



پاسخ لرزه‌ای سطح تپه‌ی ابرفتی دوزنقه‌ای واقع بر حفره‌ی دایره‌ای: موج مهاجم قائم SH

مهدی پنجمی^{*}، سعید مجتبی‌زاده حسنلوئی، محمد حبیبی‌وند

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۲۶
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

کلمات کلیدی:

اجزای مرزی نیم‌صفحه
تپه‌ی دوزنقه‌ای
موج SH
نسبت امپدانس
نسبت شکل تپه.

خلاصه: در این مقاله به تحلیل لرزه‌ای سطح تپه‌ی ابرفتی دوزنقه‌ای واقع بر یک حفره‌ی دایره‌ای زیرزمینی در برابر امواج مهاجم قائم SH پرداخته شده است. بدین منظور، از روش عددی اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان برای تهیه‌ی مدل پیشنهاد شده بهره گرفته شده است. از جمله مهم‌ترین قابلیت‌های این روش، تمرکز مش‌ها صرفاً بر روی مرز عرضه‌ی مورد نظر می‌باشد. بر این اساس و مبتنی بر فرآیند زیرسازسازی، ابتدا مدل ناهمگن مزبور به یک نیم‌صفحه‌ی حفره‌دار و یک تپه‌ی سطحی تفکیک شده و سپس ماتریس‌های حاصل با اقتاع شرایط پیوستگی/مرزی، سرهم‌سازی می‌شوند. پس از پیاده‌سازی روش پیشنهاد شده در توسعه‌ی الگوریتم داس‌پم، چند مثال پیرامون صحت و سقم آن مورد تحلیل قرار گرفته و پاسخ‌های به دست آمده با نتایج سایر محققان مقایسه شده است. در ادامه، با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی نسبت امپدانس و شکل، پاسخ لرزه‌ای سطح تپه در دو حوزه‌ی زمان و فرکانس حساسیت سنجی شده است. در این میان، تأثیر حضور حفره‌ی زیرزمینی نیز در الگوی بزرگ‌نمایی سطح مطالعه شده است. نتایج نشان داد نسبت‌های امپدانس و شکل تپه‌ی دوزنقه‌ای در حصول الگوی پاسخ بسیار مؤثر می‌باشد به گونه‌ای که افزایش نسبت شکل تپه و متناظر آن کاهش تقابل امپدانس، مسبب تشدید حالت بحرانی پاسخ حوزه‌ی زمان و فرکانس گردید. همچنین، حداکثر بزرگ‌نمایی در بیشینه‌ی نسبت شکل و کمینه‌ی امپدانس حاصل شد. این تحقیق در محور موضوعی ژئوتکنیک لرزه‌ای ارائه شده و نتایج آن از دیدگاه کاربردی در تکمیل و تدقیق آئین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود قابل استفاده می‌باشد.

۱- مقدمه

لازم است برای هر مدل معین از عوارض سطحی به طور انحصاری، توابع و معادلات حاکم 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 محاسبه‌ی دقیق پاسخ برای مسئله‌ی مورد نظر را فراهم می‌نماید. از جمله مطالعات تحلیلی بنیادی در رفتارسنجی تپه‌ها می‌توان به تحقیق ساینبا و ویلیس (۱۹۷۵) اشارت رفت که با استفاده از بسط همخوان تابع موج، پاسخ تحلیلی انواع تپه‌ها را در حوزه‌ی فرکانس ارائه نمودند. در ادامه، محققانی چون یوان و لیاو (۱۹۹۶)، لی و همکاران (۲۰۰۴)، تیسور و چانگ (۲۰۰۹)، لی و آمورن وانگ پاییان (۲۰۱۳) توانستند مسئله‌ی انتشار موج در حضور عوارض توپوگرافی سطحی به ویژه تپه‌ها را با بهره‌گیری از روش تحلیلی بسط تابع موج بررسی نمایند. همچنین، آمورن وانگ پاییان و لی (۲۰۱۳) و آمورن وانگ پاییان و همکاران (۲۰۱۵)، به بررسی مسئله‌ی پراکنش امواج برون صفحه‌ی SH در حضور یک تپه‌ی نیم‌بیضی پرداخته و به منظور پیشبرد پژوهش‌های خویش، از فرم بسته‌ی تابع موج بهره گرفتند. در این

اثر ساختگاه همواره به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در چگونگی تأثیر زمین‌لرزه بر سازه‌های سطحی مطرح و مورد توجه پژوهشگران بوده است. نقش عوارض توپوگرافی سطحی همچون تپه‌ها و ترکیب آن با عوارض زیرسطحی همانند حفره‌ها بر وضعیت بزرگ‌نمایی‌های ایجاد شده در برابر امواج لرزه‌ای، به عنوان یکی از مباحث حائز اهمیت در حوزه‌ی مهندسی زلزله و ژئوتکنیک تلقی می‌گردد. بنابراین، در تحقیقات پیشین صورت گرفته همواره تلاش شده است تا با تهیه و به‌کارگیری روش‌های مختلف در مدل‌سازی و تحلیل عوارض توپوگرافی، ضمن تأمین دقت و کارآمدی لازم، بتوان نقش هر یک از عوامل مزبور را به طور دقیق مورد بررسی قرار داد. با مرور ادبیات فنی می‌توان دریافت، پژوهشگران از سه دسته روش اصلی شامل روش‌های تحلیلی، نیمه تحلیلی و عددی جهت بررسی مسئله‌ی مذکور بهره گرفته‌اند. سانچز‌بیسما و همکاران (۲۰۰۲) در روش‌های تحلیلی،

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.panji@iauz.ac.ir



تپه‌ای را به سه دسته‌ی اصلی شامل روش‌های حجمی^۶، روش‌های مرزی^۷ و روش‌های تلفیقی^۸ تقسیم نمود (سانچزسما و همکاران، ۲۰۰۲). در روش‌های حجمی که از جمله نام‌آشنا‌ترین آن‌ها می‌توان روش‌های اجزای محدود (FEM^۹) و تفاضل محدود (FDM^{۱۰}) را نام برد، لازم است کل محیط تپه و بخش عظیمی از زیر آن گسسته‌سازی گردد. بنابراین، حجم بالای محاسبات و مدت زمان قابل توجه در تحلیل مسئله، جزء لاینفک این روش‌ها محسوب می‌گردد. از جمله مهم‌ترین پژوهش‌های انجام شده توسط روش اجزای محدود (FEM) می‌توان به مطالعات اسمیت (۱۹۷۵) و دی (۱۹۷۷) اشاره نمود که به تحلیل مسائل پراکنش امواج لرزه‌ای پرداختند. همچنین، با بهره‌گیری از روش تفاضل محدود (FDM) نیز محققانی چون بور (۱۹۷۲ و ۱۹۷۳)، موکزو (۱۹۸۹) و ویریکس (۱۹۸۴)، مسئله‌ی مذکور را در حضور عوارض توپوگرافی سطحی مورد مطالعه قرار دادند. در این میان، روش اجزای مرزی (BEM^{۱۱}) به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین و در عین حال دقیق‌ترین روش‌های عددی جهت تحلیل مسائل مهندسی به شمار می‌آید. در این روش، گسسته‌سازی‌ها صرفاً بر روی مرز عارضه‌ی مورد نظر تمرکز یافته و این مهم موجب ساده‌سازی فرآیند مدل‌سازی می‌شود. اگرچه در روش‌های مرزی نیز محدودیت‌هایی چون فرمولاسیون پیچیده و عدم توسعه‌ی مکفی در محیط‌های غیرخطی، پلاستیک و چندفازه به چشم می‌خورد، اما بهره‌گیری از آن‌ها منتج به کاهش قابل توجه حجم داده‌های ورودی، کاهش میزان حافظه‌ی اشغال شده در رایانه، کاهش مدت زمان تحلیل مسئله، اقلع شرایط مرزی تشعشع امواج در بی‌کران و دقت بسیار بالای نتایج خواهد شد (کمالیان و همکاران، ۲۰۰۶ الف).

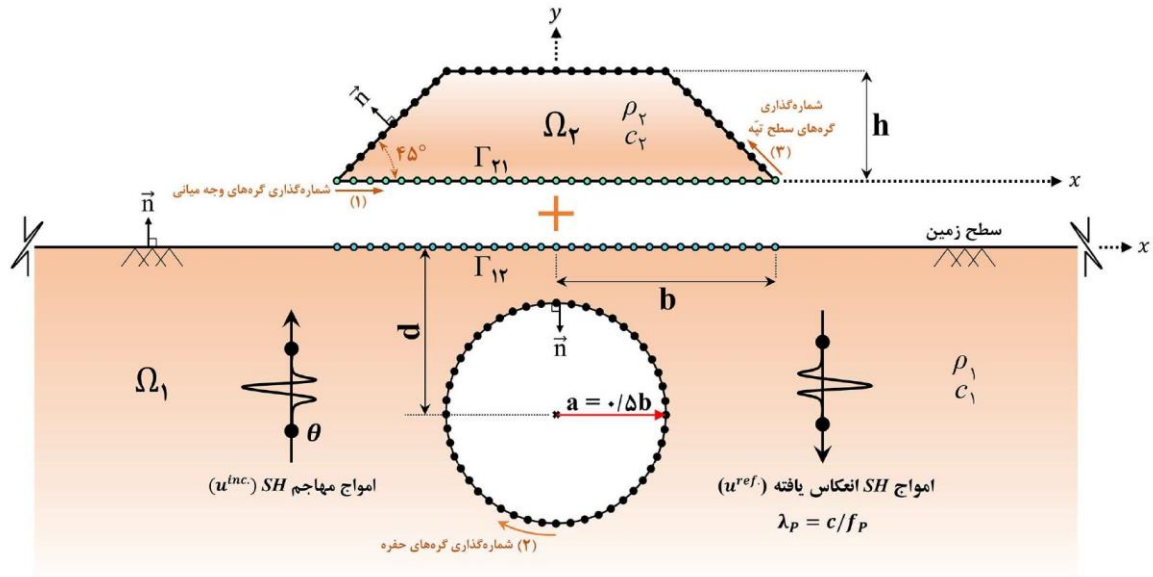
روش‌های اجزای مرزی را نیز می‌توان در قالب دو دسته‌بندی روش اجزای مرزی محیط کامل و نیم‌صفحه تقسیم نمود که هر یک در دو حوزه‌ی تبدیل یافته (فرکانس / لاپلاس) و زمان توسعه یافته‌اند (دومینگز و میس، ۱۹۹۱). با نگاهی به روش‌های مرزی مزبور می‌توان ملاحظه نمود، در فرمول‌بندی اجزای مرزی محیط کامل باید کل مرز مدل شامل محدودهی توپوگرافی مورد مطالعه به علاوه‌ی بخش بزرگی از زمین‌های هموار طرفین عارضه را مش‌بندی نمود و سپس شرایط مرزی تنش آزاد را به طور تقریبی در سطح زمین اعمال کرد. در زمینه‌ی مطالعات دینامیکی انجام شده توسط

میان، یوان و مین (۱۹۹۲) و لی و همکاران (۲۰۰۶)، از حل سری موج جهت تعیین پاسخ تپه‌ی استوانه‌ای در برابر امواج برون صفحه‌ی SH استفاده نمودند. لیانگ و همکاران (۲۰۰۴) و لیو و همکاران (۲۰۱۰) نیز از روش تابع فوریه-بسل^۱ برای تحلیل مسائل گوناگون مرتبط با تپه‌ها بهره گرفتند. کائو و همکاران (۲۰۰۱)، پاسخ یک تپه‌ی استوانه‌ای با مقطع دلخواه را به صورت تحلیلی محاسبه نمودند. کیو و لیو (۲۰۰۵) و لین و همکاران (۲۰۱۰) نیز از روش تابع مختلط برای رفتارسنجی یک تپه‌ی مثلثی منفرد استفاده نمودند. چندی بعد و با بهره‌گیری از روش بسط تابع موج، یانگ و همکاران (۲۰۱۴) توانستند پاسخ دو تپه‌ی مثلثی را به دست آورند. در روش‌های نیمه‌تحلیلی، بخشی از فرآیند حل مسئله به صورت تحلیلی و بخش دیگر با استفاده از سایر روش‌ها صورت می‌پذیرد. در رابطه با روش‌های نیمه‌تحلیلی می‌توان آکی و لارنر (۱۹۷۰) را به عنوان محققان پیشرو شناخت که با ارائه‌ی رویکردی تحت عنوان روش آکی-لارنر توانستند تحولات سطحی یک محیط لایه‌ای با مرز نامنظم را مطالعه نمایند. همچنین، بوچون (۱۹۷۳)، بارد (۱۹۸۲) و جلی و همکاران (۱۹۸۸) در طی پژوهش‌های خود، از روش آکی-لارنر جهت تعیین پاسخ انواع تپه‌ها استفاده نمودند. داتا (۱۹۷۴) از روش بسط تقریبی سازگار و سیلز (۱۹۷۸) از حل عددی معادله‌ی انتگرال یگانه‌ی فردهلم^۲ استفاده نمودند. از جمله سایر روش‌های نیمه‌تحلیلی مورد استفاده توسط پژوهشگران برای تحلیل عارضه‌ی توپوگرافی تپه، می‌توان به روش ماتریس T یا میدان صفر^۳ (چن و همکاران، ۲۰۱۱؛ چن و همکاران، ۲۰۱۲)، روش بوچون-کامپیلو^۴ (ژو و چن، ۲۰۰۶) و اخیراً، تکنیک تطبیق ناحیه^۵ (تیسور و همکاران، ۲۰۱۸) اشاره نمود. لازم به ذکر است، علی‌رغم اینکه روش‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی از دقت بالایی در محاسبه‌ی پاسخ برخوردار هستند، ولی عدم انعطاف‌پذیری مناسب جهت مدل‌سازی عوارض توپوگرافی پیچیده و منطبق با طبیعت، عرصه را برای ظهور روش‌های عددی فراهم نمود.

در سالهای اخیر با توجه به رشد و پیشرفت چشم‌گیر قدرت رایانه‌ها و افزایش کارایی آنها در مدل‌سازی و تحلیل مسائل گوناگون مهندسی، استقبال بیشتری از سوی پژوهشگران برای استفاده از روش‌های عددی در مقایسه با روش‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی به عمل آمده است. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان روش‌های عددی مورد استفاده در تحلیل عوارض توپوگرافی

6 ^۱ Domain Methods
7 ^۲ Boundary Methods
8 ^۳ Hybrid Methods
9 ^۴ Finite Element Method
10 ^۵ Finite Difference Method
11 ^۶ Boundary Element Method

1 ^۱ Bessel-Fourier Function
2 ^۲ Singular Fredholm Integral Equation
3 ^۳ Null-Field Approach
4 ^۴ Bouchon-Campillo Method
5 ^۵ Region-Point-Matching Technique



شکل ۱. هندسه‌ی تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای واقع بر حفره‌ی دایره‌ای توخالی مستقر در یک نیم‌صفحه‌ی الاستیک همگن، در برابر امواج مهاجم SH.

Fig. 1. The problem geometry of a trapezoidal shaped alluvial valley on a hollow circular cavity placed in an elastic half-plane subjected to the incident vertical SH-waves

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 قائم SH بنا نهاده شود. چنانچه مرور ادبیات فنی نشان داد، تأثیر حضور مرکب تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای و حفره بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، به طور مستقیم و شفاف در حوزه‌ی زمان مورد مطالعه قرار نگرفته است. بدین منظور، پس از توسعه‌ی روش پیشنهاد شده برای مدل مورد نظر، معادلات حاکم در یک الگوریتم جامع که پیشتر تحت عنوان داس‌بم^۱ (پنجی و همکاران، ۲۰۱۳) شناخته شده، پیاده‌سازی و اجرا شده است. سپس، با ارائه‌ی چند مثال اعتبارسنجی، دقت و کیفیت روش و الگوریتم استفاده شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت، در قالب یک مطالعه‌ی عددی پیشرفته، با در نظر گرفتن نسبت امیدانس و نسبت شکل تپه، پراکنش امواج لرزه‌ای و بزرگ‌نمایی‌های ایجاد شده در سطح به صورت نگاشته‌های سه‌بعدی در حوزه‌ی زمان و فرکانس مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

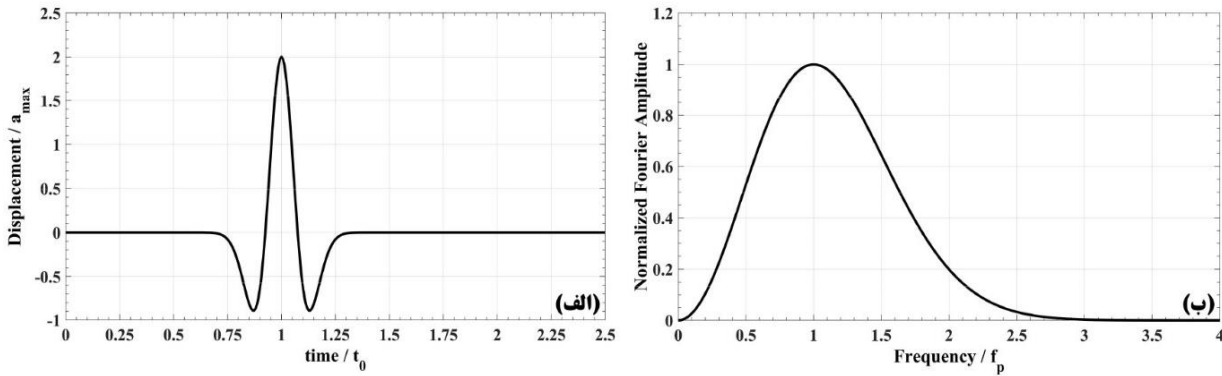
۲- اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان

شکل ۱، مدل یک تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای واقع بر یک حفره‌ی دایره‌ای زیرزمینی مستقر در یک محیط نیم‌صفحه‌ی همگن الاستیک خطی را در

روش مذکور در حوزه‌ی فرکانس می‌توان پژوهش‌های سانچزسمما (۱۹۸۲)، هدلی (۱۹۸۷)، تامبیراتام و لی (۱۹۹۰) و اخیراً با و همکاران (۲۰۱۶) و (۲۰۱۷) و در حوزه‌ی زمان تحقیقات تاکمیا و فوجیوارا (۱۹۹۴)، کاملیان و همکاران (۲۰۰۳) و موگی و کاواکامی (۲۰۰۷) را نام برد. از سوی دیگر، در فرمول‌بندی روش اجزای مرزی نیم‌صفحه، با توجه به اینکه شرایط مرزی تنش آزاد در سطح زمین به طور کامل و دقیق در معادلات حاکم اقتاع شده است، تنها مرز عارضه‌ی مورد مطالعه گسسته سازی می‌شود. بدین ترتیب، حجم محاسبات و زمان انجام تحلیل در مقایسه با روش اجزای مرزی محیط کامل به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. اگر چه، تاکنون تحقیقات انگشت‌شماری با استفاده از این روش انجام شده است، اما می‌توان به مطالعات پنجی و همکاران (۲۰۱۳)، پنجی و همکاران (۲۰۱۴)، پنجی و انصاری (۲۰۱۷) و اخیراً پنجی و مجتبی‌زاده حسنلوئی (۲۰۱۸ و ۲۰۲۰) و پنجی و حبیبی‌وند (۲۰۲۰) به عنوان مطالعات دینامیکی در حوزه‌ی تحلیل لرزه‌ای انواع عوارض توپوگرافی سطحی و زیرسطحی اشاره نمود.

از یک سو با توجه به اهمیت شکل‌گیری تپه‌های آبرفتی دوزنقه‌ای ناشی از انباشته‌های سطحی در گذر زمان و احتمال حضور این نوع عوارض به صورت پشته‌های رسوبی در بافت شهری به ویژه در مسیر عبور خطوط مترو، فاضلاب، شریان‌های حیاتی و حامله‌های انرژی و از سوی دیگر، لزوم آئین‌نامه‌های لرزه‌ای به شناخت بهتر این قسم عوارض، موجب شده است

¹ Dynamic Analysis of Structures by Boundary Element Method (DASBEM)



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

Fig. 2. The diagram of the Ricker wavelet for a point located on free-field for (a) time-domain and (b) frequency-domain

در این معادله، f_p فرکانس غالب موج، t_0 پارامتر شیفت زمان و t محور حقیقی زمان می‌باشد.

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

زمانی که مدل به صورت نیم‌صفحه بوده و شرایط مرزی تنش آزاد بر روی سطح زمین اقیانوس می‌گردد، تغییر مکان میدان آزاد (u^{ff}) را می‌توان با در نظر گرفتن فازهای ورودی و انعکاسی با استفاده از رابطه‌ی (۲) به دست آورد (رینوسو و همکاران، ۱۹۹۳).

$$u^{ff}(x, y, t) = \alpha_{max} \cdot \left(\left[1 - 2 \left(\frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc} \right)^2 \right] e^{-\left(\frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc} \right)^2} H \left(t - \frac{r^{inc}}{c} \right) + \left[1 - 2 \left(\frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref} \right)^2 \right] e^{-\left(\frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref} \right)^2} H \left(t - \frac{r^{ref}}{c} \right) \right) \quad (2)$$

که در آن، α^{inc} ، α^{ref} ، r^{inc} و r^{ref} با استفاده از معادلات (۳) و (۴) قابل محاسبه می‌باشند:

$$\alpha^{inc} = c(t - t_0) + r^{inc}, \quad (3)$$

$$r^{inc} = -\sin(\theta) \cdot x + \cos(\theta) \cdot y,$$

برابر امواج مهاجم SH نشان می‌دهد. در تهیه‌ی مدل مزبور به کمک روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان، از تکنیک زیرسازسازی^۱ و روش تصویر منبع موج^۲ اوتسو و یوتسوگی (۱۹۸۵) برای اقیانوس شرایط مرزی بر روی سطح زمین استفاده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، مش‌بندی‌ها صرفاً بر مرز تپه، وجه میانی و مرز پیرامون حفره‌ی زیرزمینی متمرکز شده است. موج مهاجم لرزه‌ای برون صفحه‌ی SH از نوع تابع ریکر^۳ (۱۹۵۳) بوده و با زاویه‌ی قائم بر مدل اعمال شده است. در شکل ۱، Ω مبین دامنه می‌باشد که برای محیط پیرامون و تپه، به ترتیب با شماره‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. Γ بیانگر مرز و c و ρ به ترتیب سرعت موج برشی و دانسیته‌ی هر محیط می‌باشند. θ زاویه‌ی امواج مهاجم لرزه‌ای بوده که در این مطالعه جبهه امواج با زاویه‌ی صفر درجه به مدل اعمال شده است. نسبت عمق حفره^۴ به صورت رابطه‌ی $(DR = \frac{d}{a})$ در نظر گرفته شده که a و d به ترتیب عمق و شعاع حفره می‌باشد. نسبت شکل تپه^۵ نیز به صورت $(SR = \frac{h}{b})$ (تعریف شده است که در رابطه‌ی مزبور، h ارتفاع تپه و b نصف پهنا‌ی کف تپه می‌باشد. n نیز بردار نرمال سطح بوده که مبتنی بر جهت شماره‌گذاری گره‌ها بر روی هر یک از مرزها تعریف شده و همواره عمود بر سطح می‌باشد. در شکل ۲ نمودار تابع موجک ریکر در حوزه‌ی زمان و فرکانس نشان داده شده است که معادله‌ی آن در قالب رابطه‌ی (۱) ارائه شده است.

- 1 ^۱ Sub-Structure Method
- 2 ^۲ Wave Source Image Technique
- 3 ^۳ Ricker Wavelet
- 4 ^۴ Depth Ratio
- 5 ^۵ Shape Ratio

در این رابطه، u^* و q^* به ترتیب بیانگر توابع گرین نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان برای مؤلفه‌های تغییر مکان و ترکشن (تنش) می‌باشند. u و q به ترتیب معرف تغییر مکان و تنش مرزی می‌باشد. X و ξ به ترتیب مختصات منبع و دریافت کننده را نشان می‌دهد. جملات $u^* \cdot q$ و $q^* \cdot u$ انتگرال‌های کانولوشن ریمان، u^{ff} تغییر مکان میدان آزاد بر روی سطح زمین صاف بدون عارضه و $c(\xi)$ زاویه‌ی شکست مرزی را مبین می‌سازد که به ضریب هندسی معروف است. با حل معادله‌ی مزبور، تغییر مکان کل سطح تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای و حفره قابل دستیابی خواهد بود. در این مرحله، امکان تعیین تغییر مکان‌ها در هر نقطه‌ی m واقع در درون دامنه (Ω) و سطح زمین ($y=0$) فراهم می‌باشد. با لحاظ نمودن $c^m(\xi)$ برابر واحد در رابطه‌ی فوق الذکر، امکان محاسبه‌ی تغییر مکان در نقاط درونی نیز مهیا می‌شود (کاواسه، ۱۹۸۸؛ هدلی و همکاران، ۱۹۸۹؛ پنچی و همکاران، ۲۰۱۳).

۳- عددی‌سازی

با گسسته‌سازی مرز تپه و حفره توسط المان‌های سه گره‌ای درجه‌ی دوم و اعمال انتگرال‌گیری تحلیلی و عددی به ترتیب بر محورهای زمان و مکان، فرم ماتریسی زیر به دست می‌آید:

$$\sum_{n=1}^N H^{N-n+1} \{u^n\} = \sum_{n=1}^N G^{N-n+1} \{q^n\} + \{u^{ff.N}\}, \quad (8)$$

در رابطه‌ی (۸)، H^{N-n+1} و G^{N-n+1} ماتریس‌هایی هستند که عناصر آن از انتگرال‌گیری مکانی هسته‌های نیم‌صفحه برای المان‌های مرزی حاصل شده‌اند. بردار مقادیر مرزی در گام زمانی Ω نیز توسط $\{u_j^n\}$ و $\{q_j^n\}$ نشان داده شده است که به ترتیب برای تغییر مکان و ترکشن می‌باشد. برای تعیین فرم قابل حل معادله‌ی مذکور، با اعمال شرایط مرزی حاکم بر مرز هندسی مدل به صورت رابطه‌ی (۹) خواهیم داشت:

$$[A_1^1] \{X^N\} = [B_1^1] \{Y^N\} + \{R^N\} + \{u^{ff.N}\}, \quad (9)$$

که $\{X^N\}$ و $\{Y^N\}$ به ترتیب بردار متغیرهای مجهول و معلوم مرزی بوده و $[A_1^1]$ و $[B_1^1]$ ماتریس‌های حاوی ستون‌های متناظر با مقادیر مجهول و معلوم مرزی می‌باشند. $\{R^N\}$ نیز اثر تاریخچه‌ی زمانی

$$\begin{aligned} \alpha^{ref.} &= c(t - t_0) + r^{ref.}, \\ r^{ref.} &= -\sin(\theta) \cdot x - \cos(\theta) \cdot y, \end{aligned} \quad (4)$$

به منظور شروع فرمول‌بندی برای مدل ارائه شده در شکل ۱، از معادله‌ی موج اسکالر به صورت زیر خواهیم داشت (ارینگن و سوهایی، ۱۹۷۵):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial y^2} + \\ b(x, y, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

در این رابطه، $u(x, y, t)$ و $b(x, y, t)$ به ترتیب تغییر مکان و نیروی حجمی برون صفحه در نقطه‌ی (x, y) بوده و t معرف زمان می‌باشد. برای محاسبه‌ی سرعت موج برشی (c) از رابطه‌ی $\sqrt{\mu/\rho}$ بهره گرفته می‌شود که μ مدول برشی و ρ دانسیته است. از شرایط مرزی رابطه‌ی (۶) به منظور دستیابی به یک محیط نیمه نامحدود دوبعدی (نیم‌صفحه) استفاده شده است (پنچی و همکاران، ۲۰۱۳). از حل همزمان دو معادله‌ی (۵) و (۶)، توابع گرین نیم‌صفحه به دست خواهد آمد.

$$\left. \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial n} \right|_{y=0} = 0, \quad (6)$$

۲-۱- معادله‌ی انتگرال مرزی (BIE¹)

با اعمال روش باقی‌مانده‌های وزن‌دار به معادله‌ی (۵)، حذف جملات انتگرالی حجمی به کمک روش‌های حل مرزی و صرف نظر از شرایط اولیه و نیروهای حجمی، معادله‌ی انتگرال مرزی در حوزه‌ی زمان به صورت رابطه‌ی (۷) به دست خواهد آمد (بریا و دومینگز، ۱۹۸۹؛ دومینگز، ۱۹۹۳):

$$\begin{aligned} c(\xi)u(\xi, t) = \\ \int_{\Gamma} \left\{ \int_0^t [u^*(x, t; \xi, \tau) \cdot q(x, t) - q^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u(x, t)] d\tau \right\} d\Gamma(x) + \\ u^{ff}(\xi, t), \end{aligned} \quad (7)$$

زیرنویس (۲۱) بیان می‌شود.

۴-۲- سرهم‌سازی

به منظور تعیین کلیه‌ی مجهولات، لازم است با اقتناع شرایط تعادل تغییر مکان ($u_{12}^N = u_{21}^N$) و سازگاری تنش ($\mu_1 q_{12}^N = -\mu_2 q_{21}^N$) به عنوان شرایط پیوستگی در وجه مشترک تپه با محیط پیرامون آن، می‌توان به شکل ماتریسی معادلات انتگرالی سرهم شده را به صورت زیر تعیین نمود:

$$\begin{bmatrix} H_{12}^1 & H_1^1 & 0 & -\frac{1}{\mu_1} G_{12}^1 \\ H_{21}^1 & 0 & H_2^1 & \frac{1}{\mu_2} G_{21}^1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{12}^N \\ u_{21}^N \\ q_{12}^N \\ q_{21}^N \end{Bmatrix} = \quad (12)$$

$$\begin{Bmatrix} R_{(1)}^N \\ R_{(2)}^N \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_{(1)}^{ff.N} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

در نهایت، از حل معادله‌ی (۱۲) کلیه‌ی مقادیر مجهول شامل تغییر مکان‌ها و تنش‌ها در وجه میانی تپه با نیم‌صفحه‌ی پیرامون به دست می‌آید. در ادامه، جهت دستیابی به تغییر مکان‌ها در سطح زمین لازم است معادلات مربوط به ناحیه‌ی اول را با فرض $C(\xi)$ برابر با واحد مجدداً حل نمود.

۵- الگوریتم داس‌بم

این برنامه که در محیط نرم‌افزار متلب (۲۰۲۰) پیاده‌سازی شده است، مبتنی بر روش اجزای مرزی نیم‌صفحه بوده و برای تحلیل دینامیکی مسائل اسکالر صفحه‌ای در حوزه‌ی زمان قابل کاربرد است. فرآیند کلی الگوریتم مزبور بدین شرح است که ابتدا مشخصات هندسی و مصالح عارضه‌ی مورد مطالعه به انضمام پارامترهای موج مهاجم ورودی در بخش پیش پردازش قرائت شده و سپس مدل ساخته شده وارد بخش پردازش می‌شود. پس از تعیین کلیه‌ی مجهولات مسئله، در نهایت خروجی تحلیل در بخش پس پردازش به صورت گرافیک دو/سه بعدی نمایش داده می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر، الگوریتم مزبور برای تحلیل عوارض برآمده‌ی ناهمگن چند مرزی توسعه داده شده و قابلیت مدل‌سازی هندسه‌های تیز گوشه از جمله تپه‌های دوزنقه‌ای را فزون آمده است. شایان ذکر است گسترش مذکور در بخش پیش پردازش به الگوریتم اعمال شده است. فلوجارت و جزئیات برنامه‌ی داسبم در مطالعه‌ی پنجگی و همکاران (۲۰۲۰) قابل مشاهده می‌باشد.

دینامیکی پیشین بر گره زمانی حاضر N ام را شامل می‌شود. بدین ترتیب، با حل معادله‌ی (۹)، تمامی مقادیر مجهول مرزی در هر گام زمانی به دست آمده و امکان محاسبه‌ی تغییر مکان‌ها در هر یک از نقاط درونی "m" واقع در دامنه فراهم خواهد شد (پنجگی و همکاران، ۲۰۲۰).

۴- مدل‌سازی

بر اساس روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان و مبتنی بر فرآیند زیرسازیه‌سازی، تپه‌ی دوزنقه‌ای واقع در سطح زمین باید از ناحیه‌ی پیرامون تحتانی جداسازی گردد. لذا مطابق شکل ۱، بخش اول شامل یک نیم‌صفحه‌ی حفره‌دار توخالی در معرض امواج مهاجم لرزه‌ای بوده و بخش دوم، یک محیط دوزنقه‌ای شکل بسته را شامل می‌شود.

۴-۱- زیرسازیه‌سازی

بخش اول مدل شامل یک محیط نیمه نامحدود دارای حفره می‌باشد که در برابر امواج مهاجم لرزه‌ای SH واقع شده است. چنانچه در این بخش کلیه‌ی گره‌های وجه مشترک تپه با محیط تحتانی توسط زیرنویس (۱۲) بیان گردد، معادله‌ی انتگرال مرزی گسسته شده در گام زمانی N ام مطابق رابطه‌ی (۱۰) بیان می‌شود:

$$H_{12}^1 u_{12}^N = G_{12}^1 q_{12}^N + R_{12}^N + u_{12}^{ff.N} \quad (10)$$

در این رابطه، u_{12}^N و q_{12}^N به ترتیب تغییر مکان و ترکشن در وجه مشترک (Γ_{12}) برای ناحیه‌ی شماره‌ی (۱)، تاریخچه‌ی دینامیکی پیشین در گام زمانی N ام و $u_{12}^{ff.N}$ تغییر مکان میدان آزاد برای وجه مشترک می‌باشد. همچنین، برای محاسبه‌ی R_{12}^N از رابطه‌ی زیر خواهیم داشت:

$$R_{12}^N = \sum_{n=1}^{N-1} (G_{12}^{N-n+1} q_{12}^n - H_{12}^{N-n+1} u_{12}^n) \quad (11)$$

بخش دوم مدل، یک محیط بسته‌ی دوزنقه‌ای شکل را شامل می‌شود که معادله‌ی انتگرال مرزی مربوط به این بخش نیز مشابه بخش اول بوده با این تفاوت که فاقد جمله‌ی تغییر مکان میدان آزاد ($u_{\square}^{ff.N}$) است و با

جدول ۱. نوع مصالح و پارامترهای اعمال شده در مدل‌سازی تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای

Table 1. The type of materials and applied parameters for the modeling of a trapezoidal shaped alluvial valley.

سرعت موج برشی مصالح (m/s)	دانسیته‌ی مصالح (ton/m ^۳)	نوع مصالح تشکیل‌دهنده	ناحیه‌ی مورد نظر
۵۰۰	۱/۸	سنگ رسوبی متوسط	محیط پیرامون
۴۵۰	۱/۵	سنگ رسوبی سست	تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای نرم
۵۰۰	۱/۸	سنگ رسوبی متوسط	تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای همگن
۵۳۵/۷۱۵	۲/۱	سنگ رسوبی متراکم	تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای سخت

۶- مطالعه‌ی پارامتریک

شده در حالت میدان آزاد می‌باشد. در این پژوهش، پاسخ حوزه‌ی فرکانس در محدوده‌ی فرکانس بی‌بعد (η) ۰/۲۵ تا ۵ محاسبه شده است. لازم به ذکر است، با علم بر اینکه همواره با نزدیک شدن به سطح زمین از سختی مصالح کاسته می‌شود و کلیه‌ی امواج مهاجم به صورت قائم در می‌آیند، لذا در مدل تهیه شده امواج ورودی با زاویه‌ی صفر درجه اعمال می‌شوند (کمالیان و همکاران، ۲۰۰۶ ب). در کلیه‌ی مدل‌ها مطابق شکل ۱، نسبت عمق حفره ($DR = \frac{d}{a}$) به صورت ثابت و برابر با ۱/۵ می‌باشد. زاویه‌ی یال تپه‌ی ذوزنقه‌ای (γ) برابر با ۴۵ درجه و محدوده‌ی سطح زمین از $b^3 - b^3$ در نظر گرفته شده است. همچنین، نسبت شکل تپه ($SR = \frac{h}{b}$) به ترتیب برابر با ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ لحاظ شده است. در رابطه‌ی مزبور، h ارتفاع تپه و b نصف پهنا‌ی کف تپه می‌باشد. مساحت تپه‌ی ذوزنقه‌ای نیز به کمک رابطه‌ی ($S = (2-SR) \cdot SR \cdot b^2$) تعیین می‌گردد.

۶-۱- صحت‌سنجی

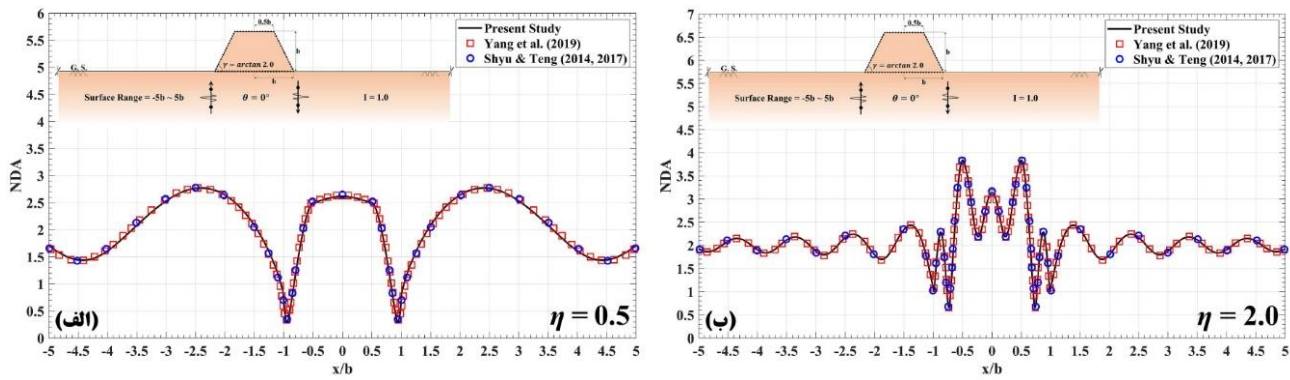
به منظور بررسی صحت عملکرد الگوریتم تهیه شده (داس‌بم)، به تحلیل لرزه‌ای یک مدل تپه‌ی ذوزنقه‌ای همگن واقع به حفره در برابر امواج مهاجم قائم SH پرداخته شده است. در این راستا از نتایج شیو و تنگ (۲۰۱۴) و (۲۰۱۷) و یانگ و همکاران (۲۰۱۹) به عنوان پنج مارک استفاده شده است. لازم به ذکر است، محققان مزبور با استفاده از روش‌های تحلیلی بسط تابع موج، رفتار لرزه‌ای تپه‌ی ذوزنقه‌ای همگن منفرد را در برابر امواج SH بررسی نموده‌اند. بدین منظور و برای نزدیک شدن به مدل آن‌ها، یک تپه‌ی

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تأثیر نسبت‌های امیدانس و شکل تپه‌ی ذوزنقه‌ای بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین می‌باشد. بنابراین لازم است برخی پارامترها و مفاهیم تعریف شود. در این راستا، دامنه‌ی تغییر مکان نرمالایز شده‌ی سطح زمین (NDA^1) به صورت نسبت دامنه‌ی فوریه‌ی تغییر مکان کلی سطح زمین حاصل از روش اجزای مرزی در یک فرکانس معین، بر دامنه‌ی فوریه‌ی حرکت ناشی از امواج مهاجم در فرکانس مذکور معرفی می‌شود. فرکانس بی‌بعد (η) با استفاده رابطه‌ی ($\eta = \omega b / \pi c$) محاسبه می‌گردد که در آن، ω بیانگر فرکانس زاویه‌ای موج و c سرعت موج برشی دامنه می‌باشد.

در بخش مطالعه‌ی پارامتریک، مقادیر ذکر شده در جدول ۱ مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) برای مصالح تشکیل‌دهنده‌ی هر بخش از مدل لحاظ شده است که به ترتیب نسبت‌های امیدانس (I) ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ را با مصالح نرم، همگن و سخت برای تپه‌های آبرفتی به دست می‌دهد. نسبت امیدانس (I) بیانگر اختلاف سختی مصالح تشکیل‌دهنده‌ی تپه و محیط پیرامون بوده و به صورت رابطه‌ی ($I = \frac{\rho_h \cdot c_h}{\rho_m \cdot c_m}$) تعریف می‌شود. در این رابطه، ρ_h و c_h به ترتیب دانسیته و سرعت موج برشی تپه و ρ_m و c_m به ترتیب دانسیته و سرعت موج برشی محیط پیرامون است. نسبت بزرگ‌نمایی، نسبت دامنه‌ی پاسخ سطح تپه به تغییر مکان ایجاد

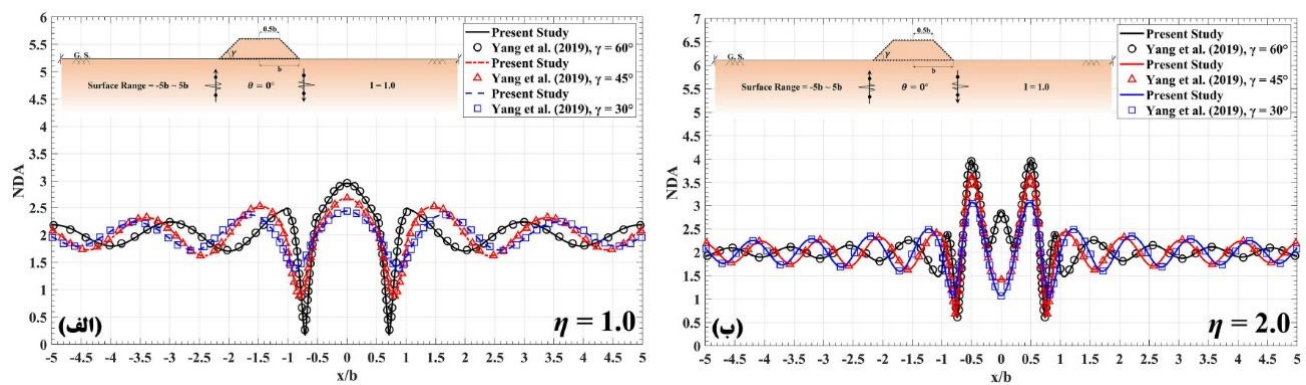
1 ^۱ Normalized Displacement Amplitude

2 ^۲ Impedance Ratio



شکل ۳. دامنه‌ی تغییر مکان نورمالایز شده‌ی سطح زمین در مقابل "x/b" برای تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای با فرکانس بی‌بعد (الف) ۰/۵ و (ب) ۱ در برابر امواج مهاجم قائم SH.

Fig. 3. The normalized displacement amplitude of the ground surface versus x/b for a trapezoidal shaped alluvial valley with the dimensionless frequency of (a) $\eta=0.5$ and (b) $\eta=1.0$ subjected to the vertical SH-waves.

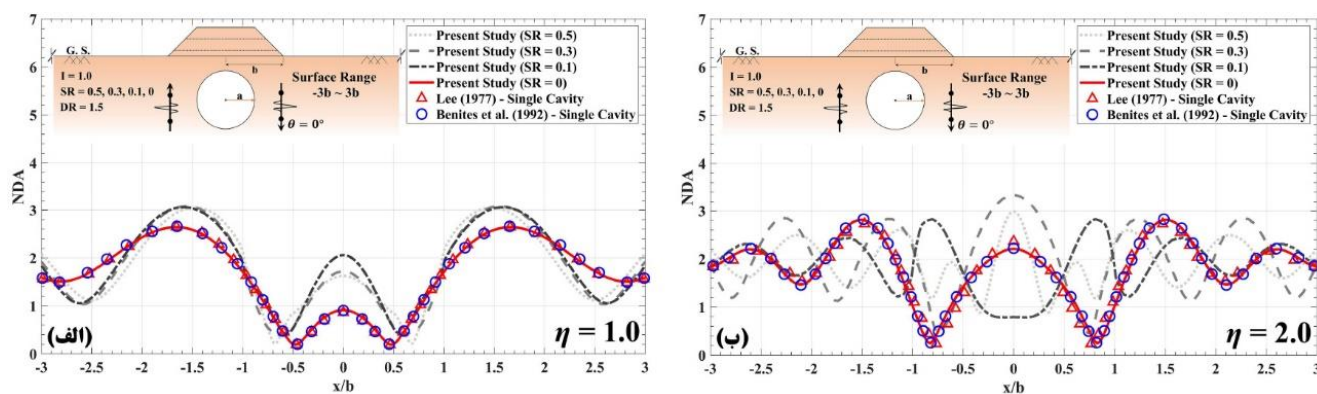


شکل ۴. دامنه‌ی تغییر مکان نورمالایز شده‌ی سطح زمین در مقابل "x/b" برای تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای با زوایای یال (γ) ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در فرکانس بی‌بعد (الف) ۱ و (ب) ۲ و هجوم امواج مهاجم قائم SH.

Fig. 4. Figure 4. The normalized displacement amplitude of the ground surface versus x/b in presence of a trapezoidal shaped alluvial valley with the edge angles (γ) of 30°, 40° and 60° for the dimensionless frequency of (a) $\eta=1.0$ and (b) $\eta=2.0$ subjected to the vertical SH-waves

شده‌ی سطح زمین برای مدل مزبور در فرکانس‌های بی‌بعد (η) ۰/۵ و ۲ و در محدوده‌ی -۵b تا ۵b نشان داده شده و با نتایج شیو و تنگ (۲۰۱۴) و (۲۰۱۷) و یانگ و همکاران (۲۰۱۹) مقایسه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود هم‌خوانی مناسب بین نتایج به چشم می‌خورد. شایان ذکر است، شکل ۳ برای زاویه‌ی یال تپه (γ) برابر با ۶۳/۴۳۵ درجه ترسیم شده است که اعتبارسنجی این پارامتر در دیگر زوایای مفروض در شکل ۴ برای فرکانس‌های ۱ و ۲ در مقایسه با نتایج یانگ و همکاران (۲۰۱۹) ارائه شده است.

همگن با نسبت امیدانس واحد و هندسه‌ی مفروض تهیه شد. برای حذف اثر حفرة، نسبت عمق آن برابر با ۴۵b لحاظ گردید. سرعت موج برشی و دانسیته‌ی محیط به ترتیب برابر با 800 m.s^{-1} و 1 ton.m^{-3} منظور شد. پارامترهای موجک ریکر نیز به ترتیب برابر با ۳ هرتز، ۱/۵ ثانیه و ۰/۰۱ متر برای فرکانس غالب، تعویق زمان و دامنه‌ی بیشینه در نظر گرفته شد. مدل با ۵۰۰ گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه‌ای تحلیل شد. سطح تپه، حفرة و وجه میانی به ترتیب با ۱۹۸، ۳۱۳ و ۲۰۰ المان گسسته شد. در شکل ۳ تغییر مکان نورمالایز



شکل ۵. دامنه‌ی تغییر مکان نرملایز شده‌ی سطح زمین در مقابل "x/b" برای حفره‌ی دایره‌ای زیرزمینی با فرکانس بی‌بعد (الف) و (ب) ۲ در برابر امواج مهاجم قائم SH.

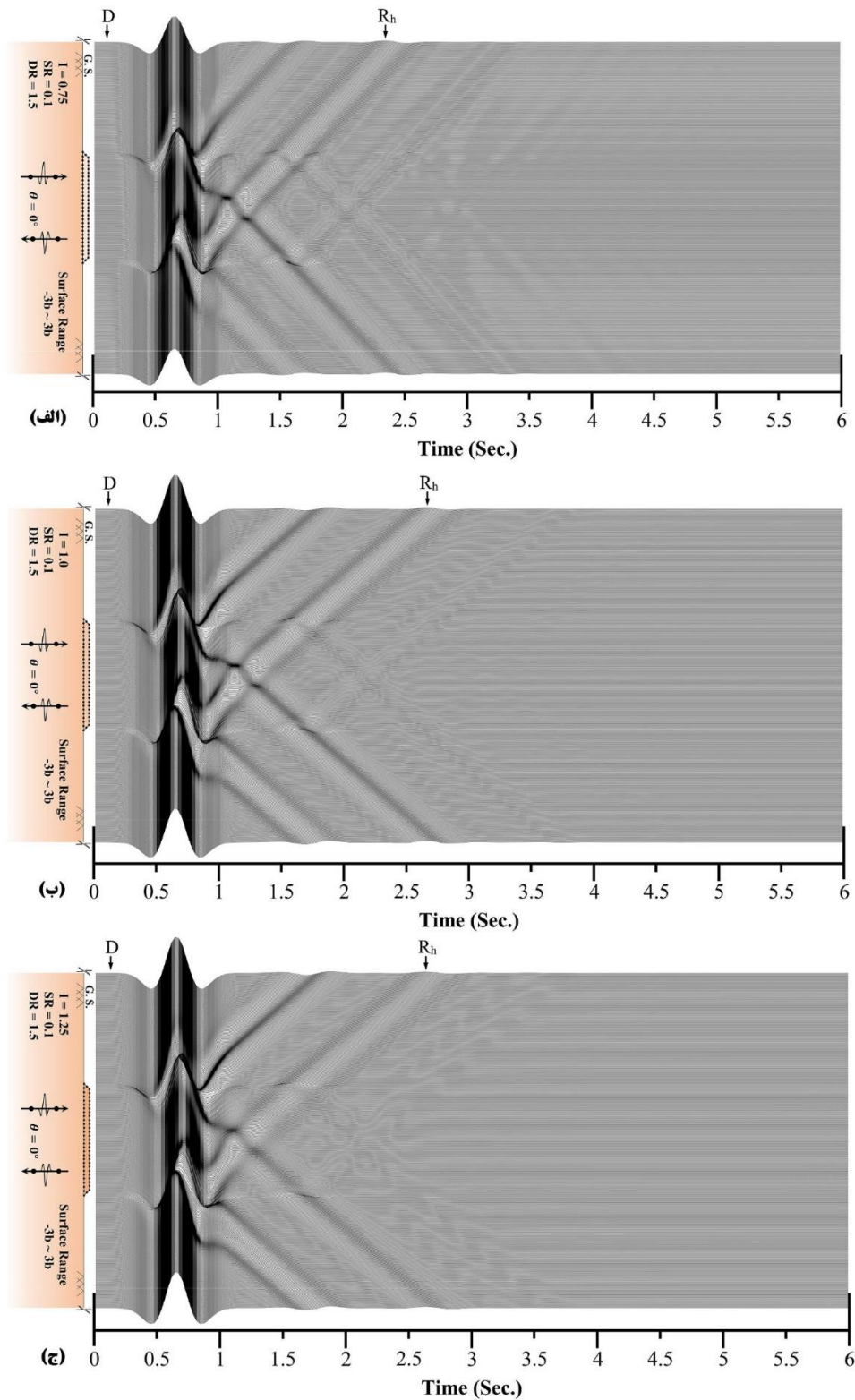
Fig. 5. The normalized displacement amplitude of the ground surface versus x/b for a subsurface circular cavity with the dimensionless frequency of (a) $\eta=0.5$ and (b) $\eta=1.0$ subjected to the vertical SH-waves

و در قلّه‌ی آن پدید می‌آید که در نتایج حوزه‌ی زمان با ایستگاه (R_H) نمایان شده است. با توجه به اعمال امواج لرزه‌ای به صورت قائم، نتایج به دست آمده در تمام حالات کاملاً متقارن می‌باشند. هنگامی که نسبت شکل تپه در کمترین مقدار خود و برابر با ۰/۱ (شکل ۶) قرار دارد، با علم بر باریک بودن ناحیه‌ی احاطه شده توسط تپه، امکان کمتری برای به دام افتادگی امواج در درون محیط تپه فراهم آمده و نتایج با سرعت بیشتری در مقایسه با نسبت شکل‌های بالاتر به همگرایی رسیده است. از مقایسه‌ی موارد (الف)، (ب) و (ج) در شکل ۶ می‌توان دریافت، هنگامی که نسبت امپدانس برابر ۰/۷۵ بوده و مصالح تشکیل دهنده‌ی تپه نرم‌تر از محیط پیرامون می‌باشد، فاصله‌ی میان ایستگاه‌های D و R_H کمتر از نسبت امپدانس ۱ (شکل ۶-ب) می‌باشد. بدین ترتیب، نرم‌تر بودن مصالح آبرفتی تپه‌ی ذوزنقه‌ای منجر به افزایش میرایی امواج و کاهش مدت زمان لازم برای همگرایی در نتایج شده است. از سوی دیگر، با مقایسه‌ی نسبت امپدانس ۱/۲۵ (شکل ۶-ج) با موارد پیشین می‌توان دریافت، مدت زمان همگرایی در این حالت به نسبت امپدانس ۱ (شکل ۶-ب) بسیار نزدیک است، اما دامنه‌ی امواج انعکاس یافته در شکل ۶-ج ضعیف‌تر از شکل ۶-ب می‌باشد. در این حالت (شکل ۶-ج)، سخت‌تر شدن مصالح تپه در مقایسه با محیط پیرامون موجب می‌شود تا امواج با سرعت بیشتری در درون تپه حرکت نموده و پس از انعکاس، به سرعت محیط را ترک نمایند. لذا فرصت لازم برای تمرکز مناسب امواج و افزایش دامنه‌ی انعکاسی به ویژه در ناحیه‌ی قلّه فراهم نمی‌شود. در نسبت شکل ۰/۳ (شکل ۷)، انعکاس‌های متناوب بیشتری در درون تپه مشاهده می‌شود که در

در شکل ۵، به منظور ارزیابی اثر حضور حفره‌ی مدفون در موقعیت تحتانی تپه ذوزنقه‌ای، یک حفره‌ی دایره‌ای توخالی با نسبت عمق ۱/۵ در نظر گرفته شده است. سپس، اثر حضور تپه با کاهش نسبت شکل آن از ۰/۵ به صفر به صورت کامل محو شده و تنها اثر حفره‌ی زیرزمینی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین باقی مانده است. در مدل مذکور، زاویه‌ی یال تپه در تمام نسبت شکل‌ها برابر با ۴۵ درجه بوده و پارامترهای مربوط به مصالح نیز مطابق با مثال‌های صحت‌سنجی پیشین در نظر گرفته شده است. در نهایت، پاسخ به دست آمده با نتایج لی (۱۹۷۷) و بنیتز و همکاران (۱۹۹۲) مقایسه شده و انطباق نتایج حاصل از پژوهش حاضر با مطالعات مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است، مطالعه‌ی لی (۱۹۷۷) به صورت تحلیلی و پژوهش بنیتز و همکاران (۱۹۹۲) با استفاده از روش اجزای مرزی غیر مستقیم صورت گرفته است.

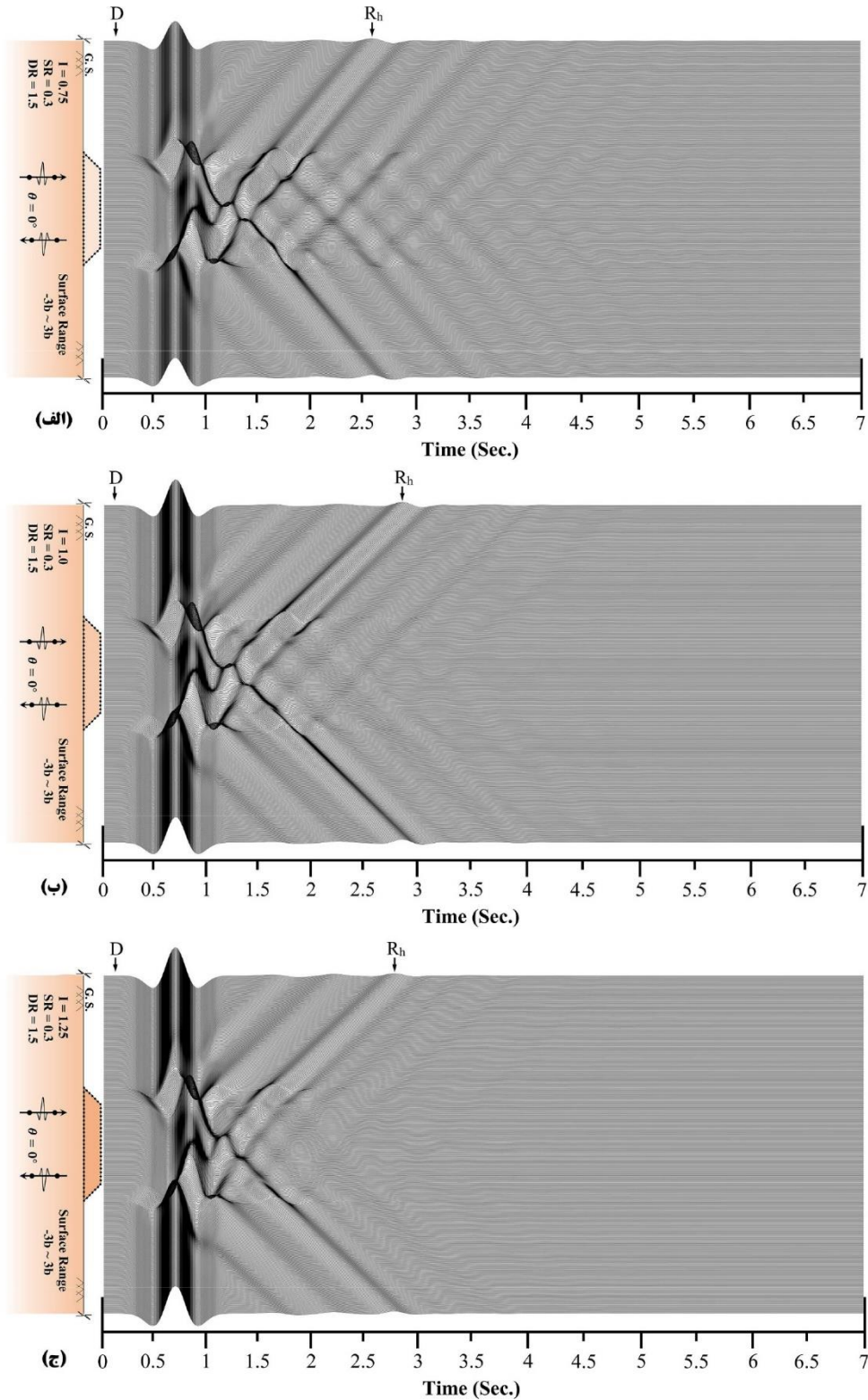
۶-۲- تحلیل در حوزه‌ی زمان

به منظور مشاهده‌ی نحوه‌ی پراکنش امواج مهاجم لرزه‌ای سطح تپه، لازم است از نتایج حوزه‌ی زمان بهره گرفته شود. لذا، شکل‌های ۶ تا ۱۰ نداشت‌های حوزه‌ی زمان را برای یک تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای منفرد در نسبت‌های امپدانس و شکل مختلف نشان می‌دهند. با اعمال امواج لرزه‌ای به مدل که با ایستگاه (D) در نتایج نمایان شده است، بخشی از موج به صورت مستقیم به قلّه برخورد نموده و بخش دیگر پس از برخورد به یال‌های تپه به سوی قلّه متمرکز می‌شود. بیشترین دامنه‌ی امواج انعکاس یافته در درون تپه



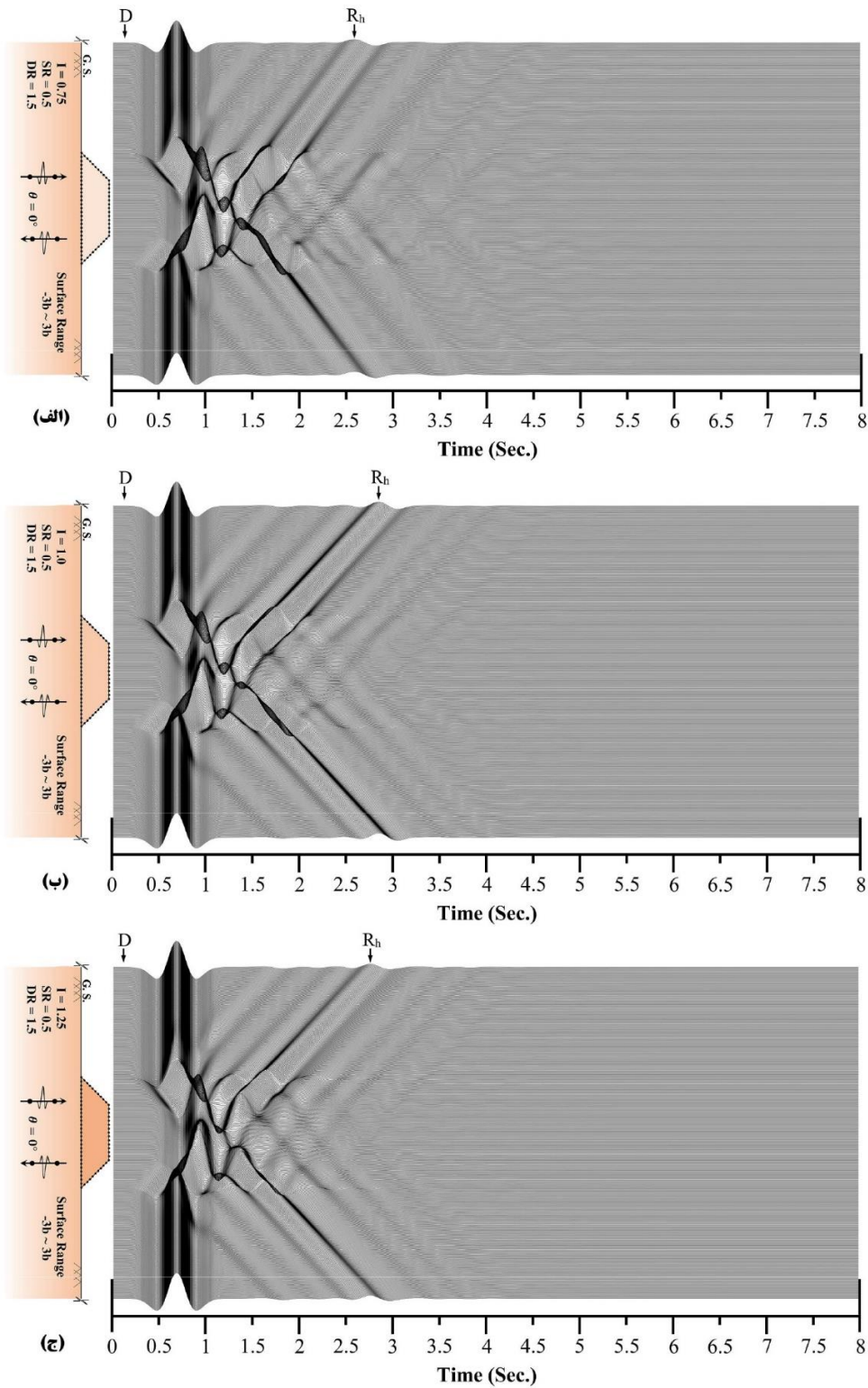
شکل ۶. الگوی کلی پاسخ تاریخی زمانی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای با نسبت شکل ۱/۰٫۷۵ (الف)، ۱/۱ (ب) و ۱/۱٫۲۵ (ج) در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 6. Synthetic seismograms of the ground surface and the procedure of the SH-waves dispersion with time, for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.1$ and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



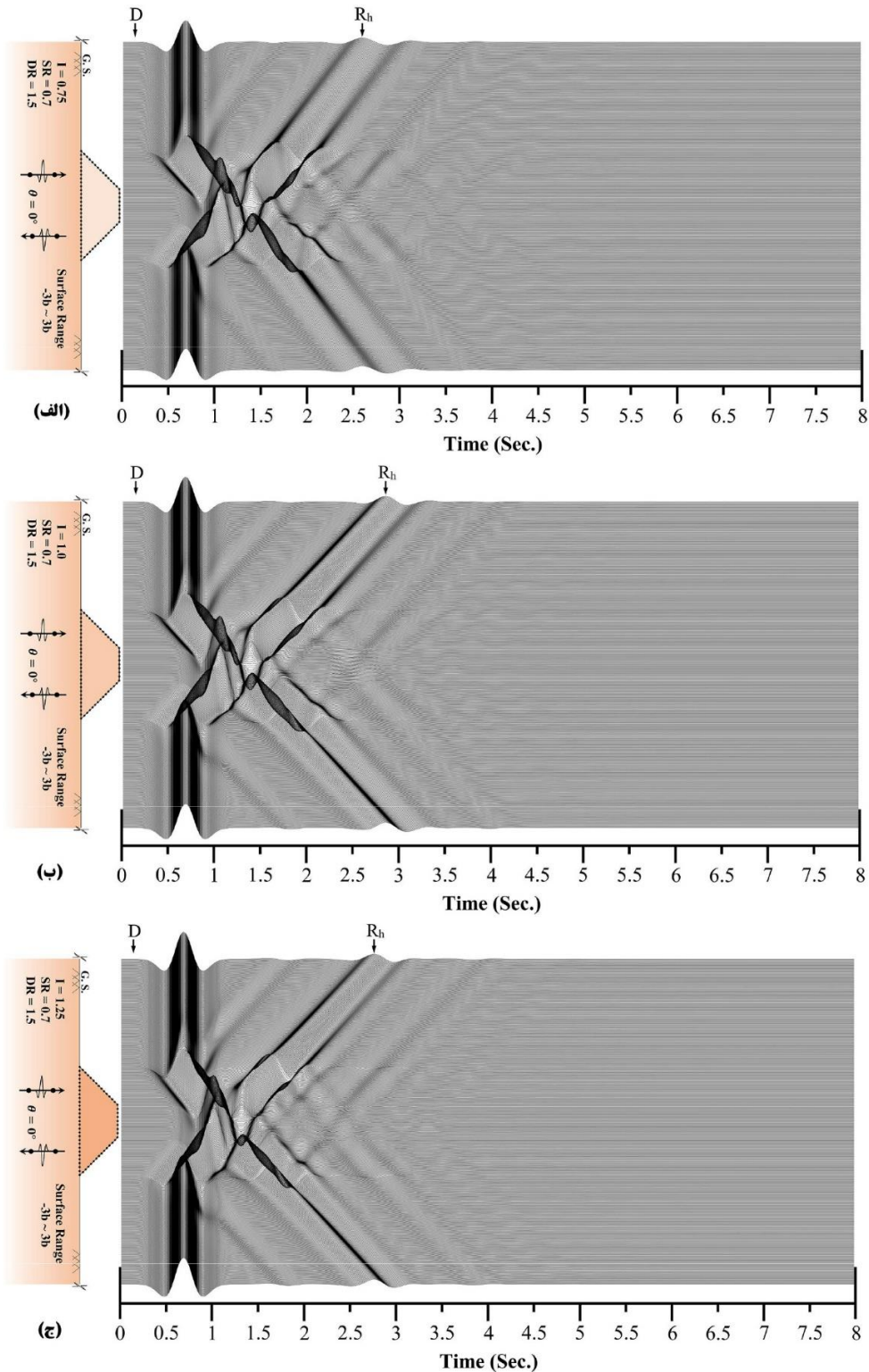
شکل ۷. الگوی کلی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۳ با نسبت امپدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH

Fig. 7. Synthetic seismograms of the ground surface and the procedure of the SH-waves dispersion with time, for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of SR=0.3 and the impedance ratio of (a) I=0.75, (b) I=1.0 and (c) I=1.25 subjected to the vertical SH-waves.



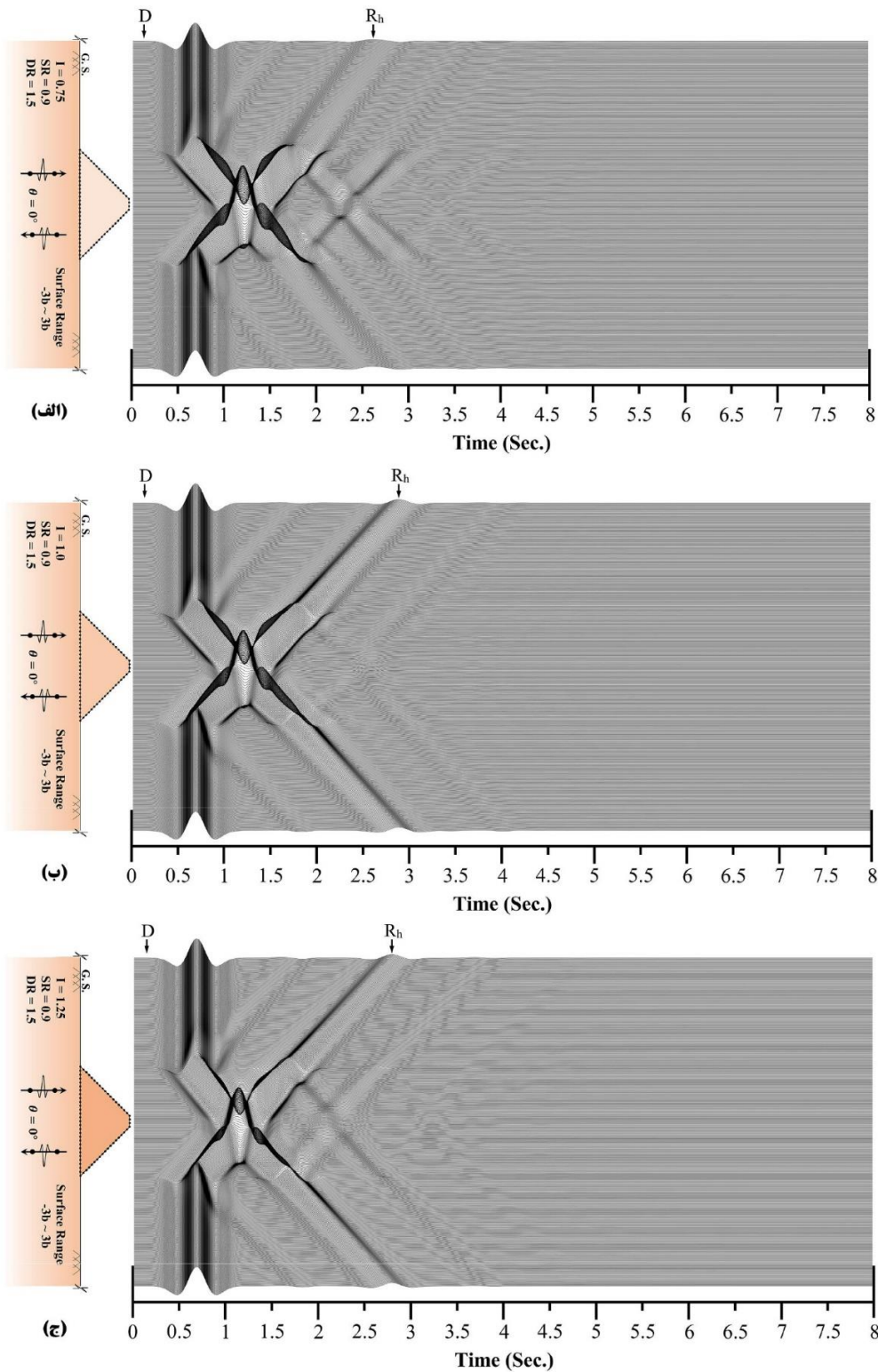
شکل ۸. الگوی کلی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۵ با نسبت امپدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 8. Synthetic seismograms of the ground surface and the procedure of the SH-waves dispersion with time, for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.5$ and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



شکل ۹. الگوی کلی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۷ با نسبت امپدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 9. Synthetic seismograms of the ground surface and the procedure of the SH-waves dispersion with time, for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.7$ and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



شکل ۱۰. الگوی کلی پاسخ تاریخچه‌ی زمانی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۹ با نسبت امپدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH

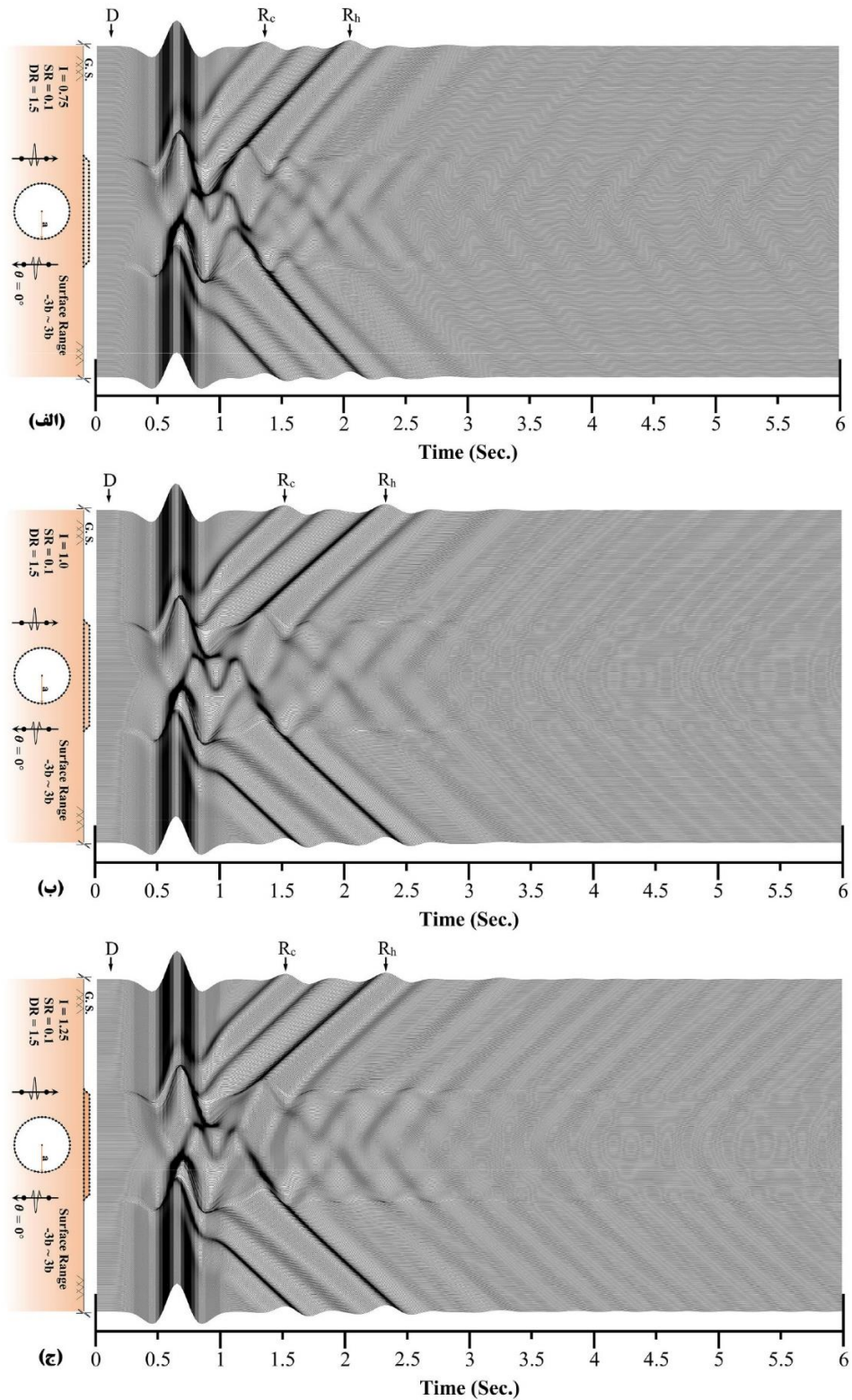
Fig. 10. Synthetic seismograms of the ground surface and the procedure of the SH-waves dispersion with time, for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.9$ and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.

زمینی برخورد می‌نمایند، بخشی از این امواج در محل مرز تحتانی حفره دچار انعکاس شده و به سطح زمین نمی‌رسند. اما، بخشی دیگر به مرزهای جناحی حفره برخورد نموده و پس از انعکاس به سطح زمین می‌رسند که دامنه‌ی این امواج در نتایج با ایستگاه (R_c) نمایان شده است. فاز دیگری از موج نیز بر روی مرز حفره خزش یافته و پس از انحراف از مسیر اولیه به سطح رسیده است که با ایستگاه (C_c) در نتایج نشان داده شده است. شکل (۱۱) بیانگر مدل یک تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۱ واقع بر یک حفره‌ی زیرزمینی می‌باشد. با مقایسه‌ی شکل‌های ۶ و ۱۱ ملاحظه می‌گردد، حضور حفره‌ی زیر زمینی باعث افزایش ارتعاش در نتایج شده است. اگر چه حضور حفره مانع از ورود بخش قابل توجه امواج لرزه‌ای مهاجم به درون محیط تپه شده است، اما از سوی دیگر باعث به دام افتادن حجم بیشتر امواج لرزه‌ای در محدوده‌ی میان مرز فوقانی حفره و تپه شده که در اثر انعکاس پیاپی امواج محصور شده، افزایش دامنه‌ی امواج انعکاسی را در پی داشته است. این در حالی است که در حالت عدم وجود حفره، امواج با سهولت بیشتر محیط مسئله را ترک نموده‌اند. لذا دامنه‌ی قوی‌تر امواج و کاهش مدت زمان همگرایی در سطح نیز برای نسبت امپدانس کمتر (شکل ۱۱-الف) مشاهده می‌شود. هنگامی که نسبت شکل به ۰/۳ (شکل ۱۲) افزایش می‌یابد، مدت زمان همگرایی نیز به صورت قابل توجهی در مقایسه با شکل (۱۱) و مدل فاقد حفره (شکل ۷) افزایش یافته است. هر چه محیط تپه بزرگ‌تر شده است، حجم امواج محصور در درون آن افزایش یافته و حضور حفره نیز به صورت قابل توجه، خروج امواج مذکور را دشوارتر نموده است. در شکل ۱۲-الف، هنگامی که نسبت امپدانس برابر با ۰/۷۵ است، تنها ایستگاه‌های R_c و R_h را می‌توان مشاهده نمود که در اثر برخورد و انعکاس امواج به مرز حفره و تپه پدید آمده‌اند. در حالی که همسان بودن مصالح تپه با محیط پیرامون (شکل ۱۲-ب) موجب نمایان شدن ایستگاه C_c در پاسخ شده است. هنگامی که هر دو محیط کاملاً همسان هستند، امواج بدون هیچ‌گونه تغییر ناشی از تفاوت در جنس مصالح به سطح تپه برخورد نموده‌اند، لذا اثر فاز خزشی (C_c) امواج ورودی به صورت مستقیم بر روی سطح نمایان شده است. از سوی دیگر، در نسبت امپدانس ۱/۲۵ (شکل ۱۲-ج)، فاز خزشی موج در سطح مشاهده نمی‌شود که به دلیل سرعت بیشتر گذر موج از مصالح تپه و انطباق مسیرهای R_h و C_c در نتیجه‌ی حاصل شده می‌باشد. با افزایش نسبت شکل تپه به ۰/۵ (شکل ۱۳)، علاوه بر بروز ارتعاش بیشتر در نتایج، ایستگاه C_c نیز در نسبت امپدانس ۰/۷۵ (شکل ۱۳-الف) ظاهر شده است. بزرگ‌تر شدن فضای تپه موجب آزادی بیشتر حرکت فازهای مختلف موج شده که

نتیجه‌ی آن، ارتعاش بیشتر در پاسخ حاصل شده است. در این مدل (شکل ۷) نیز هر چه نسبت امپدانس مصالح کمتر است، مسیرهای پراکنش ضعیف‌تری از امواج در محیط تپه شکل گرفته است. با نگاهی موشکافانه به این موضوع می‌توان دریافت، هنگامی که نسبت امپدانس برابر با ۰/۷۵ (شکل ۷-الف) است، مرز وجه میانی تپه با نیم‌صفحه‌ی تحتانی به میزان بیشتری مشابه آینه عمل نموده و امکان ورود امواج به درون تپه را دشوار می‌نماید. از سوی دیگر، مانع از خروج آسان امواج وارد شده به درون تپه می‌شود. اما در نسبت‌های امپدانس بیشتر، امواج با سهولت و آزادی بیشتر وارد تپه شده و از آن خارج می‌گردند، لذا اولین انعکاس با قدرت بیشتری اتفاق افتاده و چون امواج انعکاس یافته محیط تپه را با سرعت بیشتری ترک نموده‌اند، انعکاس متناوب کمتری پدید آمده است. شکل ۸ بیانگر نتایج تپه‌ای با نسبت شکل ۰/۵ می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، آشفتگی بیشتر در نتایج نسبت به شکل‌های ۶ و ۷ مشهود است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت، هر چه نسبت شکل تپه بزرگ‌تر شود، امکان ورود حجم بیشتری از امواج لرزه‌ای به درون مصالح آن فراهم می‌آید. این امواج پس از انعکاس از مرزها، در درون محیط تپه به دام افتاده و تکرار انعکاسی را تجربه می‌کنند که منجر به افزایش ارتعاش در نتایج می‌گردد. این پدیده، در نسبت‌های امپدانس کمتر تا حد بیشتری آشکار می‌باشد. از سوی دیگر، افزایش نسبت شکل تپه باعث افزایش مدت زمان همگرایی نتایج می‌شود، زیرا زمان بیشتری لازم است تا امواج از محیط تپه خارج شوند. با افزایش نسبت شکل به ۰/۷ (شکل ۹) مشاهده می‌شود، تداخل انعکاسی قوی در رأس تپه پدید آمده است. این اثر در نسبت شکل ۰/۹ (شکل ۱۰) که دارای تیزترین قله نسبت به سایر مدل‌ها است به وضوح قابل رؤیت است. مقایسه‌ی پاسخ‌ها برای نسبت‌های مختلف امپدانس در شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز نشان می‌دهد، بیشترین میزان دامنه‌ی انعکاسی امواج در کمترین نسبت امپدانس (۰/۷۵) حاصل شده است. بنابراین، مخرب‌ترین اثر ناشی از زمین لرزه در حالتی به وقوع پیوسته است که نسبت شکل برابر با ۰/۹ و نسبت امپدانس برابر با ۰/۷۵ بوده است.

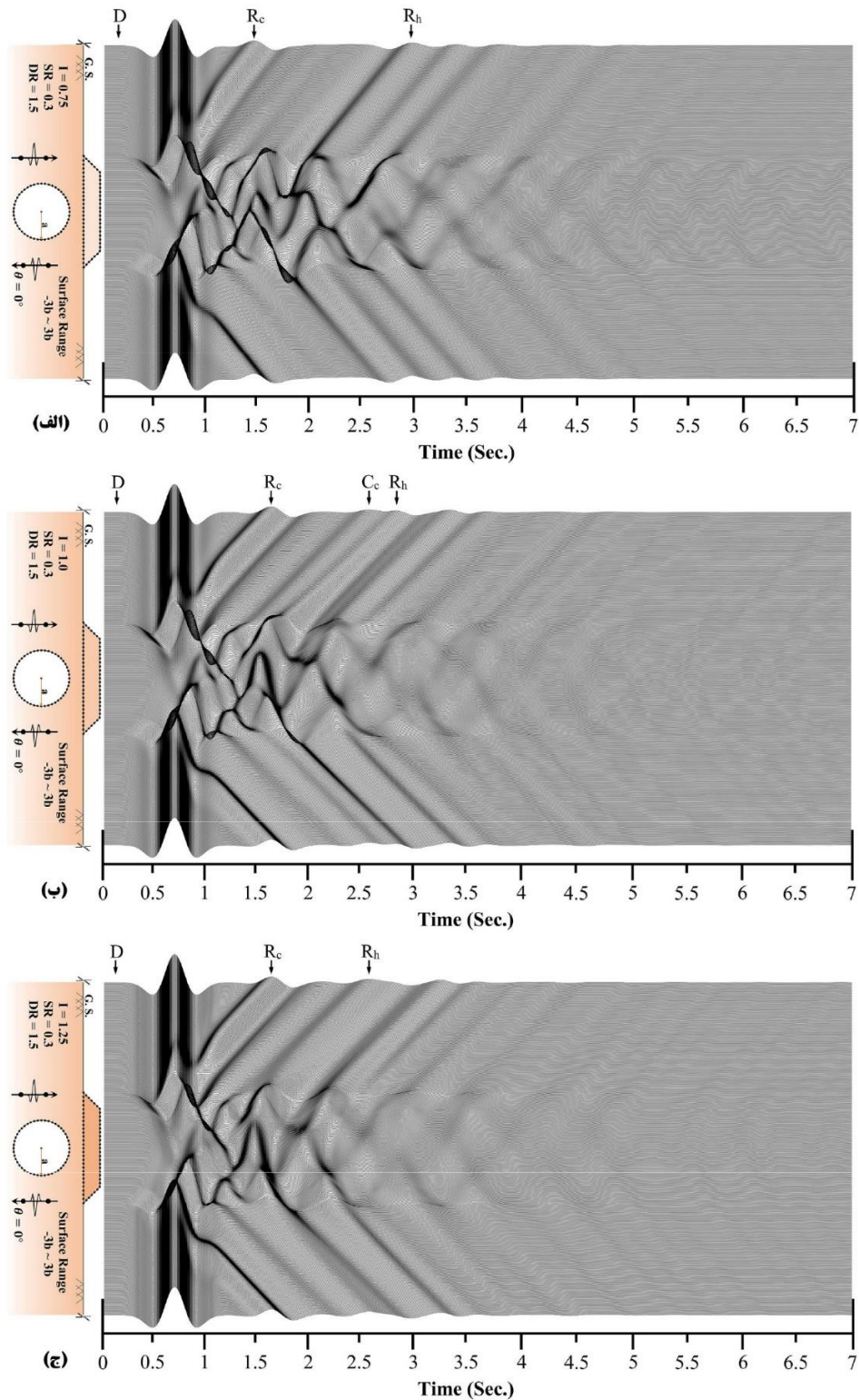
۶-۲-۱- تأثیر حضور حفره

در ادامه به بررسی اثر حضور یک حفره‌ی توخالی زیرسطحی در محل استقرار تپه آبرفتی دوزنقه‌ای پرداخته شده که نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ ارائه شده است. حفره‌ی زیرزمینی به صورت دایره‌ای و با قطر b فرض شده که در نسبت عمق ثابت برابر با ۱/۵ واقع شده است. هنگامی که امواج لرزه‌ای با زاویه‌ی تابش قائم به یک حفره‌ی توخالی زیر



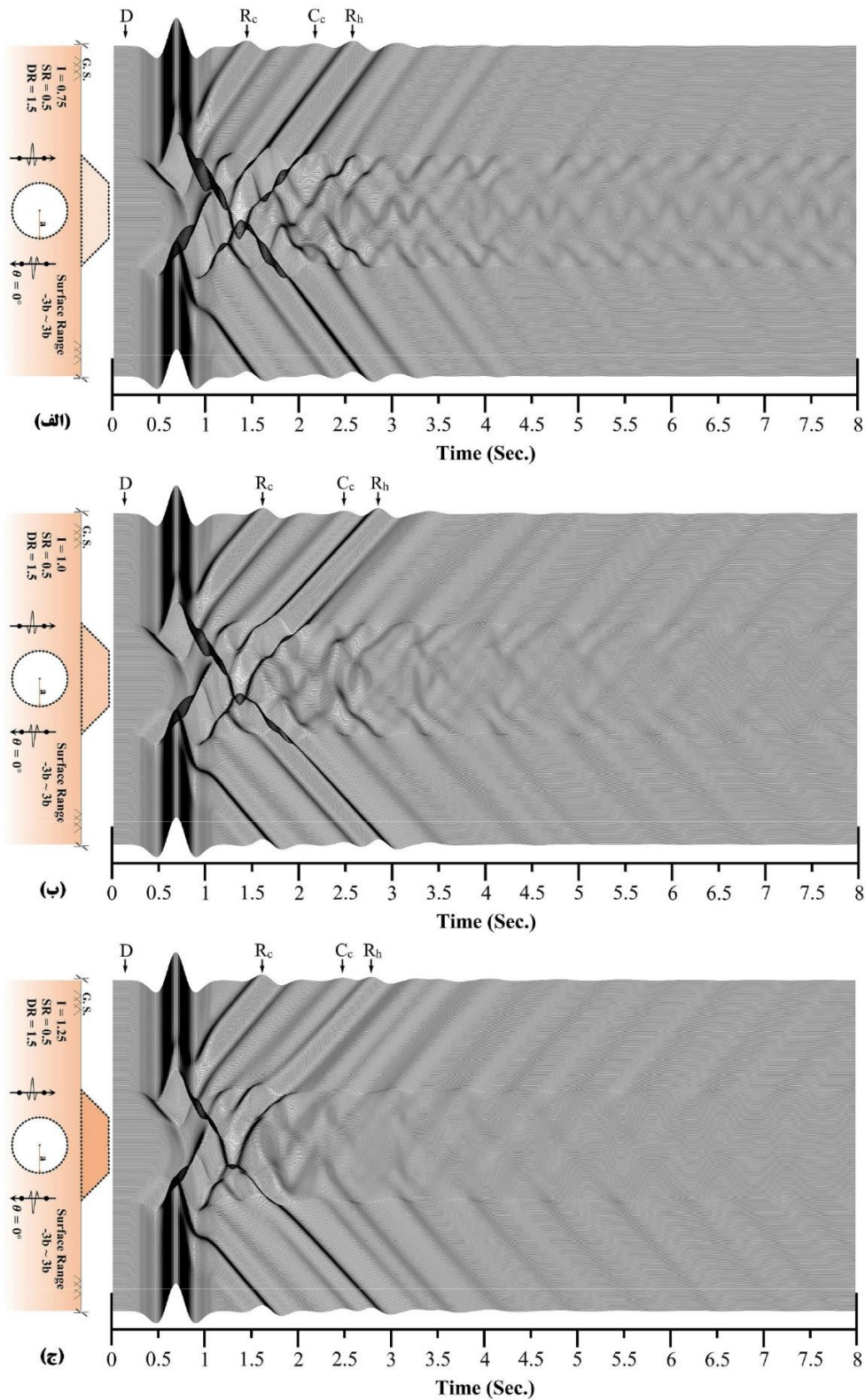
شکل ۱۱. الگوی کلی پاسخ تاریخی‌چهی زمانی سطح زمین در حضور تیبه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۱ واقع بر حفره‌ی دایره‌ای با نسبت امپدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 11. Synthetic seismograms of the ground surface and the procedure of the SH-waves dispersion with time, for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.1$ on a circular cavity and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



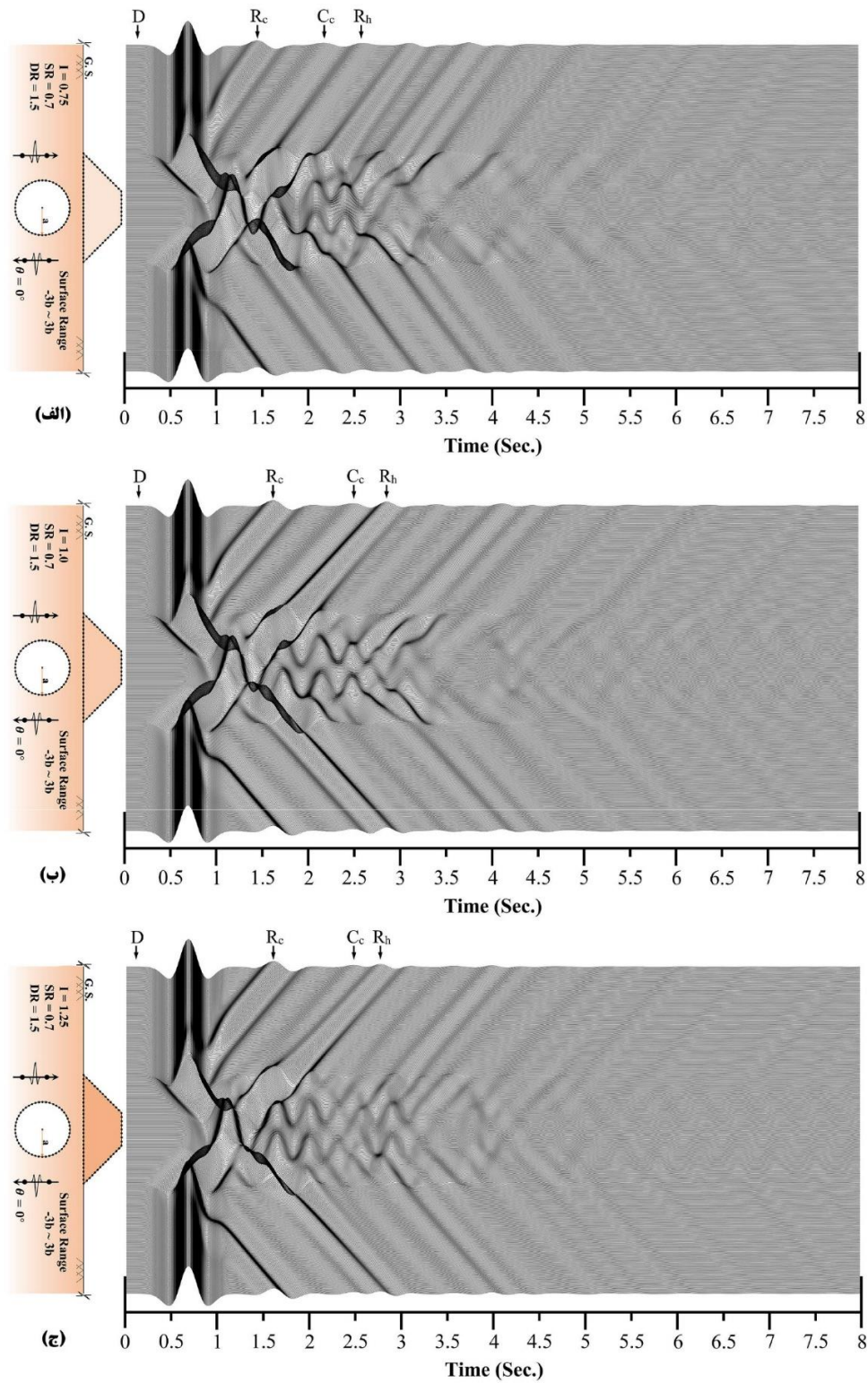
شکل ۱۲. الگوی کلی پاسخ تاریخی زمانی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۳ واقع بر حفره‌ی دایره‌ای با نسبت امپدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 12. Synthetic seismograms of the ground surface and the procedure of the SH-waves dispersion with time, for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.3$ on a circular cavity and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



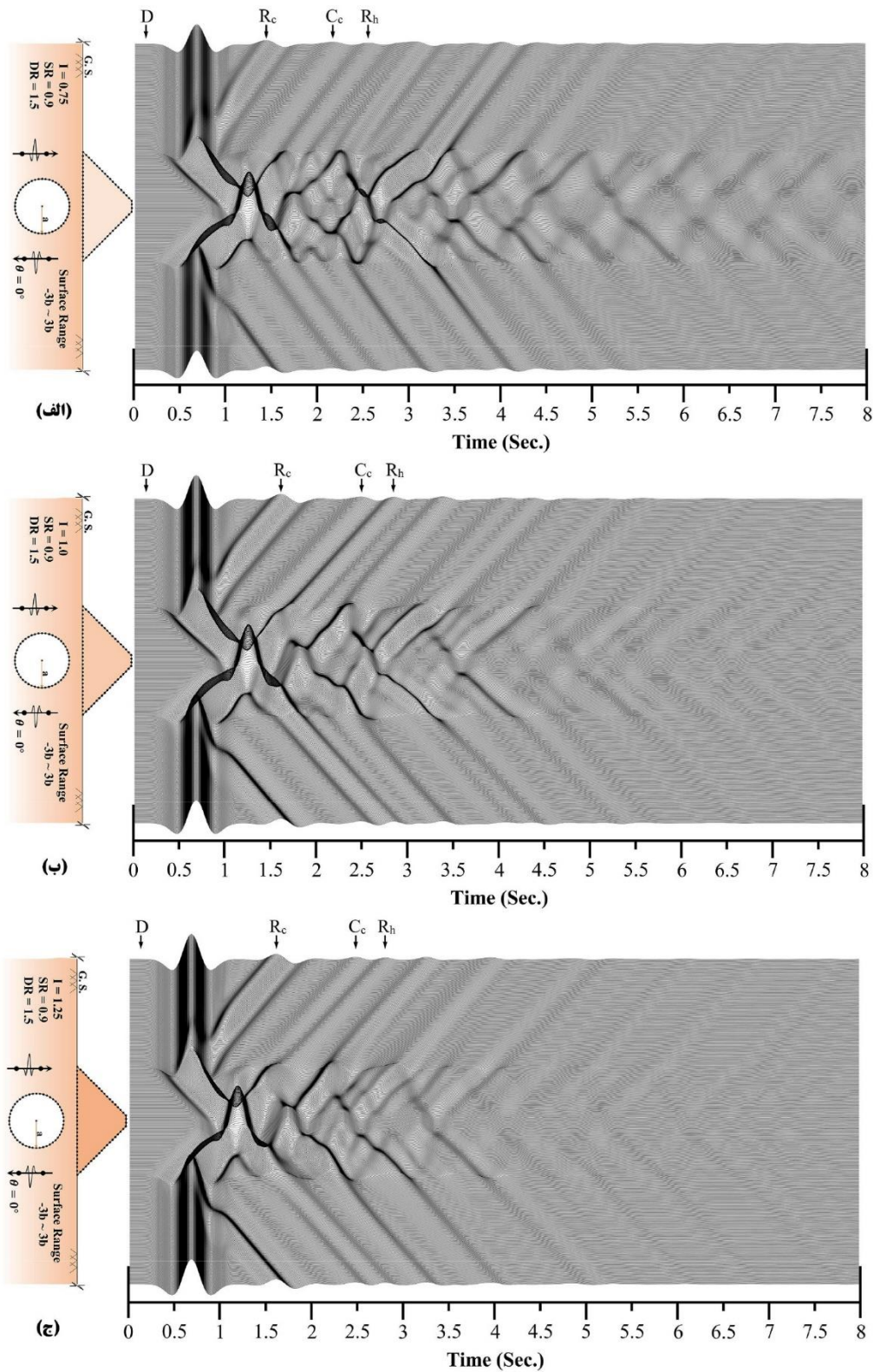
شکل ۱۳. الگوی کلی پاسخ تاریخی زمانی سطح زمین در حضور تپه‌ی ابرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۵ واقع بر حفره‌ی دایره‌ای با نسبت امپدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 13. Synthetic seismograms of the ground surface and the procedure of the SH-waves dispersion with time, for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of SR=0.5 on a circular cavity and the impedance ratio of (a) I=0.75, (b) I=1.0 and (c) I=1.25 subjected to the vertical SH-waves.



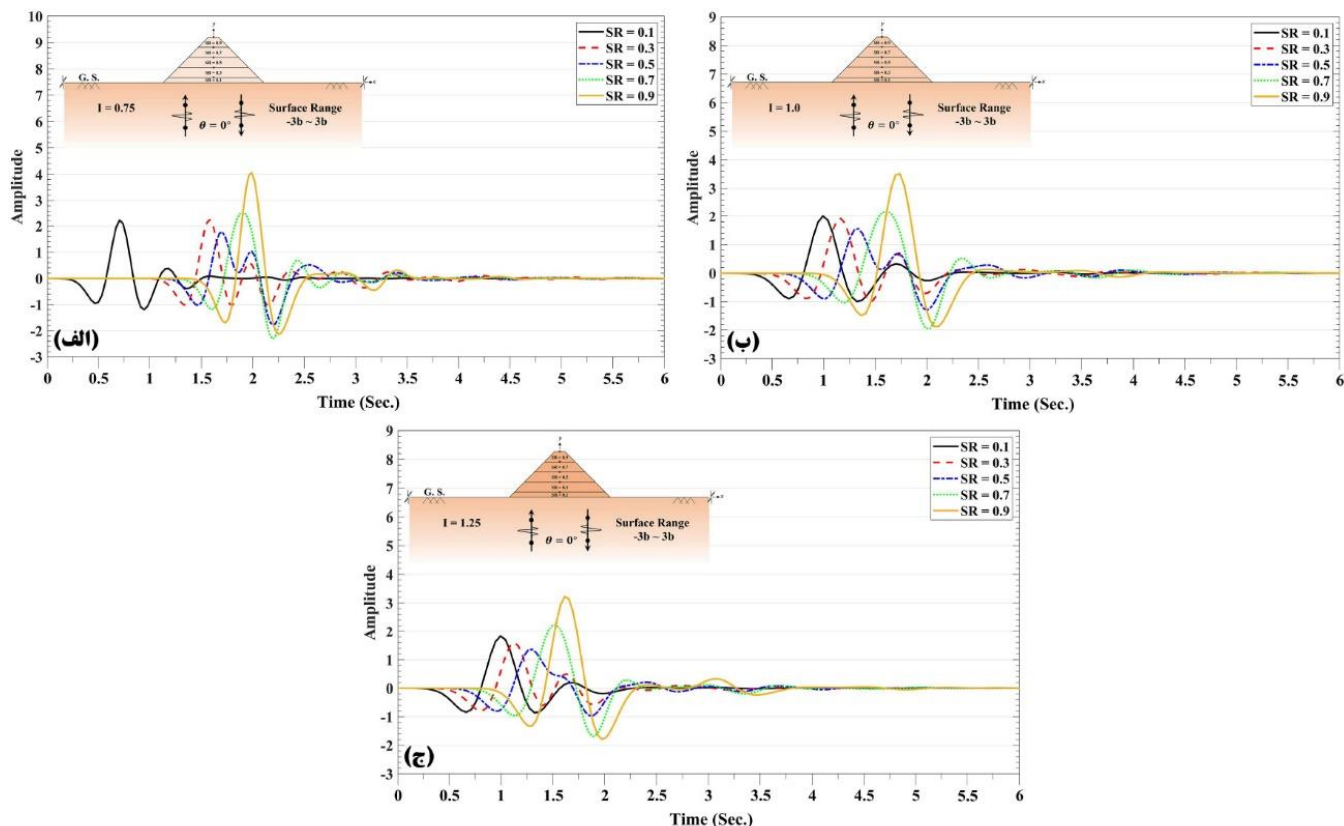
شکل ۱۴. الگوی کلی پاسخ تاریخی‌چندی زمانی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل 0.7 واقع بر حفره‌ی دایره‌ای با نسبت امپدانس (الف) 0.75 ، (ب) 1 و (ج) 1.25 در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 14. Synthetic seismograms of the ground surface and the procedure of the SH-waves dispersion with time, for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.7$ on a circular cavity and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



شکل ۱۵. الگوی کلی پاسخ تاریخی زمانی سطح زمین در حضور تپه ی آبرفتی دوزنقه ای با نسبت شکل ۰/۹ واقع بر حفره ی دایره ای با نسبت امپدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 15. Synthetic seismograms of the ground surface and the procedure of the SH-waves dispersion with time, for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of SR=0.9 on a circular cavity and the impedance ratio of (a) I=0.75, (b) I=1.0 and (c) I=1.25 subjected to the vertical SH-waves.



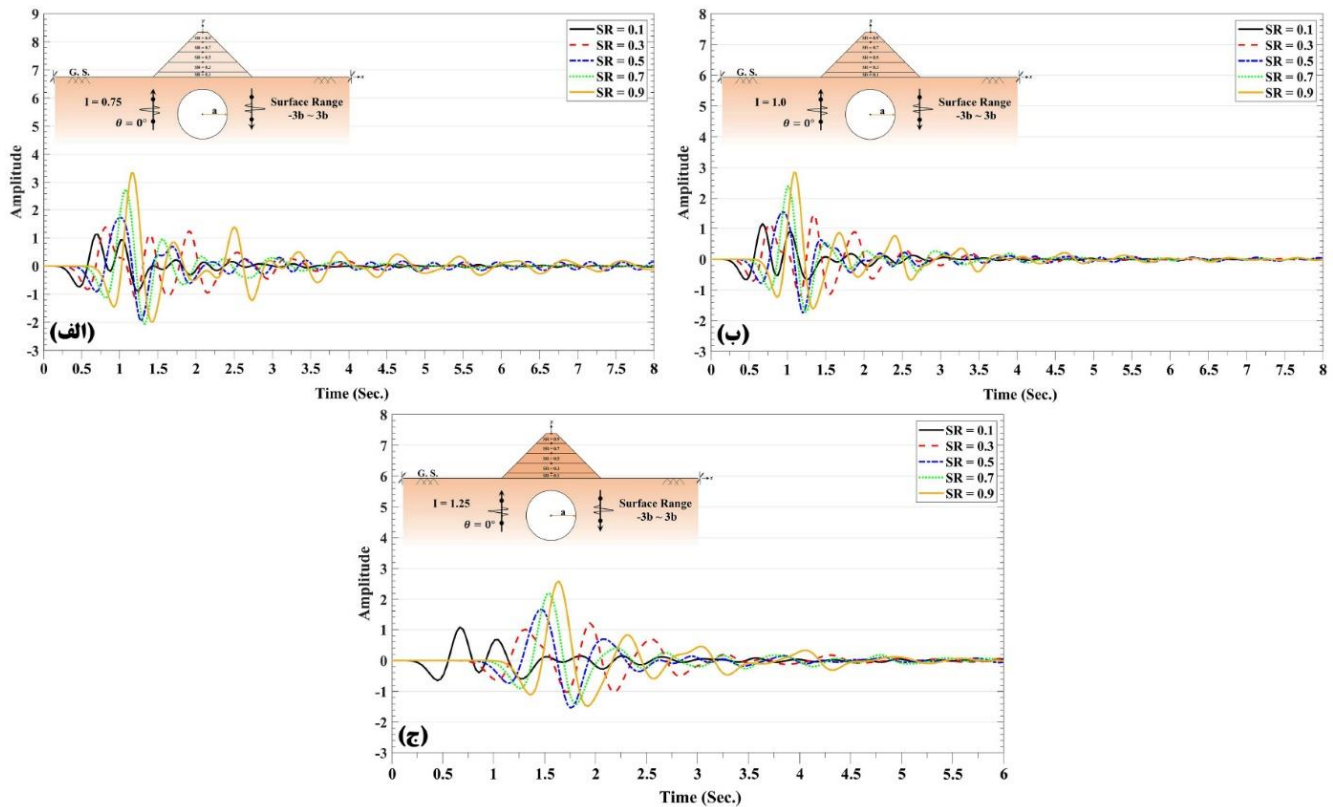
شکل ۱۶. دامنه‌ی امواج پراکنش یافته در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت امپدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 16. The amplitude of propagated waves in presence of a trapezoidal shaped alluvial valley with the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.

که تپه دارای بیشترین ارتفاع (نسبت شکل ۰/۹) و کمترین نسبت امپدانس (۰/۷۵) است. در شکل ۱۵-الف بیشترین دامنه‌ی تداخل انعکاسی امواج در محل قلّه پدید آمده است که از تمرکز فازهای موجی برخوردی به یال‌های تپه حاصل شده است.

در شکل ۱۶، نمودارهای دو بعدی دامنه برحسب زمان برای نسبت‌های امپدانس و شکل مختلف در موقعیت مرکز تپه نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، بیشترین دامنه در نسبت امپدانس ۰/۷۵ و برای نسبت شکل ۰/۹ ثبت شده که برابر با ۴ می‌باشد. همچنین، در شکل ۱۷ اثر حضور حفره‌ی تو خالی زیر زمینی نیز در نظر گرفته شده است. در این حالت، بالاترین میزان ارتعاش و بیشترین دامنه‌ی ثبت شده در همین

توانسته‌اند پیش از تداخل با سایر فازهای موج، خود را در سطح نمایان سازند. همچنین، کاهش نسبت امپدانس به ۰/۷۵ (شکل ۱۳-الف) بیشترین ارتعاش را در مقایسه با سایر نسبت‌های امپدانس (شکل ۱۳-ب و ج) به وجود آورده است که اثر محصور شدگی امواج لرزه‌ای در مصالح نرم‌تر را آشکار می‌سازد. با افزایش نسبت شکل تپه به ۰/۷ (شکل ۱۴) مشاهده می‌شود، فاصله‌ی میان ایستگاه‌های C_c و R_h در مقایسه با مدل‌های پیشین افزایش یافته است. هر چه ارتفاع تپه بیشتر شده است، مدت زمان بیشتری برای تجمع امواج در رأس تپه لازم بوده و همین پدیده باعث افزایش وقفه‌ی زمانی میان ایستگاه‌های مذکور شده است. اما، بحرانی‌ترین حالت زمانی رخ داده است



شکل ۱۷. دامنه‌ی امواج پراکنش یافته در حضور تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای واقع بر حفره‌ی دایره‌ای با نسبت امپدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH.

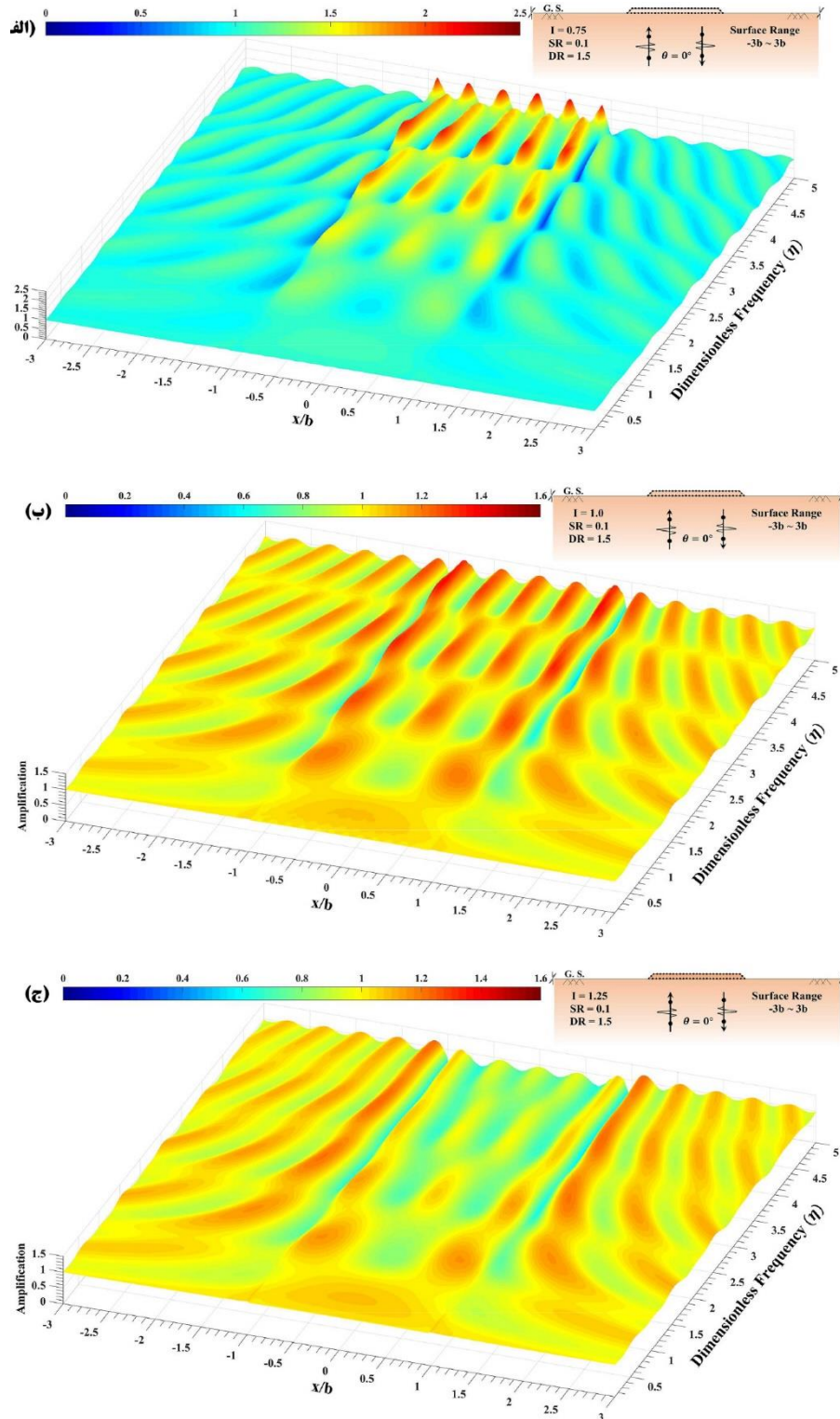
Fig. 17. The amplitude of propagated waves in presence of a trapezoidal shaped alluvial valley with the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ on a circular cavity and subjected to the vertical SH-waves.

بیشترین بزرگ‌نمایی حاصل در سطح تپه با امپدانس ۰/۷۵ (شکل ۱۸-الف) به میزان ۲/۵ می‌باشد. این در حالی است که در نسبت امپدانس ۱ (شکل ۱۸-ب)، این مقدار به ۱/۶ و در نسبت امپدانس ۱/۲۵ (شکل ۱۸-ج) به ۱/۲ کاهش یافته است. اگر چه محیط تپه در نسبت شکل ۰/۱ (شکل ۱۸) بسیار کوچک است، منتها نرم شدن تپه در امپدانس حداقل (۰/۷۵) با افزایش تفرق امواج محصور شده و متعاقباً فزونی بزرگ‌نمایی در مقایسه با دیگر نسبت‌ها را شامل می‌شود. زمانی که نسبت امپدانس برابر با ۱ واحد است (شکل ۱۸-ب)، همسان بودن مصالح تپه با محیط پیرامون موجب کاهش اثر محسوس حضور تپه می‌شود. با توجه به سخت شدن مصالح تپه در مقایسه با محیط پیرامون در نسبت امپدانس ۱/۲۵ (شکل ۱۸-ج)، امواج لرزه‌ای با

نسبت امپدانس و شکل بوده که برابر با ۳/۴ می‌باشد. بنابراین، هر چه ارتفاع تپه افزایش یافته و مصالح تشکیل دهنده آن نرم‌تر باشد، خطر بیشتری سازه‌های سطحی واقع بر تپه را در حین زمین لرزه تهدید می‌نماید.

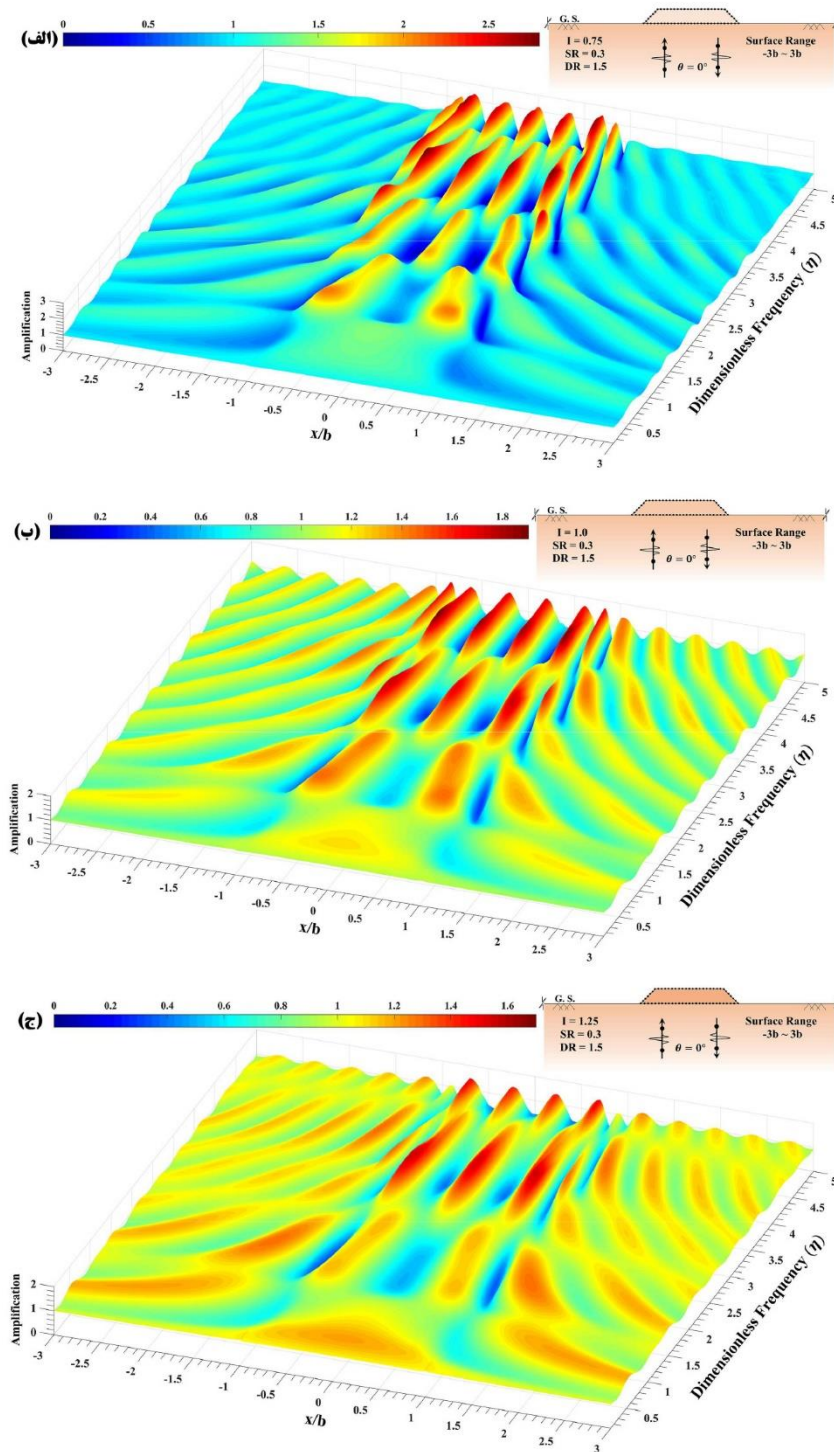
۳-۶- تحلیل در حوزه‌ی فرکانس

با استفاده از نتایج حوزه‌ی فرکانس می‌توان بزرگ‌نمایی‌های ایجاد شده در نواحی مختلف سطح تپه را مشاهده نمود. شکل‌های ۱۸ تا ۲۲ پاسخ‌های سه‌بعدی حوزه‌ی فرکانس را برای یک تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای با نسبت‌های امپدانس و شکل مختلف در محدوده‌ی فرکانس بی‌بعد ۰/۲۵ تا ۵ نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده برای نسبت شکل ۰/۱ (شکل ۱۸)،



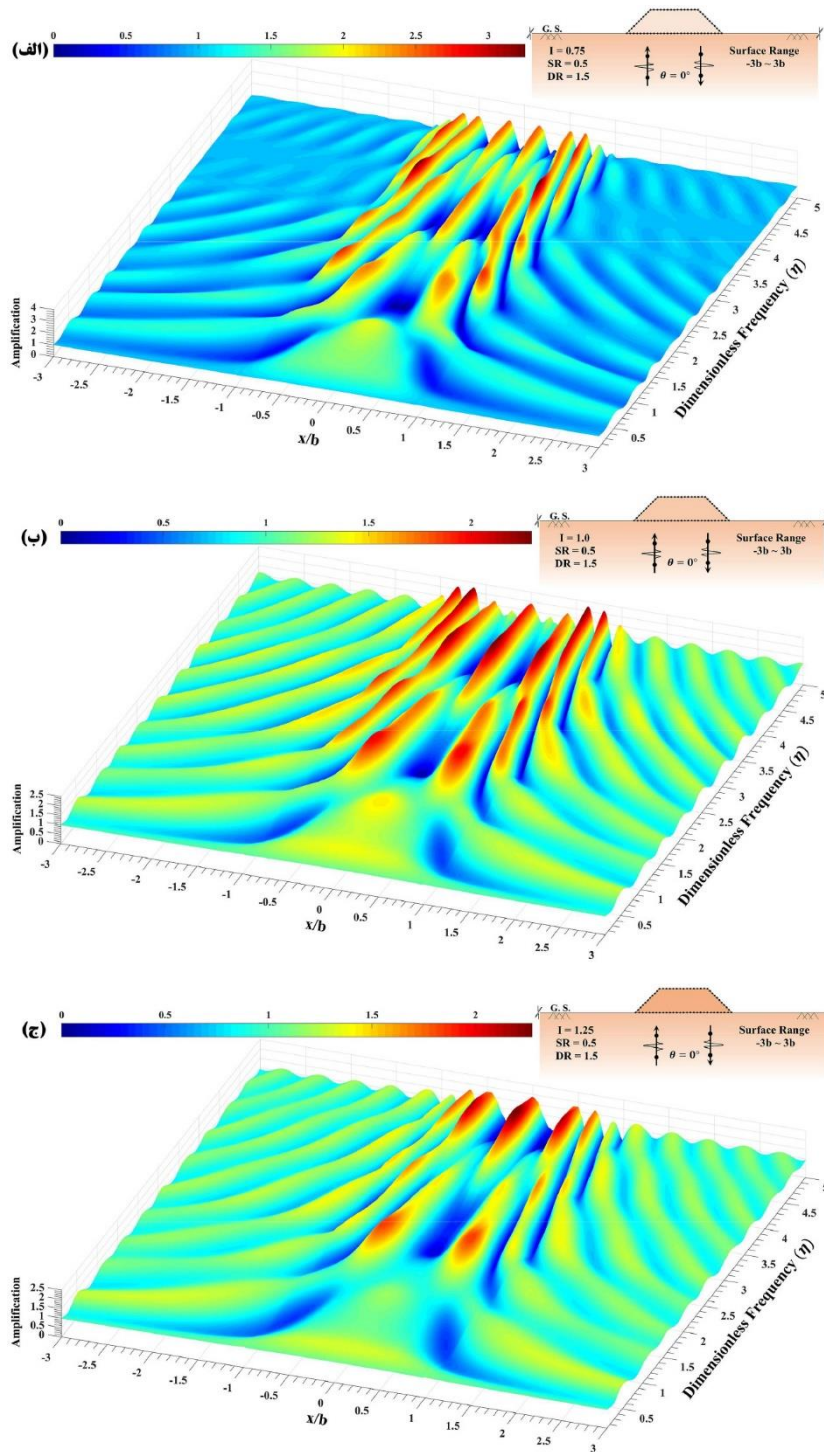
شکل ۱۸. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل $1/1$ با نسبت امپدانس (الف) $0.75/1$ ، (ب) $1/1$ و (ج) $1.25/1$ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 18. The 3D amplification of the ground surface versus different dimensionless frequencies for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.1$ and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



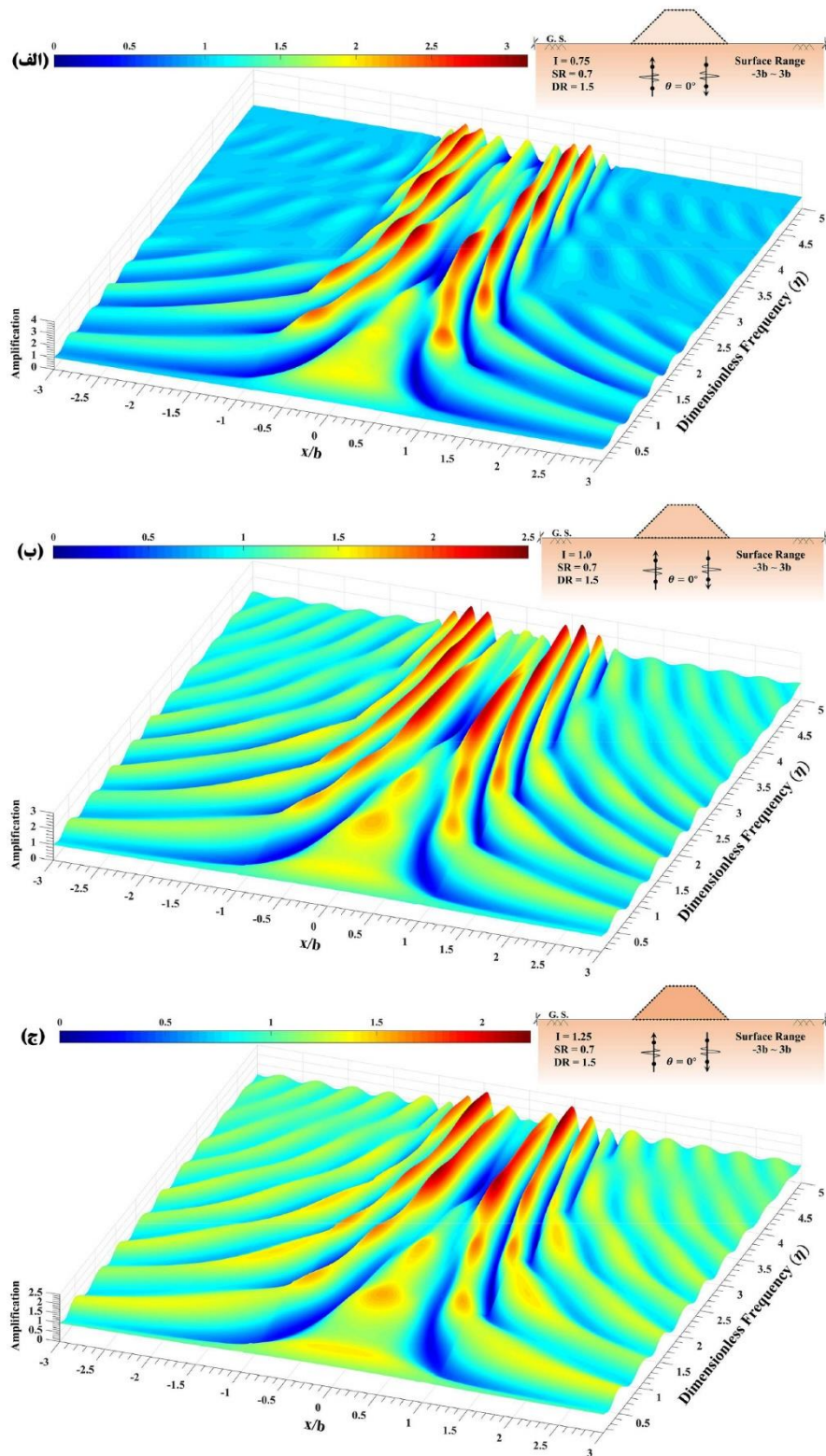
شکل ۱۹. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل 0.3 با نسبت امپدانس (الف) 0.75 ، (ب) 1.0 و (ج) 1.25 در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 19. The 3D amplification of the ground surface versus different dimensionless frequencies for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.3$ and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



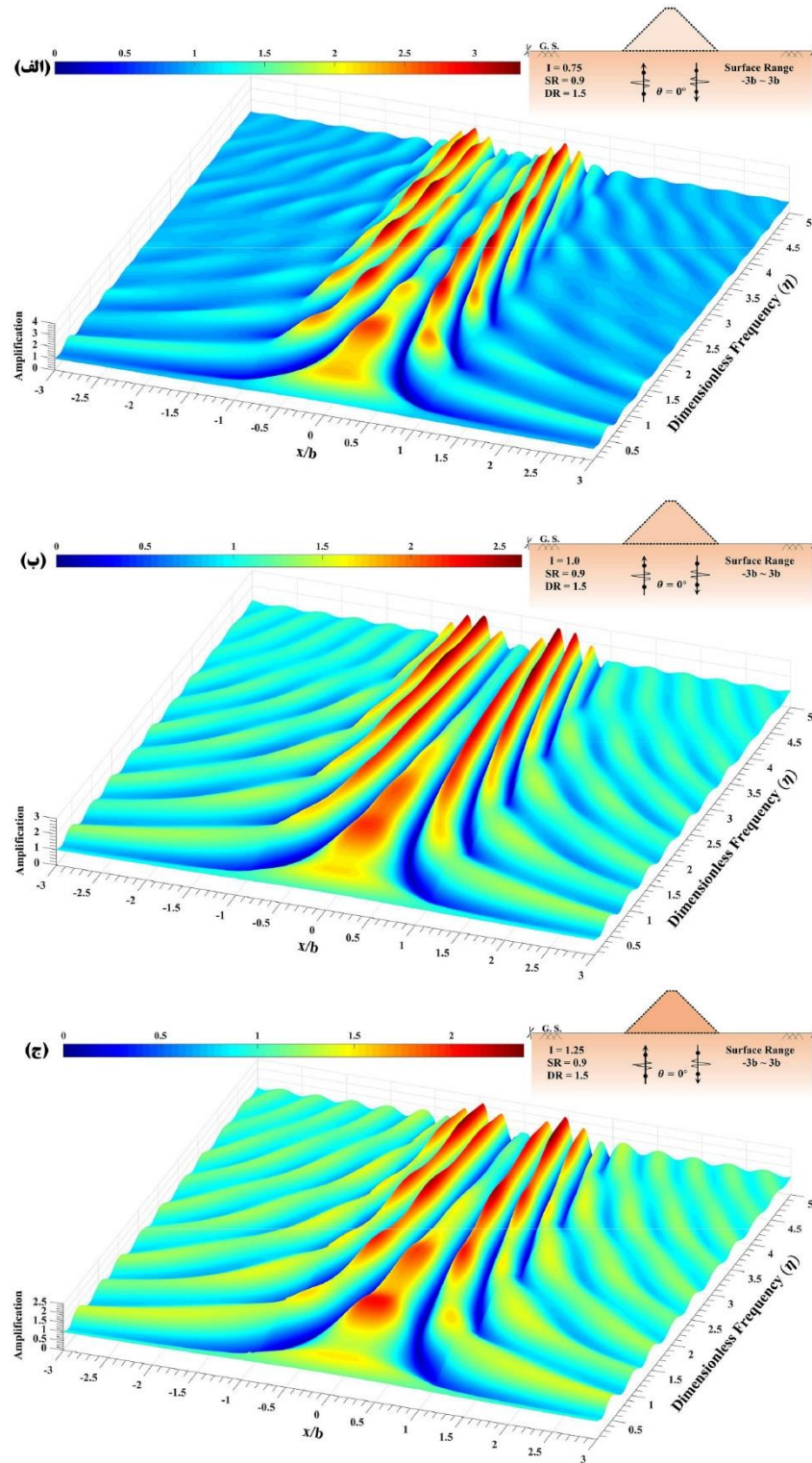
شکل ۲۰. الگوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور تپه‌ی ابرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۵ با نسبت امپدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig.20. The 3D amplification of the ground surface versus different dimensionless frequencies for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.5$ and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



شکل ۲۱. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای با نسبت شکل $0.7/1$ با نسبت امیدانس (الف) $0.75/1$ ، (ب) ۱ و (ج) $1.25/1$ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 21. The 3D amplification of the ground surface versus different dimensionless frequencies for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.7$ and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



شکل ۲۲. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل $0.9/1$ با نسبت امپدانس (الف) $0.75/1$ ، (ب) $1.0/1$ و (ج) $1.25/1$ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 22. The 3D amplification of the ground surface versus different dimensionless frequencies for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.9$ and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.

بروز بزرگ‌نمایی‌های به مراتب قوی‌تر در مقایسه با نسبت شکل ۰/۱ (شکل ۲۳) با مقداری فراتر از ۴ نمایان شده است. بیشتر شدن ارتفاع تپه در نسبت شکل ۰/۵ (شکل ۲۵) باعث شده تا اثر وجود حفره به میزان زیادی در مقایسه با نسبت شکل‌های کوچک‌تر تضعیف شود و امواج بتوانند بر نقاط مختلف تپه تأثیر بگذارند و بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی را به مقدار ۴/۵ در نسبت امیدانس ۰/۷۵ (شکل ۲۵-الف) افزایش دهند. همانطور که در نسبت امیدانس ۱ (شکل ۲۵-ب) نیز مشهود است، اثر بزرگ‌نمایی ناشی از برخورد امواج به خوبی در محل تاج تپه قابل مشاهده است. این در حالی است که در نسبت امیدانس ۱/۲۵ (شکل ۲۵-ج)، زمان لازم به تمرکز امواج در محل قلّه فراهم نبوده و یال‌های تپه دچار بزرگ‌نمایی بیشتری شده‌اند. همچنین در نسبت شکل‌های ۰/۷ (شکل ۲۶) و ۰/۹ (شکل ۲۷) ملاحظه می‌شود، نقاط دارای بزرگ‌نمایی در درون تپه به صورت کاملاً مجزا از یکدیگر می‌باشند. این اثر به ویژه در نسبت امیدانس ۰/۷۵ (شکل‌های ۲۶-الف و ۲۷-الف) با وضوح بیشتری قابل مشاهده است. آنچه مسلم است، هر چه مقطع تپه بزرگ‌تر باشد، توالی انعکاس امواج نیز افزایش یافته و بزرگ‌نمایی در نقاط مجزای بیشتری مشاهده می‌شود. چنانچه ملاحظه می‌گردد، بیشترین مقادیر بزرگ‌نمایی در نسبت شکل ۰/۵ و ۰/۹ برای نسبت امیدانس ۰/۷۵ (شکل‌های ۲۵-الف و ۲۷-الف) و برابر با ۴/۵ بوده است. نکته‌ی قابل توجه آن است که در نسبت شکل ۰/۵، بیشترین بزرگ‌نمایی در محدودی فرکانسی ۴/۵ تا ۵ رویت شده، این در حالی که در نسبت شکل ۰/۹ بیشینه‌ی بزرگ‌نمایی در فرکانس ۱ حاصل شده است.

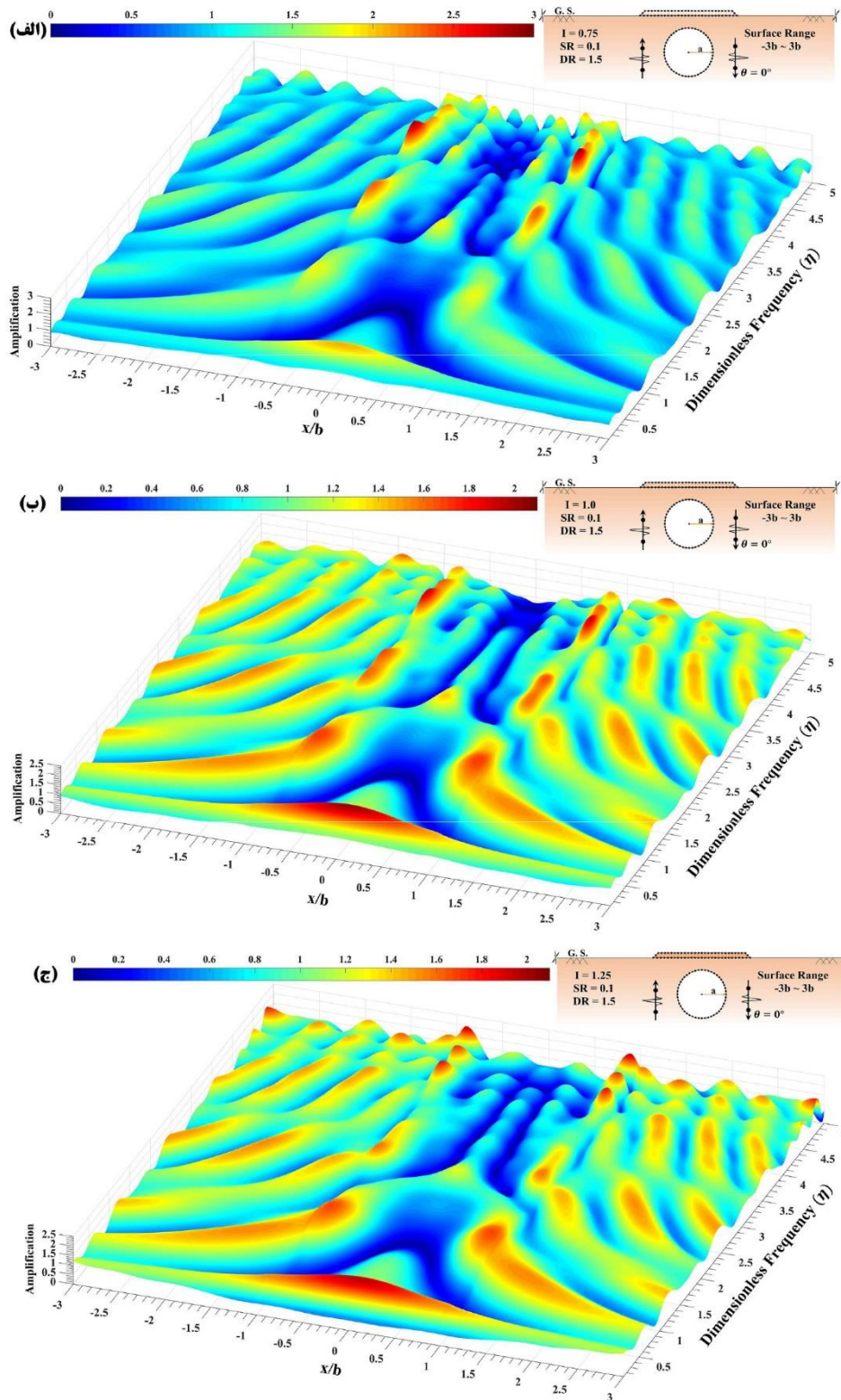
۳-۳-۲- تأثیر نسبت شکل تپه

به منظور ارزیابی دقیق دامنه‌ی تغییر مکان حاصل در سطح تپه با نسبت‌های شکل مختلف، شکل‌های (۲۸) تا (۳۳) ارائه شده است. این اشکال برای فرکانس‌های بی‌بعد ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ به دست آمده‌اند. با توجه به قائم بودن زاویه‌ی تابش امواج لرزه‌ای، نتایج متقارن بوده و با افزایش فرکانس بی‌بعد، میزان ارتعاش افزایش یافته است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، بیشترین میزان دامنه‌ی تغییر مکان در نسبت امیدانس ۰/۷۵ و نسبت شکل ۰/۹ برای فرکانس بی‌بعد ۲ (شکل ۲۸-د) به دست آمده است که در حدود ۵/۷ می‌باشد. در شکل مذکور، بیشترین دامنه‌ی پاسخ در بخش فوقانی یال‌ها و گوشه‌های تیز طرفین قلّه متمرکز شده است. در حالی که در نسبت امیدانس ۱ و فرکانس بی‌بعد ۲ (شکل ۲۹-د)، بیشینه‌ی پاسخ سطح قلّه و گوشه‌ها یکسان و برابر با ۴ بوده و در نسبت امیدانس ۱/۲۵ (شکل ۳۰-د)،

سرعت بیشتری مصالح تپه را در نور دیده و پس از انعکاس بلافاصله محیط را ترک نموده‌اند. چنانچه مشاهده می‌شود، مقادیر بزرگ‌نمایی در محل تپه از زمین هموار اطراف آن کمتر شده است. در نسبت شکل‌های ۰/۳ (شکل ۱۹) و ۰/۵ (شکل ۲۰) نیز بیشترین میزان بزرگ‌نمایی در نتایج مربوط به نسبت امیدانس ۰/۷۵ (شکل‌های ۱۹-الف و ۲۰-الف) به دست آمده که به ترتیب برابر با ۲/۷۵ و ۳/۲ تعیین شده است. این مقادیر در نسبت شکل‌های ۰/۷ (شکل ۲۱) و ۰/۹ (شکل ۲۲) برای نسبت امیدانس ۰/۷۵ به ترتیب برابر با ۳/۲ و ۳/۴ به چشم می‌خورد. آنچه مهم است آن است که از یک سو، هر چه نسبت شکل تپه بزرگ‌تر باشد امکان ورود حجم بیشتری از امواج لرزه‌ای به درون تپه فراهم شده و از سوی دیگر، بیشترین میزان محصور شدگی در نرم‌ترین حالت مصالح تپه (نسبت امیدانس ۰/۷۵) رخ می‌دهد که این دو عامل سبب افزایش بزرگ‌نمایی می‌شود.

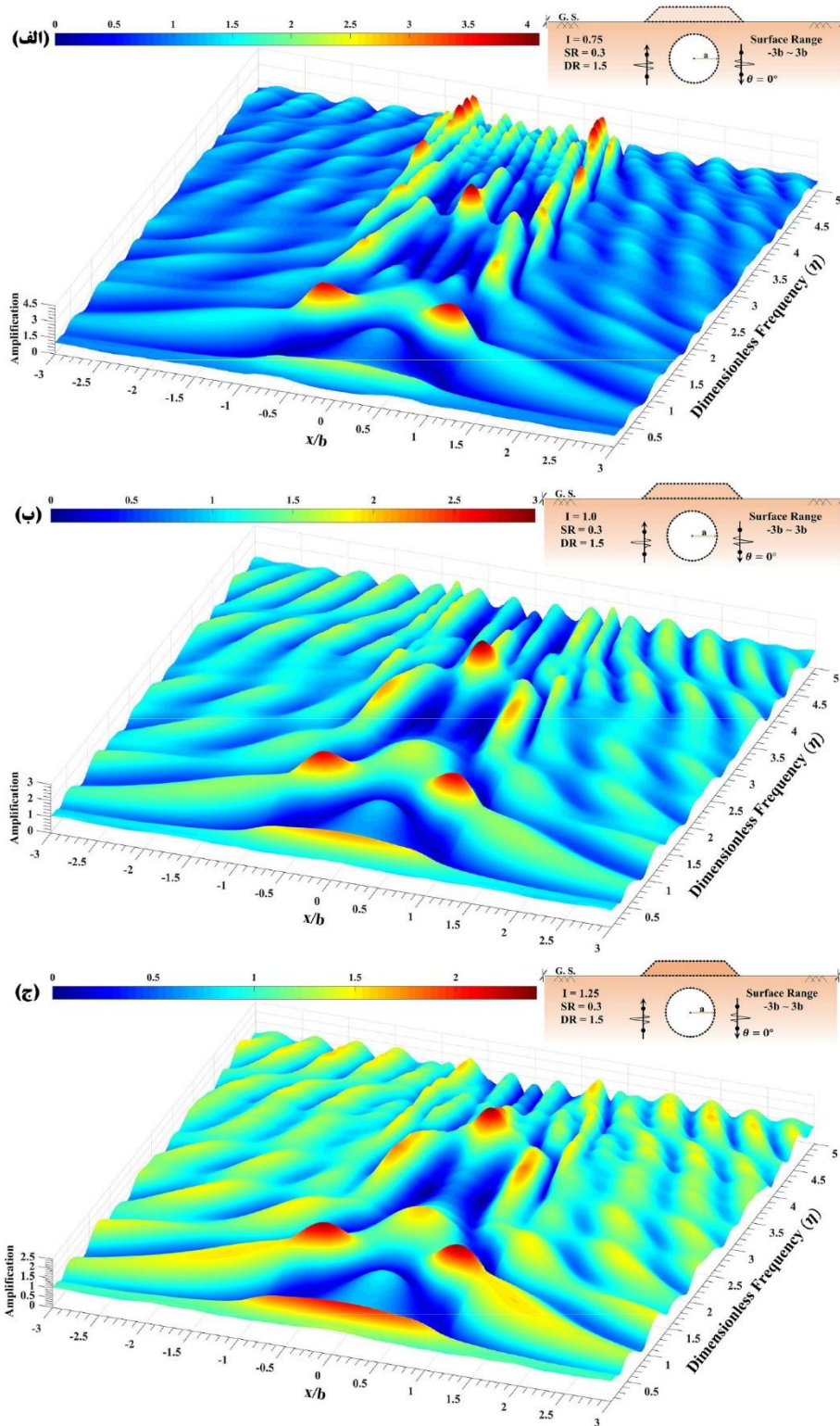
۳-۳-۱- تأثیر حضور حفره

در شکل‌های ۲۳ تا ۲۷ اثر حضور حفره‌ی زیر زمینی توخالی بر بزرگ‌نمایی رخ داده در سطح تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. زمانی که یک تپه‌ی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۱ بالای یک حفره‌ی تو خالی دایره‌ای زیر زمینی واقع می‌شود (شکل ۲۳)، حضور حفره باعث انعکاس مستقیم امواج مهاجم برخوردی به مرز تحتانی آن می‌شود. در این حالت، مقادیر بزرگ‌نمایی در موقعیت مرکزی تپه کاهش قابل توجهی داشته است. اما از سوی دیگر، برخورد امواج به مرزهای جناحی حفره و خزش آن بر روی مرز، باعث تجمع امواج در محل یال‌های تپه شده و متعاقباً بروز بزرگ‌نمایی بیشتر در مقایسه با مدل فاقد حفره (شکل ۱۸) شده است. اگر چه حضور حفره منطقه امنی در مرکز تپه پدید آورده است، اما باعث بحرانی شدن پاسخ در نواحی گوشه شده است. با افزایش نسبت امیدانس به ۱ و ۱/۲۵ (شکل ۲۳-ب و ج) می‌توان تفاوت بزرگ‌نمایی حاصل در محل استقرار تپه را با محیط پیرامون مشاهده نمود، به طوری که حداکثر بزرگ‌نمایی در مقایسه با نسبت امیدانس ۰/۷۵ (که برابر با ۳ بود)، به مقدار ۲/۲ کاهش یافته است. افزایش نسبت شکل تپه به ۰/۳ (شکل ۲۴)، رشد چشمگیر در مقادیر حداکثر بزرگ‌نمایی را به ویژه برای نسبت امیدانس ۰/۷۵ (شکل ۲۴-الف) نشان می‌دهد. نرم‌تر شدن مصالح تپه و به دام افتادن امواج در میان حفره و تپه، باعث شده است تا بزرگ‌نمایی صرفاً در محل یال‌های تپه متمرکز نشده و بخش میانی آن را نیز تحت تأثیر قرار دهد. این پدیده در شکل (۲۳-ب و ج) به خوبی مشهود است. همچنین، حجم بیشتر امواج محصور شده باعث



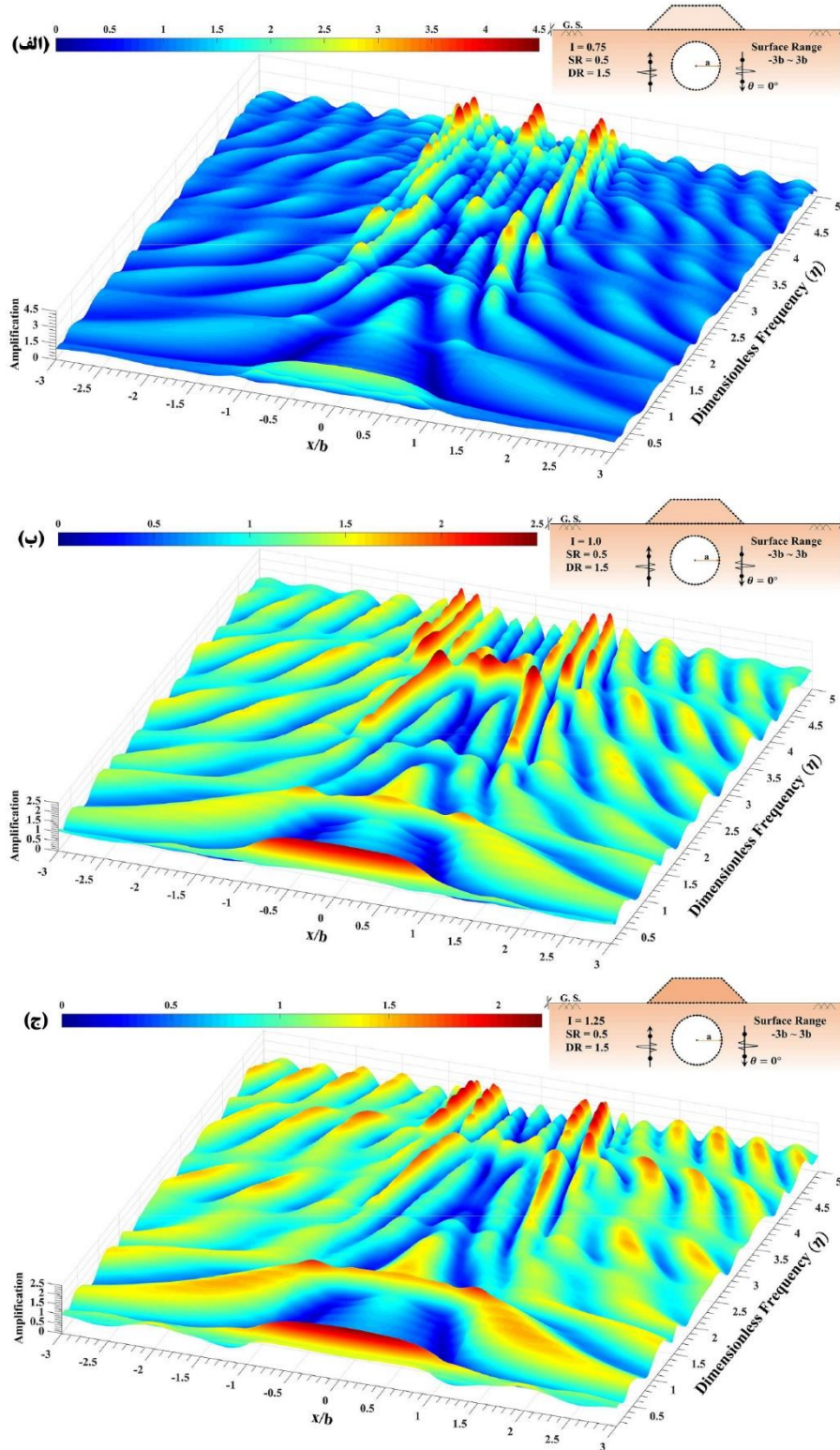
شکل ۲۳. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۱/۱ واقع بر حفره‌ی دایره‌ای با نسبت امیدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 23. The 3D amplification of the ground surface versus different dimensionless frequencies for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.1$ on a circular cavity and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



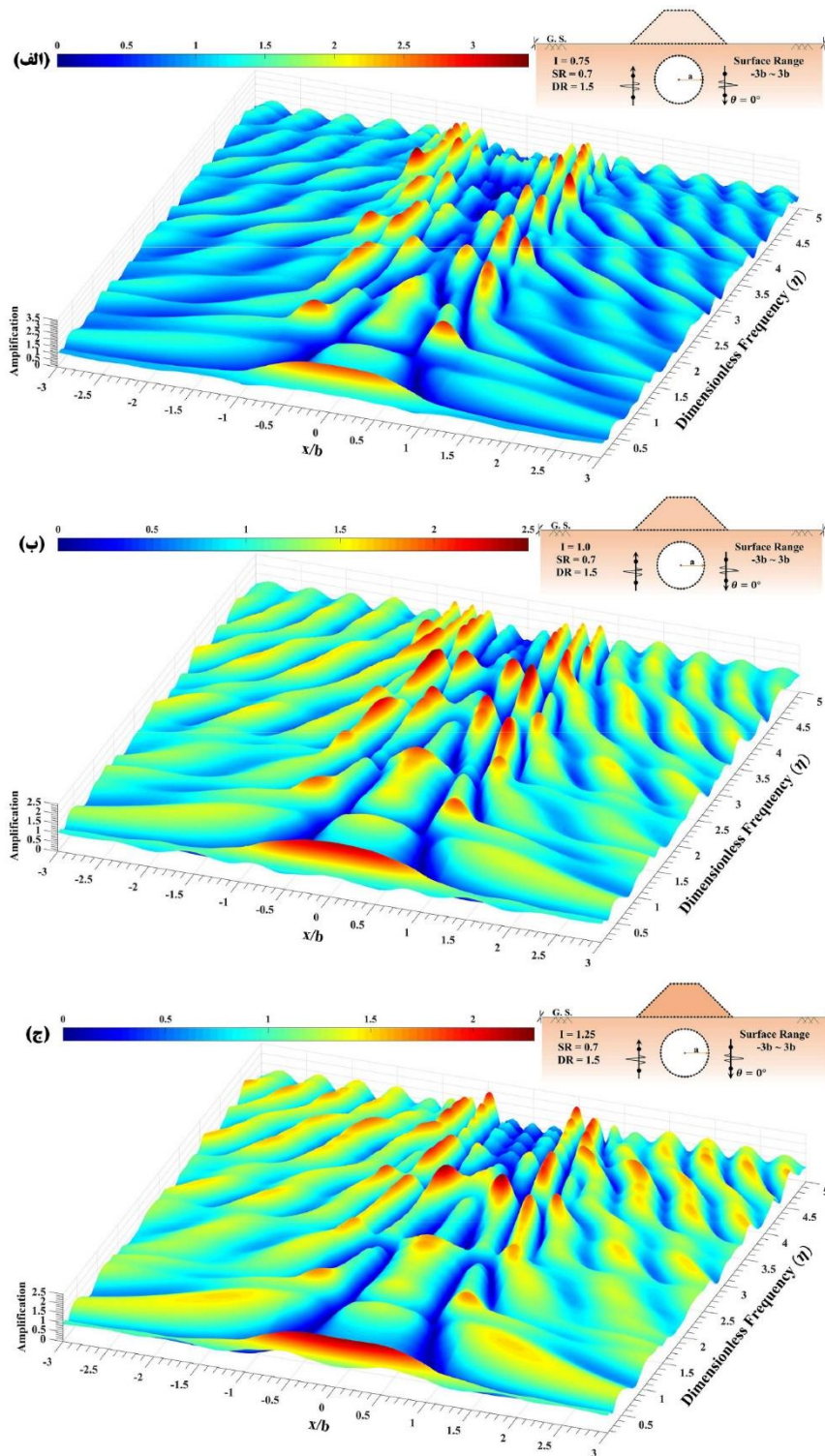
شکل ۲۴. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل $۳/۰$ واقع بر حفرة‌ی دایره‌ای با نسبت امیدانس (الف) $۰/۷۵$ ، (ب) ۱ و (ج) $۱/۲۵$ در برابر هجوم امواج قائم SH

Fig. 24. The 3D amplification of the ground surface versus different dimensionless frequencies for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.3$ on a circular cavity and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.m



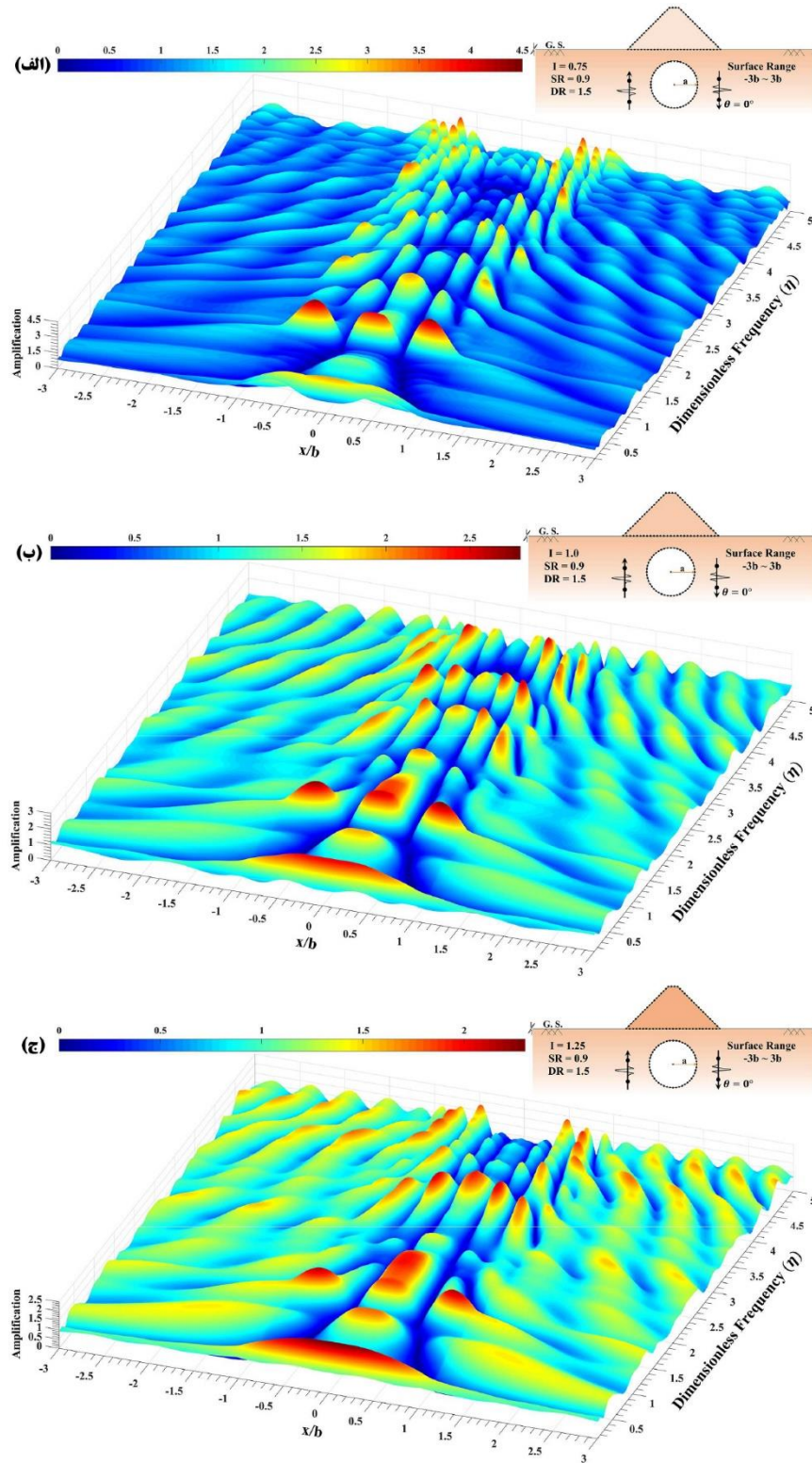
شکل ۲۵. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۵ واقع بر حفره‌ی دایره‌ای با نسبت امپدانس (الف) ۰/۷۵، (ب) ۱ و (ج) ۱/۲۵ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 25. The 3D amplification of the ground surface versus different dimensionless frequencies for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.5$ on a circular cavity and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



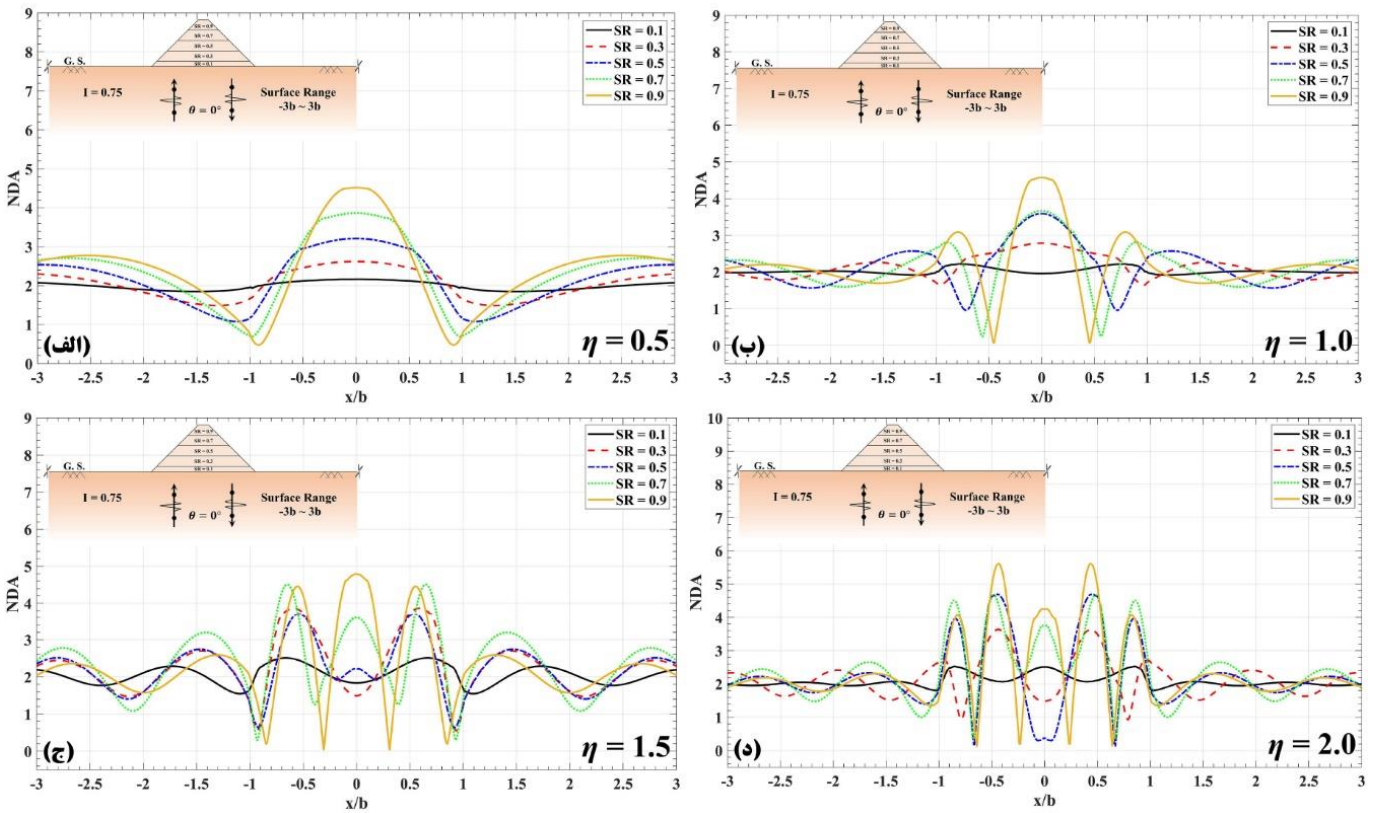
شکل ۲۶. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل $0.7/1$ واقع بر حفره‌ی دایره‌ای با نسبت امپدانس (الف) $0.75/1$ ، (ب) $1/1$ و (ج) $1.25/1$ در برابر هجوم امواج قائم SH

Fig. 26. The 3D amplification of the ground surface versus different dimensionless frequencies for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.7$ on a circular cavity and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



شکل ۲۷. الگوی بزرگ‌نمایی سطح زمین در حضور تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل $۰/۹$ واقع بر حفره‌ی دایره‌ای با نسبت امپدانس (الف) $۰/۷۵$ ، (ب) ۱ و (ج) $۱/۲۵$ در برابر هجوم امواج قائم SH.

Fig. 27. The 3D amplification of the ground surface versus different dimensionless frequencies for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the shape ratio of $SR=0.9$ on a circular cavity and the impedance ratio of (a) $I=0.75$, (b) $I=1.0$ and (c) $I=1.25$ subjected to the vertical SH-waves.



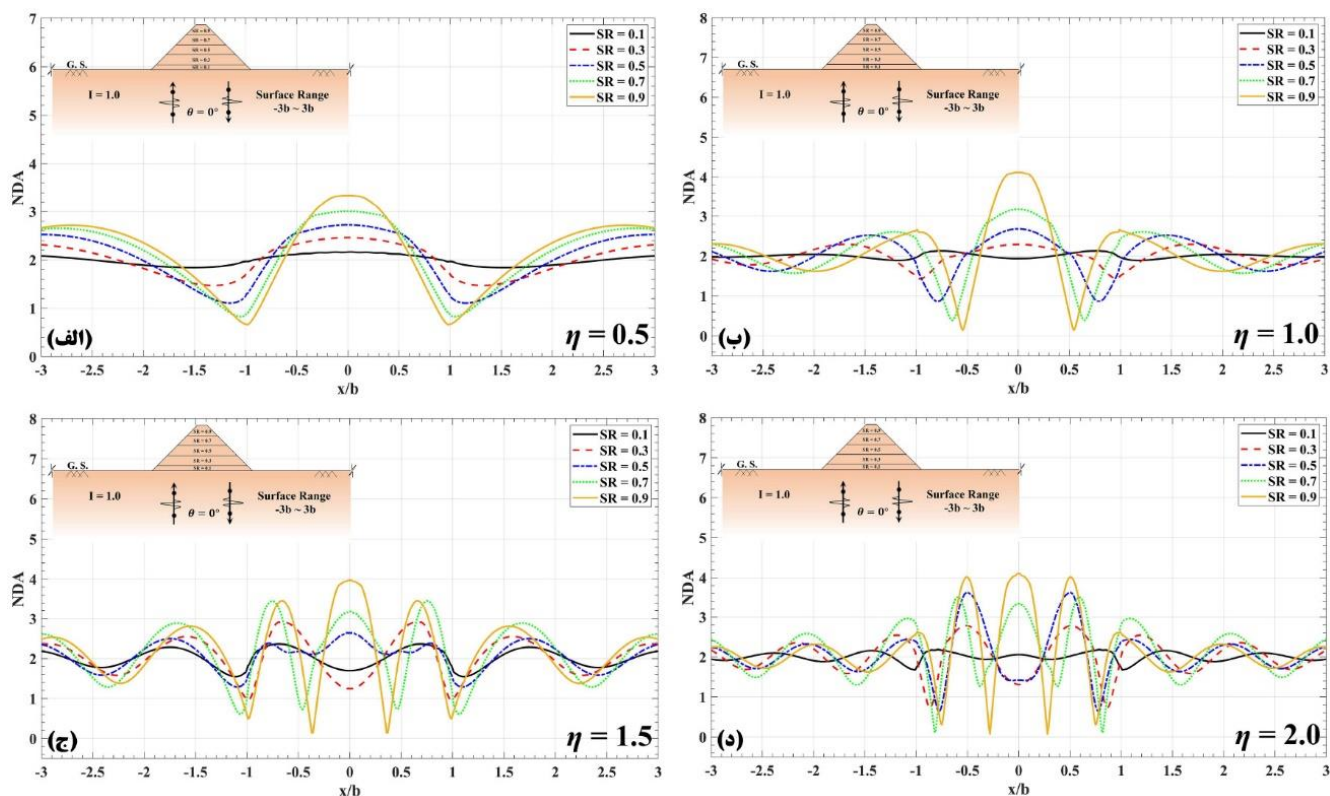
شکل ۲۸. دامنه‌ی تغییر مکان نرملایز شده‌ی سطح زمین در مقابل "x/b" برای تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت امپدانس ۰/۷۵ برای فرکانس بی‌بعد (الف) ۰/۵، (ب) ۱، (ج) ۱/۵ و (د) ۲ برابر امواج مهاجم قائم SH.

Fig. 28. The normalized displacement amplitude of the ground surface versus x/b for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the impedance ratio $I=0.75$ and the dimensionless frequency of (a) $\eta=0.5$, (b) $\eta=1.0$, (c) $\eta=1.5$ and (d) $\eta=2.0$ subjected to the vertical SH-waves.

افزایش قابل توجه دامنه‌ی تغییر مکان در نسبت شکل ۰/۱ تا حدود ۳/۸ شده است. این در حالی است که برای مدل فاقد حفره (شکل ۲۸-الف) این مقدار به ۲/۲ محدود شده است. بیشترین میزان دامنه‌ی ثبت شده برای نسبت شکل ۰/۳ (شکل ۳۱-ج) برابر با ۵/۴ است. همچنین، در نسبت امپدانس ۱ (شکل ۳۲-ج) مقداری برابر با ۵/۴ را برای نسبت شکل‌های ۰/۳ و ۰/۹ می‌توان ملاحظه نمود. در نسبت امپدانس ۱/۲۵ (شکل ۳۳) نیز بیشترین

برابر با ۳/۴۵ به دست آمده است. این پدیده نشان می‌دهد، هر چه مصالح تپه نرم‌تر باشد، امواج با سرعت کمتری در درون آن حرکت نموده و فرصت لازم جهت تمرکز در محل گوشه‌های تیز رأس تپه را می‌یابند که این امکان در نسبت امپدانس‌های بالاتر کاهش می‌یابد.

شکل‌های ۳۱ تا ۳۳ نیز اثر حضور حفره‌ی توخالی زیر زمینی را بر تغییر مکان سطح تپه نمایان ساخته است. در شکل (۳۱-الف) حضور حفره باعث



شکل ۲۹. دامنه‌ی تغییر مکان نرملایز شده‌ی سطح زمین در مقابل "x/b" برای تیپ‌هی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت امپدانس ۱ برای فرکانس بی‌بعد (الف) ۰/۵، (ب) ۱، (ج) ۱/۵ و (د) ۲ در برابر امواج مهاجم قائم SH.

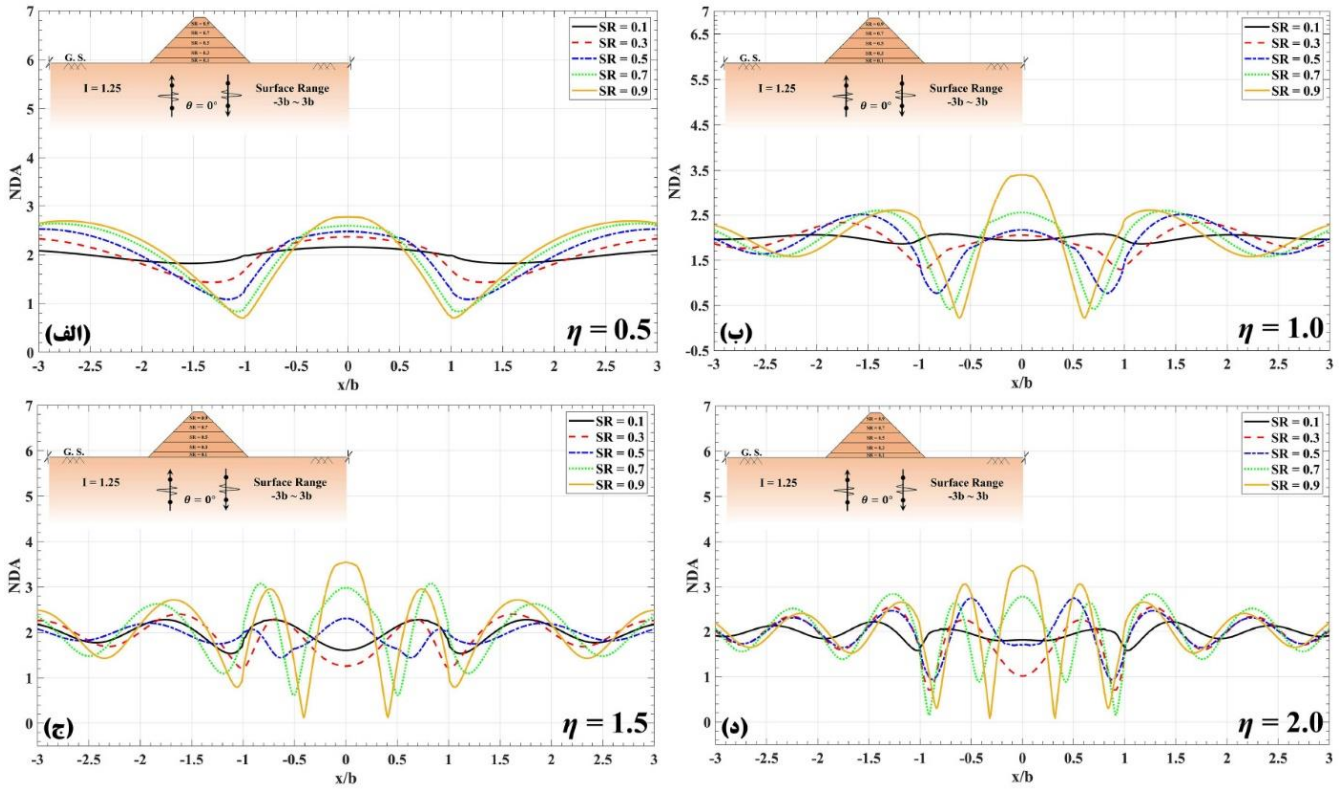
Fig. 29. The normalized displacement amplitude of the ground surface versus x/b for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the impedance ratio $I=1.0$ and the dimensionless frequency of (a) $\eta=0.5$, (b) $\eta=1.0$, (c) $\eta=1.5$ and (d) $\eta=2.0$ subjected to the vertical SH-waves.

ضمن توسعه‌ی فرمول‌بندی برای مسئله‌ی مزبور و عددی‌سازی آن در قالب الگوریتم داس‌بم، با ارائه‌ی چند مثال صحت‌سنجی، کارایی روش و دقت عملکرد الگوریتم مورد استفاده اعتبارسنجی شد. چنانچه مشاهده شد، روش پیشنهاد شده قابلیت لازم برای تحلیل لرزه‌ای مسائل مرتبط با عوارض توپوگرافی ناهمگن مرکب محذب را داراست. در ادامه، با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی نسبت امپدانس و شکل تیپ، به انجام یک مطالعه‌ی

دامنه برابر با ۴/۴ به نسبت شکل ۰/۳ (شکل ۳۳-ج) اختصاص یافته است.

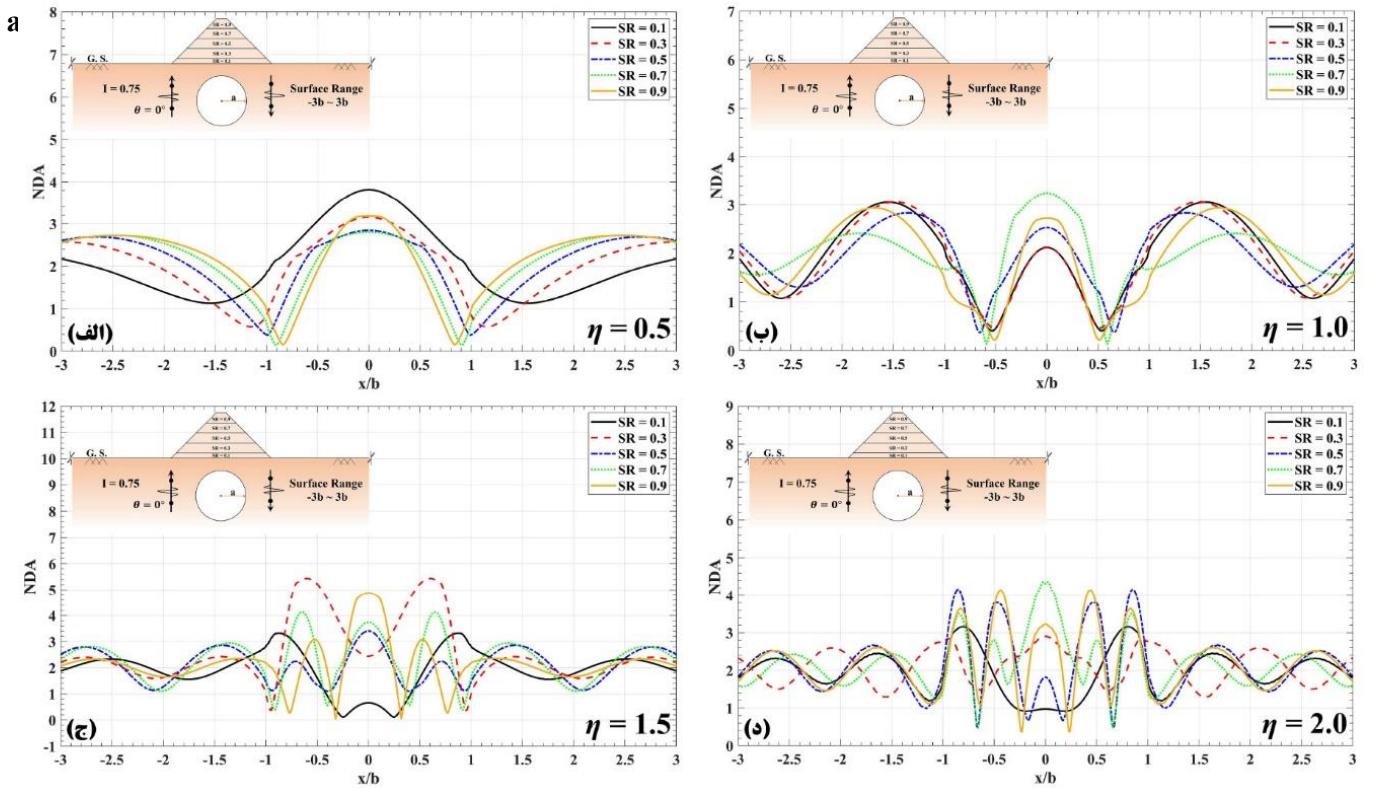
۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به تحلیل لرزه‌ای سطح تیپ‌هی آبرفتی دوزنقه‌ای واقع بر حفره‌ی دایره‌ای در برابر امواج مهاجم قائم SH پرداخته شد. از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان جهت مدل‌سازی بهره گرفته شد.



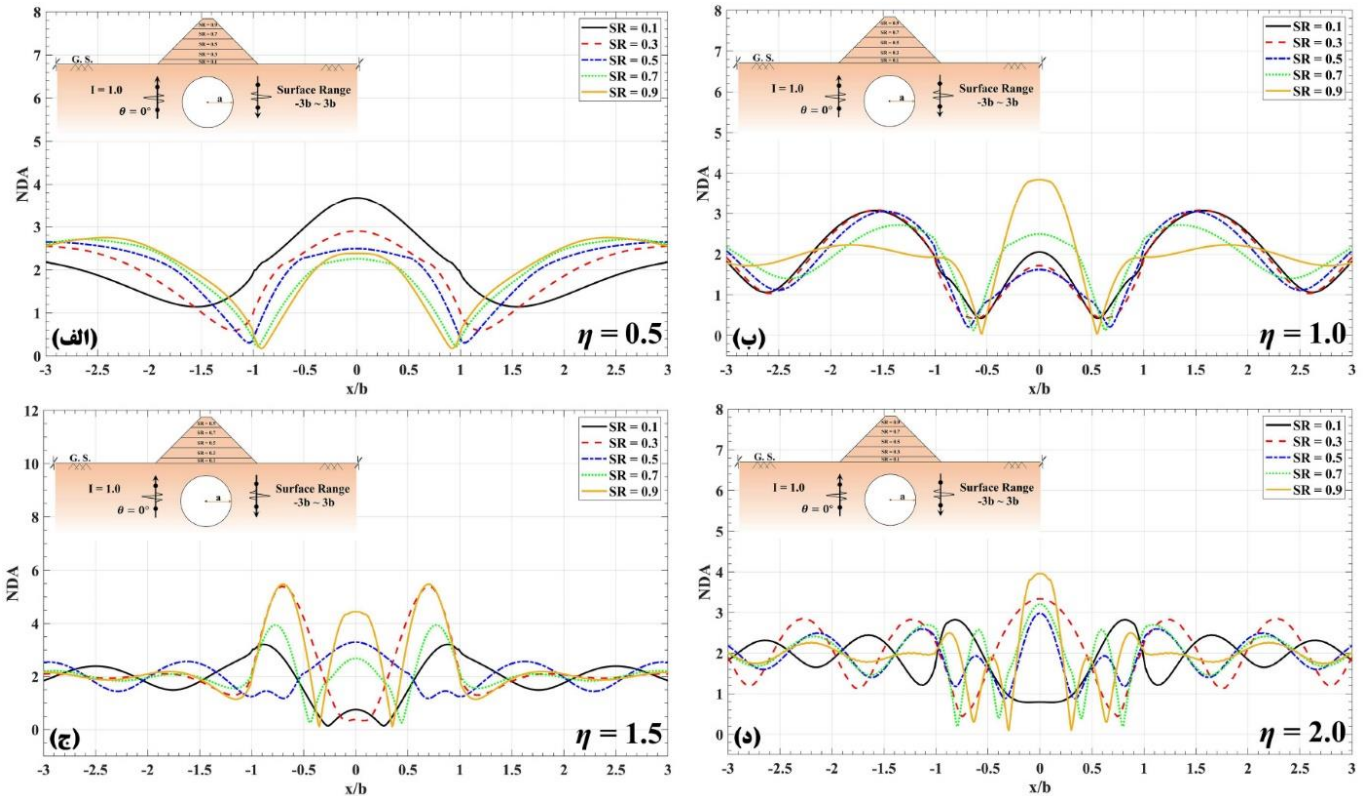
شکل ۳۰. دامنه‌ی تغییر مکان نرملایز شده‌ی سطح زمین در مقابل " x/b " برای تپه‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای با نسبت امپدانس $1/25$ برای فرکانس بی‌بعد (الف) $0/5$ ، (ب) 1 ، (ج) $1/5$ و (د) برابر امواج مهاجم قائم SH.

Fig. 30. The normalized displacement amplitude of the ground surface versus x/b for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the impedance ratio $I=1.25$ and the dimensionless frequency of (a) $\eta=0.5$, (b) $\eta=1.0$, (c) $\eta=1.5$ and (d) $\eta=2.0$ subjected to the vertical SH-waves.



شکل ۳۱. دامنه‌ی تغییر مکان نرملایز شده‌ی سطح زمین در مقابل " x/b " برای تپه‌ی اُبرفتی ذوزنقه‌ای با نسبت امپدانس $0.75/1$ واقع بر حفره‌ی دایره‌ای برای فرکانس بی‌بعد (الف) $0.5/1$ ، (ب) 1 ، (ج) $1.5/1$ و (د) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

Fig. Figure 31. The normalized displacement amplitude of the ground surface versus x/b for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the impedance ratio $I=0.75$ on a circular cavity and the dimensionless frequency of (a) $\eta=0.5$, (b) $\eta=1.0$, (c) $\eta=1.5$ and (d) $\eta=2.0$ subjected to the vertical SH-waves.

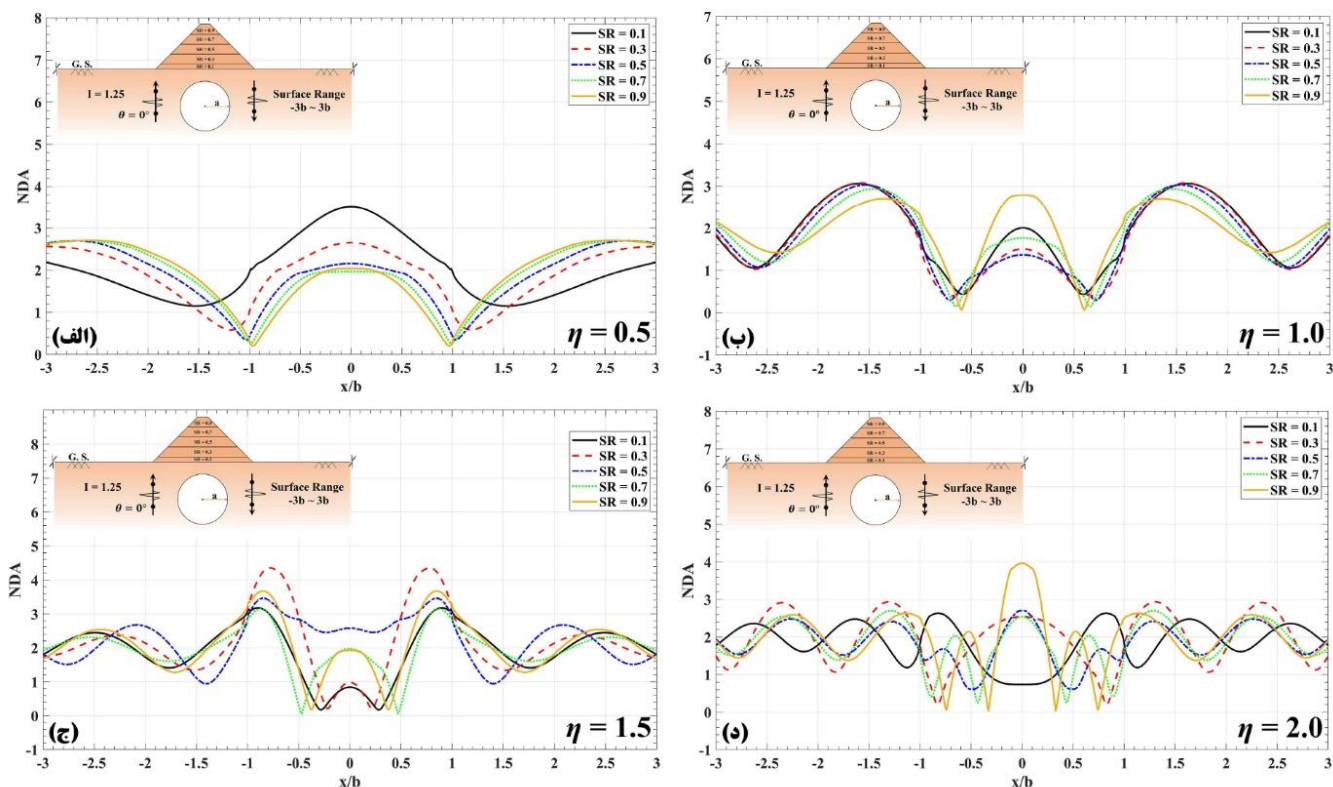


شکل ۳۲. دامنه‌ی تغییر مکان نرمالایز شده‌ی سطح زمین در مقابل "x/b" برای تیپ‌هی آبرفتی ذوزنقه‌ای با نسبت امیدانس ۱ واقع بر حفره‌ی دایره‌ای برای فرکانس بی‌بعد (الف) ۰/۵، (ب) ۱، (ج) ۱/۵ و (د) ۲ در برابر امواج مهاجم قائم SH

Fig. 32. The normalized displacement amplitude of the ground surface versus x/b for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the impedance ratio $I=1.0$ on a circular cavity and the dimensionless frequency of (a) $\eta=0.5$, (b) $\eta=1.0$, (c) $\eta=1.5$ and (d) $\eta=2.0$ subjected to the vertical SH-waves.

خورد. حضور حفره موجب کاهش پاسخ تا مقدار ۳/۴ شد.
 ۳- با افزایش نسبت شکل تیپ‌هی آبرفتی، تشدید حالت بحرانی پاسخ در نتایج حوزه‌ی زمان و فرکانس مبین شد.
 ۴- اگر چه حضور حفره در برخی مواقع در کاهش نقاط اوج مؤثر بود، ولیکن در حالت کلی سبب افزایش ارتعاش و زمان همگرایی پاسخ در دو حوزه‌ی زمان و فرکانس شد.
 ۵- چنانچه در الگوی سه‌بعدی بزرگ‌نمایی مبرم شد، همواره حداکثر مقدار که در بیشینه‌ی نسبت شکل و کمینه‌ی امیدانس ایجاد شده، فرکانس‌های بی‌بعد پایین را متأثر ساخت.

عددی جامع پرداخته شد. نتایج در دو حوزه‌ی زمان و فرکانس مشهود بود. در این میان، تأثیر حضور حفره در تغییر الگوی پاسخ سطح زمین در مقایسه با تیپ‌هی منفرد آبرفتی حساسیت‌سنجی شد. برخی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق به شرح ذیل ارائه می‌شود:
 ۱- با کاهش امیدانس مصالح تیپ‌ه نسبت به محیط پیرامون، افزایش ارتعاش پاسخ در نتایج حوزه‌ی زمان مشهود شد.
 ۲- به طور مشابه، نرم شدن تیپ‌ه در نتایج حوزه‌ی فرکانس نیز با افزایش بزرگ‌نمایی به گونه‌ای مواجه شد که حداکثر دامنه‌ی پاسخ در حداقل امیدانس و نسبت شکل بیشینه به مقدار ۴ در عدم حضور حفره به چشم



شکل ۳۳. دامنه‌ی تغییر مکان نرّمالایز شده‌ی سطح زمین در مقابل " x/b " برای تپه‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت امپدانس $1/25$ واقع بر حفره‌ی دایره‌ای برای فرکانس بی‌بعد (الف) $0/5$ ، (ب) 1 ، (ج) $1/5$ و (د) در برابر امواج مهاجم قائم SH.

Fig. 33. The normalized displacement amplitude of the ground surface versus x/b for the model of a trapezoidal shaped alluvial valley with the impedance ratio $I=1.25$ on a circular cavity and the dimensionless frequency of (a) $\eta=0.5$, (b) $\eta=1.0$, (c) $\eta=1.5$ and (d) $\eta=2.0$ subjected to the vertical SH-waves.

[4] Amornwongpaibun, A., Luo, H., Lee, V.W., (2015). "Scattering of anti-plane SH-waves by a shallow semi-elliptical hill with a concentric elliptical tunnel". J Earthq Eng. 20(3):363-382.

[5] Boor, D.M., (1972). "A note on the effect of simple topography on seismic SH-waves". Bull Seism Soc Am. 62(1):275-284.

[6] Boor, D.M., (1973). "The effect of simple topography on seismic waves: Implications for the accelerations recorded at pacoima dam, San Fernando Valley, California". Bull Seism Soc Am. 63(5):1603-1609.

منابع

[۱] مجموعه‌ی استانداردها و آیین‌نامه‌های ساختمانی ایران. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی. شماره‌ی نشر: ض-۲۵۳. آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله. استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش ۴)، ۱۸-۱۹.

[2] Aki, K., Larner, K.L., (1970). "Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH-waves". J Geophys Res. 75(5):933-954.

[3] Amornwongpaibun, A., Lee V.W., (2013). "Scattering of anti-plane SH-waves by a semi-elliptical hill: deep hill". Soil Dyn Earthq Eng. 52:126-137.

Eng Analy BE. 8(3):132-138.

[19] Dominguez, J., (1993). "Boundary elements in dynamics". Comp Mech Pub, Southampton, Boston.

[20] Eringen, A.C. & Suhubi, E.S., (1975). "Elastodynamics". Academic Press.

[21] Geli, L., Bard, P., Jullien, B., (1988). "The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results". Bull Seism Soc Am. 78(1):42-63.

[22] 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.

[23] Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A., (2003). "On time-domain two-dimensional site response analysis of topographic structures by BEM". J Seism Earthq Eng. 5(2):35-45.

[24] Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., Gatmiri, B., (2006a). "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.

[25] Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., (2006b). "Shape effects on amplification potential of two-dimensional hills" [In Persian]. J Seismolog Earthq Eng. 8(2):59-70.

[26] Lee, V.W., (1977). "On the deformations near circular underground cavity subjected to incident plane SH-waves". In: Conference Proceedings of application of Computer Methods in Engineering. Los Angeles: Uni of South California. 9:5162-.

[27] Lee, V.W., Hao, L., Jianwen, L., (2004). "Diffraction of anti-plane SH-waves by a semi-circular cylindrical hill with an inside concentric semi-circular tunnel". Earthq Eng Eng Vib. 3(2):249-262.

[28] Liang, J.W., Luo, H., Lee, V.W., (2004). "Scattering of plane SH-waves by a circular-arc hill with a circular tunnel". Acta Seism Sinica. 17(5):549-563.

Bouchon, M., (1973). "Effect of topography on surface motion". Bull Seism Soc Am. 63(3):615-632

[8] Bard, P., (1982). "Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies". Geophys J Int. 71(3):731-760.

[9] Brebbia, C.A., Dominguez, J., (1989). "Boundary elements, an Introductory Course". Comp Mech Pub. Southampton, Boston.

[10] Benites, R., Aki, K., Yomigida, K., (1992). "Multiple scattering of SH-waves in 2-D media with many cavities". Pure appl Geophys 138:353-390.

[11] Ba, Z., Liang, J., Zhang, Y., (2016). "Scattering and diffraction of plane SH-waves by periodically distributed canyons". Earthq Eng Eng Vib. 15(2):325-339.

[12] Ba, Z., Liang, J., Zhang, Y., (2017). "Diffraction of SH-waves by topographic features in a layered transversely isotropic half-space". Earthq Eng Eng Vib, 16(1):11-22.

[13] Cao, X.R., Song, T.S., Liu, D.K., (2001). "Scattering of plane SH-wave by a cylindrical hill of arbitrary shape". Appl Math Mech. 22(9):1082- 1089.

[14] Chen, J.T., Lee, J.W., Wu, C.F., Chen, I.L., (2011). "SH-wave diffraction by a semi-circular hill revisited: A null-field boundary integral equation method using degenerate kernels". Soil Dyn Earthq Eng. 31(5-6):729-736.

[15] Chen, J.T., Lee, J., Shyu, W., (2012). "SH-wave scattering by a semi-elliptical hill using a null-field boundary integral equation method and a hybrid method". Geophys J Int. 188:177-194.

[16] Datta, S.K., (1974). "Diffraction of SH-waves by an elliptic elastic cylinder". Int J Sol Struct. 10(1):123-133.

[17] Day, S.M., (1977). "Finite element analysis of seismic scattering problems" [Dissertation]. University of California, San Diego.

[18] Dominguez, J., Meise, T., (1991). "On the use of the BEM for wave propagation in infinite domains".

waves". Earthq Sci. 31:1-17.

[41] Panji, M., Mojtazadeh-Hasanlouei, S., Yasemi, F., (2020). "A half-plane time-domain BEM for *SH*-wave scattering by a subsurface inclusion". Comp Geosci. 10.1016/j.cageo.2019.104342.

[42] Panji, M., 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.

[43] Panji, M., Habibivand, M., (2020). "Seismic Analysis of Semi-Sine Shaped Alluvial Hills above Subsurface Circular Cavity". Earthq Eng Eng Vib. Accepted.

[44] Qiu, F., Liu, D., (2005). "Antiplane response of isosceles triangular hill to incident *SH*-Waves". Earthq Eng Vib. 4(1): 37-46

[45] Ricker, N. (1953). "The form and laws of propagation of seismic wavelets". Geophys. 18(1):10-40.

[46] Reinoso, E., Wrobel, L.C., Power, H., (1993), "Preliminary results of the modeling of the Mexico City valley with a two-dimensional boundary element method for the scattering of *SH*-waves". Soil Dyn Earthq Eng. 12(8), 457-468.

[47] Sabina, F.J., Willis, J.R., (1975). "Scattering of *SH*-waves by a rough half-space of arbitrary slope". Geophys J R Astr Soc. 42(2):685-703.

[48] Smith, W.D., (1975). "The application of finite element analysis to body wave propagation problems". Geophys J Int. 42:747-768.

Sills, L.B., (1978). "Scattering of horizontally-polarized shear waves by surface irregularities". Geophys J Int. 54(2):319-348

[50] Sánchez-Sesma, F.J., Herrera, A., Aviles, J., (1982). "A boundary method for elastic wave diffraction: Application to scattering of *SH*-waves by surface irregularities". Bull Seism Soc Am. 72(2):473-490.

[51] Sánchez-Sesma, F.J., Palencia, V.J., Luzon, F., (2002). "Estimation of local site effects during earthquakes: An overview". ISET J Earthq. 39(3):167-193.

[29] Lee, V.W., Luo, H., Liang, J.W., (2006). "Antiplane *SH*-wave diffraction by a semicircular cylindrical hill revisited: An improved analytic wave series solution". J Eng Mech. 132(10):1106-1114.

[30] Lin, S., Qiu, F., Liu, D., (2010). "Scattering of *SH*-waves by a scalene triangular hill". Earthq Eng Eng Vib. 9(1):23-38.

[31] Liu, G., Chen, H., Liu, D., Khoo, B.C., (2010). "Surface motion of a half-space with triangular and semicircular hills under incident *SH*-waves". Bull Seism Soc Am. 100(3):1306-1319.

[32] Lee, V.W., Amornwongpaibun, A., (2013). "Scattering of anti-plane *SH*-waves by a semi-elliptical hill: Shallow hill". Soil Dyn Earthq Eng, 52:116-125.

Moczo, P., (1989). "Finite difference technique for [33] *SH*-waves in 2D media using irregular grids-application to the seismic response problem". Geophys J Int. 99(2):321-329

[34] Mogi, H., Kawakami, H., (2007). "Analysis of scattered waves on ground with irregular topography using the direct boundary element method and neumann series expansion". Bull seism Soc Am. 97(4):1144-1157.

[35] MATLAB, (2020). "The language of technical computing". V9.8 .. Natick, Massachusetts: The Math-Works Inc.

[36] Ohtsu, M., 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.

[37] Panji, M., Kamalian, M., Asgari-Marnani, J., Jafari, M.K., (2013). "Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM". Geophys J Int. 194:1849-1865.

[38] Panji, M., Kamalian, M., Asgari-Marnani, J., Jafari, M.K., (2014). "Analysing seismic convex topographies by a half-plane time-domain BEM". Geophys J Int. 197(1):591-607.

[39] Panji, M., Ansari, B., (2017). "Transient *SH*-wave scattering by the lined tunnels embedded in an elastic half-plane". Eng Analy BE. 84:220-230.

[40] Panji, M., Mojtazadeh-Hasanlouei, S., (2018). "Time-history responses on the surface by regularly distributed enormous embedded cavities: Incident *SH*-

[63] Zhou, H., Chen, X., (2006). "A new approach to simulate scattering of *SH*-waves by an irregular topography". *Geophys J Int.* 164(2):449-459.

[52] Shyu, W., Teng, T., (2014). "Hybrid method combines transfinite interpolation with series expansion to simulate the anti-plane response of a surface irregularity". *J Mech.* 4:349-360.

[53] Shyu, W., Teng, T., Chou, C., (2017). "Anti-plane response caused by interactions between a dike and the surrounding soil". *Soil Dyn Earthq Eng.* 92:408-418

[54] Thambiratnam, D.P., Lee, S.L., (1990). "Scattering of plane *SH*-waves by underground cavities". *Eng Struct.* 12(3):215-221.

[55] Takemiya, H., Fujiwara, A., (1994). "*SH*-Wave scattering and propagation analysis at irregular sites by time-domain BEM". *Bull Seism Soc Am*, 84(5), 1443-1455.

[56] Tsaur, D., Chang, K., (2009). "Scattering and focusing of *SH*-waves by a convex circular-arc topography". *Geophys J Int.* 177(1):222-234.

[57] Tsaur, D., Chang, K., Hsu, M., (2018). "Ground motions around a deep semielliptic canyon with a horizontal edge subjected to incident plane *SH*-waves. *J Seismol.* 22(6):1579-1593.

[58] Virieux, J., (1984). "*SH*-wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method". *Geophys.* 49(2):1933-1957.

[59] Yuan, X., Men, F.L., (1992). "Scattering of plane *SH*-waves by a semi-cylindrical hill". *Earthq Eng Struct Dyn.* 21(12):1091-1098.

[60] Yuan, X., Liao, Z., (1996). "Surface motion of a cylindrical hill of circular arc cross section for incident plane *SH*-waves". *Soil Dyn Earthq Eng*,15(3):189-199.

[61] Yang, Z., Xu, H., Hei, B., Zhang, J., (2014). "Anti-plane response of two scalene triangular hills and a semi-cylindrical canyon by incident *SH*-waves". *Earthq Eng Vib.* 13(4): 569-581.

[62] Yang, Z., Song, Y., Li, X., Jiang, G., Yang, Y., (2019). "Scattering of plane *SH*-waves by an isosceles trapezoidal hill". *Wave Motion.* 92, 102415.

فهرست علائم

علامت	شرح علامت
Ω	دامنه
Γ	مرز
SH	مؤلفه‌ی افقی موج برشی (برون صفحه)
θ	زاویه‌ی تابش امواج مهاجم لرزه‌ای
DR	نسبت عمق حفره
SR	نسبت شکل تپه
b	نصف طول ضلع قاعده‌ی تپه
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	ترکشن مرزی
u^f	تغییر مکان میدان آزاد
u^*	تابع گرین برای مؤلفه‌ی تغییر مکان
q^*	تابع گرین برای مؤلفه‌ی ترکشن
η	فرکانس بی‌بعد
ω	فرکانس زاویه‌ای موج

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Panji, S. Mojtabazadeh-Hasanlouei, M. Habibvand, Seismic response of the trapezoidal alluvial hill above a circular cavity: Vertically incident SH-wave., 53(9) (2021) 3803-3846.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18113.6772



