

چکیده

این پژوهش بر تحلیل لرزه‌ای سطح زمین در حضور ناهمگنی دوقلوی بیضوی نرم زیرزمینی در برابر امواج مهاجم برون‌صفحه‌ی SH متمرکز شده است. در تهیه‌ی مدل، از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان بهره گرفته شده است. این روش تنها با استقرار المان بر روی وجه میانی ناهمگنی‌ها، به تحلیل مسئله می‌پردازد. با توسعه‌ی فرمول‌بندی برای ناهمگنی دوقلو و پیاده‌سازی عددی آن در قالب الگوریتم داس‌بم، مثال‌هایی پیرامون ارزیابی کیفیت روش مزبور ارائه شده است. در ادامه، با در نظر گرفتن نسبت شکل ناهمگنی و زاویه‌ی تابش امواج مهاجم، پاسخ گذرای سطح و نحوه پراکنش امواج لرزه‌ای در اثر برخورد به این عارضه در حوزه زمان نشان داده شده است. سپس، با تبدیل نتایج به حوزه فرکانس، دامنه تغییر مکان و بزرگنمایی سطح زمین مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به‌وضوح مبین نقش چشمگیر ناهمگنی دوقلوی بیضوی بر پاسخ لرزه‌ای سطح است و نشان می‌دهد، حداکثر تفرق و بیشینه‌ی بزرگنمایی امواج، در نسبت شکل حداقل و هجوم امواج قائم حاصل شده است. روش حاضر به‌عنوان راهکار برای مدل‌سازی رفتار لرزه‌ای سطح در حضور عوارض توپوگرافی توپر زیرزمینی پیشنهاد شده و نتایج حاصل، در تکمیل و تدقیق آئین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود قابل استفاده می‌باشد.

واژگان کلیدی: روش اجزای مرزی نیم‌صفحه، حوزه‌ی زمان، ناهمگنی دوقلو، موج SH، پاسخ سطح زمین.

پاسخ گذرای سطح زمین در حضور ناهمگنی دوقلوی زیرزمینی در برابر امواج مهاجم لرزه‌ای

مهدی پنجمی (نویسنده مسئول)

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

سعید مجتبی‌زاده حسنلوئی

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

۱- مقدمه

واقعی زمین در حضور ناهمگنی‌های زیرسطحی، ارائه و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از نقطه نظر فنی، رویکردهای مذکور را می‌توان به روش‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی و روش‌های عددی تقسیم‌بندی نمود که هر یک دارای مزایا و معایبی نسبت به سایرین می‌باشد [۳]. در روش‌های تحلیلی لازم است برای هر مدل معین از عوارض زیرسطحی، توابع و معادلات حاکم به‌صورت منحصر‌به‌فرد در نظر گرفته شده و شرایط مرزی و پیوستگی بر آن اعمال گردد. این روش‌ها عموماً از دقت بسیار مناسب و بالایی برخوردار بوده و امکان محاسبه پاسخ‌های دقیق برای مسائل مورد نظر را فراهم می‌نمایند. از جمله بنیادی‌ترین مطالعات تحلیلی صورت گرفته بر مسائل ناهمگنی می‌توان به تحقیقات سایمونز [۴] اشاره نمود که به کمک روش بسط‌نمایی، پراکنش امواج SH را در حضور ناهمگنی‌های مستقر در محیط نیمه‌بی‌نهایت مطالعه

مطالعه بر عوارض توپوگرافی زیرسطحی همچون حفرات و ناهمگنی‌ها، بیانگر نقش قابل توجه شرایط محلی ساختگاه بر پاسخ نقاط مختلف سطح زمین به هنگام اعمال امواج لرزه‌ای می‌باشد [۱]. حضور عوارض یاد شده می‌تواند به طرق مختلف از جمله پراکنش، انعکاس، خزش، انحراف و مجبوس نمودن امواج گذرا، منجر به بروز بزرگنمایی/کوچک‌نمایی در سطح زمین گردد. این مسئله به‌ویژه در ناهمگنی‌ها که از مصالح با جنس متفاوت نسبت به محیط پیرامون تشکیل شده‌اند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا، محققان همواره در تلاش بوده‌اند تا با نگرشی دقیق و موشکافانه بر عوارض مذکور و با بهره‌گیری از رویکردهای مناسب، رفتار لرزه‌ای عوارض مزبور را در حالات مختلف لرزه‌ای مطالعه نمایند [۲]. در دهه‌های اخیر، رویکردهای متنوعی جهت تحلیل مسائل مربوط به پراکنش امواج لرزه‌ای و پیش‌بینی پاسخ

توجه در تحلیل مسائل، جزء لاینفک این روش‌ها محسوب می‌شود. از جمله مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده توسط روش اجزای محدود (FEM) می‌توان به مطالعات لایسمر و دریک [۱۲]، اسمیت [۱۳]، دی [۱۴] و کاواسه و ستو [۱۵] اشاره نمود که به کاربرد روش مزبور در مباحث زلزله‌شناسی و تحلیل مسائل مرتبط با پراکنش امواج لرزه‌ای در حضور عوارض مختلف پرداخته‌اند. همچنین، محققانی چون ژانگ و کاتسوه [۱۶] یک روش اجزای محدود تلفیقی جهت تحلیل مسئله ناهمگنی‌های الاستیک با موقعیت رندوم ارائه نمودند. ناکاسون و همکاران [۱۷] موفق به تهیه یک روش محاسباتی عددی مبتنی بر روش اجزای محدود برای تحلیل حوزه تنش در حضور ناهمگنی‌های با مقطع دلخواه شدند. در کاربرد روش تفاضل محدود (FDM) نیز محققان پیشتازی چون بور [۱۸] و اوتسوکا و هرومی [۱۹] به بررسی اثر ناهمگنی در برابر امواج مهاجم لرزه‌ای SH و SV پرداختند. در این میان، روش‌های مرزی توانستند با ویژگی‌های بارز خود بر ضعف روش‌های حجمی غلبه نمایند. روش اجزای مرزی (BEM)^۶ به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین و درعین حال دقیق‌ترین روش‌های عددی جهت تحلیل مسائل مهندسی به شمار می‌آید. در این روش، گسسته‌سازی‌ها صرفاً بر روی مرز عارضه‌ی مورد نظر متمرکز شده که ساده‌سازی فرآیند مدل‌سازی را به ارمغان می‌آورد. اگرچه در روش‌های مرزی نیز محدودیت‌هایی چون فرمولاسیون پیچیده و عدم توسعه‌ی کافی برای محیط‌های غیرخطی، پلاستیک و چندفازه مشاهده می‌شود، اما بهره‌گیری از آنها منتج به کاهش قابل توجه حجم داده‌های ورودی، کاهش مدت زمان تحلیل مسائل، اقلان شرایط مرزی تشعشع امواج در بی‌کران و همچنین دقت بسیار بالای نتایج خواهد شد [۲۰-۲۱]. روش‌های اجزای مرزی را می‌توان در قالب دو دسته‌بندی شامل، روش اجزای مرزی محیط کامل و نیم‌صفحه مطرح نمود که هر یک در حوزه تبدیل یافته (از جمله فرکانس و لاپلاس) و حوزه زمان توسعه یافته‌اند [۲۲]. با نگاهی میان تفاوت‌های اصلی روش‌های مرزی مزبور می‌توان ملاحظه نمود، در روش اجزای مرزی محیط کامل، دامنه‌ی مورد نظر از

چندی بعد، کیکاچی [۵-۶] با بهره‌گیری از رویکرد بسط تابع موج، پراکنش و میرایی امواج الاستیک در حضور ناهمگنی‌ها و ترک‌ها را برای امواج SH، P و SV بررسی نمود. پس از آن، کاسی [۷] به مطالعه پراکنش امواج الاستیک در حضور ناهمگنی دارای یک ترک در وجه میانی پرداخته و توانست معادله فرم بسته برای امواج مهاجم P و SV را استخراج نماید. همچنین، وانگ و وانگ [۸] پراکنش امواج الاستیک SH توسط یک ناهمگنی صلب استوانه‌ای را مطالعه نمودند. سال‌ها بعد و با بهره‌گیری از روش تحلیلی بسط تابع موج، ژائو و کی [۹] توانستند پراکنش امواج صفحه‌ای SH در حضور ناهمگنی الاستیک استوانه‌ای را ارزیابی نمایند. یک سال بعد و مبتنی بر تئوری پراکنش چندگانه امواج، کانویر و نوریس [۱۰] پژوهش خود را بر محیط‌های الاستیک حاوی ناهمگنی‌های استوانه‌ای با در نظرگیری عدد موج مؤثر و ضرایب بازتاب معطوف نمودند. اگرچه امکان محاسبه دقیق پاسخ توسط روش‌های تحلیلی فراهم است، اما به دلیل انعطاف‌پذیری کم، پیچیدگی بالای معادلات و محدودیت در مدل‌سازی عوارض واقعی موجود در طبیعت، کاربرد این روش‌ها صرفاً به مسائل با هندسه ساده محدود شده و موجب سوق یافتن پژوهشگران به سوی روش‌های جایگزین شد.

در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت چشم‌گیر قدرت رایانه‌ها و افزایش کارایی آنها در مدل‌سازی و تحلیل مسائل گوناگون مهندسی، استقبال زیادی در استفاده از روش‌های عددی نسبت به روش‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی به عمل آمده است. اگرچه فرآیند محاسبه تقریبی نتایج در روش‌های عددی قابل اجتناب نیست، اما امکان مدل‌سازی عوارض پیچیده و واقعی موجود در طبیعت را فراهم ساخته است [۱۱]. روش‌های عددی مورد استفاده در تحلیل عوارض توپوگرافی را می‌توان به سه دسته‌ی اصلی شامل روش‌های حجمی^۱، مرزی^۲ و تلفیقی^۳ تقسیم نمود [۳]. در روش‌های حجمی که از جمله نام‌آشنا‌ترین آنها می‌توان به روش‌های اجزای محدود (FEM)^۴ و روش تفاضل محدود (FDM)^۵ اشاره نمود، لازم است کل دامنه‌ی مورد نظر گسسته‌سازی شود. لذا، حجم بالای محاسبات و مدت زمان قابل

بزرگنمایی سطح زمین در حضور ناهمگنی الاستیک واقع در یک نیم‌فضا پرداخت. پس از آن، نیوا و هایروز [۳۵] توانستند کاربرد روش معادله‌ی انتگرال مرزی برای تحلیل پاسخ گذرای ناهمگنی را ارائه نمایند. سپس، هدلی و همکاران [۳۶] به بررسی پراکنش امواج در حضور ناهمگنی واقع در نیم‌فضای غیرهمگن الاستیک پرداختند. سال‌ها بعد، یائو و همکاران [۳۷] رفتار ناهمگنی با توزیع رندوم را در حالت دو بعدی شبیه‌سازی نمودند. راس و گلگو [۳۸] به حساسیت‌سنجی ناهمگنی و حفره‌ی واقع در محیط الاستودینامیک پرداختند. در طی سال‌های پس از آن و با استفاده از معادلات انتگرال مرزی، موگیلوسکایا و همکاران [۳۹] اندرکنش ناهمگنی نانوئی چندگانه را با در نظرگیری اثرات سطحی و وجه میانی بررسی نمودند. همچنین، یو و دراویسنکی [۴۰-۴۱] پراکنش امواج هارمونیک صفحه‌ای در حضور ناهمگنی را در برابر امواج SH، P و SV بررسی نمودند. در مطالعه‌ی دیگر، دراویسنکی و یو [۴۲] پراکنش امواج SH هارمونیک صفحه‌ای توسط ناهمگنی چندگانه را مطالعه نمودند. پاروانوا و همکاران [۴۳] با بهره‌گیری از روش معادله‌ی انتگرال مرزی توانستند پاسخ دینامیکی حفرات و ناهمگنی چندگانه را به دست آورند. در همان سال، دراویسنکی و شیخ‌حسینی [۴۴] مطالعه خود را بر پراکنش امواج هارمونیک صفحه‌ای SH در حضور ناهمگنی چندلایه با شکل دلخواه معطوف ساختند. پیترز و بارا [۴۵] موقعیت و شکل هندسی ناهمگنی‌های مدفون در یک دامنه‌ی رسانا را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین، مسئله‌ی پراکنش امواج هارمونیک SH و تمرکز تنش در حضور ناهمگنی چندگانه‌ی لایه‌ای واقع در یک نیم‌فضای الاستیک در مطالعات شیخ‌حسینی و دراویسنکی [۴۶-۴۷] بررسی شد. با و یین [۴۸] پراکنش امواج صفحه‌ای SH توسط ناهمگنی زیرسطحی را با استفاده از یک روش اجزای مرزی غیرمستقیم چند دامنه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. اخیراً، جوبین و همکاران [۴۹] از روش اجزای مرزی به منظور ارزیابی عددی اندرکنش میان ناهمگنی خطی صلب واقع در یک محیط الاستیک بهره گرفتند.

درون یک محیط بی‌نهایت تفکیک شده و به‌منظور اقتناع شرایط مرزی سطح آزاد، لازم است از عارضه مورد نظر به‌اندازه کافی فاصله گرفته و در نهایت مرزهای کناری بسته شده و مش‌بندی صورت گیرد [۲۳]. ولی در روش اجزای مرزی نیم‌صفحه، با توجه به اینکه شرایط تنش آزاد در سطح زمین به‌طور کامل و دقیق در معادلات حاکم اقتناع شده است، تنها مرز عارضه‌ی مورد نظر مش‌بندی شده و بدین ترتیب، حجم محاسبات و زمان انجام تحلیل در مقایسه با روش اجزای مرزی محیط کامل، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۲۴].

در کاربرد روش اجزای مرزی محیط کامل در حالت استاتیکی، می‌توان تحقیقات پنجی و همکاران [۲۵-۲۶] را نام برد که بر تونل‌های زیرزمینی و فاکتورهای مؤثر بر آن متمرکز شدند. با استفاده از روش مزبور در حالت دینامیکی، هدلی [۲۷] توانست پراکنش امواج توسط ناهمگنی‌های واقع در یک نیم‌فضای الاستیک را بررسی نماید. کمالیان و همکاران [۲۰] با بهره‌گیری از روش تلفیقی اجزای محدود/اجزای مرزی به مطالعه‌ی دو بعدی پاسخ ساختگاه برای عوارض توپوگرافی ناهمگن در حوزه‌ی زمان پرداختند. همچنین، پاروانوا و همکاران [۲۸-۲۹] تحقیقات خویش را بر پراکنش امواج لرزه‌ای در محیط‌های حاوی ناهمگنی چندگانه معطوف ساختند. در پژوهشی دیگر و با بهره‌گیری از رویکرد تلفیقی اجزای محدود/اجزای مرزی، پاروانوا و همکاران [۳۰] توانستند پاسخ دینامیکی ناهمگنی‌های نانوئی واقع در یک جسم با ابعاد محدود را به دست آورند. در استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حالت استاتیکی، می‌توان به مطالعه پنجی و همکاران [۳۱] اشارت رفت که تونل‌های کم‌عمق واقع در خاک‌های لایه‌ای را مورد تحلیل قرار دادند. همچنین، پنجی و انصاری [۳۲] لوله تحت فشار مدفون در خاک چندلایه را توسط روش مزبور مدل‌سازی نمودند. در حالت دینامیکی نیز دونگ و همکاران [۳۳] حل عددی مربوط به مسائل ناهمگنی را ارائه نمودند. در میان مطالعات انجام شده با استفاده از روش اجزای مرزی در حوزه‌ی فرکانس می‌توان پژوهش دراویسنکی [۳۴] را نام برد که به تعیین

آن در الگوریتم پیشین داس‌بم^۷ (کدنویسی برنامه‌ی مذکور در محیط نرم‌افزار متلب ۲۰۱۹^۸ [۶۴] انجام شده است)، مثال صحت‌سنجی برای ارزیابی کیفیت و دقت روش مورد استفاده در مقایسه با نتایج سایر پژوهشگران ارائه شده است. سپس، در قالب یک مطالعه عددی جامع و با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی مدل از قبیل نسبت شکل و زاویه امواج مهاجم، به تحلیل حساسیت سطح زمین در برابر حالات مختلف ناهمگنی زیرزمینی پرداخته شده است. نتایج در دو حوزه‌ی زمان و فرکانس ارائه شده و در نهایت، برخی از مهم‌ترین دست‌آوردهای تحقیق در بخش آخر جمع‌بندی و طبقه‌بندی شده است.

۲- اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان^۹

شکل (۱) نشان‌دهنده‌ی مدل ناهمگنی دوقلوی مستقر در یک محیط نیم‌صفحه‌ی همگن الاستیک خطی، در برابر امواج مهاجم SH می‌باشد. در تهیه مدل مزبور، از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان با استفاده از تکنیک زیرسازه‌سازی^{۱۰} و روش تصویر منبع موج^{۱۱} [۶۵] نسبت به سطح زمین و اقتضای شرایط مرزی بر روی آن استفاده شده است. بدین ترتیب، مش‌بندی صرفاً بر روی مرز ناهمگنی متمرکز گردیده است. امواج مهاجم لرزه‌ای برون صفحه‌ی SH از نوع ریکر^{۱۲} [۶۶] و با زاویه‌ی دلخواه بر مدل اعمال شده است. شکل (۲) نشان‌دهنده‌ی موجک ریکر در حوزه‌ی زمان و فرکانس می‌باشد. مطابق شکل (۱)، معادله‌ی دیفرانسیل اولیه‌ی موج اسکالر برای شروع فرمول‌بندی به صورت زیر خواهد بود:

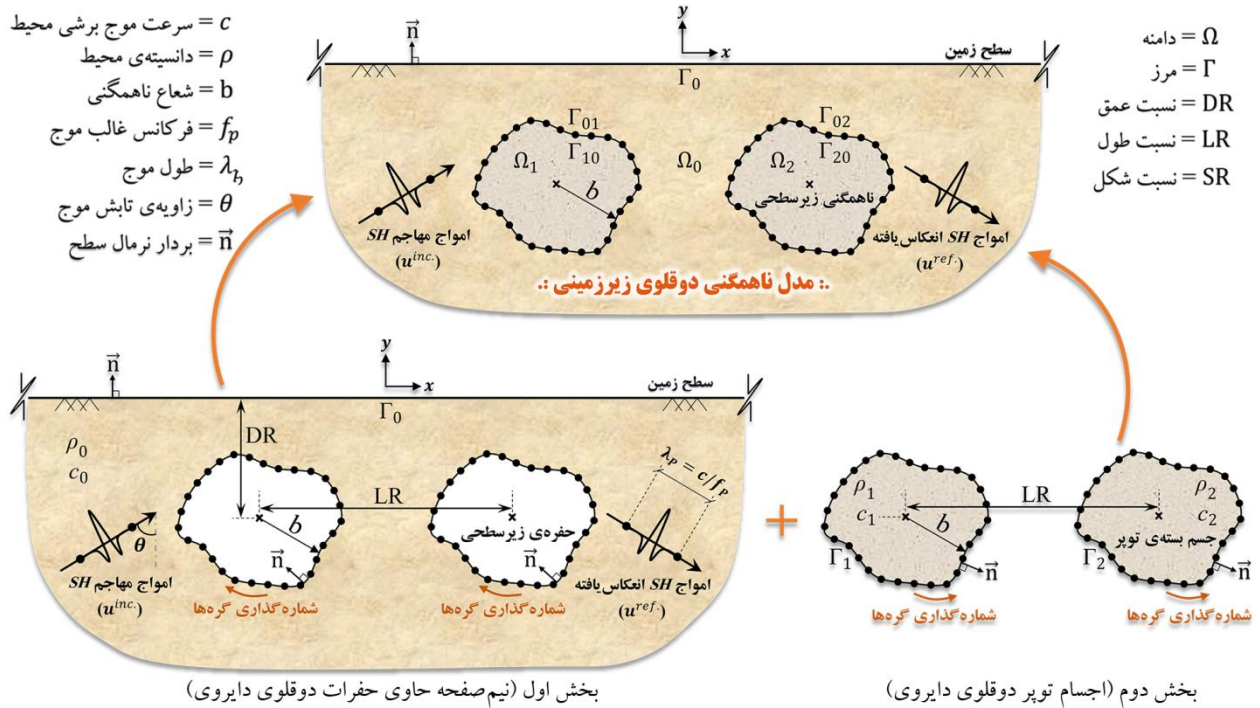
$$\frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial y^2} + b(x, y, t) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{c_j^2} \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial t^2} \quad j = 0, 1, 2$$

در رابطه‌ی فوق، $u(x, y, t)$ تغییر مکان برون‌صفحه، $b(x, y, t)$ نیروهای حجمی در نقطه‌ی (x, y) بوده و t معرف زمان می‌باشد. همچنین c_j سرعت موج برشی محیط زام بوده که به صورت $\sqrt{\mu_j / \rho_j}$ تعریف می‌گردد. در این رابطه، μ_j و ρ_j به ترتیب مدول برشی و دانسیته محیط زام می‌باشد.

با استفاده از روش اجزای مرزی در حوزه‌ی زمان، مطالعه رفتار عوارض توپوگرافی به صورت ملموس و وابسته به زمان امکان‌پذیر گردید. در این زمینه می‌توان به تحقیقات کمالیان و همکاران [۵۰] اشاره نمود که به تحلیل دو بعدی پاسخ ساختگاه در حضور عوارض توپوگرافی همسان و ناهمسان پرداختند. در همان سال، فنک و همکاران [۵۱] بر پراکنش گذرای دو بعدی امواج SH توسط یک ناهمگنی با وجه میانی اصطکاکی یک‌جانبه متمرکز شدند. سپس، هوانگ و همکاران [۵۲] توانستند روش معادله انتگرال مرزی در حوزه‌ی زمان را برای یک صفحه و اسکوالاستیک حاوی حفرات دایروی و ناهمگنی‌های الاستیک توسعه دهند. میخاسکیو [۵۳] پاسخ گذرای یک ناهمگنی صلب صفحه‌ای واقع در یک محیط الاستیک را به دست آورد. سال‌ها بعد، لی و همکاران [۵۴] در راستای بررسی پراکنش دینامیکی ترک در محیط حاوی ناهمگنی چندگانه گام برداشتند. همچنین، در مطالعات پنجمی [۲۴]، پنجمی و همکاران [۵۵-۵۶]، پنجمی و فخرآور [۵۷]، پنجمی و انصاری [۵۸]، پنجمی و یاسمی [۵۹]، پنجمی و مجتبی‌زاده حسنلوئی [۶۰-۶۱]، پنجمی و همکاران [۶۲] و اخیراً پنجمی و مجتبی‌زاده حسنلوئی [۶۳] به تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی زیرسطحی از جمله حفره‌ی تک، دوقلو، چندگانه، تونل‌های پوشش‌دار و ناهمگنی تک در حوزه‌ی زمان پرداخته شده است. چنانچه مرور ادبیات فنی فوق‌الذکر نشان می‌دهد، پراکنش امواج گذرای SH و اثر آن بر پاسخ سطح زمین در حضور ناهمگنی دوقلوی زیرزمینی مسئله‌ای است که هنوز به صورت مستقیم و شفاف در حوزه‌ی زمان مورد تجزیه و تحلیل قرار نگرفته است.

از یک سو با توجه به حضور محیط‌های ناهمگن بسته‌ی دوگانه به صورت لث‌ها و عدسی‌ها در چینه‌بندی زیرسطحی زمین و از سوی دیگر، لزوم آئین‌نامه‌های لرزه‌ای به شناخت بهتر این قسم عوارض، موجب شده است تا معیار انجام پژوهش حاضر در استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان بر تحلیل گذرای سطح زمین با وجود عوارض مزبور، تحت امواج مهاجم برون‌صفحه‌ی SH با زاویه‌ی تابش دلخواه بنا نهاده شود. پس از توسعه فرمولاسیون برای ناهمگنی دوقلوی دایروی و پیاده‌سازی



شکل (۱): هندسه مسئله ناهمگنی دوقلوی زیرزمینی با مقطع دلخواه واقع در یک محیط نیم‌صفحه‌ای الاستیک همگن، در برابر امواج مهاجم لرزه‌ای SH.

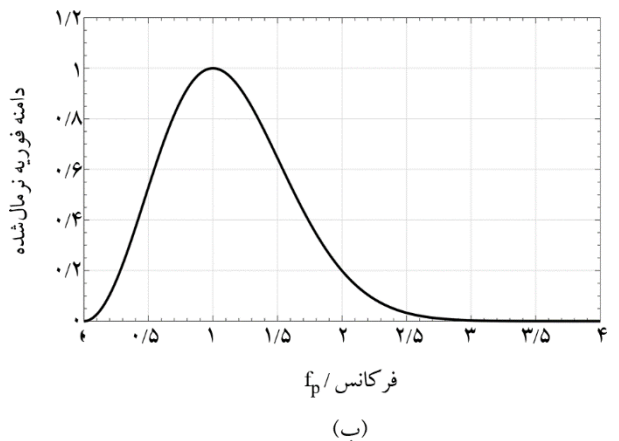
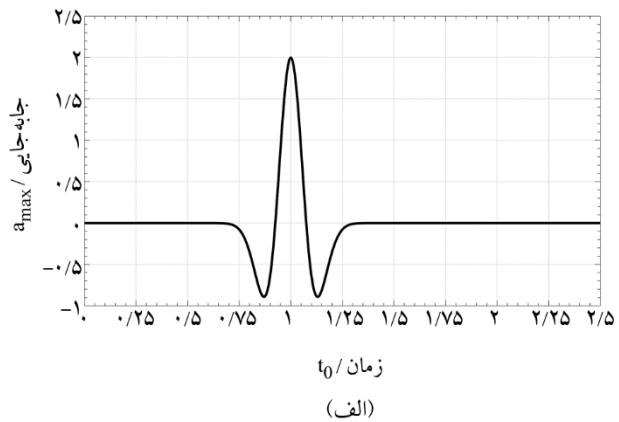
با در نظر گرفتن معادله تعادل اولیه و شرایط مرزی زیر می‌توان به حل‌های اساسی نیم‌صفحه دست یافت [۶۷-۶۸].

$$\left. \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial n} \right|_{y=0} = 0 \quad (2)$$

از حل هم‌زمان دو معادله (۱) و (۲)، حل اساسی نیم‌صفحه به دست خواهد آمد. با اعمال روش باقیمانده‌های وزن‌دار به معادله (۱) و حذف جملات واقع بر روی حجم با استفاده از روش‌های حل مرزی همچون روش منفرد و صرف‌نظر از شرایط اولیه و نیروهای حجمی، معادله انتگرال مرزی (BIE)^{۱۳} در حوزه‌ی زمان، به صورت زیر به دست خواهد آمد [۶۹].

۲-۱- معادله انتگرال مرزی

به منظور تعیین معادله انتگرال مرزی مستقیم در حوزه‌ی زمان، لازم است ابتدا بدون در نظرگیری شرایط مرزی مذکور در رابطه (۲)، انتگرال باقی‌مانده‌های وزن‌دار بر معادله (۱) اعمال شود. سپس با دو مرحله انتگرال‌گیری و حذف جملات واقع بر حجم به کمک روش‌های مرزی و صرف‌نظر نمودن از شرایط اولیه و



شکل (۲): نمودار تابع موجک ریکو برای نقطه‌ای واقع در سطح آزاد زمین، به ترتیب برای (الف) حوزه‌ی زمان و (ب) حوزه‌ی فرکانس.

عناصر آن از انتگرال گیری مکانی هسته‌های نیم صفحه برای المان‌های مرزی حاصل شده‌اند. بردارهای کمیت‌های گره‌ای مرزی در گام زمانی n نیز توسط $\{u_j^n\}$ و $\{q_j^n\}$ نشان داده شده است. برای تعیین فرم قابل حل معادله (۵)، با اعمال شرایط مرزی حاکم بر مرز هندسی مدل به صورت زیر خواهیم داشت:

$$[A_{ji}^1] \{X_j^N\} = [B_{ji}^1] \{Y_j^N\} + \{R_j^N\} + \{u_0^{ff,N}\} \quad (۶)$$

$$j = 0, 1, 2$$

در رابطه (۶)، $\{X_j^N\}$ و $\{Y_j^N\}$ به ترتیب بیانگر بردارهای حاوی مقادیر مجهول و معلوم مرزی و $\{R_j^N\}$ عبارت است از اثر تاریخیچه‌ی زمانی دینامیکی در گره زمانی حاضر N . بدین ترتیب برای $\{R_j^N\}$ نیز خواهیم داشت:

۳- مدل سازی ناهمگنی دوقلوی زیرزمینی

همان گونه که پیش‌تر در شکل (۱) نیز نشان داده شد، به هنگام استفاده از روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزه زمان، لازم است ناهمگنی دوقلو و محیط پیرامون به دو بخش مجزا تفکیک شود. بخش اول مدل عبارت است از یک نیم صفحه‌ی حاوی دو حفره توخالی و بخش دوم شامل مصالحی است که فضای درون ناهمگنی دوقلوی دایروی را پوشش می‌دهد.

۳-۱- بخش اول: نیم صفحه‌ی حاوی حفرات دوقلوی دایروی

این بخش از مدل عبارت است از یک محیط نیم صفحه‌ی دارای حفره‌ی دوقلو متأثر از امواج مهاجم لرزه‌ای SH با زوایای تابش دلخواه. چنانچه تمامی گره‌های وجه مشترک با زیر نویس (j_0) نشان داده شود و زیانگر شماره‌ی ناهمگنی باشد، معادله‌ی انتگرال مرزی گسسته‌سازی شده برای این بخش از مدل در گام زمانی N به صورت زیر خواهد بود:

$${}^1_{0j} u_{0j}^N = G_{0j}^1 q_{0j}^N + R_{0j}^N + u_{0j}^{ff,N}, \quad j = 1, 2 \quad (۸)$$

در این رابطه، u_{0j}^N و q_{0j}^N به ترتیب تغییر مکان و تنش در وجه

نیروهای حجمی، می‌توان به معادله زیر دست یافت [۶۹-۷۰].

$$c(\xi) u(\xi, t) = \int_{\Gamma_0 \cup \Gamma_1 \cup \Gamma_2} \left\{ \int_0^t [u^*(x, t; \xi, \tau) q_j(x, t) - q^*(x, t; \xi, \tau) u_j(x, t)] d\tau \right\} d\Gamma(x) + u_0^{ff}(\xi, t) \quad (۳)$$

$$j = 0, 1, 2$$

در رابطه (۳)، u^* حل اساسی نیم صفحه‌ی تغییر مکان و q^* حل اساسی تنش در حوزه‌ی زمان بوده و u_j و q_j نیز به ترتیب معرف تغییر مکان و تنش مرزی می‌باشند. Γ مبین مرز بوده و x و ξ به ترتیب مختصات نقطه‌ی گیرنده و منبع موج بوده و $c(\xi)$ زاویه‌ی شکست مرزی می‌باشد. در بخش انتهایی معادله مذکور نیز u_0^{ff} مبین تغییر مکان میدان آزاد سطح زمین است [۷۱، ۳۶]. با در نظر گیری تغییرات خطی زمان در حد فاصل هر گام و گسسته‌سازی این محور با N گام زمانی، پس از انتگرال گیری زمانی از رابطه (۳) به رابطه (۴) خواهیم رسید:

$$(\xi) u^N(\xi) = \sum_{n=1}^N \int_{\Gamma_0 \cup \Gamma_1 \cup \Gamma_2} \left(\left[U_1^{N-n+1}(x, \xi) q_j^n(x) + U_2^{N-n}(x, \xi) q_j^n(x) \right] - \left[Q_1^{N-n+1}(x, \xi) u_j^n(x) + Q_2^{N-n}(x, \xi) u_j^n(x) \right] \right) d\Gamma(x) + u_0^{ff,N}(\xi) \quad (۴)$$

$$j = 0, 1, 2$$

در رابطه (۴)، U_1^{N-n+1} ، U_2^{N-n} و Q_1^{N-n+1} ، Q_2^{N-n} فرم فشرده‌ی هسته‌ی اسکالر نیم صفحه برای مؤلفه تغییر مکان و تنش می‌باشد [۵۶] تغییر مکان مرزی و تغییر مکان میدان آزاد در زمان $t = N \Delta t$ به ترتیب با u^N و $u_j^{ff,N}$ نشان داده شده و u_i^n و q_i^n نیز به ترتیب بردارهای تغییر مکان و تنش گره‌های مرزی هستند.

۳-۲- گسسته‌سازی معادلات انتگرال مرزی

با گسسته‌سازی مرز ناهمگنی دوقلوی زیرزمینی توسط المان‌های درجه‌ی دوم و انتگرال گیری از رابطه (۴) برای همه المان‌های مرزی، فرم ماتریسی معادله‌ی مذکور به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\sum_{n=1}^N H_j^{N-n+1} \{u_j^n\} = \sum_{n=1}^N G_j^{N-n+1} \{q_j^n\} + \{u_0^{ff,N}\}, \quad (۵)$$

$$j = 0, 1, 2$$

در رابطه (۵)، H_j^{N-n+1} و G_j^{N-n+1} ماتریس‌هایی هستند که

$$\begin{bmatrix} H_{01}^1 & -1/\mu_0 G_{01}^1 & H_{02}^1 & -1/\mu_0 G_{02}^1 \\ H_{10}^1 & 1/\mu_1 G_{10}^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{20}^1 & 1/\mu_2 G_{20}^1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{01}^N \\ q_{01}^N \\ u_{02}^N \\ q_{02}^N \end{Bmatrix} = \quad (14)$$

$$\begin{Bmatrix} R_{0j}^N \\ R_{10}^N \\ R_{20}^N \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_{0j}^{ff,N} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad j=1,2$$

با حل معادله ماتریسی (۱۴)، تمامی مقادیر مجهول شامل تغییر مکان‌ها و تنش‌ها در وجه میانی ناهمگنی دوقلو و محیط پیرامون به دست خواهد آمد. به منظور محاسبه‌ی تغییر مکان‌ها در سطح زمین، از معادله بخش اول با فرض $c(\xi)$ برابر با ۱ می‌توان استفاده نمود [۵۶].

۴- مثال صحت‌سنجی

فرمول‌بندی مشروح در بخش پیشین در توسعه‌ی الگوریتم داس‌بم [۲۴] برای تحلیل لرزه‌ای سطح زمین در حضور ناهمگنی دوقلوی زیرزمینی عددی‌سازی شد. به منظور بررسی صحت عملکرد این الگوریتم، یک محیط الاستیک خطی شامل دو ناهمگنی زیرزمینی دایره‌ای در یک محیط الاستیک خطی و تحت اثر امواج مهاجم قائم SH مدل شده و پاسخ حاصل با نتایج ارائه شده در مطالعه دراوینسکی و یو [۴۲] مقایسه شده است. در شکل (۳) دامنه‌ی تغییر مکان نرمالایز شده‌ی سطح زمین (NDA)^{۱۴} در محدوده‌ی $-1.0b$ تا $1.0b$ نشان داده شده است. دامنه‌ی تغییر مکان نرمالایز شده، عبارت است از نسبت دامنه‌ی فوریه‌ی تغییر مکان سطح زمین حاصل از روش اجزای مرزی در یک فرکانس معین، بر دامنه‌ی فوریه‌ی امواج مهاجم در فرکانس مذکور. همچنین در مدل مفروض، ناهمگنی فوقانی به صورت ثابت در نسبت عمق (DR) برابر با ۲ و ناهمگنی تحتانی به ترتیب در نسبت عمق‌های ۵ و ۲۰ از سطح مستقر شده است. b معرف شعاع بوده که برای هر دو ناهمگنی به صورت یکسان لحاظ شده است. لازم به ذکر است، پاسخ ارائه شده در فرکانس بی‌بعد (η) برابر با 0.5 محاسبه شده است. فرکانس بی‌بعد (η) به صورت

مشترک (Γ_{0j}) ، R_{0j}^N تاریخچه‌ی دینامیکی پیشین در گام زمانی N ام و $u_{0j}^{ff,N}$ تغییر مکان میدان آزاد برای وجه مشترک می‌باشد. برای R_{0j}^N به صورت زیر خواهیم داشت:

$$R_{0j}^N = \sum_{n=1}^{N-1} (G_{0j}^{N-n+1} q_{0j}^n - H_{0j}^{N-n+1} u_{0j}^n), \quad j=1,2 \quad (9)$$

۳-۲- بخش دوم: اجسام توپر دوقلوی دایروی

این بخش شامل دو محیط بسته‌ی جامد توپر می‌باشد که فضای داخلی ناهمگنی را پوشش می‌دهند. مشابه بخش اول، چنانچه تمامی گره‌های متعلق به وجه مشترک برای این بخش با زیرنویس (j_0) بیان گردد، در گام زمانی N ام خواهیم داشت:

$$H_{j_0}^2 u_{j_0}^N = G_{j_0}^2 q_{j_0}^N + R_{j_0}^N, \quad j=1,2 \quad (10)$$

به طوری که:

$$R_{j_0}^N = \sum_{n=1}^{N-1} (G_{j_0}^{N-n+1} q_{j_0}^n - H_{j_0}^{N-n+1} u_{j_0}^n), \quad j=1,2 \quad (11)$$

در رابطه (۱۰)، $u_{j_0}^N$ و $q_{j_0}^N$ به ترتیب تغییر مکان و تنش در وجه مشترک (Γ_{0j}) و R_{0j}^N نیز تاریخچه دینامیکی پیشین در گام زمانی N ام برای وجه مشترک میان اجسام توپر با محیط پیرامون می‌باشد.

۳-۳- سرهم‌سازی

به منظور حل مسئله و تعیین مجهولات، لازم است شرایط پیوستگی در وجه میانی ناهمگنی دوقلو و محیط پیرامون اعمال شود. بدین ترتیب، شرایط تعادل تغییر مکان‌ها و سازگاری تنش‌ها در وجه مشترک به صورت زیر خواهد بود:

$$u_{0j}^N = u_{j_0}^N, \quad j=1,2 \quad (12)$$

و

$$\mu_0 q_{0j}^N = -\mu_j q_{j_0}^N, \quad j=1,2 \quad (13)$$

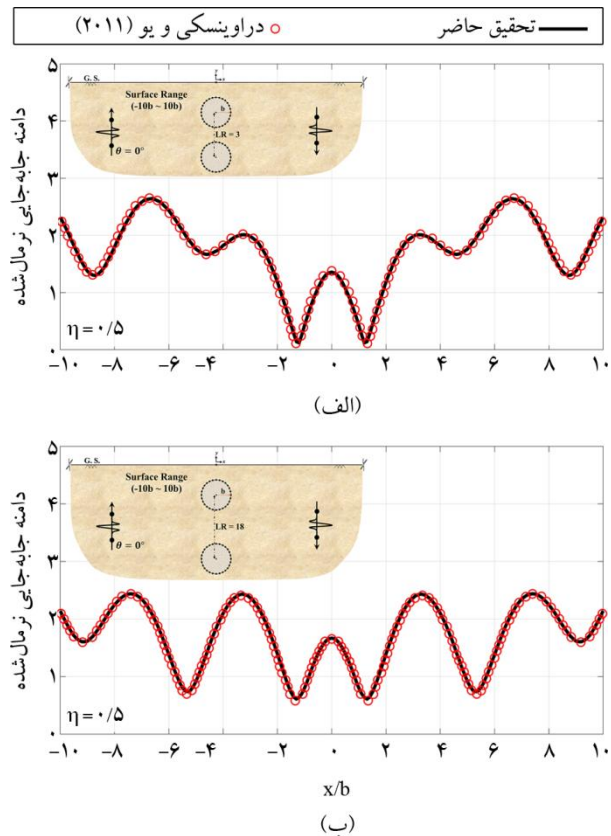
در روابط فوق، μ_0 و μ_j به ترتیب مدول برشی محیط پیرامون و ناهمگنی دوقلوی زیرزمینی می‌باشد. پس از اقناع شرایط پیوستگی مذکور در وجه میانی، فرم ماتریسی معادلات انتگرال مرزی سرهم شده به صورت رابطه (۱۴) خواهد بود [۷۲]:

همان طور که ملاحظه می شود، نتایج حاصل شده انطباق بسیار مناسبی با نتایج ارائه شده در مطالعه‌ی دراوینسکی و یو [۴۲] دارد. لازم به ذکر است، دراوینسکی و یو [۴۲] از روش اجزای مرزی محیط کامل در حوزه‌ی فرکانس برای مدل‌سازی محیط مشتمل بر ناهمگنی مزبور بهره گرفتند.

۵- مدل‌سازی مطالعه پارامتریک

با توجه به اینکه در پژوهش حاضر، اثر ناهمگنی دوقلوی دایروی زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مد نظر بوده است، لذا چهار نسبت شکل $^{15}(SR)$ شامل 0.25 ، 0.5 ، 0.75 و 1 برای هندسه ناهمگنی‌ها لحاظ شده است. نسبت عمق $^{16}(DR)$ و نسبت فاصله‌ی $^{17}(LR)$ ناهمگنی دوقلو به صورت ثابت و به ترتیب برابر با $1/5$ و 3 در نظر گرفته شده و امواج مهاجم لرزه‌ای نیز به ترتیب با زوایای 0° ، 30° ، 60° و 90° درجه به مدل اعمال شده‌اند. محدوده‌ی سطح زمین در تمامی مدل‌ها از $-4b$ تا $4b$ می‌باشد. همچنین نسبت امپدانس $^{18}(I)$ که بیانگر اختلاف سختی مصالح تشکیل دهنده‌ی ناهمگنی‌ها و محیط پیرامون می‌باشد به صورت رابطه $I = \rho_i c_i / \rho_m c_m$ تعریف شده و برابر با 0.3333 اعمال شده است. در این رابطه، ρ_i و c_i به ترتیب دانسیته و سرعت موج برشی ناهمگنی و ρ_m و c_m به ترتیب دانسیته و سرعت موج برشی محیط دربرگیرنده‌ی ناهمگنی‌ها می‌باشد. سایر پارامترهای مورد استفاده نیز مطابق موارد قید شده در بخش صحت‌سنجی در مدل‌سازی لحاظ شده‌اند. در بخش نتایج، ابتدا به بررسی وضعیت پراکنش امواج در حوزه‌ی زمان و ارائه‌ی منحنی‌های بیانگر میزان دامنه $^{19}(A)$ در مقابل زمان پرداخته شده است. منظور از دامنه، نسبت تغییر مکان سطح زمین بر شتاب پیشینه‌ی موج ورودی می‌باشد. در ادامه، به بررسی بزرگنمایی ایجاد شده در سطح زمین توسط نتایج حوزه‌ی فرکانس پرداخته شده است. بزرگنمایی نیز عبارت است از نسبت دامنه‌ی پاسخ سطح زمین در حضور ناهمگنی دوقلوی زیرزمینی به تغییر مکان ایجاد شده در حالت میدان آزاد. در این پژوهش، پاسخ‌های حوزه‌ی فرکانس در محدوده‌ی فرکانسی بی‌بعد (η) 0.25 تا 4 به دست آمده است.

رابطه‌ی $\eta = \omega b / \pi c$ تعریف می‌گردد که در آن، ω بیانگر فرکانس زاویه‌ای موج، b شعاع ناهمگنی و c سرعت موج برشی دامنه‌ی دربرگیرنده‌ی ناهمگنی‌ها می‌باشد.



شکل (۳): دامنه‌ی تغییر مکان نرمال‌ایز شده‌ی سطح زمین (NDA) در مقابل x/b برای ناهمگنی دوقلوی دایره‌ای با (الف) نسبت طول ۳ و (ب) ۱۸، در برابر امواج مهاجم قائم SH با فرکانس بی‌بعد 0.5 .

از جمله سایر فاکتورهای در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی، سرعت موج برشی (c_j) و دانسیته (ρ_j) می‌باشد که به ترتیب برابر با 1200 متر بر ثانیه و 1 تن بر مترمکعب برای محیط پیرامون و 600 متر بر ثانیه و $667/10$ تن بر مترمکعب برای مصالح تشکیل دهنده‌ی ناهمگنی لحاظ شده است. فرکانس غالب (f_p) و پیشینه دامنه‌ی موج SH (a_{max}) نیز به ترتیب مقادیر 3 هرتز و 0.001 متر در نظر گرفته شده است. تعداد المان‌های مفروض جهت مش بندی هر یک از ناهمگنی‌ها برابر با 94 المان می‌باشد. همچنین میزان تعویق زمان برابر با $1/5$ ثانیه و تعداد گام‌های زمانی بر 500 گام با بازه‌ی زمانی 0.012 ثانیه تنظیم شده است.

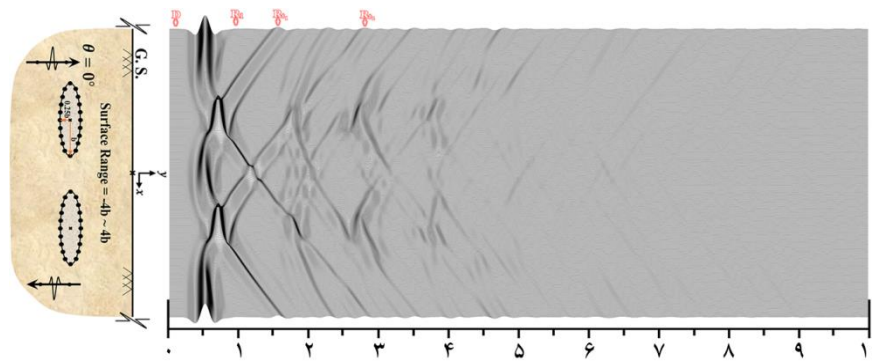
۶- تحلیل پاسخ در حوزوی زمان

با استفاده از نتایج حوزوی زمان، الگوی پراکنش امواج لرزه‌ای در اثر برخورد به ناهمگنی دوقلوی زیرزمینی برای حالات مختلف قابل مشاهده است. بدین منظور، شکل‌های (۴) تا (۹) برای نمایش تفاوت در نحوه‌ی تفرق امواج برای نسبت شکل‌ها و زوایای متفاوت تابش امواج لرزه‌ای ارائه شده است. هنگامی که امواج مهاجم لرزه‌ای با زوایای تابش دلخواه به ناهمگنی‌های زیرسطحی برخورد می‌نمایند، بخشی از امواج به صورت مستقیم در محل برخورد به مرز ناهمگنی‌ها دچار انعکاس می‌شوند. بخشی از امواج بر روی مرز ناهمگنی‌ها خزش یافته و پس از انحراف از مسیر اولیه به سطح زمین برخورد می‌نمایند و بخش سوم و مهم‌ترین بخش، امواجی هستند که وارد مصالح تشکیل دهنده‌ی ناهمگنی شده و به موجب به دام افتادگی و تکرار انعکاس، منجر به بزرگنمایی سطح می‌شوند. امواج یاد شده پس از رسیدن به سطح زمین و بازتاب، دوباره در میان مرز دو ناهمگنی و سطح به دام افتاده و تکرار انعکاس دیگری را رقم می‌زنند. بدین ترتیب جهت تفسیر ملموس نتایج، ایستگاه‌هایی با علائم اختصاری R برای امواج انعکاس یافته^{۲۰}، C برای امواج خزش یافته^{۲۱} و Rt برای انعکاس امواج محصور شده^{۲۲} در درون ناهمگنی‌ها در نظر گرفته شده است. زیرنویس‌های ۱ و ۲ به ترتیب بیانگر امواج مرتبط به هر یک از ناهمگنی‌های اول و دوم می‌باشد.

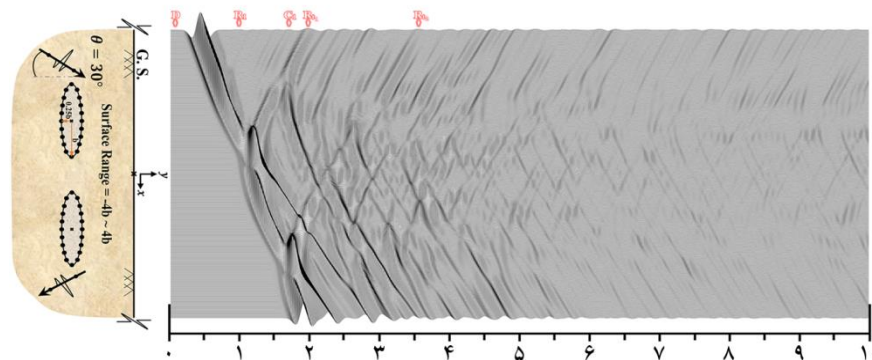
در شکل (۴) پاسخ تاریخچه‌ی زمانی در حضور ناهمگنی دوقلوی بیضوی با نسبت شکل ۰/۲۵ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، هنگام اعمال امواج لرزه‌ای به صورت قائم (شکل ۴-الف) متعاقباً پاسخ حاصل نیز به صورت متقارن بوده و با مورب شدن جبهه‌ی موج، این تقارن از بین می‌رود. در نسبت شکل ۰/۲۵، محیط احاطه شده توسط ناهمگنی‌ها کوچک و باریک بوده، لذا در تابش امواج به صورت قائم، انعکاس مستقیماً از مرز زیرین ناهمگنی‌ها صورت گرفته و بخش اندکی از امواج، از لبه‌های جانبی ناهمگنی منعکس شده و به سطح زمین رسیده‌اند. علاوه بر این، به دلیل شکل منحصر به فرد مقطع ناهمگنی‌های مذکور، اثری از امواج خزشی

مشاهده نمی‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده برای مدل یاد شده می‌توان ملاحظه نمود، بیشترین انعکاس ایجاد شده ناشی از امواج به دام افتاده در درون ناهمگنی‌ها (Rt) بوده است. با توجه به اینکه مصالح تشکیل دهنده‌ی ناهمگنی‌ها مطابق با نسبت امپدانس (I) فوق‌الذکر (۰/۳۳۳)، ۶۶/۷ درصد نرم‌تر از مصالح محیط پیرامون می‌باشد، عملکرد مرز ناهمگنی‌ها همانند آینه بوده و منجر به محصورشدگی امواج وارد شده به درون آنها می‌گردد. لذا، هر چه محیط ناهمگنی کوچک‌تر و محدودتر باشد، تکرار انعکاس امواج محصور شده افزایش یافته و مدت زمان تعویق در انعکاس کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر، حجم کمتری از امواج وارد محیط ناهمگنی شده و نتایج با سرعت بیشتر همگرا می‌شوند. با مورب شدن جبهه‌ی موج به حالت ۳۰ درجه (شکل ۴-ب)، همچنان دامنه‌ی امواج محصور شده‌ی انعکاس یافته سهم بیشتری نسبت به سایر امواج دارد و اثر اندکی نیز از امواج خزشی مشاهده می‌شود. با افزایش زاویه‌ی جبهه‌ی موج به ۶۰ درجه (شکل ۴-پ)، بخش بیشتری از امواج مهاجم بر روی مرز ناهمگنی‌ها خزش یافته و در پاسخ حاصل، اثر امواج خزشی به صورت قوی‌تری نمایان می‌گردد. با اعمال امواج به صورت افقی (شکل ۴-ت)، با توجه به باریک بودن ناحیه‌ی احاطه شده توسط ناهمگنی‌ها، تداخل کمتری در مسیر امواج ایجاد شده و عملکرد شکافنده‌ی ناهمگنی‌ها در مقابل امواج گذرا موجب می‌شود تا اثر امواج انعکاس یافته پس از اولین برخورد، آشکارتر از اثر سایر فازهای امواج باشد.

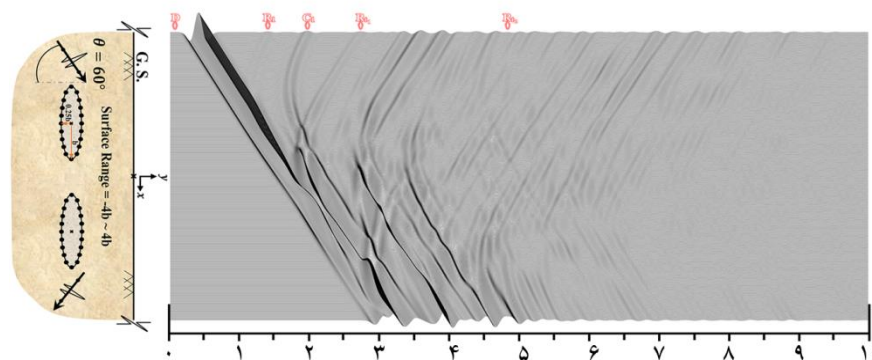
هنگامی که نسبت شکل ناهمگنی‌ها برابر با ۰/۷۵ می‌باشد (شکل ۵)، میزان لرزش‌های به وجود آمده در پاسخ به مراتب بیشتر از ناهمگنی با نسبت شکل ۰/۲۵ (شکل ۴) ثبت شده است. در این حالت، با توجه به بزرگ‌تر بودن فضای پوشش یافته توسط ناهمگنی، حجم بیشتری از امواج در درون آن به دام افتاده و در نتیجه، انعکاس امواج با دامنه‌ی به مراتب قوی‌تر و با وقفه‌ی زمانی بیشتر به چشم می‌خورد. متعاقباً، مدت زمان بیشتری نیز جهت خروج امواج از درون محیط ناهمگنی‌ها و رسیدن به همگرایی مناسب لازم خواهد بود.



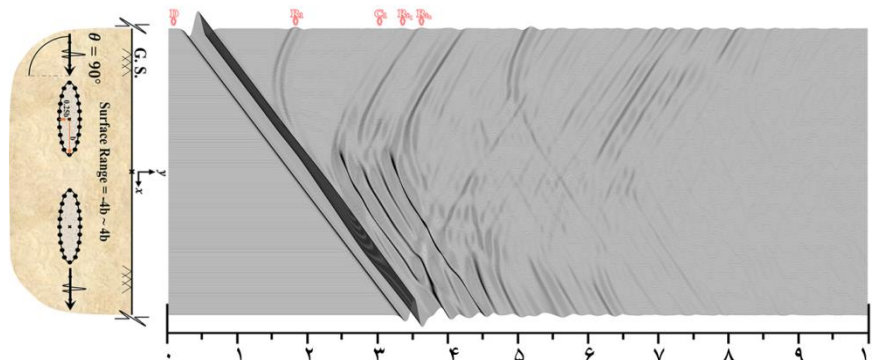
(الف)



(ب)



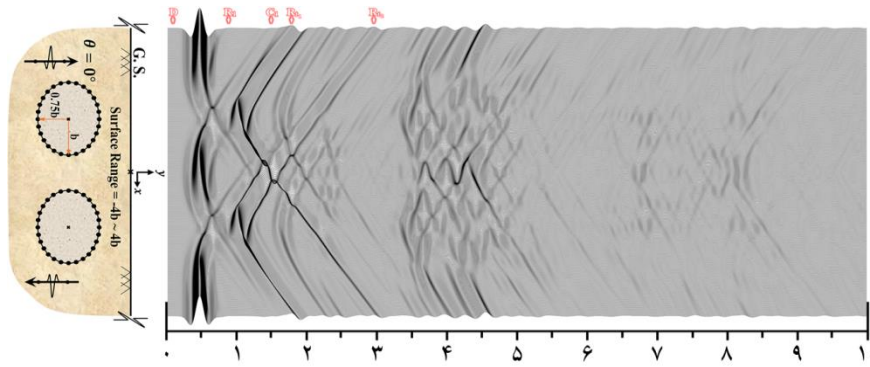
(پ)



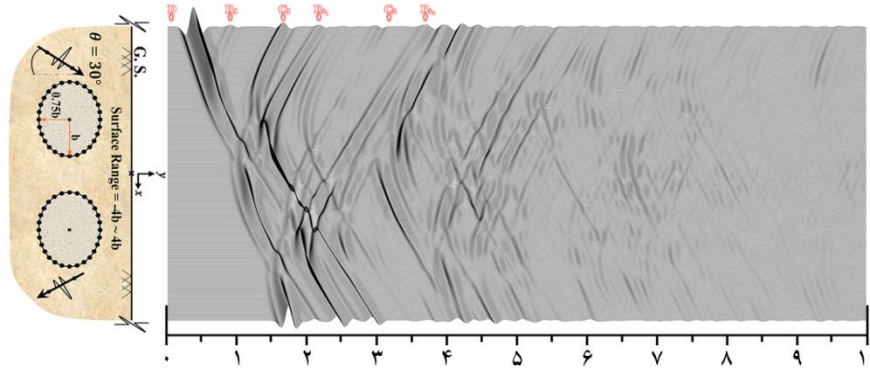
زمان (ثانیه)

(ت)

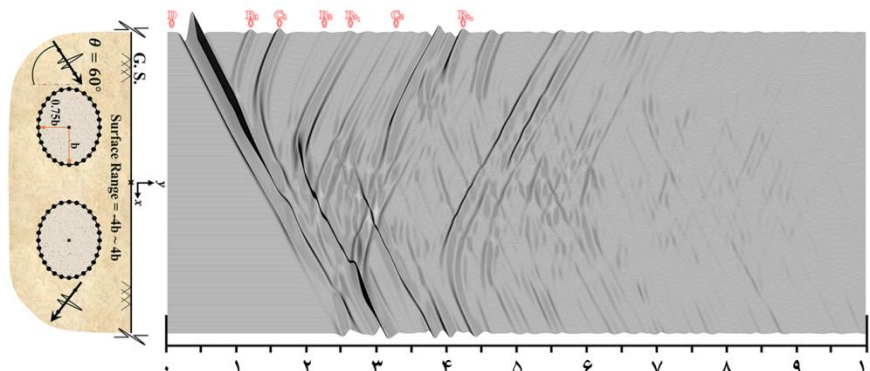
شکل (۴): الگوی کلی پاسخ تاریخیچه‌ی زمانی سطح زمین در حضور ناهمگنی دوقلوی بیضوی با نسبت شکل ۰/۲۵ در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی تابش (الف) صفر درجه، (ب) ۳۰ درجه، (پ) ۶۰ درجه و (ت) ۹۰ درجه.



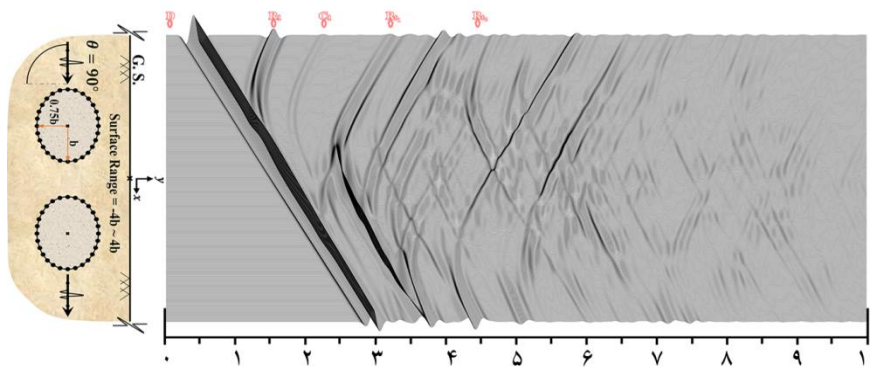
(الف)



(ب)



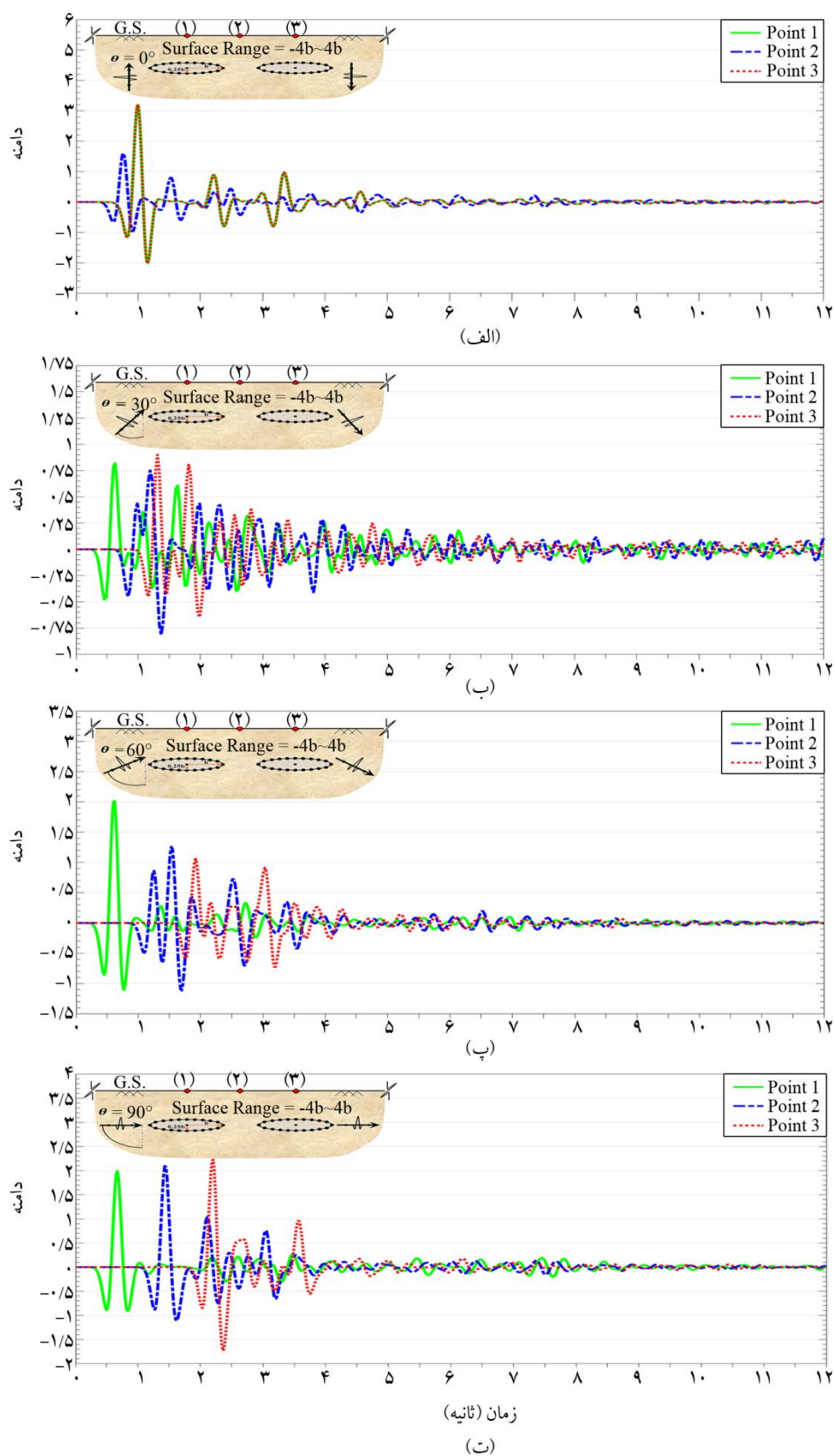
(پ)



زمان (ثانیه)

(ت)

شکل (۵): الگوی کلی پاسخ تاریخیچه‌ی زمانی سطح زمین در حضور ناهمگنی دوقلوی بیضوی با نسبت شکل ۰/۷۵ در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی تابش (الف) صفر درجه، (ب) ۳۰ درجه، (پ) ۶۰ درجه و (ت) ۹۰ درجه.



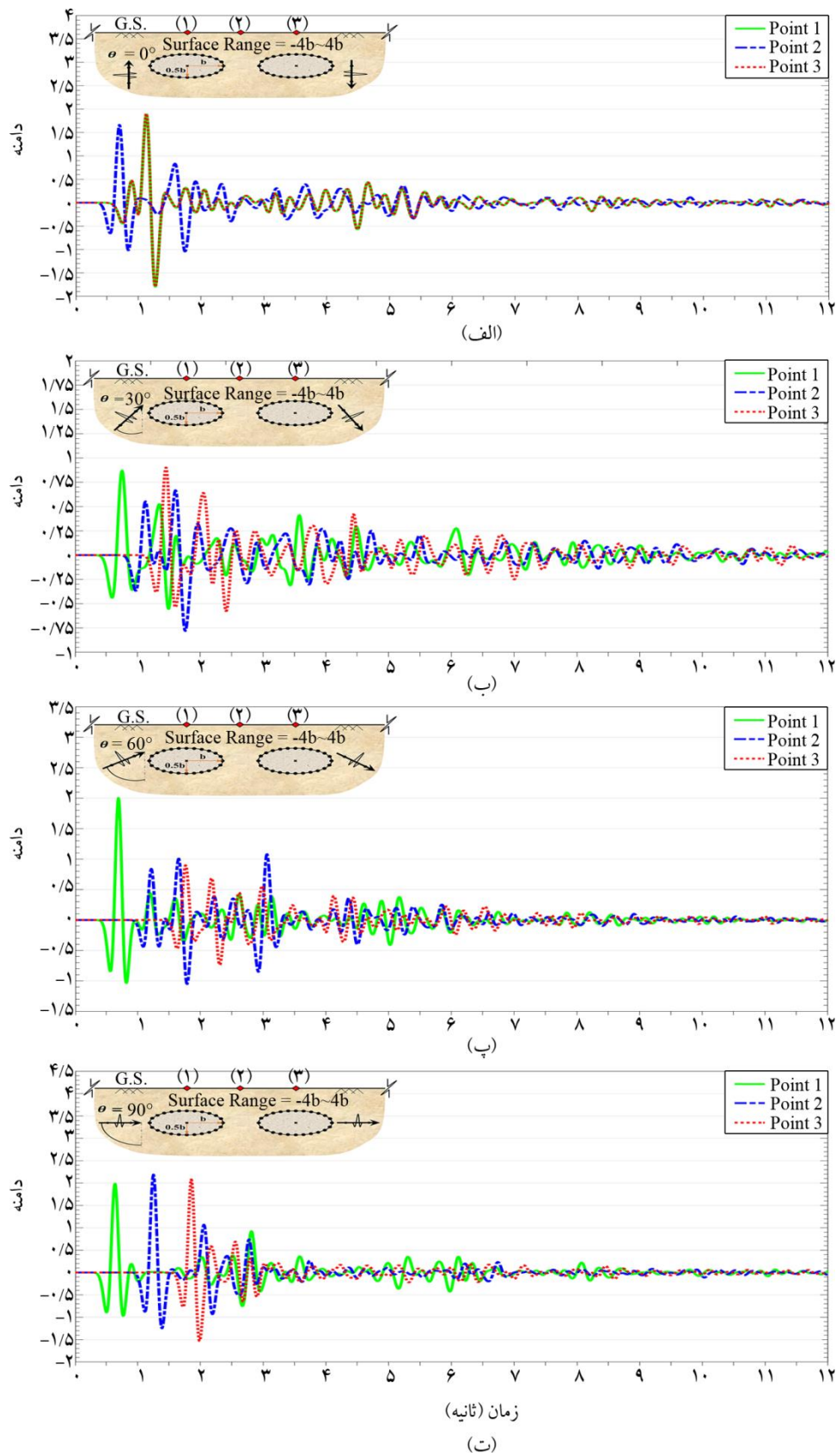
شکل (۶): دامنه‌ی امواج پراکنش‌یافته در حضور ناهمگنی دوقلوی بیضوی با نسبت شکل ۰/۲۵ در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی تابش (الف) صفر درجه، (ب) ۳۰ درجه، (پ) ۶۰ درجه و (ت) ۹۰ درجه.

با بررسی دامنه‌ی ثبت شده برای نقاط مرجع (۱) و (۳) در نسبت شکل ۰/۲۵ و زاویه‌ی تابش قائم امواج (شکل ۶-الف) می‌توان دریافت، بیشترین میزان دامنه در این مدل برابر با مقدار ۳/۱ حاصل شده است. این در حالی است که دامنه‌ی نقاط مذکور در سایر مدل‌ها به مقادیر کمتر از ۲ کاهش یافته است. عامل ایجاد چنین نتیجه‌ای در وهله‌ی اول، کوچک و محدود بودن ناحیه‌ی دربرگرفته شده توسط ناهمگنی می‌باشد. در این حالت، حجم اندکی از امواج گذرا وارد محیط ناهمگنی می‌شود، اما تکرار انعکاس امواج مذکور در درون ناهمگنی موجب تقویت امواج محصور شده می‌گردد. همچنین امواج به دام افتاده در فضای میان مرز فوقانی ناهمگنی و سطح زمین نیز عامل دیگری است که می‌تواند به تقویت بیشتر دامنه‌ی امواج کمک نماید.

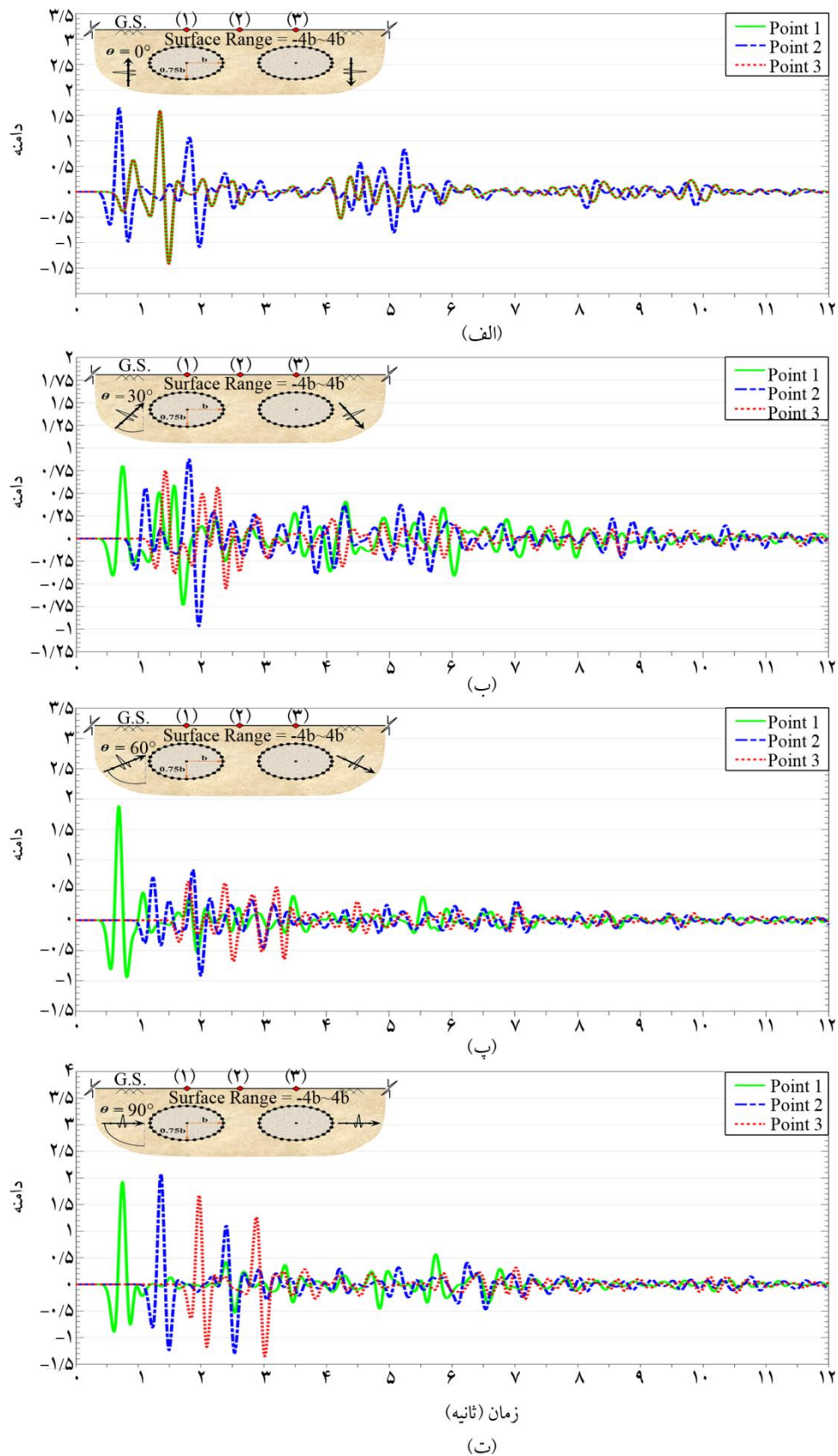
با زاویه‌دار شدن جبهه‌ی موج به ۳۰ درجه، علاوه بر متفاوت شدن نتایج در نقاط مختلف، دامنه‌های ثبت شده نیز نسبت به زاویه‌ی تابش قائم امواج کاهش قابل توجهی داشته است. در زاویه‌ی تابش ۳۰ درجه، تنها زمانی که ناهمگنی به صورت دایره‌ای کامل در نظر گرفته شده است (شکل ۹)، میزان دامنه‌ی به دست آمده از مرز ۱ عبور نموده است که آن هم مربوط به نقطه مرجع (۲) می‌باشد. در چنین شرایطی می‌توان دریافت، حضور ناهمگنی در برابر جبهه‌ی موج، بیشتر اثر مسدود کنندگی داشته و ضمن کاهش دامنه‌ی امواج، منجر به تقویت پدیده ناحیه سایه در سوی مخالف جبهه‌ی موج شده است. اما با افزایش زاویه تابش موج به ۶۰ درجه، دامنه ثبت شده برای نقطه مرجع (۱) افزایش زیادی نسبت به زاویه تابش ۳۰ درجه داشته است و در تمام نسبت شکل‌ها به حدود ۲ رسیده است. زمانی که زاویه تابش امواج لرزه‌ای ۶۰ درجه می‌باشد حالت دوار ناهمگنی، امواج ورودی را به گونه‌ای هدایت نموده است که خزش قابل ملاحظه در امواج برخوردی صورت گرفته و سپس به سطح زمین برخورد نموده‌اند. این اثر به ویژه در موقعیت ناهمگنی اول که مستقیماً در مقابل جبهه‌ی موج قرار دارد ملموس تر می‌باشد.

از سوی دیگر، بزرگ تر شدن مقطع ناهمگنی منجر به کوچک تر شدن فضای میان مرز فوقانی آن و سطح زمین می‌گردد. بدین ترتیب، امواج به دام افتاده در این ناحیه تکرار انعکاس بیشتر را تجربه خواهند نمود که این پدیده نیز یکی دیگر از عوامل افزایش مدت زمان رسیدن به همگرایی در مدل با نسبت شکل بزرگ تر می‌باشد. از مقایسه‌ی زاویه تابش قائم برای نسبت شکل‌های ۰/۲۵ و ۰/۷۵ (شکل‌های ۴-الف و ۵-الف) می‌توان دریافت که در نسبت شکل ۰/۷۵ امواج انعکاسی و به ویژه خزشی به صورت مؤثرتر وارد عمل شده‌اند. هرچه مقطع ناهمگنی دوارتر شده است، خزیدن امواج بر روی مرز آن نیز با سهولت بیشتر صورت گرفته و دامنه‌ی قوی تر از امواج خزشی بر روی سطح زمین ایجاد می‌شود. این پدیده برای زوایای برخورد ۳۰ و ۶۰ درجه در نسبت شکل ۰/۷۵ (شکل ۵-ب و پ) به صورت آشکارتر قابل رؤیت است. همچنین، در زاویه‌ی تابش افقی (شکل ۵-ت) نیز دامنه‌ی بیشتری از امواج در محل اولین برخورد دچار انعکاس شده و به سطح زمین برخورد نموده است. بدین ترتیب، با دوارتر شدن مقطع ناهمگنی، عملکرد مسدود کنندگی آن در مسیر انتشار امواج افزایش یافته و متعاقباً حجم امواج پراکنش یافته بیشتر می‌شود که در نهایت، منجر به تقویت پدیده‌ی ناحیه سایه^[۷۳] در سوی مخالف جبهه‌ی موج شده است.

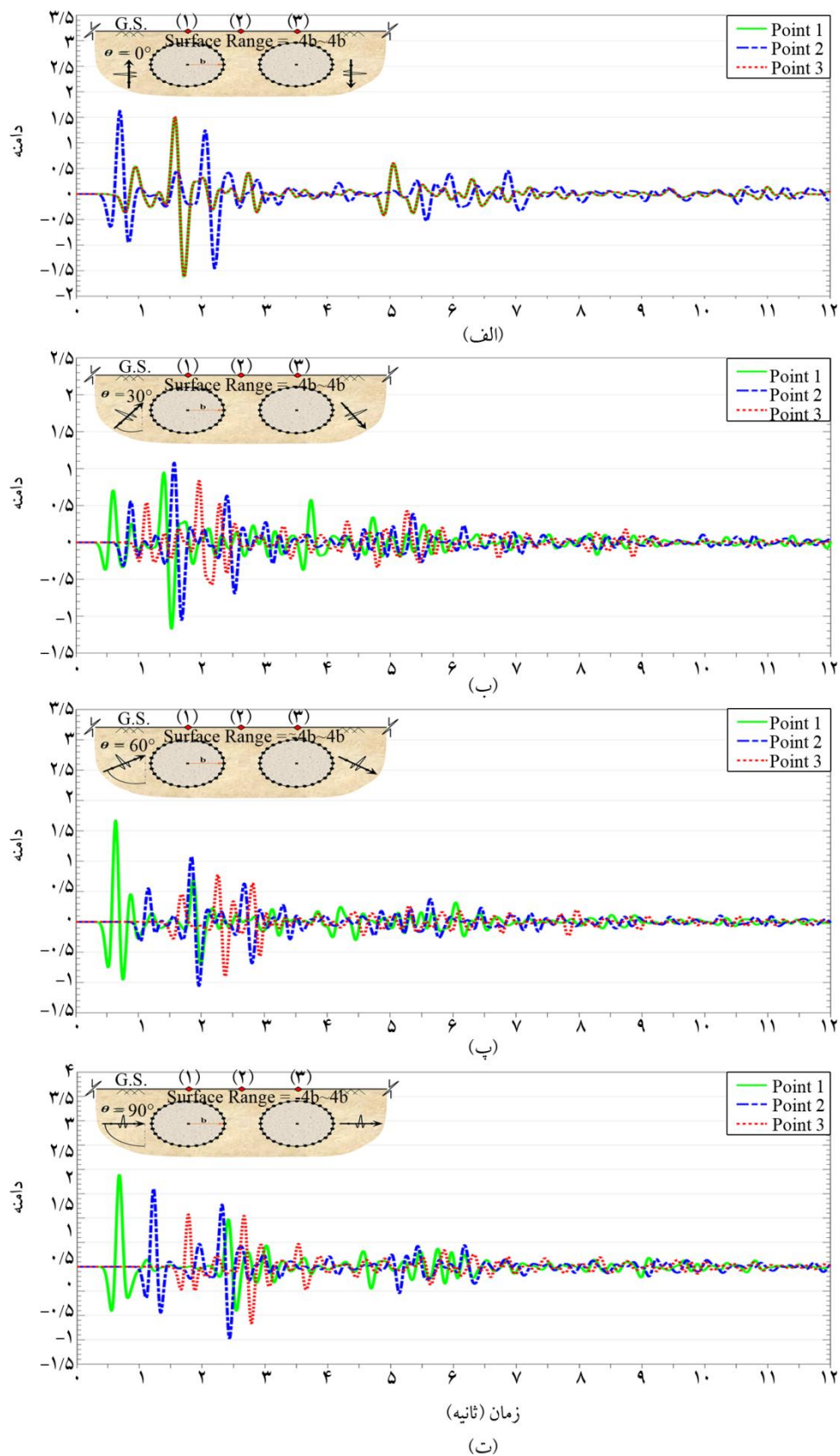
در شکل‌های (۶) تا (۹) دامنه‌ی امواج پراکنش یافته در حضور ناهمگنی دوقلوی زیرسطحی نشان داده شده است. بدین منظور، سه نقطه‌ی مرجع در سطح زمین لحاظ شده است تا امکان مقایسه‌ی میزان دامنه‌ی ایجاد شده در نقاط مختلف برای نسبت شکل‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ و در زوایای تابش امواج ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه فراهم شود. لازم به ذکر است، موقعیت در نظرگیری نقاط مرجع (۱) و (۳) دقیقاً منطبق بر مرکز ناهمگنی‌ها بوده و نقطه‌ی (۲) در مرکز (۰ و ۰) و در فاصله‌ی برابر با نقاط مذکور واقع شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۶) تا (۹) ملاحظه می‌شود، با اعمال امواج لرزه‌ای به صورت قائم، نمودارهای مربوط به نقاط (۱) و (۳) بر یکدیگر منطبق شده‌اند.



شکل (۷): دامنه‌ی امواج پراکنش‌یافته در حضور ناهمگنی دوقلوی بیضوی با نسبت شکل ۰/۵ در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی تابش (الف) صفر درجه، (ب) ۳۰ درجه، (پ) ۶۰ درجه و (ت) ۹۰ درجه.



شکل (۸): دامنه‌ی امواج پراکنش‌یافته در حضور ناهمگنی دوقلوی بیضوی با نسبت شکل 0.75 در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی تابش (الف) صفر درجه، (ب) 30° درجه، (پ) 60° درجه و (ت) 90° درجه.



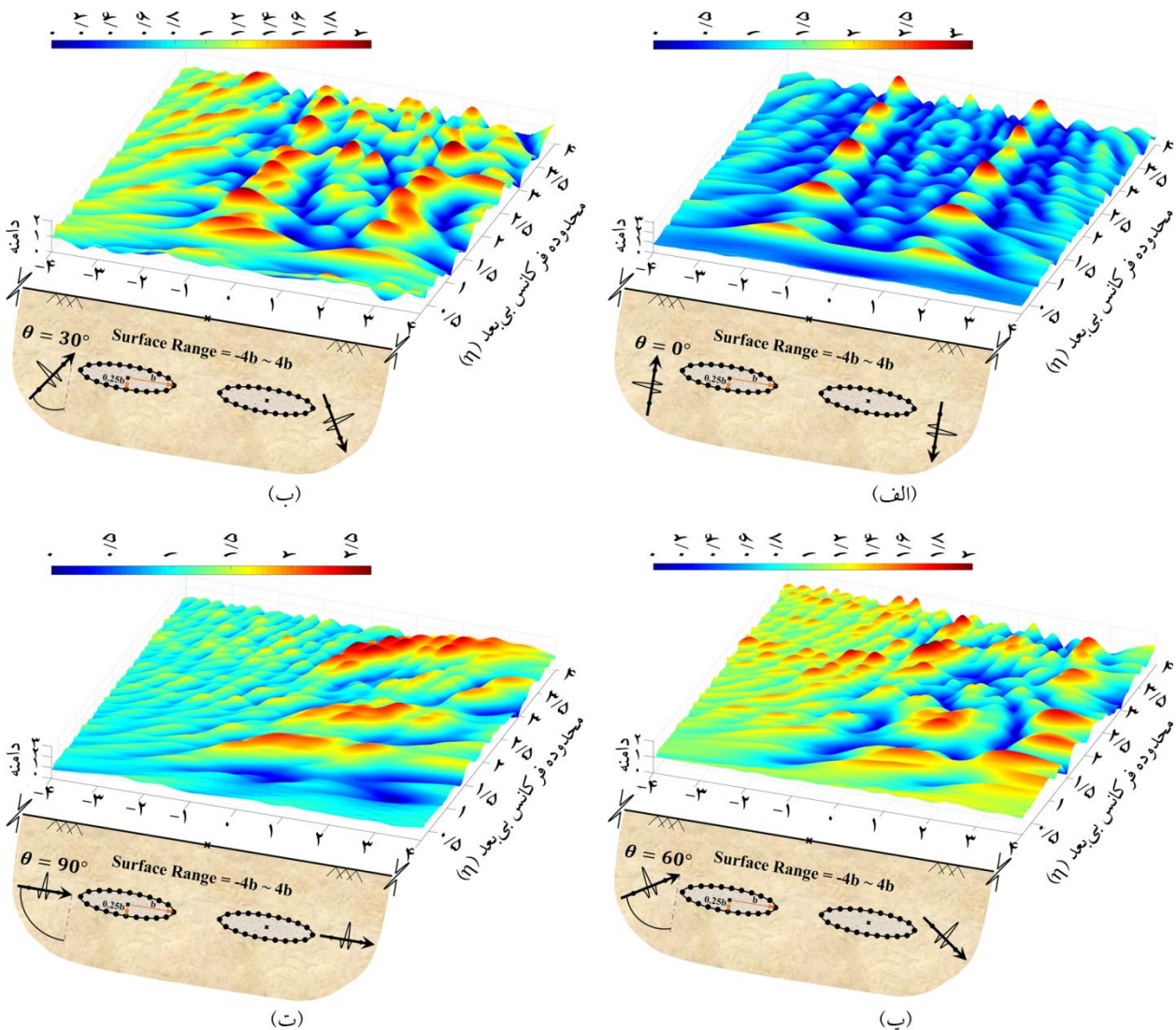
شکل (۹): دامنه‌ی امواج پراکنش یافته در حضور ناهمگنی دوقلوی بیضوی با نسبت شکل ۱ در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی تابش (الف) صفر درجه، (ب) ۳۰ درجه، (پ) ۶۰ درجه و (ت) ۹۰ درجه.

سهولت بیشتر از محل استقرار آن عبور می‌نماید. درحالی‌که با افزایش نسبت شکل تا رسیدن به حالت دایره‌ای کامل (نسبت شکل ۱)، عملکرد سد کنندگی ناهمگنی افزایش یافته و موجب پراکنش حجم قابل توجه امواج و هدایت آن به سوی سطح زمین می‌شود.

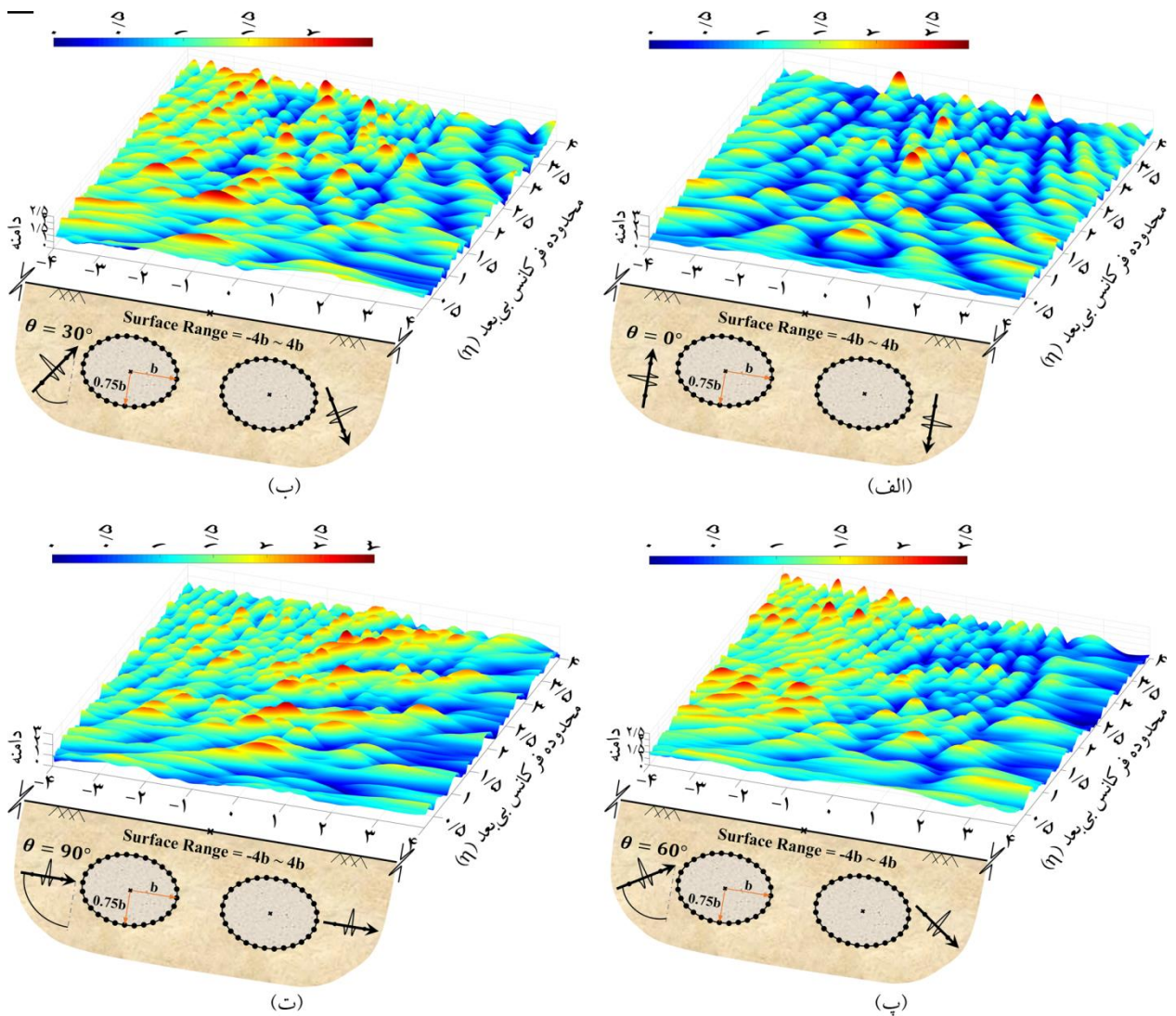
۷- تحلیل پاسخ در حوزه فرکانس

با استفاده از نتایج حوزه‌ی فرکانس می‌توان بزرگنمایی ایجاد شده در نواحی مختلف سطح زمین را برای حالات مختلف مشاهده نمود. در این پژوهش، پاسخ حوزه فرکانس برای محدوده فرکانس بی‌بعد (۱۰) تا ۰/۲۵ (۱۱) نشان داده شده است.

با بررسی نتایج کسب شده برای تابش افقی امواج مشاهده می‌شود، در نسبت شکل ۰/۲۵ (شکل ۶-ت)، بیشترین میزان دامنه‌ی ثبت شده برای نقطه مرجع (۳) و در حدود ۲/۲۵ بوده است. درحالی‌که در نسبت شکل‌های ۰/۵ (شکل ۷-ت) و ۰/۷۵ (شکل ۸-ت)، بیشترین میزان دامنه مربوط به نقطه‌ی مرجع میانی و مقدار آن در حدود ۲ بوده است. در نسبت شکل ۱ (شکل ۹-ت) نیز بیشترین دامنه در نقطه‌ی مرجع (۱) و با مقدار ۱/۸ حاصل شده است. این نتیجه بیان می‌دارد، هنگامی که نسبت شکل ناهمگنی در کمترین مقدار (نسبت شکل ۰/۲۵) قرار دارد، عملکرد مسدود کنندگی ناهمگنی در برابر امواج به کمترین میزان رسیده و امواج با



شکل (۱۰): الگوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور ناهمگنی دوقلوی بیضوی با نسبت شکل ۰/۲۵ در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی تابش (الف) صفر درجه، (ب) ۳۰ درجه، (پ) ۶۰ درجه و (ت) ۹۰ درجه.



شکل (۱۱): الگوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور ناهمگنی دوقلوی بیضوی با نسبت شکل ۰/۲۵ در برابر هجوم امواج SH با زاویه تابش (الف) صفر درجه، (ب) ۳۰ درجه، (پ) ۶۰ درجه و (ت) ۹۰ درجه.

مقادیر بزرگنمایی ایجاد شده در نسبت شکل های ۰/۲۵ و ۰/۷۵ می توان دریافت بیشینه بزرگنمایی برای زاویه تابش صفر درجه، در نسبت شکل ۰/۲۵ (شکل ۱۰- الف) به میزان ۳/۳ برابر پاسخ میدان آزاد بوده است. از سوی دیگر، با مقایسه نتایج به دست آمده برای زوایای تابش ۳۰ و ۶۰ درجه در نسبت شکل های مختلف می توان دریافت برخلاف حالت صفر درجه، هرچه نسبت شکل ناهمگنی کوچک تر شده است، میزان بزرگنمایی های بیشینه نیز کاهش یافته است. بر اساس نتایج به دست آمده، مقادیر بیشینه بزرگنمایی برای نسبت شکل ۰/۲۵ و زوایای تابش ۳۰ و ۶۰ درجه (شکل ۱۰- ب و پ) در حدود ۲

با توجه به اینکه مصالح تشکیل دهنده ناهمگنی دوقلو نرم تر از محیط پیرامون فرض شده است، لذا به هنگام اعمال امواج لرزه ای و ورود آن به درون مصالح ناهمگنی، مرز پیرامون آن مشابه آینه عمل نموده و مانع از خروج آسان امواج می گردد. از طرف دیگر، هنگامی که نسبت شکل ناهمگنی در کوچک ترین حالت (نسبت شکل ۰/۲۵) قرار دارد، حجم کمتری از امواج در درون ناهمگنی ها محصور شده، اما تکرار انعکاس بیشتر در امواج ایجاد می شود. هرچه محیط ناهمگنی تنگ تر و کوچک تر باشد، وقفه زمانی میان انعکاس ها نیز کاهش یافته و در نهایت، بزرگنمایی بیشتر در امواج به وجود می آید. با مقایسه بیشینه

مدل‌سازی و انجام تحلیل‌های عددی بهره گرفته شد. پس از توسعه‌ی فرمول‌بندی برای مسئله‌ی ناهمگنی دوقلوی بیضوی و عددی‌سازی آن در قالب الگوریتم داس‌بم، به ارائه‌ی مثال صحت‌سنجی جهت ارزیابی دقت و کیفیت الگوریتم مورد استفاده پرداخته شد. چنانچه مشاهده شد، روش پیشنهاد شده قابلیت فنی و کیفی لازم جهت تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی زیرسطحی پیچیده را دارا می‌باشد. سپس، در قالب یک مطالعه عددی در حوزی زمان و فرکانس و با در نظر گرفتن پارامترهای نسبت شکل ناهمگنی و زاویه تابش امواج مهاجم، بزرگنمایی سطح زمین حساسیت‌سنجی شد. نتایج حاصل به صورت زیر قابل جمع‌بندی می‌باشد:

۱. در نسبت شکل حداقل ($SR = 0/25$)، حداکثر انعکاس درونی امواج در ناهمگنی (R_i) با توجه به شکل منحصربه‌فرد ناهمگنی مشاهده شد.

۲. با علم بر اینکه در مطالعه حاضر، ناهمگنی در مقایسه با محیط پیرامون نرم فرض شده است (نسبت امپدانس $0/33$)، محصور شدگی بیشینه‌ی امواج و متعاقباً حداکثر بزرگنمایی در سطح زمین حاصل شد.

۳. افزایش نسبت شکل ناهمگنی، با افزایش تفرق امواج در سطح زمین و تأخیر در زمان همگرایی پاسخ کاملاً همسو بود.

۴. با دوار شدن مقطع ناهمگنی دوقلو که در اثر افزایش نسبت شکل ایجاد شده، سهولت در خزش امواج مهاجم از سطح ناهمگنی و تقویت فاز خزشی پاسخ در سطح زمین به چشم خورد.

۵. در هجوم امواج مهاجم به صورت مایل، بیشترین اختلال در انتشار و پراکنش امواج، در نسبت شکل کمینه حاصل شد.

۶. بزرگنمایی بیشینه‌ی پاسخ در سطح زمین به میزان $3/3$ در هجوم امواج قائم و در نسبت شکل حداقل به دست آمد.

مراجع

1. Aki, K. (1988) Local site effects and strong ground motion. In: *Proceedings of the Special Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics 2*. ASCE, Park City, UT.
2. Davis, L.L. and West, L.R. (1973) Observed effects

برابر سطح زمین آزاد بوده است. این در حالی است که برای نسبت شکل $0/75$ (شکل ۱۱-ب و پ) این مقدار به حدود $2/5$ برابر رسیده است. لذا می‌توان بیان نمود، اگرچه محیط کوچک‌تر ناهمگنی (نسبت شکل $0/25$) توانسته است منجر به افزایش تکرر انعکاس امواج لرزه‌ای محصور گردد، اما هنگامی که امواج به صورت مورب به مدل مذکور اعمال می‌شوند، در نسبت شکل‌های کوچک‌تر عملکرد مختل‌کنندگی بیشتر در برابر انتشار امواج به وجود می‌آید.

با ملاحظه پاسخ حاصل برای زاویه تابش افقی در نسبت شکل $0/25$ (شکل ۱۰-ت) می‌توان دریافت، مقادیر بیشینه بزرگ‌تر از مقادیر به دست آمده برای زوایای تابش 30 و 60 درجه برای مدل مذکور و در حدود $2/7$ برابر پاسخ میدان آزاد بوده است. ولی همچنان مقدار بزرگنمایی در زاویه تابش افقی (مقدار $2/7$) کمتر از بزرگنمایی به وجود آمده در زاویه تابش قائم (مقدار $3/3$) می‌باشد. در زاویه تابش افقی (شکل ۱۰-ت)، اگرچه عملکرد شکافندگی ناهمگنی با نسبت شکل $0/25$ قابل توجه بوده است و منجر به پراکنش امواج و برخورد آن به سطح زمین شده است، ولی اثر ضعیف‌تری در مقایسه با تکرر انعکاس امواج محصور در ناهمگنی داشته است. همان‌گونه که نتایج بیان می‌دارد، انتظار می‌رود باریک بودن مقطع ناهمگنی (نسبت شکل $0/25$) تأثیر به مراتب کمتری در مسیر موج افقی و تفرق آن ایفا نماید. این قضیه را به‌ویژه می‌توان با مقایسه پاسخ مزبور با نتیجه‌ی به دست آمده برای نسبت شکل $0/75$ در زاویه‌ی تابش افقی (شکل ۱۱-ت) به‌خوبی مشاهده نمود. لذا می‌توان اظهار داشت، با دوارتر شدن ناهمگنی‌ها علاوه بر اینکه موانع بزرگ‌تر در مسیر انتشار امواج ایجاد می‌شود، حجم امواج انعکاسی نیز افزایش یافته که این امواج در نهایت به سطح زمین برخورد نموده و بزرگنمایی به مراتب شدیدتر به وجود می‌آورند.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به تحلیل لرزه‌ای سطح زمین در حضور ناهمگنی دوقلوی زیرزمینی در برابر امواج مهاجم لرزه‌ای SH پرداخته شد. بدین منظور از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزی زمان جهت

- structures. *J. Phys. Earth.*, **40**(1), 27-56.
16. Zhang, J. and Katsube, N. (1995). A hybrid finite element method for heterogeneous materials with randomly dispersed elastic inclusions. *FE Analy. Desig.*, **19**, 45-55.
 17. Nakasone, Y., Nishiyama, H., and Nojiri, T. (2000) Numerical equivalent inclusion method: a new computational method for analyzing stress fields in and around inclusions of various shapes. *Mat. Sci. Eng.*, **285**(1-2), 229-238.
 18. Boore, D.M. (1972) A note on the effect of simple topography on seismic *SH*-waves. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **62**, 275-284.
 19. Ohtsuki, A. and Harumi, K. (1983) Effects of topography and subsurface inhomogeneities on seismic *SV*-waves. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **11**, 441-462.
 20. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., and Gatmiri, B. (2006) Time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid FE/BE method. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **26**(8), 753-765.
 21. Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A., and Khalaj, A. (2007) Amplification pattern of 2D semi-sine shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves. *Commun Numer. Meth. Eng.*, **23**(10), 871-887.
 22. Dominguez, J. and Meise, T. (1991) On the use of the BEM for wave propagation in infinite domains. *Eng. Analy. BE.*, **8**(3), 132-138.
 23. Ahmad, S. and Banerjee, P.K. (1988) Multi-domain BEM for two-dimensional problems of elastodynamics. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, **26**(4), 891-911.
 24. Panji, M. (2013) *Seismic Analysis of Topographic Features Subjected to SH-Waves by a Half-Plane Time-Domain BEM* [Dissertation]. Islamic Azad Uni, Sci Res Branch, Tehran, Iran.
 25. Panji, M., Koohsari, H., Adampira, M., Alielahi, H., and Asgari-Marnani, J. (2016a) Stability analysis of shallow tunnels subjected to eccentric loads by a boundary element method. *J. Rock Mech. and Geotech. Eng.*, **8**(4), 480-488.
 - of topography on ground motion. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **63**(1), 283-298.
 3. Sánchez-Sesma, F.J., Palencia, V.J., and Luzón, F. (2002) Estimation of local site effects during earthquakes: An overview. *ISET J. Earthq. Tech.*, **39**(3), 167-193.
 4. Simons, D.A. (1979) Scattering of *SH*-waves by thin, semi-infinite inclusions. *Int. J. Sol. Struct.*, **16**, 177-192.
 5. Kikuchi, M. (1981a) Dispersion and attenuation of elastic waves due to multiple scattering from inclusions, *Phys. Earth Planet Inter.*, **25**, 159-162.
 6. Kikuchi, M. (1981b) Dispersion and attenuation of elastic waves due to multiple scattering from cracks, *Phys. Earth Planet Inter.*, **27**, 100-105.
 7. Coussy, O. (1984) Scattering of elastic waves by an inclusion with an interface crack. *Wave Motion*, **6**, 223-236.
 8. Wang, Y.S. and Wang, D. (1996) Scattering of elastic waves by a rigid cylindrical inclusion partially deboned from its surrounding matrix-I. *SH* case. *Int. J. Sol. Struct.*, **33**(19), 2789-2815.
 9. Zhao, J.X. and Qi, H. (2009) Scattering of plane *SH*-wave from a partially deboned shallow cylindrical elastic inclusion. *J. Mech.*, **25**(4), 411-419.
 10. Conoir, J.M. and Norris, A.N. (2010) Effective wavenumbers and reflection coefficients for an elastic medium containing random configurations of cylindrical scatterers. *Wave Motion*, **47**, 183-197.
 11. Manoogian, M.E. and Lee, V.W. (1996). Diffraction of *SH*-waves by subsurface inclusion of arbitrary shape. *J. Eng. Mech.*, **122**(2), 123-129.
 12. Lysmer, J. and Drake, L.A. (1972) A finite element method for seismology. *Meth. Comp. Phys.*, Ed Bolt BA, Academic Press, New York, **11**, 181-216.
 13. Smith, W.D. (1975) The application of finite element analysis to body wave propagation problems. *Geophys. J. Royal Astronom. Soc.*, **42**(2), 747-768.
 14. Day, S.M. (1977) *Finite Element Analysis of Seismic Scattering Problems* [Dissertation]. University of California, San Diego.
 15. Kawase, H. and Sato, T. (1992) Simulation analysis of strong motions in the Ashigara valley considering one- and two-dimensional geological

37. Yao, Z., Kong, F., Wang, H., and Wang, P. (2004) 2D Simulation of composite materials using BEM. *Eng. Analy. BE.*, **28**, 927-935.
38. Rus, G. and Gallego, R. (2005) Boundary integral equation for inclusion and cavity shape sensitivity in harmonic elastodynamics. *Eng. Analy. BE.*, **29**, 77-91.
39. Mogilevskaya, S., Crouch, S., and Stolarski, H. (2008) Multiple interacting circular nano-inhomogeneities with surface/interface effects. *J. Mech. Phys. Solids*, **56**, 2298-2327.
40. Yu, C.W. and Dravinski, M. (2009) Scattering of plane harmonic *SH*-wave by a completely embedded corrugated scatterer. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, **78**, 196-214.
41. Yu, C.W. and Dravinski, M. (2010) Scattering of plane harmonic *P*, *SV* and *Rayleigh*-waves by a completely embedded corrugated elastic inclusion. *Wave Motion*, **47**, 156-167.
42. Dravinski, M. and Yu, M.C. (2011) Scattering of plane harmonic *SH*-waves by multiple inclusions. *Geophys. J. Int.*, **186**, 1331-1346.
43. Parvanova, S.L., Dineva, P.S., and Manolis, G.D. (2013) Dynamic behavior of a finite-sized elastic solid with multiple cavities and inclusions using BIEM. *Acta Mech.*, **224**, 597-618.
44. Dravinski, M. and Sheikhhassani, R. (2013) Scattering of a plane harmonic *SH*-wave by a rough multilayered inclusion of arbitrary shape. *Wave Motion*, **50**, 836-851.
45. Peters, F. and Barra, L.P. (2013) An inverse geometric problem: Position and shape identification of inclusions in a conductor domain. *Eng. Analy. BE.*, **37**, 1392-1400.
46. Sheikhhassani, R. and Dravinski, M. (2014) Scattering of a plane harmonic *SH*-wave by multiple layered inclusions. *Wave Motion*, **51**(3), 517-532.
47. Sheikhhassani, R. and Dravinski, M. (2016) Dynamic stress concentration for multiple multilayered inclusions embedded in an elastic half-space subjected to *SH*-waves. *Wave Motion*, **62**, 20-40.
48. Ba, Z. and Yin, X. (2016) Wave scattering of complex local site in a layered half-space by using
26. Panji, M., Asgari-Marnani, J., and Tavousi-Tafreshi, S. (2011) Evaluation of effective parameters on the underground tunnel stability using BEM. *J. Struct. Eng. and Geotech.*, **1**(2), 29-37.
27. Hadley, P.K. (1987) *Scattering of waves by inclusions in a nonhomogeneous elastic half-space solved by boundary element method* [Dissertation]. Princeton University, Princeton, United States.
28. Parvanova, S.L., Dineva, P.S., Manolis, G.D., and Kochev, P.N. (2014) Dynamic response of a solid with multiple inclusions under anti-plane strain conditions by the BEM. *Comp. and Struct.*, **139**, 65-83.
29. Parvanova, S.L., Manolis, G.D., and Dineva P.S. (2015a) Wave scattering by Nano-heterogeneities embedded in an elastic matrix via BEM. *Eng. Analy. with BE*. **56**, 57-69.
30. Parvanova, S.L., Vasilev, G.P., Dineva, P.S., and Manolis, G.D. (2015b) Dynamic analysis of nano-heterogeneities in a finite-sized solid by Boundary and Finite element methods. *Int. J. Sol. Struct.*, **80**, 1-18.
31. Panji, M., Ansari, B., and Asgari-Marnani, J. (2016b) Stress analysis of shallow tunnels in the multi-layered soils using half-plane BEM. *J. Transp. Infrast. Eng.*, **2**(1), 17-32 (in Persian).
32. Panji, M. and Ansari, B. (2017a) Modeling pressure pipe embedded in two-layer soil by a half-plane BEM. *Comp. and Geotech.*, **81**(C), 360-367.
33. Dong, C.Y., Lo, S.H., and Cheung, Y.K. (2004) Numerical solution for elastic half-plane inclusion problems by different integral equation approaches. *Eng. Analy. BE.*, **28**, 123-130.
34. Dravinski, M. (1983) Ground motion amplification due to elastic inclusion in a half-space. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **11**, 313-335.
35. Niwa, Y. and Hirose, S. (1986) Application of the boundary integral equation (BIE) method to transient response analysis of inclusions in half space. *Wave Motion*, **8**, 77-91.
36. Hadley, P.K., Askar, A., and Cakmak, A.S. (1989) Scattering of waves by inclusions in a nonhomogeneous elastic half space solved by boundary element methods. *Technical Report: NCEER-89-0027*.

- Civ. Envir. Res.*, **3**(2), 33-50 (in Persian).
60. Panji, M. and Mojtazadeh-Hasanlouei, S. (2018) Time-history responses on the surface by regularly distributed enormous embedded cavities: Incident *SH*-waves. *Earthq. Sci.*, **31**, 1-17.
 61. Panji, M. and Mojtazadeh-Hasanlouei, S. (2019) Seismic amplification pattern of the ground surface in presence of twin unlined circular tunnels subjected to *SH*-waves. *J. Transp. Infrast. Eng.*, 10.22075/jtie.2019.16056.1342 (in Persian).
 62. Panji, M., Mojtazadeh-Hasanlouei, S., and Yasemi, F. (2019) A half-plane time-domain BEM for *SH*-wave scattering by a subsurface inclusion. *Comp. Geosci.*, **134**, 10.1016/j.cageo.2019.104342.
 63. Panji, M. and Mojtazadeh-Hasanlouei, S. (2020) Transient response of irregular surface by periodically distributed semi-sine shaped valleys: Incident *SH*-waves. *J. Earthq. Tsu.*, 10.1142/S1793431120500050.
 64. MATLAB (2019) *The language of technical computing*. V. 9.7. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
 65. Ohtsu, M. and Uesugi, S. (1985) Analysis of *SH*-wave scattering in a half space and its applications to seismic responses of geological structures. *Eng. Analy.*, **2**(4), 198-204.
 66. Ricker, N. (1953) The form and laws of propagation of seismic wavelet. *Geophys.*, **18**(1), 10-40.
 67. Israil, A.S.M. and Banerjee, P.K. (1990a) Advanced development of time-domain BEM for two-dimensional scalar wave propagation. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, **29**(5), 1003-1020.
 68. Israil, A.S.M. and Banerjee, P.K. (1990b) Advanced time-domain formulation of BEM for two-dimensional transient elastodynamics, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, **29**(7), 1421-1440.
 69. Brebbia, C.A. and Dominguez, J. (1989) *Boundary Elements, an Introductory Course*. Comp Mech Pub. Southampton: Boston.
 70. Dominguez, J. (1993) *Boundary Elements in Dynamics*. Comp. Mech. Pub., Southampton, Boston.
 71. Kawase, H. (1988) Time-domain response of a semi-circular canyon for incident *SV*, *P* and Rayleigh-waves calculated by the discrete wave-number boundary element method. *Bull. Seism.* a multidomain IBEM: Incident plane *SH*-waves. *Geophys. J. Int.*, **205**(3), 1382-1405.
 49. Jobin, T.M., Ramji, M., and Khaderi, S.N. (2019) Numerical evaluation of the interaction of rigid line inclusions using strain intensity factors. *Int. J. Mech. Sci.*, **153-154**, 10-20.
 50. Kamalian, M., Gatmiri, B., and 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.
 51. Feng, Y.D., Wang, Y.S., and Zhang, Z.M. (2003) Transient scattering of *SH*-waves from an inclusion with a unilateral frictional interface, a 2D time domain boundary element analysis. *Comm. Numer. Meth. Eng.*, **19**, 25-36.
 52. Huang, Y., Crouch, S.L., and Mogilevskaya, S.G. (2005) A time domain direct boundary integral method for a viscoelastic plane with circular holes and elastic inclusions. *Eng. Analy. BE.*, **29**, 725-737.
 53. Mykhaskiv, V. (2005) Transient response of a plane rigid inclusion to an incident wave in an elastic solid. *Wave Motion*, **41**, 133-144.
 54. Lei, J., Wang, Y.S., Huang, Y., Yang, Q., and Zhang, C. (2012) Dynamic crack propagation in matrix involving inclusions by a time-domain BEM. *Eng. Analy. BE.*, **36**(5), 651-657.
 55. Panji, M., Kamalian, M., Asgari-Marnani, J., and Jafari, M.K. (2013) Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. *Geophys. J. Int.*, **194**, 1849-1865.
 56. Panji, M., Asgari-Marnani, J., and Ansari, B. (2015) Analysing the embedded water transmission pipes using half-plane BEM. *J. Dam Hydroelect. Powerplant*, **2**(4), 22-33 (in Persian).
 57. Panji, M. and Fakhravar, A. (2017) Amplification pattern of seismic ground surface in the presence of underground horseshoe tunnel subjected to incident *SH*-wave. *Bull. Earthq. Sci. Eng.*, **4**(2), 49-66.
 58. Panji, M. and Ansari, B. (2017b) Transient *SH*-wave scattering by the lined tunnels embedded in an elastic half-plane. *Eng. Analy. BE.*, **84**, 220-230.
 59. Panji, M. and Yasemi, F. (2018) Amplification pattern of the ground surface including underground circular inclusion subjected to incident *SH*-waves. *J.*

Crawled Waves	۲۱- امواج خزش یافته
Reflect of Trapped Waves	۲۲- امواج محصور شده
Shadow Zone	۲۳- ناحیه‌ی سایه

فهرست علائم

Ω : دامنه
Γ : مرز
SH : مؤلفه‌ی افقی موج برشی (برون صفحه)
θ : زاویه‌ی تابش امواج مهاجم لرزه‌ای
DR : نسبت عمق ناهمگنی
SR : نسبت شکل ناهمگنی
LR : نسبت فاصله‌ی ناهمگنی
b : شعاع ناهمگنی
λ_p : طول موج
c : سرعت موج برشی محیط
f_p : فرکانس غالب موج
t_0 : پارامتر شیفت زمان
t : محور حقیقی زمان
μ : مدول برشی محیط
ρ : دانسیته‌ی محیط
n : بردار نرمال سطح
u : تغییر مکان مرزی
q : تنش مرزی
u^{ff} : تغییر مکان میدان آزاد
u^* : حل اساسی تغییر مکان
q^* : حل اساسی تنش
η : فرکانس بی‌بعد
ω : فرکانس زاویه‌ای موج

Soc. Am., **78**(4), 1415-1437.

72. Mojtabazadeh-Hasanlouei, S., Panji, M., and Kamalian, M. (2020) On subsurface multiple inclusions model under transient SH-wave propagation. *Waves in Random and Complex Media*, DOI: 10.1080/17455030.2020.1842553.
73. Trifunac, M.D. (1973) Scattering of plane SH-waves by a semi cylindrical canyon. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **3**(1), 267-281.

واژه‌نامه

Domain Methods	۱- روش‌های حجمی
Boundary Methods	۲- روش‌های مرزی
Hybrid Methods	۳- روش‌های تلفیقی
Finite Element Method (FEM)	۴- روش‌های اجزای محدود
Finite Difference Method (FDM)	۵- روش تفاضل محدود
Boundary Element Method (BEM)	۶- روش اجزای مرزی
Dynamic Analysis of Structures by Boundary Element Method	۷- الگوریتم پیشین داس‌بم
MATLAB 2019a (V. 9.7.0.1216025)	۸- نرم‌افزار متلب ۲۰۱۹
Half-Plane Time-Domain BEM	۹- اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان
Sub-Structure Method	۱۰- از تکنیک زیرسازه‌سازی
Wave Source Image Technique	۱۱- روش تصویر منبع موج
Ricker Wavelet	۱۲- نوع ریکر
Boundary Integral Equation (BIE)	۱۳- معادله انتگرال مرزی
Normalized Displacement Amplitude (NDA)	۱۴- دامنه‌ی تغییر مکان نرمالایز شده‌ی سطح زمین
Shape Ratio (SR)	۱۵- نسبت شکل
Depth Ratio (DR)	۱۶- نسبت عمق
Length Ratio (LR)	۱۷- نسبت فاصله
Impedance Ratio (I)	۱۸- نسبت امپدانس
Amplitude (A)	۱۹- میزان دامنه
Reflected Waves	۲۰- امواج انعکاس یافته

Transient Response of the Surface by Twin Underground Inclusions Subjected to SH-Waves

Mehdi Panji^{1*} and Saeed Mojtabazadeh-Hasanlouei²

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran, *Corresponding Author, email: m.panji@iauz.ac.ir
2. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

In recent decades, the recognition of seismic ground motions and damage investigations in the presence of subsurface heterogeneities including cavities and inclusions during an earthquake have been considered among the seismologists. This issue is more significant for subsurface inclusions because they can change the initial nature of incidence waves and amplification/de-amplification on different zones of the surface. Therefore, evaluating various effective factors including geometry and type of features, site conditions, type of incident waves and paths of wave motion requires appropriate methods for their analysis and detailed understanding. Using these approaches allows modeling the problems of wave scattering and predicting the real seismic responses. Technically, researchers have proposed various approaches for seismic analysis. These methods can be divided into analytical, semi-analytical, experimental, and numerical ones. Despite the high accuracy of analytical methods, their lack of flexibility in the modeling of complex features has forced the researchers to use alternative approaches such as numerical methods. In recent years, increasing the power of computers has helped to solve complex engineering problems using numerical methods. In the use of numerical methods, one can never claim that the obtained results are completely exact; rather, the main purpose is to move toward accurate responses as close as possible. The numerical methods are divided into two general categories known as the domain and boundary methods. The common domain methods include the finite element method (FEM) and finite difference method (FDM). Moreover, the boundary methods are separated into two categories including full-plane and half-plane, in which each part is developed in the transformed and time domains as well. In the use of boundary element methods (BEM), one dimension of the model is reduced and the radiation conditions of waves at infinity are satisfied. The advantages of the BEM compared to the domain approaches are include the concentration of meshes only around the boundary of desired features, the satisfaction of wave radiation conditions in far boundaries, low volume of input data and memory seizure, a significant reduction in analysis time and high accuracy of the results.

In this study, step-by-step transient analysis of arbitrarily shaped twin elliptical inclusions are presented subjected to propagating obliquely incident plane SH-waves using the direct half-plane time-domain BEM approach. Based on the sub-structuring process, the model of twin subsurface inclusions was decomposed into a dual pitted half-plane and twin closed filled solids. By determining all the related matrices and applying the continuity conditions of the displacements and tractions at the interfaces, the coupled matrix was achieved to obtain all unknown boundary values. After developing the method to analyze the problem of twin inclusions, it was implemented in the general algorithm previously called DASBEM and its validity was evaluated by some practical examples. The key parameters of the shape ratio of inclusions and incident wave's angle were considered to sensitize the response behavior. In order to complete the numerical results, some synthetic seismograms and 3D (three-dimensional) blanket amplification patterns were presented to illustrate the time and frequency-domain responses in the presence of twin inclusions. The results clearly demonstrate the significant role of the elliptical twin inclusions on the seismic response of surface and show that the maximum scattering and amplification are achieved in minimum shape ratio for vertical incident waves. It should be noted that the main objectives of the present study are presenting the ability of the proposed method in preparing simple twin inclusions models, transient analysis of complex engineering problems, obtaining high accuracy results, and illustrating a better view of subsurface irregularities interactions in the field of geotechnical earthquake engineering.

Keywords: Half-Plane BEM; Synthetic Seismogram, SH-Wave; Twin Inclusions; Time-Domain.