

تأثیر تونل‌های دوقلوی بدون پوشش در الگوی بزرگ‌نمایی لرزه‌ی سطح زمین با استفاده از روش عددی اجزای مرزی

حمید علی‌اللهی* (استادیار)

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

محمد آدم‌پورا (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

مرتضی عسگری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

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

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۳۹۶ (۲-۳۳، شماره ۲/۳، ص. ۴۳-۲۹)

احداث تونل‌های زیرزمینی به منظور کنترل ترافیک و ایجاد شبکه‌های حمل و نقل می‌تواند در پاسخ لرزه‌ی سطح زمین و به دنبال آن در سازه‌های روستحی تأثیرگذار باشد. لذا در نوشتار حاضر سعی شده است تا با به‌کارگیری روش عددی اجزای مرزی دوبعدی در حوزه‌ی زمان و در یک محیط همگن و همسان به بررسی پاسخ لرزه‌ی و الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین واقع بر حفره‌ها و تونل‌های زیرزمینی بدون پوشش (لاینینگ) تحت تأثیر امواج برشی SV در بسامدهای مختلف پرداخته شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که تونل‌های زیرزمینی دوقلو، مؤلفه‌های افقی و قائم جابه‌جایی سطح زمین را در مقایسه با تونل‌های منفرد، تحت تأثیر بیشتری قرار می‌دهند. افزایش فضای حبس موج در بالای تونل‌های دوقلو بدون پوشش به نسبت تونل منفرد می‌تواند یکی از عمده‌ترین دلایل موجود برای افزایش بزرگ‌نمایی لرزه‌ی سطح زمین باشد. با فاصله‌گرفتن حفره‌های دوقلو از یکدیگر، تأثیر لرزه‌ی متقابل آنها در یکدیگر و به دنبال آن در پاسخ لرزه‌ی سطح زمین کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: تونل‌های زیرزمینی، روش اجزای مرزی، حوزه‌ی زمان، بزرگ‌نمایی امواج، بسامد بی‌بعد.

۱. مقدمه

امروزه با گسترش شهرها و نیازهای روزافزون سفرهای درون‌شهری، لزوم ایجاد شبکه‌های حمل و نقل زیرزمینی به دلیل مزایای فراوان آن هر روز بیش از پیش احساس می‌شود. در برخی از شهرهای پرجمعیت برای افزایش ظرفیت حمل مسافر و کاهش ازدحام جمعیت، تونل‌های جدیدی مجاور تونل‌های قدیمی احداث می‌شوند. از طرفی وجود فضاهای زیرزمینی و عبور تونل‌ها و متروها از زیر ساختمان‌ها در پاسخ لرزه‌ی سطح زمین تأثیرگذار خواهد بود. در مطالعاتی در سال ۲۰۱۵ بیان شده است که براساس تجربیات به دست‌آمده از زمین‌لرزه‌های گذشته مشخص شده است که عوارض زیرزمینی مانند تونل‌ها و متروها و همچنین سازه‌های ساخته‌شده بر روی آنها واقع بر سطح زمین در هنگام زلزله، پتانسیل زیادی برای تخریب و اختلال در کاربری دارند. به عبارتی، پاسخ لرزه‌ی سطح زمین واقع بر حفره‌های زیرزمینی متفاوت از سطح آزاد زمین خواهد بود.^[۱] این در حالی است که علی‌رغم اهمیت این

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۰۶/۰۶، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۱/۱۷، پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۰۴.

h.alielahi@iauz.ac.ir
m.adampira@srbiau.ac.ir
m.asgari64x@yahoo.com

موضوع به دلیل کمبود اطلاعات و مطالعات در این خصوص، نحوه‌ی عملکرد و پاسخ لرزه‌ی سطح زمین در حضور حفره‌های زیرزمینی و به‌خصوص تونل‌های زیرزمینی دوقلو، تاکنون جزء ابهامات و ناشناخته‌های مهندسی زلزله محسوب می‌شود. از طرفی آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ی در این مورد، تدابیر و توصیه‌های فنی لازم جهت در نظر گرفتن آثار مذکور را ارائه نداده‌اند.

مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پراکندگی و تفرق امواج به واسطه‌ی تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی و به‌طورکلی حفره‌های زیرزمینی از جمله موضوعات مورد علاقه‌ی پژوهشگران ژئوفیزیک، زلزله‌شناسان، و مهندسان بوده است. از سال ۱۹۶۰ تاکنون مطالعات بسیاری به روش‌های تحلیلی و عددی در خصوص پاسخ‌های لرزه‌ی تونل‌های زیرزمینی با رفتار مصالح همگن و ناهمگن انجام شده است.^[۲-۶] در سال ۱۹۹۴،^[۷] مطالعاتی پیرامون تفرق امواج هارمونیک برشی و فشاری در اطراف یک حفره‌ی استوانه‌ی بدون پوشش (لاینینگ) با طول نامحدود واقع بر محیط نیم‌صفحه با رفتار ویسکوکشسان بررسی و محیط مورد مطالعه با استفاده از روش اجزای مرزی غیر مستقیم در حوزه‌ی بسامد مدل‌سازی شده است.^[۷] از

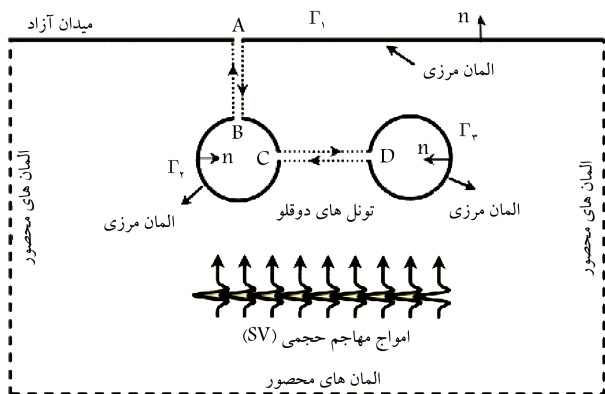
حمله مطالعات عددی دیگر می‌توان به مطالعاتی در سال ۲۰۰۶ اشاره کرد، که با استفاده از روش اجزای مرزی غیرمستقیم در حوزه‌ی بسامد برای تحلیل امواج درون‌صفحه‌یی در برخورد با حفره‌های منفرد زیرزمینی انجام شده است.^[۸] به همین ترتیب با استفاده از روش اجزای مرزی در حوزه‌ی بسامد به بررسی تفرق امواج در حفره‌ی منفرد مدفون واقع در محیط نیم‌صفحه پرداخته شده است.^[۹] همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۱۵،^[۱۰] بزرگ‌نمایی لرزه‌یی زمین در اثر تونل‌های منفرد بدون لایننگ (پوشش) زیرزمینی در هنگام انتشار قائم امواج درون‌صفحه‌یی با استفاده از روش عددی اجزای مرزی در حوزه‌ی زمان مطالعه و در آن به بررسی تأثیر عمق، شکل حفره، و طول امواج مهاجم در بزرگ‌نمایی سطح زمین در حوزه‌ی زمان و بسامد پرداخته شده است.^[۱۱] از طرفی دیگر، بررسی دقیق ادبیات فنی مسئله نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات اندکی در زمینه‌ی تعیین پاسخ لرزه‌یی تونل‌های دوقلوی موازی انجام شده است. این در حالی است که عمده‌ی مطالعات انجام‌شده‌ی متمرکز بر تحلیل اندرکنش دینامیکی تونل‌ها بر یکدیگر، تمرکز تنش‌های اطراف تونل، توزیع تغییرمکانی، و تعیین پاسخ لرزه‌یی در محیط پیرامون تونل‌های دوقلو بوده است.^[۱۲-۱۴]

از این رو بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی پاسخ لرزه‌یی سطح زمین در اثر وجود تونل‌ها و حفره‌های زیرزمینی دوقلو محدود است و نیاز به پژوهش، بیش از پیش احساس می‌شود. با توجه به اینکه مطالعات تحلیلی قادر به حل مسائل با هندسه و مشخصات مصالح پیچیده نیستند، بهره‌گیری از روش‌های عددی می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای حل مسائل مذکور باشد. لذا در پژوهش حاضر سعی شده است تا با ارائه‌ی یک روش عددی مناسب و کارآمد، تخمین دقیقی از رفتار و پاسخ لرزه‌یی سطح زمین در حضور حفره‌های زیرزمینی به خصوص تونل‌های دوقلوی مجاور یکدیگر تحت اثر امواج مهاجم برشی SV ارائه شود. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به‌عنوان گام اولیه در انجام مطالعات لرزه‌خیزی و ریزپهنه‌بندی لرزه‌یی مناطق واقع بر حفره‌ها و تونل‌های (بدون پوشش) زیرزمینی استفاده شود.

با استفاده از روش باقیمانده‌های وزنی و با نادیده گرفتن سهم شرایط اولیه و نیروهای حجمی، می‌توان معادله‌ی انتگرال مرزی حاکم بر محیط‌های کشسان خطی همسان و همگن در دامنه‌ی Γ شامل حفره‌ها را به‌صورت مجموعه روابط ۲ نوشت:

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

که در آنها، T_{ij}^* و U_{ij}^* پاسخ‌های اساسی معادله‌ی دیفرانسیل ۱ و بیان‌گر مؤلفه‌های i ام بردارهای تغییرمکان و تنش مرزی نقطه‌ی x در لحظه‌ی t هستند، که به واسطه‌ی اعمال یک بار متمرکز واحد موازی محور z ، در نقطه‌ی ξ و در لحظه‌ی $t \leq \tau$ پدید



شکل ۱. مدل شماتیک هندسه‌ی چند مرزی به روش اجزای مرزی.

۲. روش عددی مورد استفاده

در بین روش‌های عددی، روش اجزای مرزی^۱ در حل مسائل انتشار امواج در محیط‌های خطی نامحدود کارایی فراوانی دارد، چرا که از یک سو، ابعاد دستگاه معادلات را کاهش می‌دهد و از سوی دیگر، با ارضاء شرایط مرزی تشعشع در بی‌نهایت، نیاز به مش بندی حوزه‌ی دور را به کمینه‌ی ممکن کاهش می‌دهد. همچنین فرمول‌بندی مسئله در حوزه‌ی زمان، امکان ترکیب الگوریتم اجزای مرزی با سایر روش‌های عددی جهت حل مسائل غیرخطی را فراهم می‌کند. با توجه به مطالب ذکرشده برای مدل‌سازی تونل‌های دوقلو بدون پوشش و تأثیر آنها در الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین از روش اجزای مرزی استفاده شده است، که در ادامه، فرمولاسیون مورد استفاده جهت حل مسئله ارائه شده است.

معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر تعادل دینامیکی محیط‌های ارتجاعی، همسان و همگن، در محدوده‌ی تغییرشکل‌های کوچک، با استفاده از رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

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

که در آن، u_i بیان‌گر تغییرمکان و b_i بیان‌گر نیروی پیکری خاک است. c_1 و c_2 به ترتیب سرعت‌های امواج فشاری و برشی محیط را نشان می‌دهند، که از روابط

برای حل مسائل عملی، نیاز به داشتن تقریب مناسبی از متغیرهای محیط در هر دو حوزه‌ی زمان و مکان است. ادغام زمانی و توابع زمانی به صورت تحلیلی و ادغام مکانی با استفاده از روش‌های عددی ارائه شده است. با استفاده از تغییرات خطی زمان در متغیرهای محیط، تغییرمکان به صورت رابطه‌ی ۸ ارائه شده است:

$$u_i(x, \tau) = M_l(\tau).u_i^n(x) + M_r(\tau).u_i^{n-1}(x) \quad (8)$$

که در آن، $M_l(\tau)$ و $M_r(\tau)$ توابع شکل خطی زمان هستند، که به صورت رابطه‌ی ۹ تعریف شده‌اند:

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

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 فقط شامل هسته است و توسط روابط ۱۰ بیان می‌شود:

$$F_{ijl}^{N-n+1}(x, \xi) = \int_{(n-1).\Delta t}^{n.\Delta t} T_{ij}^*(x, n\Delta t; \xi, \tau).M_l(\tau)d\tau$$

$$F_{ijr}^{N-n+1}(x, \xi) = \int_{(n-1).\Delta t}^{n.\Delta t} T_{ij}^*(x, n\Delta t; \xi, \tau).M_r(\tau)d\tau \quad (10)$$

که در آن‌ها، F_{ijl}^{N-n+1} و F_{ijr}^{N-n+1} به ترتیب هسته‌ی تنش الاستودینامیک ۲ گره زمانی قبلی و کنونی در طول گام زمانی هستند. با ترکیب هسته‌های تنش در معادله‌ی ۶ و بعد از جداسازی مکانی با استفاده از المان‌های ایزوپارامتریک درجه‌ی دو^۴ و بازنویسی آن، معادله‌ی نهایی BEM برای تغییرات زمانی خطی را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱۱ بیان کرد:

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

که در آن، $F_{ijl}^{N-n+1}(x, \xi)$ از رابطه‌ی ۱۲ به دست می‌آید:

$$F_{ijl}^{N-n+1}(x, \xi) = F_{ijl}^{N+n+1}(x, \xi) + F_{ijr}^{N-n}(x, \xi) \quad (12)$$

که در آن، N نشان دهنده‌ی آخرین گام زمانی، Q تعداد کل المان‌های مرزی، $N_k(\eta)$ تابع شکل در سیستم مختصات کمکی (η) و J بیانگر ژاکوبین تبدیل^۵ است. F_{ijl}^{N-n+1} هسته‌ی تنش الاستودینامیک است و از حل اساسی T_{ij}^* که قبلاً ارائه شده است، به دست می‌آید.^[۱۹]

اگر معادله‌ی 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، رابطه‌ی ۱۳ حاصل خواهد شد:

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

که در آن، R^N از رابطه‌ی ۱۴ به دست می‌آید:

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

آمده‌اند. u_i و t_i به ترتیب تغییرمکان و تنش وارد بر روی سطح مماس بر مرز Γ را بیان می‌کنند. ضریب شناخته‌شده‌ی ناپوستگی است، که از منفرد بودن هسته‌ی T_{ij}^* ناشی می‌شود.^[۱۸، ۱۶] از طرفی مجموعه روابط ۳ الی ۵ را خواهیم داشت:

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

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

$$\Gamma = \Gamma_l \cup \Gamma_r \cup \Gamma_f \quad (5)$$

$$c_{ij}(\xi).u_i(\xi, t) = \int_{\Gamma_l} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau).t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau).u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma + \int_{\Gamma_r} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau).t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau).u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma - \int_{\Gamma_f} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau).t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau).u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma = \int_{\Gamma} \left[\int_0^t (U_{ij}^*(x, t; \xi, \tau).t_i(x, \tau) - T_{ij}^*(x, t; \xi, \tau).u_i(x, \tau)) d\tau \right] d\Gamma \quad (6)$$

در مسائل همگن، سطح آزاد نیم صفحه، مرز محیط است و از تنش واقع در آن صرف نظر می‌شود، لذا روابط ذکرشده را برای هر نقطه‌ی ξ در مرز Γ می‌توان به صورت رابطه‌ی ۶ بازنویسی کرد:

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

برای بارگذاری لرزه‌یی فرض می‌شود که تغییرمکان کل به مؤلفه‌ی (u_j^{inc}) انتشاری و (u_i^{cc}) تفرقیافته تقسیم می‌شود و معادله‌ی انتگرال مرزی باید به صورت رابطه‌ی ۷ اصلاح شود:^[۲۲-۱۹]

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

برای حل معادله‌ی انتگرال مرزی ۶، اجرای آن باید در هر دو حوزه‌ی زمان و مکان جداسازی شوند. برای جداسازی زمانی، محور زمان از صفر تا $t = \sum_{n=1}^N n\Delta t$ به N بازه‌ی مساوی (Δt)، تقسیم می‌شود.

قابل ذکر است که در مطالعات ذکر شده، پاسخ لرزه‌ی سطح زمین در بسامدهای بی‌بعد خاصی در حوزه‌ی بسامد ارائه شده است. در نتیجه برای مقایسه با نتایج مطالعات پیشین باید رابطه‌ی بسامد بی‌بعد به صورت $\eta = \omega a / \pi c_T$ تعریف شود، که در آن ω بسامد زاویه‌ی موج مهاجم، a شعاع حفره، و c_T سرعت موج برشی محیط هستند. در تمام مثال‌های اعتبارسنجی، h فاصله‌ی مرکز حفره تا سطح زمین (عمق تونل) برابر شعاع تونل (a) ، C فاصله‌ی مرکز به مرکز تونل‌ها 200 برابر شعاع حفره و موج انتشار یافته از نوع ریکر^۷ است، که در رابطه‌ی ۱۷ ارائه شده است.

۳. دامنه‌ی مطالعات پارامتریک

در پژوهش حاضر، نسبت طیفی تغییر مکان هر یک از نقاط سطح زمین واقع بر حفره‌های زیرسطحی تقسیم بر جابه‌جایی نقاط سطح آزاد زمین^۸ (بدون حضور حفره و یا تونل) به‌عنوان بزرگ‌نمایی تعریف می‌شود. به منظور تسهیل در دسته‌بندی نتایج پژوهش حاضر و پوشش تمامی محدوده‌های پرودیک، نمودارهای نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت میانگین مقادیر بزرگ‌نمایی در بازه‌های پرودیک مختلف شامل (0.5) الی (1) ، (1) الی (2) ، (2) الی (4) و (4) الی (8) ارائه شده است، که به ترتیب معادل دوره‌های تناوب کوتاه، متوسط، بلند، و خیلی بلند در نظر گرفته می‌شود.^[۱۰] به همین ترتیب پارامتر زمان و بسامد نیز به‌صورت روابط ۱۵ و ۱۶ بی‌بعد شده است:

$$T = \frac{t \cdot c_T}{2a} \quad (15)$$

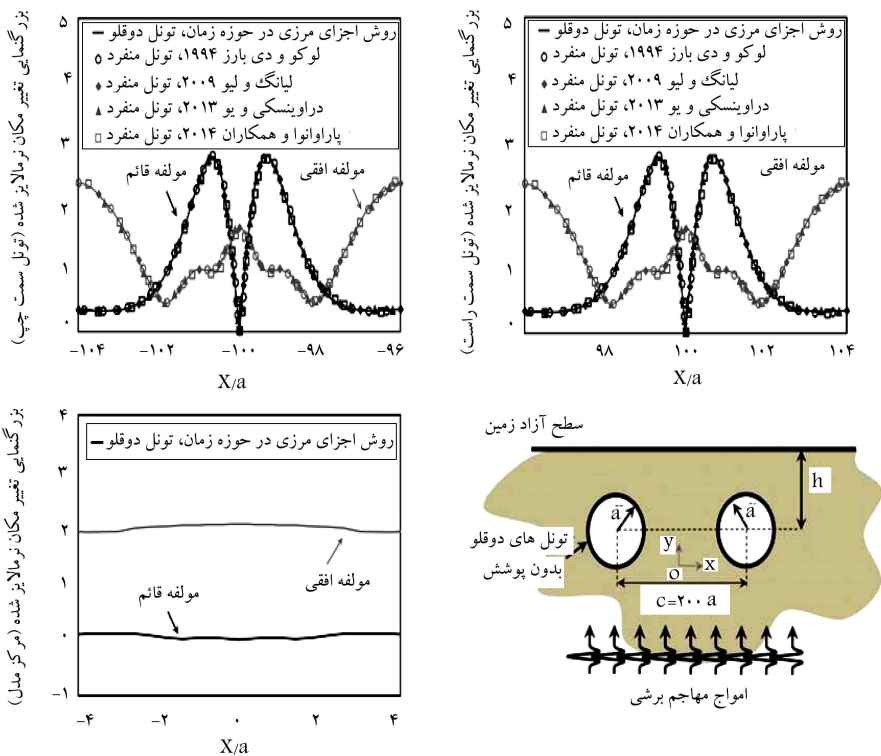
$$\eta = \frac{1}{P} = \frac{\omega \cdot a}{\pi c_T} = \frac{2a}{\lambda} \quad (16)$$

معادله‌ی ۱۳، منجر به یک ماتریس مربعی $2N_{node} \times 2N_{node}$ می‌شود، که می‌توان مقادیر جابه‌جایی مجهول را با حل آن به‌دست آورد. U^N نشان‌دهنده‌ی بردار جابه‌جایی گره در گره زمانی جاری است. R^N نشان‌دهنده‌ی تأثیر تاریخچه‌ی دینامیکی قبلی در زمان کنونی است.

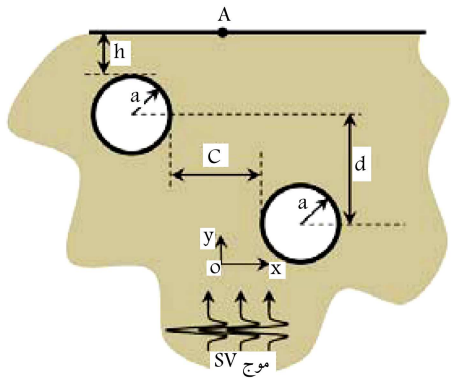
لازم به ذکر است که انتگرال‌های مربوط به روابط ۱۳ و ۱۴ به راحتی با استفاده از قاعده‌ی متعارف گوس بر روی المان‌های عادی قابل محاسبه هستند. یادآور می‌شود که روش حرکت جسم صلب فقط در شرایطی قابل استفاده است، که مرزهای مسئله بسته باشد. در مسائلی که با محیط‌های نیمه بی‌نهایت سر و کار دارند، می‌توان ابتدا با استفاده از المان‌های مجازی^۶ (محصور) مرز مش بندی شده را بست، و سپس به محاسبه‌ی انتگرال‌های منفرد قوی اقدام کرد. بدیهی است که المان‌های مجازی، که فقط جهت بستن محیط به‌کار برده می‌شوند، تعداد درجات آزادی مسئله را افزایش نخواهند داد.

۱.۲. اعتبارسنجی الگوریتم با حل مثال‌های عددی

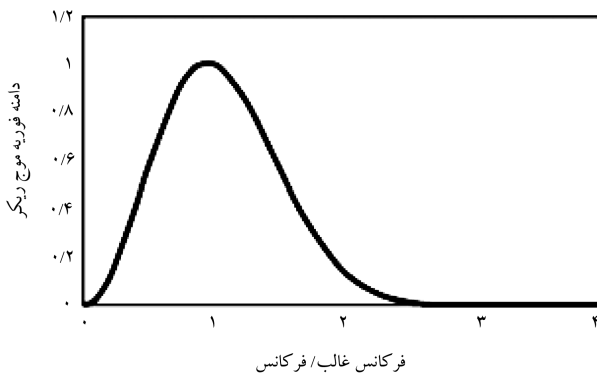
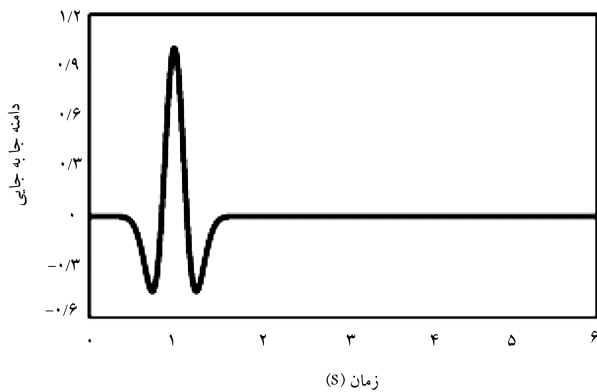
همان‌طور که ذکر شده است، مطالعات انجام شده درخصوص تحلیل پاسخ ساختگاه در حضور تونل‌های دوقلوی موازی بسیار محدود است. بر این اساس در پژوهش حاضر، فاصله‌ی تونل‌ها برای مقایسه با نتایج تونل‌های بدون پوشش منفرد با فاصله‌ی زیاد از یکدیگر در نظر گرفته شده است. به عبارتی با دورکردن فاصله بین تونل‌های مجاور هم، تأثیر تونل‌ها در رفتار لرزه‌ی یکدیگر از بین رفته و رفتار آنها مانند تونل‌های منفرد خواهد بود. هندسه‌ی مدل در نظر گرفته شده و نمودار بزرگ‌نمایی نرمالایز شده‌ی جابه‌جایی سطح زمین واقع بر بالای تونل‌های دوقلو و همچنین در مرکز تقارن حفره‌ها در سطح زمین در اثر انتشار قائم امواج SV، در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج حاصل با نتایج برخی مطالعات^[۲۴,۲۳,۹,۷] مقایسه شده است، که تطابق خوبی بین نتایج پژوهش حاضر با مطالعات مذکور قابل مشاهده است.



شکل ۲. مقایسه‌ی نتایج مطالعه‌ی حاضر (بزرگ‌نمایی تغییر مکان نرمالایز شده‌ی سطح زمین) با مطالعات پیشین.



شکل ۳. هندسه‌ی تونل‌های دوقلو بدون پوشش به همراه پارامترهای مربوط.



شکل ۴. تاریخچه‌ی زمانی و طیف فوری‌ی موج ریکر.

از این رو، ابتدا آنالیزهای حساسیت نتایج تحلیل پاسخ لرزه‌ی زمین در اثر حضور حفره‌های دایره‌ی دوقلو مدفون با نسبت عمق $DR = 0.5$ ، نسبت فاصله‌ی افقی $DHR = 1$ و نسبت فاصله‌ی قائم $DVR = 0$ بررسی شده است. المان‌های مرزی به طول ۲۰ و ۴۰ متر به منظور گسسته‌سازی محیط در اثر تابش قائم موج مهاجم SV با سرعت موج برشی 400 m/s و ضریب پواسون $\nu = 0.33$ برای محیط استفاده شده است. در این راستا گام‌های زمانی در نظر گرفته شده در بازه $0.09 \leq \Delta t \leq 0.3$ ثانیه مورد نظر قرار گرفته است، که در نتیجه برای پارامتر β مقادیری بین ۰/۵ تا ۱ حاصل می‌شود، که در شکل ۵ ارائه شده است، که با توجه به آن و به منظور بهینه‌سازی دقیق گام زمانی، مقدار β در مطالعه‌ی حاضر برابر با ۱ لحاظ شده است، که در آن، طول المان و گام زمانی به ترتیب برابر ۲۰ متر و ۰/۲۵ ثانیه برای کلیه‌ی تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است.

که در آنها، T زمان بی‌بعد، t زمان، c_2 سرعت موج برشی محیط، a شعاع حفره، η بسامد بی‌بعد، P دوره‌ی تناوب بی‌بعد (نسبت طول موج مهاجم به قطر حفره)، ω بسامد زاویه‌ی موج مهاجم و λ طول موج مهاجم هستند.

در پژوهش حاضر، شکل حفره‌های مورد مطالعه، شامل حفره‌های دایره‌ی موازی هم است و با توجه به مطالعات گذشته، اهمیت و اثر لرزه‌ی بیشتر حفره‌های سطحی نسبت به تونل‌های عمیق‌تر، نسبت عمق حفره‌های دوقلو ($DR = h/a$) برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. به همین ترتیب متغیرهای فاصله‌ی افقی تونل‌ها $DHR = c/a$ برابر ۱، ۲، ۳، ۵، ۸، و فاصله‌ی قائم تونل‌ها نسبت به هم $DVR = d/a$ برابر صفر، ۰/۵، ۱، ۲/۵ تحلیل شده است. شکل ۳، هندسه‌ی حفره‌های زیرزمینی و پارامترهای آن شامل عمق مدفون حفره‌ها تا سطح زمین h (فاصله‌ی بین سقف حفره تا سطح زمین)، a شعاع حفره، c نزدیک‌ترین فاصله‌ی افقی حفره‌ها از یکدیگر، و d فاصله‌ی قائم مرکز حفره‌ها از یکدیگر را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴، تاریخچه‌ی زمانی موج ریکر به همراه طیف فوری‌ی آن را نمایش می‌دهد. در کلیه‌ی تحلیل‌های پارامتریک از امواج مهاجم برشی SV از نوع موجک ریکر با (رابطه‌ی ۱۷) استفاده شده است. لازم به ذکر است که زاویه‌ی تابش امواج لرزه‌ی با توجه به کاهش سرعت امواج برشی در لایه‌های سطحی می‌تواند به صورت قائم فرض شود. از این رو در مطالعه‌ی حاضر زاویه‌ی تابش امواج به صورت قائم در نظر گرفته شده است:

$$f(t) = A_{max} [1 - 2(\pi f_p(t - t_0))]^2 e^{-(\pi f_p(t - t_0))^2} \quad (17)$$

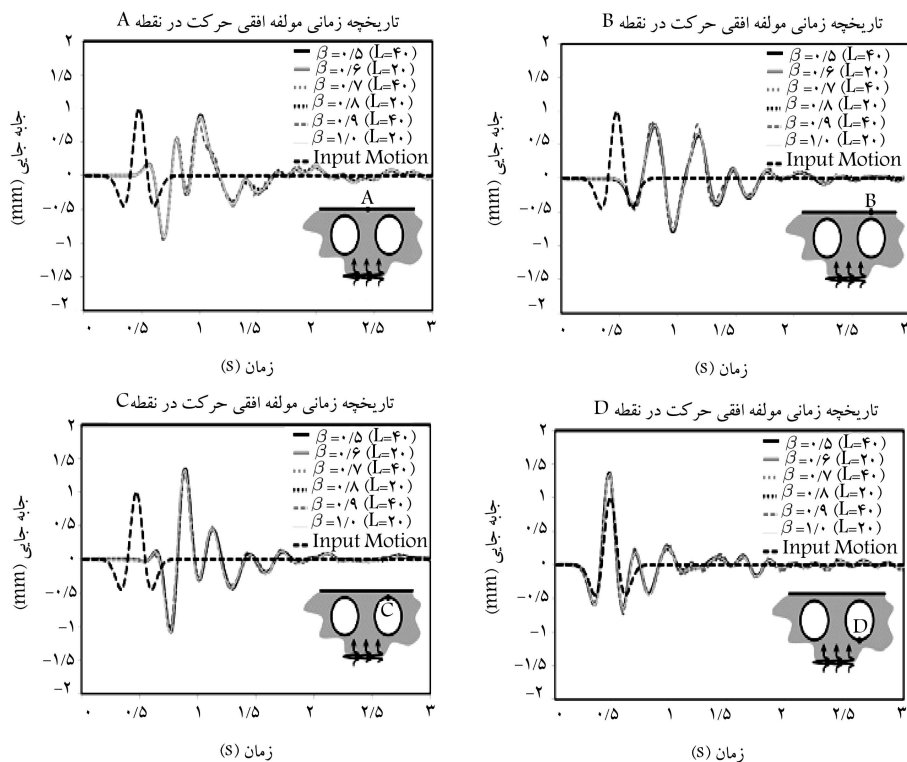
که در آن، f_p بسامد غالب موج، t_0 زمان نظیر بیشینه‌ی دامنه‌ی موج و t زمان کل موج مهاجم است. لازم به ذکر است که $f(t)$ بیان‌کننده‌ی مؤلفه‌ی افقی موج مهاجم و مؤلفه‌ی قائم آن برابر صفر است. در ضمن مقدار بیشینه‌ی دامنه‌ی موج مهاجم (A_{max}) در کلیه‌ی تحلیل‌های پارامتریک برابر ۱ میلی‌متر فرض شده است.

۱.۳. ارزیابی دقت مدل عددی

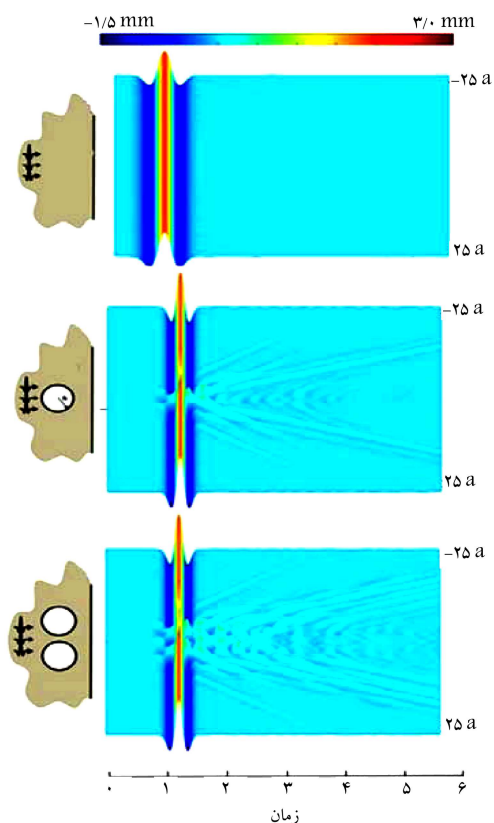
از جمله عوامل مؤثر در تعیین پاسخ‌های پایدار و قابل قبول به کمک روش اجزای مرزی در حوزه‌ی زمان، در نظر گرفتن مقادیر مناسب برای طول گام زمانی، طول و تعداد المان‌های متناسب با سرعت موج برشی مصالح محیط است. از طرف دیگر، بهینه‌سازی زمان حل مسائل دینامیکی در حوزه‌ی زمان، مستلزم انتخاب مناسب ابعاد مش‌بندی مدل و طول گام زمانی مربوط است. طول گام زمانی به نسبت سرعت موج برشی مصالح باید طوری انتخاب شود که در عین متناسب بودن با ابعاد مش‌بندی و نیز داشتن دقت مناسب، مدت زمان اجرای برنامه را نیز بهینه سازد. بدین منظور و برای یافتن معیار مشخص جهت انتخاب پارامترهای مناسب مذکور از رابطه‌ی ۱۸ استفاده شده است: [۲۷-۲۵]

$$\beta = \frac{c \cdot \Delta t}{L} \quad (18)$$

که در آن، C سرعت موج، Δt طول گام زمانی، و L دورترین فاصله‌ی گره‌های المان از یکدیگر است. در حقیقت پارامتر β تعداد المان‌های مورد نیاز در طول هر گام زمانی را هنگام تابش امواج مهاجم ارائه می‌دهد. بر طبق مطالعات انجام شده در زمینه‌ی روش اجزای مرزی، اجماع کلی در مقدار دقیق β به دست نیامده است. از این جهت، وجود تجربه‌ی کافی می‌تواند نقش اساسی و صحیح در انتخاب مناسب اندازه‌ی المان‌ها و گام زمانی متناسب با آن ایفا کند. با این حال توصیه‌ی اغلب پژوهشگران بر آن بوده است که مقدار β برای حل مسائل الاستودینامیک برابر ۱ در نظر گرفته شود، [۲۷-۲۵] و حتی المقدور از مقادیر β بزرگتر از ۱ اجتناب شود. [۲۸]



شکل ۵. تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان در نقاط A، B، C و D.

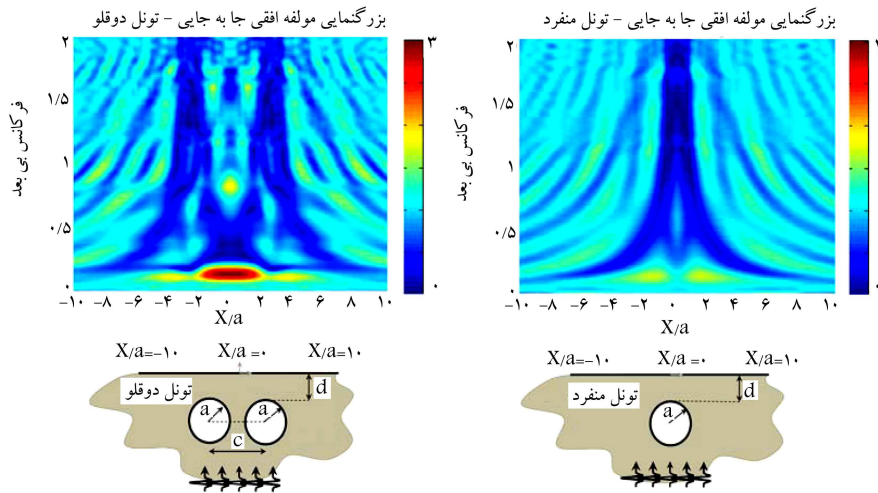


شکل ۶. مقایسه‌ی تاریخچه‌ی زمانی مؤلفه‌ی افقی تغییرمکان سطح زمین آزاد و سطح زمین واقع بر حفره‌ی دایره‌ی منفرد با نسبت $DR = 0.5$ و حفره‌ی دایره‌ی دوقلو با نسبت $DR = 0.5$ و $DHR = 3$ و $DVR = 3$ برای امواج مهاجم SV.

۴. تفرق امواج در حوزه‌ی زمان و بسامد

تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان یک نقطه، حرکت آن نقطه را هنگامی که امواج لرزه‌ی از آن عبور می‌کنند، نشان می‌دهد. نمودار تغییرمکان، نشان‌گر میدان تغییرمکان به صورت تابعی از مکان و زمان است، که از قراردادن تغییرمکان هر نقطه در محل فضایی آن به دست می‌آید. در واقع نمودار تغییرمکان نحوه‌ی انتشار امواج در محیط را به راحتی نشان می‌دهد. شکل ۶، نمودارهای مؤلفه‌ی افقی تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان در بازه‌ی مکانی $-25 \leq X/a \leq 25$ واقع بر سطح زمین (نیم‌صفحه) را برای موج مهاجم SV، در حالت‌های مختلف سطح زمین آزاد بدون حفره‌ی سطح زمین واقع بر حفره‌ی دایره‌ی منفرد و سطح زمین واقع بر حفره‌های دوقلوی دایره‌ی با نسبت فاصله‌ی $DR = 0.5$ و حفره‌ی دایره‌ی دوقلو با نسبت $DR = 0.5$ ، $DHR = 3$ و $DVR = 3$ به ترتیب نشان می‌دهد. در واقع نمودارهای مذکور، چگونگی تفرق امواج مهاجم توسط حفره‌های زیرزمینی و انتشار آنها را در سطح زمین نشان می‌دهند. امواجی که به واسطه‌ی وجود حفره‌ها متفرق می‌شوند، متشکل از امواج انعکاس یافته، تبدیل مذبافته، امواج پراشیده‌شده، و امواج تداخلی سطحی هستند. مجموعه‌ی این امواج در فاصله‌ی بین بالای حفره و سطح زمین در مدت کوتاهی تداخل و جابه‌جایی بسیار متغیری را در سطح زمین ایجاد می‌کنند. مطابق شکل ۶ مشاهده می‌شود که الگوی تغییرمکان سطح زمین متأثر از تعداد حفره‌های زیرزمینی نسبت به سطح زمین آزاد است، که افزایش تعداد حفره‌های زیرزمینی منجر به پیچیده‌تر شدن تداخل امواج متفرق‌شونده می‌شود.

از آنجایی که از نتایج به دست آمده در حوزه‌ی زمان امکان استخراج میزان بزرگ‌نمایی در تمامی محدوده‌های بسامدی وجود ندارد، نیاز به دسته‌ی دیگری از نتایج در فضای تبدیل‌یافته‌ی بسامدی است. این دسته از نتایج میزان بزرگ‌نمایی



شکل ۷. مقایسه‌ی مؤلفه‌ی افقی تغییر مکان سطح زمین واقع تونل دایره‌ی منفرد با نسبت $DR = 0.5$ و تونل دایره‌ی دوقلو با نسبت $DR = 0.5$ ، $DHR = 3$ و $DVR = 3$ در حوزه‌ی بسامد، برای امواج مهاجم SV.

کوچک‌تر در حفره‌های دوقلو خیلی بزرگ‌تر از مقادیر بزرگ‌نمایی حفره‌های منفرد است. بیشترین مقدار بزرگ‌نمایی تونل‌های دوقلو در $DHR = 2$ مشاهده می‌شود، که $2/3^0$ برابر مقدار بزرگ‌نمایی حفره‌ی منفرد در دوره‌های تناوب خیلی بلند به دست آمده است. به‌طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که در تونل‌های دوقلو نزدیک به هم در مقایسه با تونل‌های منفرد یا تونل‌های دوقلو با نسبت DHR های بزرگ‌تر، فضای محصور شده‌ی امواج مابین بالای سقف حفره و زمین بزرگ‌تر بوده است، که این موضوع سبب افزایش مقادیر بزرگ‌نمایی سطح زمین می‌شود. یا به عبارت دیگر، تونل‌های دوقلو نزدیک به هم، منطقه‌ی حبس موج بزرگ‌تری را در مقایسه با تونل‌های منفرد یا تونل‌های دوقلو با نسبت فاصله‌ی افقی بزرگ‌تر به وجود می‌آورند. لازم به ذکر است که این موضوع در تونل‌های سطحی نمایان‌تر است. در واقع اندرکنش لرزه‌ی متقابل تونل‌های دوقلو نزدیک به هم موجب می‌شود که برخی از امواج پراشیده بسیار آسان‌تر در فاصله‌ی بین بالای حفره تا سطح زمین حبس شوند. [۳۱-۲۹، ۱۰، ۸]

پراکنش امواج رابلی در ناحیه‌ی سطحی محصور بین حفره و سطح زمین موجب ایجاد مؤلفه‌ی مخالف (قائم) حرکت بر روی سطح زمین می‌شود. [۳۲] بنابراین به‌طور کلی وجود حفره‌ی زیرزمینی می‌تواند در ایجاد مقادیر قابل توجه بزرگ‌نمایی در مؤلفه‌ی مخالف (قائم) بسیار اثرگذار باشد. البته بزرگ‌نمایی لرزه‌ی مؤلفه‌ی مخالف در حالت وجود تونل‌های دوقلو موازی بسیار بزرگ‌تر نسبت به حالت تونل منفرد است. اهمیت تأثیرگذاری و اختلاف سطوح مؤلفه‌ی قائم بزرگ‌نمایی بین موارد بررسی شده شامل تونل‌های دوقلو، تونل منفرد، و پاسخ سطح آزاد (در مؤلفه‌ی مخالف برابر صفر است) در شکل ۸ و به ویژه در محدوده‌ی دوره‌های تناوب بلند و خیلی بلند به وضوح مشاهده می‌شود.

۲.۵. اثر نسبت فاصله‌ی قائم تونل‌ها از یکدیگر (DVR)

شکل ۹، تأثیر فاصله‌ی قائم تونل‌های دوقلو از یکدیگر در پاسخ لرزه‌ی سطح زمین در بازه‌های پرودیک مختلف را نشان می‌دهد. در این نمودارها، تونل سمت چپ، با نسبت عمق (DR) ثابت برابر 0.5 و تونل سمت راست با نسبت‌های فاصله‌ی قائم ($DVR = d/a$) برابر 0.5 ، 1 ، $2/5$ نسبت به مرکز تونل سمت چپ، به سمت پایین جا به جا شده است. همچنین با توجه

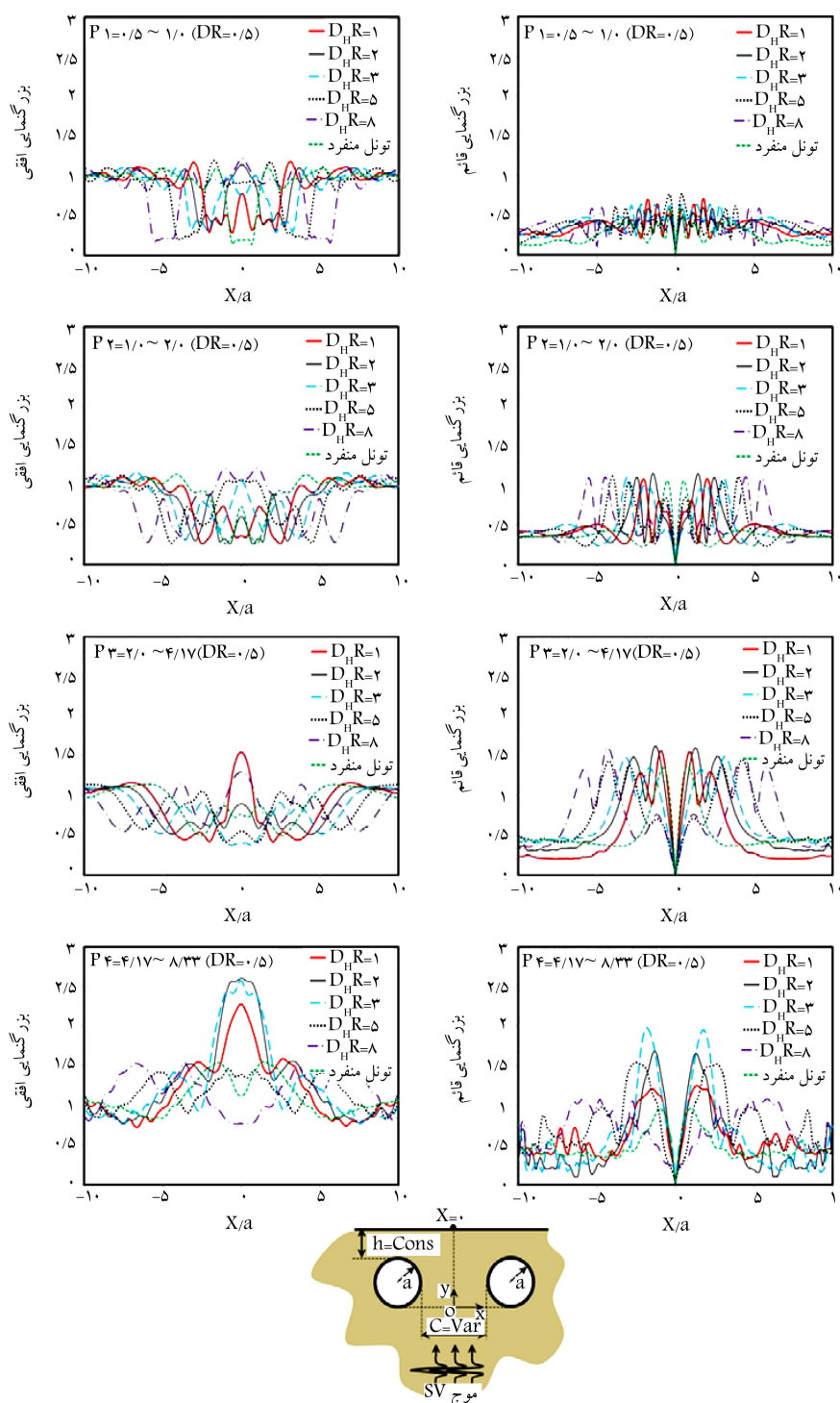
در هر نقطه از سطح زمین را در تمامی بازه‌های بسامدی و همچنین شمای کلی الگوهای بزرگ‌نمایی را در سطح زمین نمایان می‌سازد. شکل ۷، نمودارهای مؤلفه‌ی افقی بزرگ‌نمایی در محدوده‌ی $-10 \leq X/a \leq 10$ سطح زمین را برای موج مهاجم SV، برای سطح زمین واقع بر حفره‌ی دایره‌ی منفرد با نسبت $DR = 0.5$ و حفره‌ی دایره‌ی دوقلو با نسبت $DR = 0.5$ ، $DHR = 3$ و $DVR = 3$ در حوزه‌ی بسامد نشان می‌دهد.

۵. نتایج مطالعات پارامتریک

نمودارها و نتایج حاصل از مطالعات پارامتریک در اثر تغییرات پارامترهای نظیر نسبت عمق حفره‌ها (DR)، نسبت فاصله‌ی افقی (DHR)، نسبت فاصله‌ی قائم (DVR) بر بزرگ‌نمایی سطح زمین، تحت انتشار موج برشی درون صفحه‌ی SV در ادامه ارائه شده است.

۱.۵. اثر نسبت فاصله‌ی افقی تونل‌ها از یکدیگر (DHR)

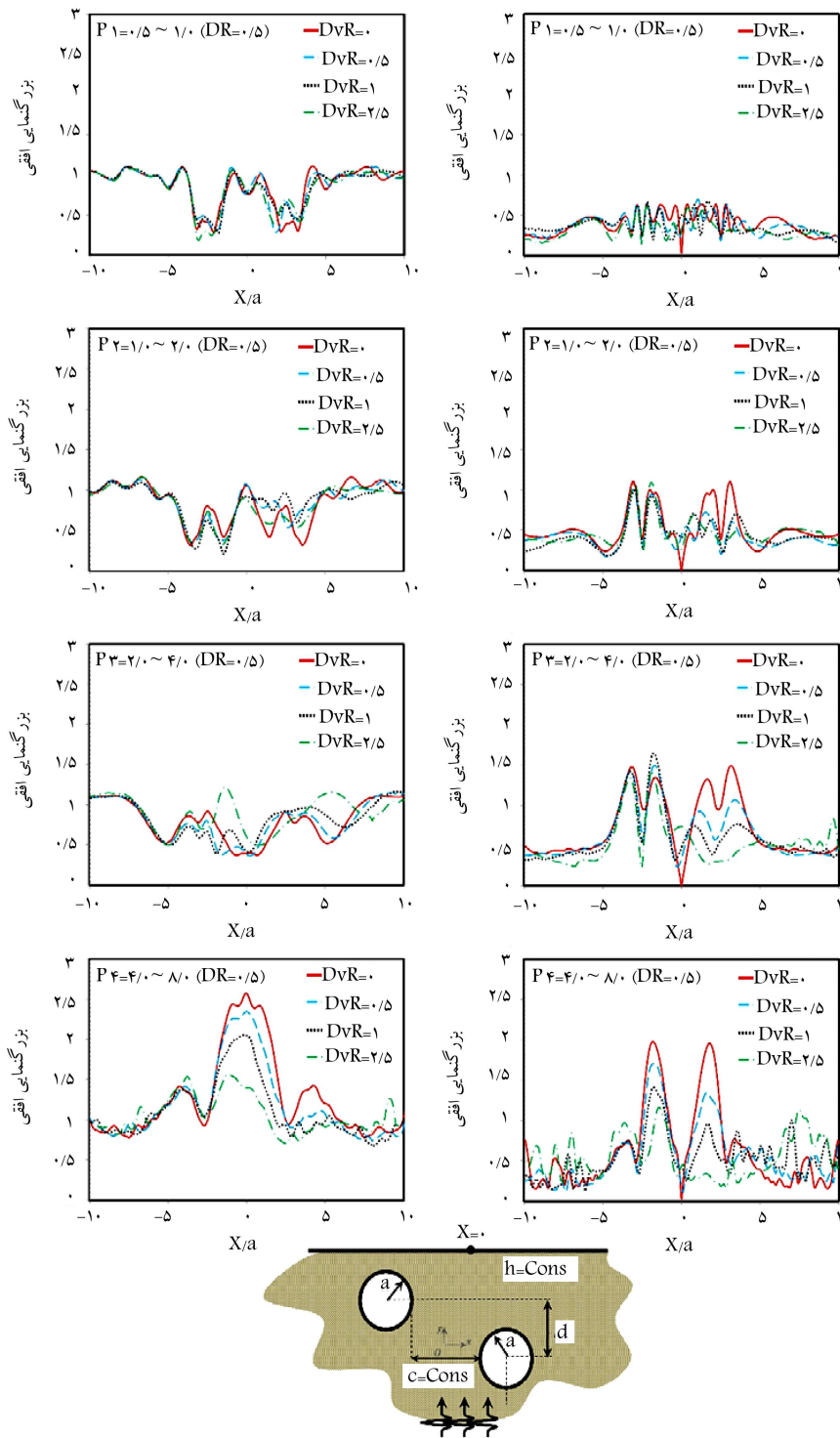
شکل ۸، تأثیر فاصله‌ی افقی تونل‌های دوقلو از یکدیگر و طول موج انتشاری در پاسخ لرزه‌ی سطح زمین را در بازه‌های پرودیک مختلف نشان می‌دهد. در شکل مذکور نتایج برای نسبت عمق (DR) برابر 0.5 به نسبت‌های فاصله‌ی افقی (DHR) برابر 1 ، 2 ، 3 ، 5 و 8 در بازه‌های پرودیک مختلف برای هر دو مؤلفه‌ی بزرگ‌نمایی افقی و قائم نشان داده شده است. همچنین در شکل مذکور نتایج تونل‌های دوقلو با تونل منفرد مقایسه شده است. واضح است که تغییرات فاصله‌ی افقی حفره‌ها از یکدیگر و طول موج مهاجم تأثیر عمده‌ی در پاسخ لرزه‌ی سطح زمین دارند. بیشترین مقادیر بزرگ‌نمایی برای تونل‌های دوقلو و منفرد در دوره‌های تناوب بلند تا خیلی بلند مشاهده شده است. در واقع عامل بزرگ‌نمایی در سطح زمین، در حالت امواج انتشار یافته با طول موج 2 تا 8 برابر قطر تونل‌های دوقلو، معمولاً مقادیر بزرگ‌تر از واحد دارد و بیشترین بزرگ‌نمایی‌ها در طول موج‌های بزرگ‌تر اتفاق می‌افتد. این در حالی است که در محدوده‌ی دوره‌های تناوب متوسط تا کوتاه، مقادیر بزرگ‌نمایی اغلب کاهش می‌یابد و به‌صورت کوچک‌نمایی لرزه‌ی ظاهر می‌شوند. به‌طور کلی مقادیر بزرگ‌نمایی برای نسبت‌های فاصله‌ی افقی (DHR)



شکل ۸. مولفه‌ی افقی و قائم بزرگ‌نمایی سطح زمین واقع بر تونل‌های دوقلوی دایروی با نسبت‌های مختلف فاصله‌ی افقی ($D^H R$) در اثر انتشار قائم موج SV.

از یکدیگر، این مقدار کاهش می‌یابد. علت این پدیده آن است که با افزایش عمق هر کدام از تونل‌ها، امواج تولیدشده‌ی سطحی رایلی کمتری به وجود آمده و در نتیجه، بزرگ‌نمایی‌های لرزه‌یی کمتری ایجاد شده است. از طرفی کاهش فضای محصورشده‌ی بالای حفره‌ها نیز سبب کاهش مقادیر بزرگ‌نمایی سطح زمین می‌شود. به عبارت دیگر، تونل‌های دوقلوی نزدیک به هم، منطقه‌ی حبس موج بزرگ‌تری را در مقایسه با تونل‌های دوقلو با نسبت فاصله‌ی قائم بزرگ‌تر به وجود می‌آورند.

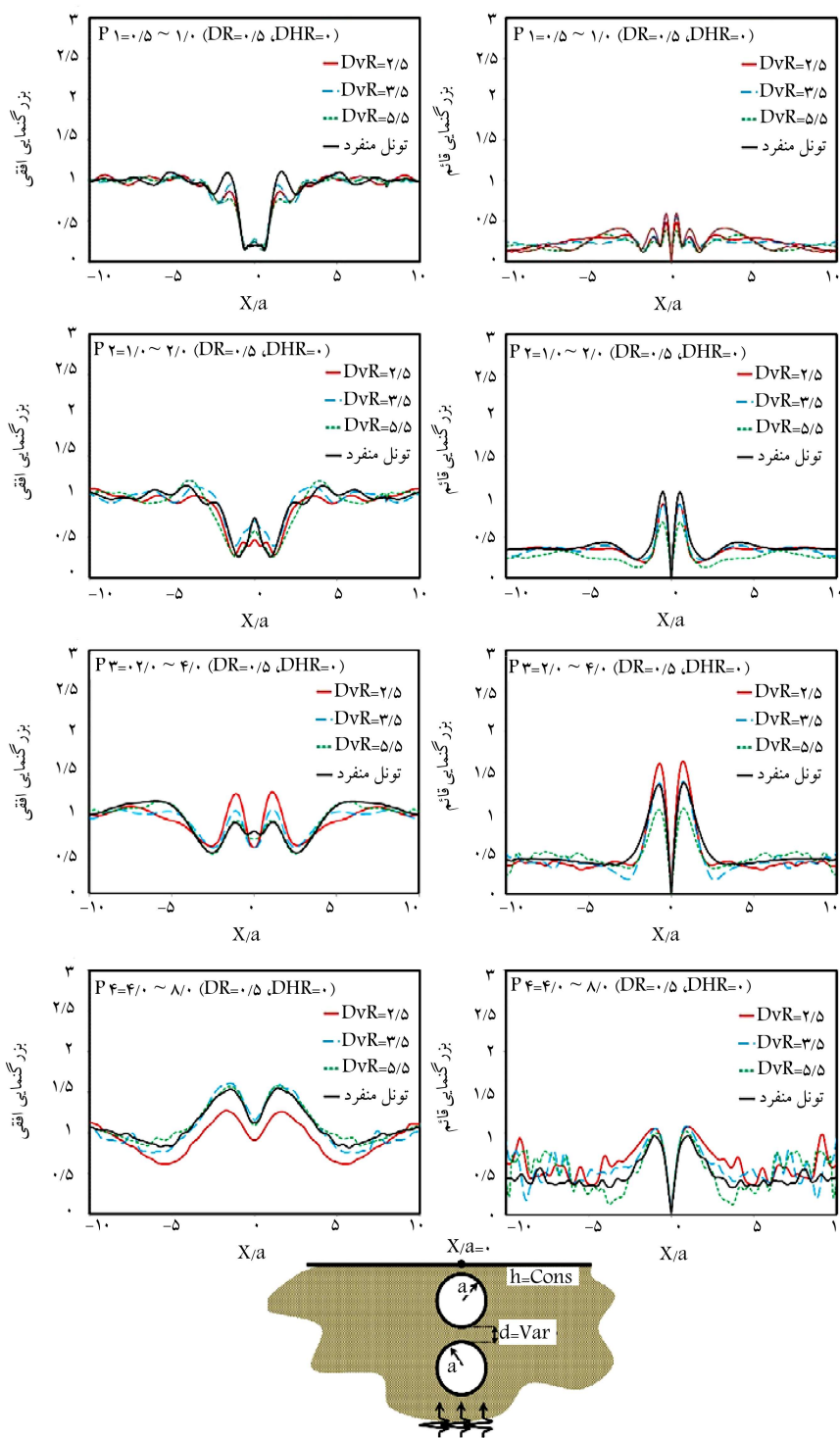
به نتایج حاصل از بخش ۱.۵. و به جهت کاهش دادن تعداد تحلیل‌ها و کسب بیشینه‌ی مقادیر بزرگ‌نمایی لرزه‌یی، نسبت فاصله‌ی افقی حفره‌ها از یکدیگر برابر ۳ در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تغییرات فاصله‌ی قائم حفره‌ها از یکدیگر تأثیر عمده‌یی در پاسخ لرزه‌یی سطح زمین دارد. بیشترین مقدار بزرگ‌نمایی برابر ۲/۵۷ مربوط به نسبت فاصله‌ی قائم ($D^V R$) صفر یا همان تونل‌های هم‌تراز است و به تدریج با افزایش نسبت فاصله‌ی قائم تونل‌ها



شکل ۹. مؤلفه‌ی افقی و قائم بزرگ‌نمایی سطح زمین واقع بر تونل‌های دوقلوی دایروی با نسبت‌های مختلف فاصله‌ی قائم (DvR) در اثر انتشار قائم موج SV .

و $DvR = 2.5, 3.5, 5.5$ است، که به عبارت دیگر تونل‌های دوقلو بر روی هم واقع شده و فاصله‌ی قائم بین آنها متغیر است. این حالت به جهت بررسی تأثیر مستقل نسبت فاصله‌ی قائم تونل‌ها از یکدیگر بدون در نظر گرفتن تأثیر نسبت فاصله‌ی افقی تونل‌ها بررسی شده است. مطابق شکل ۱۰، در حالت تونل‌های واقع شده با نسبت قائم برابر با ۲٫۵، تحریک لرزه‌ی قابل توجهی در محدوده‌ی دوره‌های تناوب بلند مشاهده می‌شود، که پاسخ‌های لرزه‌ی بیشتری را

بدیعی است که با توجه به هم‌تراز نبودن حفره‌ها در این تحلیل‌ها، نمودار بزرگ‌نمایی نسبت به مرکز تقارن تونل‌ها قرینه نیست و در دوره‌های تناوب بلند تا خیلی بلند مقدار بزرگ‌نمایی در سمت حفره‌ی، که در عمق پایین‌تری واقع شده است، کمتر است. به همین ترتیب شکل ۱۰، نشان‌دهنده‌ی حالتی است که نسبت عمق برابر $DR = 0.5$ دارد و نسبت فاصله‌ی افقی و قائم به ترتیب برابر با $DvR =$



شکل ۱۰. مؤلفه‌های افقی و قائم بزرگ‌نمایی سطح زمین واقع بر تونل‌های دوقلوی دایروی با نسبت‌های مختلف فاصله‌ی قائم (D_{VR}) وقتی که ($D_{HR} = 0$) است، در اثر انتشار قائم موج SV.

بالایی و سطح زمین به‌خصوص در محدوده‌ی دوره‌های تناوب پایین‌تر داشته باشند.

در ادامه، با تکیه بر مطالعات پارامتریک انجام‌شده، جدول‌های ۱ و ۲ برای حصول ضرایب بزرگ‌نمایی ساخت‌گاه‌های تحت مطالعه‌ی پژوهش حاضر و به جهت سهولت استفاده از نتایج ارائه شده است.

در پی دارد. این افزایش مقدار بزرگ‌نمایی در محدوده‌ی پریودیک بلند ($P4$)، در هر دو مؤلفه‌های افقی و قائم پاسخ مشاهده شده است. این در حالی است که با افزایش بیشتر نسبت فاصله‌ی قائم، مقادیر بزرگ‌نمایی مؤلفه‌های موافق و مخالف کاهش یافته و اندرکنش لرزه‌یی آنها همانند رفتار حفره‌های منفرد شده است. به عبارت دیگر، وجود تونل پایینی می‌تواند نقش سایه‌یی و کاهنده بر تونل

۶. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر وجود تونل‌های دوقلوی موازی در پاسخ لرزه‌ی سطح زمین در محیط کشسان و امواج انتشاری قائم SV با استفاده از روش اجزای مرزی در حوزه‌ی زمان مطالعه شده است. نتایج حاصل مشخص می‌کند که پتانسیل بزرگ‌نمایی سطح زمین واقع بر تونل‌های دوقلوی بدون پوشش به شدت تحت تأثیر طول موج امواج انتشار یافته و فاصله‌ی افقی و قائم تونل‌ها از یکدیگر است. برخی از مهمترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

- بزرگ‌نمایی لرزه‌ی سطح زمین تحت تأثیر حضور تونل‌های دوقلوی نزدیک به هم در مقایسه با تونل و یا حفره‌ی منفرد افزایش می‌یابد. دلیل این پدیده می‌تواند ناحیه‌ی حبس موج بزرگتر در بالای تونل‌های دوقلو نسبت به تونل‌های منفرد باشد. بیشترین مقدار بزرگ‌نمایی تونل‌های دوقلو در $DHR = 2$ مشاهده می‌شود، که برابر مقدار بزرگ‌نمایی تونل منفرد در دوره‌های تناوب خیلی بلند است. $2/3^0$
- بزرگ‌نمایی سطح زمین برای امواج مهاجم با بسامد بی‌بعد کوتاه‌تر (دوره‌های تناوب بلند)، مقادیر بزرگتری را نشان می‌دهد. به طور کلی پاسخ لرزه‌ی سطح زمین واقع بر حفره‌های منفرد و دوقلو در دوره‌های تناوب بی‌بعد بلندتر منجر به بزرگ‌نمایی امواج مهاجم می‌شوند.
- در مورد امواج مهاجم با طول موج ۲ تا ۸ برابر قطر تونل‌های دوقلو، عامل بزرگ‌نمایی در سطح زمین معمولاً مقادیر بزرگتر از واحد دارد.
- وجود حفره‌ی زیرزمینی می‌تواند در ایجاد مقادیر قابل توجه بزرگ‌نمایی در مؤلفه‌ی مخالف (قائم) بسیار اثرگذار باشد. البته بزرگ‌نمایی لرزه‌ی مؤلفه‌ی مخالف در حالت وجود تونل‌های دوقلوی موازی بسیار بزرگتر نسبت به حالت حفره‌ی منفرد است.
- تغییرات فاصله‌ی قائم تونل‌ها از یکدیگر تأثیر عمده‌ی در پاسخ لرزه‌ی سطح زمین دارد. بیشترین مقدار بزرگ‌نمایی برابر $2/57$ مربوط به نسبت فاصله‌ی قائم صفر ($DVR = 0$) یا همان تونل‌های هم‌تراز است و به تدریج با افزایش نسبت فاصله‌ی قائم تونل‌ها از یکدیگر، این مقدار کاهش می‌یابد.
- با توجه به تأثیر حفره‌ها و یا به عبارتی تونل‌های زیرزمینی در بزرگ‌نمایی لرزه‌ی سطح زمین و آسیب‌رساندن به سازه‌های روسطحی، نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در انجام مطالعات لرزه‌خیزی و ریزپهنه‌بندی لرزه‌ی مناطق واقع بر حفره‌ها و تونل‌های زیرزمینی و همچنین آیین‌نامه‌های لرزه‌ی استفاده شود.

جدول ۱. مقادیر متوسط بزرگ‌نمایی افقی در مرکز سطح زمین ($\alpha/a = 0$) واقع بر روی حفره‌های زیرزمینی با نسبت‌های مختلف DHR .

$DR = 0.5$				نسبت‌های بی‌بعد	
محدوده‌ی دوره‌های تناوب بی‌بعد *				DHR	DVR
P۴	P۳	P۲	P۱		
۲/۲۸	۱/۵۴	۰/۳۷	۰/۷۸	۱	
۲/۶۱	۰/۸۹	۰/۶۱	۱/۱۳	۲	
۲/۵۷	۰/۴	۱/۰۶	۰/۷۷	۳	۰
۱/۳۹	۰/۵۵	۱/۰۷	۰/۹۳	۵	
۰/۷۷	۱/۲۹	۱/۰۸	۱/۲۲	۸	
۱/۱۳	۰/۷۷	۰/۷۳	۰/۲	تونل منفرد	

* محدوده‌ی دوره‌های تناوب بی‌بعد بدین شرح است:

$$(1 \leq P1 \leq 0.5), (2 \leq P2 \leq 1), (4 \leq P3 \leq 2) \text{ و } (4 \leq P4 \leq 8)$$

جدول ۲. مقادیر متوسط بزرگ‌نمایی افقی در مرکز سطح زمین ($\alpha/a = 0$) واقع بر روی حفره‌های زیرزمینی با نسبت‌های مختلف DVR .

$DR = 0.5$				نسبت‌های بی‌بعد	
محدوده‌ی دوره‌های تناوب بی‌بعد *				DVR	DHR
P۴	P۳	P۲	P۱		
۲/۵۷	۰/۴	۱/۰۶	۰/۷۷	۰	
۲/۳۴	۰/۳۹	۱/۰۷	۰/۷۹	۰/۵	۳
۲/۰۴	۰/۴۲	۰/۹۲	۰/۷۷	۱	
۱/۳۹	۰/۶	۰/۸۹	۰/۸	۲/۵	
۰/۹۱	۰/۵۷	۰/۴۷	۰/۲۵	۲/۵	
۱/۱۶	۰/۵۶	۰/۷	۰/۲۸	۳/۵	۰
۱/۰۹	۰/۶۷	۰/۵۷	۰/۲۵	۵/۵	

* محدوده‌ی دوره‌های تناوب بی‌بعد بدین شرح است:

$$(1 \leq P1 \leq 0.5), (2 \leq P2 \leq 1), (4 \leq P3 \leq 2) \text{ و } (4 \leq P4 \leq 8)$$

پانویس‌ها

1. boundary element method
2. multiple boundary
3. Elastodynamic traction
4. Isoparametric quadratic boundary elements
5. Jacobian of transformation
6. enclosing element
7. Ricker wave
8. free field

(References) منابع

- Alielahi, H., Kamalian, M. and Adampira, M. "A BEM investigation on the influence of underground cavities on the seismic response of canyons", *Acta Geotechnica*, **11**(2), pp. 391-413 (2016).
- Liang, J., Zhang, J. and Ba, Z. "The effect of underground cavities on design seismic ground motion", 15 WCEE LISBOA, Department of Civil Engineering, Tianjin University, China (2012).
- Yiouta-Mitra, P., Kouretzis, G., Bouckovalas, G. and Sofianos A. "Effect of underground structures in earthquake resistant design of surface structures", *Dynamic Response and Soil Properties*, Geo-Denver: New Peaks in Geotechnics (2007).
- Ariga, Y., Inoko, K., Takeuchi, M., Oguro, A., Asaka, H., Yoda, M. and Takehara, K. "Mutual effects between high buildings and underground shopping arcade during earthquake", 15 WCEE LISBOA, Department of Civil Engineering, Tianjin University, China (2012).
- Liang, J., Zhang, J. and Ba, Z. "Amplification of in-plane seismic ground motion by group cavities in layered half-space (I)", *Earthq. Sci.*, **25**(4), pp. 275-285 (2012).
- Liang, J., Zhang, J. and Ba, Z. "Amplification of in-plane seismic ground motion by group cavities in layered half-space (II): With saturated poroelastic soil layers", *Earthq. Sci.*, **25**(4), pp. 287-298 (2012).
- Luco, J.E. and De Barros, F.C.P. "Dynamic displacements and stresses in the vicinity of a cylindrical cavity embedded in a half space", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **23**(3), pp. 321-340 (1994).
- Rodriguez-Castellanos, A., Sanchez-Sesma, F.J., Luzon, F. and Martin, R. "Multiple scattering of elastic waves by subsurface fractures and cavities", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**(4A), pp. 1359-137 (2006).
- Dravinski, M. and Yu, C.H. "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**(2), pp. 281-295 (2013).
- Alielahi, H., Kamalian, M. and Adampira, M. "Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **71**, pp. 63-79 (2015).
- Karakostas, C.Z. and Manolis, G.D. "Dynamic response of tunnels in stochastic soils by the boundary element method", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **26**(8), pp. 667-680 (2002).
- Hasheminejad, S.M. and Avazmohammadi, R. "Harmonic wave diffraction by two circular cavities in a poroelastic formation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **27**(1), pp. 29-41 (2007).
- Li, J.C., Li, H.B., Ma, G.W. and Zhou, Y.X. "Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **35**, pp. 227-234 (2013).
- Moore, I.D. and Guan, F. "Three-dimensional dynamic response of lined tunnels due to incident seismic waves", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**(4), pp. 357-369 (1996).
- Alielahi, H., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., Jafari, M.K. and Panji, M. "Applying a time-domain boundary element method for study of seismic ground response in the vicinity of embedded cylindrical cavity", *Int. J. Civil Eng.*, **11**(1), pp. 45-54 (2013).
- Brebbia, C.A. and Dominguez, J., *Boundary Elements, An Introductory Course*, Southampton: Computational Mechanics Publication, 322 p. (1989).
- Katsikadelis, J.T., *Boundary Elements: Theory and Applications*, 1st Edition, Elsevier Science Ltd., 448 p. (2002).
- Dominguez, J., *Boundary Elements in Dynamics*, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston (1993).
- Kamalian, M., Gatmiri, B. and Sohrabi-Bidar, A. "On time-domain two-dimensional site response analysis of topographic structures by BEM", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **5**(2), pp. 35-45 (2003).
- Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A. and Gatmiri, B. "Time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid BE/FE method", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **26**(8), pp. 753-765 (2006).
- Kawase, H. "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**(4), pp. 1415-1437 (1988).
- Hadely, P.K., Askar, A. and Cakmak, A.S. "Scattering of waves by inclusions in a nonhomogeneous elastic half space solved by boundary element method", Technical Report NCEER-89-0027 (1989).
- Liang, J. and Liu, Z. "Diffraction of plane SV waves by a cavity in poroelastic half-space", *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **8**(1), pp. 29-46 (2009).
- Parvanova, S.L., Dineva, P.S., Manolis, G.D. and Wuttke, F. "Seismic response of lined tunnels in the half-plane with surface topography", *Bulletin Earthquake Engineering*, **12**(2), pp. 981-1005 (2014).

25. Marrero, M. and Dominguez, J. "Numerical behavior of time-domain BEM for three-dimensional transient elastodynamic problems", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **27**(1), pp. 39-48 (2003).
26. Dominguez, J. and Gallego, R. "The time-domain boundary element method for elastodynamic problems", *Mathematical and Computer Modelling*, **15**(3-5), pp. 119-129 (1993).
27. Partridge, P.W., Brebbia, C.A. and Wrobel, L.C., *The Dual Reciprocity Boundary Element Method*, Computational Mechanics Publications, Southampton and Boston (1992).
28. Carrer, J.A.M. and Mansur, W.J. "Alternative time-marching schemes for elastodynamic analysis with the domain boundary element method formulation", *Computational Mechanics*, **34**(5), pp. 387-399 (1994).
29. Lee, V.W. "On deformations near a circular underground cavity subjected to incident plane SH-waves", *Proceedings of the Application of Computer Methods in Engineering Conference*, II, Los Angeles, Calif., U.S.A, pp. 951-962 (1977).
30. Lee, V.W., Chen, S. and Hsu, I.R. "Antiplane diffraction from canyon above a subsurface unlined tunnel", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, **25**(6), pp. 668-675 (1999).
31. Lee, V.W. and Manoogian, M.E. "Surface motion 1 above an arbitrarily shaped underground cavity for incident SH-waves", *J. of European Association for Earthquake Eng.*, **8**, pp. 3-11 (1995).
32. Ohtsuki, A. and Harumi, K. "Effect of topography and subsurface inhomogeneities on seismic SV waves", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **11**(4), pp. 441-462 (1983).