخ منحصر به فردی را به وجود می‌آورد که مشخصات آن وابسته به عوامل متعددی از جمله بزرگی زلزله، محتوای فرکانسی، فرکانس غالب و دامنه شتاب ماکزیمم می‌باشد. برای برآورد خطر زلزله در یک منطقه، تنها بزرگی زلزله احتمالی مورد توجه قرار گرفته و سپس بر اساس یک سری روابط تجربی دامنه حرکات زمین، معمولاً به صورت دامنه حداکثر شتاب تعیین می‌شود، تا بر اساس آن بار زلزله احتمالی آن منطقه به صورت شتابنگاشت تعیین شود. به عبارت دیگر در برآورد خطر زلزله از سایر پارامترهای حرکات زمین، اطلاعات چندانی به دست نمی‌آید، اما همان‌طور که به دست آمد، علاوه بر دامنه حرکات زمین، محتوای فرکانسی بار زلزله نیز تأثیر زیادی بر پاسخ دینامیکی سازه‌ها می‌گذارد.



شکل ۶. تاریخچه زمانی جابجایی قائم مدل در حالت ارتعاش آزاد نامیرا



شکل ۷. تغییرات تنش مؤثر و فشار آب حفره‌ای در عمق قرارگیری تونل

(الف) زلزله دوزچه - (ب) زلزله لوماپریتا - (ج) زلزله چنگوره - آوج

پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۳

جدول ۵. نیروهای داخلی حداکثر وارد بر سیستم نگهداری تونل با اعمال بار زلزله

سطح طراحی MCL	سطح طراحی MCL		
	زلزله لوماپریتا	زلزله دوزچه	
سطح DBL	زلزله چنگوره و آوج		
	۱۱۵۳	۱۲۸۳	نیروی محوری (KN)
	۱۷۷	۲۲۲	ممان خمشی (KN.m)
	۱۳۷	۱۶۸	نیروی برشی (KN)

جدول ۶. مقایسه نیروهای داخلی حداکثر وارد بر تونل‌ها در حالت استاتیکی و دینامیکی

زلزله چنگوره- آوج نسبت به حالت استاتیکی	زلزله لوماپریتا نسبت به حالت استاتیکی	زلزله دوزچه نسبت به حالت استاتیکی	
۲۶	۵۰	۴۰	نیروی محوری (درصد)
۸	۱۵۲	۳۵	ممان خمشی (درصد)
۲۹	۲۴۸	۵۸	نیروی برشی (درصد)

۷- نتیجه گیری

- نسبت به دو زلزله دیگر شده است.
- با توجه به این که در زمان‌های مختلف، بارگذاری زلزله متفاوت می باشد، بنابراین، مقدار نیروهای داخلی در طول تاریخچه زمانی متغیر بوده و در نتیجه محل رخداد بیشینه نیروها با زمان تغییر می کند.
 - اگر چه، هر دو شتابنگاشت دوزچه و لوماپریتا به شتاب حداکثر یکسان مقیاس بندی شدند، حرکت ورودی لوماپریتا موجب پاسخ‌های بسیار بزرگتر در سیستم زمین-تونل نسبت به حرکت ورودی دوزچه بود. اعتقاد بر این است که تفاوت به ویژگی‌های فرکانسی متفاوت این دو مجموعه از حرکات نسبت داده شده است. زلزله لوماپریتا با توجه به این که دارای محتوای فرکانسی بالا بوده و همچنین به دلیل نزدیک بودن فرکانس غالب بار زلزله لوماپریتا به فرکانس طبیعی زمین و همچنین بالا بودن محتوای فرکانسی آن نسبت به زلزله دوزچه باشد. همچنین کاهش دامنه شتاب در زلزله چنگوره- آوج باعث کاهش روانگرایی
- نتایج به دست آمده از این تحقیق، به شرح زیر می باشد:
- در تحلیل استاتیکی، نیروهای داخلی حداکثر در تونل اولی (تونل سمت راست) بیشتر از تونل دومی (تونل سمت چپ) می باشد.
 - با اعمال بار لرزه‌ای، مقدار تنش مؤثر کاهش یافته و میزان فشار آب حفره‌ای نیز افزایش می یابد. سوق تنش مؤثر به سمت صفر، حاکی از روانگرایی خاک و افزایش فشار آب حفره‌ای در شرایط غیرزهکشی می باشد.
 - به طور کلی روانگرایی در زلزله لوماپریتا نسبت به زلزله دوزچه و چنگوره- آوج بیشتر است که این می تواند به دلیل نزدیک بودن فرکانس غالب بار زلزله لوماپریتا به فرکانس طبیعی زمین و همچنین بالا بودن محتوای فرکانسی آن نسبت به زلزله دوزچه باشد. همچنین کاهش دامنه شتاب در زلزله چنگوره- آوج باعث کاهش روانگرایی

پژوهشنامه حمل و نقل، سال یازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۳

- 13-Maximum Credit Level
- 14-Duzce
- 15-Loma Prieta
- 16-Martin et al
- 17- Byrne

۹-مراجع

- Azadi, M. & Mir Mohammad Hosseini, S. 2010. Analyses of the effect of seismic behavior of shallow tunnels in liquefiable grounds. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, pp. 543-552.
- Chang, D., Travasarou, T. & Chacko, J. Numerical evaluation of liquefaction-induced uplift for an immersed tunnel. *Proc., 14th World Conf. on Earthquake Eng.(WCEE)*, Seismological Press, Beijing, 2008.
- Chian, S. & Madabhushi, S. Use of PIV analysis for soil deformations around a tunnel in liquefiable soils. *Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid, 2010.
- Chian, S. & Madabhushi, S. 2012. Effect of buried depth and diameter on uplift of underground structures in liquefied soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 181-190.
- Hashash, Y., Hook, J. J. & SCHMIDT, B. 2001. Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16, pp. 247-293.
- Itasca Consulting Group Inc. 2005. *FLAC2D*, version 5.00, Fast Lagrangian Analysis of Continua.
- Khoshnoudian, F. & Shahrou, I. 2002. Numerical analysis of the seismic behavior of tunnels constructed in liquefiable soils. *Soils and foundations*, 42, pp. 1-8.

می‌دهد که در طراحی تونل‌های زیرزمینی، تعداد کافی از حرکات ورودی که سازگار با طیف طرح در منطقه هستند، باید با توجه به حساب آوردن عدم قطعیت حرکات زمین، آنالیز شوند.

- زلزله چنگوره- آوج نیز با توجه به این که دارای دامنه شتاب ماکزیمم کمتری نسبت به دو زلزله دیگر می‌باشد، در نتیجه مقدار نیروهای داخلی کمتری در تونل ایجاد می‌کند.
- در برآورد خطر زلزله در یک منطقه، تنها بزرگی زلزله احتمالی مورد توجه قرار گرفته و از سایر پارامترهای حرکات زمین، اطلاعات چندانی به دست نمی‌آید، اما همان‌طور که به دست آمد، علاوه بر دامنه حرکات زمین، محتوای فرکانسی بار زلزله نیز تأثیر زیادی بر پاسخ دینامیکی سازه‌ها می‌گذارد.
- مقایسه نیروهای داخلی حداکثر وارد بر تونل‌ها در حالت دینامیکی و استاتیکی نشان می‌دهد که تغییرات نیروهای داخلی برای زلزله لوماپریتا حداکثر مقدار را دارا می‌باشد. همچنین زلزله چنگوره- آوج کمترین تغییرات را نسبت به حالت استاتیکی دارد.

۸-پی‌نوشت‌ها

- 1-Kobe
- 2-Chi-chi
- 3-Kocaeli
- 4-Niigata
- 5-Nihonkai-chubu
- 6- Luzon
- 7-Kushiro-oki
- 8-Particle Image Velocimetry
- 9-Tunnel Boring Machine
- 10- Earth Pressure Balance
- 11-Maximum Design Level
- 12-Design Base Level

- Yashiro, K., Kojima, Y. & Shimizu, M. 2007. Historical earthquake damage to tunnels in Japan and case studies of railway tunnels in the 2004 Niigataken-Chuetsu earthquake. Quarterly Report of RTRI, 48, pp.136-141.
- سازمان قطار شهری تبریز، "گزارش های مطالعات ژئوتکنیک خط یک مترو تبریز"، ۱۳۸۲.
- Seismosoft Ltd. 2011. SeismoSignal version 4.3.0.
- Xia, Z.-F., Ye, G.-L., WANG, J.-H., YE, B. & ZHANG, F. 2010. Numerical analysis on the influence of thickness of liquefiable soil on seismic response of underground structure. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 15, pp.279-284.

Archive of SID