

بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختگاه‌های واقع بر تونل‌های دوقلو در اثر انتشار امواج برشی درون صفحه

حمید علی‌الهی^{۱*}؛ محمد آدم پیراء^۲؛ مرتضی عسگری^۳

۱- استادیار؛ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، زنجان، ایران

۲- دانشجوی دکتری؛ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد؛ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، زنجان، ایران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۴/۰۶/۲۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۸/۲۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2016.840

| واژگان کلیدی | چکیده |
|---|---|
| بزرگنمایی لرزه‌ای تونل‌های دوقلو روش اجزای مرزی امواج برشی درون صفحه‌ای حوزه زمان | امروزه مشکل ترافیک در اغلب شهرهای بزرگ و در حال توسعه به چشم می‌خورد و یکی از موثرترین راه‌حل‌ها در این زمینه ایجاد و گسترش شبکه حمل و نقل زیرزمینی است. از طرفی احداث تونل‌های زیر زمینی نظیر متروها و تاثیر آن‌ها بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و در پی آن بر سازه‌های روستحی جزو چالش‌های ژئوتکنیک لرزه‌ای بوده و در مرحله تحقیق است. از این روی، در این مقاله سعی شده که با بکارگیری روش عددی اجزای مرزی دو بعدی در حوزه زمان در یک محیط همگن و همسان، به بررسی پاسخ لرزه‌ای و الگوی بزرگنمایی سطح زمین واقع بر روی تونل‌های زیرزمینی دوقلو و منفرد تحت تاثیر امواج مهاجم برشی درون صفحه‌ای در فرکانس‌های مختلف پرداخته شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که وجود تونل‌های زیرزمینی دوقلو می‌تواند مولفه‌های افقی و قائم جابجایی سطح زمین را ۲۳ برابر در مقایسه با حالت تونل منفرد و ۲۶ برابر سطح میدان آزاد، تحت تاثیر قرار دهد. در مقاطع مختلف هندسی، الگوی بزرگنمایی یکسانی مشاهده می‌شود، در صورتی که تفاوت اصلی در اندازه مقادیر بزرگنمایی لرزه‌ای ایجاد شده توسط آن‌ها است. |

۱- پیش‌گفتار

که عوارض زیرزمینی مانند تونل‌ها و متروها و همچنین سازه‌های واقع بر آنها، در هنگام زلزله دارای پتانسیل تخریب و اختلال در کاربری هستند (Mauge & Soccodato, 2014). به عبارتی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین واقع بر تونل‌ها متفاوت از سطح زمین آزاد بدون حضور تونل و یا حفره است. این در حالیست که علی‌رغم اهمیت این موضوع به دلیل کمبود اطلاعات و تحقیقات در این خصوص، نحوه عملکرد و پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در حضور تونل‌ها و حفره‌های زیر سطحی و به‌خصوص تونل‌های زیرزمینی دوقلو جزو ابهامات و ناشناخته‌های مهندسی زلزله محسوب می‌شود. از طرفی تاکنون آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای در این مورد تدابیر و توصیه‌های فنی لازم جهت اعمال این اثرات و مقاوم سازی

امروزه در اکثر شهرهای پرجمعیت احداث و توسعه گذرگاه‌های زیرزمینی نظیر متروها به عنوان راه‌حلی مناسب برای حل مشکلات ترافیکی مورد توجه قرار گرفته است. در برخی از شهرهای پر جمعیت برای افزایش ظرفیت حمل مسافر و کاهش ازدحام مسافران، احداث تونل‌های جدید در مجاورت تونل‌های قدیمی به عنوان یک راهکار مناسب در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر، وجود تونل‌ها و متروهای زیرزمینی می‌تواند تاثیر بسزایی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین داشته باشند. در همین راستا، مانوگیری و سوکوداتو بر مبنای تجربیات به دست آمده از زمین‌لرزه‌های گذشته نشان دادند

* استان زنجان؛ زنجان؛ خیابان معلم؛ خیابان شهید منصوری؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دپارتمان مهندسی عمران، گروه ژئوتکنیک؛ کدپستی: ۴۵۱۵۶۵۸۱۴۵؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۴-۳۳۴۲۱۰۰۱-۷؛ رایانامه: h.alielahi@iauz.ac.ir

سازه‌های واقع بر آن ارائه نداده‌اند.

مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پراکنش و تفرق امواج به واسطه تونل‌های زیرزمینی و به طور کلی حفره‌های زیرزمینی از جمله موضوعات مورد علاقه محققین ژئوفیزیک، زلزله شناسان و مهندسان بوده است. به طوری که از سال ۱۹۷۰ محققان بسیاری به بررسی تاثیر وجود تونل‌های منفرد بر پاسخ لرزهای سطح زمین پرداخته‌اند. از جمله تحقیقات انجام شده به روش‌های مختلف تحلیلی و نیمه تحلیلی در این زمینه می‌توان به تحقیقات دراوینسکی در سال ۱۹۸۳ (Dravinski, 1983)، لی و کارل در سال ۱۹۹۳ (Lee & Karl, 1993)، داویس و همکاران در سال ۲۰۰۱ (Davis, et al., 2001)، اسمرزینی و همکاران (Smerzini et al., 2009)، تسار و چانگ در سال ۲۰۱۲ (Tsaour & Chang, 2012) و لیو و همکاران در سال ۲۰۱۳ (Liu, et al., 2013) اشاره کرد. اما به دلیل ضعف و انعطاف پذیری پایین روش‌های تحلیلی در حل مسائل با هندسه و مشخصات مصالح پیچیده ضرورت استفاده از روش‌های عددی به دلیل مزایای آن در حل مسائل پیچیده احساس می‌گردد. از جمله تحقیقات انجام گرفته به روش‌های مختلف عددی در مورد اثر تونل‌های منفرد، ترک‌ها و بطور کلی حفره‌ها و فضا‌های زیرزمینی بر پاسخ لرزهای سطح زمین می‌توان به تحقیقات دی بارز و لوکو در سال ۱۹۹۳ (De Barros & Luco, 1993)، رودریگز-کاستلانوز در سال ۲۰۰۵ (Rodriguez-Castellanos, et al., 2005)، دراوینسکی و یو در سال ۲۰۱۰ (Dravinski & Yu, 2010)، علی‌الهی و همکاران در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ (Alielahi, et al., 2013; 2015)، باز یار و همکاران در سال ۲۰۱۴ (Baziar, et al., 2014) و علی‌الهی و آدم پیراء (Alielahi & Adampira, 2016) در سال ۲۰۱۶ اشاره نمود. با بررسی و مرور ادبیات فنی در این خصوص، مشاهده می‌شود مطالعات موجود در زمینه اثر حضور تونل‌های دوقلوی مجاور هم بر پاسخ لرزهای سطح زمین به ندرت انجام شده و تمرکز تمامی تحقیقات به برآورد تنش‌های ایجاد شده در دیواره و اطراف تونل‌ها و اندرکنش بین آنها بوده است. در این راستا می‌توان به تحقیقات مور و گان (Moore & Guan, 1996) در سال ۱۹۹۶ اشاره نمود. آنها به بررسی پاسخ حفره‌های دوقلوی استوانه‌ای در محیط

تمام صفحه تحت تاثیر انتشار امواج P و SV به روش تحلیلی پرداخته‌اند. در سال ۲۰۰۲، کاراکستاس و منولیز (Karakostas & Manolis, 2002) با استفاده از روش عددی اجزای مرزی، پاسخ دینامیکی حفره‌های زیرزمینی در اثر انتشار امواج برشی با تمرکز به محاسبه تنش پیرامون حفره‌ها پرداخته‌اند. در سال ۲۰۱۱، دروانفسکی و یو (Dravinsk & Yu, 2011) تفرق امواج هارمونیک SH به وسیله یک مجموعه متشکل از تعدادی حفره با شکل دلخواه و عمق مدفون مشخص را در محیط نیم صفحه با روش معادله انتگرال مرزی مستقیم مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که تغییر مکان سطح زمین در حضور حفره‌ها به دو عامل فرکانس موج مهاجم و هندسه آنها بستگی دارد. لیو و همکاران (Liu & Wang, 2012) در سال ۲۰۱۲، یک راه حل تحلیلی برای مساله تفرق امواج هارمونیک P و SV توسط تونل‌های دایره‌ای دوقلوی نزدیک به هم در محیط الاستیک تمام صفحه ارائه دادند. نتایج مطالعات عددی آنها نشان داد که فاصله بین تونل‌ها و فرکانس امواج انتشاری تاثیر عمده‌ای بر پاسخ دینامیکی تونل‌ها دارد. در سال ۲۰۱۳، لیانگ و همکاران (Liang, Han, & Ba, 2013) با استفاده از روش اجزای مرزی غیر مستقیم به مطالعه پراکنش امواج انتشاری SH توسط حفره‌های استوانه‌ای دوقلوی نامحدود در یک محیط نیم صفحه پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که حفره‌ها تغییر مکان سطح زمین را به طور قابل ملاحظه‌ای دچار بزرگنمایی و تقویت کرده و تغییر مکان سطح زمین با نزدیکتر شدن تونل‌ها به یکدیگر افزایش می‌یابد. پاروانووا و همکاران (Parvanova, et al., 2014) پاسخ لرزهای سطح زمین همراه با عوارض توپوگرافی رو سطحی را در حضور تونل‌ها در یک محیط نیم صفحه الاستیک همگن تحت اثر هجوم امواج SH با استفاده از روش اجزای مرزی مستقیم در حوزه فرکانس مورد ارزیابی قرار دادند. نتیجه حاصله نشان داد که بیشترین مقدار جابجایی برای تونل‌های دوقلو واقع در زیر تپه‌های عریض ایجاد شده و مکان هندسی حداکثر جابجایی در مرکز تقارن تونل‌ها است.

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که مطالعات انجام شده در زمینه پاسخ لرزهای ساختمانهای واقع بر تونل‌ها و فضا‌های زیرزمینی دوقلو مجاور هم محدود و

در این مقاله رفتار خاک به صورت خطی فرض شده و از نیروهای حجمی صرف نظر شده است. در مواردی که مرز Γ شامل حفره است، در واقع بیش از یک مرز وجود خواهد داشت. به عبارت دیگر تعداد متناهی از مرز داخلی غیر متقاطع توسط یک مرز خارجی محصور شده است. این نوع دامنه‌ها، دامنه‌های مرکب چند مرزی نامیده می‌شوند (Brebba & Dominguez, (Katsikadelis, 2002) (1989) که به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

با استفاده از روش باقی‌مانده‌های وزنی و با نادیده گرفتن سهم شرایط اولیه و نیروهای حجمی، می‌توان معادله انتگرال مرزی حاکم بر محیط‌های الاستیک خطی همسان و همگن در دامنه Γ شامل حفره‌ها را به صورت زیر نوشت:

$$C_{ij}(\xi) \cdot u_i(\xi, t) = \int_{\Gamma_1} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma + \int_{\Gamma_2} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma + \int_{\Gamma_3} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma + \int_{AB} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma + \int_{CD} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma + \int_{BA} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma + \int_{DC} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma \quad (2)$$

U_{ij}^* و T_{ij}^* پاسخ‌های اساسی معادله دیفرانسیل (۱) و بیانگر مولفه‌های i ام بردارهای تغییر مکان و تنش مرزی نقطه x در لحظه t بوده که به واسطه اعمال یک بار متمرکز واحد موازی محور z ، در نقطه ξ و در لحظه $t \leq \tau$ پدید آمده است. u_i و t_i به ترتیب تغییر مکان و تنش وارد بر روی سطح مماس بر مرز Γ را بیان می‌کند. c_{ij} ضریب شناخته شده ناپیوستگی است که از منفرد بودن هسته

انگشت شمار بوده و نیاز به پژوهش در این موضوع بیش از پیش احساس می‌شود. لذا در این تحقیق سعی شده تا با ارائه یک روش عددی مناسب، تخمین دقیقی از رفتار و پاسخ لرزه‌های سطح زمین (نیم‌فضا) در اثر حضور تونل‌ها و یا حفره‌های زیر سطحی به ویژه تونل‌های دوقلوی مجاور یکدیگر تحت اثر امواج مهاجم SV ارائه گردد. این در حالی است که نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان گام اولیه در انجام مطالعات لرزه خیزی و ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای مناطق واقع بر حفره‌ها و فضاهای زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش عددی مورد استفاده

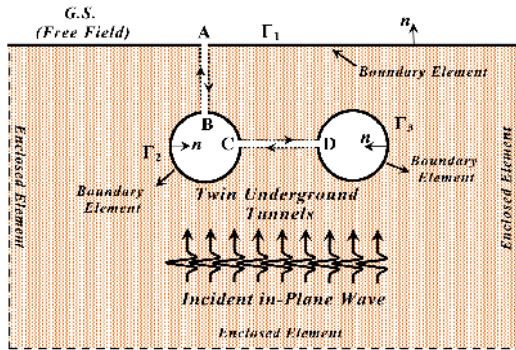
در بین روش‌های عددی، روش اجزای مرزی (BEM) در حل مسائل انتشار امواج در محیط‌های خطی نامحدود کارایی فراوانی دارد. چرا که از یک سو ابعاد دستگاه معادلات را کاهش داده و از سوی دیگر با ارضای شرایط مرزی انتشار در فواصل دور، نیاز به مش‌بندی حوزه دور را به حداقل ممکن کاهش می‌دهد. همچنین فرمول‌بندی مساله در حوزه زمان، امکان ترکیب الگوریتم اجزای مرزی با سایر روش‌های عددی جهت حل مسائل غیرخطی را فراهم می‌کند (Alielahi, et al., 2013; 2015). با توجه به مطالب ذکر شده در این مقاله برای مدل‌سازی تونل‌های دوقلو و تاثیر آنها بر الگوی بزرگنمایی سطح زمین از یک الگوریتم کامپیوتری توسعه یافته به نام $SAMBE$ (Seismic Analysis of Multiple Boundary Element) بر مبنای روش اجزای مرزی مستقیم در حوزه زمان استفاده شده که در ادامه فرمولاسیون مورد استفاده جهت حل مساله ارائه شده است.

۲-۱- معادلات روش اجزای مرزی

معادله دیفرانسیل حاکم بر تعادل دینامیکی محیط‌های ارتجاعی، همسان و همگن، در محدوده تغییر شکل‌های کوچک، با استفاده از رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$(c_1^2 - c_2^2) \cdot \frac{\partial u_i(x, t)}{\partial x \partial x_j} + c_2^2 \cdot \frac{\partial u_i(x, t)}{\partial x \partial x_j} + b_i(x, t) - \frac{\partial^2 u_i(x, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

که u_i بیانگر تغییر مکان و b_i بیانگر نیروی حجمی خاک می‌باشند. c_1 و c_2 به ترتیب سرعت‌های امواج طولی و عرضی خاک را نشان می‌دهند که از روابط $c_1^2 = (\lambda + 2\mu)/\rho$ و $c_2^2 = \mu/\rho$ به دست می‌آیند. در این روابط λ و μ ضرایب لامه و ρ دانسیته جرمی خاک می‌باشند.



شکل ۱- مدل شماتیک هندسه چند مرزی

۲-۱-۱- جداسازی در مکان و زمان

برای حل معادله انتگرال مرزی (۷)، اجزای آن باید در هر دو فضای زمان و مکان جداسازی شوند. برای جداسازی زمانی، محور زمان از صفر تا t به N بازه مساوی (Δt)، تقسیم شده

$$\text{است } (t = \sum_{n=1}^N n\Delta t)$$

برای حل مسائل عملی نیاز به داشتن تقریب مناسبی از متغیرهای محیط در هر دو حوزه زمان و مکان است. ادغام زمانی توابع زمانی به صورت تحلیلی و ادغام مکانی با استفاده از روش‌های عددی قابل حصول است. با استفاده از تغییرات خطی زمان در متغیرهای محیط، تغییر مکان به صورت زیر ارائه شده است:

$$u_i(x, \tau) = M_1(\tau) \cdot u_i^n(x) + M_2(\tau) \cdot u_i^{n-1}(x) \quad (8)$$

و $M_1(\tau)$ و $M_2(\tau)$ توابع شکل خطی زمان هستند که به

صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$t_{n-1} < \tau < t_n : \\ M_1(\tau) = \frac{\tau - t_{n-1}}{\Delta t} \quad \& \quad M_2(\tau) = \frac{t_n - \tau}{\Delta t} \quad (9)$$

اندیس‌های ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به گره‌های زمانی کنونی ($t_n = n\Delta t$) و قبلی ($t_{n-1} = (n-1)\Delta t$) در طول یک گام زمانی هستند. بنابراین ادغام زمانی تنها شامل هسته بوده و توسط روابط زیر بیان می‌شود:

$$F_{ij1}^{N-n+1}(x, \xi) = \int_{(n-1)\Delta t}^{n\Delta t} T_{ij}^*(x, n\Delta t; \xi, \tau) \cdot M_1(\tau) d\tau \\ F_{ij2}^{N-n+1}(x, \xi) = \int_{(n-1)\Delta t}^{n\Delta t} T_{ij}^*(x, n\Delta t; \xi, \tau) \cdot M_2(\tau) d\tau \quad (10)$$

T_{ij}^* ناشی می‌شود (Brebbia & Dominguez, 1989) و (Katsikadelis, 2002). از طرفی:

$$\int_{AB} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma = \\ - \int_{BA} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma \quad (3)$$

$$\int_{CD} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma = \\ - \int_{DC} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma \quad (4)$$

$$\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3$$

$$c_{ij}(\xi) \cdot u_i(\xi, t) = \\ \int_{\Gamma_1} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma \\ + \int_{\Gamma_2} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma \\ + \int_{\Gamma_3} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma \\ = \int_{\Gamma} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma \quad (5)$$

از طرفی در مسائل همگن، سطح آزاد، مرز محیط بوده و از تنش بر روی آن صرف نظر می‌شود که روابط فوق را برای هر نقطه ξ در مرز Γ می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$c_{ij}(\xi) \cdot u_i(\xi, t) = - \int_{\Gamma} \left[\int_0^t (T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma \quad (6)$$

به‌طور کلی در بارگذاری لرزه‌ای فرض شود که تغییر مکان کل به دو مولفه انتشاری (u_j^{inc}) و تفرق یافته (u_i^{sc}) تقسیم شده و معادله انتگرال مرزی (BIE) باید به صورت زیر بازنویسی شود (Kamalian, (Dominguez, 1993) (Kamalian, et Gatmiri, & Sohrabi-Bidar, 2003) (Kawase, 1988) al., 2006)

$$C_{ij}(\xi) \cdot u_i(\xi, t) = - \int_{\Gamma} \left[\int_0^t (T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma + u_j^{inc}(\xi, t) \quad (7)$$

روش غیر مستقیم مبتنی بر حرکت جسم صلب محاسبه می‌گردد. انتگرال دوم نیز که به دلیل یکسان بودن نوع و مرتبه انفراد هسته‌های الاستواستاتیک و الاستودینامیک عادی است، همانند دیگر انتگرال‌های عادی با کمک قاعده متعارف گوس برآورد می‌شود. یادآور می‌شود که تکنیک حرکت جسم صلب تنها در شرایطی قابل استفاده است، که مرزهای مساله بسته باشد. در مسائلی که با محیط‌های نیمه بی‌نهایت سر و کار دارند، می‌توان ابتدا با استفاده از المان‌های مجازی (*Enclosing element*) مرز مش‌بندی شده را بست، و سپس به محاسبه انتگرال‌های منفرد قوی اقدام نمود. بدیهی است که المان‌های مجازی، که صرفاً جهت بستن محیط بکار برده می‌شوند، تعداد درجات آزادی مساله را افزایش نخواهند داد.

معادلات ماتریس‌های (۱۳) و (۱۴) به منظور تحلیل پاسخ لرزه‌ای عوارض زیرزمینی و تاثیر آنها بر سطح زمین در برنامه کامپیوتری (*Seismic Analysis of SAMBE Multiple Boundary Element*) مبتنی بر روش اجزای مرزی در حوزه زمان تهیه شده است. در این برنامه به منظور مجزاسازی مرزها از المان‌های ۳ گرهی ایزو پارامتریک استفاده شده است. برنامه مذکور، با استفاده از کامپایلر فترن ۹۰ و به زبان فترن تهیه شده است. این برنامه شامل یک برنامه اصلی و چندین زیر برنامه می‌باشد.

۲-۲- اعتبارسنجی مدل عددی

با توجه به محدودیت‌های موجود در ادبیات فنی مسأله مورد نظر و نبود مطالعات مدون در مورد تاثیر لرزه‌ای تونل‌های دوقلو بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، به منظور امکان مقایسه‌ی نتایج تونل‌های دوقلو با تونل‌های منفرد، فاصله تونل‌ها از یکدیگر بطوری در نظر گرفته شده است، تا عملکرد هر کدام از تونل‌ها به صورت مستقل قابل بررسی باشد. به عبارتی با دور کردن فاصله بین تونل‌های مجاور هم، تاثیر تونل‌ها بر رفتار لرزه‌ای یکدیگر از بین رفته و رفتار آنها همانند تونل‌های منفرد خواهد بود. هندسه مدل در نظر گرفته شده و نمودار بزرگمایی نرمالیز شده جابجایی سطح زمین (نسبت دامنه موج جابجایی سطح زمین واقع بر حفره به حداکثر دامنه موج مهاجم) در حضور تونل‌های دوقلو بر اثر انتشار قائم امواج SV با فرض سرعت موج برشی 400 m/s و ضریب پواسون $\nu=0.33$

که در آن F_{ij1}^{N-n+1} و F_{ij2}^{N-n+1} به ترتیب هسته تنش الاستودینامیک گره زمانی قبلی و کنونی در طول گام زمانی هستند (*Kamalian, et al., 2003; 2006*).

با ترکیب هسته‌های تنش بالا در معادله (۷) و پس از جداسازی مکانی با استفاده از المان‌های ایزوپارامتریک درجه دو و بازنویسی مجدد آن، معادله اجزای مرزی برای تغییرات زمانی خطی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$c_{ij} u_i^N(\xi) = - \sum_{n=1}^N \sum_{q=1}^Q U_{ik}^n \int_{\Gamma_q} F_{ijL}^{N-n+1}(x, \xi) \cdot N_k(\eta) |J| d\eta + u_j^{inc}(\xi, t) \quad (11)$$

که در آن:

$$F_{ijL}^{N-n+1}(x, \xi) = F_{ij1}^{N-n+1}(x, \xi) + F_{ij2}^{N-n}(x, \xi) \quad (12)$$

N نشان دهنده آخرین گام زمانی، Q تعداد کل المان‌های مرزی، $N_k(\eta)$ تابع شکل در سیستم مختصات کمکی (η) و J بیانگر ژاکوبین تبدیل است.

F_{ijL}^{N-n+1} هسته تنش الاستودینامیک بوده که از حل اساسی T_{ij}^* که قبلاً ارائه شده، به دست می‌آید (*Dominguez, 1993*).

اگر معادله (۱۰) برای هر یک از نقاط مرزی در زمان $(t+\Delta t)$ نوشته شود و مجموع معادلات کنار هم قرار گیرند پس از انتقال تمام جملات معلوم به سمت راست تساوی، رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$F^1 \cdot U^N = R^N + U^{inc.N} \quad (13)$$

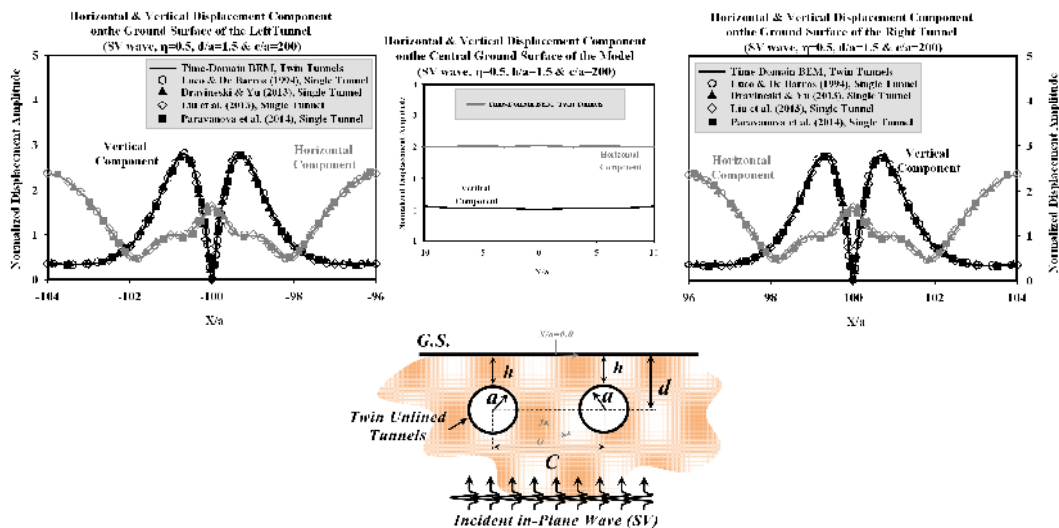
که در آن:

$$R^N = - \sum_{n=1}^{N-1} (F^{N+1-n} \cdot U^n) \quad (14)$$

معادله (۱۳) منجر به یک ماتریس مربعی $2Node \times 2Node$ می‌شود که می‌توان مقادیر جابجایی شناخته نشده را با حل آن به دست آورد. U^N نشان دهنده بردار جابجایی هر گره در زمان جاری است. R^N نشان دهنده تاثیر تاریخچه دینامیکی قبلی در زمان کنونی است. لازم به ذکر است که انتگرال‌های موجود در روابط (۱۳) و (۱۴) به راحتی با استفاده از قاعده متعارف گوس بر روی المان‌های عادی قابل محاسبه هستند. انتگرال اول که همان انتگرال منفرد حالت الاستواستاتیک است، به راحتی با استفاده از

برای محیط (مطابق شکل ۲) ارائه شده است. نتایج حاصله با نتایج تحقیقات لوکو و دی‌بارز (Luco & De Barros, 1994)، لی‌یانگ و لیو (Liang & Liu, 2009)، دراوینسکی و یو (Dravinski & Yu, 2013) و پاراوانا و همکاران (Parvanova, et al., 2014) مورد مقایسه قرار گرفته که تطابق مناسبی بین نتایج تحقیق حاضر با مطالعات پیشین مشاهده می‌شود.

نتایج تحقیقات لوکو و دی‌بارز (Luco & De Barros, 1994)، لی‌یانگ و لیو (Liang & Liu, 2009)، دراوینسکی و یو (Dravinski & Yu, 2013) و پاراوانا و همکاران (Parvanova, et al., 2014) مورد مقایسه قرار گرفته که تطابق مناسبی بین نتایج تحقیق حاضر با مطالعات پیشین مشاهده می‌شود.



شکل ۲- مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مطالعات پیشین

حضور حفره زیر سطحی به‌عنوان بزرگنمایی تعریف شده است. به منظور تسهیل در دسته بندی نتایج تحقیق، نمودارهای نتایج به‌دست آمده به صورت میانگین وزنی مقادیر بزرگنمایی در بازه‌های پرریزه‌ای بی‌بعد مختلف شامل: محدوده پرریزه‌های کوتاه (۰.۵ الی ۱)، متوسط (۱ الی ۲)، بلند (۲ الی ۴.۱۷) و خیلی بلند (۴.۱۷ الی ۸.۳۳) به صورت بی‌بعد ارائه شده است (Kamalian, et al. و Alielah, et al., 2015). همچنین پارامترهای زمان و فرکانس نیز به صورت زیر بی‌بعد شده‌اند.

$$T = \frac{t.c_2}{2a} \quad (15)$$

$$\eta = \frac{1}{P} = \frac{\omega.a}{\pi c_2} = \frac{2a}{\lambda} \quad (16)$$

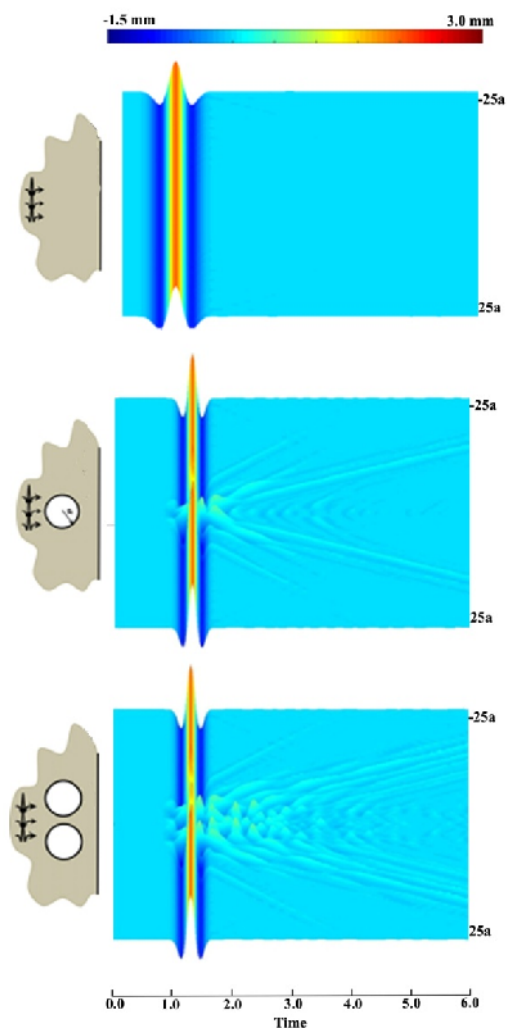
در این روابط، T زمان بی‌بعد، t زمان، c_2 سرعت موج برشی در محیط، a شعاع حفره، η فرکانس بی‌بعد، P پرریود بی‌بعد (نسبت طول موج مهاجم به قطر حفره)، ω فرکانس زاویه‌ای موج مهاجم و λ طول موج مهاجم است. شکل حفره‌های مورد مطالعه، شامل حفره‌های دوقلوی دایروی

قابل ذکر است که در مطالعات یاد شده پاسخ لرزه‌ای سطح زمین در فرکانس‌های بی‌بعد خاصی در حوزه فرکانس ارائه شده است. در نتیجه برای مقایسه با نتایج تحقیقات پیشین باید رابطه فرکانس بی‌بعد به صورت $\eta = \omega a / \pi c_2$ تعریف شود. که در آن ω فرکانس زاویه‌ای، a شعاع حفره، c_2 سرعت موج برشی محیط هستند. لازم به ذکر است که در تمامی مثال‌های اعتبار سنجی، d فاصله مرکز حفره تا سطح زمین (عمق تونل) برابر $1.5a$ ، C فاصله مرکز به مرکز تونل‌ها برابر $2.0a$ و موج انتشار یافته از نوع موج برشی ریکر می‌باشد که در رابطه (۱۷) آورده شده است. نتایج اعتبار سنجی به طور کلی در فرکانس بی‌بعد 0.5 ($\eta = 0.5$) و نسبت عمق به قطر برابر یک ($d/a = 1$) ارائه شده‌اند. همچنین طول المان‌های مرزی و گام زمانی نیز به ترتیب برابر 20 متر و 0.25 ثانیه برای کلیه تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است (Alielah, et al., 2013; 2015).

۲-۳- متدلوژی مطالعات پارامتریک

در این مطالعه نسبت دامنه تغییر مکان هر یک از نقاط سطح زمین واقع بر حفره‌ها به جابجایی نقاط سطح آزاد زمین بدون

نشان می‌دهد. این نمودارها چگونگی تفرق و پراکنش امواج مهاجم توسط حفره‌های زیرزمینی و انتشار آن‌ها در سطح زمین را نشان می‌دهند.



شکل ۳- مقایسه تاریخچه زمانی مولفه افقی تغییر مکان سطح زمین آزاد و سطح زمین واقع بر حفره دایره‌ای منفرد با نسبت $DR=0.5$ و حفره دایره‌ای دوقلو با نسبت $DR=0.5$ و $DHR=3$ برای امواج مهاجم SV

امواجی که به واسطه وجود حفره‌ها متفرق می‌شوند، امواج انعکاس یافته، تبدیل مد یافته، امواج پراشیده شده و امواج تداخلی سطحی می‌باشند. مجموعه این امواج در فاصله بین بالای حفره و سطح زمین در مدت کوتاهی تداخل نموده

موازی هم و مقایسه آنها با حفره‌های دایروی منفرد بوده و بازه متغیرهای مطالعات پارامتریک در این تحقیق شامل نسبت عمق $(3, 1.5, 1, 0.5)$ $DR=h/a$ و نسبت فاصله افقی حفره‌ها $(8, 5, 3, 2, 1)$ $DHR=c/a$ می‌باشد. همانطور که مشخص است، شکل ۲ علاوه بر نتایج صحت سنجی، هندسه حفره‌های زیرزمینی و پارامترهای آن شامل h عمق مدفون آنها تا سطح زمین، a شعاع تونل و C فاصله افقی دیواره تونل‌ها از یکدیگر را نشان می‌دهد. در کلیه تحلیل‌های پارامتریک از امواج مهاجم برشی SV از نوع موجک ریکر با (رابطه ۱۷) استفاده شده است. لازم به ذکر است که زاویه تابش امواج لرزه‌ای با توجه به کاهش سرعت امواج برشی در لایه‌های سطحی زمین می‌تواند به صورت قائم فرض شود. از این رو در مطالعه حاضر زاویه تابش امواج به صورت قائم در نظر گرفته شده است.

$$f(t) = A_{\max} [1 - 2(\pi f_p (t - t_0))^2] e^{-(\pi f_p (t - t_0))^2} \quad (7)$$

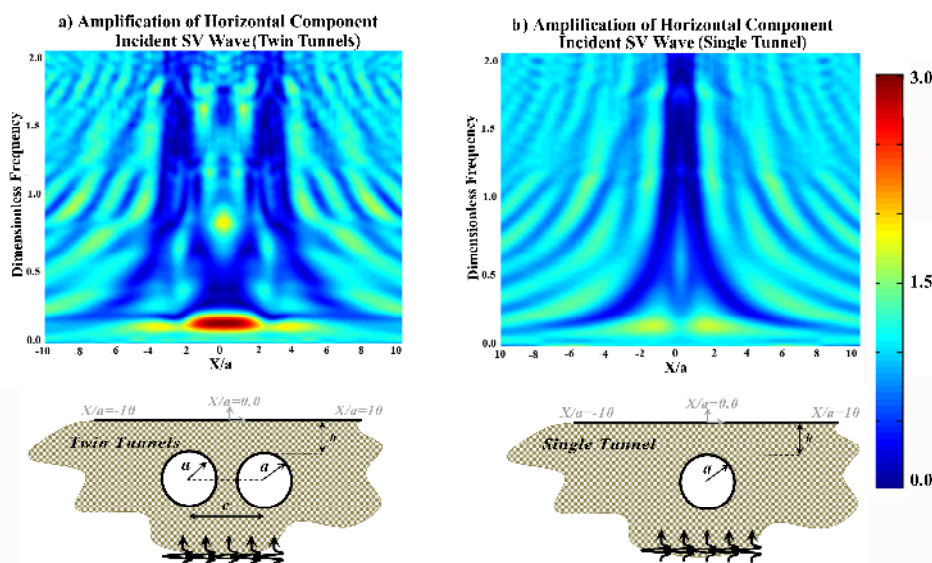
که در این رابطه f_p فرکانس غالب موج، t_0 زمان نظیر حداکثر دامنه موج و t زمان کل موج مهاجم است. لازم به ذکر است که در کلیه تحلیل‌های پارامتریک مقدار حداکثر دامنه موج مهاجم (A_{\max}) برابر ۱ میلی‌متر فرض شده است.

۳- پراکنش امواج در حوزه زمان و فرکانس

تاریخچه زمانی تغییر مکان یک نقطه، نشان دهنده‌ی حرکت آن نقطه است در هنگامی که امواج لرزه‌ای از آن عبور می‌کنند. به همین ترتیب، نمودار تغییر مکان نیز نشانگر میدان تغییر مکان به صورت تابعی از فضا و زمان می‌باشد که از قرار دادن تغییر مکان هر نقطه در محل فضایی آن به دست می‌آید. در واقع نمودار تغییر مکان نحوه انتشار امواج در محیط را به راحتی نشان می‌دهد. شکل ۳ نمودارهای مولفه افقی (مولفه موافق موج مهاجم) تاریخچه زمانی تغییر مکان در بازه مکانی $-25 \leq X/a \leq 25$ واقع در سطح زمین (نیم صفحه) را برای موج مهاجم SV، در حالت‌های مختلف سطح زمین آزاد بدون حفره، سطح زمین واقع بر حفره دایروی منفرد با نسبت $DR=0.5$ و سطح زمین واقع بر حفره‌های دایروی دوقلو با نسبت $DR=0.5$ و $DHR=3$ را

یافته فرکانسی است. این دسته از نتایج میزان بزرگنمایی در هر نقطه از سطح زمین را در تمامی بازه‌های فرکانسی و همچنین شمای کلی الگوهای بزرگنمایی را در سطح زمین نمایان می‌سازند. شکل ۴ نمودارهای مولفه افقی بزرگنمایی در محدوده $-10 \leq X/a \leq 10$ سطح زمین را برای موج مهاجم SV ، برای سطح زمین واقع بر حفره دایروی منفرد با نسبت $DR=0.5$ و حفره‌های دایروی دوقلو با نسبت $DR=0.5$ و $D_{HR}=3$ در حوزه فرکانس را نشان می‌دهد.

و جابجایی بسیار متغیری را در سطح زمین ایجاد می‌نماید. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، الگوی تغییر مکان سطح زمین متأثر از تعداد حفره‌های زیرزمینی نسبت به سطح زمین آزاد بوده که با افزایش تعداد حفره‌های زیرزمینی موجب پیچیده‌تر شدن تداخل امواج متفرق شونده می‌شود. از آنجا که از نتایج به دست آمده در حوزه زمان امکان استخراج میزان بزرگنمایی در تمامی محدوده‌های فرکانسی وجود ندارد، نیاز به دسته دیگری از نتایج در فضای تبدیل



شکل ۴- مقایسه مولفه افقی تغییر مکان سطح زمین واقع بر حفره دایره‌ای منفرد با نسبت $DR=0.5$ و حفره دایره‌ای دوقلو با نسبت $DR=0.5$ و $D_{HR}=3$ در حوزه فرکانس، برای امواج مهاجم SV

کاهش پیروی بی‌بعد، نوسانات پاسخ افزایش یافته و الگوی بزرگنمایی تغییر مکان پیچیده‌تر می‌شود. به عبارتی هرچه اندازه‌ی طول موج انتشار یافته نسبت به شعاع تونل کوچکتر باشد، الگوی بزرگنمایی تغییر مکان پیچیده‌تر است. هرگاه طول موج مهاجم نسبت به ابعاد تونل بسیار بزرگ باشد، حرکت آن‌ها یکنواخت‌تر و به حرکت سطح آزاد نزدیک‌تر می‌شود. قابل ذکر است که نسبت طول موج مهاجم به قطر تونل تعبیر فیزیکی پیرودهای بی‌بعد شده است. پس در حالت وجود تونل‌های زیرزمینی جدا از اندرکنش بین آن‌ها، نوسانات پاسخ لرزهای سطح زمین نیز شدیداً تحت تاثیر طول موج ارسالی است. یوتا-میترا (Yiouta-Mitra, et al., 2007) در بررسی‌های خود در مورد پاسخ لرزهای زمین

۴- نتایج مطالعات پارامتریک

نمودارها و نتایج حاصل از مطالعات پارامتریک در اثر تغییرات نسبت‌های هندسی مانند نسبت عمق تونل‌ها (DR) و نسبت فاصله افقی (D_{HR}) بر بزرگنمایی سطح زمین تحت انتشار موج برشی (SV) و همچنین اثر طول موج در ادامه مقاله ارائه شده است.

۴-۱- اثر طول موج مهاجم

جهت ارزیابی دقیق‌تر و استنتاج نتایج مهندسی، برای هر یک از نقاط روی سطح زمین، متوسط بزرگنمایی در هر یک از محدوده‌های پیرویدیک مشخص محاسبه شده است که نحوه تغییر بزرگنمایی بر روی سطح زمین را نشان می‌دهد. با

زمین با افزایش عمق تونل‌های دایره‌ای موازی به تدریج کاهش می‌یابد. این پدیده نشان می‌دهد که با افزایش عمق تونل تاثیر قطار امواج انعکاس یافته در بالای تونل تا سطح زمین کاهش می‌یابد (Tsaur & Chang, 2012) و (De Barros & Luco, 1993).

همچنین در شکل ۶ بزرگنمایی سطح زمین واقع بر حفره‌های منفرد برای نسبت عمق‌های مختلف (۳، ۱٫۵، ۱، ۰٫۵، $DR=0.5$) ارائه شده است. بزرگنمایی سطح زمین واقع بر حفره منفرد همانند حفره‌های دوقلو موازی بوده با این تفاوت که در حضور حفره‌های دوقلو مقدار و الگوی بزرگنمایی لرزه‌ای در هر دو مولفه موافق و مخالف موج ورودی بیشتر از حفره منفرد است.

۴-۳- اثر نسبت فاصله افقی تونل‌ها (D_{HR})

شکل ۷ تاثیر فاصله افقی تونل‌های دوقلو از یکدیگر بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را در بازه‌های مختلف پریودیک مختلف نشان می‌دهد. نتایج برای نسبت‌های مختلف فاصله افقی (۱، ۲، ۳، ۵، ۸، $D_{HR}=1, 2, 3, 5, 8$) و نسبت عمق ثابت ($DR=0.5$) برای هر دو مولفه افقی (مولفه موافق موج ورودی SV) و قائم (مولفه مخالف موج ورودی SV) بزرگنمایی تونل‌های دوقلو با تونل منفرد مورد مقایسه قرار گرفته است. تغییرات فاصله افقی تونل‌ها از یکدیگر و طول موج ارسالی تاثیر عمده‌ای بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین دارند. حداکثر مقادیر بزرگنمایی مولفه افقی برای تونل‌های دوقلو و منفرد در پریودهای بالا تا خیلی بالا مشاهده می‌شود. برای امواج انتشاری با طول موج‌های معادل ۲ تا ۸ برابر قطر تونل‌های دوقلو، فاکتور بزرگنمایی مولفه افقی در سطح زمین معمولاً مقادیر بزرگتر از واحد دارد و حداکثر بزرگنمایی در بزرگترین طول موج‌ها اتفاق می‌افتد. به طور کلی مقادیر بزرگنمایی مولفه افقی برای نسبت‌های D_{HR} کوچکتر در تونل‌های دوقلو خیلی بزرگتر از مقادیر بزرگنمایی تونل‌های منفرد است. بیشترین بزرگنمایی مولفه افقی تونل‌های دوقلو برابر ۲٫۶۱ حاصل شده که در نسبت‌های ($DR=0.5$) و ($D_{HR}=2$) رخ داده است که این مقدار در حدود ۲٫۳۰ برابر مقدار حداکثر بزرگنمایی مولفه افقی تونل منفرد است.

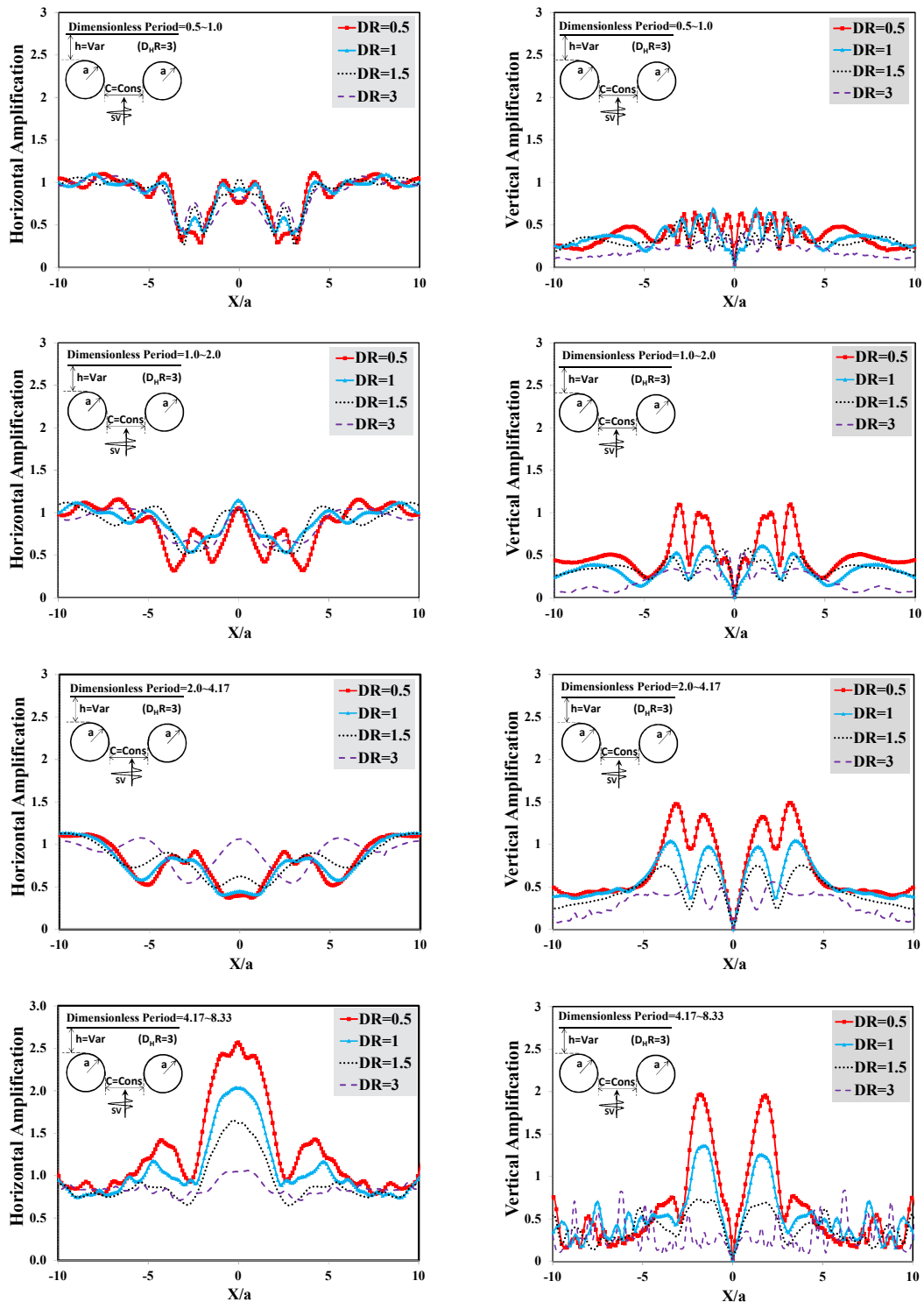
مسطح با وجود تونل منفرد به این نتیجه رسید که پاسخ زمین در صورت حضور تونل و تحریک طول موج‌های بزرگتر از قطر تونل، تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. در تحقیق حاضر نیز طول موج‌های ۲ تا ۸ برابر قطر تونل تعبیر فیزیکی محدوده پریودهای بلند تا خیلی بلند هستند. پس در نتیجه اثر وجود تونل در صورت انتشار امواج برشی با طول موج‌های بزرگتر از قطر تونل، از بین خواهد رفت.

۴-۲- اثر نسبت عمق تونل‌ها (DR)

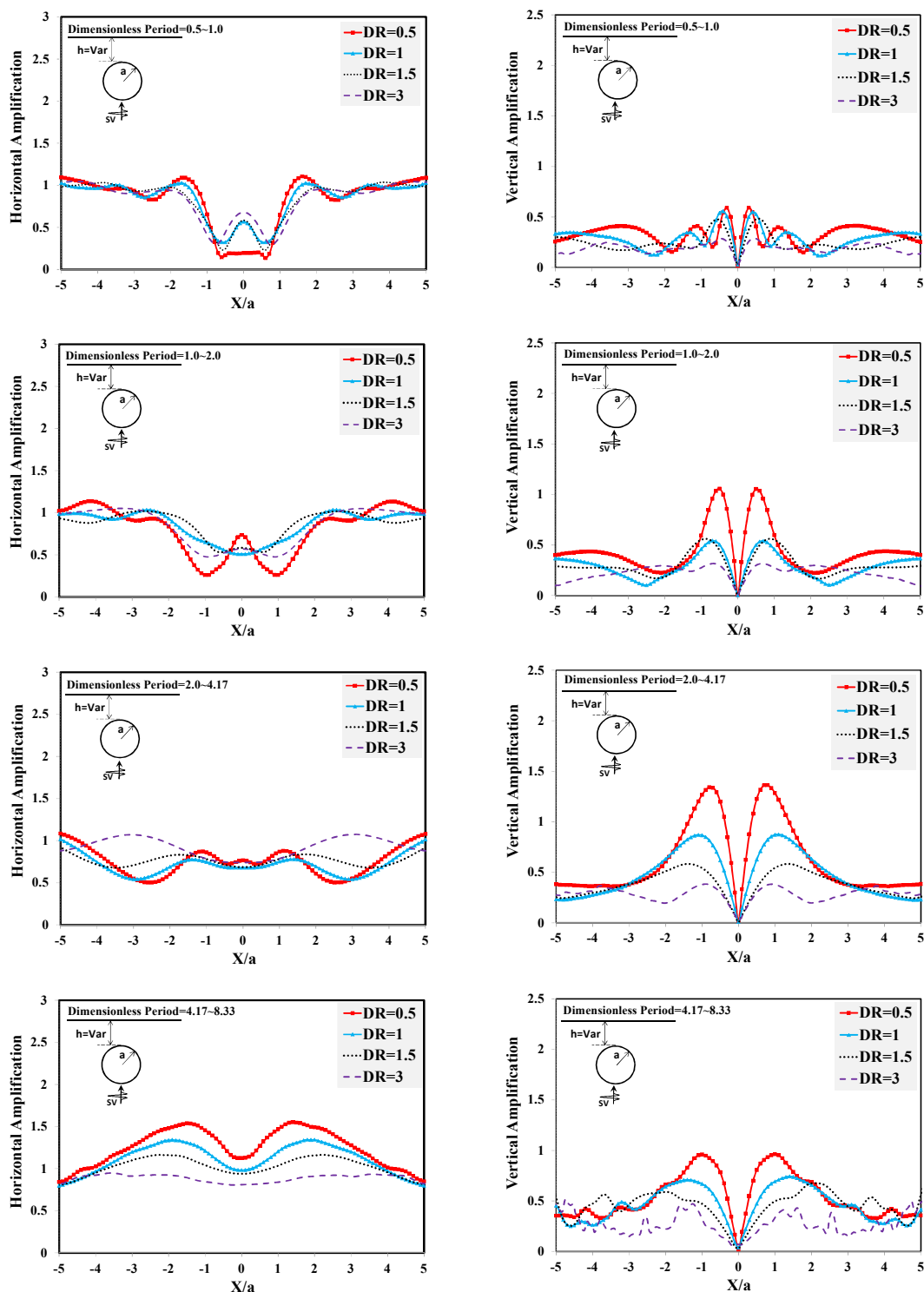
شکل ۵، تاثیر نسبت‌های مختلف عمق تونل‌های دوقلو (۳، ۱٫۵، ۱، $DR=0.5, 1, 1.5, 3$) در بازه‌های مختلف پریودیک (طول موج امواج مهاجم) بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین برای هر دو مولفه افقی (مولفه موافق موج ورودی) و قائم (مولفه مخالف موج ورودی) موج SV را نشان می‌دهد. به طور کلی مشاهده می‌شود که پاسخ لرزه‌ای سطح زمین واقع بر حفره‌های دوقلو برای هر دو مولفه افقی و قائم موج ورودی در محدوده پریودیک بلند تا خیلی بلند (طول موج ۲ تا ۸ برابر قطر تونل) به صورت بزرگنمایی و برای پریودهای کوتاه بصورت کوچک‌نمایی ظاهر می‌شود. همچنین حداکثر مقادیر بزرگنمایی و تقویت سطح زمین برای تونل‌های کم عمق‌تر ($DR < 1.5$) ایجاد شده است. در واقع جابجایی سطح زمین به دلیل حبس امواج پراشیده و تداخل امواج در فضای بین بالای تونل‌ها تا سطح زمین رخ می‌دهد. در این راستا، نتایج مشابهی برای تونل‌های منفرد توسط لی و همکاران در سال ۱۹۹۹ و ۲۰۰۲ (Lee, et al., 1999) و رودریگز-کاستلانوز در سال ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ (Rodriguez-Castellanos, et al., 2005; 2006)، به دست آمده است. همچنین در مطالعات پیشین نشان داده شده است که بیشترین میزان بزرگنمایی مربوط به تونل‌های سطحی نزدیک به سطح زمین ایجاد می‌شود (De Barros & Luco, Karl, 1993 & Lee, 1993) و (Alielahi et al., 2015) و (Luco & De Barros, 1994).

لازم به ذکر است که در کلیه مطالعات یاد شده تمامی بازه‌های پریودیک مورد بررسی قرار نگرفته و صرفاً به بررسی یک پریود یا فرکانس خاص بسنده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود که پاسخ لرزه‌ای سطح

بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختگاه‌های واقع بر تونل‌های دوقلو زیرزمینی در اثر انتشار امواج برشی درون صفحه: ص ۳۵-۵۲

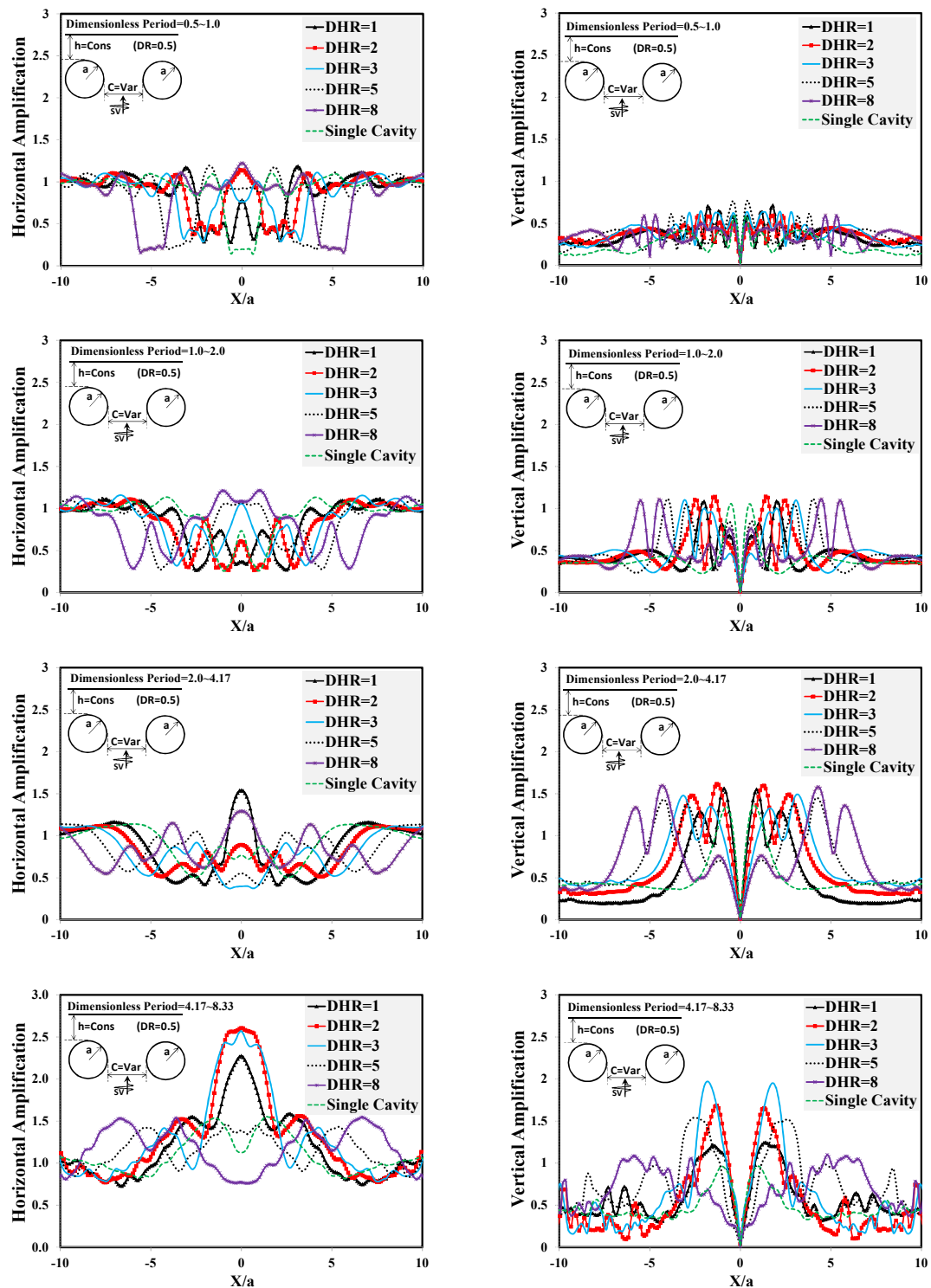


شکل ۵- مولفه افقی و قائم نمودار بزرگنمایی سطح زمین واقع بر حفره‌های دوقلو دایروی برای نسبت عمق‌های (DR) مختلف در محدوده پریودیک ۰/۲۵ الی ۸/۳۳



شکل ۶- مولفه افقی و قائم نمودار بزرگنمایی سطح زمین واقع بر حفره منفرده دایروی برای نسبت عمق‌های (DR) مختلف در محدوده پریودیک ۰/۲۵ الی ۸/۳۳

بررسی پاسخ لرزهای ساختمانهای واقع بر تونل‌های دوقلو زیرزمینی در اثر انتشار امواج برشی درون صفحه: ص ۳۵-۵۲

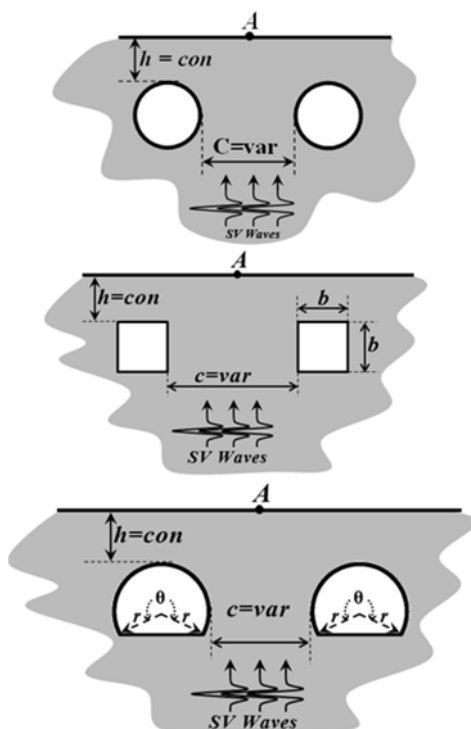


شکل ۷- مولفه افقی و قائم نمودار بزرگنمایی سطح زمین واقع بر حفره‌های دوقلوی دایروی برای نسبت فاصله افقی (DHR) مختلف در محدوده پریودیک ۰/۲۵ الی ۸/۳۳

متفاوت بوده و افزایش چشمگیری خواهد داشت.

۵- اثر شکل هندسی مقطع تونل‌ها

در این بخش از تحقیق به منظور ارزیابی تاثیر شکل هندسی مقطع تونل‌ها و یا حفره‌ها بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، به بررسی بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین در حضور شکل‌های مختلف تونل‌های دوقلو پرداخته شده است. از این رو بزرگنمایی لرزه‌ای به وجود آمده در اثر حضور حفره‌های با شکل‌های هندسی مختلف و مساحت‌های یک‌سان، نسبت عمق‌های یک‌سان ($DR=0.5$) و نسبت فاصله افقی یک‌سان ($DHR=3$) در محدوده پریودهای کوتاه تا بسیار بلند برای موج ورودی SV مورد ارزیابی قرار گرفته است. از این رو، سعی شده تا شکل‌های در نظر گرفته شده برای تونل‌ها نزدیک به مقاطع معمول و متداول باشد. لذا شکل حفره‌ها به صورت دایره‌ای، مربعی و نعل اسبی در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۸ نمای شماتیک مقاطع هندسی مختلف آورده شده است. شکل ۹ نمودارهای بزرگنمایی شکل‌های مختلف مقاطع تونل‌ها را نمایش می‌دهد.



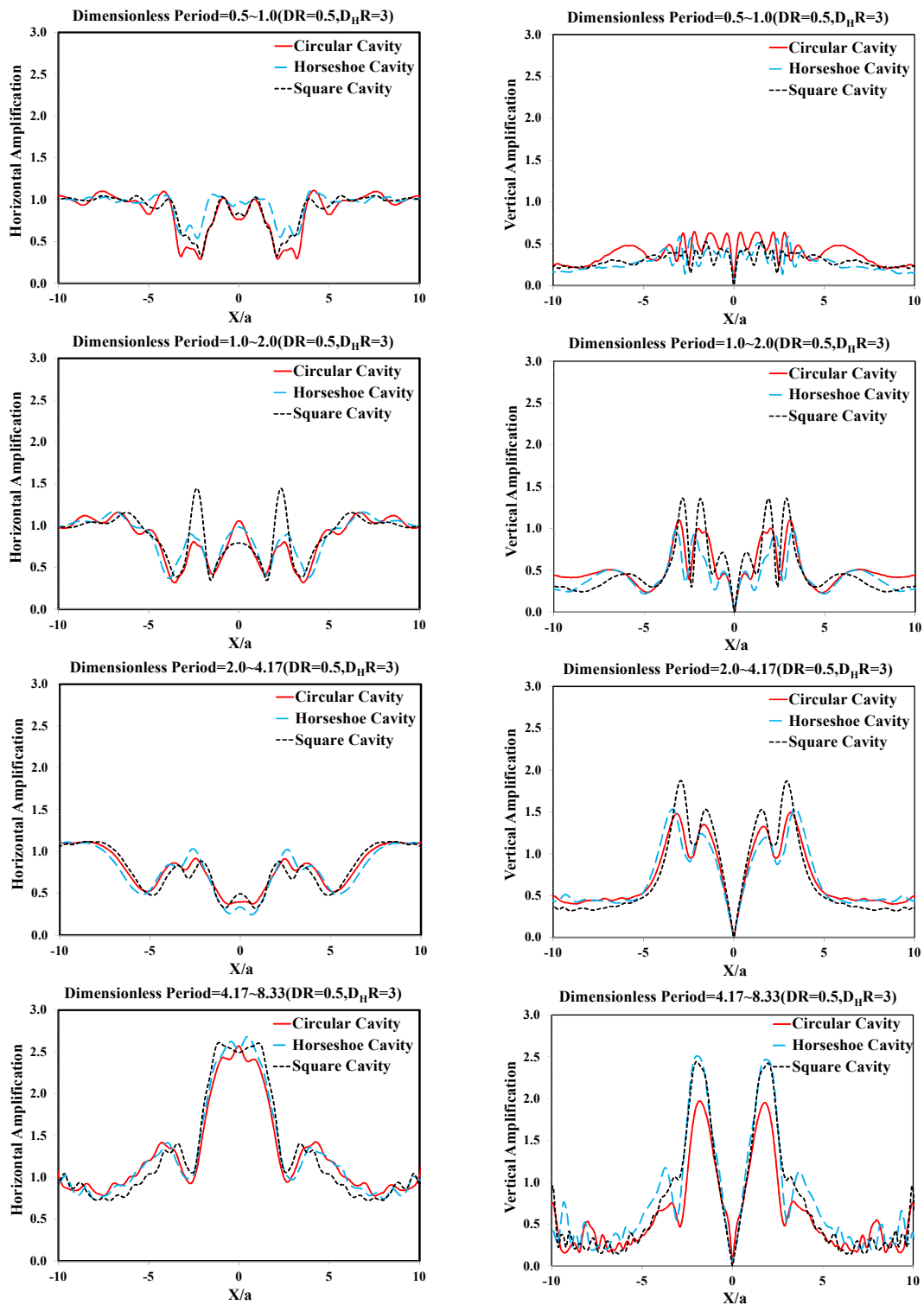
شکل ۸- نمای شماتیک اشکال مختلف هندسی مورد مطالعه و پارامترهای مربوطه

برای نسبت های DHR بزرگتر ($DHR \geq 3$) می‌توان مشاهده نمود که مقادیر بزرگنمایی سطح زمین مستقل از نسبت DHR است و مقادیر بزرگنمایی همانند حالت تونل منفرد خواهد بود.

در حفره های دوقلوی نزدیک به هم ($DHR < 3$) در مقایسه با حفره‌های منفرد یا حفره‌های دوقلوی با نسبت ($DHR \geq 3$)، فضای محصور شده امواج در فاصله بالای سقف تونل تا سطح زمین بزرگ‌تر بوده که این موضوع سبب افزایش مقادیر بزرگنمایی مولفه افقی سطح زمین می‌شود. به عبارت دیگر حفره‌های دوقلوی نزدیک هم منطقه حبس موج بزرگتری را در مقایسه با حفره‌های منفرد یا حفره‌های دوقلو با نسبت فاصله افقی بزرگتر به وجود می‌آورند. لازم به ذکر است که این موضوع در تونل‌های سطحی نمایانتر است. در واقع اندرکنش لرزه‌ای متقابل تونل‌های دوقلوی نزدیک بهم موجب می‌شود که برخی از امواج پراشیده بسیار آسانتر در فاصله بین بالای تونل تا سطح زمین حبس شوند (Rodriguez-Castellanos, et al., 2005), (Tsaour & Chang Liang & Liu, 2005) و (Alielahi, et al., 2015).

از طرفی مطابق شکل ۷، موج انتشار یافته ریکر در این مسأله ذاتاً به صورت مولفه افقی حرکت بوده و فاقد مولفه‌ی قائم می‌باشد. از این رو مولفه قائم بزرگنمایی (پاسخ) مشاهده شده ناشی از پراکنش و تفرق امواج مهاجم، امواج رایلی (Ohtsuki & Harumi, 1983) بوجود آمده که روی سطح زمین انتشار می‌یابند. از این رو تونل‌های چندگانه موازی بر چگونگی الگوی بزرگنمایی و مقادیر مولفه‌ی قائم موج برشی بسیار تاثیرگذار هستند. صرف نظر از طول موج امواج مهاجم و نسبت‌ها هندسی تونل‌های زیرزمینی، الگوهای بزرگنمایی مولفه قائم موج برشی از مقدار صفر در مرکز مدل شروع شده و به صورت متقارن به طرفین افزایش می‌یابد، به طوری که در نقطه‌ی خاصی با فاصله از مرکز به حداکثر خود می‌رسد. به صورت کلی با وجود تونل‌های دوقلو، در محدوده پریودیک بلند و خیلی بلند، مقادیر بزرگنمایی مولفه قائم نسبت به حالت میدان آزاد و حتی وجود تونل تکی بسیار

بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختگاه‌های واقع بر تونل‌های دوقلو زیرزمینی در اثر انتشار امواج برشی درون صفحه: ص ۳۵-۵۲



شکل ۹- مولفه افقی و قائم نمودار بزرگنمایی سطح زمین واقع بر حفره‌های دوقلو برای نسبت فاصله افقی ($D_H R=3$), در محدوده

پریودیک ۰/۲۵ الی ۸/۳۳

زمین معمولاً مقادیر بزرگتر از واحد داشته و حداکثر بزرگنمایی در طول موج‌ها بلند اتفاق می‌افتد.

• حداکثر مقادیر جابجایی سطح زمین برای تونل‌های کم عمق تر ($DR \leq 1.5$) ایجاد شده است.

• تاثیر لرزه‌ای متقابل حفره‌های دوقلوی نزدیک به هم در مقایسه با حفره‌های منفرد، بزرگنمایی لرزه‌ای سطح زمین را افزایش می‌دهد که به دلیل ناحیه حبس موج بزرگتر در بالای حفره‌های مجاور هم نسبت به حفره‌های منفرد است.

• بیشترین مقدار بزرگنمایی مولفه افقی تونل‌های دوقلو برابر ۲٫۶۱ حاصل شده که در نسبت‌های ($DR=0.5$) و ($DHR=2$) رخ داده است که این مقدار در حدود ۲٫۳۰ برابر مقدار حداکثر بزرگنمایی مولفه افقی تونل منفرد است.

• در مقاطع مختلف هندسی تونل‌ها با شکل‌های دایره‌ای، نعل اسبی و مربعی، الگوی بزرگنمایی یکسانی مشاهده می‌شود و صرفاً تفاوت اصلی در اندازه مقادیر بزرگنمایی لرزه‌ای است.

در پایان شایان ذکر است که در نظر گرفتن اثر تونل‌ها و به‌طور کلی فضاهای زیرزمینی می‌تواند تاثیر بسزایی در پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها و واقع بر آنها داشته باشد و لزوم توجه به این پدیده در طراحی و آیین‌نامه‌های لرزه‌ای سازه‌ها ضروری است.

مطابق نتایج حاصله در مقاطع بررسی شده رفتار بزرگنمایی یکسانی مشاهده می‌شود و تفاوت اصلی فقط در اندازه مقادیر بزرگنمایی لرزه‌ای است. در محدوده پریودهای کوتاه تا متوسط کوچکنمایی و در محدوده پریودهای بلند تا خیلی بلند بزرگنمایی مشاهده می‌شود. بیشترین بزرگنمایی مولفه افقی به ترتیب مربوط به تونل‌های نعل اسبی، مربعی و دایره‌ای بوده با این تفاوت که محل بیشترین بزرگنمایی برای تونل‌های دایره‌ای در مرکز تقارن تونل‌ها بر روی سطح زمین و برای تونل‌های نعل اسبی و مربعی با فاصله کمی از مرکز تقارن تونل‌ها در سطح زمین ایجاد می‌شود. همچنین بیشترین مقادیر بزرگنمایی مولفه قائم به ترتیب مربوط به تونل‌های نعل اسبی، مربعی و دایره‌ای است که در محدوده پریود بی‌بعد ۴٫۱۷ تا ۸٫۳۳ پدیدار می‌شود.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی وجود تونل‌های دوقلوی زیر زمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین (نیم‌فضا) تحت هجوم امواج برشی درون صفحه SV به روش اجزای مرزی در حوزه زمان پرداخته شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که پتانسیل بزرگنمایی سطح زمین واقع بر تونل‌های زیرسطحی تحت تاثیر طول موج امواج انتشاری، عمق مدفون تونل‌ها و فاصله افقی تونل‌ها از یکدیگر قرار دارد. برخی از مهمترین نتایج حاصله از این تحقیق عبارتند از:

- برای امواج مهاجم با طول موجی در حدود ۲ تا ۸ برابر قطر تونل‌های دوقلو، فاکتور بزرگنمایی در سطح

۷- مراجع

- Alielahi, H., & Adampira, M. (2016). Effect of twin-parallel tunnels on seismic ground response due to vertically in-plane waves. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 85, 67-83.
- Alielahi, H., & Adampira, M. (2016). Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: amplification patterns and engineering applications. *International Journal of Civil Engineering*, 14(4), 233-251.
- Alielahi, H., & Adampira, M. (2016). Site-specific response spectra for seismic motions in half-plane with shallow cavities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 80, 163-167.

- Alielahi, H., Kamalian, M., & Adampira, M. (2015). Seismic Ground Amplification by Unlined Tunnels Subjected to Vertically Propagating SV And P Waves Using BEM. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 71, 63–79.
- Alielahi, H., Kamalian, M., & Adampira, M. (2016). A BEM investigation on the influence of underground cavities on the seismic response of canyons. *Acta Geotechnica*, 11(2), 391-413.
- Alielahi, H., Kamalian, M., Jafari, M. K., Asgari Marnani, J., & Panji, M. (2013). Applying A Time Domain Boundary Element Method for Study of Seismic Ground Response in The Vicinity Of Embedded Cylindrical Cavity. *International Journal of Civil Engineering*, 11(1), 45-54.
- Baziar, M. H., Rabeti Moghadam, M., Kim, D. S., & Choo, Y. W. (2014). Effect of Underground Tunnel on the Ground Surface Acceleration. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44, 10–22.
- Brebbia, C. A., & Dominguez, J. (1989). *Boundary Elements, An Introductory Course*. Southampton: Computational Mechanics Publication.
- Davis, C. A., Lee, V. W., & Bardet, J. P. (2001). Transverse Response of Underground Cavities and Pipes to Incident SV Waves. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 383- 410.
- De Barros, F. C., & Luco, J. E. (1993). Diffraction of Obliquely Incident Waves by A Cylindrical Cavity Embedded in A Layered Viscoelastic Half-Space. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 12, 159- 171.
- Dominguez, J. (1993). *Boundary Elements in Dynamics*. Southampton, Boston: Computational Mechanics Publications.
- Dravinsk, M., & Yu, C. H. (2011). Scattering of Plane Harmonic SH Waves by Multiple Inclusions. *Geophys. J. Int*, 186, 1331–1346.
- Dravinski, M. (1983). Ground motion amplification due to elastic inclusions in a half-space. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11, 313-335.
- Dravinski, M., & Yu, C. H. (2010). Peak Surface Motion Due to Scattering of A Plane Harmonic SH Wave by A Randomly Corrugated Scatterer. *Journal of Seismology*, 14, 653–664.
- Dravinski, M., & Yu, C. H. (2013). The Effect of Impedance Contrast Upon Surface Motion Due to Scattering of Plane Harmonic P, SV, and Rayleigh Waves by A Randomly Corrugated Elastic Inclusion. *Journal of Seismology*, 17, 281–295.
- Kamalian, M., Gatmiri, B., & Sohrabi-Bidar, A. (2003). On Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures by BEM. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 5, 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 BE/FE Method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26, 753–765.
- Karakostas, C. Z., & Manolis, G. D. (2002). Dynamic Response of Tunnels in Stochastic Soils by The Boundary Element Method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 26, 667–680.
- Katsikadelis, J. T. (2002). *Boundary elements: theory and applications*. Elsevier Science Ltd.

- Kawase, H. (1988). Time-Domain Response of A Semi-Circular Canyon for Incident P, SV And Rayleigh Waves Calculated by the Discrete Wave Number Boundary Element Method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78, 1415-1437.
- Lee, V. W., & Karl, J. (1993). Diffraction of SV Waves by Underground, Circular, Cylindrical Cavities. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11(8), 445-456.
- Lee, V. W., Chen, S., & Hsu, I. R. (1999). Antiplane Diffraction from Canyon above A Subsurface Unlined Tunnel. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 25(6), 668-675.
- Lee, V. W., Manoogian, M. E., & Chen, S. (2002). Antiplane SH-Deformations Near A Surface Rigid Foundation above A Subsurface Rigid Circular Tunnel. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1(1), 27-35.
- Liang, J., & Liu, Z. (2009). Diffraction of Plane SV Waves by A Cavity in Poroelastic Half-Space. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8, 29-46.
- Liang, J., Han, B., & Ba, Z. (2013). 3D Diffraction of Obliquely Incident SH Waves by Twin Infinitely Long Cylindrical Cavities in Layered Poroelastic Half-Space. *Earthq Sci*, 26(6), 395-406.
- Liu, Q., & Wang, R. (2012). Dynamic Response of Twin Closely-Spaced Circular Tunnels to Harmonic Plane Waves in A Full Space. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, 212-220.
- 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 Dynamics and Earthquake Engineering*, 49, 52- 63.
- Luco, J. E., & De Barros, F. C. (1994). Dynamic Displacements and Stresses in the Vicinity Of A Cylindrical Cavity Embedded In A Half Space. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23, 321-340.
- Mauge, I. M., & Soccodato, C. (2014). Performance and Seismic Design of Underground Structures. In *Earthquake Geotechnical Engineering Design, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering* (pp. 28, Chapter 11). Springer International Publishing Switzerland.
- Moore, I. D., & Guan, F. (1996). Three-Dimensional Dynamic Response of Lined Tunnels Due to Incident Seismic Waves. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 357-369.
- Ohtsuki, A., & Harumi, K. (1983). Effect of Topography and Subsurface Inhomogeneities on Seismic SV Waves. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11, 441-462.
- Parvanova, S. L., Dineva, P. S., & Manolis, G. D. (2014). Elastic Wave Fields in A Half-Plane with Free Surface Relief, Tunnels and Multiple Buried Inclusions. *Acta Mechanica*, 225(7), 1843-1865.
- Parvanova, S. L., Dineva, P. S., Manolis, G. D., & Wutt, F. (2014). Seismic Response of Lined tunnels in The Half-Plane With Surface Topography. *Bulletin Earthquake Engineering*, 12, 981-1005.
- Rodriguez-Castellanos, A., Luzo, F., & Sanchez-Sesma, F. J. (2005). Diffraction of Seismic Waves in An Elastic, Cracked Halfplane Using A Boundary Integral Formulation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25, 827-837.
- Rodriguez-Castellanos, A., Sanchez-Sesma, F. J., Luzon, F., & Martin, R. (2006). Multiple Scattering of Elastic Waves by Subsurface Fractures and Cavities. *Bulletin of the Seismological Society of*

America, 96(4A), 1359-137.

Smerzini, C., Aviles, J., Sanchez-Sesma, F., & Paolucci, R. (2009). Effect of Underground Cavities on Surface Earthquake Ground Motion under SH Wave Propagation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(12), 1441-1460.

Tsaur, D., & Chang, K. (2012). Multiple Scattering of SH Waves by an Embedded Truncated Circular Cavity. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(1), 73-81.

Yiouta-Mitra, P., Kouretzis, G., Bouckovalas, G., & Sofian, A. (2007). Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures Dynamic Response and Soil Properties. *Geo-Denver: New Peaks in Geotechnics*.