تاریخ دریافت: ۹۶/۰۳/۰۲ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۹/۰۸

مر رنگی سیک بیشید سال پنجم، شماره اول، بهار ۱۳۹۷ پیشید

چکیدہ

در این مقاله روش اجرای مرزی نیم صفحه در حوزهی زمان برای تحلیل لرزهای و تعیین پاسخ سطح زمین در حضور حفره پوشش دار زیرزمینی دایرهای در برابر امواج مهاجم برونصفحهی SH به کار گرفته شده است. با بهره گیری از روش مزبور تنها لازم است مرزهای پیرامون پوشش و حفره المان بندی و گسسته سازی شوند. مبتنی بر روش زیر سازه سازی و تفکیک مدل به یک نيم صفحه حفرهدار و يک رينگ بسته توير، عناصر ماتريس هاي مورد نظر برای هر دو محیط در هر گام زمانی تعیین می شود. در نهایت با در نظر گرفتن شرایط پیوستگی تنش و تغییر مکان در وجه میانی پوشش با فضای پیرامون، ماتریس کوپل نهایی برای تعیین کلیه مقادیر مجهول مرزی اعم از تغییر مکان و تنش قابل حصول بوده و پس از آن بهراحتی پاسخ های نقاط درونی به کمک مقادیر مزبور محاسبه می شود. به عنوان مطالعه عددی و با فرض یک تونل دايرهاي پوشش دار بتني مدفون در يک لايه خاک رس سيلت دار، به بررسي برخمي پارامترهاي حاكم از قبيل ضخامت پوشش، زاويه موج مهاجم و فرکانس پاسخ پرداخته شده است. نتایج نشان میدهـد الگـوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور حفره پوششدار زیرزمینمی متأثر از تمامی پارامترهای مزبور ميباشد.

واژگان کلیدی: روش اجزای مرزی نیم صفحه، حوزهی زمان، امواج SH، حفره پوششدار دایرهای، تحلیل لرزهای، پاسخ زمین.

پراکنش امواج برون صفحهی SH ناشی از حفره پوشش دار دایرهای

مهدی پنجی (نویسنده مسئول) استادیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان m.panji@iauz.ac.ir

بهمن انصاري

کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان

۱ – مقدمه

توسعه روز افزون شهرنشینی و نیاز به روش های مختلف انتقال شریان های حیاتی نظیر آب، برق و حمل ونقل به خصوص در شهرهای بزرگ موجب شده است تا استفاده از تونل های زیرزمینی به امری اجتناب ناپذیر تبدیل شود. به همین منظور شناخت و درک صحیح رفتار این قبیل سازه ها همواره از نیازهای اساسی به شمار میرود. اهمیت این رفتار زمانی فزونی می یابد که سازه های مذکور تحت تأثیر بارهای لرزه ای قرار گیرند. تاریخچه حدود نیم قرن میرسد. در مطالعه آریمن و مالسکی [۱] به برخی تحقیقات انجام شده تا سال ۱۹۸۱ پیرامون تحلیل لرزه ای زمین در حضور تونل های زیرسطحی اشاره شده است. جدا از روش های آزمایشگاهی و صحرایی، به طور کلی روش های

محاسباتی این مسائل را می توان در سه دسته روش تحلیلی، نیمه تحلیلی و عددی تقسیمبندی نمود [۲].

تحلیل پراکنش امواج و تعیین پاسخ سطح زمین در حضور تونل های بدون پوشش و پوشش دار زیرزمینی به کمک روش های تحلیلی و نیمه تحلیلی توسط پژوهشگران مختلف توسعه داده شده است. لی [۳]، داتا و شاه [۴] و لی و همکاران [۵] از جمله افرادی هستند که تونل های بدون پوشش را تحت اثر امواج لرزهای با استفاده از روش های تحلیلی مورد مطالعه قرار دادهاند. پاسخ تحلیلی یک محیط الاستیک خطی مشتمل بر تونل های پوشش دار توسط لی و تریفوناک [۶]، بالندرا و همکاران [۷] و اسمرزینی و همکاران [۸] ارائه شده است. پاسخ تونل های پوشش دار مدفون در محیط های



چندفازه به کمک روش های تحلیلی توسط شی و همکاران [۹] و هاشمینی زاد و کاظمیراد [۱۰] توسعه داده شده است. علاوه بر روش های تحلیلی، پیرامون مدلسازی تونل های پوشش دار مدفون در محیط الاستیک خطی محققانی چون داتا و همکاران [۱۱]، مور و گوان [۱۲]، و مانو گیان [۱۳] از روش های نیمه تحلیلی بهره بردهاند.

اگرچه پاسخ حاصل از روش های تحلیلی و نیمــهتحلیلــی از دقت بالایی برخـوردار است، لیکن وجـود شکلهـای مختلف توپو گرافی و تونلهای زیرزمینی در طبیعت موجب می شود تا از این روش ها نتوان در بیشتر مسائل واقعی بهره جست. لذا توسعه روشهاي عددي به عنوان راه حلى براي اين موضوع به نظر میرسد. در حالت کلی روش های عبددی به دو نوع حجمی و مرزی قابل تقسیم بندی است. از جمله مشخصه های روش های حجمی که روش اجزای محدود (FEM) یا روش اختلاف محدود (FDM) از مهم ترین آنها می باشد می توان به فرمول بندی ساده و نیاز به گسستهسازی تمام محیط مسئله اشاره کرد. در ادبیات فنبی مطالعات مختلف در استفاده از روش های حجمی برای تحلیل لرزه ای حفره های بدون پوشش و پوشش دار یافت می شود که از مهم ترین آنها می توان به بشارت و همكاران [۱۴]، اسماعیلی و همكاران [۱۵] و فاچیولی و همکاران [۱۶] اشاره نمود. از آنجا که در روش های حجمی مستلزم به گسستهسازی تمام محیط مورد مطالعه میباشـد لـذا در مسائل نامحدود و نيمه نامحدود ازدياد المان ها موجب كاهش سرعت و به تبع سبب کمینهسازی دقت محاسبات خواهد شد. بـه همین دلیل در دهههای اخیر توجه ویژه به روشهای مرزی از جمله روش اجزای مرزی (BEM) افزایش یافته است. در مطالعه بســكوس [١٧] و اســتاموس و بسـكوس [١٨] بــه برخــي از کاربردهای روش اجزای مرزی در تحلیل سازه های زیرزمینی اشاره شده است.

روش اجزای مرزی در دو محیط کامل و نیم صفحه قابلیت فرمول بندی دارد. در روش اجزای مرزی محیط کامل برای

مدلسازی تونل های زیرزمینی نیاز است نه تنها مرز سطح زمین، بلکه مرزهای درونی و بیرونی حفره نیز گسسته سازی شوند [۱۹]. روش اجزای مرزی محیط کامل در حالت استاتیکی توسط كراچ و استارفيلد [۲۰]، يانگ و استرلينگ [۲۱]، زيائو و كارتر [۲۲] و پنجی و همکاران [۲۳-۲۴] برای مدلسازی توناهای زیرزمینی استفاده شده است. همچنین این روش برای تحلیل لرزهای پاسخ سطح زمین مشتمل بر تونیل های زیرزمینی پوششدار و بدون پوشش توسط کاتیس و همکاران [۲۵]، لیـو و ليو [۲۶]، لوكو و ديباروز [۲۷]، مانوليس و بسكوس [۲۸] و پاروانوا و همکاران [۲۹] به کار گرفته شده است. اگر شرایط تنش آزاد سطح صاف زمین در فرمولبندی روش اجزای مرزی اعمال شود، روش اجزای مرزی نیم صفحه حاصل خواهد شد [۳۰]. با انجام این عمل اگرچه فرمولبندی پیچیده تر خواهد شد، ولی دقت و فرآیند مدلسازی بهبود چشمگیر می یابد. در استفاده از این روش تنها مرزهای اطراف تونیلهای زیرزمینی نیازمند گسسته سازی است. روش اجزای مرزی نیم صفحه در دو حالت استاتیکی و دینامیکی توسعه داده شده است. محققان مختلف از این روش در حالت استاتیکی برای تحلیل مسائل نیمصفحه در حضور تونل های زیرزمینی مستقر در محیطهای ایزوتروپ و غیر ایزوتروپ استفاده کردهاند (دونگ و همکاران [۳۱]، دونگ و لو [۳۲]، پنجی و انصاری [۳۳]، تلس و بربیا [۳۴] و یه و ساوادا [۳۵]). روش اجزای مرزی نیمصفحه در حالت دینامیکی و در حوزه فركانس براى تحليل تونل هاى زيرزميني به كار گرفته شده است که از جمله این تحقیقات می توان به با و یین [۳۶] و بنیتس و همکاران [۳۷] اشاره نمود. تحلیل مسائل با هندسه وابسته به زمان و ترکیب روش اجزای مرزی نیمصفحه با سایر روش های عددی، شاید تنها در حوزهی زمان امکان پذیر باشد. اکثر مطالعات انجام شده در پیرامون روش اجزای مرزی در حوزهی زمان، در محیط کامل و بهمنظور مدلسازی توپو گرافی سطحی و تونل های بدون پوشش بوده است (علیالهی و همکاران [۳۸]، كماليان و همكاران [۳۹-۴۱] و تاكميا و فوجيوارا [۴۲]). بر



پارامترها از قبیل ضخامت پوشش، زاویه موج و فرکانس پاسخ بر روی پاسخ لرزهای سطح زمین در حضور یک تونل دایرهای پوشش دار پرداخته شده است. نمایش سادگی و کارایی روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزهی زمان و دقت بالای آن در مدلسازی تونل های پوشش دار زیرزمینی مدور از مهم ترین اهداف این مقاله به شمار می رود.

۲- بیان مسئله

یک محیط نیم صفحه ایزوتروپ الاستیک خطی شامل یک حفره پوششدار زیرزمینی مدور در نظر گرفته می شود (شکل ۱). با فرض اینکه پوشش و محیط اطراف تونل در تماس کامل با هم هستند، معادله موج و شرایط مرزی حاکم بر سطح زمین به صورت زیر ارائه می شود [۴۹]:



اساس آنچه از ادبیات فنی مشخص است تحقیقات اندک در استفاده از روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزهی زمان برای تحلیل پراکنش امواج و تعیین پاسخ سطح زمین در حضور توپو گرافی سطحی و حفره بدون پوشش انجام گرفته است (بلیتسکو و چانگ [۳۳]، هیرای [۴۴]، پنجی و همکاران [۳۳، (بلیتسکو و چانگ [۴۳]، هیرای [۴۸]، پنجی و همکاران (۳۳، برای تحلیل لرزهای سطح زمین در حضور حفرات پوشش دار زیرزمینی به شکل دلخواه توسعه دهند.

در این مقاله روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزه ی زمان برای تحلیل لرزهای پاسخ سطح زمین مشتمل بر تونل های پوشش دار زیرسطحی دایره ای در برابر امواج مهاجم مایل SH به کار گرفته شده است. در این راستا مدل ناهمگن تونل پوشش دار به دو زیرناحیه همگن تبدیل شده و پس از اعمال روش اجزای مرزی نیم صفحه برای هر بخش، ضرایب تأثیر ماتریس های مورد نظر به دست می آیند. در نهایت با اعمال شرایط پیوستگی و ساز گاری در وجه مشتر ک پوشش، معادله نهایی کوپل برای تعیین مقادیر مجهول مرزی حاصل می شود. روش مزبور در یک برنامه کامپیوتری با نام MISBEM [۳۳] گردآوری شده و صحت و کارایی آن با برخی مطالعات موجود در ادبیات فنی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه نیز با



شکل (۱): مدل اجزای مرزی نیمصفحه در حوزهی زمان برای حفره پوششدار مدفون.



در روابط فوق (x,y,t) و (b(x,y,t) به تر تیب معرف تغییر مکان برونصفحه و نیروی حجمی در نقطه (x,y) و در زمان t هستند. همچنین c سرعت موج برشی برابر با $\gamma / \mu / \alpha$ میباشد که در آن μ مدول برشی و ρ چگالی جرمی است. در این روابط n بردار نرمال عمود بر سطح است. همان گونه که در شکل (۱) دیده می شود بر اساس روش زیرسازه سازی، مدل ناهمگن به دو زیرناحیه همگن تجزیه شده است. بخش اول شامل یک محیط نیم صفحه تکلایه مشتمل بر حفره و بخش دوم مبین یک محیط حلقه شکل بسته است. به منظور حل این مسئله نیاز است تا روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزهی زمان بر هر محیط اعمال شود. در شکل (۱) نحوه گسسته سازی محیط اطراف حفره نشان داده شده است.

۳- روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزهی زمان

حلهای اساسی گذرای روش اجزای مرزی نیمصفحه از جوابهای تکین معادله (۱) با اعمال شرایط مرزی (۲) قابل محاسبه است. این حلها در مطالعهی پنجی و همکاران [۳۰] ارائه شده است. همچنین، کاربرد روش اجزای مرزی الاستواستاتیک نیم صفحه برای تحلیل تونل های پوشش دار زیرزمینی در پژوهش پنجی و انصاری [۳۳] قابل مشاهده است.

۳-۱- معادله انتگرال مرزی

با صرف نظر از اثر شرایط اولیه و نیروهای وزنی، شکل مستقیم معادله انتگرال مرزی (BIE) در حوزهی زمان از اعمال انتگرال باقیمانده های وزن دار به معادله (۱) قابل حصول است [۰۵-۵۱]. در حالت پراکنش موج معادله انتگرال مرزی به صورت زیر اصلاح می شود [۵۲-۵۳]:

 $c(\xi)u(\xi,t) = \int_{\Gamma} \begin{cases} \int_{0}^{t} [u^{*}(x,t;\xi,\tau).q(x,\tau) - \int_{0}^{t} d\Gamma(x) + u^{ff}(\xi,t) & (\Upsilon) \end{cases} d\Gamma(x) + u^{ff}(\xi,t) & (\Upsilon) \end{cases}$

در رابطه فوق *u و *q بهترتیب مبین حل های اساسی نیم صفحه در حوزهی زمان برای مؤلفه های تغییر مکان و تنش مرزی در نقطه x و در زمان t در اثر اعمال یک ضربه واحد در نقطه ۶ و

در زمان ت میباشد [۳۰]. همچنین در این معادلـه u و q بـهترتیب تغییر مکان و تنش مرزی هستند. (۲(x) معرف مرز محیط، (٤)c ضرایب هندسی و u^{ff} معرف تغییر مکان میدان آزاد است.

۳-۲- گسستهسازی انتگرال مرزی

به منظور حل معادله انتگرال مرزی لازم است تا محور زمان و مرزهای جسم گسستهسازی شوند. با گسستهسازی محور زمان به N بازه زمانی به طول (Δt(t=NΔt انتگرال زمان به صورت تحلیلی قابل انتگرال گیری است. با در نظر گیری تابع شکل خطی برای محور زمان معادله انتگرال مرزی به شکل زیر تبدیل خواهد شد:

$$\begin{split} & c(\xi) u^{^{N}}(\xi) = \\ & \sum_{n=1}^{^{N}} \int_{\Gamma} \left(\begin{matrix} [U_{1}^{^{N-n+1}}(x,\xi) + U_{2}^{^{N-n}}(x,\xi)] q^{^{n}}(x) - \\ [Q_{1}^{^{N-n+1}}(x,\xi) + Q_{2}^{^{N-n}}(x,\xi)] u^{^{n}}(x) \end{matrix} \right) d\Gamma(x) \, (\texttt{F}) \\ & + u^{^{\mathrm{ff},N}}(\xi) \end{split}$$

در رابطه فوق M معرف تعداد کل المانهای مرزی، Γ_m مرز المان المان الم، ($N_{\alpha}(\kappa)$ توابع شکل درجه دو بر حسب مختصات محلی ($N_{\alpha}(\kappa)$ و L ماتریس تبدیل ژاکوبین میباشد. انتگرالهای فوق در حالت غیرمنفرد و منفرد بهترتیب به کمک انتگرال گیری عددی گاوسی و لگاریتمی ویژه قابل حل می باشد. در نهایت فرم ماتریسی معادلات انتگرال مرزی به صورت زیر



خواهد شد:

$$\sum_{n=l}^{N} H^{N-n+l} \{ u^{n} \} = \sum_{n=l}^{N} G^{N-n+l} \{ q^{n} \} + \{ u^{ff,N} \}$$
(9)

در رابطه فوق ماتریس های H^{N-n+1} و G^{N-n+1} از انتگرال گیری هسته های نیم صفحه بر روی مرز جسم محاسبه می شوند. مقادیر $\{u^n\} \ e \ q^n\}$ بهترتیب مبین بردار تغییر مکان و تنش مرزی و $\{u^{f,N}\}$ بردار تغییر مکان میدان آزاد زمین است. پس از اعمال شرایط مرزی بر روی تمام گره ها، فرم قابل حل معادله (۶) به صورت زیر حاصل می شود:

$$[A_1^1] \{X^N\} = [B_1^1] \{Y^N\} + \{R^N\} + \{u^{\text{ff},N}\}$$
(V)

در این رابطه $\{X^N\}$ و $\{Y^N\}$ به ترتیب نماینده بردار مقادیر مجهول و معلوم مرزی و $[A_1^1]$ و $[B_1^{11}]$ ماتریس های ضرایب وابسته به این مقادیر هستند. $\{R^N\}$ نماینده اثر دینامیکی گام های زمانی قبلی در گره N می باشد که به صورت زیر ارائه می شود: $[R^N] = \sum_{n=1}^{N-1} (G^{N-n+1} \{q^n\} - H^{N-n+1} \{u^n\})$ (۸)

۳-۳- نقاط درونی

پس از حل معادله (۷) تمامی مجهولات مرزی محاسبه می شوند. برای تعیین پاسخ سطح زمین که به عنوان نقاط درونی تعریف می شوند لازم است تا زوایای شکست مرزی (ξ)c در معادله (۳) برابر ۱ در نظر گرفته شود. همان طور که در شکل (۱) دیده می شود سطح صاف زمین به محیط (۱) تعلق دارد، بنابراین نقاط درونی مزبور باید در معادلات این بخش قرار گرفته و حل شوند.

۴-مدلسازی

همان طور که در شکل (۱) قابل مشاهده است، مدل تونل پوشش دار در محیط نیم صفحه از ترکیب یک نیم صفحه سوراخ دار و یک حلقه تشکیل شده است. بعد از گسسته سازی تمام مرزهای مورد نیاز (مرزهای مشترک و مرز داخلی تونل) و استفاده از روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزه ی زمان، ماتریس های مستخرج برای هر دامنه با توجه به شرایط پیوستگی و سازگاری در

یک ماتریس کلی (ماتریس کوپل) کنار هم قرار می گیرنـد. در نهایت با اعمال شرایط مرزی، مجهولات مرزی محاسبه می شوند. در ادامه نحوه مدلسازی هر دامنه با جزئیات ارائه شده است.

۴-۱- محیط اول: نیم صفحه سوراخدار

این بخش شامل یک محیط نیم صفحه است که در آن یک حفره دایرهای بدون پوشش دفن شده و تحت تأثیر امواج مایل SH قرار گرفته است (شکل ۱). با توجه به شکل (۱) سطح صاف زمین و امواج مهاجم و انعکاسیافتهی SH در این محیط دیده می شوند. مرزهای مدل در این بخش تنها شامل وجه مشتر ک بین پوشش و محیط پیرامون است. گسسته سازی این دامنه باید به صورت ساعت گرد صورت گیرد تا بردار نرمال به سمت درون حفره تعریف شود. پس از گسسته سازی حفره و استخراج معادلات انتگرال مرزی، رابطه ماتریسی زیر برای گام زمانی M=n

$$[H_{12}^1]\{u_{12}^N\} = [G_{12}^1]\{q_{12}^N\} + [R_{12}^1] + \{u_{12}^{\text{ff},N}\}$$
(**(**)

که در آن:

$$\{R_{12}^{N}\} = \sum_{n=1}^{N-1} (G_{12}^{N-n+1}\{q_{12}^{n}\} - H_{12}^{N-n+1}\{q_{12}^{n}\}\{u_{12}^{n}\}) \qquad (1,.)$$

در روابط فوق ^Nul2^N و ql2^N به ترتیب تغییر مکان و تنش مرز مشترک میباشد. Rl2^N معرف اثر گامهای زمانی قبل در گام حاضر برای گره N بوده و ul2^{ff,N} مبین تغییر مکان میدان آزاد برای گرههای مرز مشترک است.

۴-۲- محيط دوم: حلقه بسته

این قسمت از مدل معرف پوشش تونل است که پس از جداسازی به شکل یک حلقه در آمده و از دو مرز بسته درونی و بیرونی (مرز مشترک) تشکیل شده است. به منظور تعریف صحیح بردار نرمال نیاز است تا گسسته سازی به صورت ساعت گرد برای مرز درونی و به صورت پادساعت گرد برای مرز بیرونی صورت



گیرد. اگرچه مدل حلقه بخشی از محیط نیم صفحه است ولیکن نقاط سطح زمین و امواج مهاجم لرزهای در ماتریس های تحلیلی این دامنه وارد نمی شوند؛ بنابراین تغییر مکان میدان آزاد (u^{ff}) در این دامنه تعریف نمی شود. پس از گسسته سازی مرزهای این مدل، فرم ماتریسی معادلات انتگرال برای گام زمانی N=n به صورت زیر قابل حصول است:

$$\{ \mathbf{H}_{21}^{1} \quad \mathbf{H}_{2}^{1} \} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{21}^{N} \\ \mathbf{u}_{2}^{N} \end{bmatrix} =$$

$$\{ \mathbf{G}_{21}^{1} \quad \mathbf{G}_{2}^{1} \} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{21}^{N} \\ \mathbf{q}_{2}^{N} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{21}^{N} \\ \mathbf{R}_{2}^{N} \end{bmatrix}$$
(11)

که در آن:

$$\{\mathbf{R}_{21}^{N}\} = \sum_{n=1}^{N-1} (\mathbf{G}_{21}^{N-n+1} \{\mathbf{q}_{21}^{n}\})$$
(11)

و

$$\{\mathbf{R}_{2}^{N}\} = \sum_{n=1}^{N-1} (\mathbf{G}_{2}^{N-n+1} \{\mathbf{q}_{2}^{n}\} - \mathbf{H}_{2}^{N-n+1} \{\mathbf{u}_{2}^{n}\})$$
(17)

در رابطه فوق ^Nu²¹ و ^Ql¹ بهترتیب معرف مقادیر تغییر مکان و تنش گره های مرز مشترک هستند. ^Qu² و ^Qq² تغییر مکان و تنش مرز داخلی تونل و ^R2l¹ و ^Qu⁹ بهترتیب معرف تأثیر گامهای زمانی قبل بر گام حاضر برای گرههای مرز مشترک و مرز داخلی تونل هستند.

۴-۳- سرهم سازی

پس از تعیین همه ماتریس های هر دامنه، میبایست معادلات ماتریسی مربوط به آنها در یک ماتریس نهایی کنار یکدیگر قرار داده شوند. برای این منظور نیاز است تا شرایط پیوستگی و سازگاری بهصورت زیر در مرزهای مشترک اعمال شود:

$$u_{12}^{N} = u_{21}^{N}$$
 (14)

$$\mu_1 q_{12}^N = -\mu_2 q_{21}^N \tag{10}$$

در رابط ه فوق ۱۱ و µ2 به تر تیب مدول برشی برای محیط نیم صفحه و پوشش هستند. با توجه به معادله (۱۴) و (۱۵) معادل ه نهایی سرهم شده به صورت زیر استخراج خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} H_{12}^{1} & 0 & -\frac{1}{\mu_{1}}G_{12}^{1} \\ H_{21}^{1} & H_{2}^{1} & \frac{1}{\mu_{2}}G_{21}^{1} \end{bmatrix} \begin{cases} u_{12}^{N} \\ u_{2}^{N} \\ q_{12}^{N} \end{cases} = \\ \begin{bmatrix} 0 & G_{2}^{1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ q_{2}^{N} \end{pmatrix} + \begin{cases} R_{12}^{N} \\ R_{(2)}^{N} \end{pmatrix} + \begin{cases} u_{12}^{\text{ff},N} \\ 0 \end{cases} + \begin{cases} u_{12}^{\text{ff},N} \\ 0 \end{cases}$$

که در رابطه فوق:

$$R_{(2)}^{N} = \begin{cases} R_{21}^{N} \\ R_{2}^{N} \end{cases}$$
(1V)

با علم بر اینکه مرز داخلی حفره تنش آزاد است، مقدار q2^N نیز برابر صفر خواهد شد؛ بنابراین بعد از اعمال تمام شرایط بیان شده معادله نهایی زیر حاصل خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} H_{12}^{1} & 0 & -\frac{1}{\mu_{1}}G_{12}^{1} \\ H_{21}^{1} & H_{2}^{1} & \frac{1}{\mu_{2}}G_{21}^{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{12}^{N} \\ u_{2}^{N} \\ q_{12}^{N} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{cases} R_{12}^{N} \\ R_{(2)}^{N} \end{bmatrix} + \begin{cases} u_{12}^{\text{ff},N} \\ 0 \end{cases}$$
(1A)

به کمک رابطه فوق، تمامی مجهولات مرزی تعیین می شوند. تغییر مکان نقاط سطح صاف زمین نیز به کمک معادلات محیط اول قابل حصول می باشد، به طوری که با توجه به بخش (۳-۳) برای تعیین پاسخ سطح زمین، معادله گسسته شده انتگرال مرزی برای m نقطه درونی به شکل زیر تبدیل خواهد شد:

$$\{ \mathbf{u}^{N,m} \} = \sum_{n=1}^{N} \left(\left[\frac{1}{\mu_1} \mathbf{G}_{12}^{,m} \right] \{ \mathbf{q}_{12}^n \} \right)$$

$$- \sum_{n=1}^{N} \left(\left[\mathbf{H}_{12}^{,m} \right] \{ \mathbf{u}_{12}^n \} \right) + \{ \mathbf{u}^{\text{ff},N,m} \}$$
 (19)

www.SID.ir

در نقاط درونی هستند. G₁₂^{<N-n+1>,m} و H₁₂^{<N-n+1>,m} ماتریس هایی هستند که بر اساس گرههای مرزی و نقاط درونی محاسبه می شوند.

۵- صحتسنجی

روش مذکور در توسعه یک الگوریتم رایانهای با نام DASBEM به کار گرفته شده است [۳۰، ۴۶-۴۷]. به منظور صحت سنجی فرمول بندی و الگوریتم تهیه شده، نتایج حاصل با برخی از پاسخ های موجود در ادبیات فنی مقایسه شده است. در این راستا برای موج ورودی مهاجم از تابع موجک ریکر استفاده شده است [۵۴]. به منظور لحاظ داشتن اثرات بازتاب امواج از سطح زمین، این تابع در دو قسمت برای موج ورودی و موج بازتابیده مطابق زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{u}^{\mathrm{ff}}(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{t}) = \mathbf{a}_{\max} \begin{pmatrix} \left[1 - 2\left(\frac{\pi \mathbf{f}_{\mathrm{p}}}{c}\alpha^{\mathrm{inc}}\right)^{2}\right] e^{-\left(\frac{\pi \mathbf{f}_{\mathrm{p}}}{c}\alpha^{\mathrm{inc}}\right)^{2}} \mathbf{H}(\mathbf{t} - \frac{\mathbf{r}^{\mathrm{inc}}}{c}) + \\ \left[1 - 2\left(\frac{\pi \mathbf{f}_{\mathrm{p}}}{c}\alpha^{\mathrm{ref}}\right)^{2}\right] e^{-\left(\frac{\pi \mathbf{f}_{\mathrm{p}}}{c}\alpha^{\mathrm{ref}}\right)^{2}} \mathbf{H}(\mathbf{t} - \frac{\mathbf{r}^{\mathrm{ref}}}{c}) \end{pmatrix}$$
(Y.)

که در آن:

- $\alpha^{\text{inc}} = c(t t_0) + r^{\text{inc}}; r^{\text{inc}} = -\sin\theta.x + \cos\theta.y$ (Y1)
- $\alpha^{\rm ref} = c(t t_0) + r^{\rm ref}; r^{\rm ref} = -\sin\theta.x \cos\theta.y \tag{YY}$

در روابط فوق f_p ، of و a_{max} به ترتیب معرف فرکانس غالب، پارامتر شیفت زمان و دامنه تابع ریکر هستند. تابع (.)H مبین تابع هویساید و θ زاویه برخورد موج است. ^{anc} و ^{ref} نیز به ترتیب فاز امواج ورودی و منعکس شده از سطح زمین را نشان میدهد. در شکل (۲) تابع بی بعد موجک ریکر برای یک نقطه فرضی در سطح صاف زمین مشاهده می شود.



شکل (۲): تاریخچه زمانی تابع موجک ریکر.

۵-۱- تونل پوششدار دایرهای

در مطالعه مانو گیان [۱۳] با استفاده از روش باقیمانده های وزندار پاسخ سطح زمین برای یک تونل پوششدار به شکل هندسی دلخواه و متأثر از امواج مهاجم SH ارائه شده است. با توجه به مدل تحليل شده، فرض مي شود تونل در عمق 1.5b مدفون بوده و شعاع داخلی (a) و ضخامت پوشش آن (t) بهترتیب برابر ۲۰۰ متر و 0.1b می باشد. مشخصات موج ریکر شامل دامنه بیشینه، پارامتر شیفت زمانی و فرکانس غالب به تر تیب برابر ۰/۰۰۱ متر، ۱/۴ ثانیه و ۳ هر تـز در نظر گرفتـه شـده اسـت. مرزهای مدل (مرزهای داخلی پوشش و مرز مشترک) با ۸۰ المان درجه دوم گسستهسازی شده و ۱۲۱ نقطه درونی برای سطح صاف زمین در نظر گرفته شده است. مسئله با ۵۰۰ گام زمانی با فاصله ۰/۰۱ ثانیه تحلیل شده است. چگالی جرمی و سرعت موج برشی محیط بهترتیب برابر 1ton/m³ و 800m/s فرض شده است. در این حالت پوشش تونل نسبت به محیط پیرامون سختتر بوده به طوری که نسبت مدول برشی و چگالی جرمی پوشش به محیط ۳ میباشد. همچنین برای ارائـه نتایج ب فرکانس های بی بعد از پارامتر η به صورت زیر استفاده شده است:

 $\eta = \frac{\omega b}{\pi c}$

در رابطه فوق ۹ فرکانس بدون بعد، ۵ فرکانس زاویهای و ۲ سرعت موج برشی است. شکل (۳) دامنه تغییر مکان نرمالیزه شده سطح زمین را در حضور تونل پوشش دار دایرهای تحت امواج مهاجم SH با زوایای مختلف و در فرکانس بی بعد ۲ نمایش می دهد. همان طور که مشاهده می شود نتایج حاضر و نتایج ارائه شده توسط مانوگیان [۱۳] به خوبی بر هم منطبق هستند. پیرامون موضوع اعتبارسنجی در این تحقیق به ارائه مثال فوق اکتفا شده و برای مشاهده مثال های دیگر می توان از مطالعه پنجی و انصاری [۴۸] به ره جست.

(۳۳)

www.SID.ir سال پنجم، شماره اول، بهار ۱۳۹۷

حوزهی زمان، یک تونل دایرهای پوشش دار بتنی مدفون در یک محیط نیمصفحه از جنس خاک رس سیلتی بررسی شده است. مشخصات پوشش و خاک در جدول (۱) نشان داده شده است [۷]. نسبت امپدانس (I) در محیط به شکل زیر تعریف می شود:

$$I = \frac{(\rho c)_{\text{soil}}}{(\rho c)_{\text{lining}}}$$
(YF)

بر اساس مشخصات جدول (۱)، این نسبت برابر /۰ در این مسئله به دست می آید. این بدان معناست که پوشش ده برابر سخت تر از محیط پیرامون است. برای دستیابی به پاسخهای مناسب مرز تونل با ۵۹ المان درجه دوم گسسته شده و ۱۲۱ نقطه درونی در سطح زمین تعریف شده است. عمق 1.5ل برای تونل فرض شده و ضخامت بی بعد پوشش تونل برابر ۵.0 ای 0.20 و ما20 در نظر گرفته شده است. زوایای موج ورودی به صورت ما30 در نظر گرفته شده است. زوایای موج ورودی به صورت ما30 در نظر گرفته شده است. زوایای موج ورودی به صورت ما30 در نظر گرفته شده است. زوایای موج ورودی به صورت ما30 در نظر گرفته شده است. زوایای موج ورودی به صورت ما30 در نظر گرفته شده است. زوایای موج ورودی به صورت ما30 در نظر گرفته شده است. زوایای موج ورودی به صورت ما30 در نظر گرفته شده است. زوایای موج ورودی به صورت ما30 در نظر گرفته شده است. زوایای موج ورودی به مور ما30 در نظر گرفته مای زمانی با توجه به عمق تونل به تر تیب ما30 در نظر مای درمانی با توجه به عمق تونل به تر تیب ما30 در نظر مای درمانی با توجه به عمق تونل به تر تیب ما30 در نظر مای درمان به طول انجامیده برای این تحلیل در یک رایانه با پردازنده ۵ هستهای ۴۰ ثانیه بوده است.

جدول (۱): مشخصات پوشش تونل و خاک پیرامون آن برای مطالعه عددی.

	چگالی	سرعت موج برشي	مدول برشي
	(ton/m^3)	(m/sec)	(Gpa)
مشخصات خاک	1.64	275	0.124
مشخصات پوشش	2.41	1870	8.40

۶-۱- پاسخ در حوزه زمان

در تحلیل حوزه زمان می توان مستقیماً ارتعاش سطحی را بر حسب زمان به دست آورد. شکل (۴) ارتعاشات سطح زمین را در حضور تونل دایرهای پوشش دار با ضخامت های 0.3b, 0=t مدفون در عمق 1.5b و متأثر از موج SH نشان می دهد. شکل های سمت چپ مربوط به ضخامت 0=t و شکل های سمت راست مربوط به

شکل (۳): دامنه تغییر مکان بیبعد سطح زمین در حضور تونل پوششدار دایرهای مدفون تحت تأثیر امواج مایل SH در فرکانس بیبعد 2=η.

۶- مطالعه عددی

بهمنظور نمایش کارایی روش اجزای مرزی نیمصفحه در

شکل (۴): پاسخ سطح زمین در حوزه زمان برای تونل دایرهای پوششدار با ضخامتهای متغیر 0 و 0.3b تحت تأثیر امواج مهاجم SH با زاویه θ الف) (4): پاسخ سطح زمین در حوزه زمان برای تونل دایرهای پوششدار با ضخامتهای متغیر 0 و 0.3b تحت تأثیر امواج مهاجم SH با زاویه θ الف) (4): پاسخ سطح زمین در حوزه زمان برای تونل دایرهای بوشندار با ضخامتهای متغیر 0 و 0.3b تحت تأثیر امواج مهاجم SH با زاویه θ الف)

t=0.3b هستند. همان طور که در این شکل ها مشخص است زمانی که موج با زاویه صفر (شکل ۴- الف و ۴- ب) به سمت زمین گسیل شده است، تونل به عنوان یک جاذب موج عمل کرده و از رسیدن موج به ناحیه بالای آن جلو گیری کرده است که این مسئله در ضخامت پوشش t=0.3b بیشتر مشهود است. با افزایش زاویه موج مهاجم، الگوی پراکنش موج پیچیده تر شده و تغییر مکان سطح زمین در تمام نقاط روی تونل قابل مشاهده است. هرچه زاویه موج ورودی بیشتر می شود از اثر افزایش ضخامت

پوشش تونل بر الگوی پراکنش کاسته می شود به طوری که الگوی تغییر مکان نقاط سطح زمین در ضخامت t=0 و t=0.3b به هم شبیه تر است.

۲-۶- پاسخ حوزه فرکانس

علاوه بر پاسخ در حوزه زمان در حوزه فرکانس نیز می توان پاسخ سطح زمین را به خوبی ارائه نمود؛ بنابراین، در شکل (۵) بزرگنمایی سهبعدی سطح زمین در حضور حفره پوششدار و

> www.SID.ir سال پنجم، شماره اول، بهار ۱۳۹۷

بزرگنمایی در حالت وجود پوشش (t=0.3b) با حالت عدم وجود آن (t=0) کاملاً متفاوت است. چنانچه در شکل های (۵- الف) و (۵- ب) مشاهده می شود با افزایش فرکانس بی بعد نقش حضور تونل پوشش دار در خنثی سازی امواج لرزهای در مقایسه با حالت بدون پوشش پررنگ تر است. با افزایش زاویه موج پاسخ ها شکل پیچیده تر به خود می گیرند و نقش بدون پوشش مدفون در عمق 1.5b ارائه شده است. در این شکل ضریب بزرگنمایی (نسبت دامنه پاسخ زمین به دامنه موج ورودی) سطح زمین بر حسب فرکانس بیبعد برای امواج مهاجم SH با زوایای مختلف نشان داده شده است. شکل های سمت چپ مربوط به حالت بدون پوشش 0=t و شکل های سمت راست برای ضخامت پوشش t=0.3b مبین است. الگوی

SH شكل (۵): الكوى سهبعدى بزر گنمايى سطح زمين در حضور يك تونل دايره اى پوشش دار با ضخامت هاى متغير 60 و 0.3b تحت تأثير امواج مهاجم SH شكل (۵): الكوى سهبعدى بزر گنمايى سطح زمين در حضور يك تونل دايره اى پوشش دار با ضخامت هاى متغير 60 و 1.3b تحت تأثير امواج مهاجم SH شكل (۵): الكوى سهبعدى بزر گنمايى سطح زمين در حضور يك تونل دايره اى پوشش دار با ضخامت هاى متغير 60 و 1.3b تحت تأثير امواج مهاجم SH شكل (۵): الكوى سهبعدى بزر گنمايى سطح زمين در حضور يك تونل دايره اى پوشش دار با ضخامت هاى متغير 60 و 1.3b تحت تأثير امواج مهاجم SH شكل (۵): الكوى سهبعدى بزر گنمايى سطح زمين در حضور يك تونل دايره اي و 6.3b رو 6.3b

علوم بریکی معلوم بریکی بوشتر بود

> خنثی سازی تونل پوشش دار کم رنگ می شود. بیشینه دامنه ی به ای پاسخ در گوشه های محل قرار گیری تونل به چشم می خورد. با سطح توجه به شکل (۵- ب) مشخص است در فرکانس های پایین سطح اف زایش ض خامت پوشش تونل موجب شده تا دامنه مها-جابه جایی های سطح زمین و ناحیه بالای آن کاهش یافته (۶-به طوری که این امر با افزایش زاویه موج مهاجم کمتر می شود. پاسخ

۶-۳- اثر زاویه موج

در شکل (۶) دامنه تغییرمکان بیبعد شده سطح زمین بر حسب زوایای مختلف موج ورودی ارائه شده است. شکل های (۶- الف) و (۶- ب) مربوط به فرکانس ۹=۱ می باشند. با توجه

به این شکل ها، افزایش ضخامت پوشش تونل موجب تغییر پاسخ سطح زمین شده به طوری که می توان افزایش جزئی در پاسخ سطح زمین را با افزایش ضخامت پوشش به ویژه در زوایای موج مهاجم قائم مشاهده نمود. همانطور که در شکل های (۶- پ) و (۶- ت) نشان داده شده است، با افزایش فرکانس، افزایش در پاسخ سطح زمین قابل مشاهده است. افزایش زاویه موج مهاجم پاسخ سطح زمین قابل مشاهده است. افزایش زاویه موج مهاجم موجب تغییر در پاسخ های سطح زمین شده به طوری که علاوه بر فرکانس های بالا با افزایش زاویه موج مهاجم شکل پیچیده تری به خود می گیرد به طوری که تغییرات دامنه پاسخ با دور شدن از تونل در این حالت بیشتر شده است (شکل ۶- پ و ۶- ت).

شکل (۶): تغییر مکان نرمالیزه سطح زمین در حضور تونل دایرهای پوششدار مدفون در عمق 1.5b برای زوایای مختلف مـوج مهـاجم SH الـف) ، η=1، t=0.1b (ب =1, t=0.3b (ب =1, t=0.3b) برای در عمق 1.5b برای زوایای مختلف مـوج مهـاجم SH الـف) ، η=1، در عمق t=0.1b

8-4- اثر ضخامت

در شکل (۷) دامنه تغییر مکان بی بعد شده سطح زمین برای تونل دایره ای با ضخامت پوشش مختلف ارائه شده است. چنانچه در این شکل ها مشاهده می شود حضور پوشش موجب تغییر چشمگیر پاسخ سطح زمین نسبت به حالت بدون پوشش (0=b) شده است. وقتی موج به صورت قائم (0=0) منتشر می شود به خصوص در

فر کانس های پایین، تأثیر پوشش موجب کاهش پاسخ سطح زمین می شود. که با افزایش فر کانس کاسته می شود. همچنین، افزایش زاویه موج مهاجم از تأثیر پوشش بر پاسخ های سطح زمین می کاهد. در حالت وجود پوشش با افزایش فر کانس، پاسخ های سطح زمین برای زوایای موج مهاجم مختلف بسیار به هم نز دیک شده اند که این مسئله در شکل های (۷-پ) تا (۷-چ) به خوبی مشهو د است.

شکل (Y): دامنه تغییرمکان بیبعد شده سطح زمین در حضور تونل دایره ای پوشش دار مدفون در عمق 1.5b برای ضخامتهای مختلف پوشـش؛ الـف) (γ = 1, θ=90 (γ = 1, θ=9 μ) (γ = 1, θ=9 μ) (γ = 1, θ=9 ج) θ=9 ج) θ=9 μ.

زمین در مقایسه با عدم حضور آن بهویژه در هجوم امواج قائم یررنگ تر شد.

مراجع

- Ariman, T. and Muleski, G.E. (1981) A review of the response of buried pipelines under seismic excitations. *Earth. Engin. and Struc. Dynam.*, 9, 133-151.
- Panji, M. (2013) Seismic Analysis of Topographic Features due to Propagating Incident SH-Waves by Half-Plane Time-Domain BEM. Ph.D Dissertation, Islamic Azad University. Science and Research Branch. Tehran, Iran.
- Lee, V.W. (1977) On the deformations near circular underground cavity subjected to incident plane SHwaves. *Proc. of Symp. of Appl. of Comp. Meth. in Engin.*, University of Southern California. Los Angeles. 951-962.
- Datta, S.K. and Shah, A.H. (1982) Scattering of SH waves by embedded cavities. *Wave Moti.*, 4, 265-283.
- Lee, V.W. Chen, S., Hsu, I.R. (1999) Antiplane diffraction from canyon above subsurface unlined tunnel. *Journal of Engineering Mechanics*, **125**(6), 668-675.
- Lee, V.W. and Trifunac, M.D. (1979) Response of tunnels to incident SH waves. *Journal of Engineering Mechanics Division*, 105(4), 643-659.
- Balendra, T., Thambiratnam, D.P., Koh, C.G., and Lee, S.L. (1984) Dynamic response of twin circular tunnels due to incident SH-waves. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 12, 181-201.
- Smerzini, C., Aviles, J., Paolucci, R., and Sanchez-Sesma, F.J. (2009) Effect of underground cavities on surface earthquake ground motion under SH wave propagation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(12), 1441-1460.
- Shi, S., Han, F., Wang, Z., and Liu, D. (1996) The interaction of plane SH-waves and non-circular cavity surfaced with lining in anisotropic media. *Appl. Math. and Mech.*, **17**(9), 855-867.

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزهی زمان برای تحلیل لرزهای سطح زمین و تعیین پراکنش امواج ناشي از یک تونل زیرزمینی پوششدار مدور در برابر امواج مهاجم SH به کار گرفته شد. در استفاده از روش مزبور تنها نیاز شد تا مرز پیرامون تونل گسستهسازی شود. با تجزیه مدل به دو محيط همكن و تحليل هر يك از آنها، معادلات هر محيط استخراج شد. با اعمال شرایط پیوستگی تنش و ساز گاری تغییر مکان در وجه میانی پوشش، در نهایت معادلات مـذکور سـرهم شده و در یک فرآیند گامبه گام زمانی حل شدند. روش پیشـنهاد شده در یک الگوریتم رایانهای به نام DASBEM [۲۶، ۴۶–۴۷] عددسازی شد و صحت آن به کمک برخی تحقیقات در دسترس مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزه زمان از دقت مناسب بر خوردار است. در ادامه نیز به عنوان مطالعهی یارامتریک، اثر ضخامت یوشش یک تونل دایرهای بتنی بر پاسخ سطح زمین در برابر امواج مهاجم SH با زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن به شرح زیر قابل جمع بندی است:

- ۱- الگوی کلی پاسخ سهبعدی در حوزهی زمان نشان داد با افزایش زاویه موج مهاجم، تفرق و انعکاس امواج سطح زمین متحمل شرایط پیچیدهای شده و افزایش ضخامت پوشش تونل سبب تغییر در الگوهای پاسخ شد.
- ۲- با افزایش ضخامت پوشش، افزایش اندک در دامنه ی پاسخ
 سطح زمین رؤیت شد که این موضوع در فرکانس های پایین
 مشهودتر شد.
- ۳- با افزایش زاویه موج مهاجم، پاسخ سطح زمین نزدیک به
 جبهه موج نه تنها دستخوش ازدیاد نوسان شده بلکه با فزونی
 در دامنه نیز مواجه شد.
- ۴- پاسخ سطح زمین در حضور حفره پوشش دار نسبت به حالت بدون پوشش کاملاً متفاوت شد. این تمایز علاوه بر اختلاف فاز، در تغییر دامنه پاسخ نیز مبین شد.
- ۵- نقش ایزولاسیون حضور پوشش در کاهش پاسخ سطح

www.SID.ir سال پنجم، شماره اول، بهار ۱۳۹۷

علوم برزار سلسه سلسه

rock tunnel using boundary element method. *Journ.* of Geot. Engin., **115**(8), 1163-1169.

- 22. Xiao, B. and Carter, J.P. (1993) Boundary element analysis of anisotropic rock masses. *Engi. Anal. with Boun. Elem.*, **11**, 293-303.
- Panji, M., Asgari Marnani, J., and Tavousi Tafreshi, Sh. (2011) Evaluation of effective parameters on the underground tunnel stability using BEM. *Journ.* of Struc. Engin. and Geot., 1(2), 29-37.
- 24. Panji, M., Koohsari, H., Adampira, M., Alielahi, H., and Asgari Marnani, J. (2016) Stability analysis of shallow tunnels subjected to eccentric loads by a boundary element method. *Journ. of Rock Mech. and Geot. Engin.*, **8**, 480-488.
- Kattis, S.E., Beskos, D.E., and Cheng, H.D. (2003)
 2D dynamic response of unlined and lined tunnels in poroelastic soil to harmonic body waves. *Earth. Engin. and Struc. Dynam.*, **32**, 97-110.
- 26. Liu, Z. and Liu, L. (2015) An IBEM solution to the scattering of plane SH-waves by a lined tunnel in elastic wedge space. *Earth. Sci.*, 28(1), 71-86.
- 27. 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. *Earth. Engin. and Struc. Dynam.*, 23(3), 321-340.
- Manolis, G.D. and Beskos, D.E. (1983) Dynamic response of lined tunnels by an isoparametric boundary element method. *Comp. Meth. in Appl. Mech. and Engin.*, 36, 291-307.
- Parvanova, S.L., Dineva, P.S., Manolis, G.D., and Wuttke, F. (2014) Seismic response of lined tunnels in the half-plane with surface topography. *Bull. of Earth. Engin.*, 12(2), 981-1005.
- 30. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M.K. (2013) Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. *Geop. Journ. Inter.*, **194**(3), 1849-1865.
- 31. Dong, C.Y., Lo, S.H., and Cheung, Y.K. (2004) Numerical solution for elastic half-plane inclusion problems by different integral equation approaches. *Engin. Anal. with Boun. Elem.*, 28, 123-130.
- 32. Dong, C.Y. and Lo, S.H. (2013) Boundary element

- Hasheminejad, S.M. and Kazemirad, S. (2008) Dynamic response of an eccentrically lined circular tunnel in poroelastic soil under seismic excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 277-292.
- Datta, S.K., Shah, A.H., and Wong, K.C. (1984) Dynamic stresses and displacements in buried pipe. *Journal of Engineering Mechanics*, **110**, 1451-1466.
- Moore, I.D. and Guan, F. (1996) Three-dimensional dynamic response of lined tunnels due to incident seismic waves. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 357-369.
- Manoogian, M.E. (2000) Scattering and diffraction of SH waves above an arbitrarily shaped tunnel. *ISET Journ. of Earth. Tech.*, 37(1-3), 11-26.
- 14. Besharat, V., Davoodi, M., and Jafari, M.K. (2012) Effect of underground structures on free-field ground motion during earthquakes. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- Esmaeili, M., Vahdani, S., and Noorzad, A. (2006) Dynamic response of lined tunnel to plane harmonic waves. *Tunn. and Unde. Spac. Tech.*, **21**, 511-519.
- 16. Faccioli, E., Maggio, F., Paolucci, R., and Quarteroni, A. (1997) 2D and 3D elastic wave propagation by a pseudo-spectral domain decomposition method. *Journal of Seismology*, 1, 237-251.
- 17. Beskos, D.E. (1987) Boundary element methods in dynamic analysis. *Appl. Mech. Revi.*, **40**(1), 1-23.
- Stamos, A.A. and Beskos, D.E. (1995) Dynamic analysis of large 3-D underground structures by the BEM. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, 917-934.
- Dominguez, J. and Meise, T. (1991) On the use of the BEM for wave propagation in infinite domains. *Engi. Anal. With Boun. Elem.*, 8(3), 132-138.
- 20. Crouch, S.L. and Starfield, A.M. (1983) Boundary Elements Methods in Solid Mechanics. Department of Civil and Mineral Engineering. University of Minnesota.
- 21. Yang, L. and Sterling, R.L. (1989) Back analysis of

- 42. Takemiya, H. and Fujiwara, A. (1994) SH-wave scattering and propagation analyses at irregular sites by time domain BEM. *Bull. of the Seis. Soci. of Ame.*, 84(5), 1443-1455.
- Belytschko, T. and Chang, H.S. (1988) Simplified direct time integration boundary element method. *Jour. of Engi. Mech.*, **114**(1), 117-134.
- 44. Hirai, H. (1988) Analysis of transient response of SH wave scattering in a half-space by the boundary element method. *Engineering Analysis*, 5(4), 189-194.
- 45. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M.K. (2013) Amplification pattern of semisine shaped valleys subjected to vertically propagating incident SH waves. *Jour. of Comp. Meth. in Engin.*, 32(2), 87-111.
- 46. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M.K. (2014) Analyzing seismic convex topographies by a half-plane time-domain BEM. *Geoph. Journ. Inter.*, **197**(1), 591-607.
- 47. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M.K. (2014) Antiplane seismic response from semi-sine shaped valley above embedded truncated circular cavity: a time-domain half-plane BEM. *Inter. Journ. of Civil Engin.*, **12**(2), 193-206.
- Panji, M. and Ansari, B. (2017) Transient SHwave scattering by a lined tunnel embedded in an el astic half-plane. *Engi. Anal. with Boun. Elem.* 84, 220-230.
- 49. Eringen, A.C. and Suhubi, E.S. (1975) *Elastodynamics Linear Theory*. Academic Press, New York.
- 50. Brebbia, C.A. and Dominguez, J. (1989) Boundary Elements an Introductory Course. Computational Mechanics Publications. Southampton, Boston.
- Dominguez, J. (1993) Boundary Elements in Dynamics. Computational Mechanics Publications. Southampton, Boston.
- 52. Ohtsu, M. and Uesugi, S. (1985) Analysis of SH wave scattering in a half space and its applications to seismic responses of geological structures. *Engi. Anal.*, 2(4), 198-204.

analysis of an elastic half-plane containing nanoinhomogeneities. *Journ. of Comp. Mate. Sci.* **73**, 33-40.

- 33. Panji, M. and Ansari, B. (2017) Modeling pressure pipe embedded in two-layer soil by a half-plane BEM. Comp. and Geot. 81, 360-367.
- Telles, J.C.F. and Brebbia, C.A. (1980) Boundary element solution for half-plane problems. *Inter. Jour. of Soli. and Stru.*, 12, 1149-1158.
- 35. Ye, G.W. and Sawada, T. (1989) Some numerical properties of boundary element analysis using halfplane fundamental solutions in 2-d elastostatics. *Journ. of Comp. Mech.*, 4, 161-164.
- 36. Ba, Z. and Yin, X. (2016) Wave scattering of complex local site in a layered half-space by using a multidomain IBEM: incident plane SH waves. *Geoph. Journ. Inter.*, 205, 1382-1405.
- Benites, R., Aki, K., and Yomogida, K. (1992) Multiple scattering of SH waves in 2-D media with many cavities. *Pure and Appl. Geoph.*, **138**(3), 353-390.
- 38. Alielahi, H., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M.K., and Panji, M. (2013) Applying a timedomain boundary element method for study of seismic ground response in the vicinity of embedded cylindrical cavity. *Inter. Jour. of Civil Engi.*, **15**, 45-54.
- 39. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., and Gatmiri, B. (2006) Timedomain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid FE/BE method. *Soil. Dynam. and Earth. Engin.*, **26**(8), 753-765.
- 40. Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A., and Khalaj, A. (2007) Amplification pattern of 2D semisine shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves. *Inter. Journ. of Num. Meth. Biom. Engin.*, 23(10), 871–887.
- 41. Kamalian, M., Jafari, MK., Sohrabi-Bidar, A., and Razmkhah, A. (2008) Seismic response of 2D semisines shaped hills to vertically propagating incident waves: amplification patterns and engineering applications. *Earth. Spec.*, 24(2), 405-430.

Υ١.

- 53. 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. Dyna. and Earth. Engin.*, **12**(8), 457-468.
- 54. Ricker, N. (1953) The form and laws of propagation of seismic wavelets. *Geoph.*, **18**(1), 10-40.

نشانه گذاری

