

# الگوی بزرگنمایی حوزه‌ی رسوبی دوزنقه‌ای در برابر موج مهاجم SH

مهدی پنجمی\*<sup>۱</sup>، سعید مجتبی‌زاده حسنلوئی<sup>۱</sup>

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

m.panji@iauz.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱

## چکیده

در این مقاله الگوی بزرگنمایی لرزه‌ای سطح دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای در برابر موج مهاجم مایل SH ارائه شده است. مدل عددی براساس روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان تهیه و تحلیل شده است. با تمرکز المان‌ها تنها بر روی وجه میانی حوزه‌ی رسوبی و بستر سنگی، کاهش حجم داده و تسهیل در مدل‌سازی همراه می‌شود. ابتدا به اختصار فرمول‌بندی روش پیشنهاد شده و توسعه‌ی آن برای حوزه‌های رسوبی تیز گوشه اشاره شده است. سپس ضمن صحت‌سنجی برخی از نتایج با ادبیات فنی در دسترس، با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی نسبت امپدانس/ شکل و زاویه‌ی موج مهاجم، الگوی بزرگنمایی سطح زمین در دو حوزه‌ی زمان و فرکانس حساسیت‌سنجی شده است. همچنین در تکمیل نتایج حوزه‌ی زمان، برخی تصاویر لحظه‌ای از نحوه‌ی پراکنش موج در درون آبرفت و بستر سنگی پیرامون نشان داده شده است. در نهایت، با تعیین بزرگنمایی حداکثر مرکز آبرفت و پروده‌های غالب نظیر، نتایج حاصل در قالب کاربردهای مهندسی جمع‌بندی شده است. دست‌آوردها نشان داد پاسخ لرزه‌ای سطح زمین نسبت به تغییر کلیه‌ی پارامترهای مزبور حساس بوده و الگوهای مختلف بزرگنمایی حاصل می‌شود. نتایج ارائه شده می‌تواند در تکمیل و تدقیق آئین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود پیرامون موضوع تأثیر ساختگاه رسوبی مورد استفاده قرار بگیرد.

**واژگان کلیدی:** اجزای مرزی نیم‌صفحه، الگوی بزرگنمایی، حوزه‌ی زمان، حوزه‌ی رسوبی دوزنقه‌ای، موج SH.

تجمع رسوبات و نهشته‌های آبرفتی و خاکی با خواص گوناگون شکل گرفته‌اند. امروزه استقرار بسیاری از مناطق شهری بر روی عوارض مزبور از یک سو و نیاز روزافزون به افزایش دانش در حوزه‌ی رفتارشناسی لرزه‌ای از سوی دیگر، موجب شده تا لزوم انجام تحقیق در این حوزه بیش از پیش احساس شود [2]. در این راستا پژوهشگران متعددی از رویکردهای مختلف شامل روش‌های تحلیلی<sup>۱</sup>، نیمه‌تحلیلی<sup>۲</sup>، عددی<sup>۳</sup> و آزمایشگاهی<sup>۴</sup> جهت تحقیق در زمینه‌ی مذکور بهره گرفته‌اند [3-6]. با مرور تحقیقات

## ۱- مقدمه

یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان و زلزله‌شناسان در دهه‌های اخیر، آگاهی از نقش مهم حوزه‌های رسوبی بر بزرگنمایی/کوچکنمایی پاسخ سطح زمین بوده که بازتاب آن در آئین‌نامه‌ها و استانداردهای لرزه‌ای مشهود است [1]. دره‌های آبرفتی از جمله عوارضی می‌باشند که در طول سالیان دراز با

<sup>3</sup> Numerical Methods

<sup>4</sup> Experimental Method

<sup>1</sup> Analytical Methods

<sup>2</sup> Semi-Analytical Methods

ترکیبی اجزای محدود-بسط سری‌ها محاسبه نمایند. اخیراً، پاسخ لرزه‌ای دو بعدی دره‌ی آبرفتی در برابر امواج مهاجم لرزه‌ای  $SH$  با بهره‌گیری از روش اجزای محدود (FEM) توسط [29,30] گزارش شده است. شایان ذکر است [31-34] نیز محققانی هستند که پژوهش خود را بر کاربرد روش تفاضل محدود (FDM) بنا نهاده‌اند.

با علم بر اینکه در روش‌های مرزی فرآیند استخراج حل‌های اساسی/توابع گرین به صورت تحلیلی صورت می‌گیرد، دقت بالای نتایج دور از انتظار نیست. در روش اجزای مرزی (BEM)<sup>6</sup> ضمن تمرکز مش‌ها صرفاً بر روی مرز عارضه‌ی مورد مطالعه و پیرامون آن، شرایط مرزی تشعشع امواج در بیکران در روابط اقناع می‌شود که عدم لزوم به نظر گرفتن مرزهای جاذب انرژی به همراه کاهش قابل توجه حجم داده‌های ورودی، کاهش مدت زمان تحلیل و تسهیل فرآیند مدل‌سازی به ارمغان می‌آید [35,36]. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان روش‌های مرزی را به روش اجزای مرزی مستقیم (DBEM)<sup>7</sup> و غیرمستقیم (IBEM)<sup>8</sup> تقسیم نمود که حالت مستقیم آن اخیراً توسعه یافته و بیشتر مورد توجه علاقه‌مندان می‌باشد. علاوه بر این، روش مزبور در حالت محیط کامل<sup>9</sup> و نیم‌صفحه<sup>8</sup> قابل فرمول‌بندی است که هر یک در حوزه‌های تبدیل یافته<sup>9</sup> و زمان<sup>10</sup> گسترش یافته است [37]. از جمله مطالعات انجام شده در رفتارسنجی لرزه‌ای دره‌های آبرفتی با استفاده از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی فرکانس می‌توان به تحقیقات [38-42] اشاره نمود. اخیراً، [43] پراکنش سه‌بعدی امواج لرزه‌ای ناشی از یک دره‌ی آبرفتی را با استفاده از روش اجزای مرزی غیرمستقیم مطالعه نمودند. با بهره‌گیری از روش مذکور، [44] به ارزیابی پراکنش امواج  $SH$  در حضور دره‌های آبرفتی سه‌بعدی در نیم‌فضای چندلایه پرداختند. در سال‌های اخیر با رشد

پشتاز مبتنی بر رفتارسنجی دره‌های آبرفتی با استفاده روش‌های تحلیلی و نیمه‌تحلیلی می‌توان به مطالعات [7-12] اشاره نمود. در ادامه محققانی چون [13] توانستند پراکنش امواج  $SH$  ناشی از دره‌های آبرفتی منقطع را مطالعه نمایند. [14,15] پاسخ دره‌های رسوبی نامتقارن را به صورت تحلیلی بررسی نمودند. در این میان، [16,17] مطالعات خود را بر تعیین میزان تغییر مکان دره‌های آبرفتی در برابر موج  $SH$  معطوف ساختند. [18] تفرق امواج  $SH$  را در حضور دره‌های آبرفتی دوزنقه‌ای با استفاده از روش بسط تابع موج<sup>1</sup> مطالعه نمودند. اخیراً، [19-23] نیز از رویکرد مزبور جهت ارزیابی پراکنش موج در حضور دره‌های نیم‌دایروی بهره گرفتند.

با توجه به بروز محدودیت موجود در روش‌های تحلیلی/نیمه‌تحلیلی همچون انعطاف‌پذیری کم و عدم مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده‌ی نزدیک به عوارض طبیعی، پژوهشگران به سوی روش‌های منعطف جایگزین از جمله روش‌های عددی روی آوردند [24]. به طور کلی روش‌های عددی را می‌توان در قالب روش‌های حجمی<sup>2</sup> و مرزی<sup>3</sup> دسته‌بندی نمود. در روش‌های حجمی، علاوه بر مش‌بندی کل محیط مسأله، لازم است دامنه تا فاصله‌ی قابل توجه نسبت به محل استقرار عارضه‌ی مورد مطالعه توسعه یافته و سپس با در نظر گرفتن مرزهای جاذب انرژی امواج، مدل در طرفین بسته شود. بنابراین در کاربرد روش‌های یاد شده، افزایش قابل توجه مدت زمان تحلیل و افزایش میزان حافظه‌ی اشغال شده در رایانه اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. محققان زیادی از روش‌های حجمی برای پیشبرد اهداف مطالعاتی خود بهره گرفته‌اند که از جمله‌ی آن می‌توان به [25-27] اشاره کرد. در طی سالیان اخیر، [28] از جمله پژوهشگرانی بودند که توانستند پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را در حضور دره‌های آبرفتی نیمه‌پُر با استفاده از رویکرد

<sup>6</sup> Indirect Boundary Element Method

<sup>7</sup> Full-Plane BEM

<sup>8</sup> Half-Plane BEM

<sup>9</sup> Transformed-Domain

<sup>10</sup> Time-Domain

<sup>1</sup> Wave Function Expansion Method

<sup>2</sup> Volumetric Method

<sup>3</sup> Boundary Method

<sup>4</sup> Boundary Element Method

<sup>5</sup> Direct Boundary Element Method

## ۲- اجزای مرزی نیم صفحه در حوزهی زمان

در شکل (۱) مدل یک دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای مستقر در یک محیط نیم صفحه‌ی همگن الاستیک خطی در برابر امواج مهاجم  $SH$  نشان داده شده است. برای تهیهی این مدل از روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزهی زمان به کمک فرآیند زیرسازه‌سازی<sup>۲</sup> و روش تصویر منبع موج<sup>۳</sup> [50] جهت اقتناع شرایط مرزی سطح زمین استفاده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، مش‌بندی صرفاً بر مرز پیرامون عارضه و وجه میانی متمرکز شده است.

شکل (۱) - هندسه‌ی حوزهی رسوبی دوزنقه‌ای مستقر در یک نیم صفحه‌ی

الاستیک همگن در برابر امواج مهاجم  $SH$ .

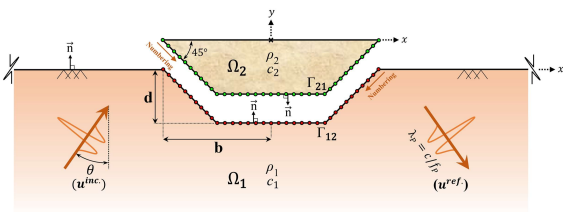


Fig. 1. The problem geometry of a trapezoidal-shaped sedimentary valley embedded in an elastic half-plane subjected to the incident  $SH$ -waves.

مطابق شکل (۱)،  $\Omega$  معرف دامنه بوده که برای بستر سنگی و حوزهی رسوبی به ترتیب با شماره‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.  $\Gamma$  مبین مرز بوده و  $\rho$  و  $c$  به ترتیب سرعت موج برشی و دانسیته می‌باشند که به صورت مجزا برای هر بخش از مدل در نظر گرفته شده است.  $\theta$  بیانگر زاویه‌ی امواج مهاجم لرزه‌ای و  $n$  مبین بردار نرمال عمود بر سطح می‌باشد که براساس جهت شماره‌گذاری گره‌ها تعریف می‌شود. برای تعیین مساحت دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای می‌توان از رابطه‌ی (۱) به شرح ذیل استفاده نمود:

$$S = (2 - SR) \cdot SR \cdot b^2 \quad (1)$$

چشمگیر روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزهی زمان توسط [45-47]، تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی گوناگون با استفاده از روش یاد شده رشد قابل توجهی داشته است. از جمله مطالعات اخیر در این حوزه می‌توان تحقیق [48] را نام برد که پراکنش امواج لرزه‌ای  $SH$  در حضور دره‌های متناوب نیم‌سینوسی را با استفاده از روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزهی زمان مطالعه نمودند. همچنین، [49] توانستند فرمول‌بندی کامل روش مزبور را برای تحلیل لرزه‌ای دره‌های آبرفتی در برابر امواج مهاجم  $SH$  توسعه دهند.

مرور ادبیات فنی نشان داد تاکنون تأثیر دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و الگوی بزرگنمایی حاصل شده به طور دقیق مورد مطالعه و حساسیت‌سنجی قرار نگرفته است. اهمیت تشکیل دره‌های آبرفتی دوزنقه‌ای ناشی از انباشت مصالح رسوبی در گذر زمان و لزوم آئین‌نامه‌های لرزه‌ای به شناخت بهتر این قسم عوارض موجب شد تا مؤلفان، پژوهش حاضر را بر تعیین الگوی بزرگنمایی سطح حوزه‌های رسوبی دوزنقه‌ای در برابر امواج مهاجم  $SH$  با استفاده از روش اجزای مرزی نیم صفحه در حوزهی زمان معطوف نمایند. در این راستا، پس از توسعه‌ی روش پیشنهاد شده مطابق با مدل مزبور، فرآیند پیاده‌سازی و اجرای معادلات حاکم در یک الگوریتم جامع که پیشتر تحت عنوان داس‌بِم<sup>۱</sup> [45] شناخته شده، صورت گرفت. ضمن ارائه‌ی چند مثال صحت‌سنجی، کیفیت و دقت الگوریتم تهیه شده مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس در قالب یک مطالعه‌ی پارامتریک جامع، با در نظر گرفتن نسبت امپدانس/ شکل و زاویه‌ی موج مهاجم  $SH$ ، الگوی بزرگنمایی سطح زمین ارزیابی شده است. در ادامه، به منظور کسب یک معیار سنجش کلی، بیشینه‌ی بزرگنمایی مرکز آبرفت برحسب پریود غالب تعیین شده و با برازش بر مقادیر حاصل، امکان تخمین بزرگنمایی برحسب تغییر نسبت‌های امپدانس و شکل فراهم شده است.

<sup>2</sup> Sub-Structure Method

<sup>3</sup> Wave Source Image Technique

<sup>1</sup> Dynamic Analysis of Structures by Boundary Element Method (DASBEM)

که در این رابطه،  $\alpha_{max}$  دامنه‌ی پیشینه‌ی موجک ریکر بوده و  $\alpha^{inc}$ ،  $r^{ref}$  و  $r^{inc}$  با بهره‌گیری از معادلات زیر قابل دستیابی می‌باشند:

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

$$\begin{aligned} \alpha^{ref} &= c(t - t_0) + r^{ref}, \\ r^{ref} &= -\sin(\theta) \cdot x - \cos(\theta) \cdot y, \end{aligned} \quad (5)$$

معادله‌ی موج اسکالر حاکم بر یک محیط خطی همگن و همسان به صورت زیر می‌باشد [52]:

$$\frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial y^2} + b(x, y, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial t^2}, \quad (6)$$

در رابطه‌ی فوق،  $u(x, y, t)$  و  $b(x, y, t)$  به ترتیب تغییر مکان و نیروی حجمی برون‌صفحه در نقطه‌ی  $(x, y)$  بوده و  $t$  معرف زمان می‌باشد. سرعت موج برشی  $(c)$  از رابطه‌ی  $\sqrt{\mu/\rho}$  تعیین می‌شود که  $\mu$  معرف مدول برشی و  $\rho$  دانسیته است. شرایط مرزی سطح صاف زمین نیز مطابق زیر ارائه می‌گردد:

$$\left. \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial n} \right|_{y=0} = 0, \quad (7)$$

در نهایت با حل همزمان معادلات (6) و (7)، توابع گرین نیم‌صفحه حاصل می‌شود [45].

### ۱-۲- معادله‌ی انتگرال مرزی (BIE)

از اعمال انتگرال باقیمانده‌های وزن‌دار به معادله‌ی (6) و با حذف جملات انتگرالی حجمی به کمک روش‌های حل مرزی، معادله‌ی انتگرال مرزی اصلاح شده در حوزه‌ی زمان بدون در نظر گرفتن شرایط اولیه و نیروهای حجمی، به صورت رابطه‌ی (8) بدست می‌آید [53,54]:

که  $SR$  نسبت شکل دره است و از رابطه‌ی  $(SR = \frac{d}{b})$  بدست می‌آید.  $d$  و  $b$  به ترتیب عمق و نصف پهنا‌ی دره می‌باشد. موج مهاجم لرزه‌ای برون‌صفحه‌ی  $SH$  از نوع تابع ریکر [51] فرض شده و با زوایای مختلف به مدل تابیده شده است.

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

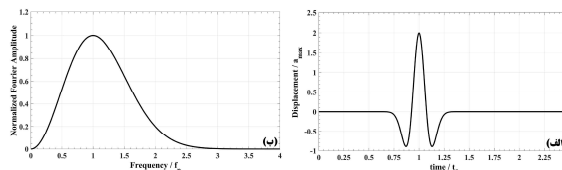


Fig. 2. The Ricker wavelet in the (a) time-domain and (b) frequency-domain.

در شکل (۲) نمودار موجک ریکر به ترتیب در حوزه‌ی زمان و فرکانس نشان داده شده که تابع آن مطابق رابطه‌ی (۲) منظور شده است. در معادله‌ی مزبور،  $f_p$  فرکانس غالب موج،  $t_0$  میزان تعویق زمان و  $t$  محور حقیقی زمان می‌باشد.

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

چنانچه مدل به صورت یک نیم‌صفحه فرض شود می‌بایست شرایط مرزی تنش آزاد بر روی سطح زمین اقیانوس؛ بنابراین تغییر مکان میدان آزاد  $(u^{ff})$  را می‌توان با در نظر گرفتن فازهای ورودی و انعکاسی موج به کمک رابطه‌ی (۳) محاسبه نمود [38].

$$\begin{aligned} u^{ff}(x, y, t) &= \alpha_{max} \cdot \left( \left[ 1 - 2 \left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc} \right)^2 \right] e^{-\left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc} \right)^2} H \left( t - \frac{r^{inc}}{c} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left[ 1 - 2 \left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref} \right)^2 \right] e^{-\left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref} \right)^2} H \left( t - \frac{r^{ref}}{c} \right) \right), \end{aligned} \quad (3)$$

معادله‌ی مذکور، با اعمال شرایط مرزی حاکم بر وجه میانی دره‌ی آبرفتی، معادله‌ی (۱۰) مطابق زیر تعیین می‌شود:

$$[A_1^1]\{X^N\} = [B_1^1]\{Y^N\} + \{R^N\} + \{u^{ff.N}\}, \quad (10)$$

که در آن،  $\{X^N\}$  و  $\{Y^N\}$  به ترتیب بردار متغیرهای مجهول و معلوم مرزی و  $[A_1^1]$  و  $[B_1^1]$  به ترتیب ماتریس‌های حاوی ستون‌های متناظر با مقادیر مجهول و معلوم مرزی می‌باشد. اثر تاریخچه‌ی زمانی دینامیکی پیشین بر گره زمانی حاضر  $N$ ام نیز با  $\{R^N\}$  وارد شده است. با حل معادله‌ی (۱۰)، کلیه‌ی مقادیر مجهول مرزی در هر گام زمانی بدست می‌آید و محاسبه‌ی تغییرمکان‌ها در هر یک از نقاط درونی واقع در دامنه نیز امکان‌پذیر خواهد بود.

#### ۴- مدل‌سازی

با استفاده از فرآیند محاسباتی زیرسازه‌سازی و تشکیل معادلات فوق برای هر ناحیه و سرانجام اعمال شرایط پیوستگی در وجه میانی، معادلات کوپل تعیین شده و مسأله حل پذیر می‌باشد. برای مشاهده‌ی جزئیات فرمول‌بندی، توسعه‌ی الگوریتم داس‌بم و فرآیند مدل‌سازی می‌توان از مطالعات [49,55,56] بهره جست.

#### ۵- مطالعه‌ی پارامتریک

هدف اصلی پژوهش حاضر، نمایش رفتار لرزه‌ای دره‌های آبرفتی از منظری بهتر و حقیقی‌تر، آشکارسازی توان الگوریتم توسعه‌یافته در تحلیل مسائل پیچیده‌ی مهندسی ژئوتکنیک و ارائه‌ی منحنی‌های کاربردی برای پروژه‌های مهندسی و عملیاتی می‌باشد. بدین منظور، به حساسیت‌سنجی پارامترهای کلیدی نسبت امپدانس و شکل حوزه‌ی رسوبی ذوزنقه‌ای بر پاسخ لرزه‌ای برون صفحه‌ی سطح زمین پرداخته می‌شود. در این راستا لازم است برخی مفاهیم پایه تعریف شود. نتایج حاصل از تحلیل

$$c(\xi)u(\xi, t) = \int_{\Gamma} \left\{ \int_0^t [u^*(x, t; \xi, \tau) \cdot q(x, t) - q^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u(x, t)] d\tau \right\} d\Gamma(x) + u^{ff}(\xi, t), \quad (8)$$

در این رابطه،  $\xi$  و  $x$  به ترتیب مختصات منبع و دریافت‌کننده پاسخ را نشان می‌دهد. جملات  $q^* \cdot u$  و  $u^* \cdot q$  بیانگر انتگرال‌های کانولوشن ریمان هستند که در آن  $u^*$  و  $q^*$  به ترتیب معرف توابع گرین نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان برای مؤلفه‌های تغییرمکان و ترکشن (تنش) بوده و  $u$  و  $q$  به ترتیب بیانگر تغییرمکان و تنش مرزی می‌باشد.  $u^{ff}$  تغییرمکان میدان آزاد سطح زمین صاف بدون عارضه بوده و  $c(\xi)$  زاویه‌ی شکست مرزی را مبین می‌سازد. پس از حل معادله‌ی فوق، تغییرمکان در کلیه‌ی گره‌های مرزی وجه میانی دره‌ی آبرفتی قابل دستیابی است. با معرفی  $c(\xi)$  برابر واحد در رابطه‌ی (۸)، امکان تعیین تغییرمکان در هر نقطه‌ی واقع در درون دامنه  $(\Omega)$  و سطح زمین  $(y = 0)$  فراهم می‌باشد.

#### ۳- عددی‌سازی

با گسسته‌سازی مرز دره توسط المان‌های سه گره‌ای درجه‌ی دوم و اعمال انتگرال‌گیری تحلیلی و عددی به ترتیب بر محورهای زمان و مکان، فرم ماتریسی معادله‌ی انتگرال مرزی (۸) به صورت رابطه‌ی (۹) بدست می‌آید:

$$\sum_{n=1}^N H^{N-n+1}\{u^n\} = \sum_{n=1}^N G^{N-n+1}\{q^n\} + \{u^{ff.N}\}, \quad (9)$$

در این رابطه، جملات  $H^{N-n+1}$  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  $n$  برای مؤلفه‌های تغییرمکان و تنش به ترتیب با  $\{u^n\}$  و  $\{q^n\}$  نشان داده شده است. برای دستیابی به فرم قابل حل

۰/۶ و ۰/۵ در نظر گرفته شده است. همچنین، زاویه‌ی موج مهاجم ( $\theta$ ) به ترتیب با زوایای ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه فرض شده است.

### ۵-۱- صحت‌سنجی

برای ارزیابی دقت عملکرد الگوریتم توسعه یافته (داس‌بم) در تحلیل لرزه‌ای دره‌های آبرفتی دوزنقه‌ای در برابر امواج مهاجم  $SH$ ، از نتایج تحلیلی [57] به عنوان بِنچ مارک استفاده شده است که مبتنی بر روش بسط تابع موج می‌باشد. برای نزدیک شدن به مدل مطالعه‌ی مزبور، یک دره‌ی دوزنقه‌ای با نسبت امپدانس ( $I$ ) ۰/۳ و هندسه‌ی نشان داده شده در شکل (۳) تهیه شد. مطابق با پارامترهای قید شده در ادبیات فنی، سرعت موج برشی و دانسیته‌ی آبرفت به ترتیب مقادیر  $400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  و  $0.76 \text{ ton}\cdot\text{m}^{-3}$  و برای بستر سنگی مقادیر  $800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  و

عموماً برحسب دو پارامتر بی‌بعد ارائه می‌شود. دامنه‌ی تغییر مکان نرمالایز شده‌ی سطح زمین (NDA) عبارت است از نسبت دامنه‌ی فوریه‌ی تغییر مکان سطح زمین حاصل از تحلیل در یک فرکانس معین، بر دامنه‌ی فوریه‌ی حرکت ناشی از امواج مهاجم در همان فرکانس. همچنین، نسبت بزرگنمایی ( $A$ ) از نسبت دامنه‌ی پاسخ سطح دره‌ی آبرفتی به تغییر مکان میدان آزاد تعیین می‌شود. نسبت امپدانس ( $I$ ) نیز اختلاف سختی مصالح تشکیل‌دهنده‌ی آبرفت و بستر سنگی است که به صورت  $I = \frac{\rho_a \cdot c_a}{\rho_m \cdot c_m}$  تعریف می‌شود. در این رابطه،  $\rho_a$  و  $c_a$  به ترتیب دانسیته و سرعت موج برشی آبرفت و  $\rho_m$  و  $c_m$  به ترتیب دانسیته و سرعت موج برشی بستر هستند. در این پژوهش، پاسخ حوزه‌ی فرکانس در محدوده‌ی بی‌بعد ۰/۲۵ تا ۴ ارائه شده است. فرکانس بی‌بعد ( $\eta$ ) براساس رابطه‌ی  $\eta = \omega b / \pi c$  محاسبه شده که در آن،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای موج و  $c$  سرعت موج برشی

شکل (۳) - دامنه‌ی تغییر مکان نرمالایز شده‌ی سطح زمین برحسب  $x/b$  برای دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای تحت امواج مهاجم  $SH$  با زوایای دلخواه و فرکانس بی‌بعد (الف) ۰/۵ و (ب) ۱.

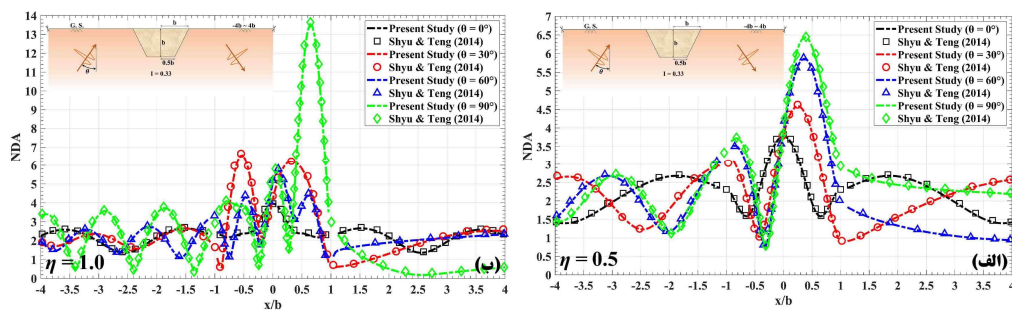


Fig. 3. The normalized displacement amplitude of the ground surface versus  $x/b$  for a trapezoidal-shaped sedimentary valley subjected to the  $SH$ -waves with the different incident angles and the dimensionless frequency of (a)  $\eta=0.5$  and (b)  $\eta=1.0$ .

$1 \text{ ton}\cdot\text{m}^{-3}$  اعمال گردید. برای فرکانس غالب، میزان تعویق زمان و دامنه‌ی بیشینه‌ی موجک ریکر نیز به ترتیب مقادیر ۳ هرتز، ۱/۵ ثانیه و ۰/۰۰۱ متر در نظر گرفته شد. در مدل مزبور، نصف پهنای آبرفت (b) برابر با ۵۰۰ متر لحاظ شده و فرآیند تحلیل در ۸۰۰ گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه انجام گرفت. مرز وجه میانی

دامنه می‌باشد. عکس فرکانس بی‌بعد ( $T = \frac{1}{\eta} = \frac{\lambda}{2b}$ ) بیانگر پیوند بی‌بعد می‌باشد که تعبیر فیزیکی آن طول موج ( $\lambda$ ) لرزه‌ای برابر با پهنای کل آبرفت است. در مدل تهیه شده، نسبت شکل دره (SR) به ترتیب برابر با مقادیر ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۹ فرض شده و نسبت امپدانس ( $I$ ) به ترتیب برابر با ۰/۳، ۰/۴،

<sup>۱</sup> Normalized Displacement Amplitude

معادل ۱۰ ثانیه منظور شده است تا امکان برقراری همگرایی مناسب در نتایج فراهم گردد. به طور کلی با مشاهده نتایج حوزه‌ی زمان می‌توان دریافت مادامیکه موج مهاجم اولیه (D) به مرز پیرامون یک دره‌ی آبرفتی برخورد می‌نماید، بخشی از امواج مستقیماً در محل برخورد دچار انعکاس (R) شده و بخش دیگر به درون عارضه انکسار می‌یابد. همچنین، بخشی دیگر از امواج بر روی مرز عارضه خزش یافته (C) و با رسیدن به سطح زمین منعکس می‌شود. در این حین به دلیل ماهیت نرم مصالح آبرفتی، امواج نفوذی در درون آبرفت به دام افتاده و مرز عارضه مانع از خروج آسان امواج مزبور می‌شود. هرچه اختلاف سختی مصالح افزایش یابد، عملکرد آینه‌ای شکل مرز دره نیز قوی‌تر خواهد شد. در نتایج ارائه شده، اولین اثر امواج محصور شده توسط ایستگاه (T) نشان داده شده و کلیه‌ی ارتعاشات پس از آن نیز ناشی از انعکاس و انکسار متوالی امواج در درون آبرفت می‌باشد. با توجه به تفسیر فوق، در شکل (۴ الف) با برخورد امواج مهاجم

دره با بستر سنگی پیرامون توسط ۹۳ المان درجه‌ی دو مش بندی شد و برای سطح زمین پیرامون ۷۷ نقطه‌ی درونی لحاظ گردید. در شکل (۳) نتایج حاصل در فرکانس‌های بی‌بعد ۰/۵ و ۱ در محدوده‌ی  $-εb$  تا  $εb$  از سطح زمین تحت موج مهاجم لرزه‌ای به ترتیب با زوایای ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نشان داده شده است. زاویه‌ی یال دره ( $γ$ ) نیز برابر با آرک تانژانت ۲ می‌باشد. چنانچه ملاحظه می‌شود هم‌خوانی مناسب میان نتایج حاصل از مطالعه‌ی حاضر و پاسخ‌های تحلیلی [57] به چشم می‌خورد.

## ۲-۵- تحلیل در حوزه‌ی زمان

برای مشاهده‌ی نحوه‌ی تفرق امواج مهاجم لرزه‌ای در سطح حوزه‌ی رسوبی دوزنقه‌ای و پیرامون آن، شکل (۴) ارائه شده است. نتایج این بخش برای محدوده‌ی  $-۲b$  تا  $۲b$  از سطح زمین، نسبت شکل ۰/۵، امپدانس ۰/۳ و زوایای برخورد موج ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه می‌باشد. مدت زمان نمایش پاسخ در تمام حالات

شکل (۴) - الگوی کلی پاسخ تاریخیچه‌ی زمانی سطح‌زمین در حضور دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل (SR) ۰/۵ در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد (الف) ۰°، (ب) ۳۰°، (ج) ۶۰° و (د) ۹۰°.

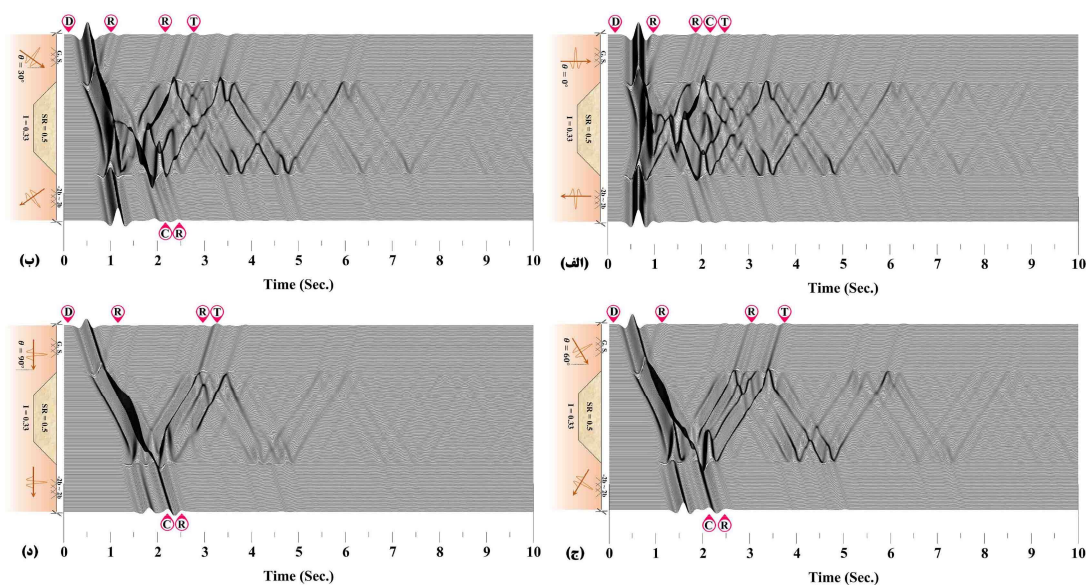


Fig. 4. Synthetic seismograms of the ground surface for a trapezoidal-shaped sedimentary valley with SR= 0.5 subjected to the SH-waves with the incident angle of (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 30^\circ$ , (c)  $\theta = 60^\circ$ , and (d)  $\theta = 90^\circ$ .

شکل (۵) - الگوی پراکنش امواج مهاجم قائم لرزه ای  $SH$  در حضور دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل (SR) ۰/۵.

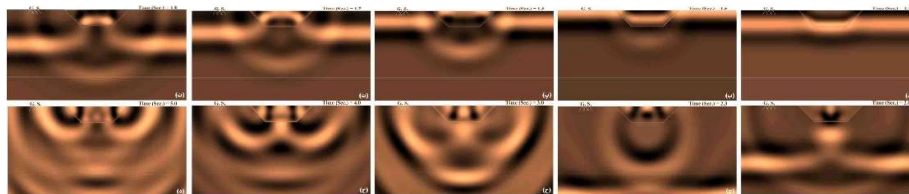


Fig. 5. Snapshots for a trapezoidal-shaped sedimentary valley with  $SR=0.5$  subjected to the  $SH$ -waves with the incident angle of  $\theta = 0^\circ$ .

شکل (۶) - الگوی پراکنش امواج مهاجم لرزه ای  $SH$  با زاویه‌ی برخورد  $30^\circ$  در حضور دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل (SR) ۰/۵.

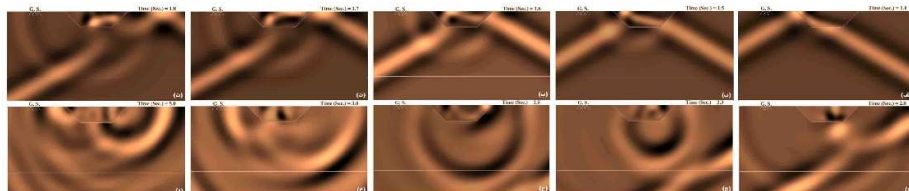


Fig. 6. Snapshots for a trapezoidal-shaped sedimentary valley with  $SR=0.5$  subjected to the  $SH$ -waves with the incident angle of  $\theta = 30^\circ$ .

شکل (۷) - الگوی پراکنش امواج مهاجم لرزه ای  $SH$  با زاویه‌ی برخورد  $60^\circ$  در حضور دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل (SR) ۰/۵.

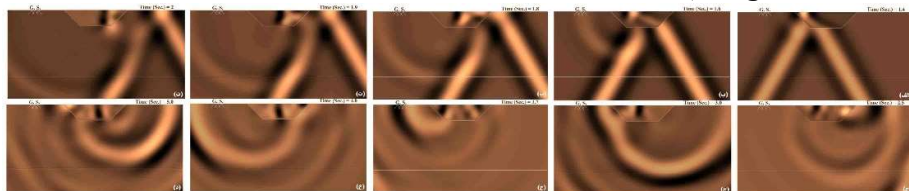


Fig. 7. Snapshots for a trapezoidal-shaped sedimentary valley with  $SR=0.5$  subjected to the  $SH$ -waves with the incident angle of  $\theta = 60^\circ$ .

شکل (۸) - الگوی پراکنش امواج مهاجم لرزه ای  $SH$  با زاویه‌ی برخورد  $90^\circ$  در حضور دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل (SR) ۰/۵.

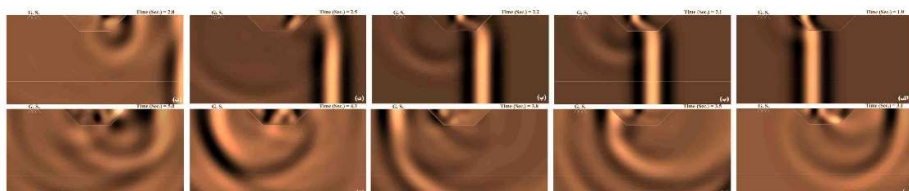


Fig. 8. Snapshots for a trapezoidal-shaped sedimentary valley with  $SR=0.5$  subjected to the  $SH$ -waves with the incident angle of  $\theta = 90^\circ$ .

قائم به دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای، پاسخ بدست آمده متقارن بوده و اولین ایستگاه ثبت شده مربوط به امواج انعکاسی (R) می‌باشد که بر اثر برخورد جبهه‌ی موج به لبه‌ی دره و سطح زمین شکل گرفته است. در ادامه، اثر امواج خزشی (C) بر روی یال‌های دره به خوبی نمایان شده و در نهایت می‌توان اولین اثر امواج محصور در آبرفت (T) را مشاهده نمود. پس از برخورد و بازتاب جبهه‌ی موج از سطح زمین، انعکاس متوالی امواج در درون آبرفت با

وقعه‌ی زمانی کوتاه تکرار شده و اثر انعکاس ۴۵ درجه‌ی امواج مبتنی بر زاویه‌ی یال‌های دره به خوبی مشهود است. همچنین، ارتعاش تا آخرین لحظات به صورت ممتد قابل ردیابی می‌باشد. به عنوان یک نتیجه‌گیری می‌توان بیان نمود، هرچه مقطع دره کوچکتر باشد، وقعه‌ی زمانی انعکاس و انکسار مکرر امواج در فاصله‌ی میان سطح فوقانی و کف آبرفت با سرعت بیشتر صورت گرفته و با توجه به مقدار کمینه‌ی نسبت امپدانس



دامنه‌ی امواج انعکاسی (R) در مقایسه با امواج خزشی (C) کاهش محسوسی داشته است. این پدیده نشان می‌دهد، در مدل مزبور حجم غالب امواج برخوردی به مرز عارضه به درون آن نفوذ نموده و شرایط مساعدی نیز برای امواج خزشی پدید آمده است. اما از یک سو به دلیل کوچک بودن مقطع دره و تمایل بیشتر زاویه‌ی تابش موج، حجم کمتر امواج در برخورد به دره تفرق یافته و از سوی دیگر، تجمع و خروج امواج پس از رخداد اولین انعکاس قوی در لبه‌ی دره، کاهش شدید حجم ارتعاش پاسخ را در پی داشته است. این پدیده را می‌توان در شکل (د) با تابش افقی امواج لرزه‌ای با وضوح بیشتر مشاهده نمود.

### ۳-۵- تصاویر لحظه‌ای در زمان

نمایش تصاویر لحظه‌ای به صورت مکمل در کنار پاسخ‌های حوزه‌ی زمان می‌تواند کمک شایانی به درک بهتر الگوی پراکنش امواج در حضور حوزه‌ی رسوبی مورد مطالعه نماید. بدین منظور شکل‌های (۵) تا (۸) ارائه شده‌اند. مطابق با نتایج بخش قبل، نسبت شکل و امیدانس به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۰/۳ در نظر گرفته شده و زاویه‌ی برخورد موج به ترتیب برابر با ۰، ۳۰، ۶۰

(۰/۳۳) در مدل مذکور، مدت زمان بیشتر برای خروج حجم قابل توجه امواج از درون آبرفت و همگرایی نتایج لازم می‌باشد. هنگام انتشار امواج با زاویه‌ی ۳۰ درجه (شکل ۴ ب)، ایستگاه (R) با دامنه‌ای به مراتب بیشتر از شکل (۴ الف) به چشم می‌خورد که ناشی از انعکاس قوی‌تر امواج در لبه‌ی نزدیک به جبهه‌ی موج می‌باشد. از سوی دیگر، فاز خزشی (C) تنها در سوی مخالف جبهه‌ی ورودی مشهود بوده و اثر آن با انعکاس امواج ورود یافته به درون آبرفت (R) همراه شده است. در این حالت، دو مسیر مجزای اولیه برای شکل‌گیری امواج محصور قابل ردیابی می‌باشد که اولی از کف آبرفت و دومی از لبه‌ی فوقانی در سطح نشأت گرفته است. با توجه به اینکه در شکل (۴ ب) تمرکز فازهای موج بر لبه‌ی مخالف جبهه‌ی موج می‌باشد، بیشترین میزان دامنه‌ی امواج در موقعیت مذکور به ثبت رسیده و خروج حجم قابل توجه امواج در محل اولین انعکاس، تا حدودی موجب کاهش حجم امواج محصور شده و کاهش مدت زمان همگرایی شده است. با متمایل شدن جبهه‌ی امواج لرزه‌ای به ۶۰ درجه (شکل ۴ ج) برخلاف شکل (۴ ب)، میزان

شکل (۹) - الگوی بزرگنمایی سطح زمین در حضور دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل (SR) ۰/۵ در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد (الف) ۰°، (ب) ۳۰°، (ج) ۶۰° و (د) ۹۰°.

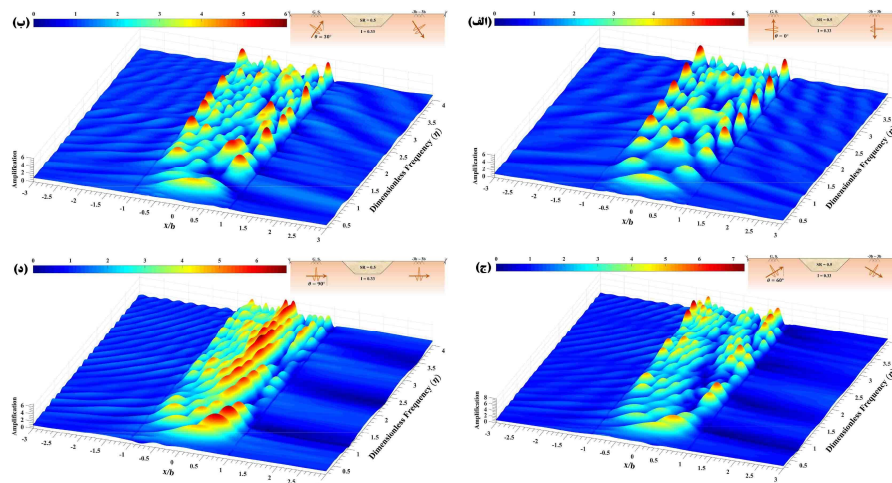


Fig. 9. The 3-D amplification of the ground surface versus different dimensionless frequencies for a trapezoidal-shaped sedimentary valley with  $SR=0.5$  subjected to the  $SH$ -waves with the incident angle of (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 30^\circ$ , (c)  $\theta = 60^\circ$ , and (d)  $\theta = 90^\circ$ .

حرکت رو به قائم امواج لرزه‌ای در مصالح آبرفتی، بیشترین میزان خطر برای سازه‌های سطحی واقع بر دره‌های آبرفتی ذوزنقه‌ای در شرایطی خواهد بود که سازه‌های مذکور در محل جناحین دره استقرار یابند. در ادامه، با مورب نمودن جبهه‌ی امواج لرزه‌ای به  $30^\circ$  درجه (شکل ۹ ب) می‌توان علاوه بر بزرگنمایی جانبی، شاهد بروز بزرگنمایی در نواحی میانی دره بود. اگرچه الگوی بزرگنمایی صورت گرفته در شکل (۹ ب) تا حدودی مانند شکل (۹ الف) می‌باشد، اما در تابش امواج لرزه‌ای با زاویه‌ی  $30^\circ$  درجه، بخش قابل توجهی از موج به درون آبرفت نفوذ نموده و اثر آن در برخورد به سطح زمین در سوی لبه‌ی مخالف جبهه‌ی موج نمایان شده است. اگرچه در شکل (۹ ب) فواصل میان قله بزرگنمایی به صورت محسوسی نسبت به شکل (۹ الف) نامتقارن بوده و بیشینه‌ی بزرگنمایی به مقدار ۶ نزول یافته است، اما نواحی جانبی دره همچنان دارای خطر بیشتر برای سازه‌های سطحی می‌باشد. با افزایش شیب جبهه‌ی موج به  $60^\circ$  درجه (شکل ۹ ج)، بیشینه‌ی بزرگنمایی به صورت چشمگیر رشد نموده و از مقدار ۷ عبور نموده است. در این حالت اگرچه بزرگنمایی در جناحین دره مشاهده می‌شود اما مطابق حالات قبل، مسیر منفرد از بزرگنمایی مشهود نبوده و مقادیر بیشینه به صورت موضعی در یال نزدیک جبهه‌ی موج متمرکز شده است. با اعمال افقی امواج مهاجم لرزه‌ای (شکل ۹ د)، اثر تجمع بزرگنمایی در مرکز دره به صورت آشکار قابل ملاحظه است ولی مقادیر بزرگنمایی به کمتر از ۷ محدود شده و در مقایسه با شکل (۹ ج) نزول یافته است. این مهم بیان می‌دارد اگرچه در حالات قبل نواحی جناحین سطح دره دارای خطر بیشتری برای سازه‌های سطحی بود، اما مطابق شکل (۹ د) در صورتی که یک زلزله‌ی میدان نزدیک با تابش موج افقی در نزدیکی محل استقرار دره‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای شکل گیرد، سازه‌های سطحی واقع در محل مرکز دره خسارات شدیدتر را متحمل خواهند شد. در یک جمع‌بندی می‌توان ادعان داشت به طور کلی استقرار سازه‌های

و  $90^\circ$  درجه فرض شده است. برای حصول این شکل‌ها، تعداد نقاط درونی در بستر سنگی پیرامون برابر با ۱۴۷۱ و در حوزه‌ی آبرفتی ۴۷۷۱ لحاظ شده است. در نتایج ارائه شده، محدوده‌ی سطح زمین بین  $3b$  تا  $3b$  و عمق  $0$  تا  $3b$  منظور شده است. ضمن تلاش برای تعیین مناسب‌ترین الگوی زمانی، مدت زمان نمایش تصاویر لحظه‌ای تا ثانیه‌ی پنجم از تفرق امواج انتخاب شده تا نقش هر یک از فازهای موج شامل امواج مستقیم (D)، انعکاس یافته (R)، خزش یافته (C) و محصور شده (T) با وضوح بیشتر قابل مشاهده باشد.

#### ۵-۴- تحلیل در حوزه‌ی فرکانس

ارائه‌ی نتایج حوزه‌ی فرکانس امکان مشاهده‌ی میزان بزرگنمایی صورت گرفته در نقاط مختلف سطح حوزه‌ی رسوبی و پیرامون آن را فراهم می‌نماید. بدین منظور در شکل (۹)، نتایج سه‌بعدی حوزه‌ی فرکانس برای دره‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای با نسبت شکل  $0/5$  و امپدانس  $0/3$  نمایش داده شده است. همانطور که در شکل (۹ الف) مشاهده می‌شود اعمال جبهه‌ی امواج مهاجم قائم، بیشینه‌ی بزرگنمایی در موقعیت لبه‌های دره را تا مقداری برابر با  $6/3$  افزایش داده است. این نتیجه بیان می‌دارد در نواحی جناحین با محدوده‌ی باریک، تعداد انعکاس متناوب امواج محصور در آبرفت به صورت قابل توجه بیشتر از سایر نقاط دره بوده و حاصل آن به صورت قله پیاپی بزرگنمایی رخنمون شده است. از منظری دیگر نیز می‌توان تفهیم داشت که نظم قابل مشاهده در فواصل قله بزرگنمایی ناشی از آهنگ یکسان در هر بار انعکاس بین سطح زمین و کف آبرفت شکل گرفته است. بدین ترتیب می‌توان انتظار داشت عمیق شدن دره موجب افزایش وقعه در بروز بزرگنمایی شود اما با این تفاوت که افزایش حجم امواج محصور می‌تواند سبب بزرگنمایی به مراتب شدیدتر گردد. به عنوان یک نتیجه‌ی کاربردی در این قسمت می‌توان اشاره نمود با توجه به نرمی لایه‌های خاک در نزدیکی سطح زمین و تمایل

آنچه مسلم است هرچه نسبت امیدانس کمتر باشد، مصالح دره‌ی آبرفتی نرم‌تر بوده و امکان محصورشدگی شدیدتر امواج در مقایسه با امیدانس‌های بیشتر فراهم می‌شود. امواج محصور در برخورد با سطح زمین و مرزهای پیرامون دره به دفعات دچار انعکاس/انکسار شده که اثر آن با افزایش مقادیر بزرگنمایی در سطح زمین نمایان می‌شود.

شکل (۱۱) - بزرگنمایی سطح زمین در حضور دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۳ تحت هجوم امواج  $SH$  با زاویه‌ی برخورد (الف)  $0^\circ$ ، (ب)  $30^\circ$ ، (ج)  $60^\circ$  و (د)  $90^\circ$ .

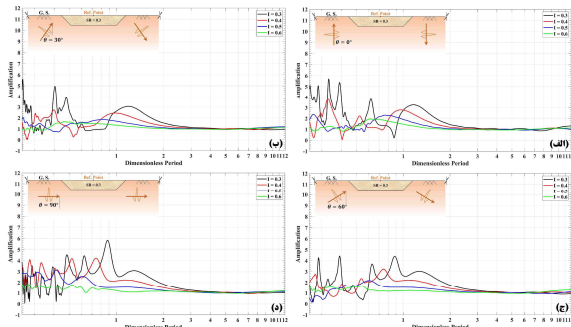


Fig. 11. The amplification of the ground surface versus different dimensionless periods for a trapezoidal-shaped sedimentary valley with  $SR=0.3$  subjected to the  $SH$ -waves with the incident angle of (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 30^\circ$ , (c)  $\theta = 60^\circ$ , and (d)  $\theta = 90^\circ$ .

از سوی دیگر، هرچه مقطع آبرفت کوچکتر باشد سرعت تکرر انعکاس امواج افزایش یافته و بزرگنمایی بیشتر به وقوع می‌پیوندد. با متمایل شدن جبهه‌ی موج به  $30^\circ$  درجه (شکل ۱۰ ب)، بیشینه‌ی بزرگنمایی به  $4/6$  رشد می‌نماید. در این حالت، امکان نفوذ حجم بیشتر امواج به درون آبرفت در مقایسه با شکل (۱۰ الف) و تجمع بیشتر آن در لبه‌ی دره‌ی مخالف جبهه‌ی موج فراهم شده و اندک افزایش در مقادیر بزرگنمایی مشهود است. مادامیکه زاویه‌ی برخورد جبهه‌ی موج به  $60^\circ$  درجه (شکل ۱۰ ج) متمایل شده است، تجمع فازه‌ی موج در لبه‌ی دره به گونه‌ای است که رشد قابل ملاحظه‌ی بیشینه‌ی بزرگنمایی تا مقدار  $5/2$  و در تابش افقی امواج (شکل ۱۰ د) تا  $5/8$  را به دنبال

سطحی بر روی دره‌های آبرفتی دوزنقه‌ای دارای خطر زیاد در حین رخداد زمین‌لرزه بوده و در حالات مختلف احتمال بروز آسیب در تمامی نواحی سطح آن وجود دارد.

### ۵-۵- اثر نسبت امیدانس / شکل

در شکل‌های (۱۰) تا (۱۴) بزرگنمایی مرکز آبرفت (نقطه‌ی مرجع<sup>۱</sup>) برحسب پیروید بی‌بعد نشان داده شده است. نتایج به ترتیب برحسب نسبت امیدانس  $0/3$ ،  $0/4$ ،  $0/5$  و  $0/6$  با نسبت شکل  $0/1$ ،  $0/3$ ،  $0/5$ ،  $0/7$  و  $0/9$  برای زوایای برخورد موج  $0^\circ$ ،  $30^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $90^\circ$  درجه ارائه شده است. مقدار کمینه‌ی  $0/3$  برای امیدانس مبتنی بر ادبیات فنی انتخاب شده چرا که در مقادیر کمتر از آن، آبرفت پایداری خود را از دست داده و ماهیتی نظیر گل و لای خواهد داشت [7]. همانگونه که در شکل (۱۰ الف) مشاهده می‌شود در نسبت امیدانس  $0/3$  و  $0/6$  به ترتیب بیشترین و کمترین بزرگنمایی در حدود  $4/4$  و  $1/6$  حاصل شده است.

شکل (۱۰) - بزرگنمایی سطح زمین در حضور دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل  $0/1$  تحت هجوم امواج  $SH$  با زاویه‌ی برخورد (الف)  $0^\circ$ ، (ب)  $30^\circ$ ، (ج)  $60^\circ$  و (د)  $90^\circ$ .

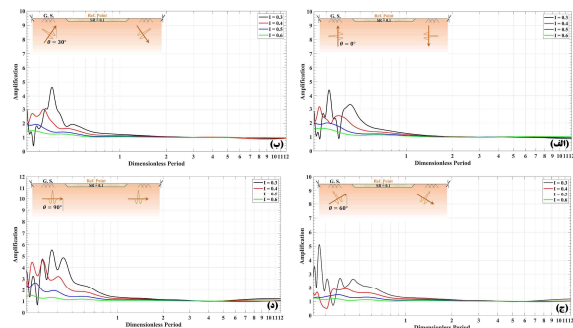


Fig. 10. The amplification of the ground surface versus different dimensionless periods for a trapezoidal-shaped sedimentary valley with  $SR=0.1$  subjected to the  $SH$ -waves with the incident angle of (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 30^\circ$ , (c)  $\theta = 60^\circ$ , and (d)  $\theta = 90^\circ$ .

<sup>1</sup> Reference Point

شکل (۱۳) - بزرگنمایی سطح زمین در حضور دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۷ تحت هجوم امواج  $SH$  با زاویه‌ی برخورد (الف)  $0^\circ$ ، (ب)  $30^\circ$ ، (ج)  $60^\circ$  و (د)  $90^\circ$ .

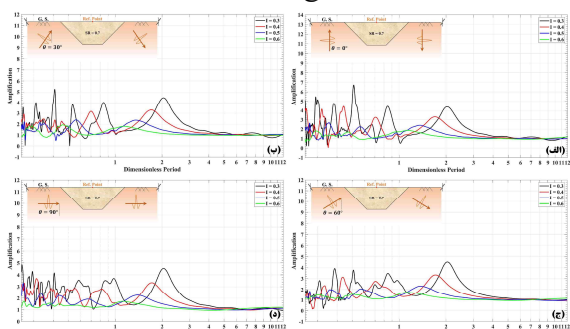


Fig. 13. The amplification of the ground surface versus different dimensionless periods for a trapezoidal-shaped sedimentary valley with  $SR=0.7$  subjected to the  $SH$ -waves with the incident angle of (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 30^\circ$ , (c)  $\theta = 60^\circ$ , and (d)  $\theta = 90^\circ$ .

شکل (۱۴) - بزرگنمایی سطح زمین در حضور دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۹ تحت هجوم امواج  $SH$  با زاویه‌ی برخورد (الف)  $0^\circ$ ، (ب)  $30^\circ$ ، (ج)  $60^\circ$  و (د)  $90^\circ$ .

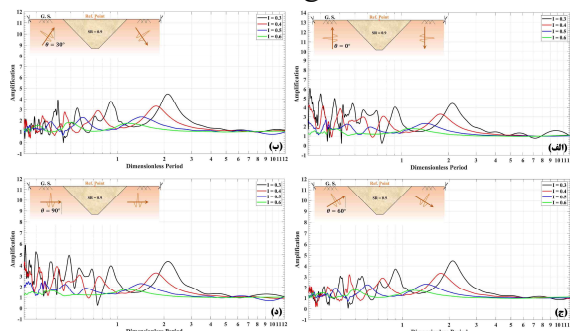


Fig. 14. The amplification of the ground surface versus different dimensionless periods for a trapezoidal-shaped sedimentary valley with  $SR=0.9$  subjected to the  $SH$ -waves with the incident angle of (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 30^\circ$ , (c)  $\theta = 60^\circ$ , and (d)  $\theta = 90^\circ$ .

علاوه بر این، با مقایسه‌ی شکل‌های (۱۰) و (۱۱) افزایش اثر مانع شدگی دره با نسبت شکل بزرگتر و به دنبال آن ازدیاد مقادیر بزرگنمایی بیشینه مشاهده می‌شود. با توسعه‌ی نسبت شکل دره به ۰/۵ (شکل ۱۲) رشد چشمگیر بزرگنمایی بیشینه تا مقدار ۶/۲ به ویژه برای زاویه‌ی تابش  $90^\circ$  درجه (شکل ۱۲) مشهود است. با فزونی نسبت شکل به ۰/۷ بزرگنمایی بیشینه رشد مجدد چشمگیر در مقایسه با مدل‌های پیشین را تجربه

داشته است. برخلاف تصور که انتظار میرفت در زاویه‌ی تابش قائم و با برخورد مستقیم امواج، قوی‌ترین بزرگنمایی در سطح دره شکل بگیرد، برخورد افقی امواج افزایش قابل توجه بزرگنمایی در مقایسه با سایر حالات را رقم زده است.

شکل (۱۲) - بزرگنمایی سطح زمین در حضور دره‌ی آبرفتی دوزنقه‌ای با نسبت شکل ۰/۵ تحت هجوم امواج  $SH$  با زاویه‌ی برخورد (الف)  $0^\circ$ ، (ب)  $30^\circ$ ، (ج)  $60^\circ$  و (د)  $90^\circ$ .

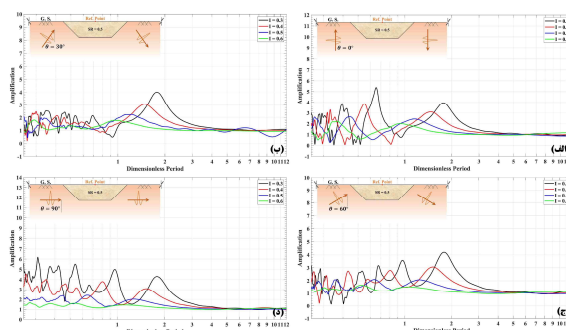


Fig. 12. The amplification of the ground surface versus different dimensionless periods for a trapezoidal-shaped sedimentary valley with  $SR=0.5$  subjected to the  $SH$ -waves with the incident angle of (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 30^\circ$ , (c)  $\theta = 60^\circ$ , and (d)  $\theta = 90^\circ$ .

با افزایش نسبت شکل دره به ۰/۳ (شکل ۱۱ الف)، میزان ارتعاش در نتایج افزایش یافته و بزرگنمایی بیشینه نیز نسبت به شکل (۱۰ الف) رشد زیادی داشته است. چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش نسبت شکل دره، تعداد دفعات انعکاس متوالی امواج تکثر شده که حاصل آن، آشفتگی بیشتر پاسخ و افزایش مدّت زمان لازم برای همگرایی می‌باشد. با ارزیابی مقادیر بزرگنمایی در شکل (۱۱) ملاحظه می‌گردد بیشینه‌ی بزرگنمایی با مقدار ۵/۸ در تابش افقی امواج (شکل ۱۱ د) حاصل شده است. مادامیکه در دیگر زوایای موج به ترتیب مقادیر ۵/۷، ۵/۶ و ۴/۴ برای برخورد  $0^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $60^\circ$  درجه بدست آمده است. بنابراین با مقایسه‌ی اشکال (۱۰ ج) و (۱۱ ج) می‌توان تأثیر نسبت شکل بزرگتر در کاهش مقادیر بزرگنمایی را به وضوح ملاحظه نمود که ناشی از انعکاس حجم قابل ملاحظه‌ی امواج مهاجم در برخورد به مرز دره می‌باشد.

طول موج‌های کوچکتر از پهنای عارضه در بروز بزرگنمایی را آشکار ساخته است.

اما با توسعه‌ی نسبت شکل، بزرگنمایی در پریودهای بیش از مقدار واحد حاصل شده است که حاکی از بسیج شدن طول موج‌های بزرگتر از پهنای عارضه در ایجاد حداکثر بزرگنمایی می‌باشد. با متمایل شدن جبهه‌ی موج به ۳۰ درجه، افزایش نسبت شکل به تدریج منجر به افزایش طول موج مؤثر بر بزرگنمایی شده است. برخورد جبهه‌ی موج با زاویه‌ی ۶۰ درجه، بازخوردی مشابه حالت ۳۰ درجه را رقم زده است متناهی با این تفاوت که میزان طول موج‌های مؤثر، اندکی بیشتر شده است. از نتایج حاصل در انتشار افقی امواج ملاحظه می‌شود در بیشتر نسبت شکل‌ها، طول موج‌های کمتر از پهنای عارضه مؤثر واقع شده است. مطابق مقادیر جدول (۱)، بیشترین بزرگنمایی برابر با ۶/۷۲۲۸ متعلق به برخورد قائم امواج در نسبت شکل ۰/۷ با امپدانس ۰/۳ ایجاد شده که در این حالت بیشترین خطر برای سازه‌های سطحی تجربه می‌شود.

### ۵-۶- بزرگنمایی بیشینه

در این بخش به جمع‌بندی مقادیر بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح دره‌ی آبرفتی ذوزنقه‌ای در حالات مختلف پرداخته شده است. بدین‌منظور، ابتدا مقادیر بیشینه‌ی بزرگنمایی با در نظر گرفتن تغییر نسبت امپدانس، شکل و زاویه‌ی برخورد امواج مهاجم لرزه‌ای به صورت مجزا برآورد شده و در نهایت با برازش خطی بر آن‌ها، اثر هر یک از پارامترهای مزبور به صورت معادلات مربوطه آشکار شده است.

### ۵-۶-۱- بزرگنمایی بیشینه برحسب نسبت

#### امپدانس

در شکل (۱۵) برازش خطی از بیشینه‌ی بزرگنمایی در مقابل تغییر نسبت امپدانس ارائه شده است. نسبت امپدانس در بازه‌ی

نموده و به مقدار ۶/۶ در حالت هجوم امواج قائم (شکل ۱۳ الف) رسیده است. به عنوان یک نتیجه‌گیری می‌توان بیان نمود در نسبت شکل ۰/۷ (شکل ۱۳) یال‌های بلندتر دره در مقایسه با نسبت‌های دیگر، هدایت مناسب امواج خزشی و افزایش انعکاس امواج محصور در نواحی جناحین را سبب شده است. با بررسی نتایج در نسبت شکل ۰/۹ (شکل ۱۴) ملاحظه می‌گردد برخلاف شکل (۱۳) بزرگنمایی بیشینه از مقدار ۶ فراتر نرفته است. بنابراین بزرگ شدن مقطع دره نمی‌تواند به تنهایی عامل رشد بزرگنمایی تلقی شده و عواملی چون میزان عمق عارضه، تیزی ضلع کف آن و میزان خزش امواج متناسب با هندسه‌ی عارضه می‌تواند از جمله عوامل کاهنده‌ی بزرگنمایی بیشینه در مقایسه با نسبت شکل‌های کوچکتر باشد.

جدول ۱- بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین بر حسب پریود غالب در نقطه‌ی مرجع براساس تغییر نسبت امپدانس/ شکل در برابر هجوم امواج SH با زوایای برخورد مختلف.

Wave Angle	0°		30°		60°		90°	
	Impedance Ratio	Max. Amp.	Period	Max. Amp.	Period	Max. Amp.	Period	Max. Amp.
0.1	0.3	4.4214	0.3137	4.6344	0.3628	5.1219	0.2735	5.5511
	0.4	3.1572	0.2711	3.0032	0.3201	1.9247	0.4050	4.6407
	0.5	2.0040	0.3048	1.9229	0.2860	1.4729	0.3629	2.6470
	0.6	1.6217	0.2852	1.4816	0.2715	1.2469	0.2503	1.4979
	0.3	5.7022	0.3319	5.5959	0.2518	4.4190	0.3901	5.8344
0.3	0.4	3.7939	0.3293	2.7427	0.3984	3.2308	0.7481	4.2211
	0.5	2.3696	0.2632	2.0551	0.2528	2.1739	0.6024	3.1411
	0.6	1.9549	0.6129	1.6596	0.4640	1.6488	0.5403	1.7773
	0.3	5.3776	0.6534	4.0100	1.7775	4.1978	1.7968	6.1660
	0.4	3.8626	0.5482	3.0575	1.4856	3.0611	1.5178	4.5356
0.5	0.5	2.6463	0.4415	2.2379	1.2160	2.0896	0.6364	2.4370
	0.6	2.2197	0.3673	1.8083	0.2910	1.6479	0.5235	1.6738
	0.3	6.7228	0.5113	5.2438	0.4091	4.5080	2.0367	4.8540
	0.4	4.4395	0.4407	3.3153	1.7083	3.3307	1.7083	3.6947
	0.5	2.6900	0.3555	2.3953	0.5612	2.2064	1.3769	3.2025
0.7	0.6	1.8698	1.1378	1.9402	0.4614	1.7205	1.1231	1.7287
	0.3	6.0759	0.2569	4.4612	2.1022	4.4810	2.1141	5.8885
	0.4	4.2238	0.2547	3.3257	1.7753	3.3296	1.7687	4.3338
	0.5	2.6650	0.3249	2.3380	1.4314	2.3207	1.4228	2.5591
	0.6	1.7947	1.1118	1.8451	0.5047	1.7750	0.5036	1.7657

Table 1. The maximum amplifications of the ground surface and their corresponding periods in reference point based on the variation of impedance/shape ratio subjected to the SH-waves with the different incident angles.

در جدول (۱) مقادیر بیشینه‌ی بزرگنمایی به همراه پریودهای غالب حاصل برحسب نسبت شکل، امپدانس و زاویه‌ی جبهه‌ی موج طبقه‌بندی شده است. مادامیکه دره با نسبت شکل کمتر از ۰/۵ در برابر امواج مهاجم قائم قرار دارد، بیشینه‌ی بزرگنمایی در محدوده‌ی پریودهای بی‌بعد کوچکتر از واحد پدید آمده که نقش

زاویه‌ی جبهه‌ی موج به  $60^\circ$  درجه متمایل می‌شود (شکل ۱۵ ج) همچنان انزال در شیب منحنی‌ها مشهود بوده و خطوط برازش یافته برای نسبت شکل‌های  $0.7$  و  $0.9$  کاملاً بر روی یکدیگر منطبق شده‌اند. با اعمال افقی جبهه‌ی موج (شکل ۱۵ د) رشد محسوس مقادیر بزرگنمایی در مقایسه با زوایای  $30^\circ$  (شکل ۱۵ ب) و  $60^\circ$  درجه (شکل ۱۵ ج) به چشم می‌خورد، اما مقادیر بزرگنمایی همچنان کمتر از حالت تابش قائم (شکل ۱۵ الف) می‌باشد. آنچه از اشکال مزبور با توجه به جدول (۱) استنباط می‌شود آن است که در اکثر حالات، طول موج‌های معادل ربع تا نصف پهنای حوزه‌ی رسوبی همواره مسبب بزرگنمایی بحرانی است. این موضوع بر اصل پدیده‌ی انتشار موج صحه گذاشته و قویاً بر تأثیر طول موج‌های کوچک در رخداد زمین لرزه‌های مخرب تأکید می‌نماید.

### ۵-۶-۲- بزرگنمایی بیشینه بر حسب نسبت شکل

در شکل (۱۶) بزرگنمایی بیشینه بر حسب تغییر نسبت شکل نشان داده شده است. چنانچه در شکل (۱۶ الف) ملاحظه مشاهده می‌شود با افزایش نسبت شکل دره، مقادیر بزرگنمایی در کلیه‌ی نسبت‌های امپدانس صعودی است ولی روند آن در نسبت امپدانس کمینه ( $0.3$ ) مبرم می‌باشد. چنانچه زاویه‌ی برخورد موج به  $30^\circ$  درجه (شکل ۱۶ ب) مایل شود، فاصله‌ی میان منحنی‌ها کاهش می‌یابد. این نتیجه بیان می‌دارد افزایش نسبت شکل در نسبت امپدانس کم ( $0.3$ ) اثر معکوس داشته ولی برای امپدانس‌های متوسط تا زیاد ( $0.4$  تا  $0.6$ ) این اثر همچنان مثبت می‌باشد. در شکل (۱۶ ج) با تمایل زاویه‌ی موج به  $60^\circ$  درجه، اگرچه سیر نزولی برای امپدانس  $0.3$  و بالعکس در دیگر نسبت‌ها مشهود است ولی در کل، مقادیر بزرگنمایی بیشینه نسبت به حالت قبل (شکل ۱۶ ب) کاهش یافته است. در شکل (۱۶ د) نیز هر چه نسبت امپدانس کمتر است، اختلاف میان نتایج بدست آمده در نسبت شکل‌های مختلف بیشتر شده است. اما

$0.33$  تا  $1.0$  مفروض شده و منحنی‌ها براساس نسبت شکل دره تفکیک شده‌اند. چنانچه در شکل (۱۵ الف) ملاحظه می‌شود تمامی خطوط برازش یافته سیر نزولی دارند. این موضوع حاکی از آن است که هرچه امپدانس افزایش یابد و ماهیت مصالح آبرفتی سخت‌تر شود، بزرگنمایی سطح زمین کاهش می‌یابد. در نسبت امپدانس  $1.0$  مصالح حوزه‌ی رسوبی و بستر سنگی کاملاً همگن فرض شده و مطابق پاسخ میدان آزاد، بزرگنمایی در کلیه‌ی حالات برابر با واحد اعمال شده است. در امپدانس کم، فاصله‌ی منحنی‌ها زیاد بوده و با افزایش آن به تدریج کاهش می‌یابد که به خوبی اثر نسبت شکل عارضه پدیدار می‌شود. در حالت امواج قائم، دره‌ی آبرفتی با نسبت شکل  $0.7$  بیشترین بزرگنمایی را در امپدانس  $0.33$  دارا می‌باشد. از سوی دیگر، در نسبت شکل  $0.1$  کمترین بزرگنمایی با شیب کمینه حاصل شده است. با مایل شدن جبهه‌ی موج به  $30^\circ$  درجه (شکل ۱۵ ب) مقادیر بیشینه‌ی بزرگنمایی و روند نزولی منحنی‌ها در مقایسه با شکل (۱۵ الف) کاهش محسوس یافته است.

شکل (۱۵) - بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع بر حسب نسبت امپدانس ( $I$ ) در برابر هجوم امواج  $SH$  با زاویه‌ی برخورد (الف)  $0^\circ$ ، (ب)  $30^\circ$ ، (ج)  $60^\circ$  و (د)  $90^\circ$ .

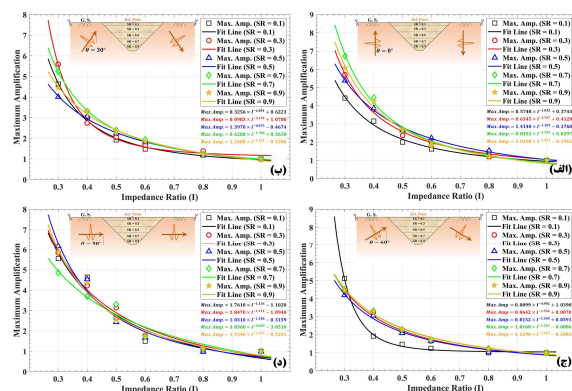


Fig. 15. The maximum amplification of the ground surface in reference point based on the impedance ratio ( $I$ ) subjected to the  $SH$ -waves with the incident angle of (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 30^\circ$ , (c)  $\theta = 60^\circ$ , and (d)  $\theta = 90^\circ$ .

در این شکل بر خلاف شکل (۱۵ الف) فاصله‌ی منحنی‌ها به صورت قابل توجه نسبت به یکدیگر کاهش یافته است. مادامیکه

امپدانس/شکل و زاویه‌ی برخورد جبهه‌ی موج، اثر حضور آبرفت در تغییر الگوی بزرگنمایی سطح زمین حساسیت‌سنجی شد. در نهایت، پس از بررسی و تفسیر نتایج، به جمع‌بندی پاسخ‌ها در قالب یک سری منحنی‌های مهندسی اقدام گردید. در ادامه به صورت مختصر به برخی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق اشاره شده است:

۱- چنانچه مشاهده شد در حالت هجوم جبهه‌ی موج قائم، تمرکز انکسار امواج در لبه‌های آبرفت مسبب تشکیل نواحی بحرانی با بزرگنمایی بیشتر از ۶/۳ شد. این مختصات در انتشار امواج افقی به سمت مرکز حوزه‌ی رسوبی با نسبت بزرگنمایی معادل ۶/۷ متمایل شد.

۲- گسترش هندسه‌ی دره‌ی آبرفتی سبب تکثر ارتعاش بزرگنمایی بیشینه برحسب پیروید بی‌بعد شد بگونه‌ای که میزان بزرگنمایی از مقدار کمینه‌ی ۱/۲۵ در نسبت شکل کمینه‌ی ۰/۱، به مقادیر فراتر از ۶ در نسبت شکل‌های بیشتر رشد نمود. این موضوع از ازدیاد انعکاس/انکسار امواج در حوزه‌ی رسوبی نرم حکایت داشت.

۳- کاهش نسبت امپدانس، میزان بزرگنمایی را چنان متأثر ساخت که بیشینه‌ی آن در حداقل امپدانس به مقداری فراتر از ۶/۷ افزایش یافت.

۴- بیشترین خطر برای سازه‌های سطحی واقع بر حوزه‌ی رسوبی دوزنقه‌ای در نسبت شکل ۰/۷ و امپدانس کمینه‌ی ۰/۳ رخ نمود.

۵- منحنی‌های برازش یافته بر حسب امپدانس تبیین نمود، افزایش پارامتر مزبور موجب کاهش تدریجی بزرگنمایی سطح شده بگونه‌ای که در امپدانس ۱/۰، بزرگنمایی در کلیه‌ی حالات به سمت نسبت واحد یعنی بزرگنمایی سطح آزاد همگرا شد.

هر چه نسبت امپدانس افزایش یافته، این اختلاف کاهش یافته و شیب اندک در نتایج را رقم زده است که بیانگر خنثی شدن اثر نسبت شکل دره با تابش افقی موج می‌باشد.

شکل (۱۶) - بزرگنمایی بیشینه‌ی سطح زمین در نقطه‌ی مرجع برحسب نسبت شکل (SR) در برابر هجوم امواج SH با زاویه‌ی برخورد (الف)  $0^\circ$ ، (ب)  $30^\circ$ ، (ج)  $60^\circ$  و (د)  $90^\circ$ .

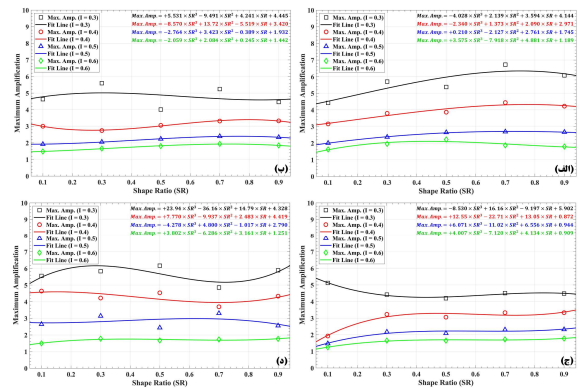


Fig. 16. The maximum amplification of the ground surface in reference point based on the shape ratio (SR) subjected to the SH-waves with the incident angle of (a)  $\theta = 0^\circ$ , (b)  $\theta = 30^\circ$ , (c)  $\theta = 60^\circ$ , and (d)  $\theta = 90^\circ$ .

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به تحلیل لرزه‌ای سطح زمین و تعیین الگوی بزرگنمایی آن در حضور حوزه‌ی رسوبی دوزنقه‌ای تحت امواج مهاجم مایل SH پرداخته شد. بدین منظور از روش اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه‌ی زمان جهت مدلسازی بهره گرفته شد. ضمن توسعه‌ی فرمول‌بندی برای مسأله‌ی مزبور و عددی‌سازی آن در قالب الگوریتم توسعه‌یافته (داس‌بم)، به ارائه‌ی چند مثال صحت‌سنجی جهت ارزیابی کارایی روش و دقت عملکرد الگوریتم پرداخته شد. نتایج نشان داد روش پیشنهاد شده قابلیت فنی لازم برای تحلیل لرزه‌ای حوزه‌های رسوبی تیزگوشه را دارا است. پیرامون مطالعه‌ی پارامتریک، پاسخ سطح زمین و پراکنش امواج لرزه‌ای در زیر سطح زمین به صورت تصاویر لحظه‌ای مشهود شد. سپس، با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی نسبت

[10] Todorovska MI, Lee VW. 1991 Surface motion of shallow circular alluvial valleys for incident plane *SH*-waves (Analytical solution). *Soil Dyn Earthq Eng*, 10(4), 192-200.

[11] Yuan X, Liao Z. 1995 Scattering of plane *SH*-waves by a cylindrical alluvial valley of circular-arc cross-section. *Earthq Eng Struct Dyn*, 24(10), 1303-1313.

[12] Sherif RI, Lee VW. 1996 Diffraction around a circular alluvial valley in an elastic wedge-shaped medium due to Plane *SH*-waves. *Europ Earthq Eng*, 3, 21-28.

[13] Tsaur DH, Chang KH. 2009 Scattering of *SH*-waves by truncated semi-cylindrical canyon. *J Eng Mech*, ASCE, 135, 862-870.

[14] Zhang N, Gao Y, Cai Y, Li D, Wu Y. 2012 Scattering of *SH*-waves induced by a non-symmetrical V-shaped canyon. *Geophys J Int*, 191(1), 243-256.

[15] Chang KH, Tsaur DH, Wang JH. 2015 Response of a shallow asymmetric V-shaped canyon to anti-plane elastic waves. *Proc Math Phys Eng Sci*, 471(2174), 20140215.

[16] Faik-Kara H, Trifunac MD. 2014 Two-dimensional earthquake vibrations in sedimentary basins, *SH*-waves. *Soil Dyn Earthq Eng*. 63, 69-82.

[17] Jalali RS, Tokmechi Z, Trifunac MD. 2015 A note on the surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident-cylindrical *SH*-waves radiating from a fault with arbitrary orientation. *Soil Dyn Earthq Eng*. 79(A), 80-88.

[18] Zhang C, Liu Q, Deng P. 2015 Antiplane scattering of *SH*-waves by a trapezoidal valley with a circular-arc alluvium in an elastic half space. *J Earthq Tsu*. 9(3), 1550008. 10.1142/S1793431115500086.

[19] Le T, Lee VW, Trifunac MD. 2017 *SH*-waves in a moon-shaped valley. *Soil Dyn Earthq Eng*, 101, 162-175.

[20] Zhang N, Gao Y, Pak RYS. 2017 Soil and topographic effects on ground motion of a surficially inhomogeneous semi-cylindrical canyon under oblique incident *SH*-waves. *Soil Dyn Earthq Eng*. 95, 17-28.

[21] Tsaur DH, Chang KH. 2018 Exact solution to scattering of *SH*-waves by an elliptic-arc canyon in the corner of an elastic quarter space. *Soil Dyn Earthq Eng*. 110, 137-140.

[22] Faik-Kara H. 2020 Dynamic response of an alluvial valley consists of three types of soil. *Earthq Eng Eng Vib*, 19, 289-305, 10.1007/s11803-020-0562-1.

۶- گرچه افزایش نسبت شکل حوزه‌ی رسوبی موجب افزایش حجم امواج ورودی به آبرفت و متعاقباً افزایش بزرگنمایی سطح شد، اما این اثر تا نسبت شکل ۰/۷ رؤیت گردید و پس از آن، به دلیل هندسه‌ی منحصراً بفرود حوزه‌ی رسوبی و خنثی شدن اثر زاویه‌ی برخورد امواج لرزه‌ای به مرزهای پیرامون آبرفت، کاهش بزرگنمایی حاصل شد.

۷- پیرو نتایج حاصل، انتشار امواج لرزه‌ای با طول موج‌های معادل با ۰/۲۵ تا ۰/۵ برابر عرض حوزه‌ی رسوبی دوزنقه‌ای می‌تواند در شکل‌گیری بزرگنمایی بحرانی سطح زمین نقش مؤثر داشته باشد.

## ۷- مراجع

[1] Bouchon M. 1973 Effect of topography on surface motion. *Bull Seism Soc Am*, 63(3), 715-732.

[2] Sánchez-Sesma FJ. 1987 Site effects on strong ground motion. *Soil Dyn Earthq Eng*. 6(2), 124-132.

[3] Davis LL, West LR. 1973 Observed effects of topography on ground motion. *Bull Seism Soc Am*, 63(1), 283-298.

[4] Bard PY, Bouchon M. 1980 The seismic response of sediment-filled valleys, Part 2. The case of incident *P* and *SV*-waves. *Bull Seism Soc Am*, 70, 1921-1941.

[5] Manoogian ME, Lee VW. 1999 Antiplane deformations near arbitrary-shape alluvial valleys. *ISET J Earthq Tech*. 36(2), 107-120.

[6] Sánchez-Sesma FJ, Palencia VJ, Luzón F. 2002 Estimation of local site effects during earthquakes: An overview. *ISET J of Earthq Tech*, 39(3), 167-193.

[7] Trifunac MD. 1973 Scattering of plane *SH*-waves by a semi-cylindrical canyon. *Earthq Eng Struct Dyn*, 1, 267-281.

[8] Wong HL, Trifunac MD. 1974 Scattering of plane *SH*-waves by a semi-elliptical canyon. *Earthq Eng Struct Dyn*, 3(2), 157-169.

[9] Lee VW. 1984 Three-dimensional diffraction of plane *P*, *SV* & *SH*-waves by a hemispherical alluvial valley. *Int J Soil Dyn Earthq Eng*. 3(3), 199-144.



- [36] Kamalian M, Gatmiri B, Sohrabi-Bidar A, Khalaj A. 2007 Amplification pattern of 2D semi-sine shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves. *Commun Numer Methods Eng*. 23(10), 871-887.
- [37] Panji M, Kamalian M, Asgari Marnani J, Jafari MK. 2012 A Literature Review of Seismic Analysis of Topographic Features Subjected to Incident *SH*-Waves (In Persian). *Bull Earthq Sci Eng*, 15, 21-35.
- [38] Reinoso E, Wrobel LC, 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.
- [39] Fishman KL, Ahmad S. 1995 Seismic response for alluvial valleys subjected to *SH*, *P* and *SV*-waves. *Soil Dyn Earthq Eng*, 14(4), 249-258.
- [40] Sánchez-Sesma FJ, Luzon F. 1995 Seismic response of three-dimensional alluvial valleys for incident *P*, *S* and *Rayleigh*-waves. *Bull Seism Soc Am*, 85(1), 269-284.
- [41] Ausilio E, Conte E, Dente G. 2008 Seismic response of alluvial valleys to *SH*-waves. In: *Seism Eng Conf, AIP Conf Proc*, 1020, 199-206.
- [42] Ba Z, Yin X. 2016 Wave scattering of complex local site in a layered half-space by using a multidomain IBEM: Incident plane *SH*-waves. *Geophys J Int*, 205(3), 1382-1405.
- [43] Liu ZX, Liang JW, Huang YH, Liu L. 2016 IBIEM modelling of the amplification of seismic waves by a three-dimensional layered alluvial basin, *Geophys J Int*. 204(2), 999-1023.
- [44] Ba Z, Wang Y, Liang J, Lee V. 2020 Wave scattering of plane *P*, *SV*, *SH*-waves by a 3D alluvial basin in a multilayered half-space. *Bull Seismol Soc Am*, 110, 10.1785/0120190090.
- [45] Panji M, Kamalian M, Asgari Marnani J, Jafari MK. 2013a Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. *Geophys J Int*, 194, 1849-1865.
- [46] Panji M, Kamalian M, Asgari Marnani J, Jafari MK. 2013b Amplification pattern of semi-sine shaped valleys subjected to vertically propagating incident *SH*-waves. *J Comp Meth in Eng*, 32(2), 87-111.
- [47] Panji M, Kamalian M, Asgari Marnani J, Jafari MK. 2014 Antiplane seismic response from semi-sine shaped valley above embedded truncated circular cavity: a time-domain half-plane BEM. *Int J Civil Eng*, 12(2 and B), 160-173.
- [48] Panji M, Mojtazadeh-Hasanlouei S. 2019 Transient response of irregular surface by periodically
- [23] Chang K, Wang W, Hsu, S. 2020 Antiplane response of a flat-bottomed semicircular canyon to cylindrical elastic waves. *J Eng Math*, 121, 125-139.
- [24] Sánchez-Sesma FJ, Rosenblueth E. 1979 Ground motions at canyons of arbitrary shapes under incident *SH*-waves. *Earthq Eng Struct Dyn*, 7, 441-450.
- [25] Lysmer J, Drake LA. 1972 A finite element method for seismology, *Method Comp Phys*. Ed Bolt BA, Academic Press, New York. 11, 181-216.
- [26] Kawase H, Sato T. 1992 Simulation analysis of strong motions in the Ashigara valley considering one- and two-dimensional geological structures. *J Phys Earth*. 40, 27-56.
- [27] Bielak J, Xu J, Ghattas O. 1999 Earthquake ground motion and structural response in alluvial valleys. *J Geotech Geoenviron Eng*, ASCE, 125(5), 413-423.
- [28] Shyu WS, Teng TJ, Chou CS. 2016 Anti-plane response induced by an irregular alluvial valley using a hybrid method with modified transfinite interpolation. *Soil Dyn Earthq Eng*, 90, 250-264.
- [29] Nohegoo-Shahvari A, Kamalian M, Panji M. 2018 Two-dimensional dynamic analysis of alluvial valleys subjected to vertically propagating incident *SH*-waves. *Int J Civ Eng*, 17, 823-839.
- [30] Nohegoo-Shahvari A, Kamalian M, Panji M. 2019 A hybrid time-domain half-plane FE/BE approach for *SH*-wave scattering of alluvial sites. *Eng Analy BE*, 105, 194-206.
- [31] Zhou H, Chen XF. 2006 A new approach to simulate scattering of *SH*-waves by an irregular topography. *Geophys J Int*, 164, 449-459.
- [32] Wang L, Xu Y, Xia J, Luo Y. 2015 Effect of near-surface topography on high-frequency *Rayleigh*-wave propagation. *J Appl Geophys*, 116, 93-103.
- [33] Zhu C, Thambiratnam D. 2016 Interaction of geometry and mechanical property of trapezoidal sedimentary basins with incident *SH*-waves. *Bull Earthq Eng*. 14, 2977-3002.
- [34] Zhu C, Thambiratnam D, Gallage C. 2019 Inherent Characteristics of 2D Alluvial Formations Subjected to In-Plane Motion, *J Earthq Eng*, 23(9), 1512-1530.
- [35] Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., Gatmiri, B. 2006 Time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid FE/BE method. *Soil Dyn Earthq Eng*. 26(8), 753-765.

- [54] Dominguez J. 1993 Boundary elements in dynamics. *Comp Mech Pub*, Southampton, Boston.
- [55] Panji M, Mojtazadeh-Hasanlouei S. 2020b Seismic antiplane response of gaussian-shaped alluvial valley. *Sharif J Civ Eng*. 37.2(2.2), 115-130.
- [56] Panji M, Mojtazadeh-Hasanlouei S, Yasemi F. 2020 A half-plane time-domain BEM for *SH*-wave scattering by a subsurface inclusion. *Comp Geosci*, 134, 104342.
- [57] Shyu WS, Teng, TJ. 2014 Hybrid method combines transfinite interpolation with series expansion to simulate the anti-plane response of a surface irregularity. *J Mech*. 30:349-360. 10.1017/jmech.2014.27.
- distributed semi-sine shaped valleys: Incident *SH*-waves. *J Earthq Tsu*, 4(1), 2050005.
- [49] Panji M, Mojtazadeh-Hasanlouei S. 2020a Surface motion of alluvial valleys subjected to obliquely incident plane *SH*-wave propagation. *J Earthq Eng*. 10.1080/13632469.2021.1927886.
- [50] 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.
- [51] Ricker N. 1953 The form and laws of propagation of seismic wavelet. *Geophys*. 18(1), 10-40.
- [52] Eringen AC, Suhubi ES. 1975 *Elastodynamics*. Academic Press.
- [53] Brebbia CA, Dominguez J. 1989 *Boundary Elements, an Introductory Course*. *Comp Mech Pub*. Southampton: Boston.

# Amplification Pattern of Trapezoidal Alluvial Valley Subjected to *SH*-waves

Mehdi Panji<sup>\*1</sup>, Saeed Mojtazadeh-Hasanlouei<sup>1</sup>

1- Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran.

m.panji@iauz.ac.ir

## Abstract:

In this paper, a simple numerical model is presented for analyzing trapezoidal alluvial valleys subjected to propagating obliquely incident plane *SH*-waves. As the literature review shows, the scattering effect of transient *SH*-waves on the surface of trapezoidal alluvial valleys has not yet been directly analyzed in the time-domain by half-plane BEM. In previous researches, the models were limited to the homogeneous single-material subsurface problems. Although in some researches, the mathematical formulation, numerical implementation, and transient analysis of two-dimensional non-homogeneous solids were presented as well, they were established to obtain the time-domain responses by the inverse Fourier/Laplace-transform from a mechanical problem point of view. Additionally, some researchers were used a full-plane time-domain BEM approach to present the time-domain responses for an alluvial valley. But in this study, based on an advanced half-plane time-domain BEM, the surface responses of a linear elastic trapezoidal alluvial valley are obtained due to propagating obliquely incident anti-plane *SH*-waves. In the use of half-plane time-domain BEM, the meshes are only concentrated around the interface of the basin. First, the problem is decomposed into two parts including a half-plane valley-shaped feature and closed filled alluvium. Then, the influence coefficients of the matrices are obtained by applying the method to each part. Finally, by satisfying the boundary/continuity conditions on the interfaces, a coupled equation is formed to determine unknown boundary values in each time-step. Then, all ground surface responses are also obtained in a secondary solution as internal points. After implementing the method in a general algorithm previously named DASBEM, several practical examples are analyzed to authenticate the obtained results beside prior published responses by other researchers. The main aims of this study are to present some applicable diagrams for use in engineering/operational projects, present a better view of alluvial valleys' seismic behavior, and reveal the power of the developed algorithm in the analysis of complicated geotechnical problems. Thus, an advanced numerical study is performed to sensitize the surface motion of trapezoidal alluvial valleys with the variable of shape/impedance ratios as synthetic seismograms and three-dimensional (3D) amplification patterns. In the following, to complete the time-domain results, the transient response of the internal domain of the alluvium as well as the surrounding bedrock is shown by the snapshots' views. Moreover, the sensitivity analysis is carried out to obtain the seismic amplification pattern of the surface by considering the key parameters including impedance and shape ratios, incident wave angle, and response frequency. Lastly, by collecting the maximum amplification of different scenarios and applying linear fit on the obtained values, the responses are summarized as a series of linear equations and tables. The results showed that the mentioned factors are very effective on the seismic response of the surface. The results of the present study can be used to complete the accuracy of existing codes around the subject of near-filed site effects.

**Keywords:** Alluvial valley, Half-plane BEM, *SH*-wave, Trapezoidal valley, Time-domain.