

طیف‌های شتاب طرح لرزه‌ای سطح زمین تحت اثر تونل‌های مترو شهری با مقطع دایروی در خاک‌های آبرفتی

رضا وهدانی^{۱*}؛ حامد فخریه^۲؛ محسن گرامی^۳

۱- استادیار؛ گروه مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
 ۲- دانشجوی دکتری؛ گروه مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
 ۳- دانشیار؛ گروه مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۷/۱۶؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶
 شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2019.6297.1326

واژگان کلیدی	چکیده
شتاب افقی ماکزیمم سطح زمین طیف شتاب اثر تونل روش المان محدود	<p>متروهای شهری که با کمک ماشین‌های حفر تونل (TBM) با مقطع دایره‌ای ایجاد می‌گردند، کاربرد زیادی در زمینه حمل‌ونقل دارند. سازه‌های مدفون بسته به شکل هندسی، عمق دفن و پارامترهای مختلف ژئوتکنیکی و لرزه‌ای رفتار متفاوتی از خود در هنگام وقوع زلزله نشان می‌دهند. وجود این سازه‌ها در زمین باعث تغییر در وضعیت حرکت‌های لرزه‌ای در سطح زمین خواهد شد. طراحی سازه‌های سطح زمین در حوزه دور از گسل، با شتاب افقی حداکثر زمین در آن منطقه مرتبط است. لذا در این مطالعه سعی شد با تغییر در عمق جایگذاری، ضخامت پوشش تونل و همچنین تغییر در مشخصات خاک، فرکانس مجموعه خاک و تونل را تغییر داد و شتاب افقی ماکزیمم سطح زمین در حضور تونل را برای خاک نوع ۴ بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران محاسبه کرد. در نهایت رابطه‌ای بین شتاب ماکزیمم افقی سطح زمین و فرکانس مجموعه خاک و تونل منجر به تولید مؤلفه افقی طیف شتاب خواهد شد. نتایج نشان‌دهنده آن است که در اکثر نواحی بازه فرکانس مورد بررسی، شتاب‌های طیفی در مدل‌های بدون حضور تونل مقدار بیشتری را در مقایسه با مدل‌هایی که تونل در خاک مدفون‌اند، خواهد داشت. تقویت و عدم تقویت شتاب سطح زمین وابسته به پیوند توده خاک و تونل، مشخصات مدل مورد بررسی و وضعیت نقطه مورد بررسی در سطح زمین نسبت به تونل است. تغییرات شتاب طیفی با پیوند مدل‌های مورد بررسی در حالت عدم حضور تونل، به‌صورت تابع درجه سوم است. با استفاده از نرم‌افزار المان محدود <i>Plaxis 2D</i> و <i>Ansys</i>، مطالعه به‌صورت موردی به روی تونل متروی دهلی با مؤلفه‌های افقی زلزله‌های مشابه با خاک محل احداث انجام گرفت.</p>

۱- پیشگفتار

برای سازه‌های موجود یا پارامترهای حرکت ورودی زمین جهت طراحی بر اساس عملکرد مفید باشد. نیومارک و کوزل یک روش ساده‌شده برای محاسبه میدان آزاد زمین ناشی از انتشار موج هارمونیک در یک زاویه ورودی داده‌شده در یک محیط الاستیک، ایزوتروپیک پیشنهاد کردند (Newmark, 1968 and Kuesel, 1969). به‌طورمعمول زاویه برخوردی که باعث ایجاد بیشینه کرنش می‌شود، به‌عنوان معیار ایمنی در برابر عدم قطعیت از پیش‌بینی زلزله استفاده می‌شود. پائو و ماو، انکسار مؤلفه

اثر اندرکنش سینماتیکی ناشی از عدم توانایی سیستم سازه‌ای تونل در تطابق با تغییرشکل‌های حرکت میدان آزاد است. در میدان آزاد، حرکت زمین متأثر از حضور تونل نیست. اندرکنش سینماتیکی سبب حرکت پایه سازه، جدای از حرکت میدان آزاد می‌گردد. تعامل سینماتیکی می‌تواند پارامترهای حرکت ورودی زمین را تغییر دهد یا حالت‌های ارتعاشی اضافی را به سازه معرفی کند (Kramer, 1996). ارزیابی این اثرات می‌تواند برای برآورد خطر لرزه‌ای

* نویسنده مسئول - سمنان؛ روبروی پارک سوکان؛ دانشگاه سمنان؛ پردیس شماره ۱؛ دانشکده مهندسی عمران؛ گروه مهندسی زلزله؛ طبقه ۱
 اول؛ کدپستی: ۱۹۱۱۱-۳۵۱۳۱؛ شماره تلفن: ۰۲۳-۳۱۵۳۵۱۷۲؛ رایانامه: rvahdani@semnan.ac.ir

سازه زیرزمینی، خواهد داشت (Abuhajar, et al., 2011). سیکا و همکاران، تأثیر حفاری زیرزمینی بر تقویت حرکت زمین با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک را مطالعه کردند و کاهش تقویت حرکت زمین را به افزایش عمق جایگذاری حفاری نسبت دادند. همچنین مشخص گردید، افزایش فاصله بین حفاری‌ها تقویت کمتری ایجاد می‌کند (Sica, et al., 2012). بشارت و همکاران، تأثیر سازه‌های زیرزمینی بر حرکت میدان آزاد زمین در طی زلزله را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که حضور تونل موجب افزایش شتاب حداکثر زمین تا بیش از ۳۴ درصد می‌شود و این افزایش در خاک‌های سست بیشتر از خاک‌های سخت است (Besharat, et al., 2012). بشارت و همکاران، تغییر در پاسخ‌های سطح زمین تحت حرکت‌های لرزه‌ای ورودی متفاوت به دلیل حضور تونل را بررسی کردند. در این مطالعه با استفاده از مدل تفاضل محدود، حضور تونل طی حرکت لرزه‌ای و با لحاظ نمودن رفتار دینامیکی خاک، طبق مدل رفتاری موهر-کولمب و میرایی هیستریزس و با انجام تحلیل دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه مشخص شد که تأثیر تونل در فاصله بیشتر از چهل متر از محور تونل از بین می‌رود. همچنین در فرکانس‌های بالاتر، اثر تونل در فاصله دور از محور تونل به سمت پاسخ میدان آزاد می‌رود (Besharat, et al., 2014).

بازیار و همکاران، تأثیر تونل‌های جعبه‌ای را بر شتاب سطح زمین با مدل سانتریفیوژ و حل عددی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که حضور تونل باعث کاهش تقویت شتاب سطح زمین در پریودهای کوتاه و تقویت آن در پریودهای بلند می‌شود (Baziar, et al., 2014). سینگ و همکاران، بررسی لرزه‌ای تونل متروی دهلی با نرم‌افزار المان محدود Plaxis 2D تحت مؤلفه‌های افقی و قائم زلزله Uttarkashi با استفاده از میرایی رایلی انجام داده است و پاسخ‌های لرزه‌ای از قبیل تغییر مکان و شتاب تاج تونل و سطح زمین، نیروهای پوشش تونل را به دست آوردند و به این نتیجه رسیدند که نقطه متناظر تاج تونل در سطح زمین بیشترین تأثیر را از شتاب‌نگاشت افقی اعمال شده نسبت به سایر نقاط خواهد داشت (Singh, et al., 2016).

افقی موج الاستیک برشی (SH) و تمرکز تنش دینامیکی در نتیجه یک سیلندر دایره‌ای جایگذاری شده در فضای بی‌نهایت ایده‌آل را بررسی کردند (Pao & Mow, 1973). داتا و الاکیلی، انتشار امواج الاستیک در نتیجه یک حفاری سیلندری در محیط نیمه بی‌نهایت را بررسی نمودند (Datta & El-Akily, 1978). لی و ورکرز، انتشار میدان مؤلفه افقی موج برشی (SH) را در حضور حفاری یا تونل بررسی کردند (Lee & co-workers, 1979). دراوینسکی، جزئیاتی از انتشار امواج الاستیک با بی‌نظمی‌های زیرسطحی را ارائه کردند (Dravinski, 1983).

سختی نسبی تونل به زمین اطراف توسط نسبت‌های انعطاف‌پذیری و تراکم‌پذیری اندازه‌گیری می‌شود که به ترتیب سختی خمشی و سختی کششی محیط نسبت به پوشش هستند و روابط آنها توسط مریت و مونسیز ارائه شده است (Merritt & Monsees, 1985). اس تی جان و زاهرا، روش نیومارک را به منظور گسترش حل برای میدان آزاد محوری و کرنش‌های انحنای (خمیدگی) به علت فشار، برش و امواج رایلی استفاده کردند (St. John & Zahrah, 1987). پاور و همکاران، به مطالعه و ارزیابی شرایط کمی تغییرشکل‌های محوری و خمشی سازه تونل به‌عنوان تیر با یک بستر الاستیک پرداخته‌اند (power, et al., 1996). در این تحقیق با استفاده از تئوری تیر، کرنش‌های محوری میدان آزاد کل با ترکیب کرنش‌های تولیدشده توسط تغییر شکل‌های محوری و خمشی محاسبه شدند.

همچنین لی و همکاران، اثرات متقابل سطح و حفاری‌های زیرزمینی/ تونل‌ها و اثرات آنها بر حرکت سطح زمین را بررسی کردند (Lee, et al., 1999). ابوهاجر و همکاران، تأثیر سازه‌های زیرزمینی بر تشدید حرکت لرزه‌ای بر خاک‌های ماسه‌ای با چگالی متفاوت را با سه رکورد زلزله و مدل‌سازی آزمایشگاهی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که وجود سازه زیرزمینی باعث کاهش PGA با عمق، نسبت به حالت میدان آزاد می‌گردد. به‌گونه‌ای که با افزایش PGA در رکوردهای زلزله در بستر، مقدار کاهش PGA در عمق با وجود سازه‌های زیرزمینی، نسبت به میدان آزاد افزایش می‌یابد. همچنین نتیجه حاصل شد که تغییر چگالی ماسه مورد بررسی تأثیر کمی بر تشدید PGA در مدل‌های شامل

۲- تهیه طیف طرح شتاب سطح زمین ناشی

از حضور و عدم حضور تونل

با توجه به اینکه در حوزه دور از گسل مؤلفه افقی شتاب زلزله در طراحی سازه‌های سطح زمین اهمیت بیشتری دارد. لذا در این تحقیق به منظور دستیابی به طیف طرح شتاب با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی خاک و روابط کاربردی به تحلیل دینامیکی سازه تونل مترو پرداخته شده است. تحقیق مورد نظر برای تولید طیف شتاب افقی سطح زمین در حضور تونل به صورت مطالعه موردی به روی متروی دهلی انجام شد. رکوردهای زلزله‌های افقی متفاوت به تونل اعمال و ماکزیمم شتاب افقی سطح زمین در فاصله‌های مختلف برداشت می‌شود. با تغییر زلزله‌ها، اثرات زلزله‌های مختلف بر ماکزیمم شتاب افقی سطح زمین بررسی شده است. تغییر مشخصات تونل و خاک به منظور تغییر فرکانس آن، تغییر یافته است و روند فوق مجدداً تکرار می‌شود. این روند منتج به تولید طیف شتاب سطح زمین با میانگین‌گیری از مقادیر حداکثر شتاب‌های افقی می‌گردد. در نهایت طیف شتاب سطح زمین در حضور و عدم حضور تونل نمود پیدا می‌کند. جهت انجام مطالعه از دو نرم‌افزار *Plaxis 2D* و *ANSYS* استفاده شد. از *ANSYS* جهت تحلیل مودال و به دست آوردن فرکانس‌ها و شکل مدهای مجموعه خاک و تونل و از نرم‌افزار *Plaxis 2D* جهت تحلیل تاریخچه زمانی و به دست آوردن مقدارهای شتاب نقاط مختلف مدل از قبیل تصویر تاج تونل بر سطح زمین و همچنین فاصله‌های مختلف از تصویر تاج تونل بر سطح زمین استفاده شد.

۲-۱- مدل‌سازی عددی

پاسخ تاریخچه زمانی تونل به صورت رابطه (۱) است. که در آن $[M]$ ماتریس جرم و $[C]$ ماتریس میرایی و $[K]$ ماتریس سختی مدل، همچنین $\ddot{u}(t)$ بردار شتاب، $\dot{u}(t)$ بردار سرعت، $u(t)$ بردار تغییر مکان و $a(t)$ تاریخچه زمانی شتاب اعمال شده است.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -\{m\}.a(t) \quad (1)$$

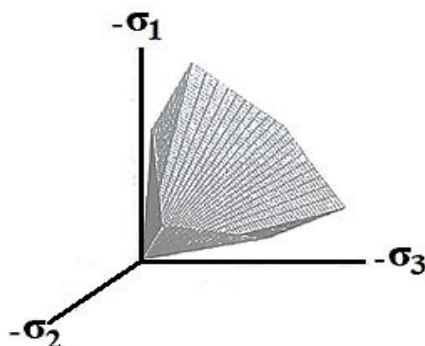
آنالیز المان محدود دینامیکی کرنش مسطح دوبعدی برای تونل مترو با محدوده مستطیلی انجام شد. ابعاد مدل در *Plaxis 2D* برابر با ۶۰ در ۱۴۰ متر در نظر گرفته شد. همچنین المان‌های مثلثی ۱۵ گرهی و مدل کرنش مسطح (*Plain Strain*) برای توده خاک لحاظ و پوشش تونل با

المان *plate* به صورت خطی مدل شد. تحلیل مودال برای محاسبه فرکانس مجموعه خاک و تونل با استفاده از نرم‌افزار *Ansys* با ابعاد مشابه در *Plaxis 2D* انجام گرفت. در *Ansys* از مدل دراگر-پراگر برای خصوصیات غیرخطی خاک و میرایی مستقل از فرکانس استفاده شد. با توجه به بررسی مطالعات و تحقیقات گذشته عموماً مدل رفتاری خاک مدل موهر-کولمب در *Plaxis 2D* مورد استفاده قرار گرفته است. به طور کلی در نرم‌افزار *Plaxis 2D* چندین مدل رفتاری خاک را می‌توان در نظر گرفت که مناسب‌ترین آن برای انجام تحلیل مورد نظر، مدل موهر-کولمب است. فرمول‌بندی مدل موهر-کولمب به شرح رابطه (۲) است. دو پارامتر مدل پلاستیک که در این توابع تسلیم وجود دارند پارامترهای شناخته شده c و φ هستند. ترسیم فضایی این توابع به صورت شکل ۱، خواهد بود.

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{2}|\sigma'_2 - \sigma'_3| + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \\ f_2 &= \frac{1}{2}|\sigma'_3 - \sigma'_1| + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \\ f_3 &= \frac{1}{2}|\sigma'_1 - \sigma'_2| + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi \leq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

هم‌چنین علاوه بر تابع تسلیم که در بالا ذکر شد، تابع پتانسیل پلاستیک زیر نیز برای مدل موهر-کولمب با روابط (۳) تعریف می‌شوند. این توابع شامل یک پارامتر دیگر پلاستیک، به عنوان ψ هستند. این پارامتر برای مدل کردن افزایش حجم‌های مشاهده شده در خاک‌های سخت استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} g_1 &= \frac{1}{2}|\sigma'_2 - \sigma'_3| + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \psi \\ g_2 &= \frac{1}{2}|\sigma'_3 - \sigma'_1| + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \psi \\ g_3 &= \frac{1}{2}|\sigma'_1 - \sigma'_2| + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \psi \end{aligned} \quad (3)$$



شکل ۱- سطح سیلان مدل موهر-کولمب در فضای تنش‌های اصلی

۲-۲- مشخصات خاک

تونل در خاک آبرفتی حفر شده و تغییرات مدول الاستیسیته خاک با عمق در جدول ۱، خلاصه شده است. وزن مخصوص و وزن مخصوص اشباع به ترتیب برابر ۱۸ و ۲۰ کیلونیوتن بر مترمکعب، سطح ایستایی وجود ندارد و ضریب چسبندگی (C) برای خاک برابر صفر است. همچنین زاویه اصطکاک (ϕ) و زاویه اتساع (ψ) به ترتیب برابر ۳۵ و ۵ درجه هستند. در *Plaxis 2D* برای نظر گرفتن اندرکنش بین تونل و خاک اطراف از R_{inter} استفاده می‌شود. این پارامتر مرتبط با مقاومت خاک به مقاومت فصل مشترک است که با رابطه (۴) نمایش داده شده است.

$$G_{inter} = R_{inter} \cdot C_{soil} \quad (4)$$

$$\tan(\phi)_{interface} = R_{inter} \cdot \tan(\phi)_{soil}$$

با استفاده از مقدار وارد شده R_{inter} ، زاویه اصطکاک و چسبندگی فصل مشترک در مقایسه با زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک مجاور کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، اندازه R_{inter} باید کمتر از یک باشد. مقدار R_{inter} در این مطالعه ۰/۶۷ در نظر گرفته شد.

جدول ۱- تغییرات مدول الاستیسیته خاک متروی هند با عمق (Singh, et al., 2016)

مدول الاستیسیته (kpa)	ضخامت (m)	عمق (m)
۷۵۰۰	۱۰	۰-۱۰
۱۵۰۰۰	۱۰	۱۰-۲۰
۳۰۰۰۰	۱۵	۲۰-۳۵
۴۰۰۰۰	۱۵	۳۵-۵۰
۵۰۰۰۰	۱۰	۵۰-۶۰

۲-۳- مشخصات تونل

با مطالعه تحقیقات گذشته تقریباً در تمام آنها رفتار پوشش تونل به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است. قطر تونل در مدل اصلی متروی دهلی ۶/۲۶ متر و عمق روباره ۱۶/۸۷ متر است. بتن مسلح با ضخامت ۰/۲۸ متر و مدول الاستیسیته (Ec) برابر با $3/16 \times 10^7$ کیلوپاسکال و ضریب پواسون (U) برابر ۰/۱۵ برای پوشش تونل استفاده شده است.

۲-۴- انواع مدل‌ها

برای ایجاد فرکانس و شکل مودها جهت انجام مطالعه، مدل‌های مختلفی برای مشخصات اصلی خاک، شامل مدل

واقعی متروی دهلی، ۱/۲۵ و ۱/۵ برابر مدول الاستیسیته، همچنین ۱/۷۵ و ۲ برابر مدول الاستیسیته و در نهایت ۲/۲۵ و ۲/۵ برابر مدول الاستیسیته مدل خاک اصلی با قطرها و ضخامت‌های متفاوت تونل و عمق جایگذاری متفاوت تونل در نظر گرفته شده که در جدول ۲، خلاصه شده است.

۲-۵- بارگذاری زلزله

تحلیل‌های دینامیکی با ۹ رکورد زلزله متفاوت به مدل‌ها اعمال و انتخاب رکوردها از سایت *peer* انجام شد. مشخصات زلزله‌ها در جدول ۳، خلاصه شده و *PGA* تمامی زلزله‌ها به ۰/۳۵g مقیاس شده است. این روند با نرم‌افزار *SeismoSignal* انجام پذیرفته است. با توجه به اینکه تونل متروی دهلی در خاک آبرفتی حفر شده و با توجه به تقسیم‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران از نوع ۴ است، زلزله‌های انتخاب‌شده نیز همان‌گونه که در جدول ۳، مشخص است در خاک با سرعت موج برشی (*Vs*) کمتر از ۱۷۵m/s انتخاب شده‌اند؛ زیرا در آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران سرعت موج برشی (*Vs*) خاک نوع ۴ از ۱۷۵m/s کمتر است. در این مطالعه اثر زلزله‌های دور از گسل در نظر گرفته شد. در جدول ۳، معیار دوری و نزدیکی از گسل با *Rjb* برحسب کیلومتر مشخص شده است که این مقدار برای زلزله‌های دور از گسل، باید از ۲۰ کیلومتر بیشتر در نظر گرفته شود. همچنین تنها مؤلفه افقی رکوردهای مقیاس‌شده به مدل‌ها اعمال و از اثر مؤلفه‌های قائم در مطالعه صرف‌نظر شده است. پرپود غالب شتاب‌نگاشت‌های اعمالی با نرم‌افزار *SeismoSignal* محاسبه شد و به همراه مقدار *PGV*، زمان زلزله‌ها و *PGA* آنها قبل از مقیاس شدن که در شکل و مقدار طیف شتاب مؤثر هستند، در جدول ۴، ارائه گردیده است.

۲-۶- میرایی

در (*Plaxis 2D*) فرض می‌شود که میرایی با جرم و سختی سیستم رابطه دارد. پارامتر متداول استفاده شده نسبت میرایی (ξ) است. در روش المان محدود، میرایی رایلی یکی از اندازه‌گیری‌های مناسب است که اثرات میرایی را در ماتریس‌های سختی و جرم سیستم در نظر می‌گیرد. در مدل‌های کرنش صفحه‌ای مانند تونل‌ها در حالت دوبعدی و اعمال زلزله، میرایی رایلی برای به‌دست‌آوردن نتیجه‌های منطبق بر واقعیت لازم به نظر می‌رسد.

جدول ۲- مدل‌های در نظر گرفته شده در تحقیق نسبت به مدل اصلی

شماره مدل	مدول الاستیسیته خاک	عمق جایگذاری (متر)	ضخامت پوشش تونل (متر)	شعاع تونل (متر)
۱	مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۵	۳/۱۳
۲	مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۲۸	۳/۱۳
۳	مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۵	۶
۴	مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۷۵	۶
۵	مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۷۵	۶
۶	۱/۲۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۲۸	۳/۱۳
۷	۱/۲۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۲۸	۳/۱۳
۸	۱/۲۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۵	۶
۹	۱/۲۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۵	۶
۱۰	۱/۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۵	۳/۱۳
۱۱	۱/۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۲۸	۳/۱۳
۱۲	۱/۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۷۵	۶
۱۳	۱/۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۵	۶
۱۴	۱/۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۵	۶
۱۵	۱/۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۷۵	۶
۱۶	۱/۷۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۲۸	۳/۱۳
۱۷	۱/۷۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۲۸	۳/۱۳
۱۸	۱/۷۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۵	۶
۱۹	۱/۷۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۵	۶
۲۰	۲ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۵	۳/۱۳
۲۱	۲ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۲۸	۳/۱۳
۲۲	۲ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۷۵	۶
۲۳	۲ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۵	۶
۲۴	۲ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۵	۶
۲۵	۲ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۷۵	۶
۲۶	۲/۲۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۲۸	۳/۱۳
۲۷	۲/۲۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۲۸	۳/۱۳
۲۸	۲/۲۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۵	۶
۲۹	۲/۲۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۵	۶
۳۰	۲/۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۵	۳/۱۳
۳۱	۲/۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۲۸	۳/۱۳
۳۲	۲/۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۲۰	۰/۵	۶
۳۳	۲/۵ برابر مدل اصلی مترو دهلی	۱۰	۰/۵	۶

جدول ۳- مشخصات زلزله‌های در نظر گرفته شده برای تحلیل تاریخیچه زمانی تحقیق مشابه با خاک محل

شماره	Record Seq	بزرگا	شدت آریاس (m/s)	رویداد	سال وقوع	ایستگاه	Rjb (km)	Rrup (km)	Vs30 (m/s)
۱	۳۲۶	۶/۳۶	۰/۲	Coalinga-01	۱۹۸۳	Parkfield- Cholame 2WA	۴۳/۸۳	۴۴/۷۲	۱۷۳/۰۲
۲	۴۵۲	۶/۱۹	۰/۱	Morgan Hill	۱۹۸۴	Foster City - APEEL 1	۵۳/۸۹	۵۳/۸۹	۱۱۶/۳۵
۳	۷۳۲	۶/۹۳	۱/۳	Loma Prieta	۱۹۸۹	APEEL2 - Redwood City	۴۳/۰۶	۴۳/۲۳	۱۳۳/۱۱
۴	۱۸۴۳	۵	۰/۰	Yountville	۲۰۰۰	APEEL2 - Redwood City	۹۴/۱۸	۹۴/۵	۱۳۳/۱۱
۵	۳۶۹۷	۵/۲۷	۰/۰	Whittier Narrows-02	۱۹۸۷	Carson- Water St	۲۶/۱۴	۲۹/۰۹	۱۶۰/۵۸
۶	۳۸۲۸	۵	۰/۰	Yountville	۲۰۰۰	Treasure Island	۶۰/۲۹	۶۰/۷۹	۱۵۵/۱۱
۷	۷۵۹	۶/۹۳	۱/۸	Loma Prieta	۱۹۸۹	Foster City - APEEL 1	۴۳/۷۷	۴۳/۹۴	۱۱۶/۳۵
۸	۹۶۲	۶/۶۹	۰/۲	Northridge-01	۱۹۹۴	Carson - Water St	۴۵/۴۴	۴۹/۸۱	۱۶۰/۵۸
۹	۶۰۸	۵/۹۹	۰/۲	Whittier Narrows-01	۱۹۸۷	Carson - Water St	۲۶/۳	۳۰/۰۳	۱۶۰/۵۸

فرم کلی میرایی رایلی به صورت رابطه (۵) است:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[k] \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، M و K به ترتیب ماتریس‌های جرم و سختی و α و β ضرایب میرایی رایلی هستند. آلفای رایلی پارامتری است که اثر جرم در میرایی سیستم را تعیین می‌کند. در مقادیر بالاتر آلفا، بیشتر فرکانس‌های پایین مستهلک می‌شوند. بتای رایلی پارامتری است که اثر سختی در میرایی سیستم را تعیین می‌کند. در مقادیر بالاتر بتا، بیشتر فرکانس‌های بالا مستهلک می‌شوند. این ضرایب با رابطه (۶) تعیین می‌گردند:

$$\alpha = \frac{2\omega_n \cdot \omega_m (\xi_n \cdot \omega_m - \xi_m \cdot \omega_n)}{\omega_m^2 - \omega_n^2} \quad (۶)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_m \cdot \omega_m - \xi_n \cdot \omega_n)}{\omega_m^2 - \omega_n^2}$$

در رابطه (۶)، ξ نسبت میرایی و ω_m و ω_n فرکانس‌های طبیعی مجموعه برحسب rad/sec به ترتیب برای شکل مدهای n ام و m ام است. در مطالعه مورد بررسی، m و n به ترتیب ۱ و ۲ در نظر گرفته شد. با استفاده از نرم‌افزار *Ansys* مدها و فرکانس مجموعه خاک و تونل به دست آمده و با فرض میرایی ۵ درصد ضرایب آلفا و بتای رایلی به دست آمده و در *Plaxis 2D* استفاده شده است.

جدول ۴- مشخصات محاسبه شده توسط *SeismoSignal* برای رکوردهای شتاب‌نگاشت اعمالی به مدل‌ها

شماره	PGA (g)	PGV (Cm/s)	پریود غالب (ثانیه)	مدت زمان (ثانیه)
۱	۰/۱۰۹۷	۱۱/۵۹۸	۰/۴۴	۵۹/۹۸
۲	۰/۰۴۲۹۵	۳/۷۲۵	۰/۳	۰/۳
۳	۰/۲۷۴۴	۵۳/۶۵۲	۱/۰۶	۳۵/۹۶
۴	۰/۰۰۷۹۶	۰/۷۷۹۷	۰/۴۶	۴۷/۹۹۵
۵	۰/۰۴۷۵	۵/۰۰۷	۰/۷	۲۲/۶۵
۶	۰/۰۰۸۹۷	۰/۴۷۵۲	۰/۱۴	۵۹/۹۹
۷	۰/۲۵۷۶	۳۱/۹۳۵	۰/۵	۵۹/۹۹
۸	۰/۰۹۱۴۵	۶/۳۳۲	۰/۳	۳۹/۹۸
۹	۰/۱۱۰۱۵	۸/۸۸	۰/۳	۲۹/۶۵

۲-۷- شرایط مرزی

برای تحلیل استاتیکی، گره‌ها در امتداد مرزهای قائم مش‌المان محدود در جهت x مقید شدند و در جهت y برای حرکت آزاد هستند. در مرزهای پایین در هر دو جهت x و y گره‌ها مقید شدند. این عمل در *Plaxis 2D* با استفاده از گزینه *standard fixities* انجام می‌گیرد. برای آنالیز دینامیکی مرزهای جاذب ویسکوز استفاده شد که شرایط تغییرمکانی در هر دو امتداد مرزهای عمود بر هم استفاده می‌کند. این عمل در *Plaxis 2D* با استفاده از گزینه *standard earthquake boundaries* انجام می‌گیرد. مرزهای ویسکوز شامل میراگر و فنر (*dashpot*) متناظر با هر درجه آزادی در هر گره در امتداد مرزها هستند. نیروهای جانبی و برشی به‌وسیله یک میراگر در جهت x در رابطه (۷) ارائه شده‌اند:

$$F_t = C_2 \cdot A \cdot \rho \cdot V_s \cdot \dot{u}_y, F_n = C_1 \cdot A \cdot \rho \cdot V_p \cdot \dot{u}_x \quad (7)$$

در رابطه (۷)، ρ چگالی مصالح و V_p و V_s سرعت‌های موج فشاری و برشی و \dot{u}_x و \dot{u}_y سرعت‌های قائم و مماسی در امتداد مرز هستند. A نشان‌دهنده منطقه‌ای است که با یک گره مرتبط است. C_1 و C_2 ضریب‌های بهبود جذب موج بر مرزهای جاذب هستند. C_1 پراکندگی در جهت عمود بر مرز جاذب و C_2 در جهت مماس را اصلاح می‌کند. برای جذب کامل، مقدار C_1 و C_2 واحد در نظر گرفته می‌شود. از مطالعات گذشته که شامل آنالیزهای عددی و آزمایشگاهی است مشاهده شد که موج برشی به‌طور کامل جذب نمی‌شوند؛ بنابراین C_1 و C_2 به ترتیب ۱ و ۰/۲۵ در نظر گرفته شدند که مقدارهای پیش‌فرض *Plaxis 2D* نیز هستند.

۲-۸- مراحل تحلیل

در این تحقیق سه مرحله (فاز) آنالیز در نظر گرفته شد.

- اولین فاز، محاسبه پلاستیک و ساختار مرحله‌ای است. در این مرحله پوشش تونل فعال و خاک داخل تونل غیرفعال می‌شود.

- تنش‌های ایجادشده در زمین باعث منقبض شدن پوشش تونل شده است و این انقباض سبب ایجاد تغییر شکل پوشش تونل و تغییر حجم می‌شود. در فاز دوم مقدار حجم کم‌شده به‌وسیله اعمال انقباض به پوشش تونل

شبیه‌سازی شد. این انقباض در فاز محاسبه ساختار مرحله‌ای تعریف و انقباض ۲ درصد برای مرکز تونل اعمال شد. در فاز سوم، محاسبات دینامیکی انجام گرفت و زلزله مورد نظر در این مرحله و پس از یک سری محاسبات پلاستیک به مدل اعمال شد.

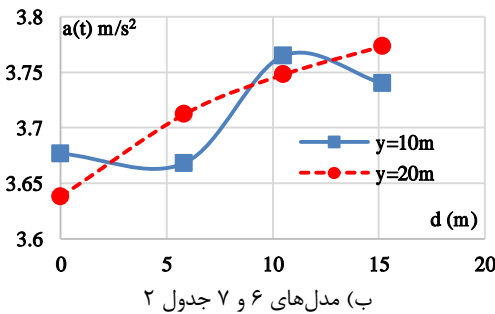
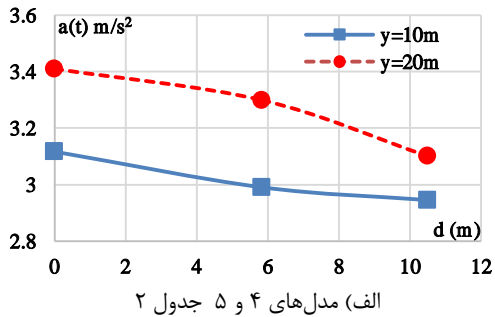
۲-۹- آنالیز حساسیت

با آنالیز مودال توسط نرم‌افزار *Ansys* مشخص گردید که فرکانس توده خاک و تونل بیشتر به مدول الاستیسیته مدول وابسته بوده و تغییر عمق جایگذاری تونل، قطر و ضخامت پوشش تونل با اختلاف زیاد نسبت به تغییر مدول الاستیسیته از عوامل دیگر می‌باشند. با آنالیز تاریخچه زمانی توسط نرم‌افزار *Plaxis 2D* مشخص گردید که تاریخچه شتاب نقاط کلیدی مدول، به پارامترهای مکانیکی خاک یعنی زاویه اصطکاک (ϕ)، ضریب چسبندگی (C)، زاویه اتساع (ψ) وابسته است. به‌گونه‌ای که با کاهش C و ϕ و ψ خاک، شتاب ماکزیمم نقاط کلیدی مدول افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه در آنالیزهای انجام‌شده چسبندگی طبق مدل اصلی برابر صفر ($C=0$) در نظر گرفته شده است لذا نتایج به‌دست آمده در جهت اطمینان است. در مدل اصلی زاویه اصطکاک برابر 35° ($\phi=35^\circ$) و زاویه اتساع برابر 5° ($\psi=5^\circ$) است. مشخص گردید با کاهش هم‌زمان آن‌ها به 30° $\phi=$ و 0° $\psi=$ نتایج دقت مناسبی داشته و با کاهش بیشتر از مقادیر یادشده، نتایج حاصل از تحقیق با دقت کمتری مواجه خواهد بود. در این مطالعه نسبت پواسون خاک (ν) برابر ۰/۲۵ در مدل اصلی است که با کاهش به میزان ۰/۲ نتایج دقت مناسبی خواهد داشت و برای مقادیر کمتر نتایج حاصل از تحقیق دقت مناسبی نخواهد داشت. همچنین نتایج حاصله به چگالی خاک مورد بررسی حساس بوده و برای چگالی کمتر از مقدار در نظر گرفته شده در مطالعه، از دقت کمتری برخوردار است.

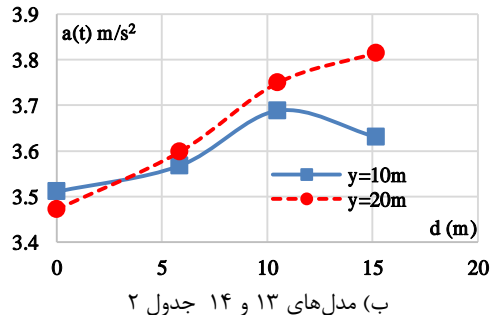
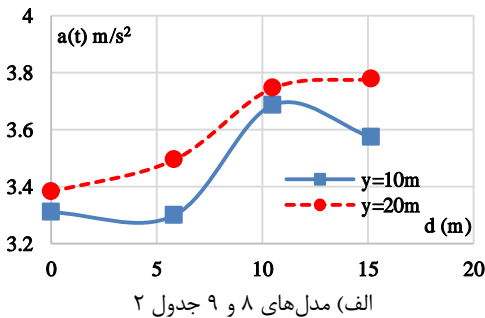
۲-۳- نتایج تحلیل مودال و تاریخچه زمانی

با استفاده از نرم‌افزار *Ansys* مقادیرهای فرکانس و پریود اصلی نوسان مدول و شکل مودهای ارتعاشی برای تمامی مدل‌های ذکرشده در جدول ۲، انجام شد که به‌عنوان نمونه، فرکانس و حالت ارتعاشی اول و دوم برای مدل اصلی متروی دهلی در شکل ۲، نمایش داده شده است. با استفاده

زمین بررسی شد. مشخص شد که برای قطر کمتر، شتاب اندازه‌گیری شده در فاصله‌های نزدیک به تصویر مرکز تونل در سطح زمین، بیشتر از قطرهای بزرگ‌تر است که بسته به نوع مدل‌ها حداکثر تا حدود ۱۳ درصد افزایش می‌یابد.

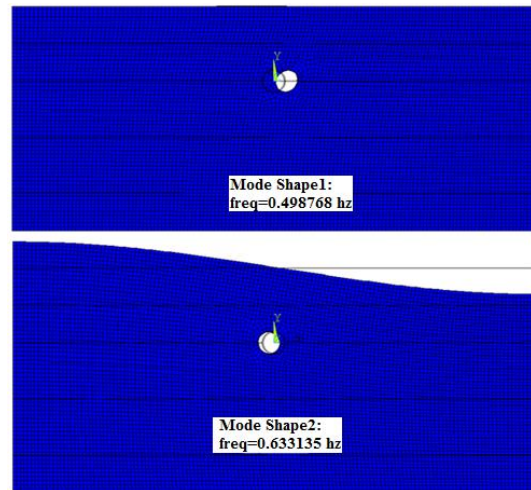


شکل ۳- تأثیر عمق جایگذاری تونل بر شتاب سطح زمین



شکل ۴- تأثیر عمق جایگذاری تونل بر شتاب سطح زمین

از رابطه (۵) مقدارهای α و β رایلی محاسبه گردیده و در نرم‌افزار *Plaxis 2D* به‌عنوان یکی از داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. به‌عنوان مثال در مدل اصلی متروی دهلی مقدارهای آلفا و بتای رایلی به ترتیب برابر با ۰/۱۷۵ و ۰/۱۴۱ محاسبه شد. با افزایش مدول الاستیسیته خاک در مدل‌ها، مقدار آلفای رایلی افزایش و مقدار بتای رایلی کاهش می‌یابد.



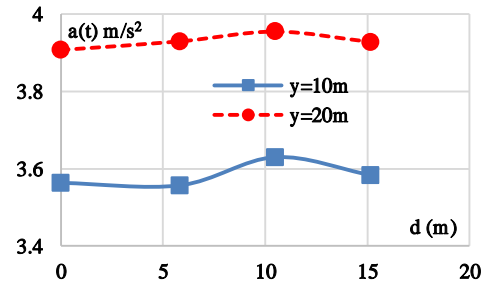
شکل ۲- فرکانس‌ها و مدهای ارتعاشی اول و دوم برای مدل اصلی متروی دهلی

در گام بعدی مدل‌سازی جهت تحلیل تاریخچه زمانی در *Plaxis 2D* انجام شد. با انجام تحلیل تاریخچه زمانی مشخص شد که با افزایش عمق جایگذاری تونل (y)، از ۱۰ به ۲۰ متر، شتاب سطح زمین در فاصله صفر و ۵/۸۳ و ۱۰/۵۰ متری از تصویر مرکز تونل روی سطح زمین افزایش می‌یابد. این افزایش برای برخی از مدل‌های جدول ۲ در شکل‌های ۳ تا ۷ نمایش داده شده است که البته با برخی از استثنائات همراه بوده و حداکثر کمی بیشتر از ۱۰٪ بسته به نوع مدل است. در شکل‌های یادشده، $a(t)$ میانگین ماکزیمم مقدار شتاب برداشت شده در نتیجه ۹ رکورد شتاب‌نگاشت اعمالی جدول ۳، در نقاط مذکور بر حسب متر بر مجذور ثانیه و d فاصله نقاط مذکور از تصویر مرکز تونل در سطح زمین بر حسب متر است. اثر افزایش شعاع تونل از ۳/۱۳ به ۶ متر، بر شتاب‌های ماکزیمم اندازه‌گیری شده در سطح زمین به فاصله صفر و ۵/۸۳ و ۱۰/۵۰ متری از تصویر مرکز تونل بر روی سطح

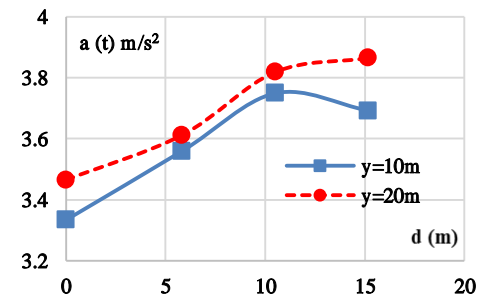
با فاصله از تصویر مرکز تونل در سطح زمین، اختلاف مقادیرهای شتاب سطح زمین به ازای قطرهای متفاوت تونل، کمتر شده به گونه‌ای که بعد از فاصله ۱۰/۵ متری از تصویر مرکز تونل بر سطح زمین این رابطه معکوس می‌شود. به عبارتی مقدار شتاب سطح زمین در تونل‌های با قطر بزرگ‌تر، بسته به مدل حداکثر تا ۵٪، مقدار بیشتری خواهد داشت.

این موضوع در نمودارهای ۸ و ۹ نمایش داده شده است. در این نمودارها، شعاع تونل r مقدار میانگین ماکزیمم شتاب اندازه‌گیری شده است؛ در نتیجه ۹ رکورد شتاب‌نگاشت اعمال شده در جدول ۳، در سطح زمین با واحد متر بر مجذور ثانیه محاسبه شده و d فاصله نقطه مورد بررسی از تصویر مرکز تونل بر روی سطح زمین است. عمق جایگذاری تونل برای تمامی مدل‌ها ۲۰ متر، ضخامت پوشش تونل ۰/۵ متر است.

در گام بعدی اثرات تغییر مدول الاستیسیته خاک بر شتاب برداشت‌شده در سطح زمین بررسی شد که در شکل ۱۰، نمایش داده شده است.

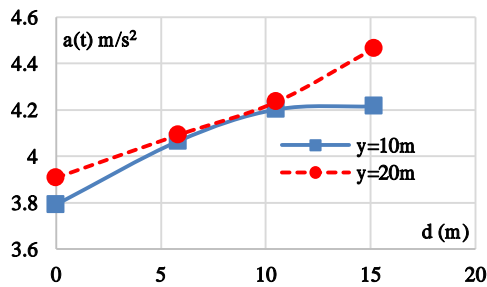


الف) مدل‌های ۱۶ و ۱۷ جدول ۲

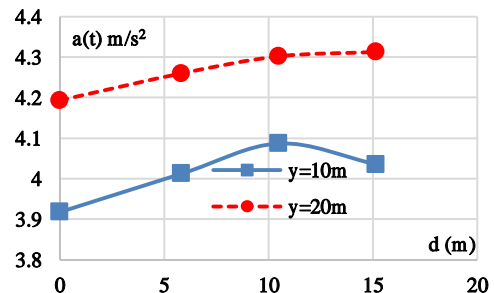


ب) مدل‌های ۱۸ و ۱۹ جدول ۲

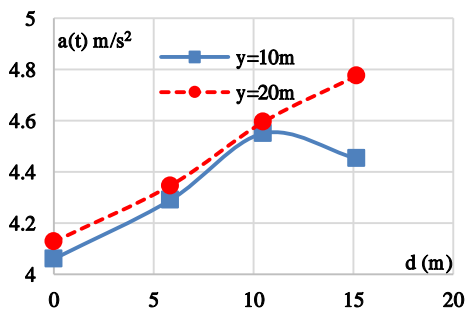
شکل ۵- تأثیر عمق جایگذاری تونل بر شتاب سطح زمین



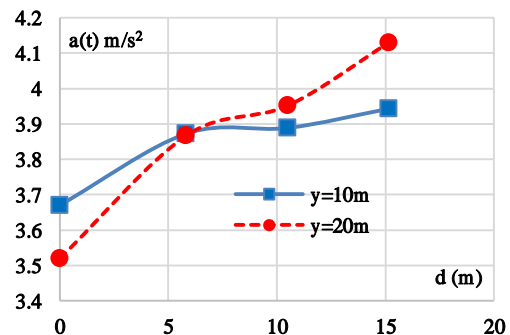
الف) مدل‌های ۲۸ و ۲۹ جدول ۲



الف) مدل‌های ۲۶ و ۲۷ جدول ۲



ب) مدل‌های ۳۲ و ۳۳ جدول ۲



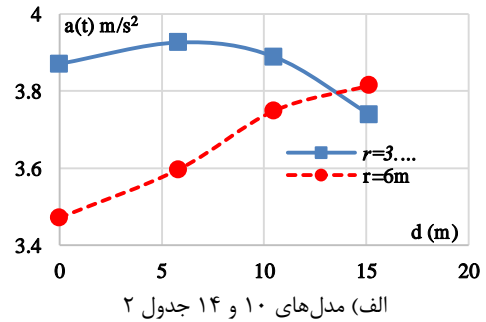
ب) مدل‌های ۲۳ و ۲۴ جدول ۲

شکل ۷- تأثیر عمق جایگذاری تونل بر شتاب سطح زمین

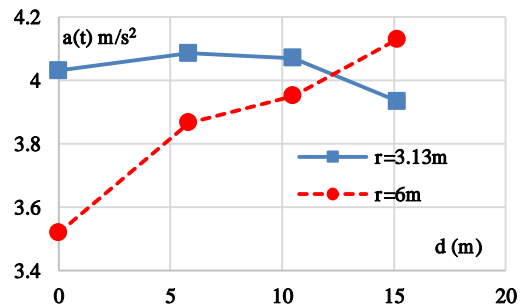
شکل ۶- تأثیر عمق جایگذاری تونل بر شتاب سطح زمین

در شکل ۱۰، E در محور افق تغییرات مدول الاستیسیته و $a(t)$ مقدار میانگین ماکزیمم شتاب‌های برداشت‌شده تصویر مرکز تونل بر روی سطح زمین است. به‌طور نمونه، دو مدل با شعاع تونل (r) و عمق جایگذاری تونل در خاک (y) و ضخامت پوشش تونل (t) متفاوت بررسی شد. همان‌گونه که از شکل ۱۰، مشخص است با افزایش مدول الاستیسیته خاک در بازه مورد بررسی، مقدار شتاب ماکزیمم سطح زمین، به‌صورت کلی افزایش می‌یابد. طیف شتاب در حضور تونل (که آن را SF می‌نامیم) برای نقاطی به فاصله صفر و $۵/۸۳$ و $۱۰/۵۰$ و $۱۵/۱۷$ متری از تصویر مرکز تونل بر سطح زمین در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ ارائه و با طیف ناشی از عدم حضور تونل یعنی میدان آزاد (که آن را FF می‌نامیم) مقایسه شده است.

شکل‌های ۱۱ تا ۱۴، برای مقادارهای میانگین (μ) و میانگین به‌علاوه انحراف معیار ($\mu+\sigma$) شتاب طیفی با واحد متر بر مجذور ثانیه در محور عمود و پیروید اصلی مدل‌های جدول ۲، برحسب ثانیه در محور افق رسم شده‌اند. همان‌گونه که از نمودارهای ۱۱ تا ۱۴ مشخص است، مقدار شتاب‌های طیفی در مدل‌های عدم حضور تونل (FF) به‌صورت کلی از شتاب‌های طیفی در مدل‌های با حضور تونل (SF) بیشتر بوده و تقریباً پوشش شتاب‌های طیفی در حضور تونل (SF) است. همچنین بر نمودار شتاب طیفی بدون حضور تونل (FF) بهترین منحنی برازش داده شده است که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ به همراه معادله منحنی و رگرسیون آن نمایش داده شده است. همان‌گونه که از نمودارهای یادشده مشاهده می‌شود، در بازه پیروید مورد بررسی، شتاب طیفی به‌صورت تابع درجه سه با پیروید تغییر می‌یابد. در شکل ۱۱ که شتاب سطح زمین درست روی تصویر مرکز تونل را ارائه می‌دهد، تقویت شتاب سطح زمین در دو نقطه قابل مشاهده است. نقطه اول مربوط به مدلی با تونل با شعاع ۶ متری، ضخامت پوشش تونل $۰/۷۵$ متری و عمق جایگذاری تونل ۲۰ متری و خاک با مدول الاستیسیته برابر با مدل اصلی متروی دهلی است. نقطه دیگر مدلی با خاک مدول الاستیسیته $۱/۲۵$ برابر نسبت به متروی دهلی و تونل با شعاع $۳/۱۳$ متری، ضخامت پوشش تونل $۰/۲۸$ متری و عمق جایگذاری تونل ده متری است. در شکل ۱۲ که شتاب سطح زمین در فاصله $۵/۸۳$ متری از تصویر مرکز تونل را

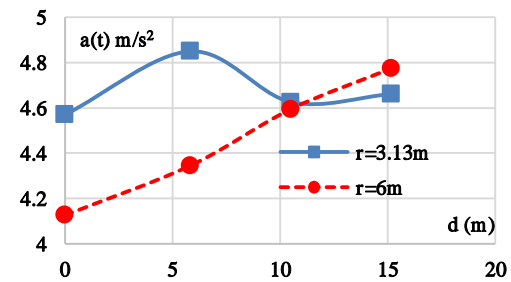


الف) مدل‌های ۱۰ و ۱۴ جدول ۲



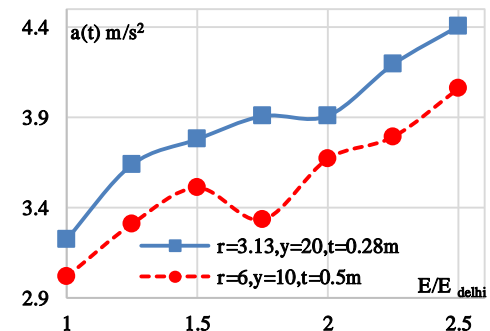
ب) مدل‌های ۲۰ و ۲۴ جدول ۲

شکل ۸- تأثیر شعاع تونل بر شتاب سطح زمین



شکل ۹- تأثیر شعاع تونل بر شتاب سطح زمین مدل‌های

۳۰ و ۳۲ جدول ۲



شکل ۱۰- تأثیر مدول الاستیسیته خاک بر شتاب سطح

زمین

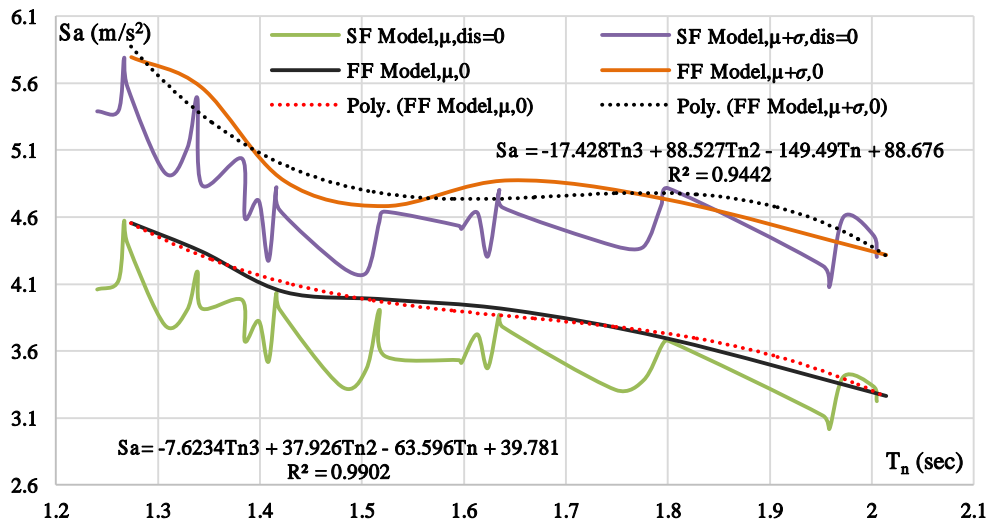
دارند که تقویت شتاب در آنها رخ داده است. در سه مدل شعاع تونل ۶ متر، ضخامت پوشش تونل ۰/۵ متر و عمق جایگذاری تونل ۲۰ متر و مدول الاستیسیته ۲/۲۵ و ۱/۲۵ و ۲ برابر نسبت به خاک متروی دهلی است. در دو نقطه دیگر شعاع تونل ۳/۱۳ متر، عمق جایگذاری تونل ۲۰ متر و ضخامت پوشش تونل ۰/۲۸ متر و خاک با مدول الاستیسیته برابر با متروی دهلی و ۲/۵ برابر آن است.

برای محاسبه پریود خاک برای جایگذاری در رابطه‌های پیشنهادی می‌توان از مدل‌های نرم‌افزاری و روابط تجربی و تحلیلی استفاده کرد. دوبری و همکاران، برای خاک‌های رسوبی پریود طبیعی غالب را مقدار $T = \frac{4h}{C_s}$ پیشنهاد دادند (Dobry, et al., 1976). در این رابطه h ضخامت لایه رسوبی و C_s سرعت موج برشی است. رابطه‌های پیشنهادی در این تحقیق، با فرض اندرکنش خاک و سازه و همچنین فرض پایه انعطاف‌پذیر برای سازه‌های سطح به‌دست آمده‌اند. لذا برای پریود سازه‌های سطح زمین می‌توان از پریود معادلی شامل اثرات خاک زیر سازه استفاده کرد. در (NIST) روابط متعددی برای پریود معادل سازه و خاک زیر آن ارائه شده است. در صورت نبود اطلاعات کافی می‌توان از طیف‌های شتاب بدون حضور تونل برای سازه‌های سطحی استفاده کرد که البته با توجه به نمودارها در بیشتر نقاط ضریب اطمینان بالایی دارد که اقتصادی نیست.

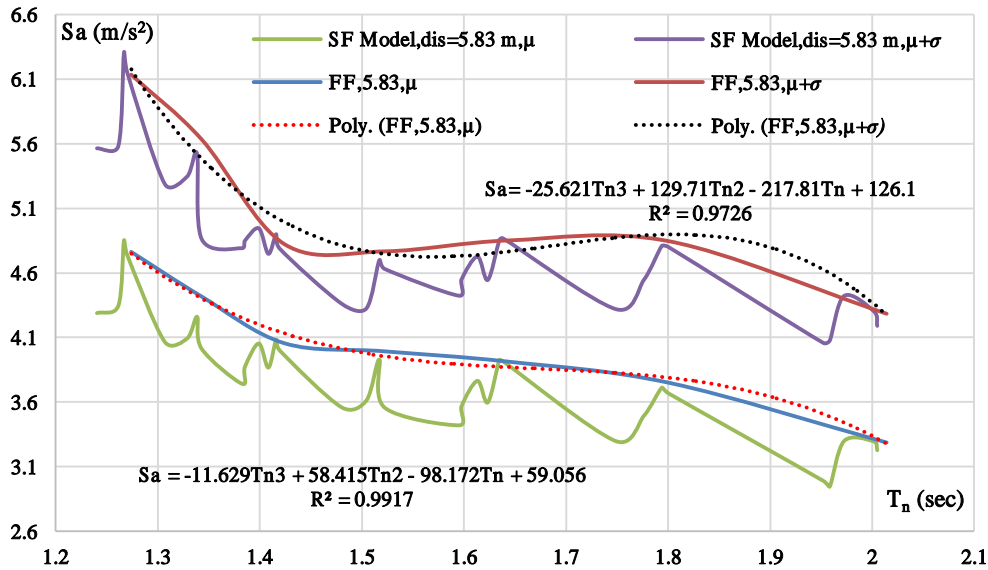
ارائه می‌دهد، سه نقطه مشاهده می‌شود که تقویت شتاب در آنها رخ داده است. نقطه اول مربوط به مدلی با تونل با شعاع ۶ متری، ضخامت پوشش تونل ۰/۷۵ متری و عمق جایگذاری تونل ۲۰ متری و خاک با مدول الاستیسیته برابر با مدل اصلی متروی دهلی است. دو نقطه دیگر مدل‌های با شعاع تونل ۳/۱۳ متری، عمق جایگذاری تونل ۲۰ متری و ضخامت پوشش تونل ۰/۵ متری ولی یکی با مدول الاستیسیته ۱/۵ برابر نسبت به خاک متروی دهلی و دیگری مدول الاستیسیته ۲/۵ برابر نسبت به خاک متروی دهلی است.

در شکل ۱۳ که شتاب سطح زمین در فاصله ۱۰/۵ متری از تصویر مرکز تونل را ارائه می‌دهد، چهار نقطه مشاهده می‌شود که تقویت شتاب در آنها رخ داده است. در دو مدل شعاع تونل ۳/۱۳ متری و ضخامت پوشش تونل ۰/۲۸ متری و عمق جایگذاری تونل ۱۰ متری ولی با مدول‌های الاستیسیته ۱/۲۵ و ۱/۷۵ برابر نسبت به خاک متروی دهلی هستند. دو مدل دیگر با شعاع تونل ۳/۱۳ متری، ضخامت پوشش تونل ۰/۲۸ متری ولی عمق جایگذاری تونل ۲۰ متری و مدول الاستیسیته ۲/۲۵ و ۱/۲۵ برابر نسبت به خاک متروی دهلی هستند.

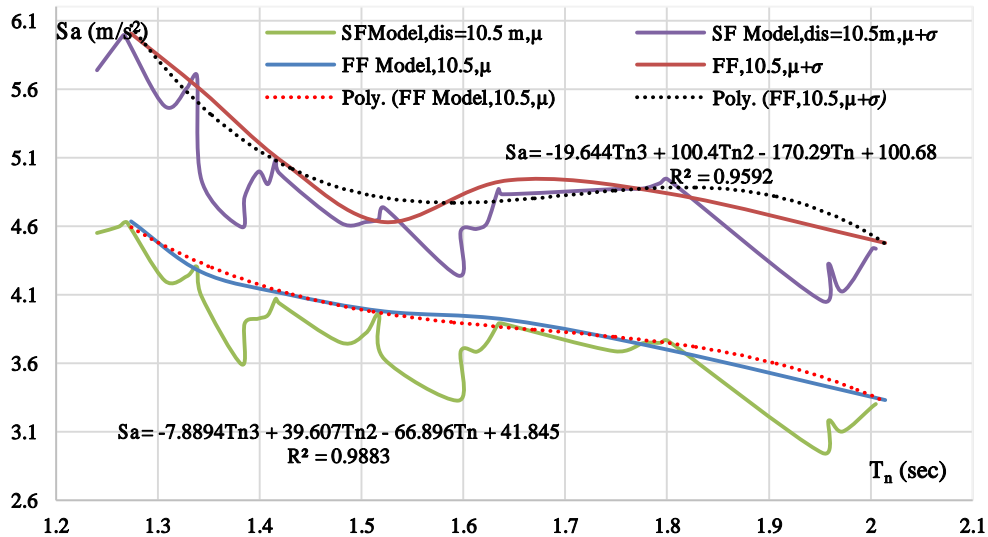
در شکل ۱۴ که شتاب سطح زمین در فاصله ۱۵/۱۷ متری از تصویر مرکز تونل را ارائه می‌دهد، پنج نقطه وجود



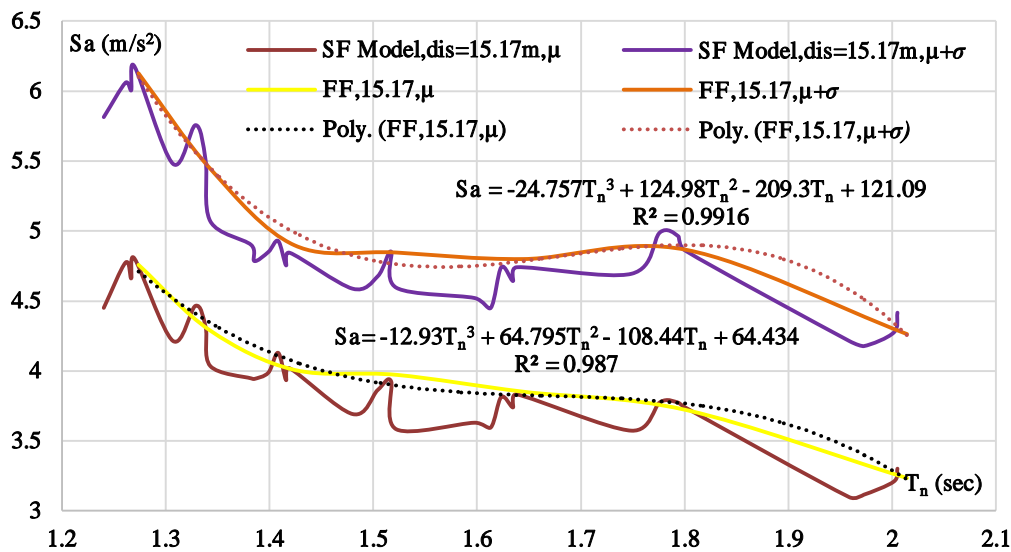
شکل ۱۱- شتاب‌های طیفی میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار برای مدل‌های با حضور تونل (SF) و بدون حضور تونل (FF) روی تصویر مرکز تونل در سطح زمین.



شکل ۱۲- شتاب‌های طیفی میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار برای مدل‌های با حضور تونل (SF) و بدون حضور تونل (FF) به فاصله ۵/۸۳ متری از تصویر مرکز تونل در سطح زمین.



شکل ۱۳- شتاب‌های طیفی میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار برای مدل‌های با حضور تونل (SF) و بدون حضور تونل (FF) به فاصله ۱۰/۵۰ متری از تصویر مرکز تونل در سطح زمین.



شکل ۱۴- شتاب‌های طیفی میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار برای مدل‌های با حضور تونل (SF) و بدون حضور تونل (FF) به فاصله ۱۵/۱۷ متری از تصویر مرکز تونل در سطح زمین.

مقدار شتاب‌های طیفی در حضور تونل (SF) در اکثر

نقاط از شتاب‌های طیفی در مدل‌های عدم حضور تونل (FF) کمتر است و منحنی شتاب‌های طیفی بدون حضور تونل، تقریباً پوش منحنی شتاب‌های طیفی در حضور تونل (SF) است. در بازه پریرود مورد بررسی شتاب طیفی بدون حضور تونل (FF) به صورت تابع درجه سه کاهش می‌یابد. در صورت نبودن اطلاعات کافی می‌توان از طیف‌های شتاب بدون حضور تونل برای سازه‌های سطحی استفاده کرد که در برخی نقاط، با ضریب اطمینان بالایی همراه است. جهت استفاده از روابط پیشنهادی، می‌توان از پریرود معادل برای سازه‌های سطحی که اثرات اندرکنش خاک و سازه شامل می‌شوند، بهره جست.

- تقویت شتاب ناشی از حضور تونل در سطح زمین،

بسیار وابسته به مدل مورد بررسی است. در بیشتر موارد (۱۱) مورد از ۱۴ مورد، تقویت شتاب سطح زمین، در عمق جایگذاری ۲۰ متری قابل مشاهده است. دلیل این موضوع را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که هرچه عمق جایگذاری تونل بیشتر شود، با توجه به اینکه امواج از پائین مدل انتشار می‌یابند زودتر به مانع تونل برخورد می‌کنند و دچار اغتشاش می‌شوند.

- در نصف مواردی که تقویت شتاب در سطح زمین

۴- نتیجه‌گیری

افزایش عمق جایگذاری تونل (Y)، از ۱۰ به ۲۰ متر، موجب افزایش شتاب سطح زمین در فاصله صفر و ۵/۸۳ و ۱۰/۵۰ متری از تصویر مرکز تونل روی سطح زمین می‌شود. این میزان افزایش حداکثر کمی بیشتر از ۱۰٪ بسته به نوع مدل، محاسبه شده است.

در مدل‌های با عمق جایگذاری تونل یکسان ۲۰ متر، ضخامت پوشش تونل ۰/۵ متر، افزایش شعاع تونل از ۳/۱۳ به ۶ متر، موجب کاهش شتاب‌های ماکزیمم اندازه‌گیری شده در سطح زمین در فواصل نزدیک به تصویر مرکز تونل بر سطح زمین، بسته به نوع مدل‌ها، حداکثر تا حدود ۱۳٪ می‌شود. با فاصله از تصویر مرکز تونل در سطح زمین، اختلاف مقدارهای شتاب سطح زمین به ازای قطرهای متفاوت تونل، کمتر شده به‌گونه‌ای که بعد از فاصله ۱۰/۵ متری از تصویر مرکز تونل بر سطح زمین این رابطه معکوس می‌شود. به عبارتی مقدار شتاب اندازه‌گیری شده در تونل‌های با قطر بزرگ‌تر، مقدار بیشتری، بسته به مدل حداکثر تا ۵٪ خواهد داشت.

افزایش مدول الاستیسیته خاک در بازه مورد بررسی، به‌طور کلی مقدار شتاب ماکزیمم سطح زمین را افزایش می‌دهد.

مشاهده شده، ضخامت پوشش تونل ۰/۲۸ متر است. - ۹ مورد از ۱۴ مورد تقویت شتاب سطح زمین، مربوط به تونل با شعاع کمتر (۳/۱۳ متر) است. - با دور شدن از تصویر مرکز تونل به روی سطح زمین تا فاصله ۱۵/۱۷ متری، تعداد نقاطی که تقویت شتاب سطح زمین در آنها رخ می‌دهد بیشتر است. به عبارتی وضعیت قرارگیری نقاط روی سطح زمین نسبت به تونل، نیز در تقویت یا عدم تقویت شتاب سطح زمین مؤثر است.

۵- سیاهه‌ی نمادها

در جدول ۵، فهرست نمادها آورده شده است.

جدول ۵- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
S_a	$\frac{m}{sec^2}$	شتاب طیفی
T_n	sec	پریود مجموعه خاک و تونل
d	m	فاصله از تصویر مرکز تونل در سطح زمین
ω_{n1}	rad/sec	فرکانس زاویه ای مود اول ارتعاشی توده خاک و تونل
ω_{n2}	rad/sec	فرکانس زاویه ای مود دوم ارتعاشی توده خاک و تونل
E_c	kPa	مدول الاستیسیته بتن مسلح پوشش تونل
PGV	m/sec	حداکثر سرعت زمین

۶- مراجع

- Abuhajar, O., El Naggar, H., Newson, T. (2011). *Effects of underground structures on amplification of seismic motion for sand with varying density. Geotechnical Conference, 2011 Pan-Am CGS.*
- ANSYS Multiphysics Simulation Software version 15. *Finite element code for mechanical engineering.* <http://www.ansys.com/>.
- Baziar, M.H., Rabeti Moghadam, M., Kim, Dong-Soo., Choo, Yun Wook. (2014). *Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration. J.Tunnelling and Underground Space Technology* 44: 10-22.
- Besharat, V., Davoodi, M., Jafari, M.K. (2012). *Effect of Underground Structures on Free-Field Ground Motion during Earthquakes. 15 WCEE, Lisboa.*
- Besharat, V., Davoodi, M., Jafari, M.K. (2014). *Variations in Ground Surface Responses Under Different Seismic Input Motions Due the Presence of a Tunnel. Arab J Sci Eng* 39:6927-6941.
- Datta, SK., El-Akily, N. (1978). *Diffraction of elastic waves by cylindrical cavity in a half-space. Journal of the Acoustical Society of America;* 64(6):1692-1978.
- Dobry, R., Oweis, I., Urzua, A. (1976). *Simplified procedures for estimating the fundamental period of a soil profile. Bull. Seismol.Soc. Am.* 66, 4. pp. 1293_1321.
- Dravinski, M. (1983). *Ground motion amplification due to elastic inclusions in a halfspace. Earthquake Engineering and Structural Dynamics;* 11(3):313-335.
- Kramer, S.(1996). *Geotechnical Earthquake Engineering.Isted. Prentice-Hall, Inc. Upper saddle River, NJ, USA.*

- Kuesel, T. R. (1969). *Earthquake Design Criteria for Subways*. *Journal of the Structural Divisions, ASCE*, Vol. 95, No. ST6, June.
- Lee, VW., Chen, S., Hsu, IR. (1999). *Antiplane diffraction from canyon above subsurface unlined tunnel*. *Journal of Engineering Mechanics*; 125(6):668–675.
- Lee, VW., Trifunac, MD. (1979). *Response of tunnels to incident SH-waves*. *Journal of the Engineering Mechanics Division (ASCE)*: 105(4):643–659.
- Merritt, J.L., Monsees, J.E., Hendron, A.J., Jr. (1985). *Seismic design of underground structures*. *Proceedings of the 1985 Rapid Excavation Tunneling Conference*, vol. 1, pp. 104_131.
- Newmark, N. M. (1968). *Problems in Wave Propagation in Soil and Rock*. *International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*.
- NIST. *National Institute of Standards and Technology. Soil-Structure Interaction for Building Structures*. September (2012).
- Owen, G. N., Scholl, R. E. (1981). *Earthquake Engineering of Large Underground Structures*, prepared for the Federal Highway Administration, FHWA/RD-80/195.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). *PEER Strong Motion Database*. Internet Website: <http://peer.berkeley.edu>
- Pao, HY., Mow, CC. (1973). *The Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations*. Crane-Russak: New York.
- Plaxis 2D version 8.5. *Finite element code for geotechnical engineering*. <http://www.plaxis.nl/>
- Power, M.S., Rosidi, D., Kaneshiro, J. (1996). *Vol. III Strawman: screening, evaluation, and retrofit design of tunnels*. Report raft. National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
- Sica, S., Rotili, F., Simonelli, A.L., Dello Russo, A. (2012). *The role of underground cavities on ground motion amplification*. 15 WCEE, Lisboa.
- Singh, M., Viladkar, M.N., Samadhiya, N.K. (2016). *Seismic Analysis of Delhi Metro Underground Tunnels*. *Indian Geotech J*.
- St. John, C. M., and Zahrah, T. F. (1987). *Aseismic Design of Underground Structures*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 2, No. 2.

Seismicity Acceleration Spectrum of Ground Surface under the Effects of Urban Metro Tunnels with Circular Cross Section in Alluvial Soils

R. Vahdani¹; H. Fakhriyeh²; M. Gerami³

1. Assistant professor; Faculty of Civil Engineering, Semnan University

2. Ph.D. student; Faculty of Civil Engineering, Semnan University

3. Associate professor; Faculty of Civil Engineering, Semnan University

Received: 8 Oct 2017; Accepted: 6 Jan 2019

DOI: 10.22044/TUSE.2019.6297.1326

Keywords

Acceleration spectrum

Tunnel effect

Horizontal acceleration

Finite element method

Ground surface

Extended Abstract

Summary

Urban subways in the ground would change its seismic movements. Designing ground surface structure in far filed is related to the horizontal component of acceleration at the ground surface in that area. Therefore, an attempt has been made in this study to change the frequency of soil-tunnel systems and to calculate the maximum horizontal acceleration of the ground surface due to tunnel presence through changing in tunnel placement depth, its diameter and its lining thickness as well as changing the soil properties. The maximum horizontal acceleration of the ground surface has been calculated in the presence of the tunnel for soil type 4 based on code 2800. The relationship between the maximum horizontal acceleration of the ground surface and the frequency of the soil-tunnel systems will result in the production of a horizontal acceleration spectrum. In the frequency range studied, spectral accelerations in models without a tunnel have mainly higher values compared to those models that have a tunnel buried in the soil. Amplification and deamplification of the ground surface acceleration is dependent on the period of soil-tunnel systems, the properties of the model under study and the position of the point studied at the ground surface.

Introduction

9 acceleration records of known influential earthquakes, 33 models (in presence of tunnel) and 7 models (in absence of tunnel) have been used in this study. Overall, about 360 nonlinear dynamic analyses have been carried out. These analyses have been made for multilayered soil while the nonlinear effects of the soil and its interaction with the surrounding structures have been considered.

Methodology and Approaches

This study has been conducted on a Delhi subway tunnel. ANSYS and Plaxis2D software packages have been used for the study. The ANSYS software has been used for modal analysis, obtaining the frequencies and mode shape of the soil-tunnel systems, while the Plaxis2D software has been used to analyze the time history and obtaining the acceleration values of key points of the model. Elasto-plastic Mohr-Coulomb model has also been used to model the soil.

Results and Conclusions

In most cases (11 out of 14 cases), amplification of ground acceleration is observed at a depth of 20 m. 9 of the 14 ground acceleration amplification are related to a tunnel with a smaller radius (3.13 m). Whatever the tunnel center image is taken away from the ground surface, we will have higher number of points in which acceleration amplification of the ground surface occurs.
