

الگوی بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل‌های دوقلوی دایره‌ای بدون پوشش در برابر امواج مهاجم SH

مهدی پنجمی*، سعید مجتبی زاده حسنلوئی

گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران.

Email: m.panji@iauz.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۷ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۶

چکیده

در این مقاله، الگوی بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل‌های دوقلوی دایره‌ای بدون پوشش، در برابر امواج مهاجم لرزه‌ای برون صفحه نشان داده شده است. از روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزه‌ی زمان، که پیشتر برای تونل‌های زیرزمینی منفرد توسعه داده شده بود، جهت تحلیل لرزه‌ای از یک مدل مفروض بهره گرفته شده است. ابتدا، ضمن اشاره‌ی مختصر به فرمول‌بندی روش پیشنهاد شده و ارائه‌ی یک مثال صحت‌سنجی، با در نظر گرفتن پارامترهای عمق مدفون تونل، فاصله‌ی مابین، زاویه‌ی موج مهاجم و فرکانس پاسخ، به تحلیل حساسیت و تعیین بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین اقدام شده است. در نهایت، با اتخاذ بزرگنمایی حداکثر در حالات مختلف و برازش این مقادیر، نتایج به صورت یک سری معادلات خطی و جداول جمع‌بندی شده است. نتایج نشان می‌دهد که موقعیت‌های مختلف استقرار تونل‌های دوقلوی مدفون در بافت شهری، بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین بسیار مؤثر است. نتایج این تحقیق می‌تواند در تکمیل و تدقیق آیین‌نامه‌های موجود، پیرامون موضوع پهنه‌بندی سطح زمین در حضور تونل‌های دوقلو، مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: الگوی بزرگنمایی، اجزای مرزی نیم صفحه، تونل‌های دوقلوی دایره‌ای، حوزه‌ی زمان، موج SH

۱. مقدمه

همچون متروها و خطوط راه‌آهن، بزرگراه‌ها، انتقال آب و فاضلاب و بسیاری موارد دیگر، به اهمیت این قبیل عوارض می‌افزاید. از طرفی، پیشرفت فناوری در این حوزه، سهولت نسبی در حفاری و احداث سازه‌های زیرزمینی و همچنین رفع محدودیت فضاها‌ی سطحی

با توجه به تمایل روز افزون در استفاده از فضاها و سازه‌های زیرزمینی، امروزه این نوع بناها در جوامع مدرن به عنوان شاهراه حیاتی تلقی می‌شوند. کاربردهای متعدد بازشدگی‌های زیرسطحی، به ویژه در مباحث حمل و نقل،

برای اجرای طرح‌های عمرانی، توجه بسیاری از کشورها، از جمله کشور ایران، را به احداث تونل‌های دوقلو، برای کاربری‌های مختلف عمرانی، نظامی، معدنی و سایر موارد معطوف ساخته است. در این میان، استقرار برخی از تونل‌ها در نواحی با پتانسیل لرزه‌خیزی زیاد، زمینه‌ساز توسعه‌ی آسیب و خرابی آن‌ها، در اثر ارتعاش ناشی از زمین‌لرزه و متعاقباً تخریب سازه‌های سطحی شده است. بدین ترتیب، این سازه‌ها علاوه بر تحمل بارهای استاتیکی، می‌بایست در برابر بارگذاری ناشی از زمین‌لرزه نیز مقاومت کافی داشته باشند (آکی، ۱۹۸۸). با توجه به شواهد تاریخی و اثرهای ناشی از زمین‌لرزه بر سازه‌های زیرزمینی، ملاحظه می‌شود که میزان خرابی در این نوع سازه‌ها، نسبت به سازه‌های واقع در سطح زمین، به مراتب کمتر می‌باشد. اما از سوی دیگر، رخداد زلزله‌های اخیر، همچون زلزله‌ی ۱۹۹۵ کوبه‌ی ژاپن، زلزله‌های ۱۹۹۵ چی‌چی تایوان و همچنین ۱۹۹۹ کوجائلی ترکیه، به وضوح نشان داد که این نوع سازه‌ها نیز می‌توانند دچار خسارات عمده، به هنگام قرارگیری در معرض امواج مهاجم لرزه‌ای، شوند (آرورک و همکاران، ۲۰۰۰؛ وانگ و وانگ ۲۰۰۱؛ گوستاو و همکاران، ۲۰۰۶). در این میان، اثر محل ساختگاه نیز به نوبه‌ی خود، یکی از مهم‌ترین تأثیرگذارترین پارامترها در هنگام بروز زمین‌لرزه می‌باشد که اهمیت آن منجر به تمایل بیشتر محققان به انجام بررسی‌های دقیق‌تر در این زمینه شده است. بنابراین، شناخت رفتار دقیق سطح زمین در حضور تونل‌های زیرزمینی به کمک ابزار مناسب، از جمله مطالعات پایه‌ای به حساب می‌آید که پیش از احداث آن، به ویژه در مناطق شهری پراهمیت، باید مد نظر قرار گیرد.

بررسی ادبیات فنی در حوزه‌ی تحلیل لرزه‌ای سطح زمین در حضور بازشدگی‌های زیرسطحی نشان می‌دهد که روش‌های مختلفی در این زمینه وجود دارد. هرچند در حوزه‌ی اثرهای ساختگاهی، مطالعات صحرایی اسگارلاتو و همکاران (۲۰۱۱) و کاظمینی و همکاران (۲۰۱۵) به چشم می‌خورد، اما به طور کلی می‌توان اذعان داشت که روش‌های تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی زیرسطحی به سه دسته‌ی روش‌های تحلیلی^۱، نیمه‌تحلیلی^۲ و عددی^۳ قابل تقسیم می‌باشند. امروزه، با توسعه‌ی دانش نرم‌افزاری، از روش‌های عددی به طور گسترده جهت مدل‌سازی و مطالعه‌ی رفتار سازه‌های زیرزمینی و انواع مختلف عوارض توپوگرافی استفاده می‌گردد. در این راستا، از روش‌های عددی گوناگونی چون روش المان محدود (FEM^۴)، روش تفاضل محدود (FDM^۵) و روش المان مرزی (BEM^۶) به منظور مدل‌سازی و المان‌بندی محیط پیرامون سازه‌ها و انجام تجزیه و تحلیل رفتار انواع سازه‌ها و عوارض توپوگرافی در حالت دینامیک، بهره گرفته می‌شود. اما در یک دسته‌بندی کلی، می‌توان روش‌های عددی را به دو بخش شامل روش‌های حجمی^۷ و مرزی^۸ تقسیم نمود. در هنگام استفاده از روش‌های اجزای محدود و تفاضل محدود که زیرشاخه‌ی روش‌های حجمی می‌باشند، لازم است کل دامنه‌ی مورد نظر گسسته‌سازی شده و مرزهای جاذب انرژی امواج در پیرامون مدل در نظر گرفته شوند. بدین ترتیب، می‌توان مسائلی با محیط‌های بی‌نهایت و نیمه‌بی‌نهایت را تحلیل نمود. اما گسسته‌سازی مدل و استفاده از مرزهای جاذب در روش‌های حجمی، موجب

^۱- Analytical methods

^۲- Semi-analytical methods

^۳- Numerical methods

^۴- Finite Element Method

^۵- Finite Difference Method

^۶- Boundary Element Method

^۷- Domain methods

^۸- Boundary methods

تحقیقات بنیتز و همکاران (۱۹۹۲) اشاره نمود که تأثیر پراکنش امواج الاستیک بر سیستمی با حفرات چندگانه را تحلیل نموده و پاسخ سطح زمین را با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی فرکانس به دست آورده‌اند. همچنین، دراوینسکی (۱۹۸۳)، اوتسو و یئوسوگی (۱۹۸۵)، رینوسو و همکاران (۱۹۹۳) و آسیلیو و همکاران (۲۰۰۸) نیز با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی فرکانس، پراکنش امواج SH را در حضور عوارض مختلف توپوگرافی به کار گرفته‌اند. همچنین، با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان نیز محققانی چون بلیچکو و چانگ (۱۹۸۸) و هیرای (۱۹۸۸) به گسترش مرزهای دانش پرداخته و رویکرد مذکور بعدها توسط پنجی و همکاران (۲۰۱۳) به سوی تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی سطحی و زیرسطحی معطوف گردید.

همان‌طور که مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد، تاکنون تأثیر تونل‌های دوقلو بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و همچنین الگوی بزرگنمایی^۱ ایجاد شده به طور دقیق مورد مطالعه و حساسیت‌سنجی واقع نشده است. لذا، مؤلفان بر آن شدند تا در این پژوهش، با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان به تعیین الگوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور تونل‌های دوقلوی بدون پوشش در برابر امواج مهاجم SH بپردازند. پس از توسعه‌ی روش مذکور، به منظور حل مسائل مربوط به حفرات چندگانه (پنجی و مجتبی‌زاده حسنلوئی، ۲۰۱۸)، با پیاده‌سازی معادلات در الگوریتم کلی که پیشتر داس‌بم^۲ نامیده شد (کدنویسی برنامه‌ی مذکور در محیط نرم‌افزار متلب^۳ پیاده‌سازی و اجرا شده است)، تحلیل تونل‌های دوقلوی زیرزمینی مهیا گردید. ابتدا، ضمن ارائه‌ی یک مثال اعتبارسنجی، صحت و سقم روش و الگوریتم تهیه شده مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس در قالب یک

پیچیدگی به مراتب بیشتر مسأله شده و زمان تحلیل را به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد.

در این میان، روش‌های مرزی توانسته‌اند با ویژگی‌های بارز خود بر ضعف‌های مذکور غلبه نمایند. روش اجزای مرزی (BEM) به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین و نام‌آشنا‌ترین روش‌ها می‌باشد که امکان متمرکز ساختن گسسته‌سازی‌ها، صرفاً روی مرز عارضه‌ی مورد نظر، را فراهم می‌نماید. اگرچه روش‌های مرزی شامل محدودیت‌هایی همچون فرمول‌بندی پیچیده و توسعه‌یافتگی کمتر برای محیط‌های غیرخطی، پلاستیک و چندفازه می‌باشند، اما استفاده از آن‌ها منتج به کاهش حجم داده‌های ورودی، کاهش قابل توجه زمان تحلیل، اقیان شرایط مرزی تشعشع امواج در بی‌کران و دقت بسیار زیاد نتایج خواهد شد (کمالیان و همکاران، ۲۰۰۶). روش اجزای مرزی به دو بخش روش اجزای مرزی محیط کامل و نیم‌صفحه تقسیم می‌گردد که هر یک در حوزه‌ی زمان و حوزه‌ی تبدیل یافته توسعه یافته‌اند. نکته‌ی لازم به ذکر آن است که هنگام به‌کارگیری روش اجزای مرزی محیط کامل، باید دامنه‌ی مورد نظر برای هندسه‌ی مدل را از درون یک محیط بی‌انتهای تکمیک نموده و جهت اقیان شرایط مرزی سطح آزاد، لازم است از ناحیه‌ی مورد نظر جهت بررسی به اندازه‌ی کافی فاصله گرفته و سپس مرزهای کناری بسته و مش‌بندی صورت گیرد (احمد و بنرجی، ۱۹۸۸).

در روش اجزای مرزی نیم‌صفحه، شرایط مرزی سطح آزاد به عنوان نماینده‌ی سطح زمین در معادلات اقیان شده است. اگرچه این عمل اندکی باعث پیچیدگی بیشتر معادلات می‌گردد، اما در این صورت نیازی به مش‌بندی سطح زمین نخواهد بود و در نهایت، سادگی بیشتر در فرآیند مدل‌سازی را به ارمغان خواهد آورد. از جمله مطالعات صورت گرفته در این حوزه می‌توان به

۱- Amplification

۲- DASBEM = Dynamic Analysis of Structures by Boundary Element Method

۳- MATLAB (V. 9.4)

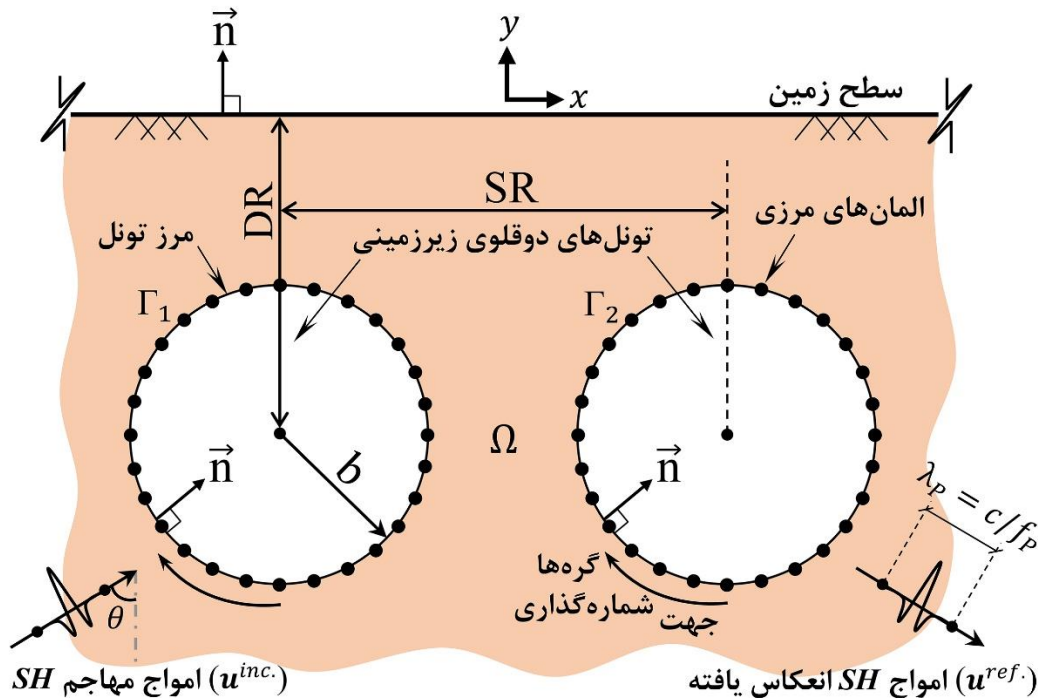
دامنه، Γ مرز تونل‌ها، DR^۱ نسبت عمق تونل‌ها از سطح زمین، SR^۲ نسبت فاصله‌ی مرکز تونل‌ها از یکدیگر، θ زاویه‌ی اعمال امواج مهاجم لرزه‌ای، b شعاع تونل‌ها و n بردار نرمال سطح می‌باشد (که براساس جهت شماره‌گذاری گره‌ها تعریف شده و همواره نیز عمود بر سطح است). مدل‌ها در معرض امواج مهاجم برون صفحه‌ی SH از نوع ریکر^۳ (ریکر، ۱۹۵۳) می‌باشند. شکل ۲، نشان‌دهنده‌ی موجک ریکر در حوزه‌ی زمان و فرکانس بوده و معادله‌ی آن نیز به صورت معادله‌ی ۱ بیان می‌گردد. در معادله‌ی مذکور، f_p فرکانس غالب، t_0 پارامتر شیفت زمان و t محور حقیقی زمان می‌باشد.

$$f(t) = \left[1 - 2 \left(\pi f_p (t - t_0) \right)^2 \right] e^{-\left(\pi f_p (t - t_0) \right)^2} \quad (1)$$

مطالعه‌ی پارامتریک، با در نظرگیری نسبت‌های مختلف عمق و فاصله برای تونل‌ها، زاویه‌ی اعمال امواج مهاجم لرزه‌ای و فرکانس پاسخ، الگوی بزرگنمایی سطح زمین تعیین و حساسیت‌سنجی شد. همچنین، به منظور کسب یک معیار سنجش کلی، مقادیر بیشینه‌ی بزرگنمایی سطح زمین بر حسب پریود بی‌بعد، تعیین شده و با برازش بر آن‌ها امکان تخمین این مقادیر بر حسب نسبت‌های عمق و فاصله فراهم شد. در قالب این پژوهش، امکان تکمیل و تدقیق آئین‌نامه‌ها و استانداردهای لرزه‌ای موجود در حوزه‌های مهندسی عمران، زلزله و ژئوتکنیک قابلیت مهیاسازی خواهد داشت.

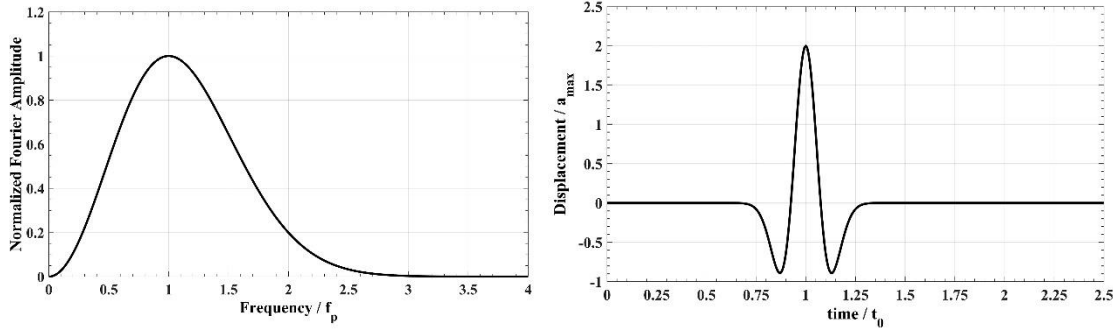
۲. اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تونل‌های دوقلوی دایره‌ای در درون یک محیط نیم‌صفحه‌ی الاستیک خطی همگن مستقر شده‌اند. در این شکل، Ω



شکل ۱. هندسه‌ی مسأله‌ی تونل‌های دوقلوی دایره‌ای مستقر در یک محیط نیم‌صفحه‌ی الاستیک، در برابر امواج مهاجم SH

1- Depth Ratio
2- Space Ratio
3- Ricker



شکل ۲. نمودار تابع موجک ریکر برای یک نقطه‌ی واقع در سطح صاف زمین در فضای زمان و فرکانس

در این رابطه، n بردار نرمال می‌باشد و همواره عمود بر سطح زمین است. از حل همزمان دو معادله‌ی ۲ و ۳، حل اساسی نیم‌صفحه به دست خواهد آمد. با اعمال روش باقیمانده‌های وزن‌دار بر معادله‌ی ۲ و حذف جملات واقع بر حجم، با استفاده از روش‌های حل مرزی همچون روش منفرد و صرف نظر از شرایط اولیه و نیروهای حجمی، معادله‌ی انتگرال مرزی (BIE^۲) اصلاح شده در حوزه‌ی زمان، به صورت زیر به دست می‌آید (بریا و دومینگز، ۱۹۸۹):

$$c(\xi)u(\xi, t) = \sum_{c=1}^2 \left[\int_{\Gamma_c} \left\{ \int_0^t [u^*(x, t; \xi, \tau) \cdot q(x, t) - q^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u(x, t)] d\tau \right\} d\Gamma_c(x) + u^{ff}(\xi, t) \right] \quad (4)$$

در رابطه‌ی فوق، u^* و q^* بیانگر حل اساسی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان و به ترتیب برای مؤلفه‌های تغییر مکان و تنش و u و q نیز تغییر مکان و تنش مرزی می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص شده، $\Gamma(x)$ نشان‌دهنده‌ی مرز تونل‌ها بوده و u^{ff} تغییر مکان میدان آزاد سطح زمین، بدون حضور هیچ‌گونه عارضه‌ای، می‌باشد. به منظور پیاده‌سازی عددی معادله‌ی انتگرال مرزی ۴، با گسسته‌سازی محورهای مکان و زمان، به الگوریتم گام زمانی به صورت معادله‌ی ۵ دست خواهیم یافت:

در روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان، با بهره‌گیری از روش تصویر منبع موج^۱ (اوتسو و یونسوگی، ۱۹۸۵) نسبت به سطح زمین و اقتناع شرایط مرزی روی آن، مش‌بندی و گسسته‌سازی صرفاً بر مرز تونل‌ها متمرکز می‌گردد. بدین ترتیب، ضمن تأمین دقت مناسب، منجر به کاهش قابل توجه حجم داده‌های ورودی مسئله نیز می‌گردد. لذا، با در نظرگیری یک محیط نیم‌صفحه‌ی الاستیک خطی همگن و ایزوتروپ، مطابق شکل ۱، معادله‌ی موج اسکالر به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial y^2} + b(x, y, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

که $u(x, y, t)$ و $b(x, y, t)$ تغییر مکان و نیروی حجمی برون‌صفحه در نقطه‌ی (x, y) ، t معرف فاکتور زمان می‌باشد و c بیانگر سرعت موج برشی است که از رابطه‌ی $\sqrt{\mu/\rho}$ به دست می‌آید. در این رابطه، μ مدول برشی و ρ نیز دانسیته‌ی محیط است. از حل منفرد معادله‌ی ۲، بدون در نظرگیری شرایط مرزی، حل اساسی محیط کامل به دست خواهد آمد (اسرائیل و بنرجی، ۱۹۹۰ الف و ب). به منظور حل معادله‌ی ۲، از شرایط مرزی زیر استفاده شده است:

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial n} \Big|_{y=0} = 0 \quad (3)$$

1- Wave Source Image technique

2- Boundary Integral Equation

تغییر مکان‌ها در هر یک از نقاط درونی واقع در دامنه‌ی مربوط به مسأله، از رابطه‌ی زیر تعیین شوند.

$$u^m(\xi, t) = \sum_{c=1}^2 \left[\int_{\Gamma_c} \left\{ \int_0^t [u^{*m}(x, t; \xi, \tau) \cdot q(x, t) - q^{*m}(x, t; \xi, \tau)] \cdot u(x, t) d\tau \right\} d\Gamma_c(x) + u^{ff.m}(\xi, t) \right]_c \quad (8)$$

در این رابطه، u^{*m} و q^{*m} به ترتیب حل اساسی نیم‌صفحه برای مؤلفه‌های تغییر مکان و تنش در هر یک از نقاط درونی می‌باشند. $u^{ff.m}$ نیز تغییر مکان میدان آزاد بوده که لازم است در این گام مجدداً محاسبه گردد. پس از حل معادله‌ی مذکور، امکان محاسبه‌ی پاسخ برای هر یک از نقاط درونی m واقع در درون دامنه فراهم می‌گردد. در رابطه با این مسأله، نقاط درونی روی سطح زمین واقع شده‌اند و نقطه‌ی مرجع^۱ مورد نظر که بزرگنمایی‌ها در آن محاسبه خواهد شد، به عنوان یکی از نقاط درونی مذکور و در مبدأ مختصات $(0, 0)$ واقع شده است.

۳. صحت‌سنجی

در این بخش، فرمول‌بندی ارائه شده در راستای گسترش و توسعه‌ی کد روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان پیاده‌سازی و اجرا شده است. این الگوریتم پیش‌تر تحت عنوان داس‌بم معرفی گردیده است. در هنگام استفاده از روش مذکور، تنها گسسته‌سازی مرز پیرامون تونل‌ها کفایت می‌نماید. به منظور بررسی عملکرد و دقت الگوریتم مذکور در تحلیل تونل‌های دوقلوی دایره‌ای، مدلی از این نوع عارضه در یک محیط الاستیک خطی، در برابر امواج مهاجم قائم SH مدّ نظر قرار گرفته است. در شکل ۳، دامنه‌ی تغییر مکان تُرمالایز شده‌ی سطح زمین (NDA)^۲ در محدوده‌ی $-3b$ تا $3b$ از سطح نشان داده شده است که b بیانگر شعاع تونل می‌باشد. NDA به

$$\sum_{c=1}^2 \left[\sum_{n=1}^N H^{N-n+1} \{u^n\} \right]_c = \sum_{c=1}^2 \left[\sum_{n=1}^N G^{N-n+1} \{q^n\} + \{u^{ff.N}\} \right]_c \quad (5)$$

بدین ترتیب، H^{N-n+1} و G^{N-n+1} ماتریس‌هایی هستند که عناصر آن‌ها با انتگرال‌گیری از المان‌های مرزی به‌دست آمده‌اند. همچنین، $\{u^n\}$ و $\{q^n\}$ نیز بردارهایی از مقادیر مرزی در گام زمانی n ام می‌باشند. با توجه به عدم نظرگیری تنش روی مرز تونل‌ها در این مطالعه‌ی خاص، جمله $\{q^n\}$ برابر با صفر در نظر گرفته شده است. بنابراین، ماتریس حاصل شده از معادله‌ی ۵ برای تونل‌های دوقلو به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} H^1 & H^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^1 \\ u^2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R^1 \\ R^2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u^{ff.1} \\ u^{ff.2} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

در این رابطه نیز $u^{ff.1}$ و $u^{ff.2}$ بیانگر پاسخ‌های میدان آزاد تونل‌های اول و دوم و همچنین R^1 و R^2 نماینده‌ی تاریخچه‌ی زمانی پیشین برای تونل‌های اول و دوم می‌باشند. در ادامه، با اعمال شرایط مرزی بر گره‌ها و تمرکز مجهولات در سمت چپ معادله، رابطه‌ی زیر به‌دست خواهد آمد:

$$[A] \{X^N\} = \{R^N\} + \{u^{ff.N}\} \quad (7)$$

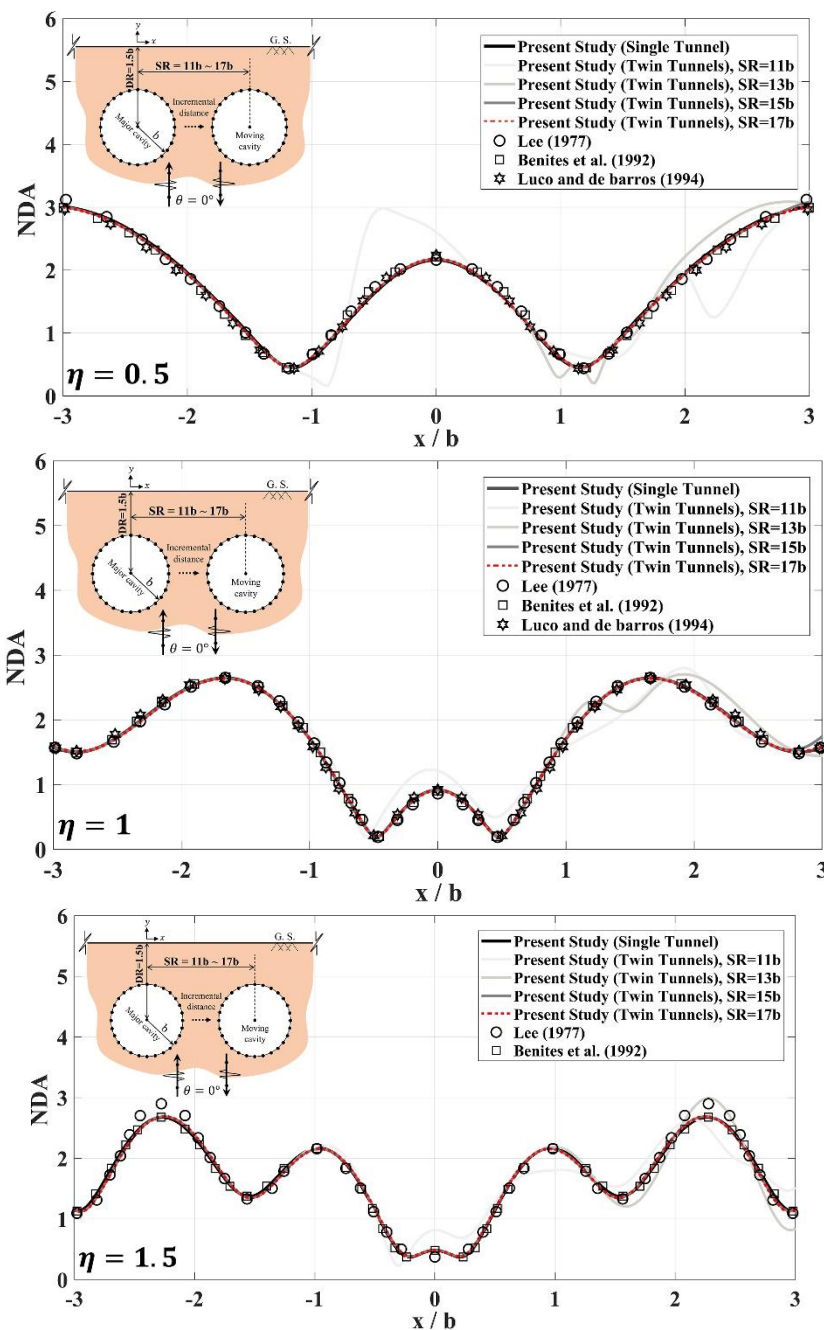
به‌طوری‌که از بازنویسی معادله‌ی (۶) به صورت معادله‌ی (۶)، A حاصل از H^1 و H^2 ، X^N حاصل u^1 و u^2 ، R^N حاصل از R^1 و R^2 و $u^{ff.N}$ نیز براساس $u^{ff.1}$ و $u^{ff.2}$ به‌دست می‌آید. در این میان، $\{X^N\}$ بردار متغیرهای مجهول و $\{R^N\}$ دربرگیرنده‌ی اثر تاریخچه‌ی زمانی دینامیک پیشین بر گره زمانی N می‌باشد. در نهایت، حل معادله‌ی ۸ منجر به به‌دست آمدن تمامی مقادیر مجهول مرزی در هر گام زمانی خواهد شد. پس از حل معادله‌ی مذکور، این امکان فراهم می‌شود که

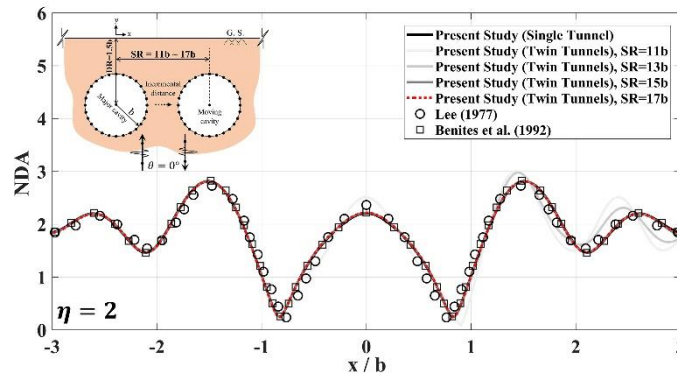
¹ - Reference point

² - Normalized Displacement Amplitude

شده‌اند. نتایج در فرکانس‌های بی بُعد 0.5 ، 1 ، 1.5 و 2 نشان داده شده است. فرکانس بی بُعد به صورت $(\eta = \omega b / \pi c)$ تعریف شده که در این رابطه، ω فرکانس زاویه‌ای موج، b شعاع تونل‌ها و c سرعت موج برشی محیط مورد بررسی می‌باشد.

صورت نسبت دامنه‌ی فوریه‌ی تغییر مکان کلی سطح زمین و حاصل شده از روش اجزای مرزی در یک فرکانس مشخص، بر دامنه‌ی فوریه‌ی حرکت ناشی از امواج مهاجم در فرکانس مذکور تعریف می‌شود. هر دو تونل در یک تراز و در عمق $1/5$ برابر شعاع خود واقع





شکل ۳. دامنه‌ی تغییرمکان نرملایز شده‌ی سطح زمین در مقابل x/b برای تونل‌های دوقلو با شعاع b ، نسبت عمق $1/5b$ ، نسبت فاصله‌ی $11b$ تا $17b$ ، تحت اثر امواج مهاجم قائم SH .

است، تغییرمکان‌های به‌دست آمده برای تونل مرجع کاملاً منطبق بر پاسخ تونل منفرد شده است. همچنین، ملاحظه می‌گردد که نتایج تونل منفرد نیز به خوبی با نتایج مطالعات لی (۱۹۷۷)، بنیتز و همکاران (۱۹۹۲) و لوکو و دی‌باروس (۱۹۹۴) همخوانی و انطباق دارد.

۴. متدولوژی مطالعه‌ی پارامتریک

در ابتدا، به ارائه‌ی نمودارهای بزرگنمایی در مقابل پیروید بی‌بُعد (معکوس فرکانس بی‌بُعد) برای تونل‌های دوقلوی زیرزمینی پرداخته شده است. بزرگنمایی به صورت نسبت دامنه‌ی پاسخ سطح زمین به تغییرمکان میدان آزاد^۱ تعریف می‌گردد. به منظور تهیه‌ی مدل‌ها، تونل‌ها بدون پوشش در نظر گرفته شده و مشخصات محیط دربرگیرنده‌ی تونل‌ها نیز مطابق با مقادیر مورد نظر در بخش صحت‌سنجی لحاظ شده است. در بررسی اثر نسبت عمق (DR)، مقادیر $1/5b$ تا $1/5b$ و در مطالعه‌ی اثر نسبت فاصله (SR)، مقادیر $3b$ تا $15b$ برای تونل‌ها مد نظر قرار گرفته است. در انتهای هر بخش، مقادیر بیشینه‌ی بزرگنمایی در قالب جداولی برای زوایای مختلف هجوم امواج ارائه خواهد شد. در بخش پایانی نیز به گردآوری مقادیر بیشینه‌ی حاصل از حالات مختلف و برازش خط بر نتایج و ارائه‌ی معادلات جهت پیش‌بینی

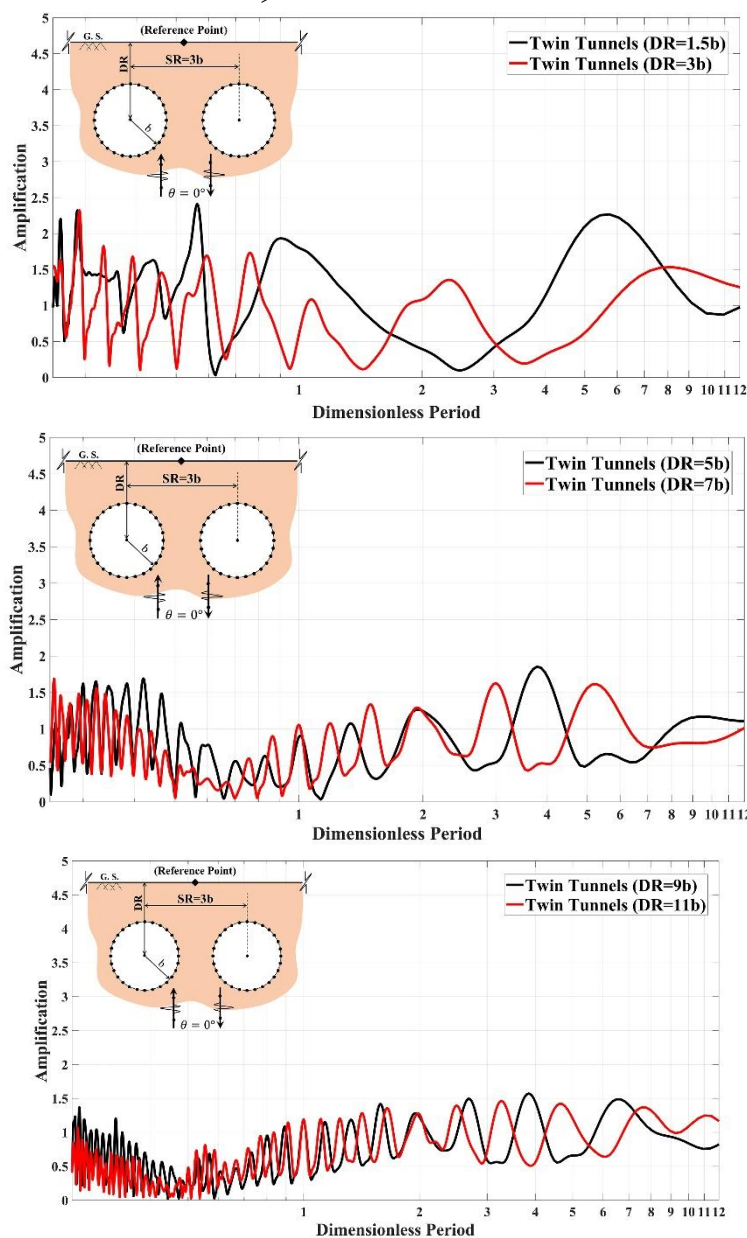
در انجام این صحت‌سنجی، تونل اصلی در مبدأ مختصات واقع شده و فاصله‌ی مرکز تا مرکز تونل اصلی تا تونل متحرک به ترتیب به میزان ۱۱، ۱۳، ۱۵ و ۱۷ برابر شعاع آن افزایش داده شده است تا بدین ترتیب اثر تونل متحرک بر پاسخ تونل اصلی به تدریج کم‌رنگ‌تر و در نهایت، پاسخ حاصل آمده برای تونل اصلی، منطبق بر تونل منفرد گردد. به منظور انجام صحت‌سنجی، از نتایج مطالعات ارائه شده توسط لی (۱۹۷۷)، بنیتز و همکاران (۱۹۹۲) و لوکو و دی‌باروس (۱۹۹۴) کمک گرفته شده است. پژوهش لی (۱۹۷۷) به صورت تحلیلی و مطالعات بنیتز و همکاران (۱۹۹۲) و لوکو و دی‌باروس (۱۹۹۴) به کمک روش اجزای مرزی غیرمستقیم در حوزه‌ی فرکانس صورت گرفته است. سرعت موج برشی و دانسیته‌ی محیط به ترتیب برابر با 1000 m/s و 1 ton/m^3 در نظر گرفته شده و مطابق بر مقادیر مد نظر در بخش‌های بعدی این پژوهش می‌باشد. برای فرکانس غالب و بیشینه‌ی دامنه‌ی موج SH به ترتیب مقادیر ۳ هرتز و $0/001$ متر و برای پارامتر تعویق زمان نیز مقدار $2/4$ ثانیه مد نظر قرار گرفته است. مسأله‌ی مذکور با استفاده از 1000 گام زمانی با بازه‌ی زمانی $0/006$ ثانیه تحلیل شده و برای هر یک از تونل‌ها ۱۲۶ المان جهت مش‌بندی در نظر گرفته شده است. با مقایسه‌ی نتایج می‌توان دریافت که زمانی که تونل متحرک به میزان $17b$ از تونل مرجع فاصله گرفته

^۱- Free-Field Motion

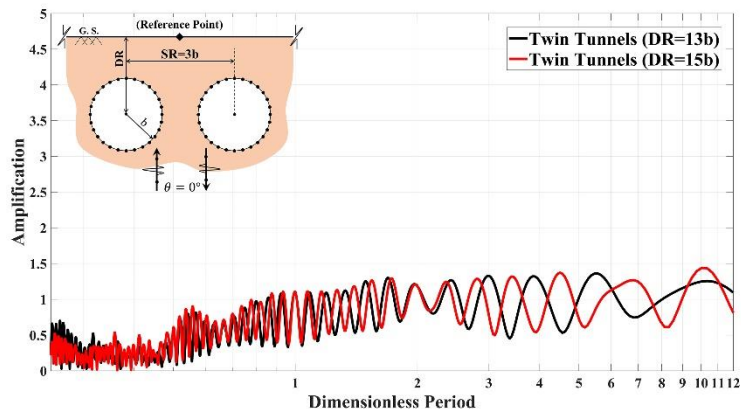
۵. اثر نسبت عمق (DR)

به منظور بررسی اثر نسبت عمق (DR)، مقادیر ۱/۵، ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱، ۱۳ و ۱۵ برابر شعاع تونل مد نظر قرار گرفته است. نتایج حاصل به ترتیب برای زوایای هجوم امواج صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه ارائه شده‌اند. مقادیر بزرگنمایی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع واقع در مبدأ مختصات در فواصل یکسان نسبت به محل استقرار تونل‌ها به دست آمده‌اند. در شکل‌های ۴ تا ۷، الگوی بزرگنمایی حاصل برحسب پیروی بی‌بعد نشان داده شده است.

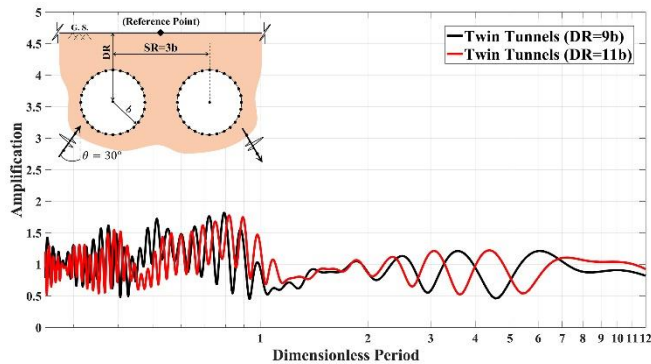
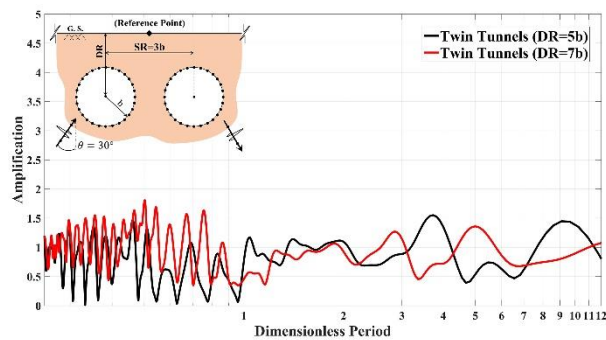
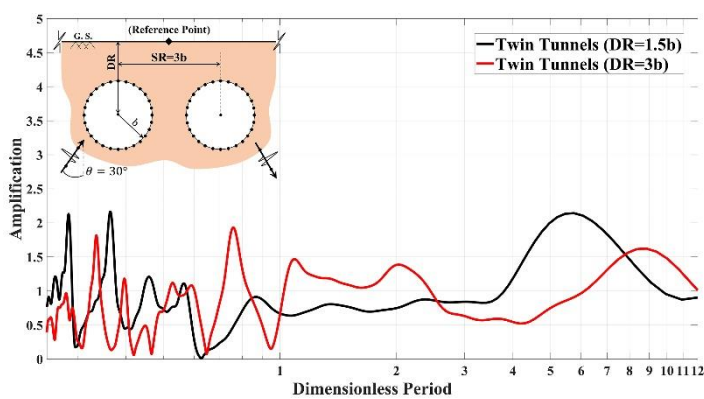
بزرگنمایی‌ها پرداخته خواهد شد. برازش خطی بر پاسخ‌های حاصل شده، ضمن ارائه‌ی یک دیدگاه جامع و کلی از نحوه‌ی تغییرات بزرگنمایی در سطح، امکان استفاده از نتایج این پژوهش در حوزه‌های کاربردی و عملیاتی را فراهم می‌نماید که یکی از مهم‌ترین اهداف مؤلفین در انجام این تحقیق بوده است. لازم به ذکر است که نتایج حاصل در هر یک از بخش‌های مطروحه نیز به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

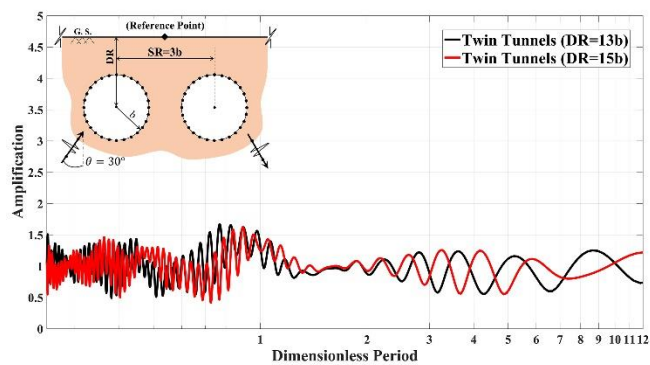


الگوی بزرگنمایی لرزهای سطح زمین در حضور تونل‌های دوقلوی دایره‌ای بدون پوشش در برابر امواج مهاجم SH

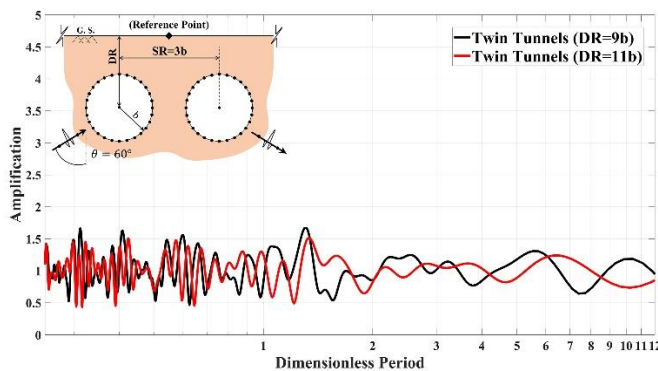
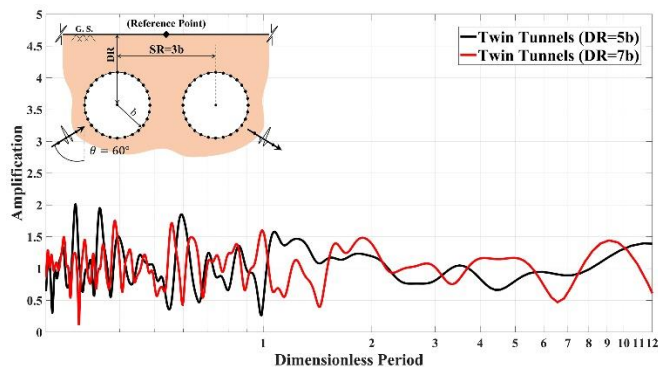
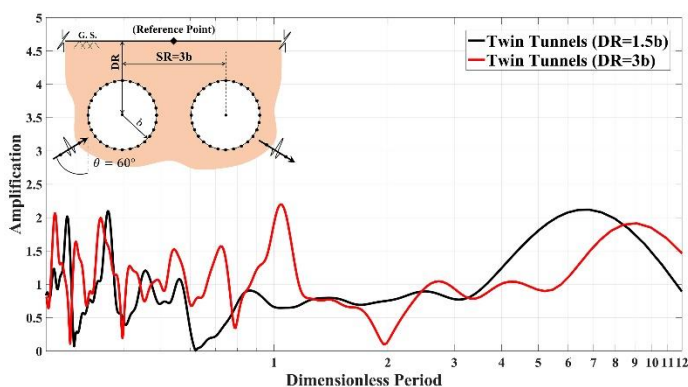


شکل ۴. تأثیر نسبت عمق (DR) بر بزرگنمایی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع، در برابر هجوم امواج قائم SH

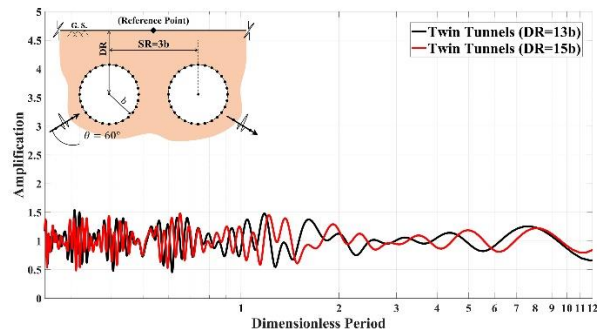




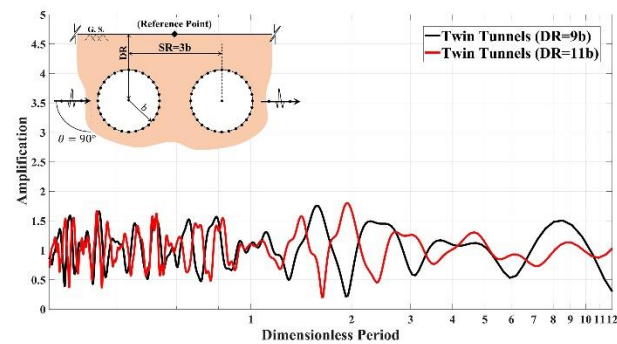
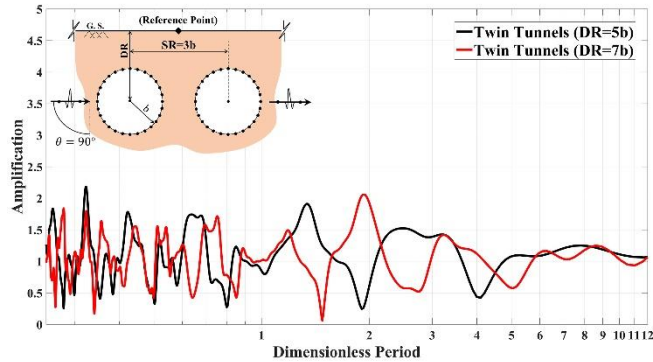
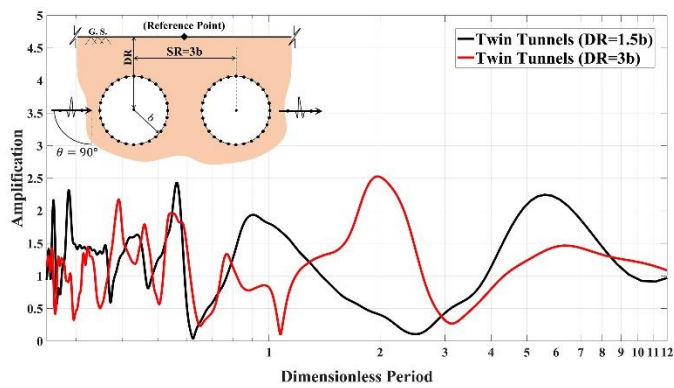
شکل ۵. تأثیر نسبت عمق (DR) بر بزرگنمایی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع، در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد (θ) ۳۰ درجه

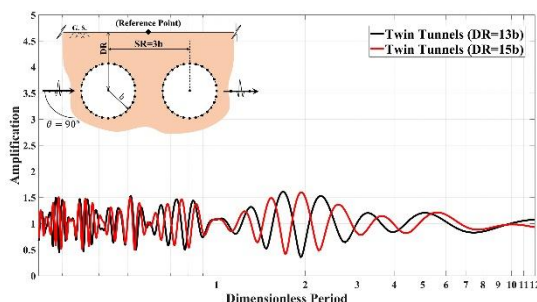


الگوی بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل‌های دوقلوی دایره‌ای بدون پوشش در برابر امواج مهاجم SH



شکل ۶. تأثیر نسبت عمق (DR) بر بزرگنمایی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع، در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد (θ) ۶۰ درجه.





شکل ۷. تأثیر نسبت عمق (DR) بر بزرگنمایی‌های سطح زمین در نقطه‌ی مرجع، در برابر هجوم امواج افقی SH

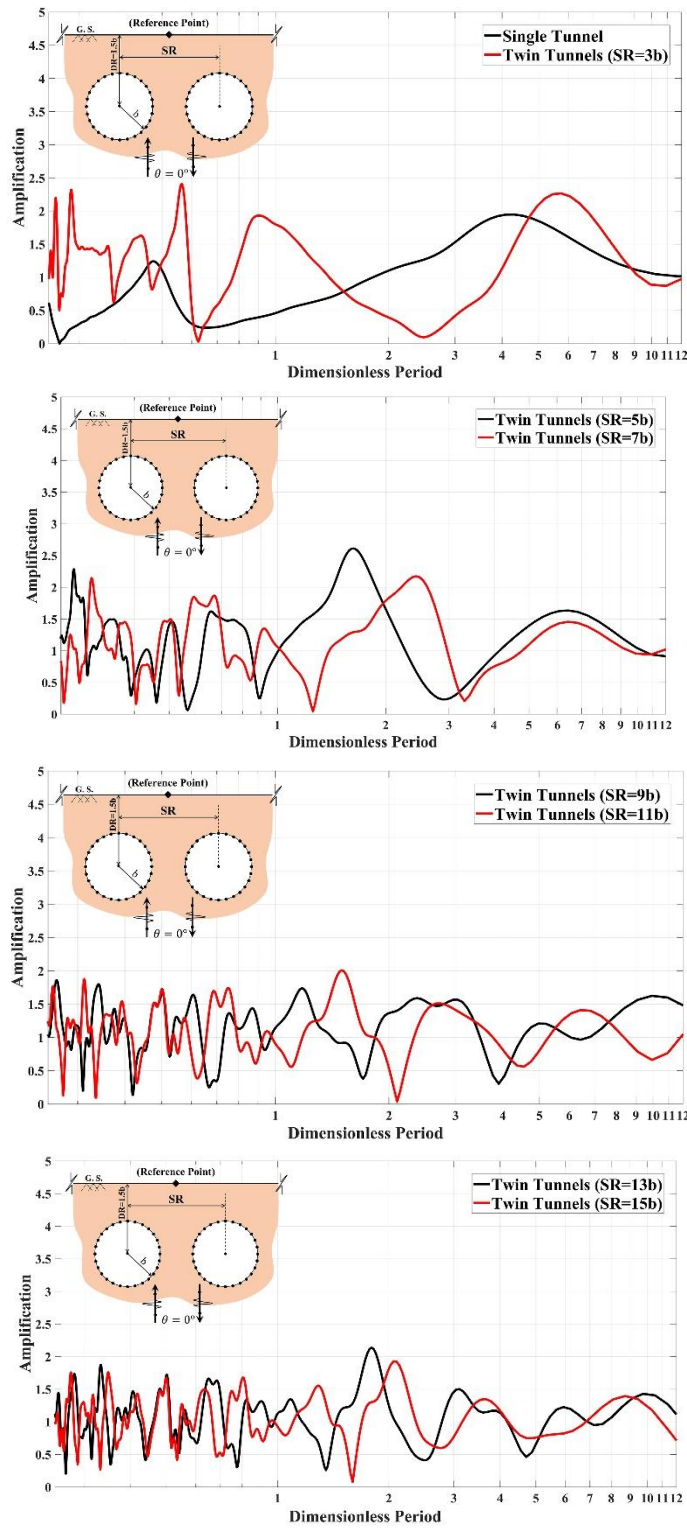
قسمتی از امواج نیز روی مرز تونل‌ها دچار خزیدگی شده و سپس به سطح می‌رسند. در این میان، هر یک از موارد مذکور می‌توانند منجر به محبوس‌شدگی امواج در فضای بین تونل‌ها و سطح زمین شوند (کِلر، ۱۹۶۲). چنانچه دور از انتظار نیست، در زمان انتشار امواج به صورت قائم و افقی، حداکثر میزان محبوس‌شدگی امواج به وقوع می‌پیوندد. این اثر در نسبت عمق کمینه مشهودتر است. به عبارت دیگر، می‌توان چنین اذعان داشت که در حالت هجوم امواج قائم، تکرار انعکاس امواج در فضای بین تونل و سطح زمین و در حالت هجوم امواج افقی اثر همین پدیده، ولی در مابین تونل‌ها، از جمله عوامل اصلی می‌باشند. شایان ذکر است که در حالت استقرار تونل‌های عمیق در برخی پروده‌های بی‌بُعد، کوچک‌نمایی مشاهده شده که این موضوع برای هجوم امواج قائم پُررنگ‌تر است.

۶. اثر نسبت فاصله (SR)

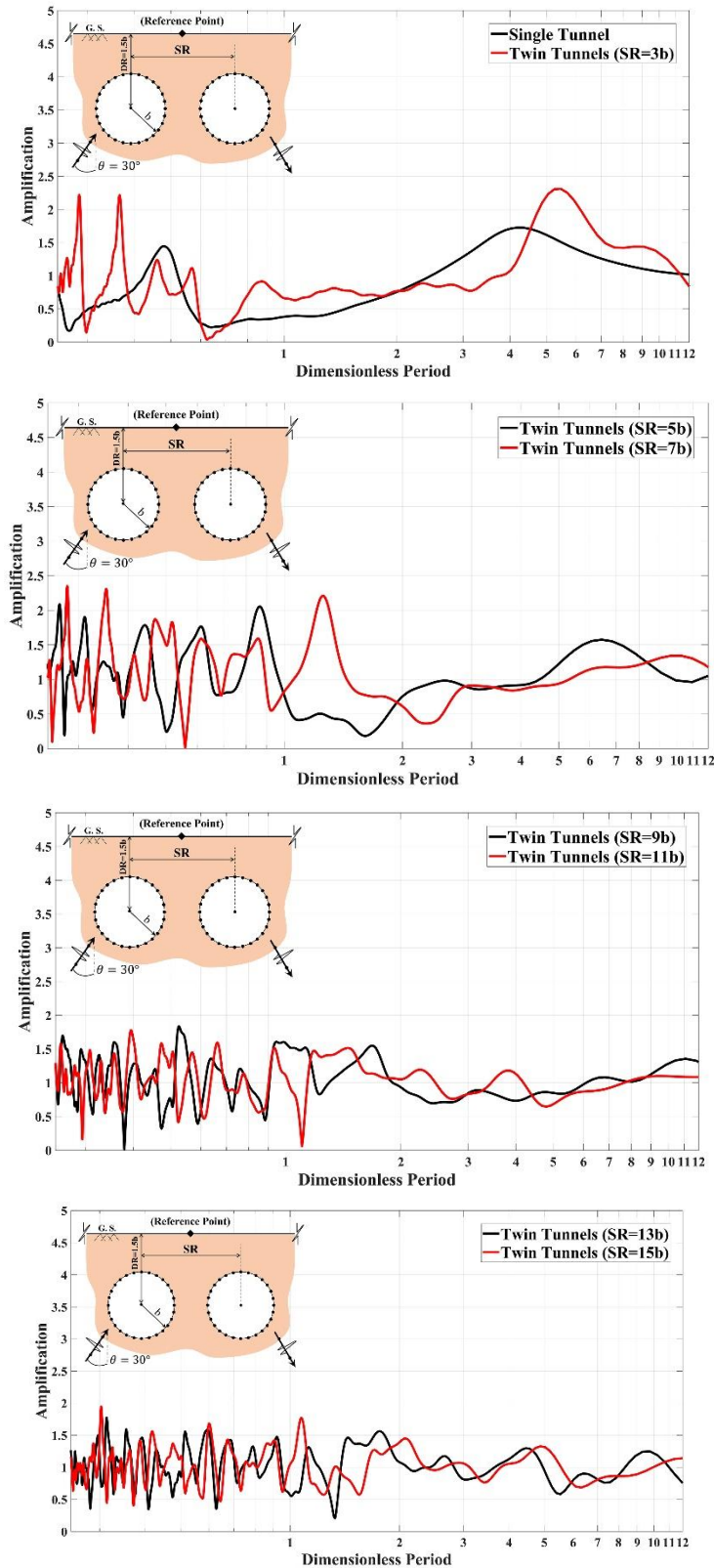
در شکل‌های ۸ تا ۱۱، اثر تغییر نسبت فاصله (SR) مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این نمودارها، بزرگنمایی نقطه‌ی مرجع برحسب پرپود بی‌بُعد برای SR های مختلف دسته‌بندی شده است. در کلیه مدل‌ها، مقدار DR به صورت یکسان و برابر با $1/5b$ فرض شده و برای نسبت فاصله، مقادیر ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۱، ۱۳ و ۱۵ برابر شعاع تونل اعمال شده است.

چنانچه ملاحظه می‌شود، هرچه میزان DR کمتر است و تونل‌ها در عمق کمتر نسبت به سطح زمین واقع شده‌اند، تأثیر آن‌ها بر پاسخ سطح زمین بیشتر شده و مبین بزرگنمایی بحرانی می‌باشند. از سوی دیگر، هرچه میزان DR افزایش می‌یابد، در کلیه زوایای هجوم موج، نتایج به سمت مقدار بزرگنمایی واحد همگرا می‌شود که این موضوع بیانگر اثر تونل‌ها بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین است. آنچه مسلم است، از مقایسه‌ی بزرگنمایی حاصل برای DRهای $1/5b$ و $3b$ با مقادیر DR بالاتر همچون $13b$ و $15b$ ، می‌توان دریافت در مقادیر کمینه‌ی نسبت عمق، نوسان پاسخ به مراتب کمتر بوده و مقادیر بیشینه‌ی بزرگنمایی با اختلاف بیشتری نسبت به پاسخ سطح آزاد زمین حاصل می‌شوند. این در حالی است که در DRهای زیاد، نمودارها نشان دهنده‌ی همگرایی نتایج به سمت مقدار واحد و انطباق بر پاسخ میدان آزاد می‌باشند.

همچنین، میزان نوسان در پاسخ‌ها با افزایش پرپود بی‌بُعد کاهش یافته و در نهایت، به سمت بزرگنمایی واحد همگرا شده‌اند. از سوی دیگر، با مقایسه‌ی حالات مختلف می‌توان مشاهده نمود که در هنگام هجوم امواج به صورت قائم و افقی (شکل‌های ۴ و ۷)، نسبت بزرگنمایی به مقدار $2/5$ رسیده، که حداکثر میزان ثبت شده در حالات مختلف می‌باشد. نتایج بدین ترتیب تفسیر می‌شود که در هنگام ورود امواج به داخل محیط، بخشی از آنها به طور مستقیم به سطح می‌رسند و بخش دیگر از امواج به تونل‌ها برخورد نموده و منعکس می‌شوند.

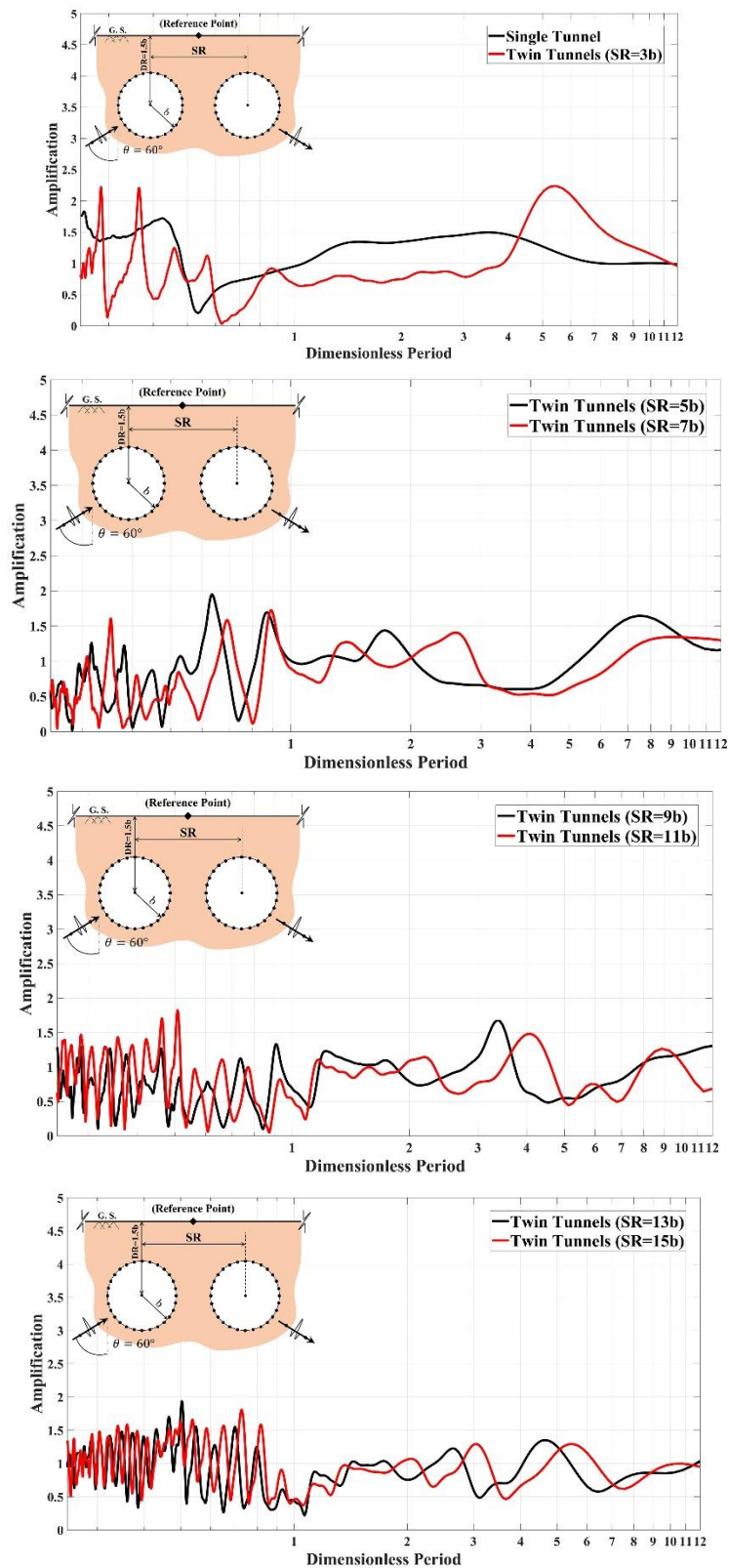


شکل ۸. تأثیر نسبت فاصله (SR) بر بزرگنمایی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع، در برابر هجوم امواج قائم SH

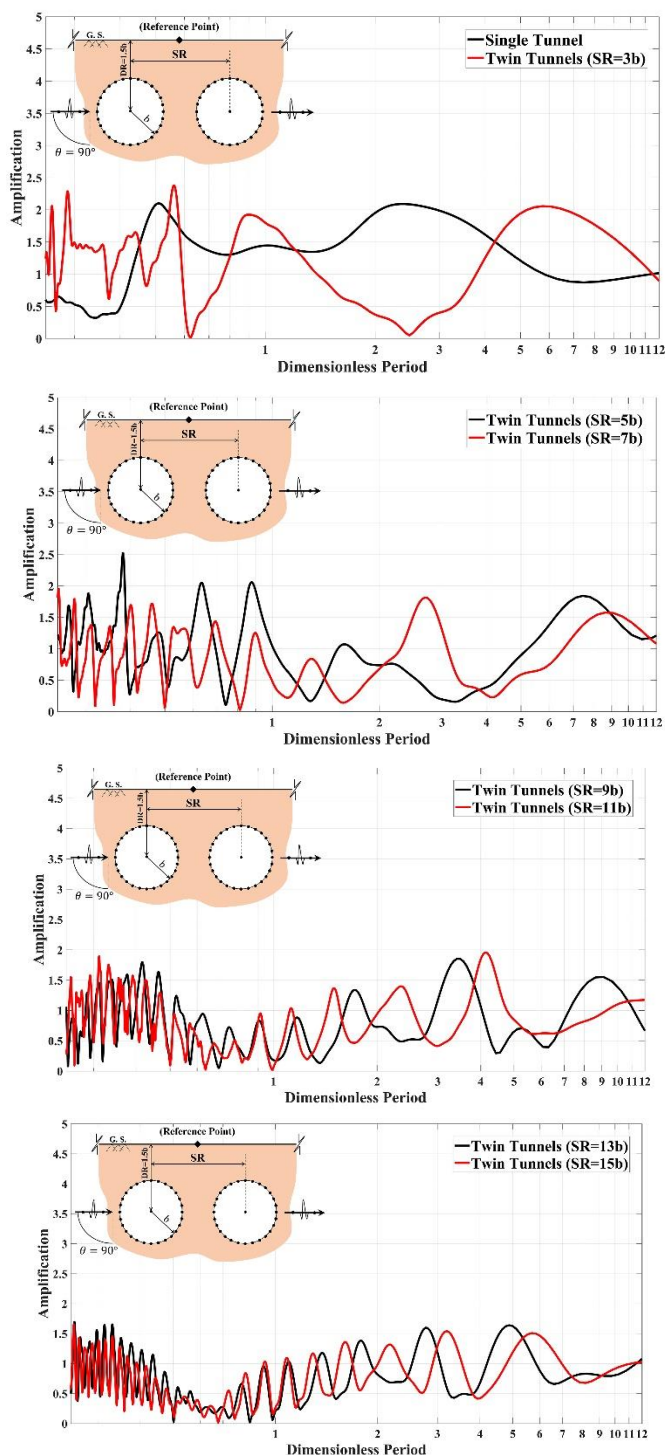


شکل ۹. تأثیر نسبت فاصله (SR) بر بزرگنمایی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع، در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد (θ) ۳۰ درجه

الگوی بزرگنمایی لرزهای سطح زمین در حضور تونل‌های دوقلوی دایره‌ای بدون پوشش در برابر امواج مهاجم SH



شکل ۱۰. تأثیر نسبت فاصله (SR) بر بزرگنمایی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع، در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد θ ۶۰ درجه



شکل ۱۱. تأثیر نسبت فاصله (SR) بر بزرگنمایی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع، در برابر هجوم امواج افقی SH

زمین بیشتر شده که متعاقباً افزایش میزان بزرگنمایی را نتیجه می‌دهد. از سوی دیگر، هرچه فاصله‌ی تونل‌ها از یکدیگر بیشتر می‌شود، با توجه به کاهش اثر پراکنش موج در نزدیکی محل اخذ پاسخ (نقطه‌ی مرجع)، بزرگنمایی

چنانچه مشاهده می‌شود، با افزایش SR، نوسان پاسخ بیشتر شده و دامنه‌ی بزرگنمایی کاهش می‌یابد. در واقع، هرچه تونل‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر هستند اثر انعکاس، خزش و محبوس‌شدگی امواج بین تونل و سطح

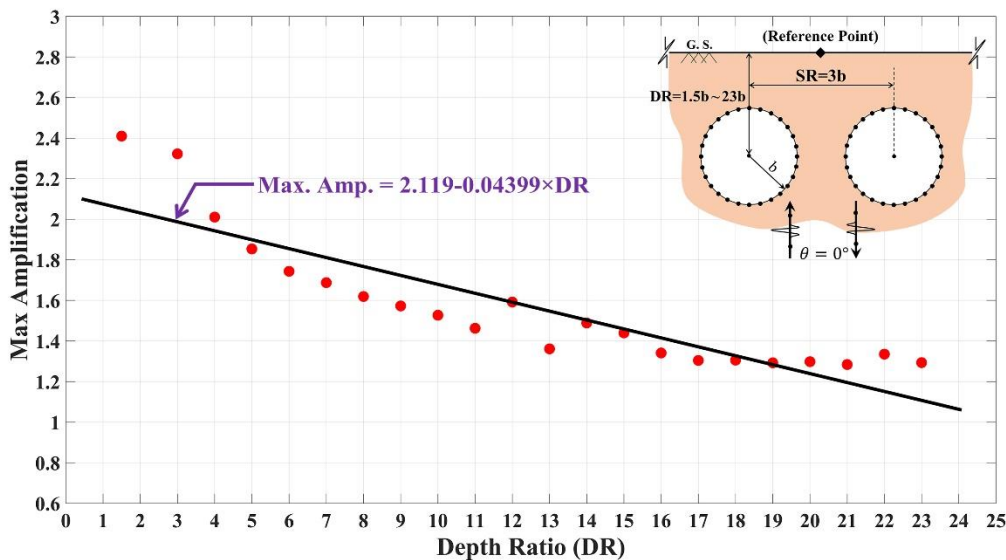
۷. بزرگنمایی حداکثر

در این بخش، به صورت منسجم، به ارائه مقادیر بزرگنمایی بیشینه‌ی به‌دست آمده در سطح زمین برای حالات مختلف پرداخته شده است. سپس، با برازش خطی بر مقادیر مذکور، این امکان فراهم آمده است تا از نتایج این پژوهش در طرح‌های عملیاتی و در راستای تکمیل و تدقیق سازی آئین نامه‌های لرزه‌ای موجود بهره گرفته شود.

۷-۱. بزرگنمایی حداکثر برحسب نسبت عمق

در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵، برازش خطی از حداکثر بزرگنمایی حاصل در حالات مختلف مشروح برای نسبت عمق ارائه شده است.

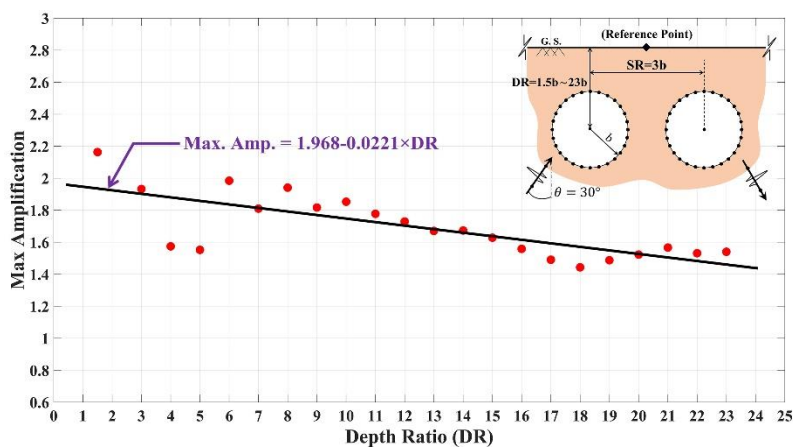
سطح زمین کمتر شده و در نهایت به سمت مقدار واحد همگرا می‌شود. این حالت، به‌ویژه در SR های ۱۳b و ۱۵b بیشتر به چشم می‌خورد. آنچه مسلم است، بزرگنمایی حداکثر برای نسبت فواصل کمینه رخ داده است که تقریباً مقدار ۲/۵ را نشان می‌دهد. در این میان، نتایج حاصل برای هجوم امواج به صورت قائم و افقی، اندکی بیش از سایر زوایای تابش است. در این حالت از برخورد موج، انعکاس و خزیدگی بیشتری در مرز تونل‌ها رخ داده و به دنبال آن اثر تداخل امواج پُررنگ‌تر می‌شود. این در حالی است که در سایر زوایای برخورد، حتی تونل‌ها در نقش مانع برای رسیدن امواج به سطح زمین عمل نموده و منجر به بروز ناحیه‌ی سایه^۱ (تریفوناک، ۱۹۷۳) در پشت جبهه‌ی موج می‌گردند.



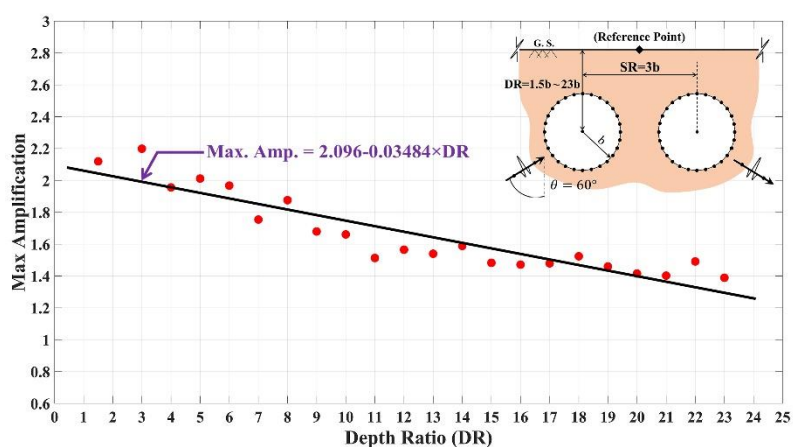
شکل ۱۲. بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع برحسب نسبت عمق (DR)، در برابر هجوم امواج

قائم SH

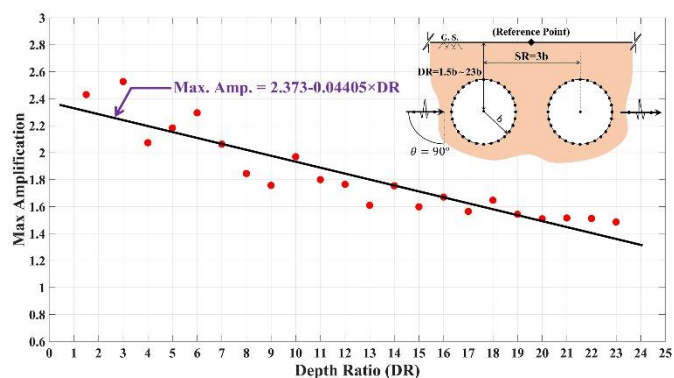
^۱ - Shadow zone



شکل ۱۳. بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع برحسب نسبت عمق (DR)، در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد (θ) ۳۰ درجه



شکل ۱۴. بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع برحسب نسبت عمق (DR)، در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد (θ) ۶۰ درجه



شکل ۱۵. بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع برحسب نسبت عمق (DR)، در برابر هجوم امواج SH افقی

صفر و ۹۰ درجه بیشتر از سایر حالات می‌باشد. همچنین، شیب نمودار کمینه نیز مربوط به زاویه‌ی موج ۳۰ درجه می‌باشد. مقادیر بزرگنمایی حداکثر به همراه پریود بی‌تعد نظیر در نسبت عمق‌های مختلف، در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

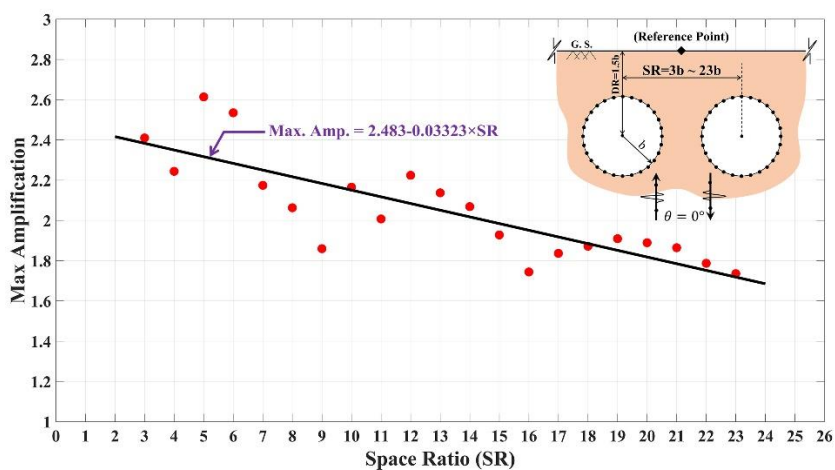
چنانچه مشاهده می‌شود، با افزایش DR، مقادیر بیشینه‌ی بزرگنمایی کاهش می‌یابند و شیب کلیه‌ی خطوط برازش یافته به صورت نزولی و در حال حرکت به سوی بزرگنمایی واحد می‌باشد. اما کاملاً بدیهی است که شیب خطوط برازش یافته برای هجوم موج با زوایای

جدول ۱. بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین برحسب پریود بی‌تعد در نقطه‌ی مرجع براساس نسبت عمق (DR)، در برابر هجوم امواج SH با زوایای برخورد مختلف

زاویه‌ی موج مهاجم		۰ درجه		۳۰ درجه		۶۰ درجه		۹۰ درجه	
مشخصات نقاط نسبت عمق	پریود بی‌تعد	بزرگنمایی بیشینه	پریود بی‌تعد	بزرگنمایی بیشینه	پریود بی‌تعد	بزرگنمایی بیشینه	پریود بی‌تعد	بزرگنمایی بیشینه	
	۱/۵b	۰/۵۶۳۰	۲/۴۱۰۰	۰/۳۶۴۱	۲/۱۶۲۸	۶/۸۲۶۷	۲/۱۱۹۵	۰/۵۶۳۷	۲/۴۳۰۵
۳b	۰/۲۸۹۸	۲/۳۲۲۶	۰/۷۵۸۵	۱/۹۳۲۳	۱/۰۴۰۳	۲/۱۹۸۸	۱/۹۷۴۰	۲/۵۲۶۸	
۵b	۳/۷۷۶۵	۱/۸۵۳۹	۳/۷۲۳۶	۱/۵۵۲۱	۰/۳۰۱۴	۲/۰۱۱۵	۰/۳۲۲۵	۲/۱۸۲۸	
۷b	۰/۲۵۵۴	۱/۶۸۷۷	۰/۵۰۲۰	۱/۸۰۹۷	۰/۳۸۷۳	۱/۷۵۴۳	۱/۹۳۴۲	۲/۰۶۳۰	
۹b	۳/۸۴۶۰	۱/۵۷۳۰	۰/۷۹۰۷	۱/۸۱۶۶	۱/۳۰۵۱	۱/۶۷۹۳	۱/۵۶۹۳	۱/۷۵۷۰	
۱۱b	۳/۲۵۸۲	۱/۴۶۲۹	۰/۸۱۷۳	۱/۷۷۷۲	۱/۳۳۲۰	۱/۵۱۲۹	۱/۹۳۳۲	۱/۷۹۹۸	
۱۳b	۵/۵۶۲۵	۱/۳۶۱۳	۰/۷۶۷۵	۱/۶۷۰۴	۰/۳۰۸۱	۱/۵۳۹۵	۱/۶۸۹۱	۱/۶۰۹۷	
۱۵b	۱۰/۰۳۹۲	۱/۴۳۹۹	۰/۸۹۳۲	۱/۶۲۸۰	۰/۶۵۰۲	۱/۴۸۲۵	۱/۹۲۹۳	۱/۵۹۸۵	

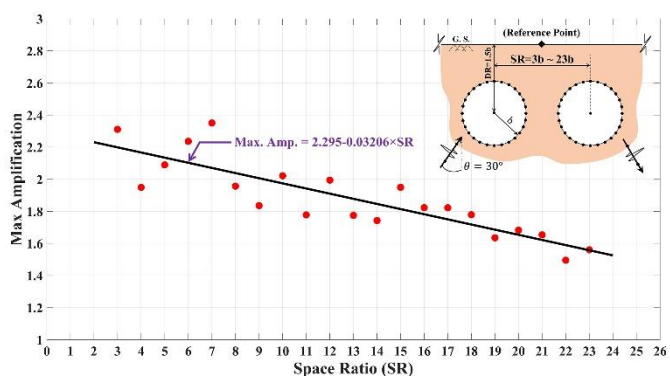
۷-۲. بزرگنمایی حداکثر برحسب نسبت فاصله

مقادیر بیشینه‌ی بزرگنمایی ناشی از تغییر نسبت فاصله در زوایای مختلف موج، تعیین شده و در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ در کنار یکدیگر قرار داده شده است.



شکل ۱۶. بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع برحسب نسبت فاصله (SR)، در برابر هجوم امواج

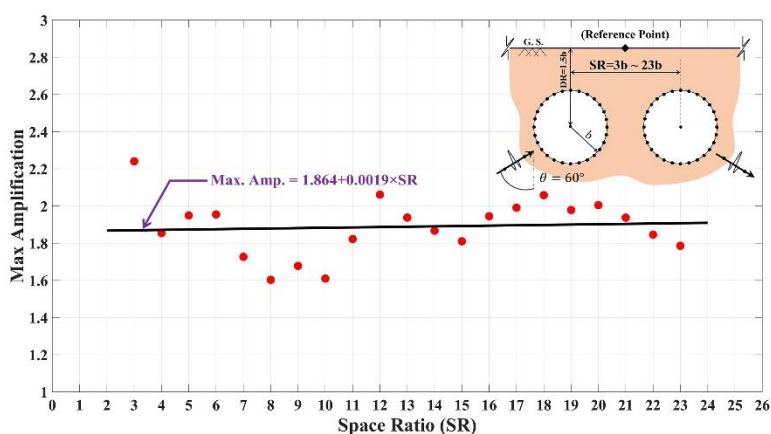
قائم SH



شکل ۱۷. بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع برحسب نسبت فاصله (SR)، در برابر هجوم امواج

SH

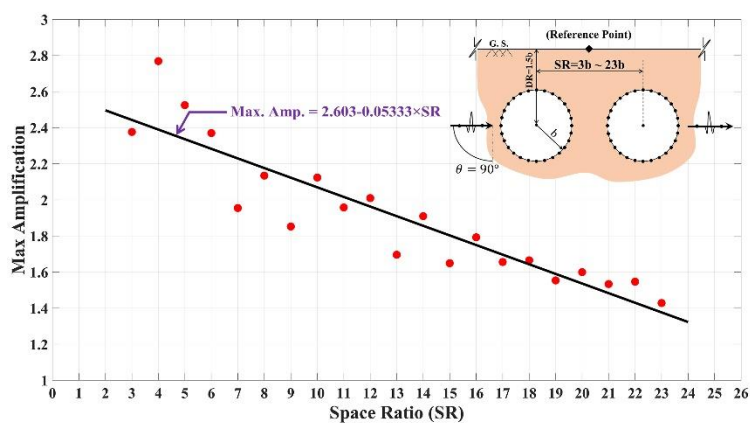
با زاویه‌ی برخورد (θ) ۳۰ درجه



شکل ۱۸. بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع برحسب نسبت فاصله (SR)، در برابر هجوم امواج

SH

با زاویه‌ی برخورد (θ) ۶۰ درجه



شکل ۱۹. بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع برحسب نسبت فاصله (SR)، در برابر هجوم امواج

افقی SH

SH با زاویه‌ی ۶۰ درجه، تغییر فاصله‌ی بین تونل‌ها آن چنان که باید بزرگنمایی سطح زمین را متأثر نمی‌سازد. علت این موضوع شاید از عدم برخورد مستقیم امواج و کاهش انرژی آن در اثر تداخل خزشی قابل توجه باشد. برخلاف حالت مذکور، در حالت هجوم امواج افقی، بزرگنمایی در فواصل کم تونل‌ها دارای بیشترین مقدار است اما با افزایش SR، روند نزولی بیشتری در مقایسه با سایر زوایای تابش امواج تجربه می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش فاصله‌ی تونل و دور شدن از نقطه‌ی مرجع، پدیده‌ی ناحیه‌ی سایه (تریفوناک، ۱۹۷۳) را به صورت پُررنگ‌تر مطرح می‌سازد و در نهایت، پاسخ‌ها با سرعت بیشتری به سمت مقدار واحد همگرا می‌شوند. لازم به ذکر است که آنچه در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ ارائه شد، به صورت جدول ۲ در پیوندهای بی‌بُعد نظیر قابل مشاهده می‌باشد.

مشابه قبل، با برآزش خطی از این مقادیر، معادلات مربوطه برحسب نسبت فاصله حاصل شده است. از مقایسه‌ی شیب کمتر نمودار به دست آمده برحسب تغییرات نسبت فاصله در مقابل تغییرات نسبت عمق و در حالت هجوم امواج غیر افقی می‌توان دریافت که تأثیر استقرار عمودی تونل نسبت به موقعیت افقی آن بیشتر است و افزایش نسبت عمق منجر به افزایش شیب خطوط برآزش می‌شود. از نگاه دیگر، شیب کم نمودارهای مربوط به نسبت فاصله (شکل‌های ۱۶ تا ۱۹)، از پُرآکنندگی زیاد نقاط بیشینه‌ی بزرگنمایی نیز قابل توجیه است. با توجه به استقرار تونل‌ها در عمق کمینه‌ی ۱/۵b، ازدیاد فاصله‌ی بین تونل‌ها امکان فرار امواج و عدم تداخل آن را با دیواره فراهم ساخته و سبب شکل‌گیری بزرگنمایی کم در مقایسه با تغییرات نسبت عمق می‌شود. از نکات قابل توجه خط برآزش یافته شکل ۱۸ آن است که تقریباً یک خط افقی با شیب بسیار اندک را مبین می‌سازد. چنانچه مشاهده می‌شود، در حالت هجوم امواج

جدول ۲. بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین برحسب پیوند بی‌بُعد در نقطه‌ی مرجع براساس نسبت فاصله (SR)، در برابر هجوم امواج مهاجم SH با زوایای برخورد مختلف

زاویه‌ی موج مهاجم		درجه ۰		درجه ۳۰		درجه ۶۰		درجه ۹۰	
مشخصات نقاط نسبت فاصله	پیوند	بزرگنمایی	پیوند	بزرگنمایی	پیوند	بزرگنمایی	پیوند	بزرگنمایی	پیوند
	بی‌بُعد	بیشینه	بی‌بُعد	بیشینه	بی‌بُعد	بیشینه	بی‌بُعد	بیشینه	بی‌بُعد
۳b	۰/۵۶۳۰	۲/۴۱۰۰	۵/۴۶۱۳	۲/۳۱۱۰	۵/۴۶۱۲	۲/۲۴۰۴	۵/۴۶۱۲	۰/۵۶۳۰	۲/۳۷۶۴
۵b	۱/۶۳۰۲	۲/۶۱۳۸	۰/۲۶۷۷	۲/۰۸۹۴	۰/۶۳۵۰	۱/۹۴۹۵	۰/۶۳۵۰	۰/۳۸۱۰	۲/۵۲۵۱
۷b	۲/۴۲۷۳	۲/۱۷۴۵	۰/۲۸۰۱	۲/۳۵۰۴	۰/۸۹۳۲	۱/۷۲۶۳	۰/۸۹۳۲	۰/۲۵۱۳	۱/۹۵۴۸
۹b	۰/۲۶۳۸	۱/۸۵۹۷	۰/۵۲۵۱	۱/۸۳۵۶	۳/۳۵۷۴	۱/۶۷۷۷	۳/۳۵۷۴	۳/۴۱۳۳	۱/۸۵۲۳
۱۱b	۱/۴۹۶۳	۲/۰۰۷۶	۰/۳۹۳۶	۱/۷۷۷۸	۰/۵۰۸۲	۱/۸۲۲۲	۰/۵۰۸۲	۴/۱۳۱۹	۱/۹۵۸۰
۱۳b	۱/۷۹۶۵	۲/۱۳۷۲	۰/۳۱۳۱	۱/۷۷۴۸	۰/۵۰۳۲	۱/۹۳۷۵	۰/۵۰۳۲	۰/۲۵۶۰	۱/۶۹۵۶
۱۵b	۲/۰۶۰۴	۱/۹۲۸۰	۰/۳۰۲۶	۱/۹۴۹۷	۰/۷۲۶۲	۱/۸۱۰۰	۰/۷۲۶۲	۰/۲۵۴۷	۱/۶۴۸۹

۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

امواج مهاجم SH ارائه شد. برای این منظور، ابتدا روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان جهت مدل‌سازی و انجام تحلیل‌های عددی توسعه داده شد. پس از عددی‌سازی روش مذکور در توسعه‌ی الگوریتم

در این مقاله، الگوی بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل‌های دوقلوی دایره‌ای بدون پوشش در برابر

با ۱/۵b و ۳b، بیشترین ضریب بزرگنمایی به ترتیب به میزان ۲/۴ و ۲/۵ برابر پاسخ میدان آزاد تجربه شد.

۴- با علم بر ازدیاد انعکاس و تداخل امواج مابین تونل و سطح زمین در نسبت فاصله‌ی کمینه (یعنی ۳b و ۵b)، حداکثر میزان بزرگنمایی به ترتیب برابر ۲/۴ و ۲/۶ برابر پاسخ میدان آزاد در هجوم امواج قائم مشهود بود.

۵- نرخ کاهش بزرگنمایی با افزایش نسبت عمق (DR) در زوایای تابش صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۳۸، ۱۵/۷۵، ۳۲/۵۸ و ۳۶/۷۴ درصد حاصل شد که بدین ترتیب تأثیر افزایش عمق تونل‌ها در کوچکنمایی پاسخ سطح زمین در هجوم موج قائم حاکم شد.

۶- نرخ کاهش بزرگنمایی با افزایش نسبت فاصله (SR) در زوایای تابش صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۲۰، ۱۵/۶۳، ۱۹/۲۱ و ۳۰/۶۱ درصد تعیین شد که بدین ترتیب تأثیر افزایش فاصله‌ی تونل‌ها در کوچکنمایی پاسخ سطح زمین در هجوم موج افقی حاکم شد.

۷- از مقایسه‌ی نتایج مربوط به نسبت‌های عمق و فاصله مشاهده شد که تأثیر نسبت عمق در روند کاهش پاسخ مثبت‌تر بوده و خطوط برازش یافته با شیب بیشتر نازل شدند. به عبارت دیگر، افزایش نسبت عمق، بر کاهش انعکاس امواج میان تونل و سطح زمین مؤثرتر بود.

داس‌بم و تحلیل یک مثال صحت‌سنجی، مشاهده گردید که روش پیشنهاد شده از قابلیت مناسب در تحلیل لرزه‌ای تونل‌های دوقلوی زیرزمینی برخوردار است. در ادامه، با در نظر گرفتن برخی پارامترهای کلیدی در مدل‌ها از جمله نسبت عمق و فاصله‌ی مابین تونل‌ها، زاویه‌ی موج و فرکانس پاسخ، در قالب یک مطالعه‌ی عددی، نتایج حاصل مورد حساسیت‌سنجی واقع شد. در نهایت، با تعیین بزرگنمایی بیشینه در حالات مختلف، نتایج کلیه‌ی تحلیل‌ها جمع‌بندی شده و کاربرد مهندسی آنها ارائه گردید. نتایج حاصل از مطالعه‌ی عددی را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی نمود:

۱- چنانچه مشاهده شد، با افزایش نسبت عمق، بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین تا آنجا کاهش یافت که از عمق ۱۵b به بعد، تأثیر حضور تونل‌های دوقلو بر سطح زمین از بین رفته و بزرگنمایی حاصل به سوی پاسخ سطح آزاد زمین همگرا شد.

۲- با افزایش نسبت عمق، تعداد نوسان در پاسخ فزونی یافت؛ اما کاهش در دامنه همواره مشهود شد. به عبارت دیگر، در مقادیر کمینه‌ی نسبت عمق، مقادیر بیشینه‌ی بزرگنمایی با اختلاف بیشتر نسبت به پاسخ سطح آزاد زمین حاصل شد.

۳- با توجه به محبوس‌شدگی و خزش بیشینه‌ی امواج در حالت هجوم امواج افقی و قائم، در نسبت عمق‌های برابر

۹. مراجع

- Aki, K. 1988. "Local site effects and strong ground motion". In: Proceedings of the Special Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics 2, American Society of Civil Engineers, Park City, UT.
- Ahmad, S. and Banerjee, P. K. 1988. "Multi-domain BEM for two-dimensional problems of elastodynamics". Int. J. Numer. Meth. Eng., 26(4): 891-911.
- Ausilio, E., Conte, E. and Dente, G. 2008. "Seismic response of alluvial valleys to SH-waves". In: Seismic Engineering Conference, AIP Conference Proceedings, 1020: 199-206.
- Belytschko, T. and Chang, H. S. 1988. "Simplified direct time integration boundary element method". ASCE, J. Eng. Mech., 114(1): 117-134.
- Brebbia, C. A. and Dominguez, J. 1989. "Boundary elements: An introductory course". WIT Press, Southampton, UK.
- Benites, R., Aki, K. and Yomigida, K. 1992. "Multiple scattering of SH-waves in 2D media with many cavities". Pure Appl. Geophys., 138: 353-390.
- Dravinski, M. 1983. "Ground motion amplification due to elastic inclusions in a half-space". Earthq. Eng. Struct. Dyn., 11: 313-335.

- Gustavo, J., Bobet, A. and Ramirez, J. 2006. "Evaluation of soil-structure interaction and structural collapse in Daikai subway station during Kobe earthquake". *ACI Struct J.*, 103(1): 113-122.
- Hirai, H. 1988. "Analysis of transient response of SH-wave scattering in a half space by the boundary element method". *Eng. Anal.*, 5(4): 189-194.
- Israil, A. S. M. and Banerjee, P. K. 1990a. "Advanced development of time-domain BEM for two-dimensional scalar wave propagation". *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 29(5): 1003-1020.
- Israil, A. S. M. and Banerjee, P. K. 1990b. "Advanced time-domain formulation of BEM for two-dimensional transient elastodynamics". *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 29(7):1421-1440.
- Keller, J. B. 1962. "Geometrical theory of diffraction". *J. Opt. Soc. Am.* 52: 116-130.
- Kamalian, M., Jafari, M. K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A. and Gatmiri, B. 2006. "Time-domain two dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid FE/BE method". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 26(8): 753-765.
- Kazemeini, M. J., Haghshenas, E. and Kamalian, M. 2015. "Experimental evaluation of seismic site response over and nearby underground cavities (study of subway tunnel in city of Karaj, Iran)". *Iran. J. Sci. Tech., Trans. Civ. Eng.*, 39(2): 319-332.
- Lee, V. W. 1977. "The deformations near circular underground cavity subjected to incident plane SH-waves". In: *Proceedings of the Conference on Application of Computer Methods in Engineering*, Los Angeles, California, 9: 51-62.
- Luco, J. E. and De Barros, F. C. P. 1994. "Dynamic displacements and stresses in the vicinity of a cylindrical cavity embedded in a half-space". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 23: 321-340.
- Ohtsu, M. and Uesugi, S. 1985. "Analysis of SH-wave scattering in a half space and its applications to seismic responses of geological structures". *Eng. Anal.* 2(4): 198-204.
- O'Rourke, T. D., Goh, S. H., Menkiti, C. O. and Mair, R. J. 2000. "Highway tunnel performance during the 1999 Duzce earthquake". *Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Oughourlian, Istanbul, Turkey.
- Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J. and Jafari, M. K. 2013. "Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM". *Geophys. J. Int.*, 194: 1849-1865.
- Panji, M. and Mojtazadeh-Hasanlouei, S. 2018. "Time-history responses on the surface by regularly distributed enormous embedded cavities: Incident SH-waves". *Earthq. Sci.*, 31: 1-17.
- Ricker, N. 1953. "The form and laws of propagation of seismic wavelet". *Geophys.*, 18(1): 10-40.
- Reinoso, E., Wrobel, L. C. and Power, H. 1993. "Preliminary results of the modeling of the Mexico City valley with a two-dimensional boundary element method for the scattering of SH-waves". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 12(8): 457-468.
- Sgarlato, G., Lombardo, G. and Rigano, R. 2011. "Evaluation of seismic site response nearby underground cavities using earthquake and ambient noise recordings: A case study in Catania area, Italy". *Eng. Geol.*, 122(3): 281-291.
- Trifunac, M. D. 1973. "Scattering of plane SH-waves by a semi cylindrical canyon". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 3(1): 267-281.
- Wang, W. and Wang, T. 2001. "Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake". *Tunn. Underg. Space Tech.*, 16: 133-150.