

تحلیل لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل پوشش دار زیرزمینی در برابر امواج مهاجم قائم P/SV و SH: یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای

پژوهشی

مهدی پنجه^{۱*}؛ سعید مجتبی زاده حسنلوئی^۲؛ علی غیاثوند^۳

۱- استادیار؛ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، m.panji@iauz.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری تخصصی؛ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، mojtabazadeh@iauz.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، ali.qiasvand74@gmail.com

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۰۶/۰۲؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵

شماره صفحات: ۲۶۷ تا ۲۸۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2021.10002.1397

واژگان کلیدی	چکیده
آباکوس بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای تونل پوشش دار روش اجزای محدود مدل‌سازی سه‌بعدی	در این مقاله به تعیین پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در برابر امواج مهاجم قائم P/SV و SH در حضور یک تونل زیرزمینی پوشش‌دار دایره‌ای پرداخته شده است. در این راستا از روش اجزای محدود سه‌بعدی در قالب نرم‌افزار عددی آباکوس برای مدل‌سازی بهره گرفته شده است. ضمن ارائه‌ی مختصر مبانی نظری حاکم بر روش اجزای محدود و حل یک مثال صحت‌سنجی، با در نظر گرفتن برخی پارامترهای کلیدی از قبیل، عمق تونل و نسبت امپدانس پوشش نگهدارنده با محیط پیرامون، پاسخ سطح زمین حساسیت‌سنجی شده است. در ادامه، یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای بین نتایج سه‌بعدی حاصل و پاسخ‌های دوبعدی اجزای مرزی نیم‌فضا انجام شده است. نتایج نشان داد، در نسبت عمق ۵ و ۸ به ترتیب برای امواج P/SV و SH اثر حضور تونل از بین رفته و پاسخ به سمت حرکت میدان آزاد سطح زمین همگرا شده است؛ همچنین، در حالت هجوم امواج درون‌صفحه‌ی P/SV افزایش هر واحد نسبت امپدانس حداقل به میزان ۵٪ در کاهش پاسخ افقی سطح بالای تونل مؤثر بوده، اما در هجوم امواج برون صفحه SH، نتایج معکوس به چشم می‌خورد. دست‌آوردهای حاصل می‌تواند در تکمیل و دقت آیین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود پیرامون موضوع ریزپهنه‌بندی ساختمان در حضور بازشدگی زیرسطحی مفید باشد.

۱- پیش‌گفتار

بازشدگی را دو چندان می‌سازد. نتایج زلزله‌های اخیر نشان داد، حضور تونل‌های زیرزمینی نه تنها بر شدت پاسخ سطح زمین، بلکه در شکل‌گیری الگوهای مختلف پاسخ تأثیر بسزایی دارد (Gizzi & Masini, 2006)؛ بنابراین، بهره‌گیری از یک ابزار مناسب برای تهیه‌ی یک مدل محاسباتی، لازم به نظر می‌رسد. در ادبیات فنی برای تحلیل لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل‌های زیرزمینی، به روش‌های مختلف اشاره شده است که از آن جمله می‌توان

گسترش روزافزون جوامع بشری را می‌توان دلیل بر توسعه‌ی امکانات زیرسطحی رفاهی از قبیل، خطوط حمل‌ونقل، تأسیسات آب و فاضلاب، سیستم‌های مخابراتی و ... دانست. از یک سو، استقرار این قبیل ابنیه‌ها در محیط نیمه‌نامحدود زمین و تأثیر مستقیم هجوم امواج زلزله روی آن‌ها و از سوی دیگر تغییر در الگوی پاسخ سطح زمین در حضور تونل‌ها، اهمیت شناخت رفتار لرزه‌ای محیط‌های مشتمل بر

روش‌های تحلیلی، نیمه‌تحلیلی، عددی و تجربی را نام برد (Panji & Mojtazadeh-Hasanlouei, 2018). محققان متعددی با استفاده از روش‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی مبتنی بر اصول ریاضی به مدل‌سازی پاسخ سطح زمین در حضور تونل‌های زیرزمینی بدون پوشش/پوشش‌دار پرداخته‌اند. از جمله مهم‌ترین مطالعات صورت گرفته با استفاده از روش تحلیلی بسط تابع موج می‌توان به تحقیقات (Lee & Trifuanc, 1979)، (Lee & Zhang, 1995)، (Liang, et al., 2010)، (Manoogian, 1995)، (Huang & Pan, 2010)، (Li, et al., 2012)، (Smerzini, et al., 2012)، (Liu, et al., 2016) اشاره کرد. (2009) و (Liu, et al., 2013) نیز محققانی بودند که به ترتیب از روش تحلیلی بسط تابع بسط و تئوری متغیر مختلط برای پیشبرد پژوهش خویش بهره گرفتند؛ همچنین، (Liang, et al., 2003 & 2004)، (Lee & Karl, 1992) و (Xu, et al., 2009) به کمک روش تحلیلی بسط سری بسط - فوریه و (Tsaour & Chang, 2012) و (Liu & Lin, 2004) از روش تحلیلی تطابق ناحیه‌ای بهره گرفتند. در این میان، مطالعات نیمه‌تحلیلی (Wang, et al., 1985)، (Chin, et al., 1987)، (Moore & Guan, 1996)، (Liao, et al., 2000)، (Manoogian, 2000)، (Liu, et al., 2008)، (Chen, et al., 2011) و (Lee, et al., 2019) در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی زیرسطحی در برابر امواج مهاجم SH نیز قابل ذکر است.

از آن جمله است.

اهمیت حضور تونل‌های پوشش‌دار در بافت شهری به ویژه در مسیر عبور خطوط مترو، فاضلاب، شریان‌های حیاتی و حامل‌های انرژی و لزوم آئین‌نامه‌های لرزه‌ای به شناخت بهتر این قسم عوارض موجب شده است تا معیار انجام پژوهش حاضر بر تحلیل لرزه‌ای سطح زمین با وجود عوارض مزبور بنا نهاده شود. چنانچه مرور ادبیات فنی نشان داد، اکثر مطالعات انجام شده پیرامون تحلیل لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل‌های زیرزمینی محدود به مطالعات دوبعدی بوده و یا در صورت ارائه‌ی مدل‌های سه‌بعدی، تحلیل پارامتریک جامع به چشم نمی‌خورد؛ بنابراین در این مطالعه به مدل‌سازی سه‌بعدی پاسخ سطح زمین در حضور تونل زیرزمینی پوشش‌دار طویل در برابر امواج مهاجم قائم P/SV و SH به کمک روش اجزای محدود سه‌بعدی اقدام شده است.

پیشرفت علم رایانه و استفاده از آن در تحلیل سیستم‌های سازه‌ای موجب شد که پژوهشگران برای حل مسأله‌ی تفرق امواج به استفاده از روش‌های عددی روی آورند. آن‌ها با بهره‌گیری از روش‌های اجزای محدود (FEM)، تفاضل محدود (FDM) و اجزای مرزی (BEM) به مدل‌سازی عددی پاسخ سطح زمین در حضور عوارض توپوگرافی و تونل‌های زیرزمینی پرداخته‌اند. در استفاده از روش‌های حجمی اجزای محدود و تفاضل محدود لازم است، کل محیط مورد مطالعه مش‌بندی شده و شرایط مرزی در مرزهای دوردست اقتاع شود. از جمله محققانی که از روش اجزای محدود برای پیشبرد مطالعات خویش بهره گرفته‌اند، می‌توان به (Lysmer & Drake, 1972)، (Smith, 1975)،

علم بر تحلیل خطی مسأله و بی‌بعدسازی پارامترها، شعاع داخلی تونل (b) و ضخامت پوشش بتنی پیرامون (t) معادل 0.1 شعاع داخلی تونل فرض شده است.

به‌منظور کاهش هزینه‌ی محاسبات، بارگذاری خارجی از نوع تابع موجک ریکر (Ricker, 1953) و از جنس تغییرمکان اعمال شده است.

جدول ۱- مشخصات مصالح در نظر گرفته شده برای مدل سازی مسأله‌ی تونل پوشش‌دار زیرزمینی

مشخصات مصالح	سرعت انتشار موج برشی (C)	ضریب پواسون	جرم حجمی (ρ)
	- متر بر ثانیه	(ν)	- تن بر متر مکعب
خاک و سنگ	۲۷۵	۰/۳۳	۱/۶۴
پیرامون			
پوشش بتنی تونل	۱۸۷۰	۰/۲	۲/۴

در شکل ۲، نمودار موجک مذکور به ترتیب در حوزه‌ی زمان و فرکانس مشاهده می‌شود و معادله‌ی آن مطابق رابطه‌ی (۱) است.

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

در معادله‌ی مزبور، f_p فرکانس غالب موج و برابر با $2/5$ هرتز، t_0 پارامتر تعویق زمان و برابر با 0.4 ثانیه و t زمان بارگذاری است که ۳ ثانیه در نظر گرفته شده است. برای بهینه‌سازی تحلیل در حوزه‌ی زمان، گسسته‌سازی مبتنی بر روش (Kuhlemeyer & Lysmer, 1973) انجام شده که براساس آن، ابعاد المان‌ها از رابطه‌ی $(\Delta l \leq \lambda/8 \sim \lambda/10)$ به دست می‌آید. در این رابطه λ طول موج برشی انتشار یافته در محیط ($\lambda = c_s/f_p$) است که برابر ۱۱۰ متر حاصل شده است؛ بنابراین ابعاد المان برابر ۱۵ متر محاسبه شده است.

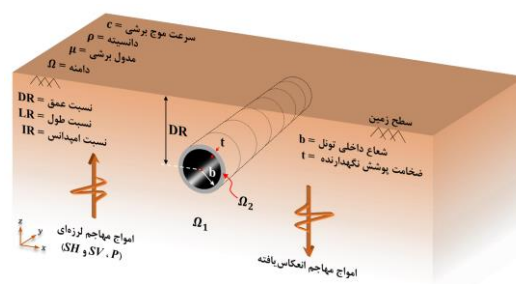
برای تحلیل مدل و مش‌بندی آن از المان‌های خطی مکعبی شکل (سه‌بعدی) ۸ گره‌ای استفاده شده که در شکل ۳، قابل مشاهده است. ابعاد مناسب مدل نیز به صورت سعی و خطا بدست آمده است؛ به گونه‌ای که به میزان ۲۰ برابر شعاع عارضه از ناحیه‌ی استقرار آن فاصله گرفته و سپس المان‌های نامحدود در مرزهای پیرامون مدل در نظر گرفته شده‌اند.

شایان ذکر است، المان‌های نامحدود جناحین به

ضمن صحت‌سنجی برخی نتایج حاصل با پاسخ‌های عددی در دسترس، با در نظر گرفتن پارامترهای عمق تونل و نسبت امیدانس پوشش، الگوی لرزه‌ای سطح زمین حساسیت‌سنجی شده است. در این میان یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای نیز بین نتایج حاصل با نتایج دوبعدی اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان حاصل از مطالعه‌ی (Panji & Ansari, 2017) انجام شده است. هدف از انجام این تحقیق، ارائه‌ی الگوی سه‌بعدی پاسخ سطح زمین در مقابل تغییر پارامترهای مزبور و اهمیت این‌گونه مدل‌سازی در مقایسه با نتایج دوبعدی است.

۲- مدل‌سازی

شکل ۱، مدل یک نیم‌فضا مشتمل بر یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای در برابر امواج مهاجم قائم P/SV و SH را نشان می‌دهد. در این تحقیق با استفاده از روش اجزای محدود سه‌بعدی در قالب نرم‌افزار تجاری آباکوس به تحلیل لرزه‌ای یک تونل زیرزمینی پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج قائم P/SV و SH پرداخته شده است.



شکل ۱- هندسه‌ی تونل پوشش‌دار دایره‌ای مستقر در یک نیم‌فضای سه‌بعدی

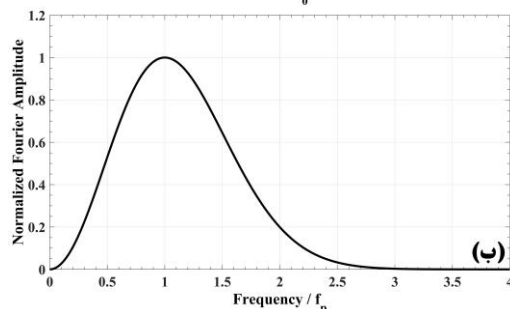
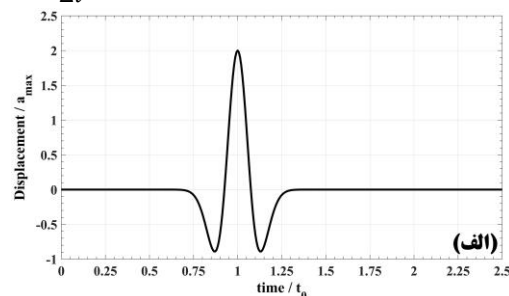
چنانچه در شکل ۱، نشان داده شده است، Ω دامنه، b شعاع داخلی تونل، t ضخامت پوشش، c سرعت موج برشی و μ مدول برشی است؛ همچنین، DR نسبت عمق تونل، LR نسبت فاصله روی سطح زمین و IR نسبت امیدانس مصالح تشکیل دهنده‌ی پوشش نکه‌دارنده‌ی تونل با محیط پیرامون است. جدول ۱، بیان‌گر سرعت انتشار موج برشی، ضریب پواسون و جرم حجمی خاک پوشش مبتنی است که مقادیر آن مبتنی بر ادبیات فنی در نظر گرفته شده‌اند (Balendra, 1984) و (Panji & Ansari, 2017) همچنین، با

۳- مطالعه‌ی پارامتریک

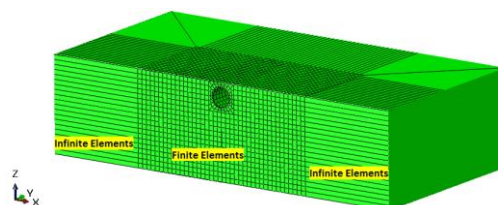
از جمله اهداف اصلی پژوهش حاضر، حساسیت‌سنجی پارامترهای کلیدی نسبت عمق و امپدانس تونل پوشش‌دار دایره‌ای بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین است. در این راستا لازم است، برخی مفاهیم پایه تعریف شود. نتایج حاصل از تحلیل عددی حاضر برحسب پارامتر بی‌بعد دامنه‌ی تغییرمکان نرمالایز شده ارائه می‌شود. دامنه‌ی تغییرمکان نرمالایز شده‌ی سطح زمین (NDA) عبارت از نسبت دامنه‌ی فوریه‌ی تغییرمکان سطح زمین حاصل از تحلیل در یک فرکانس معین، بر دامنه‌ی فوریه‌ی حرکت ناشی از امواج مهاجم در همان فرکانس است. نسبت عمق تونل از رابطه‌ی $(DR = h/b)$ حاصل شده که در آن h و b به ترتیب عمق و شعاع داخلی تونل است. نسبت طول در سطح زمین به صورت $(LR = x/b)$ منظور شده که x مبین محور افقی روی سطح زمین است؛ همچنین، نسبت امپدانس (I) که بیانگر اختلاف سختی پوشش بتنی و بستر خاکی پیرامون است، به کمک رابطه‌ی $(IR = \frac{\rho_c \cdot c_c}{\rho_s \cdot c_s})$ محاسبه می‌شود. در این رابطه، ρ_c و c_c به ترتیب دانسیته و سرعت موج برشی پوشش نگاه‌دارنده‌ی تونل و ρ_s و c_s به ترتیب دانسیته و سرعت موج برشی محیط پیرامون هستند. در این پژوهش، پاسخ حوزه‌ی فرکانس در محدوده‌ی بی‌بعد (η) ۰/۵ تا ۱ محاسبه شده است. فرکانس بی‌بعد (η) به کمک رابطه‌ی $(\eta = \omega b / \pi c_s)$ محاسبه می‌شود که در آن ω فرکانس زاویه‌ای موج و c_s سرعت موج برشی محیط پیرامون است. عکس فرکانس بی‌بعد $(T = 1/\eta = \lambda/2b)$ مبین پریود بی‌بعد است که تعبیر فیزیکی آن طول موج (λ) لرزه‌ای برابر با قطر کل تونل است. در مدل تهیه شده، نسبت عمق تونل (DR) به ترتیب برابر با ۱/۵، ۳/۱۰ و ۵/۱۰ در نظر گرفته شده و برای نسبت امپدانس مقادیر ۱/۱۰، ۲/۱۰، ۴/۱۰ و ۶/۱۰ لحاظ شده است. نسبت امپدانس واحد مبین استقرار تونل بدون پوشش در محیط مفروض است. در این مطالعه، جنبه‌ی امواج مهاجم لرزه‌ای به صورت قائم یعنی عمود بر سطح زمین به مدل اعمال شده است. لازم به ذکر است، با علم بر اینکه با نزدیک شدن به سطح زمین از سختی مصالح خاکی کاسته می‌شود، مسیر کلیه‌ی امواج مهاجم لرزه‌ای با کاهش عمق به تدریج به حالت قائم نزدیک می‌شود، لذا در مدل تهیه شده امواج مهاجم به صورت عمود فرض شده‌اند

منظور جلوگیری از انعکاس امواج هنگام برخورد به مرزهای کناری تعبیه شده‌اند که به عنوان مرزهای جاذب انرژی امواج عمل نمایند. طبق توصیه‌ی (Mansur, 1983) ضریب بی‌بعد β برای تدقیق گام زمانی منظور شده است که به صورت رابطه (۲) قابل تعریف است:

$$\beta = \frac{c\Delta t}{\Delta l} \quad (2)$$



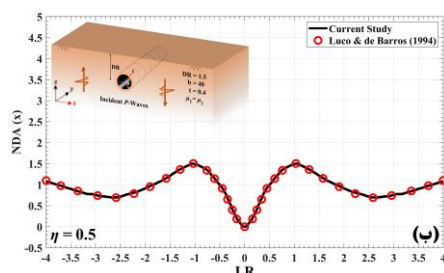
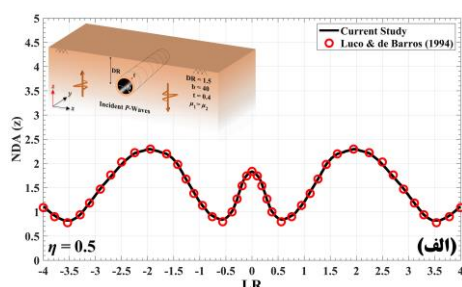
شکل ۲- نمودار تابع موجک ریکر برای یک نقطه‌ی واقع در سطح صاف زمین در (الف) حوزه‌ی زمان و (ب) حوزه‌ی فرکانس.



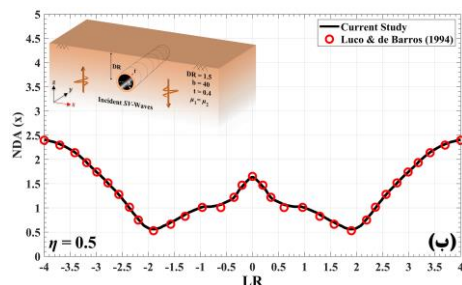
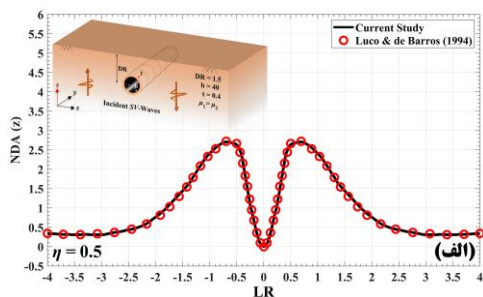
شکل ۳- مش‌بندی مدل سه‌بعدی اجزای محدود با استفاده از المان‌های قطبی ۸ گره‌ای

لازم به ذکر است، (Dominguez & Gallego, 1991) برای حل مسائل الاستودینامیک با مش‌بندی یکنواخت، مقدار β را برابر ۱ پیشنهاد داده‌اند؛ لذا مقدار Δt برابر ۰/۰۵ ثانیه محاسبه شده است. لازم به ذکر است، پس از تحلیل، پاسخ‌ها در قالب تغییرمکان بی‌بعد، در فرکانس بی‌بعد ۰/۵ و در ۲۱ نقطه واقع بر سطح زمین قرائت شده‌اند.

امپدانس ۶ برای پوشش بتنی تونل را نشان می‌دهد.



شکل ۴- مقایسه‌ی مؤلفه‌های قائم و افقی پاسخ سطح زمین در حضور یک حفره‌ی پوشش‌دار متجانس با محیط پیرامون در برابر امواج مهاجم لرزه‌ای P حاصل از پژوهش حاضر و مطالعه‌ی (Luco & de Barros, 1994).



شکل ۵- مقایسه‌ی مؤلفه‌های قائم و افقی پاسخ سطح زمین در حضور یک حفره‌ی پوشش‌دار متجانس با محیط پیرامون در برابر امواج مهاجم لرزه‌ای SV حاصل از پژوهش حاضر و مطالعه‌ی (Luco & de Barros, 1994).

(Kamalian, et al., 2006). در انجام مطالعه‌ی پارامتریک، ابتدا به ارائه نتایج حوزه‌ی زمان پرداخته و سپس اثر هر یک از مؤلفه‌های کلیدی به صورت مجزا مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته است. در نهایت، یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای بین نتایج پژوهش حاضر و نتایج عددی حاصل از روش اجزای مرزی دوبعدی (Panji & Ansari, 2017) برای رؤیت تفاوت روش‌های عددی در مدل‌سازی دو و سه‌بعدی ارائه شده است.

۳-۱- صحت‌سنجی

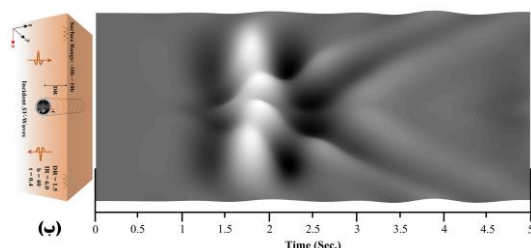
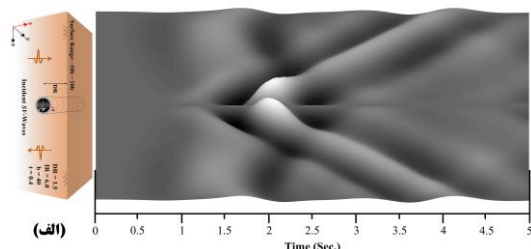
در این بخش توانایی روش اجزای محدود دینامیکی در مدل‌سازی مسائل لرزه‌ای و تفرق امواج سه‌بعدی توسط یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به اینکه مسأله‌ی مزبور در حالت بدون پوشش (حفره) قبلاً توسط (Luco & de Barros, 1994) مطالعه شده است، نتایج آن‌ها مبنای اعتبارسنجی مطالعه‌ی حاضر قرار گرفته است. (Luco & de Barros, 1994) از جمله محققان نام‌آشنای عرصه‌ی عددی هستند که با استفاده از روش اجزای مرزی غیرمستقیم به مدل‌سازی یک محیط سه‌بعدی مشتمل بر یک حفره‌ی زیرسطحی در برابر امواج P و SV پرداخته‌اند؛ بنابراین، برای نزدیک شدن به مدل آن‌ها و یکسان‌سازی شرایط مسأله، سختی خاک (μ_s) و پوشش تونل (μ_c) به صورت یکسان فرض شده است تا بدین ترتیب از اثر پوشش نگه دارنده‌ی تونل صرف‌نظر شود.

شکل ۴ تا شکل ۶ به ترتیب مبین دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بعد سطح زمین در فرکانس بی‌بعد ۰/۵ و نسبت عمق ۱/۵ تحت هجوم امواج قائم P/SV و SH در مقایسه‌ی با نتایج (Luco & de Barros, 1994) در شکل‌های مزبور، دامنه‌ی فوری‌هی تغییرمکان برای مؤلفه‌های x، y و z به صورت مستقل نمایش داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، هم‌خوانی مناسب میان نتایج حاصل از پژوهش عددی حاضر و پاسخ‌های موجود در ادبیات فنی به چشم می‌خورد. لازم به ذکر است، پارامترهای هندسی و خواص مصالح مطابق بخش (۲) در نظر گرفته شده است.

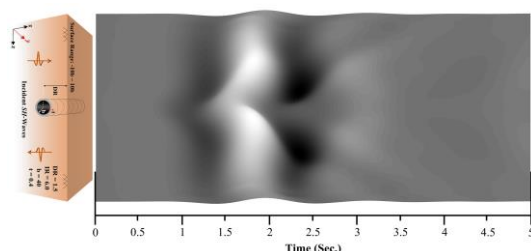
۳-۲- الگوی پاسخ در حوزه‌ی زمان

شکل ۷ تا شکل ۹، الگوی کلی پاسخ تاریخی‌چپه‌ی زمانی سطح زمین در حضور تونل زیرزمینی پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج قائم P/SV و SH در نسبت عمق ۱/۵ و نسبت

این مقادیر به ویژه در امواج برشی درون صفحه (SV) پرننگ‌تر به نظر می‌رسد (شکل ۸).



شکل ۸- الگوی کلی پاسخ تاریخی زمانی سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج لرزه‌ای قائم SV.

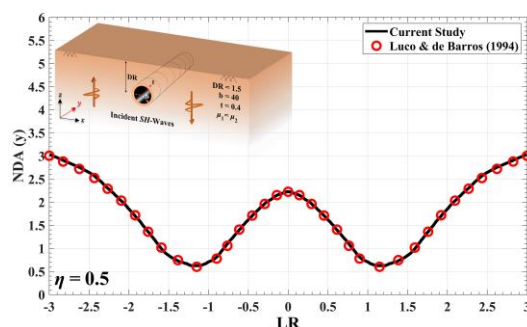


شکل ۹- الگوی کلی پاسخ تاریخی زمانی سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج لرزه‌ای قائم SH.

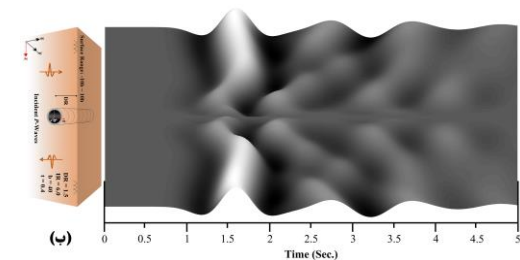
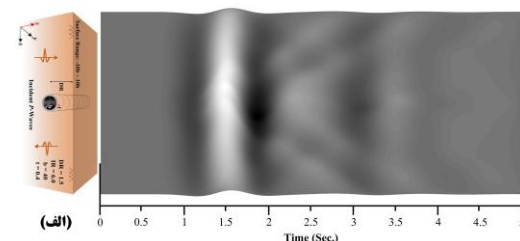
هر چند ارتعاش افقی عمود بر صفحه (شکل ۹) ناشی از انتشار امواج تک مؤلفه‌ای SH از لحاظ الگو با مؤلفه‌ی نظیر امواج SV (شکل ۸-ب) تقریباً همخوانی دارد، ولیکن همگرایی سریع نوسان پاسخ در این حالت، تأثیر کمتر این مؤلفه را در مقایسه با امواج درون صفحه تداعی می‌کند.

۳-۳- اثر نسبت عمق

شکل ۱۰ تا شکل ۱۲، مؤلفه‌ی قائم و افقی دامنه تغییرمکان بی‌بعد سطح زمین را برای نسبت عمق‌های ۱/۵، ۳/۰ و ۵/۰ و نسبت امپدانس ۶ در فرکانس بی‌بعد ۰/۵ نشان می‌دهد.



شکل ۶- مقایسه‌ی پاسخ سطح زمین در حضور یک حفره‌ی پوشش‌دار متجانس با محیط پیرامون در برابر امواج مهاجم لرزه‌ای SH حاصل از پژوهش حاضر و مطالعه‌ی Luco & de Barros (1994).

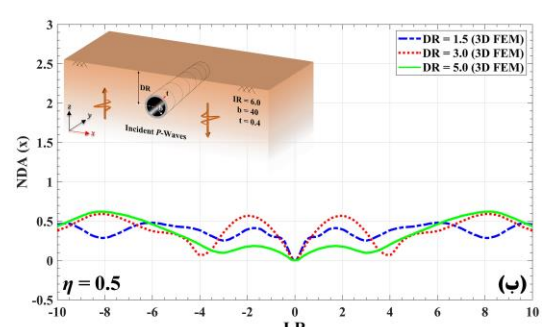
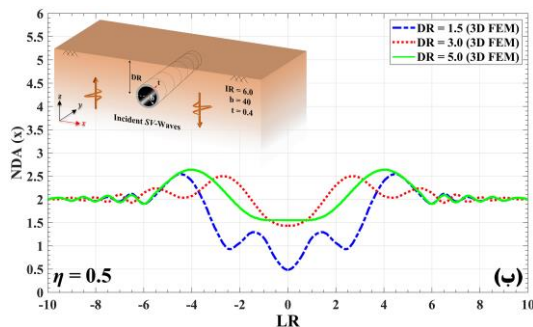
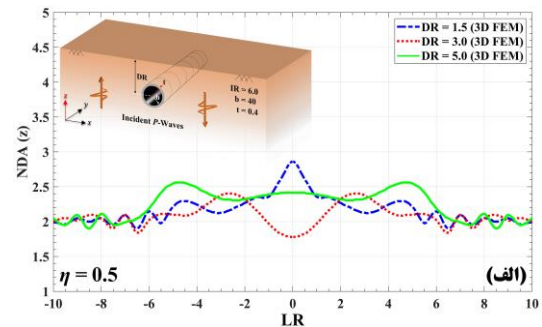
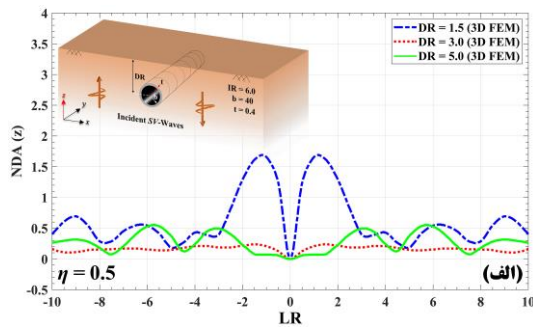


شکل ۷- الگوی کلی پاسخ تاریخی زمانی سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج لرزه‌ای قائم P

چنانچه در شکل ۷- الف، مشاهده می‌شود، تغییرمکان قائم سطح زمین آنچنان که باید دستخوش تغییر واقع نشده که حاکی از تأثیر اندک مؤلفه‌ی فشاری موج بر حرکت عمود بر سطح است؛ اما، ارتعاش قابل توجه هنگام پراکنش امواج فشاری P در امتداد مماس سطح زمین (شکل ۷-ب) پدید آمده که نقش حائز اهمیت آن در بروز تغییرمکان افقی و ازدیاد نوسان سطح زمین مشهود است. آنچه مسلم است، سطح زمین در برابر پراکنش امواج سه‌بعدی همواره تغییرمکان افقی را تجربه می‌نماید؛ چرا که

دامنه‌ی تغییرمکان افقی در بالای تونل ($LR = 0$) شده که این موضوع کاهش نقش ایزولاسیون تونل را با ازدیاد عمق نشان می‌دهد. از سوی دیگر، حداکثر دامنه‌ی تغییرمکان قائم (شکل ۱۱-الف) همواره کمتر از حرکت آزاد زمین و برابر $1/7$ در عمق کمینه است؛ به طوری که با افزایش عمق تونل مقدار آن کاهش یافته و در نسبت عمق‌های بیشینه، این مقدار ناچیز شده است. با توجه به ماهیت تک‌مؤلفه‌ای امواج مهاجم SH (شکل ۱۲)، این موج تنها باعث حرکت افقی سطح زمین شده و صرفاً مؤلفه‌ی تغییرمکان در امتداد محور y را متأثر ساخته است. چنانچه در شکل ۱۲، مشاهده می‌شود، وجود تونل در عمق‌های مختلف تأثیر نامحسوس بر جابجایی سطح زمین در محدوده‌ی فوقانی آن داشته است؛ اما در نقاط مجاور نیز در نسبت فاصله‌ی ۲ تا ۸ در طرفین، افزایش دو چندان تغییرمکان ملاحظه می‌شود. با افزایش عمق تونل، تغییرمکان در محدوده‌ی مذکور به گونه‌ای افزایش یافته است که حداکثر دامنه در حدود $5/5$ نیز به چشم می‌خورد.

چنانچه در شکل ۱۰-الف، مشاهده می‌شود، در امواج P دامنه‌ی تغییرمکان قائم برای اکثر نقاط سطح زمین پیرامون عدد ۲ است که مبین تغییرمکان میدان آزاد است. وجود تونل موجب افزایش تغییر مکان قائم سطح زمین در نسبت فاصله‌ی ۵- تا ۵ شده و در موقعیت مرکز تونل روی سطح زمین (LR برابر با صفر) حداکثر پاسخ حاصل شده است. افزایش عمق تونل به تدریج موجب کاهش دامنه‌ی تغییرمکان قائم شده و در عمق بیشینه، نمودار هموارتر شده است. از طرف دیگر، مطابق شکل ۱۰-ب، ملاحظه می‌شود، اگرچه رفتار تغییرمکان افقی سطح زمین متأثر از تغییر عمق تونل است، ولیکن دامنه‌ی آن تغییرات ناگهانی را نشان نداده و همواره میزان آن بسیار کمتر از حرکت میدان آزاد سطح زمین است. متناظراً در تابش امواج مهاجم لرزه‌ای SV (شکل ۱۱-ب) وجود تونل مشابه یک محیط ایزوله مسبب کاهش تغییرمکان افقی سطح زمین در محدوده‌ی بالای آن ($3 < LR < -3$) شده و در دیگر نقاط سطح، با اندک بزرگنمایی حرکت آزاد زمین تجربه می‌شود.

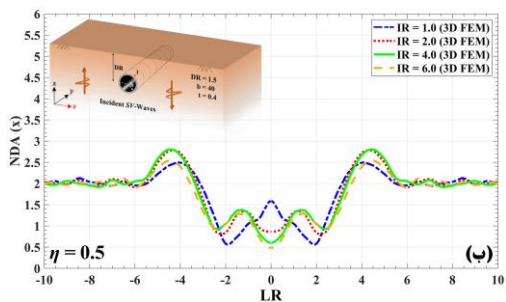
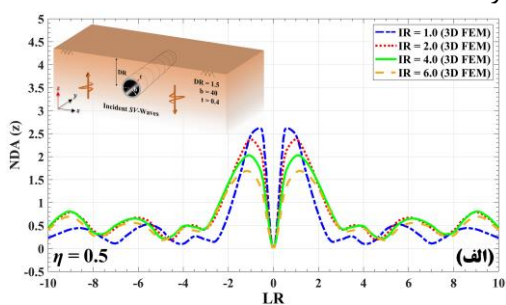


شکل ۱۱- تأثیر نسبت عمق بر دامنه‌ی تغییرمکان افقی و قائم پاسخ سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج لرزه‌ای قائم SV .

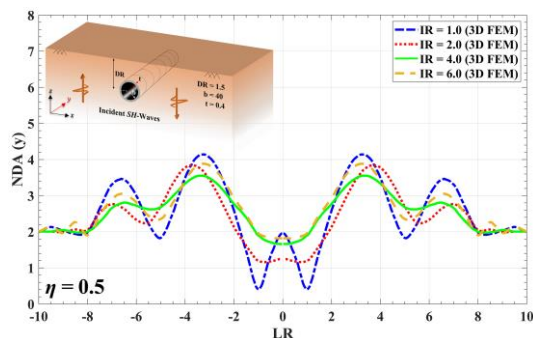
شکل ۱۰- تأثیر نسبت عمق بر دامنه‌ی تغییرمکان افقی و قائم پاسخ سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج لرزه‌ای قائم P .

چنانچه مشاهده می‌شود، افزایش عمق موجب افزایش

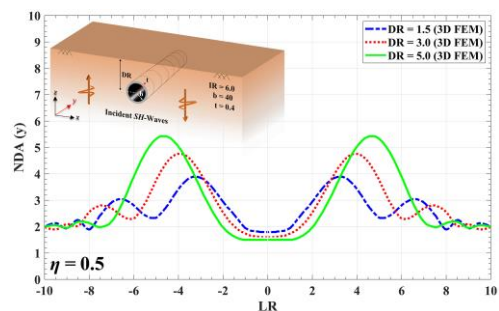
دامنه‌ی تغییرمکان قائم سطح زمین، به ویژه در موقعیت فوقانی تونل ($LR = 0$) شده است (شکل ۱۳-الف). چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود، در نسبت امپدانس ۶ دامنه‌ی تغییرمکان قائم رشد فراتر از مقدار واحد را در مقایسه با نسبت امپدانس ۱ (معادل تونل بدون پوشش) تجربه نموده است؛ همچنین در شکل ۱۴، برای امواج SV نیز ملاحظه می‌شود، افزایش نسبت امپدانس موجب کاهش دامنه‌ی تغییرمکان افقی سطح زمین در ناحیه‌ی فوقانی تونل شده و تأثیر چندانی بر دامنه‌ی تغییرمکان دیگر نقاط سطح زمین ندارد.



شکل ۱۴- تأثیر نسبت امپدانس بر دامنه‌ی تغییرمکان افقی و قائم پاسخ سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج لرزه‌ای قائم SV.



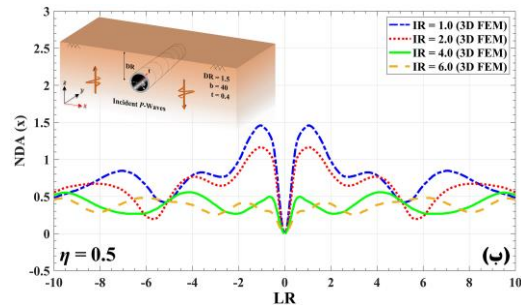
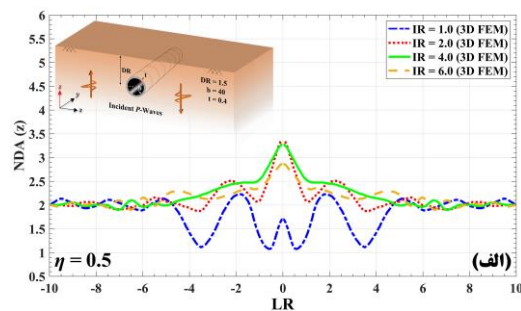
شکل ۱۵- تأثیر نسبت امپدانس بر دامنه‌ی تغییرمکان پاسخ سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج لرزه‌ای قائم SH.



شکل ۱۲- تأثیر نسبت عمق بر دامنه‌ی تغییرمکان پاسخ سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج لرزه‌ای قائم SH.

۳-۴- اثر نسبت امپدانس

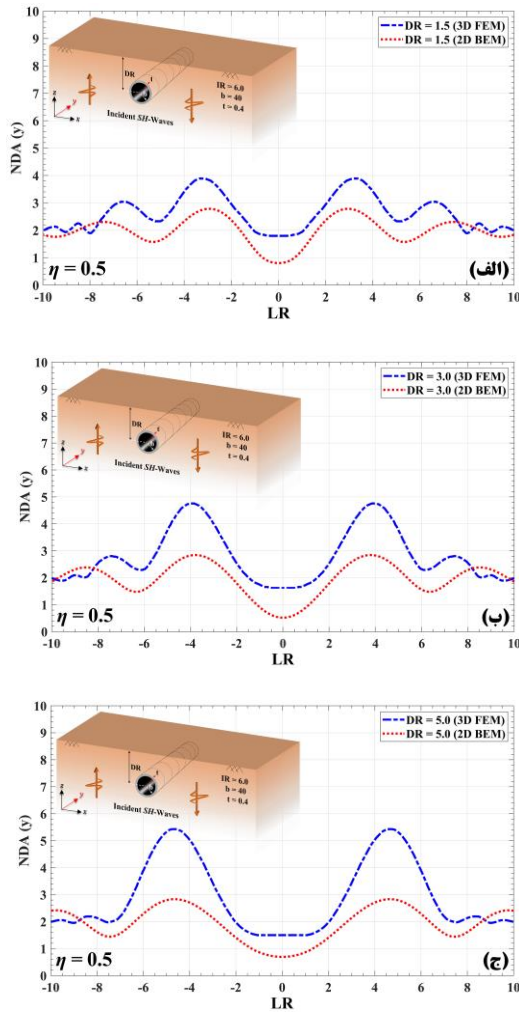
در شکل ۱۳ تا شکل ۱۵، مؤلفه‌ی قائم و افقی دامنه‌ی تغییرمکان بی‌بعد سطح زمین در نسبت امپدانس‌های مختلف و نسبت عمق ۱/۵ نمایش داده شده است.



شکل ۱۳- تأثیر نسبت امپدانس بر دامنه‌ی تغییرمکان افقی و قائم پاسخ سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج لرزه‌ای قائم P.

همان‌طور که در شکل ۱۳-ب، ملاحظه می‌شود، برای امواج P افزایش نسبت امپدانس موجب کاهش دامنه‌ی تغییرمکان افقی سطح زمین می‌شود؛ به‌طوری‌که در نسبت امپدانس ۶ دامنه‌ی تغییرمکان افقی به حدود ۰/۳ نزول یافته است. از طرفی افزایش نسبت امپدانس باعث افزایش

مسلم است، عدم تغییرات محسوس نه تنها در دامنه بلکه در نوسان پاسخ مشهود است. البته با توجه به اینکه تونل مستقیم فرض شده و سطح زمین کاملاً یکنواخت است، مشاهده‌ی چنین نتایجی دور از انتظار نیست. به منظور تکمیل نتایج بخش مطالعه‌ی مقایسه‌ای، شکل ۱۷ تا شکل ۱۹، ارائه شده است.



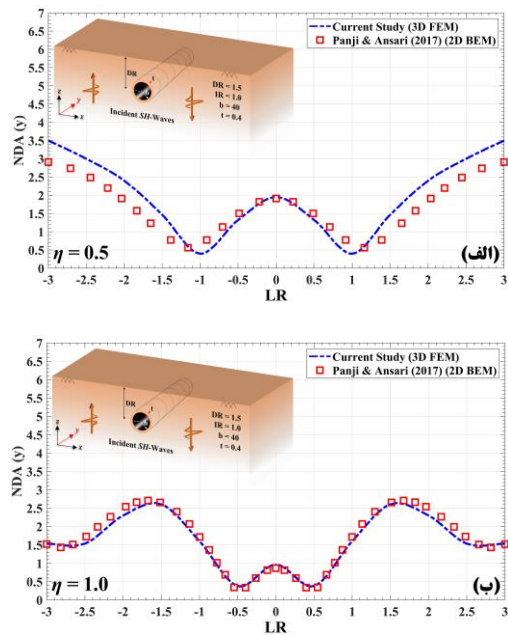
شکل ۱۷-مقایسه‌ی روش اجزای محدود سه‌بعدی و اجزای مرزی دوبعدی در تأثیر نسبت عمق بر دامنه‌ی تغییرمکان پاسخ سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج لرزه‌ای قائم SH

شایان ذکر است، نتایج حاصل از روش اجزای مرزی حاضر مبتنی بر یک الگوریتم پیشرفته‌ی رایانه‌ای تعیین شده که پیشتر تحت عنوان برنامه‌ی داس پم (Panji, et

این بدان معنی است که در حالت هجوم امواج برشی، پوشش‌دار بودن تونل و افزایش سختی آن به مشابه یک ایزولاسیون لرزه‌ای عمل نموده و موجب میرا شدن حرکت سطح زمین بالای تونل می‌شود. اگرچه برای امواج مهاجم SH (شکل ۱۵) رفتار پاسخ سطح زمین در فواصل اطراف تونل (در محدوده‌ی شعاع تونل) مشابه حالت SV است، ولیکن در محدوده‌ی بالای تونل، حضور پوشش باعث افزایش اندک به همراه کاهش نوسان پاسخ سطح شده است.

۳-۵-مطالعه‌ی مقایسه‌ای

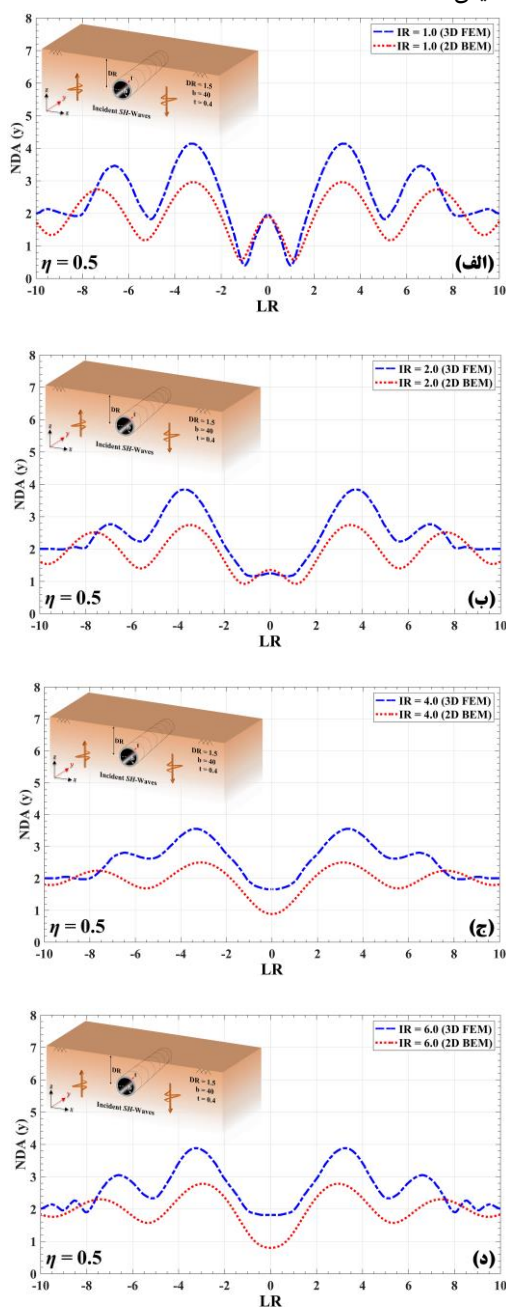
در شکل ۱۶، پاسخ سطح زمین حاصل از مطالعه‌ی حاضر با نتایج دوبعدی (Panji & Ansari, 2017) برای تونل بدون پوشش مستقر در نسبت عمق ۱/۵ مقایسه شده است. محققان یاد شده با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان به مدل‌سازی دوبعدی تونل‌های بدون پوشش/پوشش‌دار دایره‌ای تحت امواج مهاجم SH پرداخته‌اند.



شکل ۱۶-مقایسه‌ی پاسخ سطح زمین حاصل از مطالعه‌ی سه‌بعدی حاضر با نتایج دوبعدی اجزای مرزی در مطالعه‌ی (Panji & Ansari, 2017)

چنانچه در فرکانس‌های مختلف مشاهده می‌شود، در برخی نقاط سطح زمین نتایج سه‌بعدی غالب شده و آنچه

(شکل ۹) فراهم آید. مقایسه‌ی نتایج حوزه‌ی زمان نیز انطباق مناسب پاسخ‌های حاصل از دو رویکرد مزبور را به نمایش گذاشته است.



شکل ۱۸- مقایسه‌ی روش اجزای محدود سه‌بعدی و اجزای مرزی دو‌بعدی در تأثیر نسبت امپدانس بر دامنه‌ی تغییرمکان پاسخ سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج لرزه‌ای قائم SH .

(*al.*, 2013) شناخته شده است. این برنامه به صورت ویژه برای تحلیل تونل‌های پوشش‌دار با مقاطع دلخواه در برابر امواج مهاجم SH توسعه یافته است (Panji & Ansari, 2017). در شکل ۱۷، نتایج حاصل از روش اجزای محدود سه‌بعدی و اجزای مرزی نیم‌صفحه‌ی دو‌بعدی برای مقایسه‌ی تأثیر نسبت عمق بر دامنه‌ی تغییرمکان سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای با امپدانس ۶ در برابر امواج لرزه‌ای قائم SH نشان داده شده است.

پاسخ نشان شده در نسبت‌های عمق ۱/۵، ۳ و ۵ ارائه شده است. آنچه در نخست با مشاهده‌ی این شکل استنباط می‌شود افزایش پاسخ مدل سه‌بعدی در مقایسه با دو‌بعدی با حفظ الگوی حرکت در حالت تونل پوشش‌دار است؛ این در صورتی است که در حالت بدون پوشش (شکل ۱۶) این اختلاف ناچیز بود. از سوی دیگر، افزایش نسبت عمق تونل در مدل‌های سه‌بعدی موجب بزرگنمایی دامنه‌ی تغییرمکان سطح زمین در نواحی اطراف تونل تا مقدار ۵/۵ شده است. این در حالی است که تغییرمکان حاصل از روش اجزای مرزی دو‌بعدی در مقادیر کمتر از ۳ ثابت یافته‌اند.

در شکل ۱۸، اثر نسبت امپدانس پوشش نگاه‌دارنده با محیط پیرامون بر اساس دو رویکرد مزبور برای یک تونل دایره‌ای پوشش‌دار مستقر در نسبت عمق ۱/۵ مورد مطالعه قرار گرفته است. نسبت امپدانس در نظر گرفته شده مطابق بخش‌های قبل، شامل مقادیر ۱/۰، ۲/۰، ۴/۰ و ۶/۰ است. نتایج حاصل نشان می‌دهد، اگرچه الگوی نوسان تغییرمکان در نواحی مختلف سطح تا مقدار زیادی مشابه یکدیگر بوده، اما بهره‌گیری از روش اجزای محدود سه‌بعدی، به افزایش اندک مقادیر پاسخ منتج شده است؛ همچنین، افزایش نسبت امپدانس، نوسان پاسخ‌های حاصل از رویکرد سه‌بعدی را بیش از مدل‌های دو‌بعدی تحت تأثیر قرار داده است. در ادامه، شکل ۱۹، مبین الگوی پاسخ تاریخی‌ی زمانی سطح زمین در حضور یک تونل دو‌بعدی پوشش‌دار دایره‌ای با نسبت عمق ۱/۵ و نسبت امپدانس ۶/۰ در برابر امواج مهاجم SH است.

نتیجه‌ی مذکور با بهره‌گیری از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان تعیین شده و کلیه‌ی پارامترهای دخیل مطابق بخش (۲-۳) منظور شده است تا امکان قیاس مستقیم با پاسخ حاصل از روش اجزای محدود سه‌بعدی

تحقیق، موارد زیر قابل جمع‌بندی است:

۱- چنانچه از نتایج مربوط به نسبت عمق مشاهده شد، تقریباً در نسبت‌های بزرگتر از ۵ و ۸ به ترتیب برای امواج P/SV و SH اثر حضور تونل از بین رفته و پاسخ به سمت حرکت میدان آزاد سطح زمین همگرا شد.

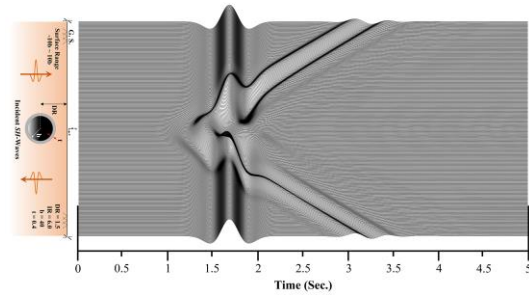
۲- علاوه بر تأثیر اندک امواج فشاری P بر تغییرمکان افقی سطح، در حالت هجوم امواج برشی SV و SH تغییرات محسوس برای این مؤلفه‌ی حرکت در نسبت عمق‌های مختلف به چشم خورد.

۳- هرچند در حالت هجوم امواج درون‌صفحه‌ی P/SV افزایش نسبت امیدانس در کاهش پاسخ افقی سطح بالای تونل مؤثر بود، در حالت هجوم امواج برون‌صفحه SH نتایج معکوس مشاهده شد.

۴- از نتایج حاصل از مطالعه‌ی مقایسه‌ای مبین شد، تغییر نسبت عمق و امیدانس در مدل‌های سه‌بعدی اثر قوی‌تر بر نوسان دامنه‌ی تغییرمکان سطح زمین در مقایسه با مدل‌های دوبعدی نظیر داشت.

۵- از مقایسه‌ی دامنه‌ی پاسخ‌ها، تقریباً افزایش واحد نتایج اجزای محدود سه‌بعدی در قیاس با اجزای مرزی دوبعدی مشخص شد.

۶- اگرچه الگوی پاسخ حاصل از مدل‌های دو و سه‌بعدی در بروز رفتار مشابه همسو بودند، ولیکن اهمیت مدل‌سازی سه‌بعدی و عدم اکتفا به نتایج دوبعدی در نرخ افزایش پاسخ در برابر تغییر پارامترهای مزبور کاملاً مشهود شد.



شکل ۱۹- الگوی کلی پاسخ تاریخی‌چهی زمانی سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای تحت هجوم امواج لرزه‌ای قائم SH حاصل از روش اجزای مرزی دوبعدی

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به مدل‌سازی سه‌بعدی پاسخ سطح زمین در حضور یک تونل پوشش‌دار دایره‌ای در برابر امواج مهاجم P/SV و SH پرداخته شد. در این راستا از روش عددی اجزای محدود در قالب نرم‌افزار تجاری آباکوس بهره گرفته شد. از مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود با پاسخ‌های موجود در ادبیات فنی مشاهده شد، مدل تهیه شده از دقت کافی برخوردار است. در ادامه، با در نظر گرفتن برخی پارامترهای کلیدی مدل از قبیل نسبت عمق و امیدانس، یک تحلیل حساسیت برای تعیین پاسخ لرزه‌ای سطح زمین انجام شد. در نهایت نیز یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای بین نتایج حاصل و پاسخ دوبعدی اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان انجام پذیرفت. از مشاهده‌ی نتایج حاصل از این

۵- مراجع

- Balendra, T., Thambiratnam, D.P., Koh, C.G., Lee, S.L. (1984). Dynamic response of twin circular tunnels due to incident SH -waves. *Earthq Eng Struct Dyn*, 12(2), 181-201.
- Ba Z., Yin X., (2016). Wave scattering of complex local site in a layered half-space by using a multidomain IBEM: incident plane SH -waves, *Geophys J Int*, 205, 1382-1405.
- Chin, Y.F., Rajapakse, R.K.N.D., Shah, A.H., Datta, S.K. (1987). Dynamics of buried pipes in back-filled trench. *Soil Dyn Earthq Eng*, 6(3), 158-163.
- Chen, J.T., Lee, J.W., Wu, C.F., Chen, I.L. (2011). SH -wave diffraction by a semi-circular hill revisited: a null-field boundary integral equation method using degenerate kernels. *Soil Dyn Earthq Eng*, 31, 729-736.
- Dominguez, J., Gallego, R., (1991). The time domain boundary element method for elastodynamic problems. *Math Comp Model*, 15(3-5), 119-129.

- Davis, C.A., Lee, V.W., Bardet, J.P. (2001). Transverse response of underground cavities and pipes to incident *SV*-waves. *Earthq Eng Struct Dyn*, 30(3), 383-410.
- Esmaeili, M., Vahdani, S., Noorzad, A. (2006). Dynamic response of lined tunnel to plane harmonic waves. *Tunnel Undergr Space Technol*, 21, 511-519.
- Gizzi, F.T., Masini, N. (2006). Historical damage pattern and differential seismic effects in a town with ground cavities: A case study from Southern Italy. *Eng Geolog*, 88(1-2), 41-58.
- Huang, M., Pan, B.Y. (2012). Dynamic stress concentration of underground lined cavities in different distance under incident plane *SV*-wave. *Adv Mater Res*, 446-449, 2317-2320.
- Huang, J.Q., Du, X.L., Jin, L., Zhao, M. (2016). Impact of incident angles of *P*-waves on the dynamic response of long lined tunnels. *Earthq Eng Struct Dyn*, 45(15), 2435-2454.
- Jiang, I., Chen, J. (2010). Seismic response of underground utility tunnels: shaking table testing and FEM analysis. *Earthq Eng Eng Vib*, 9(4), 555-567.
- Kuhlemeyer R.L. and Lysmer J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *J Soil Mech Found Div*, 99(5), 421-427.
- Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A., (2003). On time-domain two-dimensional site response analysis of topographic structures by BEM. *J Seism Earthq Eng*, 5(2), 35-45.
- Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., 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., 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-Transact Civ Eng*, 39, 319-322.
- Lysmer, J., Drake, L.A. (1972). A finite element method for seismology, *Meth Comp Phys*. Ed Bolt BA, Academic Press, New York. 11, 181-216.
- Lee, V.W., Trifuanc, M.D., (1979). Response of tunnels to incident *SH*-waves. *J Eng Mech Div*, ASCE, 105(4), 643-659.
- Lee, V.W., Karl, J. (1992). Diffraction of *SV*-waves by underground, circular, cylindrical cavities. *Soil Dyn Earthq Eng*, 11(8), 445-456.
- Luco, J.E., 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(3), 321-340.
- Lee, V.W., Manoogian, M.E., (1995). Surface motion above an arbitrary shape underground cavity for incident *SH*-waves. *J Europ Earthq Eng*, 7(1), 3-11.
- Liang, J., Zhang, H., Lee, V.W. (2003). A series solution for surface motion amplification due to underground twin tunnels: incident *SV*-waves. *Earthq Eng Eng Vib*, 2(2), 289-298.
- Liang, J.W., Lee, V.W., Zhang, H. (2004). A series solution for surface motion amplification due to underground group cavities: Incident *P*-waves. *Acta Seismol Sinica*, 17(3), 296-307.

- Liu, D.K., Lin, H. (2004). Scattering of *SH*-waves by an interacting interface linear crack and a circular cavity near bimaterial interface. *Acta Mech Sinica*, 20(3), 317-326.
- Liao, W.I., Yeh, C.S., Teng, T.J. (2008). Scattering of elastic waves by a buried tunnel under obliquely incident waves using T matrix. *J Mech*, 24(4), 405-418.
- Liang, J., Luo, H., Lee, V.W., (2010). Diffraction of plane *SH*-waves by a semi-circular cavity in half-space. *Earthq Sci*, 23(1), 5-12.
- Li, Y.S., Li, T.B., Zhang, X. (2012). Response of shallow-buried circular lining tunnel to incident *P*-wave. *Appl Mech Mater*, 160, 331-336.
- Liu, Q., Zhao, M., Wang, L. (2013). Scattering of plane *P*, *SV* or *Rayleigh*-waves by a shallow lined tunnel in an elastic half-space. *Soil Dyn Earthq Eng*, 49, 52-63.
- Liu, Z., Liu, L. (2015). An IBEM solution to the scattering of plane *SH*-waves by a lined tunnel in elastic wedge space. *Earthq Sci*, 28(1), 71-86.
- Liu, Q., Zhang, Ch., Todorovska, M.I. (2016). Scattering of *SH*-waves by a shallow rectangular cavity in an elastic half space. *Soil dyn Earthq Eng*, 90, 147-157.
- Liu, Z., Wang, Y., Liang, J. (2016). Dynamic interaction of twin vertically overlapping lined tunnels in an elastic half-space subjected to incident plane waves. *Earthq Sci*, 29(3), 185-201.
- Lee, Y.T., Chen, J.T., Kuo S.R. (2019). Semi-analytical approach for torsion problems of a circular bar containing multiple holes/cracks. *Eng Fract Mech*, 219, 106547.
- Mansur, W.J., (1983). A time-stepping technique to solve wave propagation problems using the boundary element method [Ph.D. dissertation]. *University of Southampton*.
- Moore, I.D., Guan, F. (1996). Three-dimensional dynamic response of lined tunnels due to incident seismic waves. *Earthq Eng Struct Dyn*, 25(4), 357-369.
- Manoogian, M.E. (2000). Scattering and diffraction of *SH*-waves above an arbitrarily shaped tunnel. *ASET J Earthq Technol*, 37(1-3), 11-26.
- Nohegoo-Shahvari, A., Kamalian, M., Panji, M. (2018). Two-dimensional dynamic analysis of alluvial valleys subjected to vertically propagating incident *SH*-waves. *Int J Civ Eng*, 17, 823-839.
- Nohegoo-Shahvari, A., Kamalian, M., Panji, M. (2019). A hybrid time-domain half-plane FE/BE approach for *SH*-wave scattering of alluvial sites. *Eng Analy BE*, 105, 194-206.
- Panji, M., Kamalian, M., Asgari-Marnani, J., Jafari, M.K., (2013). Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. *Geophys J Int*. 194, 1849-1865.
- Parvanova, S.L., Dineva, P.S., Manolis, G.D., Wuttke, F. (2014). Seismic response of lined tunnels in the half-plane with surface topography. *Bull Earthq Eng*, 12(2), 981-1005.
- Panji, M., Kamalian, M., Asgari-Marnani, J., Jafari, M.K. (2014). Antiplane seismic response from semi-sine shaped valley above embedded truncated circular cavity: a time-domain half-plane BEM. *Int J of Civ Eng*, 12(2), 194-206.

- Panji, M., Ansari, B., (2017). Transient *SH*-wave scattering by the lined tunnels embedded in an elastic half-plane. *Eng Analy BE*, 84, 220-230.
- Panji, M., Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., (2018). Time-history responses on the surface by regularly distributed enormous embedded cavities: Incident *SH*-waves. *Earthq Sci*, 31, 1-17.
- Panji M., Mojtabazadeh-Hasanlouei S., (2019). Seismic amplification pattern of the ground surface in presence of twin unlined circular tunnels subjected to *SH*-waves [In Persian]. *J Transp Infrast Eng*, 5(3), 111-134.
- Panji, M., Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., Yasemi, F., (2020). A half-plane time-domain BEM for *SH*-wave scattering by a subsurface inclusion. *Comp Geosci*, 134, 104342.
- Panji, M., Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., (2020). Transient response of irregular surface by periodically distributed semi-sine shaped valleys: Incident *SH*-waves. *J Earthq Tsu*, 14(1), 2050005.
- Ricker, N. (1953). The form and laws of propagation of seismic wavelet. *Geophys*, 18(1), 10-40.
- Rabeti-Moghadam, M., Baziar, M.H. (2016). Seismic ground motion amplification pattern induced by a subway tunnel: Shaking table testing and numerical simulation. *Soil Dyn Earthq Eng*, 83, 81-97.
- Smith, W.D. (1975). The application of finite element analysis to body wave propagation problems. *Geophys J Royal Astronom Soc*, 42(2), 747-768.
- Smerzini, C., Aviles, J., Paolucci, R., Sanchez-Sesma, F.J. (2009). Effect of underground cavities on surface earthquake ground motion under *SH*-wave propagation. *Earthq Eng Struct Dyn*, 38, 12, 1441-1460.
- Tsaur, D.H., Chang, K.H. (2012). Multiple scattering of *SH*-waves by an embedded truncated circular cavity, *J Marine Sci Tech*, 20(1), 73-81.
- Verrucci, L., Lanzo, G., Pagliaroli, A., Sanò, T. (2012). Effects of cavities on seismic ground response. In: *proceeding second international conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering*.
- Wong, K.C., Shah, A.H., Datta, S.K. (1985). Dynamic stresses and displacements in a buried tunnel. *J Eng Mech*, 111(2), 218-234.
- Wang, L., Xu, Y., Xia, J., Luo, Y. (2015). Effect of near-surface topography on high-frequency *Rayleigh*-wave propagation. *J Appl Geophys*, 116, 93-103.
- Xu, H., Li, T., Xu, J., Wang, Y. (2014). Dynamic response of underground circular lining tunnels subjected to incident *P*-waves. *Math Probl Eng*, 2014(4), 1-11.
- Yeh, C.S., Teng, T.J., Shyu, W.S., Tsai, I.C. (2002). A hybrid method for analyzing the dynamic responses of cavities or shells buried in an elastic half-plane. *J Mech*, 18(2), 75-87.
- Yu, C., W. Dravinski, M. (2009). Scattering of plane harmonic *SH*-wave by a completely embedded corrugated scatterer. *Int J Numer Meth Eng*, 78, 196-214.

- Yiouta-Mitra, P., Kouretzis, G., Bouckovalas, G., Sofianos, A. (2007). Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures. In: *Proceedings of the dynamic response and soil properties, New Peaks in Geotechnics*.
- Zhou, H., Chen, X.F. (2006). A new approach to simulate scattering of *SH*-waves by an irregular topography. *Geophys J Int*. 164, 449-459.
- Zhang, Y., Zhou, C., Liu, Y. (2011). Dynamic stresses concentrations of *SH*-wave by circular tunnel with lining. *Adv Mater Res*, 323, 18-22

Seismic Analysis of the Surface in the Presence of Underground Lined Tunnel Subjected to Vertical Incident P/SV & SH-Waves: A Comparative Study

M. Panji^{1*}; S. Mojtabazadeh-Hasanlouei²; A. Ghiasvand³

1-Assistant Professor; Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University (IAUZ),
m.panji@iauz.ac.ir

2- PhD Student; Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University (IAUZ),
mojtabazadeh@iauz.ac.ir

3-Msc Student; Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University (IAUZ),
ali.qiasvand74@gmail.com

Received: 23 Aug 2020; Accepted: 25 Apr 2021
DOI: 10.22044/tuse.2021.10002.1397

Keywords

3D Modeling
ABAQUS
Amplification
Boundary element method
Finite element method
Lined tunnel
Seismic response

Final English Extended Abstract

Summary

In this paper, the seismic response of the surface in the presence of a circular underground lined tunnel subjected to vertical incident *P/SV* and *SH*-waves is obtained. In this regard, the three-dimensional (3D) finite element method (FEM) in the framework of ABAQUS numerical software is used for preparing the model. At first, a brief presentation of FEM formulation as well as solving a validation example is carried out. Then, by considering some key

parameters such as tunnel depth, and the impedance ratio of the lining, the response of the ground surface is sensitized. In this research, a comparative study is performed between the responses of 3D-FEM and 2D half-plane boundary element method (2D-BEM). The results show that the mentioned parameters are very effective in the formation of different patterns of ground motion. Furthermore, a slight increase of amplitudes is observed in the responses of the 3D approach compared to 2D modeling. The results of the present study can be used to complete the accuracy of existing seismic codes around the subject of micro-zonation of the site in the presence of subsurface openings as well. For this study, a 3D finite element software named ABAQUS has been utilized to sensitize the effect of some key parameters such as the depth/impedance ratio of the tunnel, and then, a comparative study has been performed between the results of 3D-FEM and 2D-BEM as well.

Introduction

Study on the role of subsurface topographic features such as cavities and lined tunnels on the amplification/de-amplification of the earthquake is carried out as one of the major issues in the field of geotechnical engineering. In this paper, seismic analysis of the surface is made in the presence of a circular underground lined tunnel subjected to vertical incident *P/SV* and *SH*-waves.

Methodology & Approaches

The 3D-FEM approach applied to ABAQUS software is utilized for modeling circular subsurface lined tunnel. Besides, an advanced general algorithm named DASBEM has been used to determine the responses based on 2D half-plane time-domain BEM. It should be noted that this computer program has previously developed for analyzing arbitrary shaped lined tunnels subjected to *SH*-waves.

Conclusions

The results of this study show that although the oscillation patterns are almost the same in both methods, the obtained

responses of 3D-FEM approach are slightly higher than those of the 2D-BEM approach.
