

چکیده

در این مقاله شبیه‌سازی عددی و تحلیل تونل خط ۲ مترو تبریز، واقع در ناحیه با فعالیت لرزه‌ای بالا، تحت تحریکات زلزله‌های مختلف بررسی شده است. تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی سیستم به هم بسته خاک-تونل با استفاده از نرم‌افزار FLAC2D انجام شده‌اند. رفتار غیرخطی خاک و اندرکنش خاک و سازه با در نظر گرفتن مشخصات مربوط به تونل زیرزمینی مدل شده است. عملکرد لرزه‌ای مدل به وسیله مدل رفتاری UBCHYST برای خاک ارزیابی گردیده است. این مدل رفتار سیکلی غیرخطی شامل کاهش مدول برشی با کرنش برشی و نسبت میرایی وابسته به کرنش می‌باشد. پارامترهای مدل UBCHYST به وسیله مقایسه منحنی‌های کاهش مدول و میرایی حاصل از شبیه‌سازی مدل با منحنی‌های Darendeli کالیبره شده و سپس مدل تحت زلزله‌هایی با ماکزیمم شتاب زمین و فرکانس‌های غالب مختلف قرار گرفت. نتایج تحلیل‌های دینامیکی برحسب جابه‌جایی، تنش مؤثر و نیروهای داخلی در طی زلزله ارائه شده است. بر اساس تحلیل‌ها، افزایش ماکزیمم شتاب زمین و ماکزیمم جابه‌جایی افقی منجر به افزایش نیروهای داخلی دینامیکی در پوشش تونل، افزایش نشست دائمی خاک و کاهش تنش مؤثر در خاک می‌شود. به علاوه، پس از هر زلزله مقادیر باقیمانده قابل توجهی برای لنگر خمشی دینامیکی در پوشش تونل در اثر کرنش‌های تجمعی مشاهده شد در صورتی که مقادیر باقیمانده پس از زلزله برای نیروهای محوری در پوشش تونل کوچک‌تر است.

واژگان کلیدی: پاسخ لرزه‌ای، تونل، مترو تبریز، تحلیل عددی، دینامیکی.

تحلیل عددی پاسخ لرزه‌ای تونل زیرزمینی مترو تبریز

مجید فرین

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مسعود حاجی علیلو بناب (نویسنده مسئول)

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز،

hajialilue@tabrizu.ac.ir

توحید اخلاقی

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۱- مقدمه

شده است. در این خصوص اشمیت و حشاش [۷] گزارش کردند که برخی تونل‌های کالیفرنیا در زلزله ۱۹۹۸ لوماپریتا به صورت شناور درآمدند. برخی محققین مانند چو و همکاران [۸] بر روی این موضوع متمرکز شده‌اند [۹-۱۰]. پاکباز و یاروند [۱۱] اندرکنش بین خاک و پوشش تونل در طی زلزله را به وسیله برنامه کامپیوتری تفاضل محدود بررسی کردند. همچنین صدارت و همکاران [۱۲] یک مطالعه المان محدود عددی از اندرکنش پوشش بتنی دایروی و خاک با شرایط تماسی که اجازه لغزش و جداشدگی محدود در المان حد فاصل را می‌داد، انجام دادند. اخیراً، لاتزانو و همکاران [۱۳] اثر تونل دایروی را روی پاسخ شتاب زمین اطراف با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ

در سالیان گذشته تسهیلات زیرزمینی آسیب کمتری را در مقایسه با سازه‌های سطحی تجربه کرده‌اند. با این وجود برخی سازه‌های زیرزمینی آسیب شدیدی را در زلزله‌های اخیر از جمله زلزله ۱۹۹۵ کوبه ژاپن، زلزله ۱۹۹۹ چی چی تایوان و زلزله ۱۹۹۹ کوجالی ترکیه تجربه کرده‌اند [۱].

چندین تحقیق و مقاله آسیب‌های سازه‌های زیرزمینی کوچک مانند لوله‌های مدفون در خاک را بررسی کرده‌اند [۲-۴]. به علاوه چندین مطالعه شامل روش‌های عددی و تحلیلی و مطالعات آزمایشگاهی در خصوص این موضوع انجام شده است. در این مطالعات بلندشدگی خطوط لوله به طور کامل ارزیابی شده است [۳، ۵-۶] همچنین آسیب سازه‌های زیرزمینی بزرگ گزارش

دانشگاه کمبریج ارزیابی کردند. آنها اثر عمق تونل و دانسیته خاک ماسه‌ای را در آزمایش‌هایشان مورد مطالعه قرار دادند. عبدالمتعال و همکاران [۱۴] اندر کنش لرزه‌ای بین تونل‌ها و خاک دانه‌ای خشک اطرافش را بررسی کرده و اثرات دانسیته نسبی لایه خاک ماسه‌ای و عمق تونل را مورد مطالعه قرار دادند. بازیار و همکارانش [۱۵] اثر تونل زیرزمینی جعبه‌ای شکل را روی پاسخ شتاب سطح زمین با استفاده از آزمایش‌های ساترفیوژ دینامیکی و شبیه‌سازی عددی با تمرکز بر اثر مشخصات حرکت ورودی بررسی کردند. علی‌الهی و همکاران [۱۶] پاسخ لرزه‌ای توده الاستیک خطی شامل یک تونل مدفون بدون پوشش را تحت امواج منتشر شونده قائم SV و P بررسی کردند. همچنین در تحقیقات دیگری توسط علی‌الهی و آدم پیرا [۱۷-۱۸] اثرات وجود سازه‌های زیرزمینی به‌ویژه حفرات زیرزمینی و تونل‌های موازی بدون تکیه‌گاه طویل بر روی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان بررسی گردید. در تحقیق دیگری توسط تسینیدیس و همکاران [۱۹] پاسخ لرزه‌ای تونل‌های مستطیلی در ماسه به‌وسیله آزمایش ساترفیوژ و تحلیل عددی بررسی شده است.

تاکنون به دلیل پارامترهای متعدد مؤثر بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی، نتیجه‌گیری جامعی در این بخش از مطالعات در ادبیات فنی وجود ندارد. بدین منظور، امید است که تحقیق حاضر یک سری مطالعات عددی را برای توسعه برخی ابعاد مسئله انجام دهد. اثرات پارامترهای مختلف شامل ماکزیمم شتاب زمین، محتوای فرکانسی حرکت ورودی و سایر مشخصات زلزله بر روی پاسخ لرزه‌ای تونل زیرزمینی مترو در تحقیق حاضر بررسی شده است. این مقاله نتایج تحلیل عددی دینامیکی بر روی تونل زیرزمینی با سطح مقطع دایره تحت بارگذاری تاریخچه زمانی شتاب زلزله‌های مختلف را ارائه می‌کند. در این تحلیل‌ها، یک مدل دو بعدی از تونل دایروی شامل رفتار غیر ارتجاعی ترکیبی خاک با استفاده از مدل UBCHYST استفاده شده است.

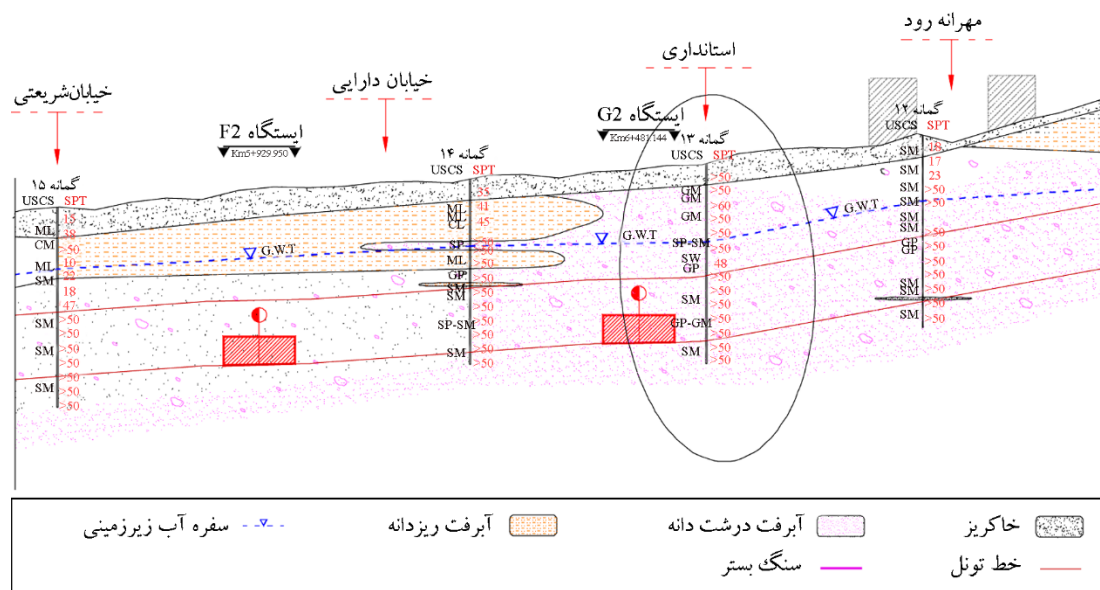
مدل UBCHYST با معیار گسیختگی موهر-کولمب ترکیب

شده و در نرم‌افزار FLAC به‌عنوان یک مدل رفتاری تعریف شده توسط کاربر ارائه شده است. در این مدل، مقدار نسبت تنش به‌وسیله پوش گسیختگی موهر-کولمب در کرنش‌های برشی بالا محدود می‌شود. مقاومت برشی مصالح خاکی که توسط مدل UBCHYST تخمین زده می‌شود سازگار با تخمین‌های مدل موهر-کولمب می‌باشد. مزیت مدل UBCHYST بر مدل ساده موهر-کولمب حلقه‌های هیستریزس غیرخطی ایجاد شده به‌وسیله تغییر مدول برشی مماسی در طی بارگذاری و باربرداری است. این مدل، رفتار واقعی خاک را شبیه‌سازی کرده و همراه با مدل ساده موهر-کولمب مقدار لازم معین کننده G/G_{max} و میرایی را کاهش می‌دهد [۲۰].

۲- مشخصات خط ۲ مترو تبریز

شهر تبریز با مساحت ۱۶۰ کیلومترمربع و جمعیتی در حدود ۱/۶۰۰/۰۰۰ نفر یکی از پرجمعیت‌ترین و مهم‌ترین شهرهای شمال غرب ایران است. خط ۲ قطار شهری تبریز (TURL2) با طولی حدود ۲۲ کیلومتر قسمت شرقی شهر را به قسمت غربی آن متصل می‌کند. این مطالعه بر روی قسمت مرکزی خط ۲ بین ایستگاه‌های E2 و H2 تمرکز دارد. تونل خط ۲ به‌صورت مکانیزه توسط ماشین حفار سپری مکانیزه با سیستم فشار تعادلی زمین حفاری می‌شود. قطر حفاری تونل خط ۲ متروی تبریز ۹/۴۹ متر و قطر خارجی سپر در بخش جلویی آن ۹/۴۶ متر می‌باشد [۲۱]. همچنین سگمنت‌های پوشش تونل دارای ضخامت ۳۵ سانتی‌متر و طول ۱۵۰ سانتی‌متر از بتن پیش‌تنیده ساخته شده‌اند که درست در پشت سپر نصب می‌شوند.

در محدوده مورد نظر از مسیر خط ۲، بر اساس مطالعات انجام شده زمین‌شناسی، نوع خاک اساساً SM و GM بوده و سطح آب زیرزمینی تقریباً در عمق ۱۰ متری قرار دارد. مقطع زمین‌شناسی مسیر تونل در شکل (۱) نشان داده شده است. مطابق مقطع ژئوتکنیکی، توده خاک در محدوده مدل مورد نظر دانه‌ای، همگن و ایزوتروپیک می‌باشد. مشخصات ژئوتکنیکی خاک محدوده مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است همچنین مشخصات پوشش تونل در جدول (۲) آورده شده است.



شکل (۱): پروفیل زمین‌شناسی خط ۲ مترو تبریز در محدوده مورد مطالعه.

جدول (۱): مشخصات ژئوتکنیکی مورد استفاده برای لایه‌های خاک مدل [۲۲].

مشخصه	دانسیته خشک (kN/m ³)	دانسیته مرطوب (kN/m ³)	مدول برشی ماکزیمم (MPa)	نسبت پواسون	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (°)	زاویه اتساع (°)
لایه اول (GM)	۱۶/۹۷	۱۸/۳۴	۵۴۵	۰/۲۷	۸	۳۵	۵
لایه دوم (SM)	۱۶/۶۷	۱۹/۵۰	۲۷۷/۱	۰/۲۹	۸	۳۳	۳

۳- حرکات زمین مورد استفاده برای تحلیل عددی

فوریه سریع آنها که به کف مدل اعمال شده است، نشان می‌دهد.

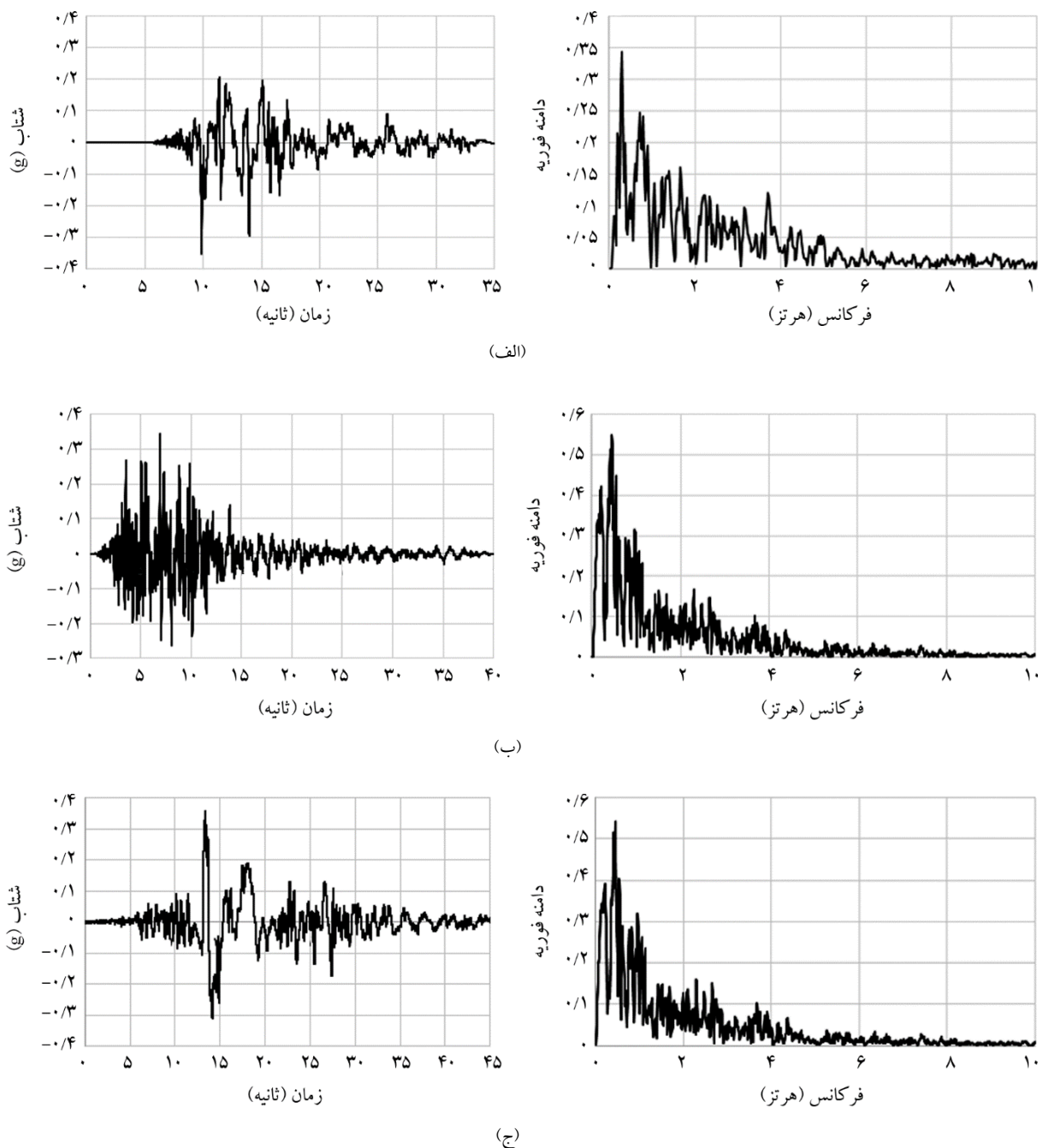
با توجه به اینکه تونل‌های قطار شهری تبریز به گسل شمال این شهر نزدیک هستند، از مشخصات سه زلزله حوزه نزدیک مطابق جدول (۳) برای تحلیل‌های عددی استفاده شده است. همچنین شکل (۲)، تاریخچه زمانی شتاب ثبت شده زلزله‌ها را همراه با تبدیل

جدول (۲): مشخصات مکانیکی مدل تونل.

وزن مخصوص γ (kN/m ³)	مدول الاستیسیته E (GPa)	نسبت پواسون ν	مقاومت فشاری f_c (MPa)
۲۵	۳۰/۲	۰/۲	۴۰

جدول (۳): مشخصات سه زلزله مورد استفاده در تحلیل‌های عددی.

زلزله	بزرگ	شتاب ماکزیمم (g)	زمان شتاب ماکزیمم (sec)	سرعت ماکزیمم (cm/sec)	زمان سرعت ماکزیمم (sec)	جابه‌جایی ماکزیمم (cm)	زمان جابه‌جایی ماکزیمم (sec)	سرعت موج برشی محل ثبت زلزله (m/sec)	شدت آریاس (m/sec)	چگالی انرژی ویژه (cm ² /sec)
۱۹۹۹ کوجالی ترکیه ایستگاه Yarımcı	۷/۵	۰/۳۵	۹/۸۷۰	۶۲/۱۸۲	۱۰/۳۸۰	۵۱/۳۰۲	۱۲/۰۱۰	۲۹۷	۱/۳۲	۱۰۳۳۴/۰
۱۹۹۵ کوبه ژاپن، ایستگاه Kakogawa (CUE90)	۶/۹	۰/۳۵	۶/۹۳۰	۲۷/۶۷۸	۵/۸۴۰	۹/۶۹۴	۱۱/۴۱۰	۳۱۲	۱/۶۹	۱۶۲۵/۹
۱۹۹۹ چی چی تایوان، ایستگاه TCU052	۷/۶۲	۰/۳۵	۱۳/۳۴	۱۵۰/۲۷	۱۵/۳۳	۱۹۴/۱۵	۱۴/۲۴	۵۷۹/۱	۲/۹	۶۲۹۸۴/۴



شکل (۲): تاریخچه زمانی شتاب و تبدیل فوریه سریع زلزله‌های الف) کوجالی ب) کوبه پ) چی چی، استفاده شده برای تحلیل‌های عددی.

۴- شبیه‌سازی عددی

۴-۱- توصیف مدل عددی

تحلیل دینامیکی می‌تواند برای اندرکنش‌های پیچیده خاک-سازه مورد استفاده قرار گرفته و به‌طور عملی رفتار تونل تحت حرکات زلزله را شبیه‌سازی کند. تاریخچه زمانی حرکات زمین و محدوده وسیعی از طیف‌های فرکانسی را می‌توان به‌طور مستقیم در

تحلیل دینامیکی وارد کرد. کاهش مدول برشی و میرایی وابسته به کرنش خاک در طی حرکات زلزله می‌تواند در تحلیل‌های دینامیکی به طریق واقعی ترکیب شود. تحت حرکات زلزله، پاسخ تونل و زمین به‌وسیله خصوصیات دینامیکی خاک شبیه‌سازی می‌شود. برای شبیه‌سازی عددی پاسخ لرزه‌ای تونل خط ۲ مترو تبریز تحت زلزله‌های مختلف، از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 7.0 [۲۳]

به‌عنوان تابعی از تعداد سگمنت‌ها و سختی خاک اطراف متغیر است [۲۴]. انجمن مهندسين عمران ژاپن به‌طور توصیفی کاهش سختی سازه خطی پیوسته را بین ۲۰ تا ۴۰ درصد توصیه می‌کند. با در نظر گرفتن ضریب تصحیح $\zeta=0.3$ برای مدول یانگ بتن، مدول واقعی که بایستی در تحلیل‌ها در نظر گرفته شود مطابق معادله (۱) به دست می‌آید:

$$E_c = (1 - \zeta) \times E_{CLS} = (1 - 0.3) \times E_{CLS} = 0.7E_{CLS} \quad (1)$$

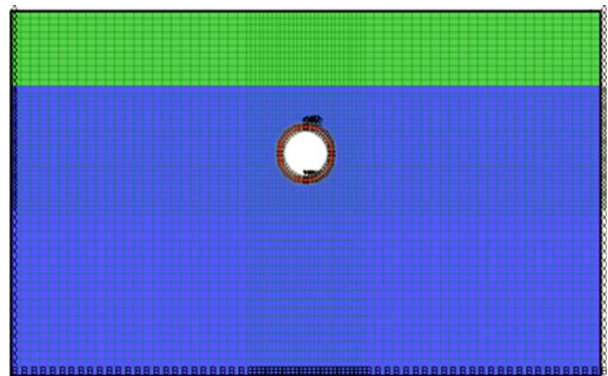
که در این رابطه E_c مدول مجازی رینگ و E_{CLS} مدول بتن می‌باشد [۲۵].

۴-۲- توصیف مدل رفتاری UBCHYST خاک

مدل تنش کل UBCHYST، در دانشگاه بریتیش کلمبیا (UBC) برای تحلیل دینامیکی خاک تحت بارگذاری زلزله ایجاد شده است. این مدل در برنامه تفاضل محدود دو بعدی FLAC به‌عنوان یک فیش مرجع توسط ناسگارد و همکاران [۲۱] به کار گرفته شده است. بعداً به‌منظور سرعت بخشیدن به زمان محاسبات، کد فیش مرجع به ++C تبدیل شده و به‌صورت یک فایل DLL توسط گروهی از محققان در UC-Berkeley در آورده شده است [۲۶].

مدل UBCHYST امکان مدلسازی پاسخ تنش- کرنش غیرخطی و غیر ارتجاعی خاک را به‌طور مستقیم در تحلیل‌های دینامیکی فراهم می‌آورد. مدل مورد نظر با پارامترهای مقاومت زهکشی نشده در خاک‌های رسی و سیلتی با نفوذپذیری پایین و خاک‌های دانه‌ای با نفوذپذیری بالا که فشار آب حفره‌ای به‌محض تشکیل مستهلک می‌شود یا در خاک‌های دانه‌ای غیراشباع استفاده می‌شود. این مدل به‌طور مستقیم امکان مدلسازی پاسخ سیکیلی غیرخطی و تنش-کرنش غیر الاستیک خاک را توسط کاهش مدول برشی با کرنش برشی و نسبت میرایی وابسته به کرنش را شبیه‌سازی می‌کند. مدول برشی مماسی (G_T) تابعی از مدول برشی ماکزیمم، G_{max} ، ضریب ضرایب کاهش می‌باشد که تابعی از نسبت تنش ایجاد شده و تغییر در نسبت تنش برای رسیدن به گسیختگی هستند که در معادله (۲) و شکل (۴) ارائه شده است.

استفاده شده است. تحلیل‌های تاریخیچه زمانی دینامیکی از سیستم به هم بسته خاک-تونل تحت شرایط کرنش مسطح انجام شده است. در این تحقیق، خاک به‌وسیله المان‌های کرنش مسطح درجه دوم و تونل به‌وسیله المان‌های Linear مش بندی شده است (شکل ۳). رفتار خاک به‌وسیله مدل رفتاری ترکیبی تنش کل هیستریزیس (UBCHYST) و مدل تونل به‌وسیله رفتار الاستیک خطی مدلسازی شده است. با توجه به اینکه در تحلیل‌های دینامیکی، فرکانس موج ورودی و مشخصات سرعتی موج، دقت عددی انتقال امواج را تحت تأثیر قرار می‌دهد، برای ایجاد دقت لازم در انتقال امواج در مدل، ابعاد مش‌ها کمتر از $1/10$ طول موج بزرگ‌ترین فرکانس موج ورودی در نظر گرفته شد.



شکل (۳): مدل عددی در نرم‌افزار FLAC.

واضح است که پوشش سگمندی دارای سختی خمشی متفاوت از تونل یکپارچه یا تونل با تعداد ثابت مفصل در نقاط معین است. روش‌های متفاوتی برای در نظر گرفتن تأثیر درزهای سگمندی روی سختی خمشی پوشش تونل پیشنهاد شده است. در روش محاسبات معمول اصلاح شده برای در نظر گرفتن کاهش سختی در درزهای سگمندی، یک نسبت انتقال ممان خمشی (ζ) معرفی می‌شود. این نسبت برای تصحیح مدول الاستیک رینگ در تحلیل‌های عددی می‌باشد. در این روش پس از تصحیح مدول الاستیک رینگ مطابق با ضریب ζ بارهای وارده بر پوشش محاسبه می‌شوند. سپس مقدار لنگر خمشی به‌ترتیب با افزایش و کاهش مقدار برای سگمنت و درز به‌وسیله همان ضریب ζ تصحیح می‌شود. مقدار پارامتر ζ بین $1/3$ تا $1/5$

در این مدل برگشت تنش زمانی اتفاق می‌افتد که قدر مطلق مقدار نسبت تنش ایجاد شده (η) از مقدار قبلی کوچک‌تر باشد و تلاقی زمانی اتفاق می‌افتد که τ_{xy} تغییر علامت بدهد. بازگشت تنش باعث می‌شود که مقدار η_1 به صفر رسیده و مقدار η_{1f} دوباره محاسبه شود [۲۰].

۳-۴- شرایط مرزی

در تحلیل دینامیکی در نرم‌افزار FLAC، معمولاً دو نوع شرط مرزی استفاده می‌شود که یکی مرز آرام و دیگری مرز میدان آزاد می‌باشد. مرز آرام شامل میراگرهایی است که به‌طور مستقل در جهت‌های قائم و برشی به مرز متصل شده‌اند که نیروهای قائم و برشی ویسکوز را تولید می‌کنند. مرز آرام از بازتاب موج پیش‌رونده خارج به داخل مدل جلوگیری کرده و اجازه تابش انرژی لازم را می‌دهد. یک مرز میدان آزاد حرکت میدان آزاد را در مرزهای جانبی مدل تقویت می‌کند و این مرزها خواص غیر بازتابندگی خود را حفظ می‌کنند. در نرم‌افزار FLAC، مرزهای جانبی شبکه اصلی با میراگرهای ویسکوز به شبکه میدان آزاد بسته می‌شوند تا مرز آرام شبیه‌سازی شده و نیروهای نامتعادل از شبکه میدان آزاد به مرز شبکه اصلی منتقل شود [۲۷].

در این مطالعه مرز میدان آزاد به مرزهای جانبی اختصاص داده شده است به طوری که شرایط مشابه مدل نامحدود را شبیه‌سازی می‌کند. در تحلیل دینامیکی، حرکات لرزه‌ای زمین به‌عنوان تابعی از زمان به پایه مدل اعمال می‌شود. در این مطالعه، فقط حرکات زمین که وابسته به امواج برشی هستند در نظر گرفته شده است.

۴-۴- اندرکنش بین خاک و پوشش تونل

اثرات اندرکنش خاک و پوشش تونل با به‌کارگیری المان‌های حد فاصل موجود در نرم‌افزار FLAC در نظر گرفته شده است. در این راستا المان‌های حد فاصل با کوپل فنرهایی

در این معادله مدول برشی مماسی در تمام سیکل بارگذاری تغییر می‌کند تا حلقه‌های تنش- کرنش هیستریزیس با دامنه و مساحت (میرایی) متغیر در کل بارگذاری زلزله به دست آید [۲۰].

$$G_t = G_{\max} * \left(1 - \frac{\eta_1}{\eta_{1f}} \times R_f\right)^n \times \text{mod1} \times \text{mod2} \quad (2)$$

که G_t : مدول برشی مماسی

η : نسبت تنش ایجاد شده (τ_{xy}/σ'_v)

$\eta_1 = \eta - \eta_{\max}$: تغییر در نسبت تنش η از آخرین برگشت

η_{\max} : ماکزیمم η در آخرین برگشت

$\eta_{1f} = \eta_f - \eta_{\max}$: تغییر در η برای رسیدن به پوش گسیختگی

در جهت بارگذاری

$$\eta_f = (\sin(\phi_f) + \text{Cohesion} \times \cos(\phi_f)) / \sigma'_v$$

τ_{xy} : تنش برشی ایجاد شده در صفحه افقی

σ'_v : تنش مؤثر قائم

ϕ_f : زاویه اصطکاک ماکزیمم

n و R_f : پارامترهای کالیبراسیون

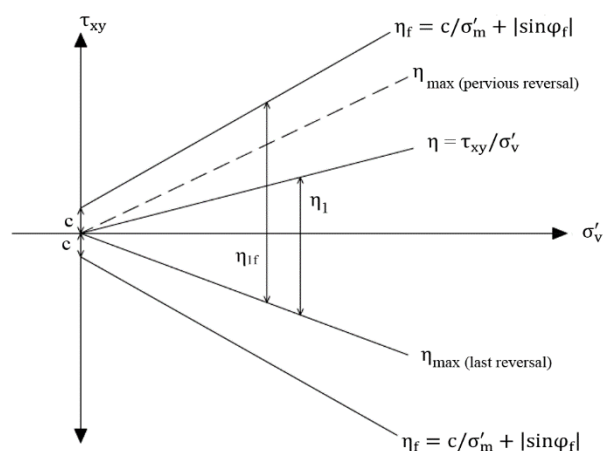
mod1: ضریب کاهش برای اولین بار یا بارگذاری اولیه که

معمولاً مقداری بین ۰/۶ تا ۰/۸ است.

mod2: تابع اختیاری برای در نظر گرفتن کاهش مدول دائمی با

کرنش بزرگ که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\left(1 - \left(\frac{\eta_1}{\eta_{1f}}\right)^{rm}\right) \times \text{dfac} \geq 0.2$$



شکل (۴): پوش گسیختگی و پارامترهای مورد استفاده در مدل

UBCHYST [۲۰].

ترازهای کرنش ۰/۰۰۰۱ درصد تا ۱ درصد ساخته شد تا منحنی‌های مدول برشی و میرایی مصالح مربوطه در فشارهای محصور کننده معین تولید گردند. پارامترهای غیرخطی مدل UBCHYST خاک چنان انتخاب شده‌اند که منحنی‌های کاهش مدول و میرایی به دست آمده از مدل غیرخطی با منحنی تست‌های آزمایشگاهی دارندلی [۲۸] در فشارهای محصور کننده مختلف منطبق شوند.

شکل‌های (۵) و (۶) به دست آمده به روش فوق، مقایسه منحنی‌های کاهش مدول و میرایی حاصل از مدل تجربی دارندلی [۲۸] با منحنی‌های حاصل از مدل UBCHYST در عمق‌های مختلف لایه‌های اول و دوم خاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود، مدل، پاسخ میرایی را در کرنش‌های برشی متوسط تا بزرگ ($> 0.1\%$) بیشتر تخمین می‌زند. این مسئله در مدل‌های غیرخطی متداول است. دلیل تخمین بیشتر ضریب میرایی به نظر می‌رسد به دلیل شکل منحنی تنش-کرنش اصلاح شده در کرنش‌های بزرگ است و قبلاً توسط چندین محقق اشاره شده است [۲۶، ۲۹-۳۱].

پارامترهای ورودی مدل UBCHYST شامل مدول برشی ماکزیمم (G_{max})، مدول بالک (K) و پارامترهای معیار گسیختگی

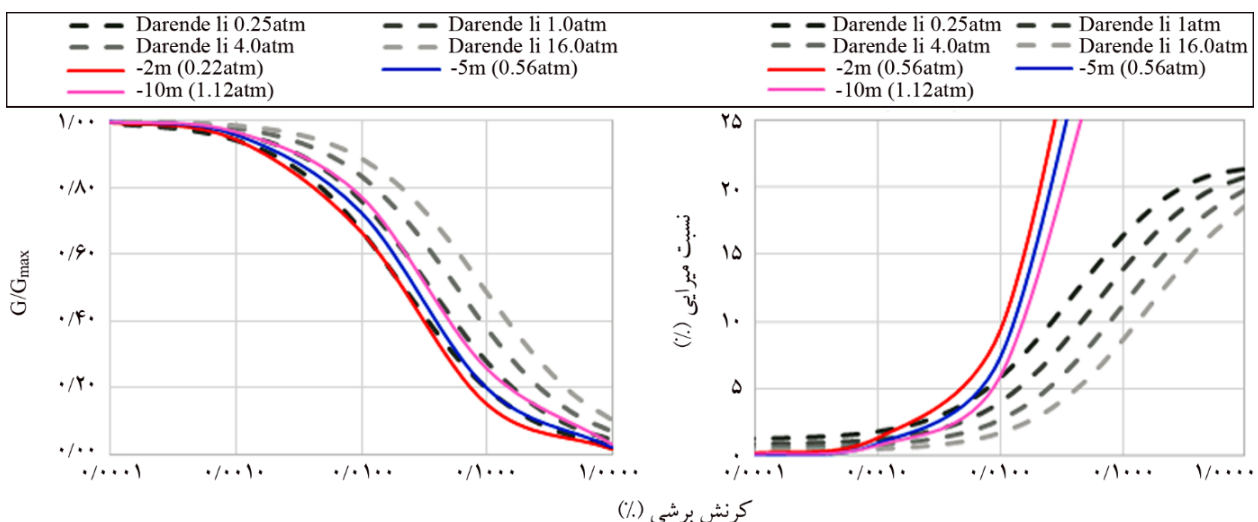
با سختی برشی K_s و سختی قائم K_n مدل شده‌اند که مطابق معادله (۳) تقریباً ده برابر سختی معادل سخت‌ترین ناحیه مجاور سازه تونل انتخاب شده است:

$$k_n \text{ or } k_s = 10 \times \max \left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta Z_{min}} \right] \quad (3)$$

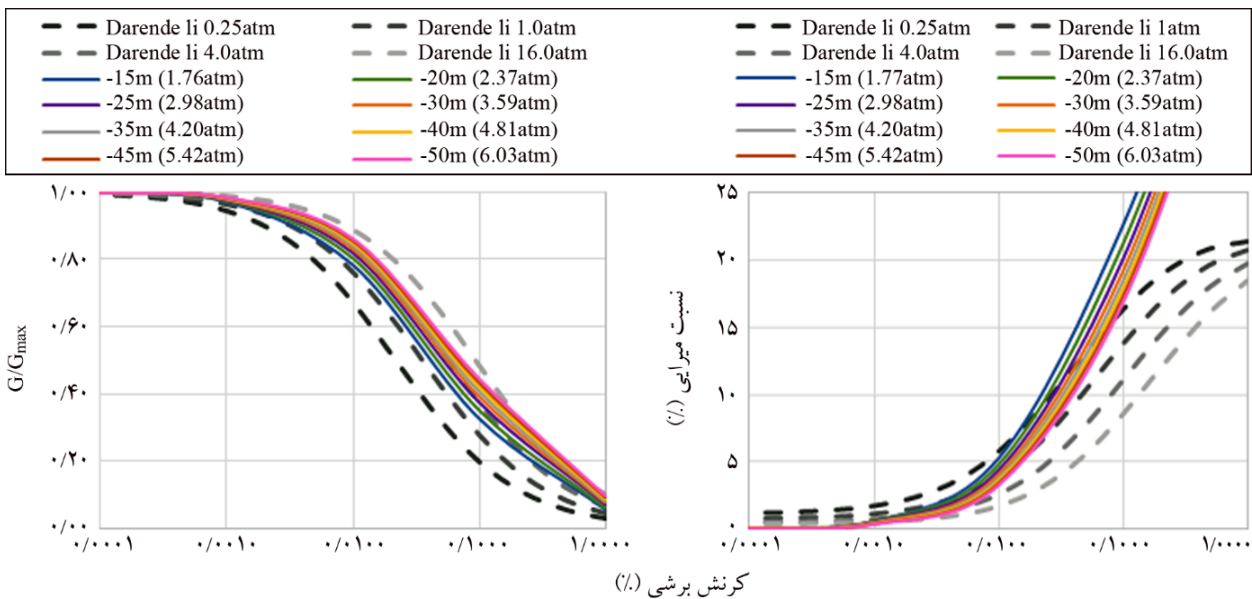
در این رابطه K و G به ترتیب مدول بالک و برشی ناحیه خاک مورد نظر و ΔZ_{min} بعد کوچک‌ترین ناحیه مجاور در جهت قائم می‌باشد [۲۷]. با در نظر گرفتن مشخصات خاک و بعد کوچک‌ترین ناحیه مجاور برابر با ۰/۵ متر، سختی برشی و قائم فنرها برابر با ۱۳/۴ گیگاپاسکال خواهد بود.

۴-۵- کالیبراسیون پارامترهای ورودی مدل UBCHYST

پارامترهای مدل UBCHYST به وسیله مقایسه منحنی‌های کاهش مدول و میرایی حاصل از شبیه‌سازی مدل در نرم‌افزار FLAC با منحنی‌های ارائه شده توسط دارندلی [۲۸] کالیبره شده است. در روند کالیبراسیون، یک تخمین اولیه از هر کدام از پارامترها در هر لایه خاک بر اساس تحلیل حساسیت انجام شد تا پارامترها محاسبه شوند. یک المان آزمایش برش ساده سیکلی (CSS) با استفاده از مدل رفتاری UBCHYST در نرم‌افزار FLAC در عمق‌های مختلف مدل در محدوده



شکل (۵): تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی با دامنه کرنش برشی سیکلی در عمق‌های مختلف در لایه خاک اول که توسط FLAC با استفاده از مدل UBCHYST تخمین زده شده است.



شکل (۶): تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی با دامنه کرنش برشی سیکلی در عمق‌های مختلف در لایه خاک دوم که توسط FLAC با استفاده از مدل UBCHYST تخمین زده شده است.

جدول (۴): پارامترهای خاک برای مدل رفتاری UBCHYST استفاده شده در تحلیل‌های FLAC.

توصیف پارامتر	پارامترها	لایه ۱	لایه ۲
وزن واحد حجم (kN/m^3)	g	۱۸/۳۴	۱۹/۵
چسبندگی (kPa)	c	۸	۸
زاویه اصطکاک ماکزیمم (درجه)	ϕ	۳۵	۳۳
زاویه اتساع (درجه)	ψ	۵	۳
مدول برشی کرنش‌های کوچک (MPa)	G_{\max}	۵۴۵/۲	۲۷۷/۱
نسبت پواسون	ν	۰/۳۱	۰/۲۹
ضریب نرخ تنش	R_f	۰/۹۸	۰/۹۸
توان نرخ تنش	n	۱/۰	۲/۰
توان نرخ تنش	n_1	۱/۰	۱/۰
ضریب سیکل اول	mod1	۰/۷۵	۰/۷۵
توان کرنش‌های بزرگ	rm	۰/۵	۰/۵
ضریب کرنش‌های بزرگ	d fac	۰	۰

مختلف شامل شتاب ماکزیمم زمین و محتوای فرکانسی حرکات ورودی روی رفتار مدل تونل بررسی شد. برای این منظور از شتاب‌سنج‌ها در اعماق مختلف تونل، کرنش‌سنج‌ها در مقطع تونل و

موهر-کولمب مانند چسبندگی، زاویه اصطکاک، زاویه اتساع و مقامت کششی و همچنین یک‌سری پارامترهای کالیبراسیون هستند که شکل و اندازه حلقه‌های تنش-کرنش را کنترل می‌کنند. لیست پارامترهای استفاده شده در مدل UBCHYST در جدول (۴) آورده شده است.

مدل UBCHYST تقریباً هیچ انرژی تلف شده در ترازهای کرنش سیکلی کم را ایجاد نمی‌کند که ممکن است غیرواقعی باشد. در این مطالعه مقدار کوچک میرایی رایلی (۰/۵ درصد) برای ایجاد میرایی در تحلیل‌ها در کرنش‌های خیلی کوچک استفاده شده است.

۵- صحت‌سنجی مدلسازی عددی

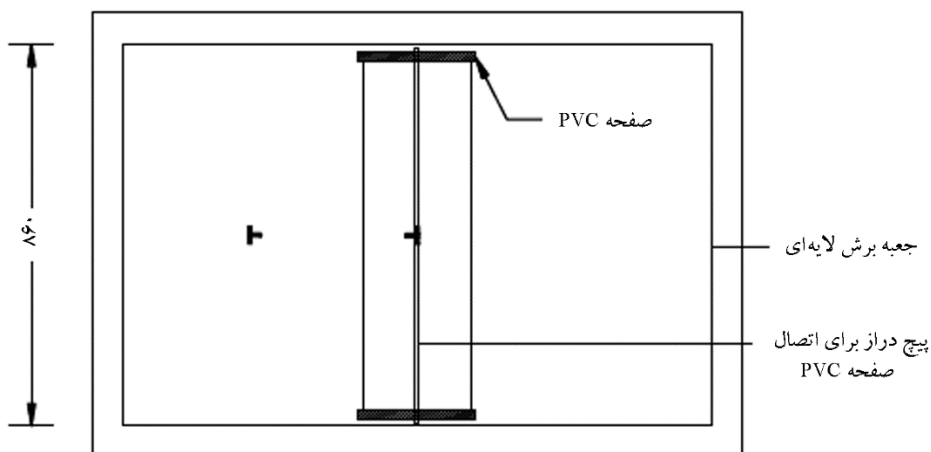
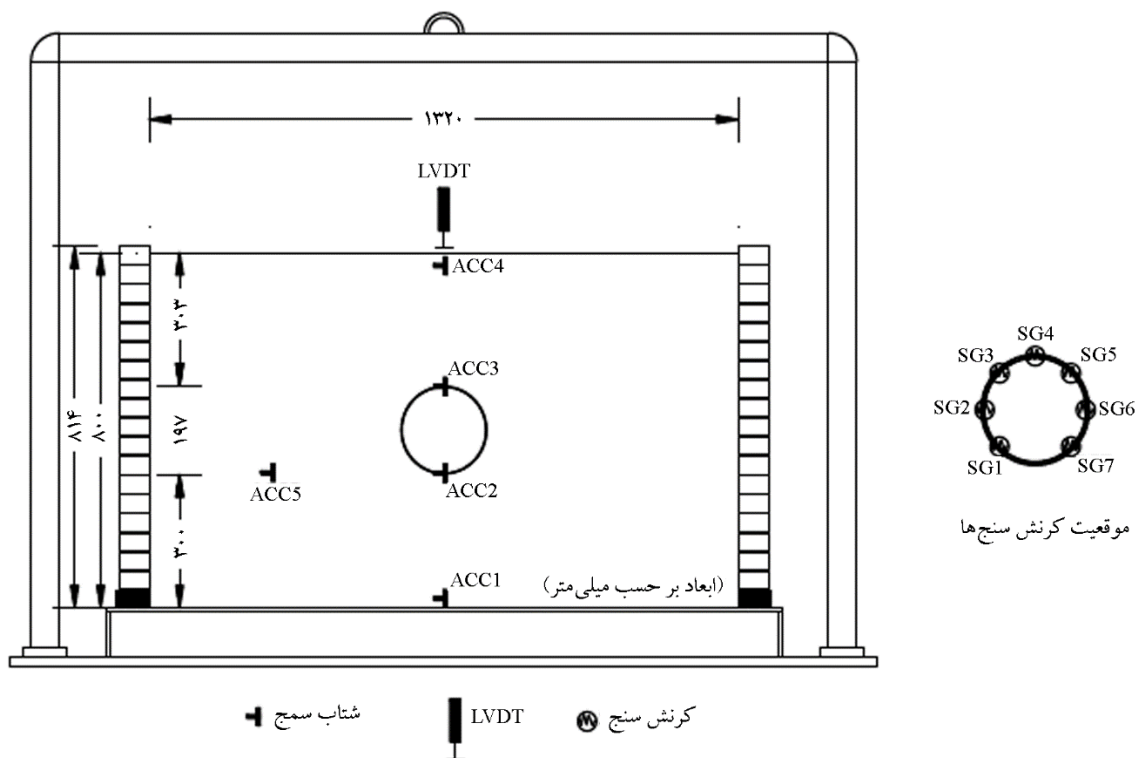
برای صحت‌سنجی مدل عددی، از یک‌سری آزمایش‌های میز لرزه ۱g مربوط به بررسی پاسخ مدل فیزیکی تونل خط ۲ مترو تبریز که توسط مؤلفین در دانشگاه تبریز انجام شده است، استفاده گردید. مدل فیزیکی مطابق شکل (۷) شامل یک تونل دایروی مدفون در ماسه خشک داخل جعبه برش لایه‌ای بود که تحت بارگذاری امواج هارمونیک قرار گرفت. در مطالعه آزمایشگاهی اثرات پارامترهای

۳ هر تر نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده مطابقت خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد.

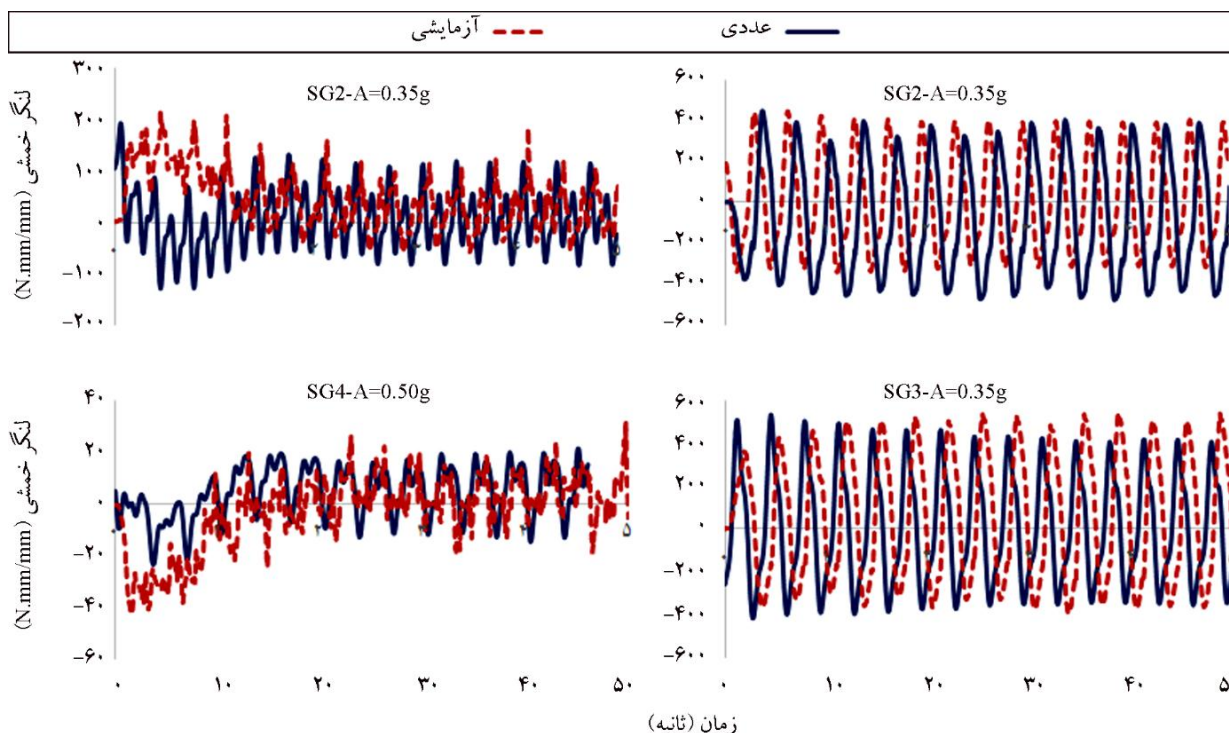
۶- روش تحلیل

تحلیل مدل در سه مرحله انجام شده است: در مرحله اول المان‌های خاک تحت شرایط ژئواستاتیک برای رسیدن به حالت پایدار طبیعی بارگذاری شده‌اند. از این مقادیر تنش‌های اولیه برای محاسبات بعدی استفاده شده است. در مرحله دوم پوشش بتنی در

LVDTها در سطح خاک برای اندازه‌گیری نشست استفاده شد. مدل عددی ساخته شده از روی مدل آزمایشگاهی، تحت بارگذاری دینامیکی سینوسی به دست آمده از شتاب‌سنج واقع در کف جعبه آزمایش قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی عددی شامل نیروهای داخلی در مقطع وسط پوشش تونل در محل کرنش‌سنج‌های مدل آزمایشگاهی از تحلیل‌ها به دست آمد. شکل (۸) مقایسه نمودارهای تاریخچه زمانی لنگر خمشی دینامیکی حاصل از مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی را در مقیاس مدل در بارگذاری هارمونیک با دامنه $0.35g$ و فرکانس



شکل (۷): طرح شماتیک پیکربندی و ابزاربندی مدل و جانمایی کرنش‌سنج‌ها بر روی پوشش مدل فیزیکی.



شکل (۸): مقایسه نمودارهای تاریخچه زمانی لنگر خمشی دینامیکی حاصل از مدلسازی عددی و آزمایشگاهی در مقیاس مدل در بارگذاری هارمونیک با دامنه $0.35g$ و فرکانس ۳ هرتز.

بدون میرایی (تحلیل ارتعاش آزاد) تحلیل گردید، سپس دوره تناوب یک سیکل کامل جابه‌جایی یک نقطه در بالای مدل به دست آمد. فرکانس طبیعی برابر با معکوس این دوره تناوب محاسبه گردید. با توجه به تحلیل‌های انجام یافته فرکانس طبیعی سیستم لایه‌های خاک برابر $3/50$ و سیستم خاک-تونل برابر با $3/46$ هرتز می‌باشد. در اثر وجود تونل در داخل توده خاک، فرکانس طبیعی سیستم کاهش می‌یابد.

۲-۷- تحلیل و مقایسه نتایج شتاب‌ها

با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته نسبت شتاب محاسبه شده در امتداد آرایش تونل عموماً بزرگ‌تر از یک است که نشان‌دهنده‌ی تمایل مدل برای تقویت سیگنال پایه در حال حرکت به سطح زمین در امتداد آرایش تونل می‌باشد. در شکل (۹) تاریخچه زمانی شتاب در اعماق مختلف برای زلزله کوچالی ارائه شده است. به‌عنوان یک واقعیت، شتاب ماکزیمم اندازه‌گیری شده در سطح بالای تونل بزرگ‌تر از پایین تونل است. همچنین شتاب زیر تونل

خاک جایگذاری شده و مشخصات المان حدفاصل اعمال گردیده و مدل دوباره تحلیل گردید. در تحلیل استاتیکی، سیستم خاک و پوشش تونل درحالی‌که مرز پایه در تمام جهت‌ها و مرزهای کناری در جهت X بسته شده، تنها تحت بارگذاری ثقلی قرار گرفت. در نهایت تحلیل لرزه‌ای انجام شد. برای کاهش موج‌های بازتابیده از مرزهای مدل، از مرز میدان آزاد استفاده گردید.

۲- نتایج و بحث

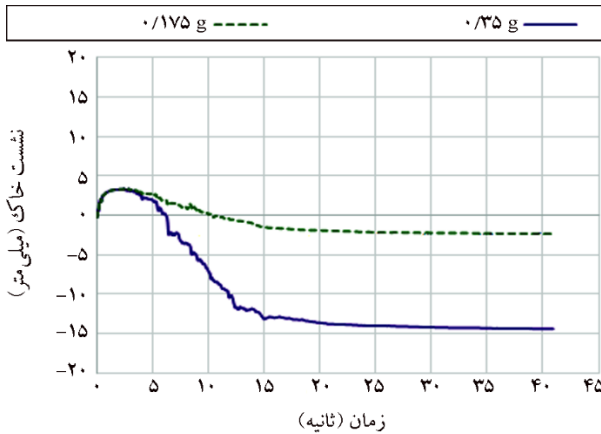
در این مطالعه، اثرات دامنه ماکزیمم و فرکانس غالب زلزله به همراه سایر مشخصات زلزله روی رفتار لرزه‌ای خط ۲ مترو تبریز ارزیابی شده است. همچنین پاسخ تونل و نشست زمین نیز بررسی گردیده است. نتایج به شرح زیر مورد ارزیابی قرار گرفته است:

۲-۱- فرکانس‌های طبیعی لایه‌های خاک مورد مطالعه و

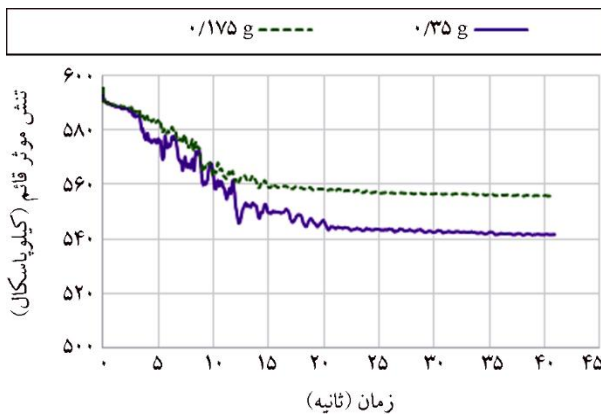
سازه تونل

برای به دست آوردن فرکانس طبیعی مدل در نرم‌افزار، مدل

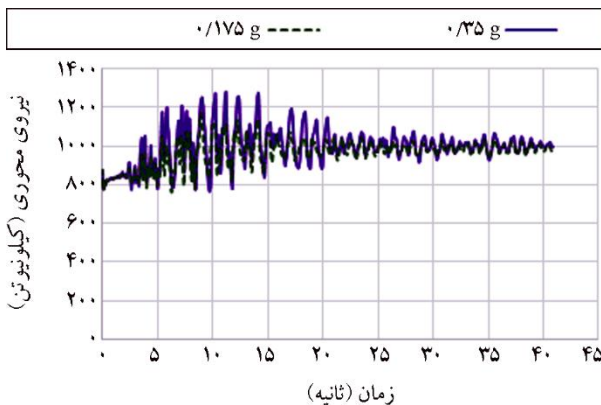
ایجاد شده در شانه چپ پوشش بتنی تونل را در طی دو زلزله ذکر شده نشان می‌دهند. در هر دو مدل، نیروی محوری در پوشش



شکل (۱۰): تاریخچه زمانی محاسبه شده نشست سطحی خاک در خط مرکزی تونل برای زلزله کوبه با PGAهای مختلف.

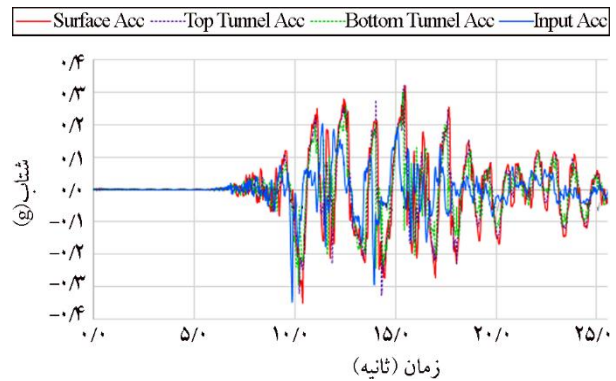


شکل (۱۱): تاریخچه زمانی محاسبه شده تنش مؤثر در کف مدل برای زلزله کوبه با PGAهای مختلف.



شکل (۱۲): تاریخچه زمانی محاسبه شده نیروی محوری در شانه سمت چپ پوشش تونل برای زلزله کوبه با دو PGA مختلف.

همیشه مقادیر بزرگ تری از شتاب را نسبت به شتاب کف مدل می‌باشد که احتمالاً به دلیل تنش غیریکنواخت در امتداد تونل به دلیل اثرات قوس زدگی و همچنین تأثیر مرز حفره تونل می‌باشد که امواج برشی قسمت پایین را به سمت بالا منتشر می‌کند.



شکل (۹): نمودار تاریخچه زمانی شتاب در اعماق مختلف مدل برای زلزله کوجالی.

۲-۳- اثرات دامنه ماکزیمم زلزله

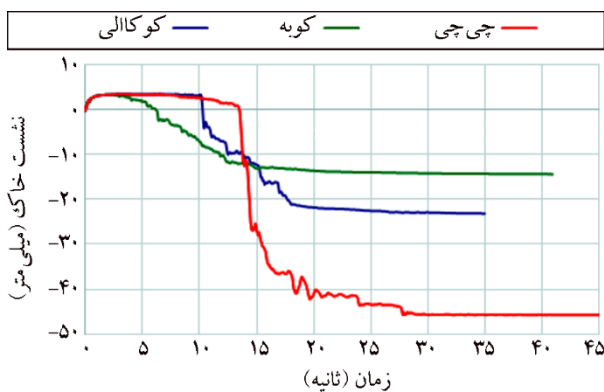
زلزله کوبه با دو دامنه ماکزیمم مختلف ($PGA=0.175g, 0.35g$) به عنوان بارگذاری لرزه‌ای ورودی به مدل برای در نظر گرفتن اثر شتاب ماکزیمم زمین در نظر گرفته شده است.

تاریخچه زمانی نشست خاک در شکل (۱۰) نشان داده شده است. طبق انتظار با افزایش دامنه ماکزیمم زلزله، تغییر مکان قائم افزایش می‌یابد. نشست سطحی خاک در خط مرکزی تونل بعد از اعمال زلزله برابر با $2/4$ میلی متر برای $PGA=0.175g$ و $14/4$ میلی متر برای $PGA=0.35g$ به دست آمد. مطابق نتایج تحلیل‌ها، نشست سطح زمین با فاصله گرفتن از خط مرکزی تونل به طرفین شدیداً کاهش می‌یابد.

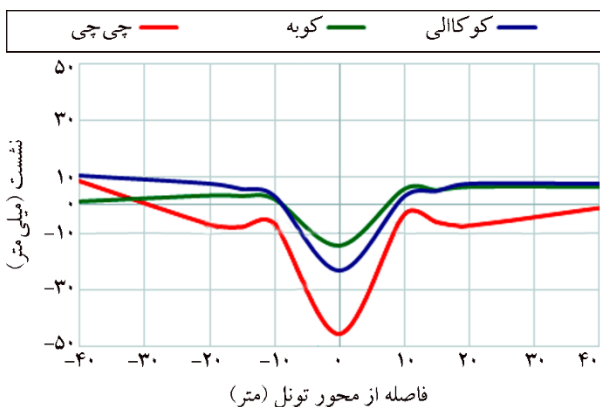
شکل (۱۱) تاریخچه زمانی تنش مؤثر در کف مدل (عمق ۵۰ متری) را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تنش مؤثر خاک برای هر دو مقدار دامنه ماکزیمم کاهش می‌یابد. نرخ کاهش تنش مؤثر برای $PGA=0.35g$ سریع‌تر است و مقدار نهایی تنش مؤثر برای $PGA=0.35g$ کوچک‌تر است.

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نیروی محوری و لنگر خمشی دینامیکی

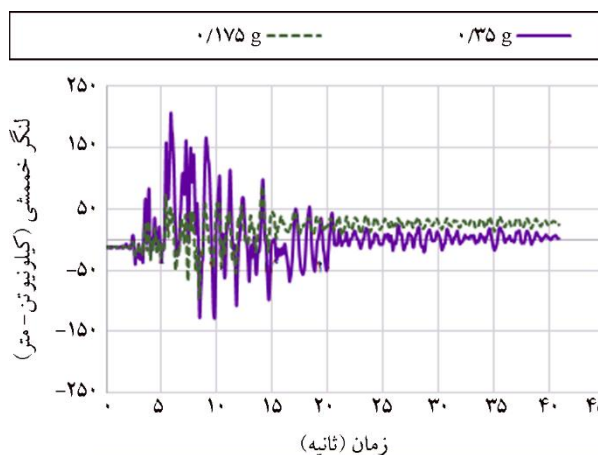
نیست و به پارامترهای دیگری از جمله جابه‌جایی ماکزیمم بستگی دارد. با توجه به اینکه شتاب برابر با حاصل ضرب جابه‌جایی در مجذور فرکانس زاویه‌ای می‌باشد، برای زلزله‌های با شتاب‌های ماکزیمم یکسان، با فرض ثابت بودن سایر مشخصات، زلزله دارای فرکانس بالاتر محتوای انرژی کمتری دارد زیرا انرژی متناسب با جابه‌جایی می‌باشد. بیشترین نشست‌های ایجاد شده در سطح زمین در خط مرکزی تونل در زلزله‌های کوجالی، کوبه، چی چی به ترتیب برابر با ۲۳/۱، ۱۴/۴ و ۴۵/۷ میلی‌متر بودند. شکل (۱۵) نشست نهایی سطح زمین در اطراف تونل با تغییر فاصله از مرکز تونل به طرفین برای سه زلزله مذکور را نشان می‌دهد. بیشترین نشست در مرکز تونل اتفاق می‌افتد و با حرکت از تونل به طرفین مقدار نشست کاهش یافته و در بعضی نقاط منجر به بالا آمدگی خاک می‌شود.



شکل (۱۴): تاریخچه زمانی محاسبه شده نشست سطحی خاک در خط مرکزی تونل برای سه زلزله مختلف با دامنه ماکزیمم یکسان و فرکانس‌های غالب متفاوت.



شکل (۱۵): نشست نهایی سطح زمین در اطراف تونل با تغییر فاصله از مرکز تونل.



شکل (۱۳): تاریخچه زمانی محاسبه شده لنگر در شانه سمت چپ پوشش تونل برای زلزله کوبه با دو PGA مختلف.

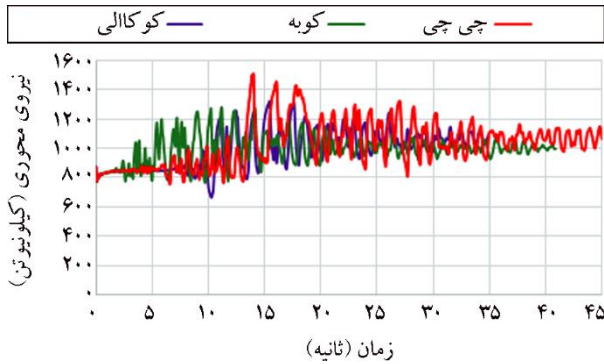
تونل در طی زلزله حول مقدار میانگین نوسان می‌کند. تاریخچه زمانی نیروی محوری در هر دو مدل از الگوی یکسانی تبعیت می‌کند و پس از اولین افزایش در دامنه شتاب به مقادیر ماکزیمم خود می‌رسد. همچنین مقدار نهایی نیروی محوری در دو مدل، اختلاف کمی دارد. در پایان تحلیل، نیروی محوری باقیمانده در پوشش برای هر دو زلزله یکسان است. همچنین الگوی تاریخچه زمانی لنگر خمشی دینامیکی در پوشش تونل برای هر دو زلزله یکسان است اما مقدار ماکزیمم لنگر برای $PGA=0.35g$ بیش از دو برابر $PGA=0.175g$ است. همچنین مشاهده می‌شود که پس از اعمال شتاب قابل توجه، نیروهای داخلی در پوشش تونل تغییرات قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهند.

نتایج مشابهی برای زلزله‌های کوجالی و چی چی در مطالعه تأثیر دامنه ماکزیمم زلزله به دست آمد.

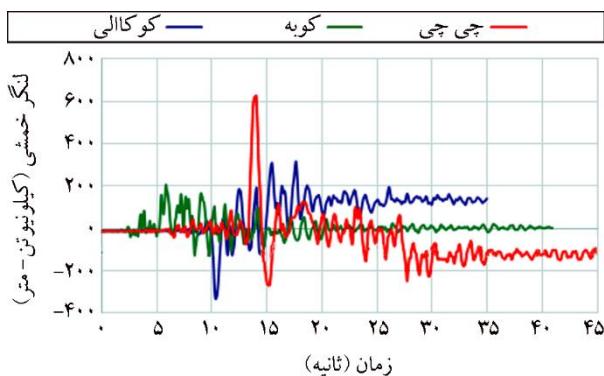
۷-۴- تأثیر فرکانس غالب زلزله

برای بررسی اثر فرکانس غالب زلزله، تاریخچه زمانی شتاب سه زلزله مختلف (کوجالی، کوبه، چی چی) با سه پریرود غالب مختلف (به ترتیب برابر با ۱/۴۰، ۱/۱۶ و ۰/۹۳ هرترتز) و PGA یکسان (۰.۳۵g) برای در نظر گرفتن اثرات محتوای فرکانسی به مدل اعمال گردید. نتایج به دست آمده که در شکل (۱۴) نشان داده شده‌اند بیانگر این است که نشست سطحی خاک تنها متأثر از فرکانس غالب زلزله

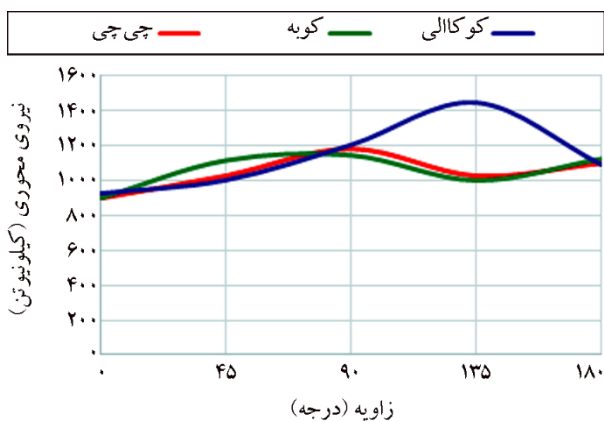
خمش و نیروی محوری دینامیکی در نزدیکی تاج و شانه‌های تونل ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه شتاب ماکزیمم زلزله کوجالی منفی و مخالف جهت شتاب ماکزیمم زلزله‌های کوبه و چی چی می‌باشد، روند تغییرات نمودار شکل‌های (۱۹) و (۲۰) صحیح است.



شکل (۱۷): تاریخچه زمانی محاسبه شده نیروی محوری در شانه سمت چپ پوشش تونل برای سه زلزله مختلف با دامنه ماکزیمم یکسان و فرکانس‌های غالب متفاوت.

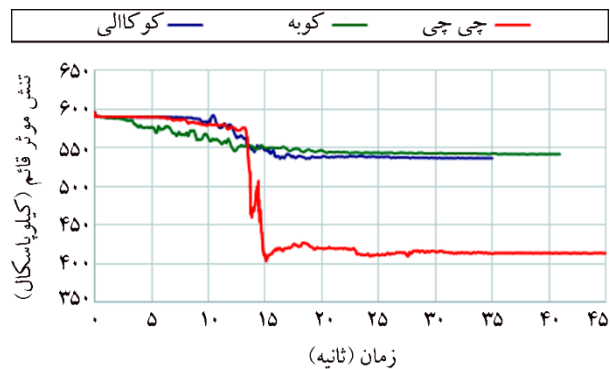


شکل (۱۸): تاریخچه زمانی محاسبه شده لنگر در شانه سمت چپ پوشش تونل برای سه زلزله مختلف با دامنه ماکزیمم یکسان و فرکانس‌های غالب متفاوت.



شکل (۱۹): پوش نمودارهای نیروی محوری در محل پوشش تونل برای زمان مربوط به $a_{max}=0.35g$.

مطابق شکل (۱۶)، تنش مؤثر خاک در کف مدل در طی سه زلزله اعمال شده کاهش می‌یابد. واضح است زمانی که تغییر عمده در تنش مؤثر رخ می‌دهد ارتباطی به فرکانس غالب زلزله ندارد، بلکه کاملاً مربوط به اولین افزایش در دامنه زلزله می‌باشد. کاهش تنش مؤثر همچنین ممکن است مربوط به سایر مشخصات لرزه‌ای مانند شدت آریاس یا مدت زمان قابل توجه زلزله باشد.



شکل (۱۶): تاریخچه زمانی محاسبه شده تنش مؤثر در کف مدل برای سه زلزله مختلف با دامنه ماکزیمم یکسان و فرکانس‌های غالب متفاوت.

شکل‌های (۱۷) و (۱۸)، تغییرات نیروهای داخلی پوشش تونل را برای زلزله‌های با فرکانس غالب مختلف نشان می‌دهند. تفاوت در مقادیر نیروهای محوری در طی سه زلزله اندک است اما تفاوت در مقادیر لنگر خمشی ایجاد شده در پوشش تونل چشمگیر می‌باشد. همچنین مقادیر نیروی محوری ایجاد شده در پوشش تونل بیشتر متأثر از بارگذاری استاتیکی وارد بر تونل است و نیروی محوری دینامیکی ایجاد شده تحت زلزله کمتر از مقادیر استاتیکی می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نشان داده شده است، در انتهای زلزله‌های وارده، نیروهای داخلی باقیمانده در پوشش تونل وجود دارد که این مقدار برای زلزله کوبه با بیشترین فرکانس غالب کمتر است ولی برای زلزله‌های کوجالی و چی چی مقادیر بزرگ‌تری دارد. شکل‌های (۱۹) و (۲۰) به ترتیب پوش نمودارهای نیروی محوری و لنگر خمشی در محل پوشش تونل برای زمان مربوط به $a_{max}=0.35g$ را نشان می‌دهد که زاویه از راستای قائم در نظر گرفته شده است. مقادیر ماکزیمم برای لنگر

افتاده است. همچنین تنش مؤثر در زیر تونل کمتر از تنش مؤثر در نقاط هم تراز می‌باشد که این امر باعث جابه‌جایی تونل به سمت پایین در طی زلزله می‌شود. همچنین مقادیر نیروی محوری نشان می‌دهند که قسمت پایینی تونل بیشتر از قسمت بالایی فشرده می‌شود که به دلیل تنش‌های سرباره می‌باشد.

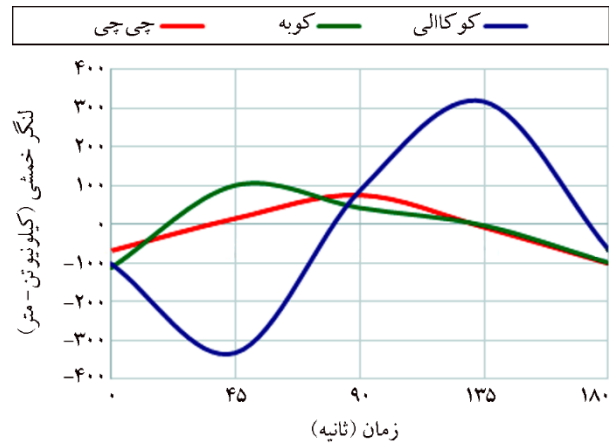
مطابق آیین‌نامه ACI، لنگرهای ترک‌خوردگی و ضریب‌دار در پوشش بتنی تونل را می‌توان توسط معادلات (۴) و (۵) محاسبه نمود [۳۲]:

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{h/2} \quad (۴)$$

که f_r مدول گسیختگی بتن، I_g ممان اینرسی کل مقطع بتنی و h ضخامت کلی عضو می‌باشد.

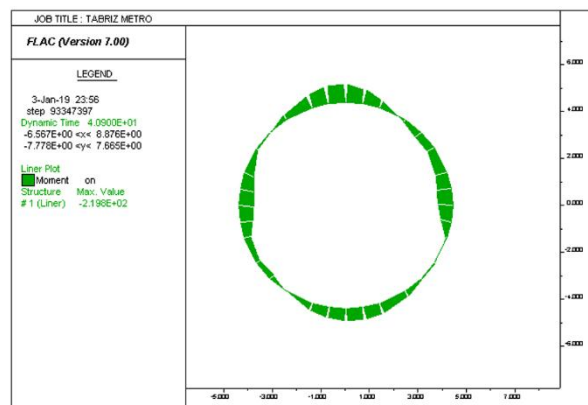
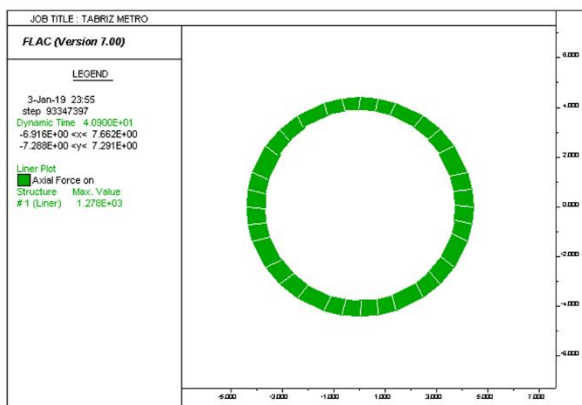
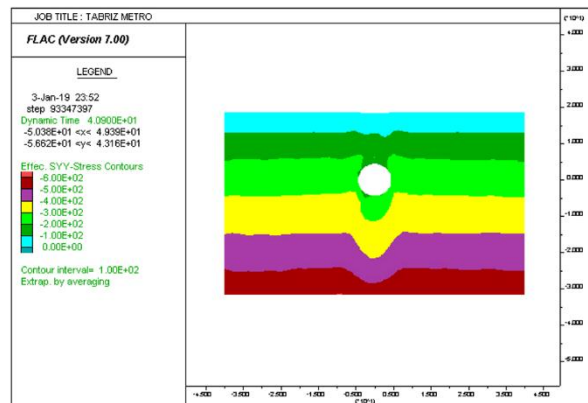
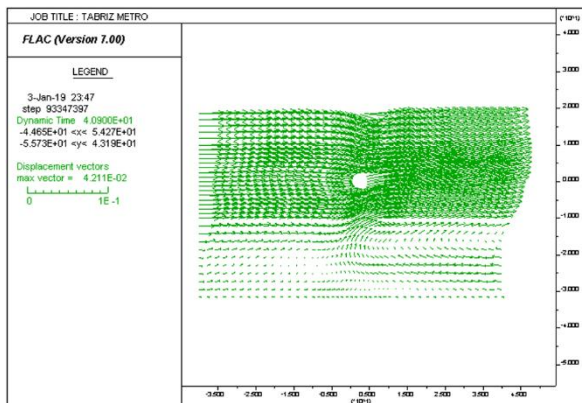
$$M_u = \phi M_n = \phi A_s \cdot f_y \cdot (d - a/2) \quad (۵)$$

که ϕ ضریب کاهش خمشی، M_n مقاومت خمشی اسمی مقطع، A_s مساحت میلگرد کششی طولی، f_y مقاومت تسلیم مشخصه میلگرد، d



شکل (۲۰): پوش نمودارهای لنگر خمشی در محل پوشش تونل برای زمان مربوط به $amax=0.35g$.

شکل (۲۱) جابه‌جایی نقاط مختلف مدل، کانتورهای تنش مؤثر، دیاگرام توزیع نیروی محوری و ممان خمشی در مقطع پوشش تونل را در انتهای زلزله کوبه نشان می‌دهد. با توجه به شکل در انتهای زلزله شکل تونل از حالت دایره خارج شده و بیضی شکل شده است و بیشترین نشست‌های سطح خاک در بالای تونل اتفاق



شکل (۲۱): جابه‌جایی نقاط مختلف مدل، کانتور تنش مؤثر، دیاگرام توزیع لنگر خمشی و نیروی محوری در محل پوشش تونل در انتهای زلزله کوبه.

اما مقادیر باقیمانده کوچک‌تر برای نیروی محوری دینامیکی در پوشش تونل پس از هر زلزله ایجاد شد.

مراجع

1. Hashash, Y.M.A., Hook, J.J., Schmidt, B. and Yao, J.I.-C. (2001) Seismic design and analysis of underground structures. *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, **16**, 247-293.
2. Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K. (1996) Liquefaction induced ground displacement and its related damage to lifeline facilities, *Journal of Soils Foundations*, **36**, 81-97.
3. Koseki, J., Matsuo, O., Ninomiya, Y., and Yoshida, T. (1997) Uplift of Sewer manholes during the 1993 Kushiro-oki earthquake. *Journal of Soils Foundations*, **37**, 109-121.
4. O'Rourke, T.D., Stewart, H.E., Gowdy, T.E., and Pease, J.W. (1991) Lifeline and geotechnical aspects of the 1989 Loma Prieta Earthquake. *Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamic*, University of Missouri-Rolla, Rolla, US, 1601-1612.
5. Wang, L.R.L., Shim, J.S., Ishibashi, I. and Wang, Y. (1990) Dynamic responses of buried pipelines during a liquefaction process. *Journal of Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **9**, 44-50.
6. Ling, H.I., Mohri, Y., Kawabati, T., Liu, H., Burke, C., and Sun, L. (2003) Centrifugal modeling of seismic behavior of large-diameter pipe in liquefiable soil, *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, ASCE, **129**, 1092-1101.
7. Schmidt, B. and Hashash, Y.S.T. (1998) US immersed tube retrofit. *Tunnels & Tunneling International*, **30**(11), 22-24.
8. Chou, H.S., Yang, C.Y., Hsieh, B., and Chang, S.S. (2001) A study of liquefaction related damages on shield tunnels. *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*,

فاصله از دورترین تار فشاری مرکز میلگرد کششی طولی و a عمق بلوک تنش مستطیلی معادل می‌باشد. با در نظر گرفتن مشخصات مقطع پوشش تونل، ممان ترک خوردگی برابر با 80 کیلونیوتن-متر و ممان ضریب دار برابر با $129/9$ کیلونیوتن-متر می‌باشد؛ بنابراین پوشش تونل مترو تبریز ممکن است آسیب‌های جدی در طی زلزله‌های مورد مطالعه دریافت کند.

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک سری تحلیل‌های عددی برای ارزیابی اثرات شتاب ماکزیمم و فرکانس غالب زلزله با در نظر گرفتن سایر مشخصات زلزله، روی رفتار لرزه‌ای تونل خط ۲ مترو تبریز انجام شده است. بر اساس نتایج این مطالعه عددی، نتیجه‌گیری زیر به دست می‌آید:

- مدل UBCHYST می‌تواند برای مدلسازی پاسخ تنش- کرنش غیرخطی و غیر الاستیک خاک به طور مستقیم در تحلیل‌های دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد.

- نتایج تحلیل‌ها با فرکانس غالب ثابت و PGAهای مختلف نشان می‌دهد که وقتی دامنه ماکزیمم زلزله افزایش می‌یابد، نشست سطحی خاک نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

- مطابق با نتایج به دست آمده، افزایش در PGA، افزایش جابه‌جایی و چگالی انرژی زلزله منجر به افزایش فشار آب حفره‌ای و کاهش تنش مؤثر در خاک می‌گردد.

- بر اساس نتایج تحلیل‌ها، نیروی محوری و لنگر خمشی دینامیکی با افزایش شتاب ماکزیمم زمین و افزایش جابه‌جایی افزایش می‌یابد ولی با فرض ثابت بودن شتاب ماکزیمم، کاهش فرکانس غالب زلزله تنها عامل مؤثر بر افزایش نیروهای داخلی پوشش تونل نیست بلکه سایر پارامترهای زلزله از جمله ماکزیمم جابه‌جایی و انرژی زلزله نیز تأثیر دارد.

- مطابق با نتایج محاسبه شده، مقادیر ماکزیمم برای لنگر خمشی دینامیکی در نزدیکی تاج و شانه‌های تونل به دست آمد.

مقادیر باقیمانده بزرگ برای لنگر خمشی دینامیکی پس از هر زلزله به دلیل کرنش‌های تجمعی در طی زلزله به دست آمد

18. Alielahi, H. and Adampira, M. (2016) Effect of twin-parallel tunnels on seismic ground response due to vertically in-plane waves. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **85**, 67-83.
19. Tsinidis, G., Pitilakis, K., and Madabhushi, G. (2016) On the dynamic response of square tunnels in sand. *Engineering Structures*, **125**, 419-437.
20. Katebi, H., Rezaei, A.H., Hajjalilue-Bonab, M. and Tarifard, A. (2015) Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM). *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology*, **49**, 67-78.
21. Naesgaard, E., Byrne, P.M., and Amini, A. (2015) Manual of Hysteretic Model for Non-Liquefiable Soils (UBCHYST5d).
22. Report of Geophysical and Geotechnical Investigations for Tabriz Urban Railway Line 2 Project (2009) Tabriz Urban Railway Organization (in Persian).
23. Itasca Consulting Group, Inc. (2012) *FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua, version 7.0*, Minneapolis, Minnesota, US.
24. Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. and Xu, S. (2007) Mechanized Tunnelling in Urban Areas: Design methodology and construction control. *Taylor & Francis Group*, London, UK.
25. Koyama, Y. (2003) Present status and technology of shield tunneling method in Japan. *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology*, **18**, 145-159.
26. Geraili Mikola, R. (2012) *Seismic Earth Pressures on Retaining Structures and Basement Walls in Cohesionless Soils*, PhD Thesis, University of California, Berkeley, US.
27. Itasca Consulting Group (2012) *FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua. User's Manual Version 7.0*, Minneapolis, US, 2012.
28. Darendeli, M.B. (2001) *Development of a New* **16**, 185-193.
9. Ohshima, Y. and Watanabe, H. (1994) An elasto-plastic dynamic response analysis of underground structure-soil composite based upon the 3-D finite element method. *Journal of Structural Eng./Earthquake Eng.*, **11**(2), 103s-114s.
10. Stamos, A.A. and Beskos, D.E. (1995) Dynamic analysis of large 3-D underground structures by the bem. *Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **24**, 917-934.
11. Pakbaz, M. and Yarvand, A. (2005) 2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **20**, 411-417.
12. Sedarat, H., Kozak, A., Hashash, Y., Shamsabadi, A., and Krimotat, A. (2009) Contact interface in seismic analysis of circular tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**, 482-490.
13. Lanzano, G., Bilotta, E., Russo, G., Silvestri, F. and Madabhushi, S.P.G. (2012) Centrifuge modelling of seismic loading on tunnels in sand. *Geotechnical Testing Journal*, **35**(6), 854-869.
14. Abdel-Motaal, M.A., El-Nahhas, F.M., and Khiry, A.T. (2014) Mutual seismic interaction between tunnels and the surrounding granular soil, *HBRC Journal*, **10**, 265-278.
15. Baziar, M.H., Rabeti Moghadam, M., Kim, D.S., and Wook Choo, Y. (2014) Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration. *Journal of Tunnelling and Underground Space Technology*, **44**, 10-22.
16. Alielahi, H., Kamalian, M., and Adampira, M. (2015) Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **71**, 63-79.
17. Alielahi, H. and Adampira, M. (2016) Site-specific response spectra for seismic motions in half-plane with shallow cavities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **80**, 163-167.

Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves, PhD Thesis, the University of Texas at Austin, US.

29. Naesgaard, E. (2011) *A Hybrid Effective Stress–Total Stress Procedure for Analyzing Soil Embankments Subjected To Potential Liquefaction and Flow*. PhD Thesis, University of British Columbia, Canada.
30. Callisto, L., Rampello, S., and Viggiani, G.M. (2013) Soil–structure interaction for the seismic design of the Messina Strait bridge. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **52**, 103-115.
31. Jones, K.C. (2013) *Dynamic Soil-Structure-Soil-Interaction Analysis of Structures in Dense Urban Environments*. PhD Thesis, University of California, Berkeley, US.
32. ACI (2015) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318M-14*. American Concrete Institute (ACI) Committee 318.