



ارزیابی اثرات حفر تونل بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین با استفاده از روش تفاضل محدود

محمد حسین خلج زاده، محمد آزادی*

گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۷ بهمن ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۱ اسفند ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۳ اسفند ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۰ فروردین ۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

تونل
پاسخ لرزه‌ای زمین
تفاضل محدود
تقویت امواج زلزله
FLAC 2D

چکیده: با افزایش روز افزون جمعیت شهری و ایجاد مشکلات ترافیکی، لزوم استفاده از فضاهای زیرزمینی در بخش حمل و نقل اجتناب‌ناپذیر است. تحقیقات اخیر نشان داده است که پاسخ لرزه‌ای سطح زمین بر روی تونل‌ها، می‌تواند از حرکت میدان آزاد در طول زلزله متفاوت باشد و باعث تغییر در پاسخ زمین و پی ساختمان‌ها شود. با اینحال تا کنون این تاثیرات در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای برای طراحی سازه‌های سطحی لحاظ نشده است. در این تحقیق به روش تفاضل محدود با استفاده از نرم افزار FLAC 2D بررسی اثرات حفر تونل بر روی تقویت امواج زلزله در سطح زمین پرداخته شده است. با مدل سازی‌های عددی صورت گرفته، تاثیر سرعت موج برشی خاک تحت امواج هارمونیک با فرکانس و دامنه‌های متفاوت در دو حالت با حضور تونل و میدان آزاد بررسی شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که سختی خاک و پوشش تونل و همچنین محتوای فرکانسی امواج، تاثیر بسزایی در پاسخ زمین می‌گذارد و می‌تواند حداکثر شتاب سطح زمین را در شرایط امواج هارمونیک تا حدود ۱/۳ و با اعمال شتابنگاشت زلزله بم تا ۱/۷ برابر افزایش دهد. اثر حضور تونل تا فاصله ۱۵ برابر شعاع آن بوده است و در فواصل بیشتر بی‌تاثیر می‌شود. ضرایب بدست آمده برای بزرگنمایی پاسخ زمین می‌تواند در پهنه بندی لرزه‌ای مناطق شهری و برای طراحی لرزه‌ای سازه‌های سطحی در محدوده تحت تاثیر تونل، مورد استفاده قرار گیرد.

۱- مقدمه

ابوهاجر^۱ و همکاران [۱] با استفاده از مجموعه‌ای از آزمون‌های سانتریفوژ به منظور بررسی اثر کانال‌های زیر زمینی به شکل قوطی یا جعبه در پاسخ شتاب خاک محیط اطراف آن‌ها صورت گرفت. اسمرزینی^۲ و همکاران [۲] به مطالعه تأثیر حفره‌های زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در اثر انتشار امواج SH با روش تحلیلی پرداختند. لی و همکاران [۳] رفتار لرزه‌ای پی نیم‌دایره‌ای دفن شده صلب در نزدیکی سطح زمین واقع در بالای یک تونل دایره‌ای پوشش‌دار را بررسی کردند. در این تحقیق از امواج صفحه‌ای SH در محیط‌های نیم‌فضای الاستیک، همگن و همسان و از مدل دو بعدی با روش تحلیلی استفاده شد. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که مقدار دامنه، تفرق و پراکنش ناشی از انعکاس امواج، به علت حبس شدن امواج در قسمت بالای تونل و زیر پی افزایش می‌یابد. در تحقیق انجام شده توسط تیسور و چانگ [۴] به بررسی تفرق امواج برون صفحه‌ای SH در اثر برخورد با مقطع تونلی شکل پرداخته شده‌است. بررسی‌های انجام شده در این مقاله، شامل نسبت عمق بی‌بعد حفره نسبت به سطح زمین (h/a)، تغییرات فرکانس بی بعد و زوایای مختلف تابش موج نسبت به افق، بوده است. سیکا و همکاران [۵] تأثیر حضور حفرات زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای در سطح زمین را برای

طراحی سازه‌های مقاوم در برابر خطر زمین لرزه‌های احتمالی آتی نیازمند برآورد دو پارامتر است: ۱- برآورد احتمال رویداد زمین لرزه‌ها و بزرگی آن‌ها در گستره موردنظر، ۲- محاسبه پاسخ سازه به این زمین لرزه‌های احتمالی. این مهم اغلب با استفاده از ضریب بزرگنمایی حداکثر شتاب سنگ بستر در سطح زمین صورت می‌گیرد. از طرفی امروزه با افزایش جمعیت، تسهیلات زیرزمینی از جمله تونل‌های زیرزمینی، تونل‌های و ایستگاه‌های مترو، پارکینگ‌های بزرگ و کانال‌های زیرزمینی همگی از زیر ساخت‌های مهم جوامع مدرن به حساب می‌آیند. ساخت تونل‌های زیرزمینی باعث ایجاد تغییرات استاتیکی و دینامیکی در سطح زمین می‌شود. با توجه به اهمیت موضوع محققین زیادی با روش‌های متفاوت همچون مدل‌سازی‌های فیزیکی، روش‌های عددی و تحلیلی به بررسی این موضوع پرداختند. با این حال، مطالعات مربوط به اثر سازه‌های زیرزمینی در پاسخ لرزه‌ای زمین هنوز محدود هستند. نخستین و کامل‌ترین مطالعه صورت گرفته به روش مدل‌سازی فیزیکی با هدف بررسی اثر حضور سازه زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین توسط

1 Abuhajar
2 Smerzini

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: azadi@qiau.ac.ir

۲- شرایط مدل سازی های عددی

مجموعه ای از مدل سازی های انجام شده برای ترسیم منحنی های پاسخ زمین تحت شرایط میدان آزاد و هم چنین با حضور تونل، انجام گردید که در این بخش به آن پرداخته می شود:

۲-۱- هندسه مدل

هندسه مدل و ابعاد مش بر اساس آنالیز حساسیت ابعاد حاصل شده است. ابعاد مدل شامل ۱۸۰ متر عرض و ۵۰ متر عمق بوده که مطابقت مناسبی با مدل سازی های صورت گرفته بشارت و همکاران [۱۸] و رستمی [۱۹] دارد و ابعاد مش بندی با استفاده از نتایج تحقیقات کولیمر و لایسمر^۴ [۲۰] بدست آمده است. بر اساس این مطالعات دو پارامتر فرکانس موج ورودی و سرعت موج برشی خاک بر دقت عددی شرایط انتقال موج تأثیرگذار شناخته شده است. این دو محقق حداکثر ابعاد المان را به رابطه ۱ و ۲ محدود کردند:

$$\Delta l < \lambda / 10 \quad (1)$$

در رابطه بالا لاندا طول موج برشی انتشار یافته در محیط است که با حداقل سرعت موج برشی در محیط (V_{smin}) و حداکثر فرکانس موج ورودی (f_{max}) به صورت زیر در ارتباط است:

$$\lambda_{min} = (V_{smin}) / f_{max} \quad (2)$$

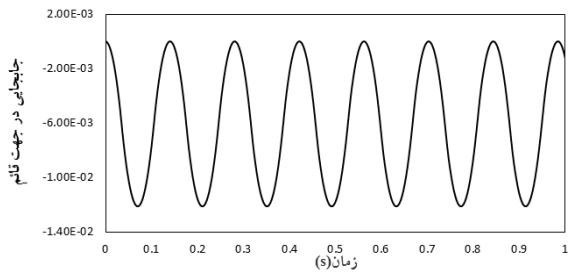
در نهایت از دو رابطه فوق، حداکثر ابعاد المان به منظور انتشار صحیح موج در محیط به رابطه زیر محدود می شود:

$$\Delta l \leq (V_{smin}) / (10 * f_{max}) \quad (3)$$

در تحقیق حاضر از خاک هایی با سرعت موج برشی متفاوت استفاده شده که حداقل مقدار آن ۱۷۵ m/s است. هم چنین از موج هارمونیک با فرکانس ۰/۲۵ هرتز تا ۱۰ هرتز و شتابنگاشت طبیعی زلزله بم با فرکانس حداکثر ۱۵ هرتز استفاده شده است. حداکثر ابعاد المان طبق رابطه ۲ و ۳ به ۱/۲ محدود گردیده که به منظور دقت بیشتر در تحلیل های صورت گرفته، از المان های چهار ضلعی کرنش مسطح با حداکثر ابعاد یک متر استفاده شده است. در قسمت تحتانی مدل از مرز ثابت و در مرزهای جانبی برای جلوگیری از انعکاس امواج ورودی به داخل محیط مرز آزاد اعمال شده است (شکل ۱ و ۲).

روستای کستل نوو^۱ به روش عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن ها از نرم افزار دو بعدی QUAD4 M بر پایه FEM استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان می دهد که وجود حفرات زیرزمینی، فاصله، تعداد و عمق آن ها، بزرگنمایی شتاب در سطح زمین را تحت تأثیر قرار می دهد و نمی توان از اثرات آن چشم پوشی نمود. علی الهی و همکاران [۶] و [۷] پاسخ لرزه ای یک محیط الاستیک خطی بدون میرایی مصالح (محیط سنگی با سرعت ۸۰۰ متر بر ثانیه) که در بردارنده تونلی بدون پوشش با هندسه های متفاوت است را در برابر امواج مهاجم P,SV مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور، آن ها از تحلیل عددی دو بعدی در حوزه زمان که بر مبنای روش المان مرزی (BEM) توسعه داده شده است استفاده نمودند. یوتامیترا [۸] یک سری از آنالیزهای FDM را برای اندازه گیری اثرات پارامترهای مختلف h/a ، x/a ، D/λ ، با استفاده از مدل عددی ویسکو الاستیک برای تونل های دایره ای با پوشش و بدون پوشش انجام داده است. در تحقیقی توسط اسگارلاتو و همکاران [۹] به ارزیابی پاسخ لرزه ای زمین در نزدیکی حفره های زیرزمینی با ثبت داده های محیطی و زلزله به عنوان مطالعه موردی ناحیه کاتانیا واقع در کشور ایتالیا، پرداخته شده است. لانزانو و همکاران [۱۰] اثر تونل دایره ای شکل را بر پاسخ زمین ارزیابی کرده اند. در این آزمایش ها اثر عمق تونل و دانسیته خاک ماسه ای مطالعه شدند. بازیار و همکاران [۱۱-۱۳] اثر تونل مترو به شکل قوطی و جعبه را بر پاسخ شتاب در سطح زمین با استفاده از آزمون های سانتریفوژ دینامیکی و شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار داده اند که غالباً بر ویژگی حرکت امواج ورودی متمرکز می شود. زوپنگ ژانگا [۱۴] به بررسی تأثیر نوع خاک در خرابی های بوجود آمده در پوشش تونل تاورایاما^۲ در زلزله کوماموتو^۳ که در سال ۲۰۱۶ رخ داده بود پرداختند. اومیت دیکمن و همکاران [۱۵] با بررسی ساختمان هایی در فاصله کمتر از ۱۱۰ متری از گسل و در ۳۴ رکورد زلزله، به مطالعه بزرگنمایی و تغییرات امواج زلزله پرداختند. جوتقانی و همکاران [۱۶] به ارزیابی اثرات ناشی از زلزله های نزدیک و دور از گسل بر اساس طیف های استاندارد ۲۸۰۰ ایران پرداختند و در تحقیق خود از شتابنگاشت زلزله بم استفاده کردند. رابطی مقدم و همکاران [۱۷] با استفاده از میز لرزه اثر تونل در بزرگنمایی امواج زلزله در سطح زمین را بررسی کردند. تمام روش های تحلیلی، عددی، آزمایشگاهی تأیید کردند که فضاها و سازه های زیرزمینی بر پاسخ سطح زمین تأثیر گذار بوده است. در مطالعه حاضر با استفاده از نرم افزار FLAC که بر اساس روش تفاضل محدود، به تحلیل مناسبی از مسائل ژئوتکنیکی و لرزه ای می پردازد، اثرات پارامترهای گوناگون نظیر سرعت موج برشی خاک، محتوای فرکانسی امواج ورودی، عمق تونل در الگو و روش تقویت در سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته اند و ضرایب بزرگنمایی شتاب حداکثر برای طراحی لرزه ای سازه های سطحی در پهنه لرزه خیزی با $g/0.35$ پیشنهاد شده است.

- 1 Castelnuovo
- 2 Catania
- 3 Tawarayama
- 4 Kumamoto

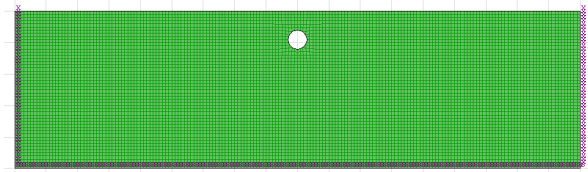


شکل ۲. تعداد نوسانات مدل در یک ثانیه تحت نیروی گرانش زمین در خاک تیپ II-I

Fig. 2. The number of oscillations of proposed model per second under earth's gravity force applied to the soil type I-II

استفاده می‌شود که عضو سازه‌ای شبیه‌سازی شده دارای مقاومت خمشی باشد. مصالح بتنی پوشش تونل با مدول الاستیسیته ۲۴ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ مدول‌سازی گردیده و در تمام مدل‌ها ضخامت پوشش تونل ۳۰ cm و قطر آن ۶ m لحاظ شده‌است.

فرکانس طبیعی سیستم برای مدل‌هایی در تیپ‌های متفاوت خاک با استفاده از رفتار الاستیک مصالح بدست آمده است. به گونه‌ای که مدل تحت نیروی گرانش خود تحلیل دینامیکی شده و در نمودار جایجایی قائم در برابر زمان، تعداد نوساناتی که مدل در یک ثانیه انجام می‌دهد به عنوان فرکانس طبیعی سیستم بدست آمده است. در شکل شماره ۲ نمونه‌ای از نمودار جایجایی در برابر زمان که در نقطه‌ای روی سطح مدل، برای خاک با سرعت موج برشی ۷۵۰ m/s بدست آمده، نشان داده شده‌است. با استفاده از همین روش فرکانس طبیعی در تمام خاک‌ها بدست آمده است (جدول ۲).



شکل ۱. نمونه مدل عددی تونل دایره ای و محیط پیرامون

Fig. 1. numerical modeling of circular tunnel and its surrounding

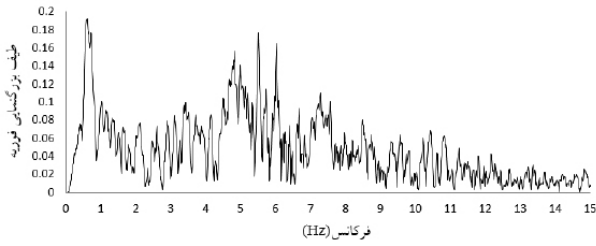
خصوصیات خاک‌ها بر اساس تیپ بندی موجود در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای مدل‌سازی شده و در جدول ۱ ارائه گردیده است. این طبقه بندی بر اساس سرعت موج برشی صورت گرفته است. تحلیل‌ها از مدل رفتاری موهر-کولمب که رفتار خاک را به صورت الاستو پلاستیک در نظر می‌گیرد پیروی می‌کنند. در مدل‌سازی‌ها پارامترهای چسبندگی و ضریب اصطکاک به ترتیب برابر ۱۵ و ۳۰ فرض شده‌است. برای بدست آوردن پارامترهای مدول برشی و مدول حجمی، به ترتیب از روابط $(G=\rho*VS^2)$ و $(B=E/3(1-2\nu))$ استفاده شده‌است.

برای مدل‌سازی پوشش تونل، از المان لاینر استفاده شده‌است. لاینر یک المان دو بعدی می‌باشد و در هر نقطه گره‌ای دارای سه درجه آزادی است که شامل جایجایی در جهت x، جایجایی در جهت y و دوران بوده که قادر به تحمل نیروهای محوری، خمشی و برشی بوده است. از این المان زمانی

جدول ۱. مشخصات فرض شده برای محیط خاکی

Table. 1. Properties of the soils

تیپ خاک	سرعت موج برشی خاک (m/s)	پواسون ν	وزن مخصوص γ (KPa)	مدول برشی G(MPa)	مدول حجمی B(MPa)
IV-III	۱۷۵	۰/۳۵	۱۶	۴۹	۱۴۷
III	۲۵۰	۰/۳۵	۱۶/۵	۱۰۳	۳۰۹
III-II	۳۷۵	۰/۳	۱۷	۲۳۹	۵۱۸
II	۵۰۰	۰/۳	۱۷/۵	۴۳۸	۹۴۸
II-I	۷۵۰	۰/۳	۱۷/۵	۹۸۴	۲۱۳۰



شکل ۴. طیف بزرگنمایی فوری زلزله بم

Fig. 4. Amplified Fourier spectrum for the Bam earthquake

جدول ۲. فرکانس‌های طبیعی سیستم در مدل‌سازی انواع خاک‌ها

Table. 2. The natural frequencies of the soils

فرکانس طبیعی مدل (Hz)	تیپ خاک
۱/۶۵	IV-III
۲/۵۲	III
۳/۵	III-II
۴/۶۲	II
۷	II-I

۳- تاثیر فرکانس موج ورودی بر بزرگنمایی شتاب و سرعت سطح زمین تحت اثر حضور تونل

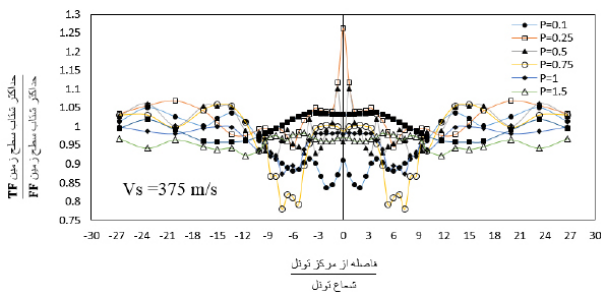
پس از انجام آنالیز حساسیت مدل مینا که برای دستیابی به ابعاد مناسب مش‌بندی و ابعاد کلی مدل انجام گردید، مطالعه پارامتری گسترده‌ای به منظور بررسی پارامترهای تاثیر گذار در بزرگنمایی شتاب و سرعت سطح انجام شده است. منظور از بزرگنمایی، افزایش شتاب سطح زمین بر اثر حضور تونل است. به این صورت که حداکثر شتاب سطح زمین در شرایط حضور تونل (Tunnel Field) نسبت به حداکثر شتاب سطح زمین در حالت بدون تونل (Free Field) محاسبه می‌گردد. برای این منظور دو تاریخچه شتاب برداشت شده از روی سطح زمین بر هم تقسیم شده است. اعداد بزرگتر از یک نشان دهنده بزرگنمایی و اعداد کوچکتر از یک معرف کوچکنمایی امواج روی سطح زمین هستند. در ادامه تحقیق از TF و FF به ترتیب برای حالت در حضور تونل و بدون حضور تونل نام برده میشود. ابتدا تاثیر پریود موج ورودی بررسی شده است بصورتی که امواج هارمونیک با پریودهای متفاوت تحلیل شده اند. در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب بزرگنمایی شتاب و سرعت سطح زمین در خاک با سرعت موج برشی ۳۷۵ متر بر ثانیه، تحت امواج هارمونیک با پریودهای متفاوت نشان داده شده است. تاثیر بزرگنمایی در فواصل بی بعد متفاوت از مرکز تونل X/a بدست آمده است. X فاصله از مرکز تونل، H فاصله سطح زمین تا تاج تونل و a شعاع تونل در نظر گرفته شده است.

۲-۲- تحریک‌های ورودی به مدل‌ها

برای اعمال تحریک‌های ورودی به مدل از امواج هارمونیک به صورت سینوسی با دامنه و فرکانس‌های متفاوت بصورت رابطه ۴ استفاده گردید.

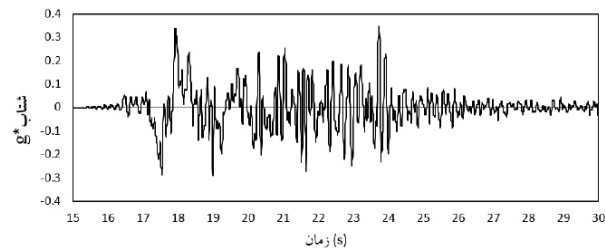
$$F=A(\sin(\omega*t)) \quad (4)$$

هم‌چنین برای دستیابی به نتایج واقع‌تر، از شتاب‌نگاشت زلزله بم استفاده شده است. این زلزله در سال ۲۰۰۳ میلادی در کشور ایران و شهر بم رخ داد. فاصله از گسل در این تاریخچه شتاب ۵۰ متر است که مطابقت مناسبی با عمق خاک در مدل‌سازی دارد. دامنه زلزله مذکور به $PGA = 0.35 g$ مقیاس و فرکانس‌های بالاتر از ۱۵ هرتز حذف شده است. در شکل ۳ تاریخچه زمانی اصلاح شده این زلزله نشان داده شده است. هم‌چنین در شکل ۴ طیف بزرگنمایی فوری آن رسم شده که نشان می‌دهد این زلزله دارای فرکانس غالب 0.61 هرتز است. بزرگنمایی فوری در این فرکانس برابر 0.192 و در فرکانس $5/5$ هرتز دارای بزرگنمایی فوری به اندازه 0.177 بوده است. با توجه به شتاب‌نگاشت و طیف بزرگنمایی فوری زلزله بم، ملاحظه می‌شود که دلیل داشتن پالس در ابتدای شتاب‌نگاشت و هم‌چنین فاصله آن از گسل که کمتر از ۱۰ کیلومتر است، میتوان نتیجه گرفت که شتاب‌نگاشت مذکور مربوط به حوزه نزدیک بوده و دارای فرکانس بالایی می‌باشد.



شکل ۵. بزرگنمایی شتاب حداکثر سطح زمین در خاک تیپ III-II (عمق تونل $h/a=2$)

Fig. 5. Amplification of the peak ground acceleration in soil type III-II (tunnel depth $h/a=2$)



شکل ۳. شتاب‌نگاشت زلزله بم همپایه شده به شتاب مبنای طرح

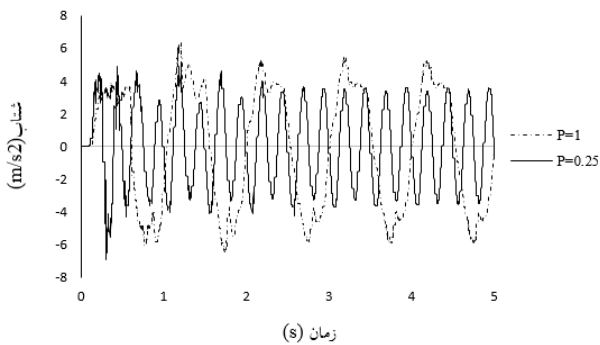
Fig. 3. Bam earthquake normalized acceleration record

جدول ۳. مشخصات زلزله بم

Table 3. Bam earthquake specifications

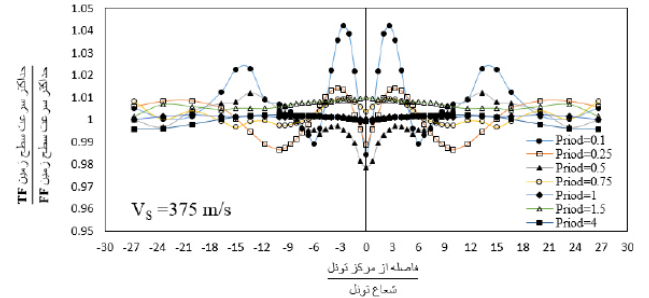
فرکانس‌های غالب (Hz)	پریود غالب (s)	بزرگنمایی فوریه	سال وقوع	فاصله از گسل (km)	Station Name
۵/۵ - ۰/۶۱	۱/۶۳۸	۰/۱۹۲	۲۰۰۳	۰/۰۵	"Bam"

نمایش داده شده است. حداکثر بزرگنمایی شتاب سطح زمین در مرکز تونل ($X/a=0$) و در فاصله دو برابر شعاع تونل ($X/a=2$) به ترتیب در خاک‌هایی با سرعت موج برشی ۳۷۵ و ۷۵۰ متر بر ثانیه و برابر با ۱/۲۵ و ۱/۱ می‌باشد. این بزرگنمایی‌ها در پریود موج ورودی (s) ۰/۲۵ رخ داده است و بیشترین کوچکنمایی در خاک با سرعت موج برشی ۳۷۵ متر بر ثانیه در کمترین مقدار پریود موج ورودی (s) ۰/۱ بدست آمده است. این کوچکنمایی‌ها در فواصل مرکز تونل و دو برابر شعاع تونل بر روی سطح زمین، به ترتیب برابر ۰/۹ و ۰/۸۴ مشاهده می‌شود. مطابق نتایج بدست آمده، مقدار بزرگنمایی‌ها در فواصل متفاوت به شدت تحت تاثیر پریود امواج ورودی هستند. در شکل شماره ۹ به همین صورت نتایج بزرگنمایی سرعت در فاصله $X/a=0$ و $X/a=2$ نشان داده شده است. بررسی نتایج حاکی از آن بوده که محل حداکثر بزرگنمایی‌های شتاب و سرعت در فواصل متغیری از مرکز تونل رخ داده است. علت این رخ داد، تفاوت در حداکثر مقدار تاریخچه سرعت و شتاب است. همچنین دامنه و محتوای فرکانسی امواج سرعت و شتاب که به سازه زیرزمینی برخورد می‌کند متفاوت می‌باشد.



شکل ۷. مقایسه تاریخچه شتاب روی سطح زمین در حضور تونل تحت بار هارمونیک با پریود $P=1$ و $P=0.25$

Fig. 7. Comparison ground acceleration record with TF model under harmonic load (Period $P=1$ and $p = 0.25$)



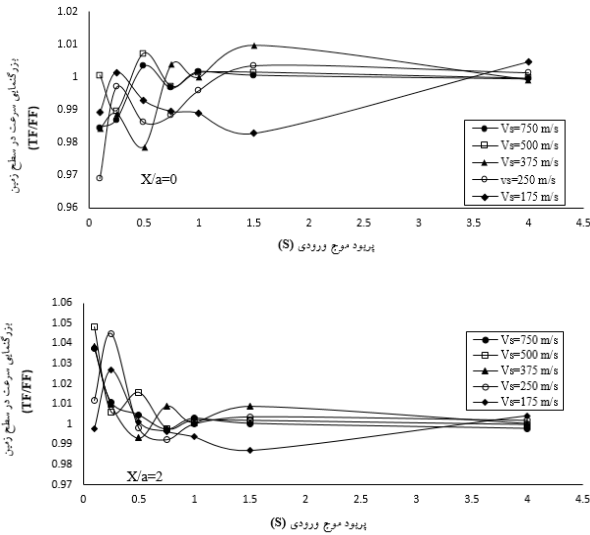
شکل ۶. بزرگنمایی سرعت حداکثر سطح زمین در خاک تیپ III-II (عمق تونل $h/a=2$)

Fig. 6. Amplification of the peak ground velocity in soil type III-II (tunnel depth $h/a=2$)

حداکثر بزرگنمایی شتاب در مرکز تونل و در پریود موج ورودی (s) $P=0.25$ به اندازه ۱/۲۷ بدست آمده و حداکثر فاصله تاثیر حضور تونل بر شتاب سطح زمین در این حالت $X/a=9$ بوده است. در پریودهای بزرگتر از یک به دلیل فاصله گرفتن از پریود تشدید، تاثیر حضور تونل ناچیز خواهد شد. در شکل شماره ۷ تاریخچه شتاب برای خاک با سرعت موج برشی ۳۷۵ متر بر ثانیه نشان داده شده است. مشاهده میشود که حداکثر شتاب در پریود موج ورودی (s) $P=0.25$ ، برابر ۶/۹ و در پریود موج ورودی (s) $P=1$ این مقدار برابر ۶/۱ می باشد. نزدیک بودن فرکانس موج ورودی به فرکانس طبیعی دلیل افزایش دامنه امواج روی سطح زمین است. بیشترین تاثیر حضور تونل بر حداکثر سرعت سطح زمین در پریود موج ورودی (s) $P=0.1$ به صورت بزرگنمایی و در فاصله $X/a=3$ رخ داده است.

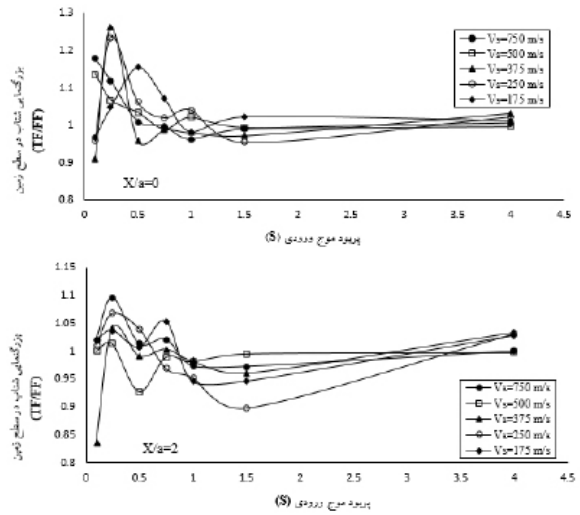
۴- تاثیر سرعت موج برشی خاک در بزرگنمایی شتاب سطح زمین در اثر حضور تونل

در ادامه نتایج بزرگنمایی شتاب و سرعت برای انواع خاک در پریودهای موج ورودی متفاوت نشان داده شده است. این بررسی‌ها در دو فاصله $X/a=0$ و $X/a=2$ از مرکز تونل بر روی سطح زمین صورت گرفته و تغییرات بزرگنمایی شتاب، در فواصل ذکر شده از مرکز تونل در شکل شماره ۸



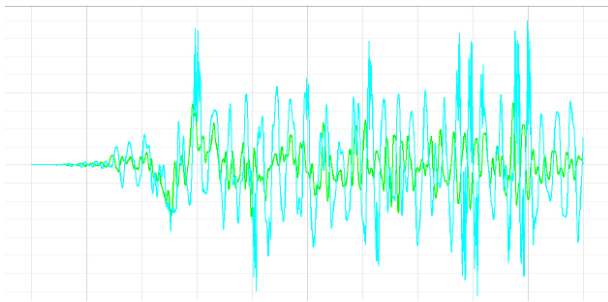
شکل ۹. بزرگنمایی سرعت سطح زمین در پریرودهای موج ورودی $X/a=۰$ و $X/a=۲$ تا ۴ ثانیه در فاصله $X/a=۰$ و $X/a=۲$

Fig. 9. Amplification of ground velocity at periods of wave 0.1 to 4 (distance $X/a=0$ and $X/a=2$)



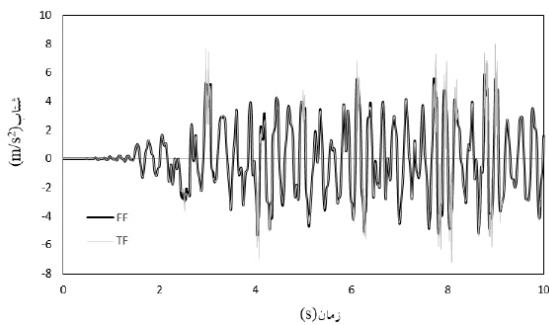
شکل ۸. بزرگنمایی شتاب سطح زمین در پریرودهای موج ورودی $X/a=۰$ و $X/a=۲$ تا ۴ ثانیه در فاصله $X/a=۰$ و $X/a=۲$

Fig. 8. Amplification of ground acceleration at periods of wave 0.1 to 4 (distance $X/a=0$ and $X/a=2$)



شکل ۱۰. شتاب‌نگاشت اعمال شده به کف مدل و برداشت شده در سطح زمین در خاک تیپ II-I و تونل به عمق $H/a=۴$

Fig. 10. Acceleration applied down the model and taken at ground level in soil type II-I and (tunnel depth $H/a=4$)



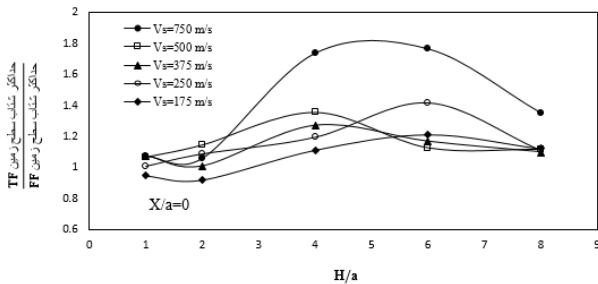
شکل ۱۱. شتاب‌نگاشت‌های سطح زمین بدون تونل و با حضور تونل

Fig. 11. Accelerations records of ground in FF and TF models

۵- الگوی بزرگنمایی شتاب و سرعت سطح زمین بر اساس شتاب‌نگاشت زلزله بم

در بخش قبل با استفاده از امواج هارمونیک به مطالعه پارامتری تأثیر فرکانس موج ورودی بر الگوی بزرگنمایی سطح زمین پرداخته شد. برای دستیابی به نتایج واقعی‌تر، می‌بایست از شتاب‌نگاشت‌های واقعی زلزله استفاده شود چرا که زلزله‌ها متشکل از فرکانس‌هایی با قدرت‌های متفاوت بوده و دارای محتوای فرکانسی خاص آن زلزله می‌باشند. بر این اساس از شتاب‌نگاشت زلزله بم در تحلیل مدل‌ها استفاده شده‌است. همانند تحلیل‌های صورت گرفته تحت امواج هارمونیک، تحلیل‌هایی جهت شناسایی رفتار بزرگنمایی امواج زلزله متاثر از جنس خاک صورت گرفته است که در ادامه به نتایج آن پرداخته خواهد شد. هنگامی که شتاب‌نگاشت به سنگ بستر اعمال می‌شود دارای PGA برابر با $g/۳۵$ است. این امواج با عبور از لایه خاک تغییراتی در دامنه و محتوای فرکانسی آن صورت می‌گیرد. دامنه امواج در سطح زمین در زلزله‌های واقعی افزایش می‌یابد. نمونه‌ای از این تغییرات در شکل ۱۰ نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود طیف شتاب سنگ بستر، بیشینه شتاب کوچکتری نسبت به طیف شتاب سطح زمین دارد. همچنین حضور تونل بر تغییرات پارامترهای زلزله در سطح زمین تأثیرگذار بوده است. بطور مثال در شکل ۱۱ نمونه‌ای از مقایسه طیف شتاب در سطح زمین، در حضور تونل و بدون حضور تونل نشان داده شده‌است.

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب بزرگنمایی شتاب و سرعت در سطح زمین در انواع خاک‌ها در اثر حضور تونل نشان داده شده‌است. همواره با کاهش سرعت موج برشی خاک، تاثیر حضور تونل بر بزرگنمایی شتاب کمتر شده‌است.



شکل ۱۵. بزرگنمایی شتاب سطح زمین در انواع خاک‌ها برای عمق‌های مختلف تونل

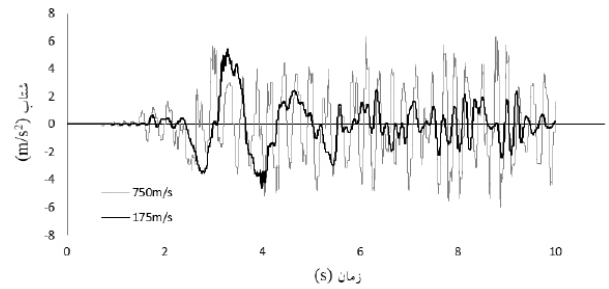
Fig. 15. Amplification of ground acceleration in different soil types and tunnel depths

همانطور که در نمودار ۱۵ مشاهده می‌شود در مرکز تونل بر روی سطح زمین، حضور تونل تا عمق $H/a=2$ تاثیر بسیار کمی در بزرگنمایی شتاب سطح زمین در انواع خاک‌ها دارد. در تونل‌هایی با عمق ۴ تا ۶ برابر شعاع آن، بیشترین تاثیر حضور تونل مشاهده شده‌است. با افزایش سرعت موج برشی خاک بزرگنمایی شتاب حد اکثر به مقدار $1/8$ رسیده است. در خاک با سرعت موج برشی 175 m/s حضور تونل تاثیر کمی بر بزرگنمایی شتاب دارد. در اعماق بی بعد بیشتر از ۶ تاثیر تونل بر بزرگنمایی در تمام خاک‌ها کم شده‌است و مقدار بزرگنمایی به یک میل می‌کند.

با بررسی نتایج گراف‌های بدست آمده مشاهده می‌شود با کاهش سرعت موج برشی خاک، حداکثر بزرگنمایی شتاب سطح زمین نیز کاهش یافته است. حداکثر تغییرات شتاب سطح زمین به صورت بزرگنمایی مربوط به خاک با سرعت موج برشی 750 m/s رخ داده‌است و حداکثر مقدار کوچک‌نمایی در خاک با کمترین سرعت موج برشی مشاهده می‌شود. بعبارت دیگر در صورت حفر تونل در خاک‌های سخت، بررسی بزرگنمایی شتاب سطح زمین الزامی است. همچنین با کاهش سرعت موج برشی خاک، تغییرات حداکثر شتاب سطح زمین کاهش می‌یابد. دلیل این تغییرات که از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند، تاثیر همزمان اندرکنش خاک و تونل، پراکنش و تفرق امواج که در اثر انعکاس امواج در برخورد با پوشش تونل رخ داده‌است و همچنین تاثیر فاصله فرکانس طبیعی مدل و فرکانس غالب زلزله بر امواج زلزله است.

۶- نتیجه‌گیری

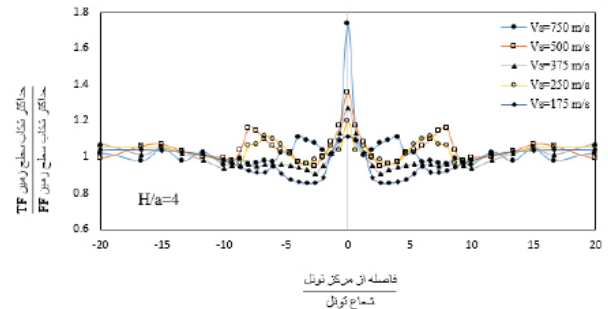
در این تحقیق، تاثیر حضور تونل بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در محیط



شکل ۱۲. تاریخچه شتاب سطح زمین در شرایط حضور تونل برای دو نوع خاک تیپ II-I و تیپ IV-III

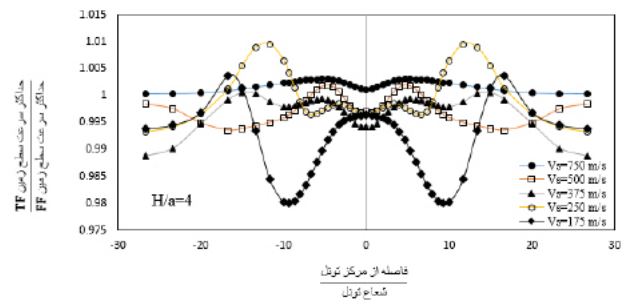
Fig. 12. Record of ground acceleration in TF model (soil type II-I and IV-III)

در شکل شماره ۱۲ تاریخچه دو شتاب برداشت شده از سطح زمین برای دو نوع خاک ارائه شده‌است. بر اساس این شکل تفاوت در محتوای فرکانسی و مقدار دامنه‌ها کاملاً مشهود است. این تغییرات نشان دهنده تاثیر نوع خاک بر امواج زلزله می‌باشد. همچنین با افزایش سرعت موج برشی خاک، اثر حضور تونل بر بزرگنمایی امواج نیز افزایش یافته است. که مقدار آن با نتایج بدست آمده از تحقیق رابطی مقدم [۱۶] مطابقت دارد.



شکل ۱۳. بزرگنمایی شتاب سطح زمین در انواع خاک در تونلی به عمق $H/a=4$

Fig. 13. Amplification of ground acceleration in soil types (tunnel depth $H/a=4$)



شکل ۱۴. بزرگنمایی سرعت سطح زمین در انواع خاک در حضور تونلی به عمق $H/a=4$

Fig. 14. Amplification of ground velocity in soil types (tunnel depth $H/a=4$)

- [2] C. Smerzini, J. Aviles, R. Paolucci, F. Sánchez-Sesma, Effect of underground cavities on surface earthquake ground motion under SH wave propagation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(12) (2009) 1441-1460.
- [3] S.-H. Lee, Y.-W. Choo, D.-S. Kim, Performance of an equivalent shear beam (ESB) model container for dynamic geotechnical centrifuge tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44 (2013) 102-114.
- [4] D.-H. Tsaur, K.-H. Chang, Multiple scattering of SH waves by an embedded truncated circular cavity, *Journal of Marine Science and Technology*, 20(1) (2012) 73-81.
- [5] S. Sica, A.D. Russo, F. Rotili, A.L. Simonelli, Ground motion amplification due to shallow cavities in nonlinear soils, *Natural hazards*, 71(3) (2014) 1913-1935.
- [6] H. Alielahi, M. Kamalian, M. Adampira, Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 71 (2015) 63-79.
- [7] H. Alielahi, M. Adampira, Site-specific response spectra for seismic motions in half-plane with shallow cavities, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80 (2016) 163-167.
- [8] P. Yiouta-Mitra, G. Kouretzis, G. Bouckovalas, A. Sofianos, Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures, (2007).
- [9] G. Sgarlato, G. Lombardo, R. Rigano, Evaluation of seismic site response nearby underground cavities using earthquake and ambient noise recordings: A case study in Catania area, Italy, *Engineering Geology*, 122(3-4) (2011) 281-291.
- [10] G. Lanzano, E. Bilotta, G. Russo, F. Silvestri, S.G. Madabhushi, Centrifuge modeling of seismic loading on tunnels in sand, *Geotechnical Testing Journal*, 35(6) (2012) 854-869.
- [11] M.H. Baziar, M.R. Moghadam, D.-S. Kim, Y.W. Choo, Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44 (2014) 10-22.
- [12] M.H. Baziar, M.R. Moghadam, Y.W. Choo, D.-S. Kim, Tunnel flexibility effect on the ground surface acceleration response, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(3) (2016) 457-476.
- [13] M.H. Baziar, C. Song, Analysis of transient wave scattering and its applications to site response analysis using the scaled boundary finite-element method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 98 (2017) 191-205.

الاستو پلاستیک تحت امواج هارمونیک و شتاب‌نگاشت زلزله بم، با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان مورد مطالعه قرار گرفته است. پتانسیل بزرگنمایی امواج در سطح زمین واقع بر تونلها به شدت تحت تاثیر محتوای فرکانسی امواج انتشار یافته بوده است. برخی از مهمترین نتایج حاصله از این تحقیق عبارتند از:

- حضور تونل در شتاب سطح زمین به دو صورت بزرگنمایی و کوچکنمایی در فواصل مختلف از مرکز تونل بر روی سطح زمین تاثیر می‌گذارد.

- منطقه تحت تاثیر تونل در سطح زمین حداکثر به $15 \leq X/a \leq 15$ محدود میشود و در فواصل دورتر اثر حضور تونل بر بزرگنمایی امواج سطح زمین ناچیز می‌شود.

- حداکثر تاثیر حضور تونل در شتاب و سرعت سطح زمین در فواصل $X/a=0$ و $X/a=2$ در پرپود موج ورودی $0.1(s)$ تا $1/5(s)$ مشاهده میشود و در پرپودهای بیشتر تاثیر حضور تونل بر بزرگنمایی بسیار کم خواهد بود. که دلیل آن عبور امواج با طول موج‌های بلندتر از قطر سازه زیرزمینی است. این نتیجه مطابق تحقیقات علی الهی [۶،۷] و رابطی مقدم [۱۷] می‌باشد.

- حداکثر بزرگنمایی شتاب سطح زمین $1/27$ و در پرپود موج ورودی $0.25(s)$ در خاک تیپ III-II مشاهده شده است.

- میزان بزرگنمایی در حالت استفاده از امواج زلزله بیشتر از مقادیر مشابه در حالت استفاده از امواج سینوسی است. حداکثر بزرگنمایی شتاب در امواج واقعی برابر $1/7$ و در امواج سینوسی $1/27$ رخ داده است. هم‌چنین محل حداکثر بزرگنمایی و کوچکنمایی همانند امواج سینوسی است.

- میزان بزرگنمایی در زلزله‌های واقعی تابعی از پارامتر مهم و تاثیرگذار پرپود مشخصه سیستم و محتوای فرکانسی موج ورودی است. هر اندازه پرپود مشخصه سیستم به پرپود موج ورودی نزدیک تر شده شاهد افزایش بزرگنمایی خواهیم بود که نشان دهنده پدیده تشدید است.

- بیشترین تاثیر حضور تونل بر بزرگنمایی امواج سطح زمین در عمق بی‌بعد $H/a=4$ تا $H/a=6$ بوده است و با افزایش عمق تونل بیشتر از ۶ برابر شعاع آن، مقدار بزرگنمایی زلزله به سمت عدد یک میل می‌کند.

- محل حداکثر بزرگنمایی‌های شتاب و سرعت در فواصل متغیری از مرکز تونل رخ می‌دهد که علت آن تفاوت در حداکثر مقدار تاریخچه سرعت و شتاب، و دامنه و محتوای فرکانسی امواج سرعت و شتاب در هنگام برخورد به پوشش تونل است.

مراجع

- [1] O. Abuhajar, H. El Naggar, T. Newson, Effects of underground structures on amplification of seismic motion for sand with varying density, in: Pan-Am CGS Geotechnical Conference, 2011, pp. 2-6.

- [17] M.R. Moghadam, M.H. Baziar, Seismic ground motion amplification pattern induced by a subway tunnel: shaking table testing and numerical simulation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 83 (2016) 81-97.
- [18] V. Besharat, M. Davoodi, M.K. Jafari, Variations in ground surface responses under different seismic input motions due the presence of a tunnel, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(10) (2014) 6927-6941.
- [19] A. Rostami, M.A. Ziarati, B. Shahi, S. Jahani, Evaluation of Seismic Behavior and Earth's Surface Acceleration, by Interaction of Tunnels with Different Shapes and Different Types of Soils, *Open journal of civil engineering*, 6(02) (2016) 242.
- [20] R.L. Kuhlemeyer, J. Lysmer, Finite element method accuracy for wave propagation problems, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 99(Tech Rpt) (1973).
- [14] X. Zhang, Y. Jiang, S. Sugimoto, Seismic damage assessment of mountain tunnel: a case study on the Tawarayama tunnel due to the 2016 Kumamoto Earthquake, *Tunnelling and underground space technology*, 71 (2018) 138-148.
- [15] S.Ü. Dikmen, G. Tanırcan, Site amplification and resonance frequency in the urban environment, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 105 (2018) 160-170.
- [16] K.T. Jouneghani, M. Hosseini, M.S. Rohanimanesh, M.R. Dehkordi, Evaluating main parameters effects of near-field earthquakes on the behavior of concrete structures with moment frame system, *Advances in Science and Technology Research Journal*, 11(3) (2017).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. H. Khalaj Zadeh, M. Azadi, The effects of tunnel excavation on the seismic response of ground surface using finite difference method, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(1) (2019) 99-108.

DOI: 10.22060/ceej.2018.14012.5534



