

## نوع مقاله: پژوهشی

## پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دو بعدی نیم‌سینوسی متقارن و نامتقارن در برابر امواج مهاجم قائم SV

نیلوفر باباآدم

دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه،  
دانشگاه تربیت مدرس، تهران

علی ارومیه‌ای (نویسنده مسئول)

استاد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت  
مدرس، تهران، [uromeia@modares.ac.ir](mailto:uromeia@modares.ac.ir)

عبدالله سهرابی بیدار

دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران

ابراهیم حق‌شناس

دانشیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی  
زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

شهرام مقامی

دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم،  
دانشگاه تهران، تهران

## چکیده

در این پژوهش رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی شامل دره‌ها و تپه‌های نیم‌سینوسی دو بعدی به دو صورت متقارن و نامتقارن با نسبت شکل و نسبت تقارن متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. در عوارض متقارن، ارتفاع/عمق و در عوارض نامتقارن، نیم‌پهنا فاکتور متغیر می‌باشد. عوارض توپوگرافی به صورت همگن در نظر گرفته شده‌اند و مدل‌سازی عددی تحت موج مهاجم قائم SV ریکر با فرکانس‌های غالب ۳ و ۵ هرتز و با استفاده از روش اجزای مرزی انجام شده است. در این مطالعه تحلیل‌ها همگی در سطح زمین و در حوزه زمان به دست آمده است که با اعمال تبدیل فوریه به حوزه فرکانس منتقل شده است. نتایج به دست آمده در این پژوهش حاکی از آن است که در عوارض متقارن، افزایش نسبت شکل سبب تشدید در بزرگ‌نمایی تاج در تپه‌ها و کوچک‌نمایی در کف دره‌ها می‌شود؛ در حالی که در عوارض نامتقارن، افزایش نسبت تقارن موجب کاهش بزرگ‌نمایی بالای تپه‌ها و همچنین کوچک‌نمایی کف دره‌های مورد مطالعه می‌شود. همچنین در پایان اشاره‌ای به چگونگی بررسی عوارض توپوگرافی در آیین‌نامه‌های ساختمانی شده است که بیان می‌کند، مقادیر بزرگ‌نمایی‌های به دست آمده برای عوارضی با نسبت شکل‌های مختلف با مقادیر پیشنهاد شده توسط آیین‌نامه‌های ساختمانی مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج، گواه بر این موضوع است که میزان تأثیر ابعاد عارضه و عدم تقارن، بر پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی به مقدار چشمگیری بیش از ضرایب در نظر گرفته شده در این آیین‌نامه‌هاست.

**واژگان کلیدی:** عوارض توپوگرافی، نسبت شکل، نسبت تقارن، دو بعدی، موج مهاجم SV.

## ۱- مقدمه

موارد مشابهی اشاره کرد. به دلیل اهمیت بسیار زیاد تأثیر این عوارض، اعم از دره‌ها و تپه‌ها بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، محققان بسیاری در این زمینه به تحقیق و بررسی پرداخته‌اند [۹-۱۰].

مروری بر ادبیات فنی در این زمینه نشان می‌دهد که در دهه‌های اخیر روش‌های عددی به‌عنوان ابزاری مناسب برای بررسی اثرات ساختگاهی مطرح شده‌اند و تاکنون کارایی روش‌های مختلف در این زمینه مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطالعاتی که در زمینه‌ی بررسی تأثیر عوارض توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای انجام شده است بیان‌کننده این مطلب است که در بالای تپه‌ها بزرگ‌نمایی و در کف دره‌ها کوچک‌نمایی در موج

در سال‌های اخیر گزارش‌های بسیاری از خسارات ناشی از زلزله در نقاط مختلف جهان مشاهده شده است، به‌خصوص پس از مشاهده شدت خرابی‌ها در زلزله ۱۹۸۵ مکزیکوسیتی توجه ویژه‌ای به بحث اثرات ساختگاهی معطوف شد و پژوهشگران بسیاری به بیان و بررسی این مسئله در ساختگاه مکزیکوسیتی و همچنین بررسی اثرات ساختگاهی بر پاسخ لرزه‌ای در سایر ساختگاه‌ها پرداختند [۱-۳]. تأثیرات ناشی از عوارض توپوگرافی به‌عنوان یک عامل مهم در تقویت امواج زلزله بیان شده است که می‌توان به زلزله‌ی ۱۹۹۴ نورث‌ریج [۴]، زلزله ۱۹۸۷ شیلی [۵]، زلزله ۱۳۹۶ سرپل ذهاب (کرمانشاه) [۶] زلزله‌های یونان [۷-۸] و

اجزای مرزی مطالعات دیگری نیز انجام شده است که می‌توان به سمبلا و همکاران [۱۵] اشاره کرد. در این تحقیق مطالعه عددی را با استفاده از روش اجزای مرزی بر روی حوضه رسوبی کاراکاس انجام داده‌اند. بخشی از نتایج به‌دست آمده که نشان‌دهنده‌ی میزان بزرگ‌نمایی در بخش‌های مختلف حوضه است و حاکی از آن است که با حرکت به سمت لبه‌های حوضه بزرگ‌نمایی افزایش می‌یابد. پنچی و همکاران [۱۶-۱۷] نیز با ارائه روش اجزای مرزی توسعه یافته‌ای به تحلیل مسائل دو بعدی گسترش موج لرزه‌ای در محیط‌های همگن و همسانگرد دارای رفتار الاستیک خطی پرداخته‌اند و از این روش برای بررسی رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تپه و دره در مقابل موج مهاجم SH استفاده کرده‌اند.

همچنین تأثیر عوامل دیگری از جمله شیب دامنه بر پاسخ لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاکی از آن است که شیب دامنه نیز بر پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تأثیرگذار است، به گونه‌ای که تأثیر توپوگرافی با افزایش شیب، افزایش می‌یابد [۱۸-۱۹]. به‌طور کلی نتایج تحقیقات در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که عوامل مختلفی بر بزرگ‌نمایی عوارض توپوگرافی (تپه‌ها) تأثیرگذارند، از جمله کمالیان و همکاران [۱۴، ۲۰] در مطالعه رفتار لرزه‌ای تپه‌ها و دره‌های دو بعدی نیم‌سینوسی به این موضوع اشاره دارند که در درجه اول طول موج و هندسه محل مورد مطالعه و پس از آن نوع موج و پارامترهای مهندسی محیط از عوامل مؤثر بر الگوی بزرگ‌نمایی در تپه‌ها می‌باشند.

پورسرتیپ و همکاران [۲۱] نیز مطالعه‌ی پارامتریک جامعی را بر روی تأثیر بی‌نظمی‌های توپوگرافی بر حرکت زمین انجام داده‌اند که در این پژوهش تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله نوع موج مهاجم، زاویه موج مهاجم، فرکانس موج مهاجم و شکل عارضه (تپه، دره) را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج همان‌طور که انتظار می‌رود نشان می‌دهند که بزرگ‌نمایی وابسته به رابطه بین خصوصیات عارضه و طول موج غالب هستند.

در پژوهش‌هایی که تاکنون در زمینه پاسخ لرزه‌ای عوارض

لرزه‌ای دیده می‌شود. زمانی که نسبت شکل عارضه توپوگرافی تغییر می‌کند پاسخ امواج نیز متفاوت می‌شود؛ به گونه‌ای که با افزایش نسبت شکل میزان بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی افزایش می‌یابد [۱۱].

در مطالعه‌ای که توسط آنگرینی [۱۲] در بررسی تأثیرات عوارض توپوگرافی بر انتشار امواج انجام شده است، مدل‌سازی‌ها با استفاده از (SEM) SPECFEM3D و برای زلزله ۲۰۰۵ کشمیر انجام شده است. نتایج در دو حالت حضور و عدم حضور عوارض توپوگرافی مورد بررسی قرار گرفته است و بیان می‌کنند که ناپیوستگی‌های توپوگرافی با پراکنده ساختن امواج لرزه‌ای سبب تشدید در برخی از پشته‌های تپه می‌شوند، همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد که شدت لرزش‌ها در پشته‌ها و دامنه‌های شیب‌دار دارای تغییری تا ۷۰ درصد بیشتر از دره‌ها هستند. مشخص است که افزایش دامنه جنبش‌ها در شیب‌ها می‌تواند پتانسیل وقوع زمین‌لغزش را به مقدار چشمگیری افزایش دهد. جلی و همکاران [۱۳] به بررسی پاسخ لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی تحت موج مهاجم SH پرداخته‌اند. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه بیان می‌کند که: الف) بررسی تأثیر توپوگرافی به تنهایی کار بسیار دشواری است زیرا همواره با فاکتورهای دیگری از جمله لایه‌بندی سطحی همراه می‌باشد، بنابراین برای بررسی بزرگ‌نمایی در بالای عوارض توپوگرافی پیچیده نمی‌توان فقط از تخمین بر اساس فاکتور توپوگرافی استفاده کرد؛ ب) نسبت بزرگ‌نمایی به‌دست آمده تاج/پای تپه در منطقه معمولاً با ساختار دو بعدی که تحت موج مهاجم SH بررسی می‌شوند مطابقت ندارند.

کمالیان و همکاران [۱۴] پاسخ لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی متقارن را در ۷ نسبت شکل متفاوت تحت موج مهاجم  $p$  و  $SV$  مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج ارائه شده در این پژوهش صرفاً به بررسی پاسخ در تاج تپه پرداخته است و گویای این مطلب است که با افزایش نسبت شکل بزرگ‌نمایی در بالای تپه نیز افزایش می‌یابد.

در زمینه بررسی اثرات ساختگاهی با استفاده از روش عددی

که در آن  $u_i$  بیانگر تغییر مکان و  $b_i$  بیانگر نیروی پیکری محیط است.  $c_L$  و  $c_T$  سرعت‌های امواج طولی و عرضی محیط را نشان می‌دهند که به ترتیب از روابط  $c_L^2 = (\lambda + 2\mu)/\rho$  و  $c_T^2 = \mu/\rho$  به دست می‌آیند.  $\lambda$  و  $\mu$  ضرایب لامه و  $\rho$  دانسیته جرمی محیط هستند. معادله انتگرال مرزی حاکم بر محیط‌های الاستیک خطی همسان و همگن، با اعمال روش باقیمانده‌های وزنی بر معادله (۱) مطابق رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$c_{ij}(\xi)u_j(\xi, t) = \int_{\Gamma} \{u_{ij}^*(x, \xi, t) * p_j(x, t)\} d\Gamma - \int_{\Gamma} \{p_{ij}^*(x, \xi, t) * u_j(x, t)\} d\Gamma \quad (2)$$

که در آن  $p_i$  ترکشن بر روی سطح مماس بر مرز  $\Gamma$  را بیان می‌دارد.  $u_{ij}^*$  و  $p_{ij}^*$  جواب‌های اساسی معادله دیفرانسیل تعادل دینامیکی و به ترتیب بیانگر مؤلفه‌های  $i$ ام جابه‌جایی و ترکشن نقطه  $x$  در لحظه  $t$  هستند که به واسطه اعمال یک بار متمرکز واحد موازی محور  $i$ ، در نقطه  $\xi$  و در لحظه  $\tau \leq t$  پدید آمده‌اند. عبارات  $u_{ij}^* * p_j$  و  $p_{ij}^* * u_j$  انتگرال‌های کانولوشن ریمن هستند  $c_{ij}(\xi)$  در رابطه (۲) ضریب شناخته شده ناپیوستگی در نقطه  $\xi$  است که از تکنیک جواب اساسی  $p_{ij}^*$  ناشی می‌شود. این ضریب تنها تابع هندسه مرز بوده و در هر دو بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مقدار یکسانی دارد. در صورتی که محیط مورد بررسی در معرض هجوم امواج لرزه‌ای قرار گیرد، معادله انتگرال مرزی حاکم به شرح زیر اصلاح می‌شود:

$$c_{ij}(\xi)u_j(\xi, t) = \int_{\Gamma} \{u_{ij}^*(x, \xi, t) * p_j(x, t)\} d\Gamma - \int_{\Gamma} \{p_{ij}^*(x, \xi, t) * u_j(x, t)\} d\Gamma + u_i^{inc}(\xi, t) \quad (3)$$

که در آن  $u_i^{inc}$  تغییر مکان حاصله از موج مهاجم را بیان می‌دارد. برای حل مسئله به روش عددی می‌بایست معادله انتگرال مرزی به گونه‌ای بیان شود که مجموعه‌ای از معادلات خطی حاصل گردیده و با حل آنها جواب مسئله مقدار مرزی به دست می‌آید. به منظور تبدیل معادله انتگرالی حاکم به شکل مطلوب، ابتدا در زمان و سپس در مکان جداسازی می‌شود. در نهایت معادلات به دست آمده به شکل ماتریسی بیان خواهند شد. معادلات ذکر شده و عددی‌سازی آن در برنامه HYBRID [۲۲]

توپوگرافی یا به بیان دیگر تأثیر توپوگرافی بر رفتار لرزه‌ای انجام شده است عمدتاً عوارض متقارن مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، به رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی، اعم از دره‌ها و تپه‌های متقارن و نامتقارن نیم‌سینوسی با نسبت شکل‌های متفاوت پرداخته شده است. دلیل انتخاب عوارض نیم‌سینوسی این است که متداول‌ترین شکل عوارض توپوگرافی در طبیعت هستند و این امر در کاربردی کردن نتایج مطالعات بسیار حائز اهمیت است. مهم‌ترین علت مطالعه حاضر این است که در طبیعت عوارض توپوگرافی به ندرت به صورت متقارن دیده می‌شوند و ضرورت مطالعه عوارض نامتقارن در مطالعات لرزه‌ای بسیار احساس می‌شود.

## ۲- روش عددی مورد استفاده

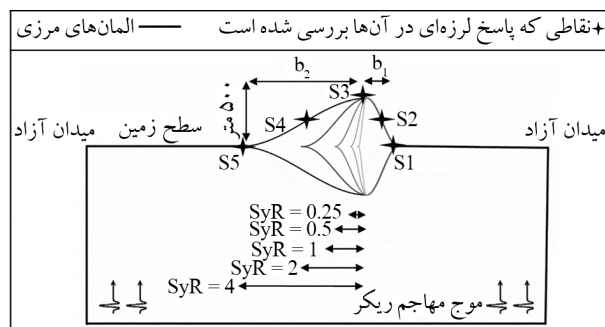
به منظور انجام مدل‌سازی‌های عددی از روش اجزای مرزی استفاده شده است که از میان روش‌های عددی موجود، دقت بسیار بالایی را در مدل‌سازی پراکنش امواج لرزه‌ای نشان داده است. از مهم‌ترین مزایای روش اجزای مرزی، برآورده نمودن شرط تشعشع سامرفلد (تشعشع موج از محیط به سمت بی‌نهایت و عدم انتشار امواج از بی‌نهایت به سمت محیط مورد بررسی) است. همچنین در روش اجزای مرزی، به دلیل کاهش یک بعد از معادلات، امکان استفاده از مش‌بندی‌های محدودتر فراهم می‌گردد که این امر سبب افزایش دقت و سرعت انجام محاسبات می‌شود. در روش اجزای مرزی، به دلیل انجام تحلیل‌ها در مرزهای محدوده مورد بررسی، امکان انتشار امواج کاذب در مش‌بندی دامنه‌ای نیز کاهش می‌یابد. مجموعه این شرایط تحلیل دقیق‌تر گسترش موج در محیط‌های بی‌نهایت را فراهم می‌سازد.

روش اجزای مرزی مبتنی بر معادله انتگرال مرزی تعادل دینامیکی محیط است. معادله دیفرانسیل حاکم بر تعادل دینامیکی محیط‌های الاستیک خطی همسان و همگن، توسط رابطه (۱) بیان می‌گردد:

$$(c_L^2 - c_T^2) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} + c_T^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + b_i = \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (1)$$

نیم‌سینوسی با نیم‌پهنای ثابت ۵۰۰ متر و ارتفاع‌های متفاوت ۱۲۵، ۲۵۰، ۳۷۵ و ۵۰۰ متر بوده که به ترتیب دارای نسبت شکل برابر با ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ می‌باشند (جدول ۱). پاسخ هر یک از این عوارض در سه نقطه در بالا، میانه و پایین عارضه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۱) عوارض توپوگرافی متقارن را نشان می‌دهد. بخش دوم مطالعات شامل بررسی رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی همگن و نامتقارن می‌باشد. به همین منظور ۱۰ دره و تپه نامتقارن با ارتفاع یکسان ۵۰۰ متر و نیم‌پهنای متفاوت ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ متر که به ترتیب دارای نسبت تقارن ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ می‌باشند، انتخاب شده است (شکل ۲).

پارامتر نسبت شکل بیانگر نسبت ارتفاع/عمق به نیم‌پهنای (h/b) عارضه می‌باشد. در عوارض نامتقارن نسبت تقارن بیان‌کننده نسبت نیم‌پهنای متغیر (b2) به نیم‌پهنای ثابت (b1) می‌باشد.

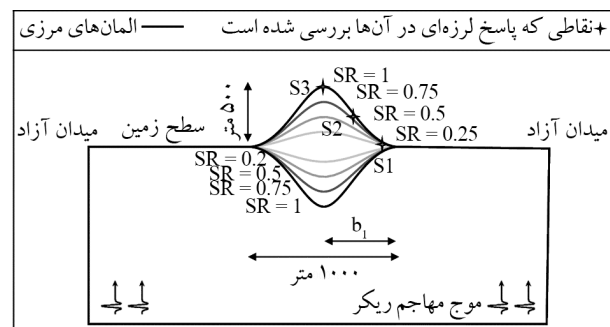


شکل (۲): هندسه عوارض توپوگرافی نامتقارن در نسبت شکل‌های متفاوت در برابر امواج مهاجم SV ریکر و محل نقاطی که پاسخ لرزه‌ای در آنها بررسی شده است.

به انجام رسیده و جزئیات آن در مراجع [۲۳-۲۵] بیان شده است.

### ۳- متدولوژی و محدوده مطالعه

هدف این پژوهش بررسی رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دو بعدی نیم‌سینوسی و همگن در دو حالت متقارن و نامتقارن می‌باشد. همان‌طور که اشاره شد، مطالعات مختلف، پاسخ لرزه‌ای را در قسمت‌های مختلفی از عوارض توپوگرافی مورد بررسی قرار داده‌اند و به اهمیت شکل این عوارض در پاسخ لرزه‌ای محیط اشاره نموده‌اند. به‌منظور بررسی سازوکار این تأثیرات، دو دسته عوارض توپوگرافی نیم‌سینوسی متقارن و نامتقارن تعریف شده و تأثیر آنها بر امواج لرزه‌ای با فرکانس‌های غالب ۳ و ۵ هرترز مورد بررسی قرار گرفته است. عوارض متقارن مورد بررسی، متشکل از هشت دره و تپه

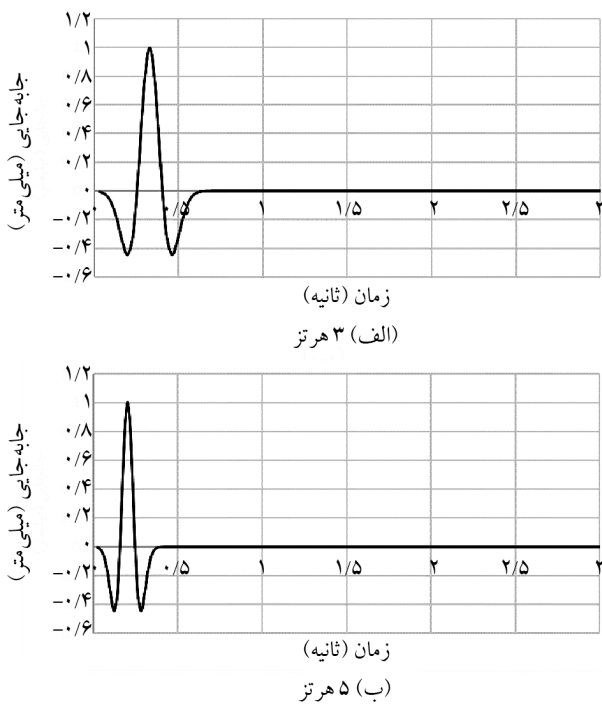


شکل (۱): هندسه عوارض توپوگرافی متقارن در نسبت شکل‌های متفاوت در برابر امواج مهاجم SV ریکر و محل نقاطی که پاسخ لرزه‌ای در آنها بررسی شده است.

جدول (۱): مشخصات عوارض مورد بررسی.

نسبت شکل/تقارن	ارتفاع	b1 (نیم‌پهنای ثابت)	b2 (نیم‌پهنای متغیر)	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)
عوارض متقارن	۱۲۵	۵۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
	۲۵۰	۵۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
	۳۷۵	۵۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
عوارض نامتقارن	۵۰۰	۵۰۰	۱۲۵	۱۰۰۰
	۵۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۰۰۰
	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
	۵۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
	۵۰۰	۵۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰





شکل (۳): تاریخچه زمانی موج مهاجم ریکر برای دو فرکانس غالب موج مهاجم.

نسبت بزرگ‌نمایی به معنای نسبت طیف فوریه پاسخ لرزه‌ای در سطح، به طیف فوریه موج مهاجم تعریف شده است. در این معادله  $\pi$  و  $b$  به ترتیب فرکانس زاویه‌ای و نیم‌پهنای عارضه را بیان می‌کنند. همچنین در نمودارهایی که برحسب دوره تناوب ارائه شده‌اند، دوره تناوب نیز به صورت بدون بعد می‌باشد (بیان‌کننده نسبت طول موج برشی به ابعاد عارضه).

سرعت موج برشی در تمام مدل‌سازی‌ها ثابت و برابر با ۱۰۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است که می‌تواند معادل سازندهای زمین‌شناسی نسبتاً سخت در نظر گرفته شود. سایر پارامترهای محیطی مورد استفاده در مدل‌سازی‌ها، مدول یانگ = ۵۹۸۵۰۰۰ کیلوپاسکال، مدول بالک = ۵۸۶۷۶۴۸ کیلوپاسکال، وزن مخصوص = ۲۲/۰۷ کیلونیوتن بر مترمکعب و نسبت پواسون = ۰/۳۳ می‌باشند.

#### ۴- پاسخ لرزه‌ای عوارض

نتایج تحلیل‌ها همگی در سطح زمین و در حوزه زمان به دست آمده است که با اعمال تبدیل فوریه به حوزه فرکانس

امواج لرزه‌ای مورد استفاده از نوع موج قائم SV ریکر می‌باشند که دامنه آن در حوزه زمان توسط رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$f(t) = [1 - 2 \cdot (\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2] e^{-(\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2} \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $f_p$  و  $t_0$  به ترتیب فرکانس غالب و پارامتر زمان تأخیر است. در موج SV،  $f(t)$  مؤلفه افقی موج مهاجم را تعیین می‌کند، درحالی‌که مؤلفه عمودی صفر است. همان‌طور که اشاره شد موج مهاجم در مدل‌سازی‌ها قائم در نظر گرفته شده است زیرا بر اساس قانون اسنل با کاهش سرعت موج در لایه‌های سطحی‌تر شکست موج اتفاق افتاده و زاویه انتشار موج به حالت قائم میل می‌کند. از این‌رو در مطالعات عددی بسیار مرسوم است که زاویه انتشار موج مهاجم به خصوص در مورد مطالعات لرزه‌ای حوضه دور قائم در نظر گرفته شود. پاسخ لرزه‌ای برای موج مهاجم ریکر در دو فرکانس مختلف ۳ و ۵ هرتز در حوزه زمان محاسبه شده است. نسبت بزرگ‌نمایی در نقاط مورد بررسی در حوزه فرکانس بر اساس محدوده اعتبار هر یک از امواج مورد استفاده ترکیب شده و در محدوده فرکانس بدون بعد ۰/۲ تا ۱۲ ارائه شده است (برابر با پیوند بدون بعد در محدوده ۰/۱ تا ۴/۷). محدوده اعتبار هر یک از امواج بر مبنای فرکانس‌های دارای دامنه بیش از ۰/۱ دامنه پیک، در نمودار سری فوریه این امواج در نظر گرفته شده است.

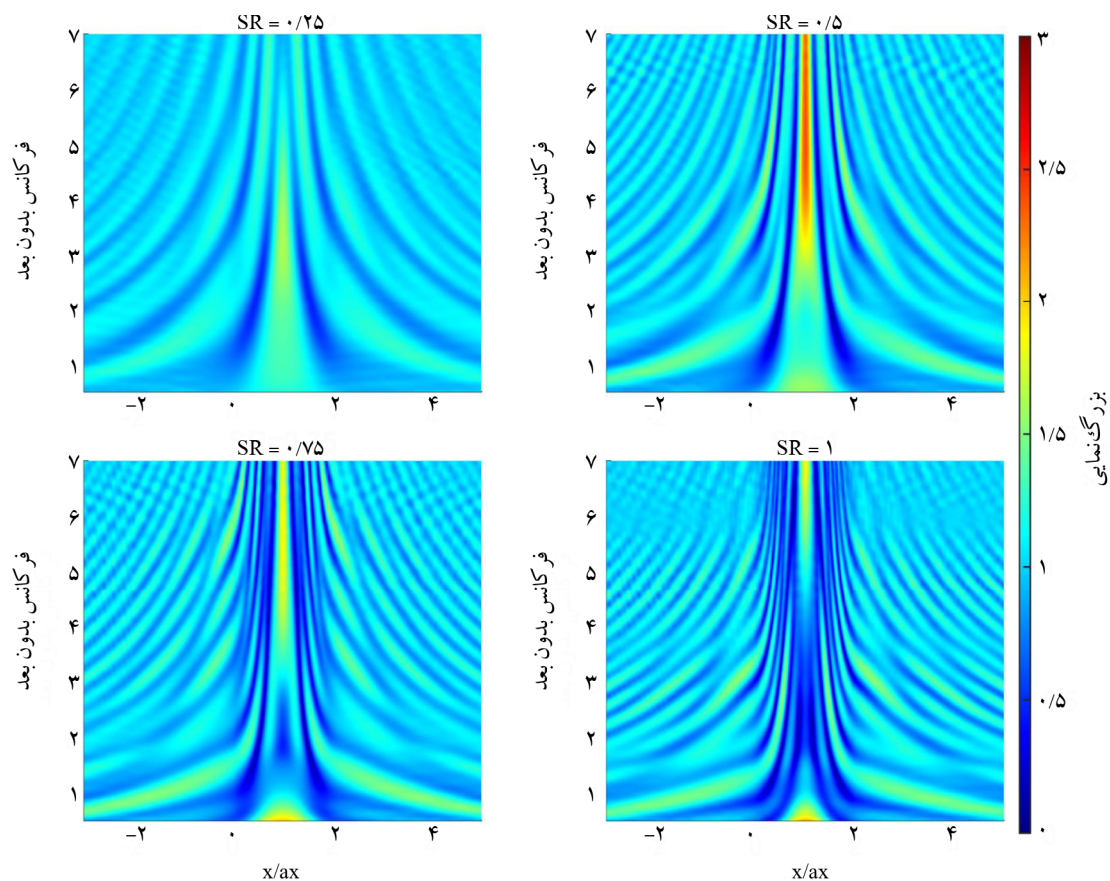
نتایج به دست آمده در حوزه فرکانس در قالب نسبت بزرگ‌نمایی و به ازای فرکانس بدون بعد ( $\Omega = \omega b / \pi c^2$ ) ارائه شده‌اند. مفهوم فیزیکی فرکانس بدون بعد نیز همان نسبت پهنای عارضه به طول موج برشی محیط نیم‌صفحه می‌باشد. لازم به ذکر است که گام زمانی برای هر یک از تحلیل‌ها معادل با یک‌دهم عکس فرکانس غالب و پارامتر تأخیر زمانی ۱۰ برابر طول گام زمانی لحاظ شده است. شکل (۳)، امواج مهاجم ریکر مورد استفاده در این پژوهش با فرکانس‌های غالب ۳ و ۵ هرتز را نشان می‌دهد. هر یک از تحلیل‌ها تا ۱۵۰ گام زمانی ادامه یافته است.

عوارض را می‌توان در دو ناحیه فرکانسی طبقه‌بندی کرد؛ محدوده فرکانس‌های بدون بعد کمتر از  $0/5$  و محدوده فرکانس‌های بدون بعد بیشتر از  $2$ . با افزایش نسبت شکل، بزرگ‌نمایی در محدوده فرکانس بدون بعد  $0/5$  افزایش می‌یابد، در حالی که نسبت‌های بزرگ‌نمایی و محدوده فرکانسی نظیر آن، در فرکانس‌های بدون بعد بیشتر از  $2$  با افزایش نسبت شکل کاهش می‌یابد. در نسبت شکل  $0/75$  در حدود فرکانس بدون بعد  $2$ ، کوچک‌نمایی موج پاسخ مشاهده می‌شود. این کوچک‌نمایی در نسبت شکل (۱) گسترش یافته و تا محدوده فرکانس بدون بعد  $5$  را پوشش می‌دهد. با فاصله گرفتن از بالای تپه، تناوبی از بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی دیده می‌شود. با افزایش نسبت شکل، تعداد این محدوده‌های بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی بیشتر می‌شود. اگرچه در یک نگاه کلی می‌توان گفت در مقادیر نسبت‌های طیفی، در نسبت شکل  $0/5$ ، تأثیر بزرگ‌نمایی و در نسبت شکل‌های  $0/75$  و  $1$ ، تأثیر کوچک‌نمایی شاخص‌تر است. به‌طور کلی در عوارض مورد بررسی، بالاترین

منتقل شده است. مطالعات در دو بخش و شامل مطالعه کل عارضه در محدوده فرکانس بدون بعد  $0/2$  تا  $7$  و سپس برای برخی نقاط منتخب، در محدوده دوره تناوب بدون بعد  $0/1$  تا  $4/7$  بررسی شده است. این نقاط منتخب در عوارض متقارن شامل سه نقطه S1-S3 (در بالا، میانه و پایین عارضه) و در عوارض نامتقارن پنج نقطه S1-S5 (در بالا، میانه و پایین در هر دو سمت عارضه) می‌باشند (شکل‌های ۱ و ۲). تغییرات دامنه در هر نقطه برای نسبت شکل یا نسبت تقارن‌های متفاوت در قالب یک نمودار مورد مقایسه قرار گرفته است.

#### ۴-۱- پاسخ لرزه‌ای تپه‌های متقارن

پاسخ لرزه‌ای حوزه فرکانس برای کل عارضه (تپه‌های متقارن)، در چهار نسبت شکل متفاوت در شکل (۴) آمده است که نشان می‌دهد بیشترین نسبت بزرگ‌نمایی در کلیه حالات در بالای تپه مشاهده می‌شود ( $x/ax = 1$ ). بزرگ‌نمایی‌های قابل بررسی در این

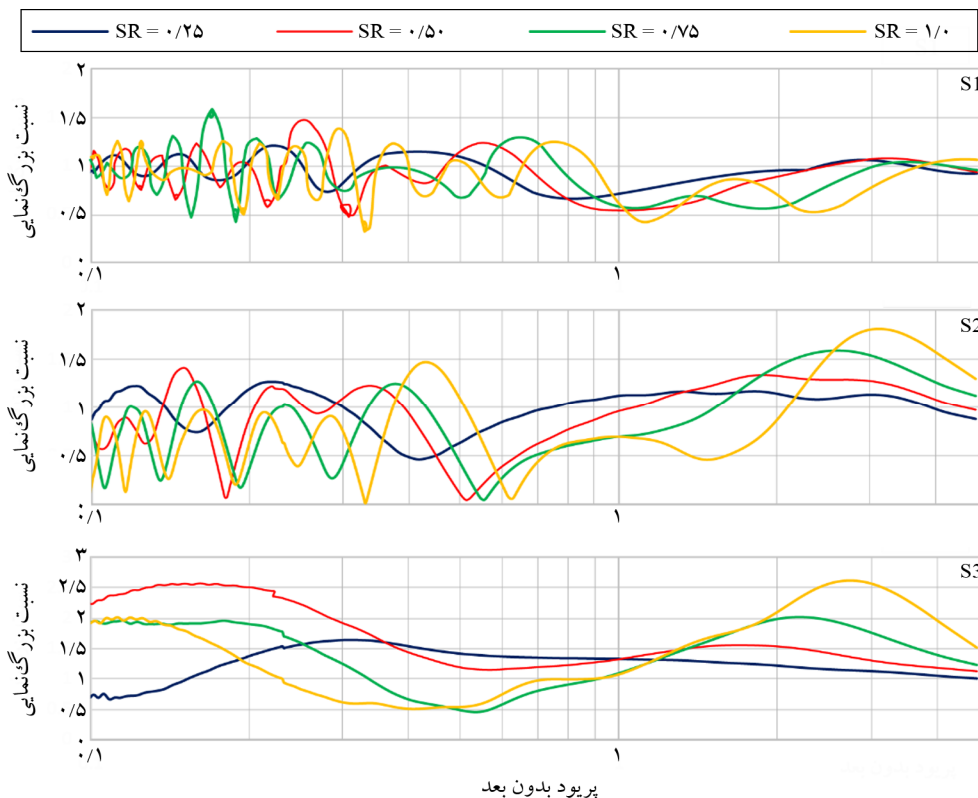


شکل (۴): پاسخ لرزه‌ای حوزه فرکانس برای کل عارضه (تپه‌های متقارن) در چهار نسبت شکل متفاوت. نسبت بزرگ‌نمایی با شاخص رنگی مشخص شده است.

دامنه‌ها در نسبت شکل ۰/۵ مشاهده می‌شوند. در این نسبت شکل، مقادیر نسبت بزرگ‌نمایی تا بیش از ۳ می‌رسد. همچنین مشخص است که تأثیر توپوگرافی عارضه در پاسخ لرزه‌ای، محدود به خود عارضه نبوده و تقریباً در تمام حالات تا نسبت  $x/b$  حداقل برابر ۴، این تأثیر قابل مشاهده است.

شکل (۵) نسبت بزرگ‌نمایی موج لرزه‌ای در عوارض متقارن، در دوره تناوب‌های مختلف، برای سه نقطه از تپه با نسبت‌های شکل متفاوت را نشان می‌دهد. در دوره تناوب‌های پایین‌تر ( $T < 0.5$ ) نوسانات بیشتری در دو نقطه S1 و S2 به ترتیب در پایین و میانه عارضه دیده می‌شود در حالی که در نقطه S3 نوسانات کمتری دیده می‌شوند. همچنین می‌توان مشاهده نمود که با جابه‌جایی به سمت بالای عارضه (از S1 به سمت S3) بیشینه نسبت‌های بزرگ‌نمایی افزایش می‌یابد، به این معنی که مقدار بیشینه بزرگ‌نمایی از حدود ۱ در S1 به ۲/۵ در S3 برای دوره تناوب‌های بیشتر از ۱ می‌رسد. اگرچه نسبت‌های بزرگ‌نمایی در نقطه S1 مقادیر قابل توجهی ندارند، اما یک روند تدریجی در روند تغییرات نسبت‌های

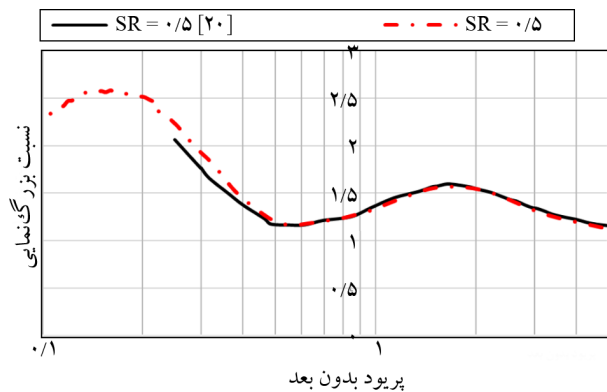
بزرگ‌نمایی قابل تعقیب است، به این صورت که با افزایش نسبت شکل، بیشینه نسبت بزرگ‌نمایی از دوره تناوب بدون بعد حدود ۰/۴ به دوره تناوب بدون بعد حدود ۰/۸ انتقال می‌یابد. در S2 با افزایش نسبت شکل نه تنها بیشینه نسبت بزرگ‌نمایی افزایش می‌یابد بلکه دوره تناوب نظیر این نسبت‌ها نیز از حدود دوره تناوب بدون بعد ۱ برای نسبت شکل ۰/۲۵ به حدود ۳ برای نسبت شکل ۱ می‌رسد. در شکل (۵) مشاهده می‌شود که تأثیر نسبت شکل در نقاط مختلف از عارضه متفاوت است. در نقطه S3 نسبت شکل‌های ۰/۲۵ و ۰/۵ تأثیر قابل توجهی را نشان نمی‌دهند، با تغییر نسبت شکل از ۰/۵ به ۰/۷۵ تغییر قابل ملاحظه‌ای در روند نمودارها دیده می‌شود. کمالیان و همکاران [۲۰] نیز به بررسی پاسخ لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی نیم‌سینوسی در نسبت شکل‌های متفاوت پرداخته‌اند که شکل (۶) مقایسه‌ای از نسبت بزرگ‌نمایی رأس تپه برای نسبت شکل ۰/۵ در مطالعه حاضر و مطالعه پیشین را نشان می‌دهد. تطابق نمودارها به درستی و اعتبار مدل‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش اشاره دارد.



شکل (۵): نسبت‌های بزرگ‌نمایی طیفی برای تپه‌های دو بعدی متقارن در سه نقطه واقع بر بالای تپه (S3)، میانه تپه (S2) و پایین تپه (S1) در نسبت شکل‌های متفاوت (SR بیانگر نسبت شکل است).

S1، S2 و S3 که موقعیت آنها به ترتیب در بالا، میانه و کف دره قرار دارد (شکل ۱) مورد بررسی قرار گرفته است. (شکل ۷)، روند تغییرات پاسخ طیفی این نقاط برای نسبت شکل‌های مختلف را نشان می‌دهد.

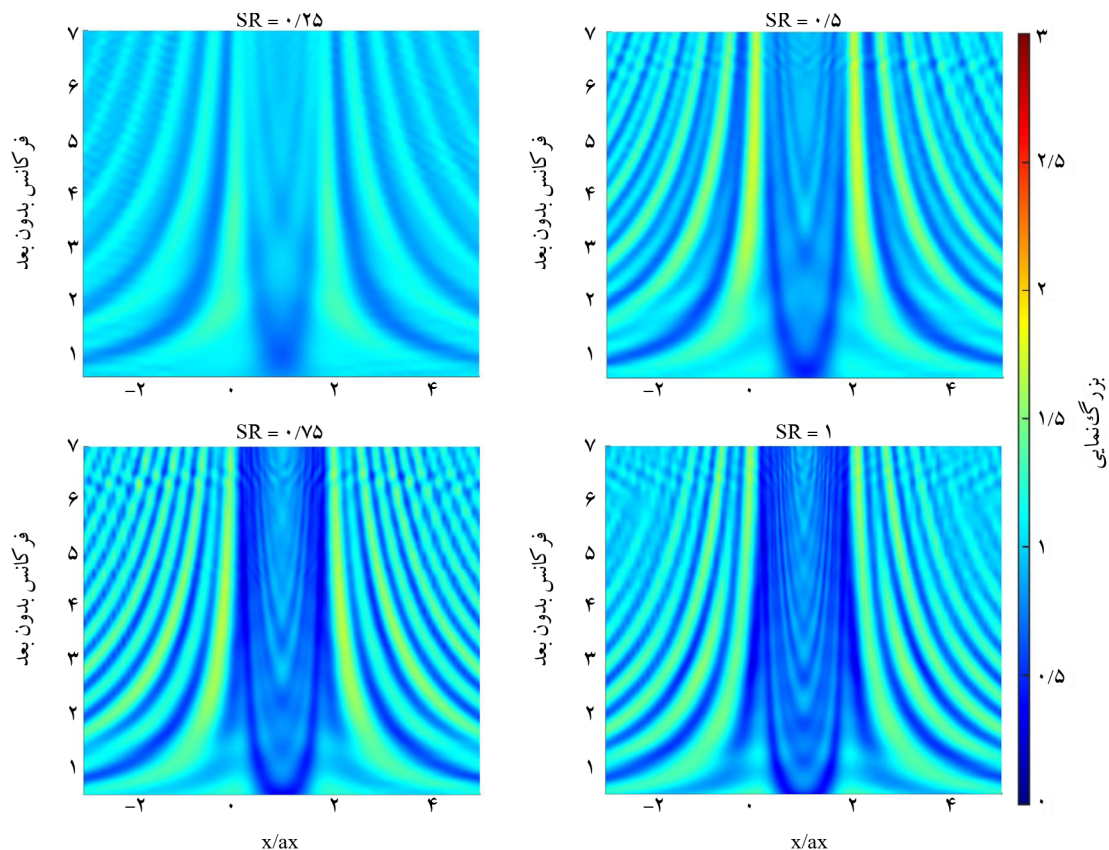
نمودارهای شکل (۸) بیان می‌کند که در تمام نقاط داخل دره (S2 و S3) نسبت‌های بزرگ‌نمایی کمتر از ۱ (کوچک‌نمایی) مشاهده می‌شود. باین حال این رفتار برای نقطه S1 واقع بر لبه دره تا حدودی متفاوت است. در این نقطه در دوره تناوب‌های بدون بعد کمتر از ۱ در کلیه نسبت شکل‌ها به جز ۰/۲۵ روند مشخصی دنبال می‌شود. به این صورت که در دوره تناوب بدون بعد ۰/۱ نسبت‌های بزرگ‌نمایی در حدود ۱/۵ برای هر سه نسبت شکل مشاهده می‌شود. این نسبت‌های بزرگ‌نمایی در حدود دوره تناوب‌های بدون بعد ۰/۳ تا ۰/۵ کاهش می‌یابد. مقدار این کاهش با افزایش نسبت شکل شدیدتر شده و دوره تناوب بدون بعد نظیر آن افزایش می‌یابد، به این معنا که دره دارای نسبت شکل (۱)،



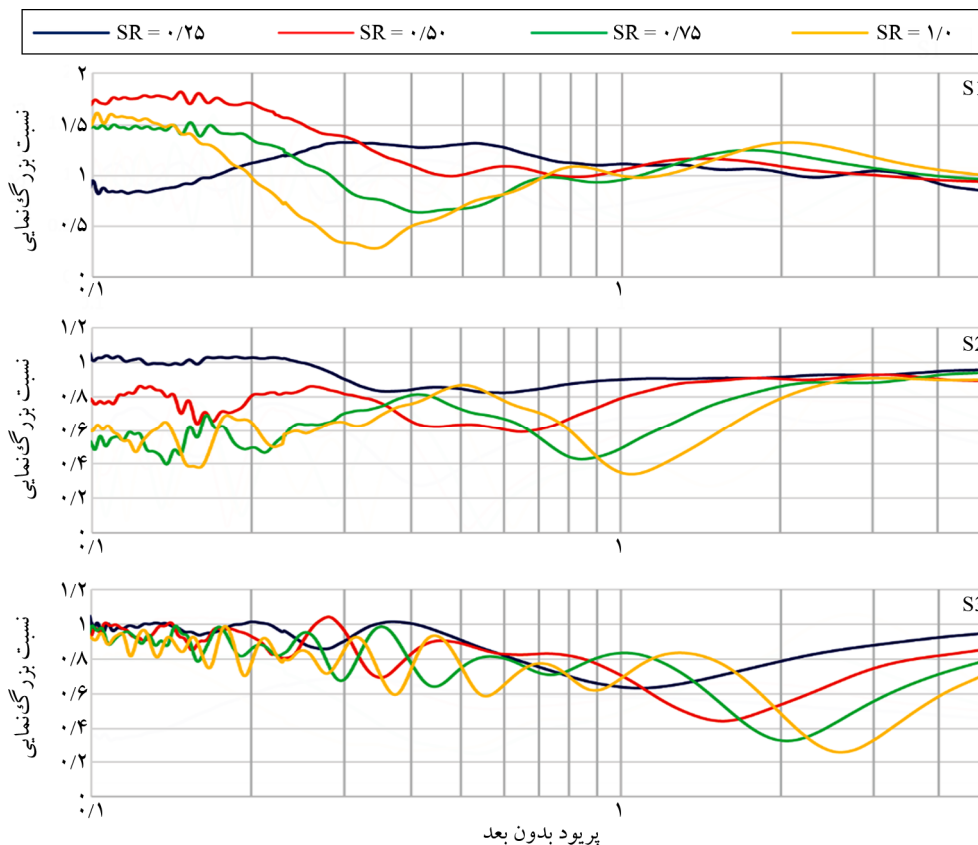
شکل (۶): مقایسه پاسخ لرزه‌ای رأس تپه در مطالعه حاضر و کمالیان و همکاران [۲۰] در نسبت شکل ۰/۵ به منظور اعتبارسنجی مدل‌سازی‌های انجام شده.

#### ۲-۴-۲ پاسخ لرزه‌ای دره‌های متقارن

افزایش نسبت شکل، کمینه نسبت‌ها در محدوده دره کاهش می‌یابد. تأثیر لبه‌های حوضه در بزرگ‌نمایی امواج لرزه‌ای با مقادیر نزدیک به ۲، تقریباً در سرتاسر محدوده فرکانسی قابل تشخیص است. برای بررسی دقیق‌تر رفتار این عوارض، سه نقطه



شکل (۷): پاسخ لرزه‌ای کل عارضه در حوزه فرکانس (دره‌های متقارن) در چهار نسبت شکل متفاوت. تغییرات نسبت‌های بزرگ‌نمایی با شاخص رنگی بیان شده‌اند.



شکل (۸): نسبت‌های بزرگ‌نمایی طیفی برای دره‌های دو بعدی متقارن در سه نقطه واقع بر بالای دره (S1)، میانه دره (S2) و کف دره (S3) در نسبت شکل‌های متفاوت (SR بیان‌گر نسبت شکل است).

کف دره، با افزایش نسبت شکل، بیشینه کوچک‌نمایی به سمت فرکانس‌های بالاتر و با مقادیر کوچک‌تر مایل می‌شود.

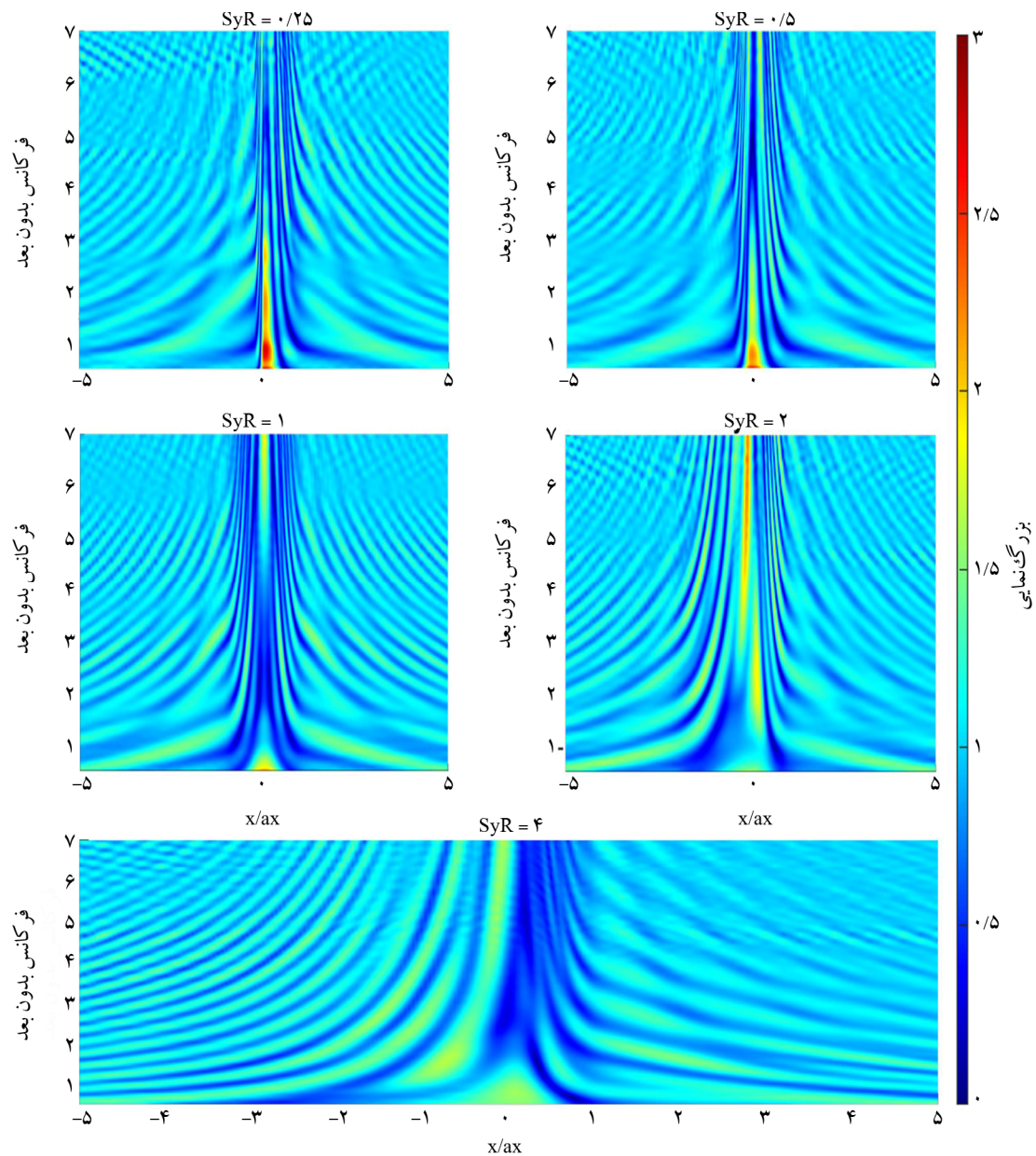
#### ۴-۳- پاسخ لرزه‌ای تپه‌های نامتقارن

برای بررسی تأثیر عدم تقارن بر رفتار لرزه‌ای تپه‌ها، پنج تپه با نسبت شکل‌های مختلف (شکل ۲) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همچنین برای هر تپه، مقادیر نسبت بزرگ‌نمایی در پنج نقطه واقع بر بالای تپه، میانه تپه در دو طرف و پایین تپه در دو طرف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل (۹) این نسبت‌های بزرگ‌نمایی را برای نقاط واقع در امتداد سطح عوارض مورد بررسی نشان می‌دهد. در عوارض نامتقارن یک بزرگ‌نمایی در فرکانس‌های پایین دیده می‌شود که از فرکانس ۰/۵ شروع می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود همواره بیشترین بزرگ‌نمایی‌ها در هر نسبت شکل در قسمت نامتقارن تپه (پال تپه که شیب آن در نسبت تقارن‌های مختلف تغییر می‌کند) مشاهده می‌شود.

نسبت‌های بزرگ‌نمایی در حدود ۰/۳ را در دوره تناوب بدون بعد ۰/۳۵ نشان می‌دهد، در صورتی که این مقدار برای نسبت شکل ۰/۵ در دوره تناوب بدون بعد ۰/۵ به ۱ می‌رسد. این بدان معناست که در دوره تناوب‌های دارای طول موج برابر با نیم‌پهنای دره، لبه دره‌های عمیق‌تر نسبت‌های بزرگ‌نمایی کمتری نشان می‌دهند. در میانه و کف دره روند مشابهی در حدود دوره تناوب بدون بعد به ترتیب ۰/۷ تا ۱ و ۲ تا ۳ دیده می‌شود.

با همان دیدگاه قبلی می‌توان نتیجه گرفت در دوره تناوب‌های بدون بعد معادل با طول موج‌های دو برابر نیم‌پهنای دره، در میانه دره‌های عمیق‌تر، نسبت‌های بزرگ‌نمایی کوچک‌تری مشاهده می‌شود. همچنین در دوره تناوب‌های بدون بعد دارای طول موج ۴ تا ۶ برابر نیم‌پهنای دره، روند مشابهی برای کف دره دنبال می‌شود. به بیان ساده می‌توان گفت، در دره‌های متقارن، با افزایش نسبت شکل، در لبه دره مقادیر بزرگ‌نمایی افزایش یافته و به فرکانس‌های بالاتر تمایل می‌یابد. همچنین در قسمت‌های میانی و





شکل (۹): نسبت‌های بزرگ‌نمایی طیفی پاسخ لرزه‌ای در امتداد سطح زمین در تپه‌های نامتقارن در پنج نسبت شکل متفاوت، تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی با شاخص رنگی مشخص شده است.

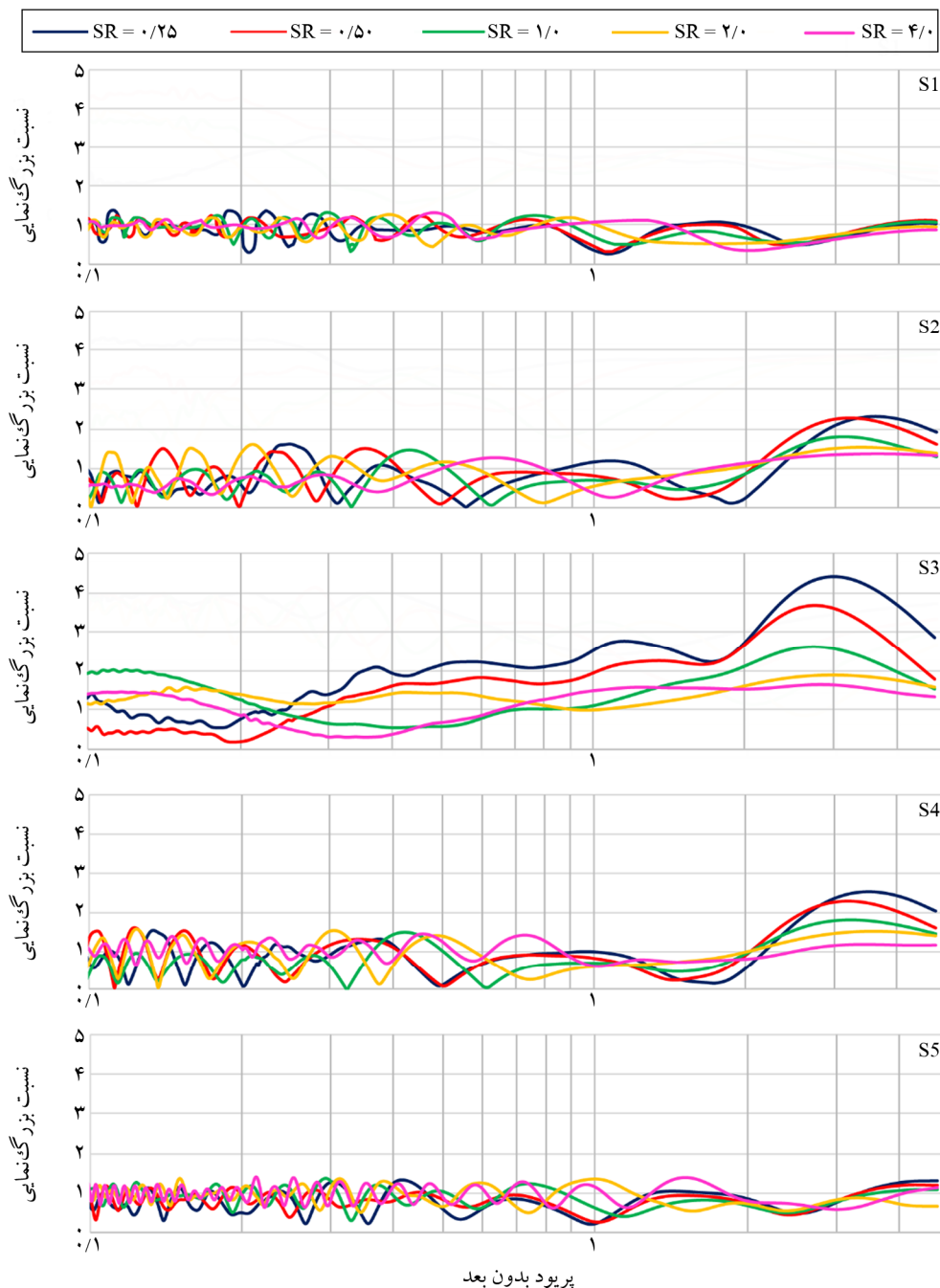
رفتار لرزه‌ای عوارض تا فاصله  $x/ax = 5$  مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش نسبت شکل، تأثیر عارضه تا فاصله بیشتری دیده می‌شود. با توجه به شکل (۹)، هر چه از مرکز عارضه فاصله می‌گیریم تناوب‌های بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی در دامنه امواج دیده می‌شود. برخلاف عوارض متقارن که با افزایش نسبت شکل بر تعداد تناوب‌ها افزوده می‌شود، در عوارض نامتقارن تعداد تناوب‌ها تغییر چشمگیری را نشان نمی‌دهد ولی مقادیر بزرگ‌نمایی‌ها و کوچک‌نمایی‌ها با افزایش نسبت تقارن افزایش می‌یابد.

بیشترین مقادیر بزرگ‌نمایی در تاج تپه و در نسبت تقارن  $0/25$  یعنی در پرشیب‌ترین دامنه در حدود فرکانس بدون بعد ۱ تا ۳ مشاهده می‌شود. با افزایش نسبت تقارن، مقدار بزرگ‌نمایی بالای تپه کاهش یافته و فرکانس نظیر آن افزایش می‌یابد. اگرچه در نسبت شکل‌های کمتر از ۱، بیشترین بزرگ‌نمایی‌ها در یال پرشیب و در فرکانس‌های پایین‌تر مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت شکل، این بیشینه بزرگ‌نمایی به سمت فرکانس‌های بالاتر ( $F > 4$ ) انتقال می‌یابد.



محدوده دوره تناوب بدون بعد ۳ تا ۴ مشاهده می‌شود. در این قسمت‌ها با افزایش نسبت تقارن بیشینه نسبت بزرگ‌نمایی کاهش می‌یابد. این محدوده دوره تناوب بدون بعد معادل با دوره تناوب‌هایی است که طول موج ۶ تا ۸ برابر بزرگ‌تر از نیم‌پهنای عارضه دارند. همچنین در محدوده دوره تناوب‌های بدون بعد کوچک‌تر از ۱، نوسانات شدید در پاسخ‌ها دنبال نمودن روند خاصی

بر اساس پاسخ‌های لرزه‌ای در پنج نقطه متفاوت که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، بیشترین تأثیر نسبت تقارن در نقطه S3 (بالای عارضه) دیده می‌شود و با حرکت به سمت اطراف عارضه (از یک سو به سمت نقطه S1 و از سوی دیگر به سمت نقطه S5 تأثیر نسبت تقارن کاهش می‌یابد. در میانه‌ها و بالای تپه، به‌طور کلی شاخص‌ترین پاسخ‌ها در



شکل (۱۰): نمودار نسبت‌های بزرگ‌نمایی برای تپه‌های دو بعدی نامتقارن در پنج نقطه واقع بر بالای تپه (S1, S5)، میانه تپه (S2, S4) و پایین تپه (S3) در نسبت‌های متفاوت. SR بیانگر نسبت شکل‌های مختلف است.

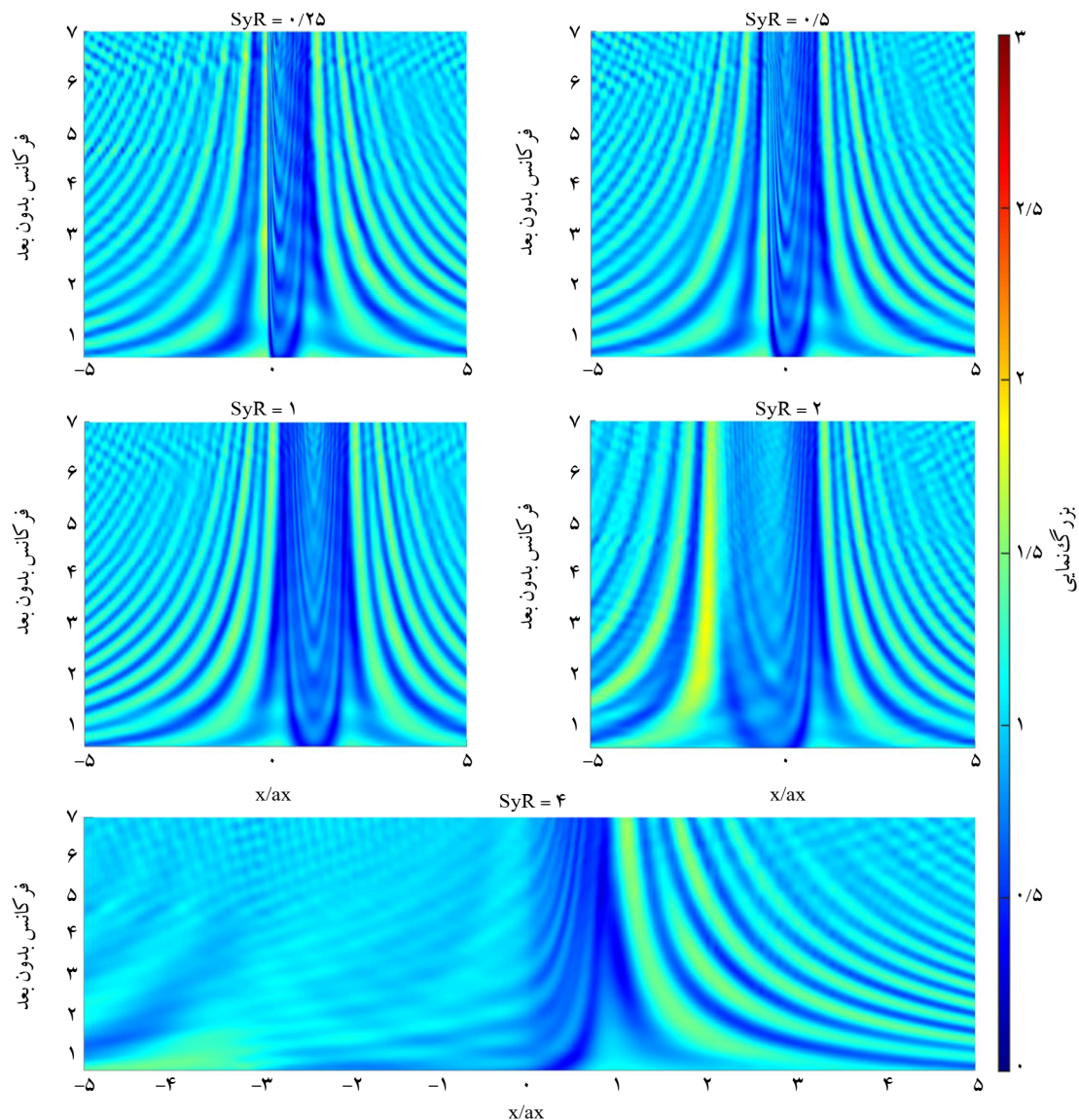
تفاوت‌هایی است. در دوره تناوب‌های بدون بعد بزرگ‌تر از ۴، در هر دوی این نقاط پاسخ‌ها به سمت پاسخ میدان آزاد یعنی نسبت بزرگ‌نمایی ۱ میل می‌کند.

#### ۴-۴- پاسخ لرزه‌ای دره‌های نامتقارن

پاسخ دره‌های نامتقارن در شکل (۱۱) نشان داده شده است که روند کلی پاسخ‌ها همانند قبل، متشکل از کوچک‌نمایی‌های تناوبی در داخل دره و تناوبی از کوچک‌نمایی و بزرگ‌نمایی در لبه و بیرون دره است. تعداد تناوب‌ها در سمتی که دارای شیب بیشتری است نسبت به سمتی که دارای شیب ثابت است، شدیدتر است.

در نسبت‌های بزرگ‌نمایی را دشوار می‌کند، با این حال می‌توان مشاهده نمود که بیشتر این نوسانات در محدوده صفر تا ۱ بوده و به بیان دیگر، در این محدوده از دوره تناوب‌های بدون بعد تأثیر عارضه بیشتر به صورت کوچک‌نمایی موج است.

مقایسه پاسخ لرزه‌ای در دو سوی تپه نشان می‌دهد که در سمت نامتقارن به مقدار جزئی دامنه‌ها بزرگ‌نمایی بیشتری را نشان می‌دهند. در نقاط S1 و S5 در پای دامنه، نسبت‌های بزرگ‌نمایی با مقادیر حدود ۱، نوساناتی را نشان می‌دهد. به این صورت که اساساً تأثیرات عارضه به صورت کوچک‌نمایی بوده و در دو سوی عارضه الگوی این پاسخ‌ها در دوره تناوب‌های مختلف دارای

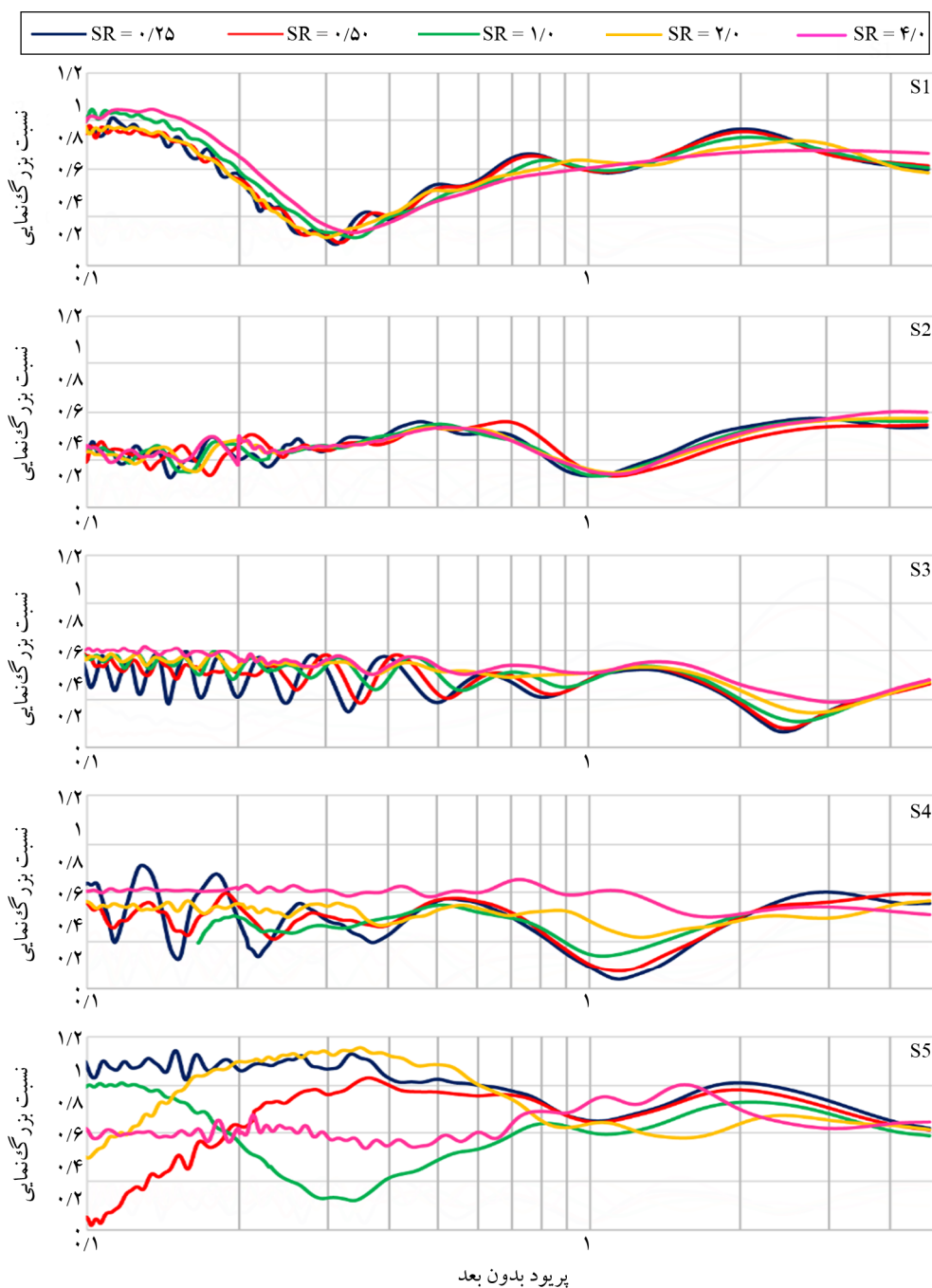


شکل (۱۱): نسبت‌های بزرگ‌نمایی طیفی پاسخ لرزه‌ای در امتداد سطح زمین در دره‌های نامتقارن در پنج نسبت شکل متفاوت، تغییرات نسبت بزرگ‌نمایی با شاخص رنگی مشخص شده است.

نسبت متغیر است، دامنه بزرگ‌نمایی امواج به سمت ۱ میل می‌کند و رفتاری مشابه رفتار سطح میدان آزاد نشان می‌دهد. این مسئله نشان می‌دهد تأثیر دره‌هایی با نسبت شکل ۴ یا بیشتر در پاسخ لرزه‌ای، بسیار جزئی است.

در شکل (۱۲)، تغییرات طیفی پاسخ لرزه‌ای در پنج نقطه واقع بر دره نامتقارن نشان داده شده است که نشان می‌دهد با حرکت از

بیشترین کوچک‌نمایی در همه حالات در مرکز دره‌ها ( $x/a_x=0$ ) دیده می‌شود. با افزایش نسبت تقارن، کوچک‌نمایی در مرکز دره کاهش می‌یابد؛ در حالی که بزرگ‌نمایی در لبه‌ای که دارای نسبت تقارن متغیر است با افزایش نسبت شکل افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه در بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای در کل عارضه این است که در نسبت تقارن  $SyR=4$  در سمتی از دره که دارای



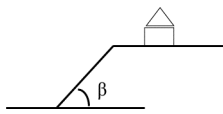
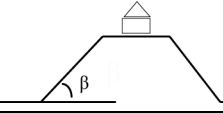
شکل (۱۲): نسبت‌های بزرگ‌نمایی برای دره‌های دو بعدی نامتقارن در پنج نقطه واقع بر بالای دره (S1, S5)، میانه دره (S2, S4) و کف دره (S3) در نسبت شکل‌های متفاوت. SR بیان‌گر نسبت شکل‌های مختلف است.

مشخصات ژئومکانیکی مصالح موجود در محل است. - در واقع ساده‌سازی بسیاری در این دستورالعمل‌ها به کار گرفته شده است که می‌توان بخشی از آن را به عدم دانش کافی در رابطه با رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی نسبت داد.

در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، در ایران نیز اشاره‌ای به بزرگ‌نمایی ناشی از توپوگرافی شده است. در این آیین‌نامه ذکر شده است که «در تحلیل پایداری شیب‌ها ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی در مقدار Kh (ضریب زلزله طرح) ضرب می‌گردد. حداقل مقادیر ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی در پایداری شیب‌ها و طراحی سازه‌های واقع بر یا نزدیک شیب‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. این ضریب بزرگ‌نمایی فقط در ثلث فوقانی ارتفاع شیب‌ها اعمال می‌گردد» [۲۶].

در جداول (۳) و (۴) ضرایب بزرگ‌نمایی برای بالای تپه و کف دره با توجه به نتایج این پژوهش در محدوده پریود بدون بعد ۰/۱ تا ۵ ارائه شده است که در مقایسه با ضرایب پیشنهاد شده در آیین‌نامه، مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند. علاوه بر این، همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده است ضرایب ارائه شده برای تپه‌های نامتقارن در مواردی به ۴/۵ نیز می‌رسد؛ درحالی‌که در آیین‌نامه‌ها به این بخش اشاره‌ای نشده است، این در حالی است که برای بخش‌های دیگر تپه از جمله پایین تپه‌ها و عوارض دره نیز ضریبی در نظر گرفته نشده است. با توجه به مطالعات گسترده‌ای که در این زمینه‌ها انجام شده است، لزوم تکمیل ضرایب ارائه شده در آیین‌نامه‌ها توصیه می‌شود.

جدول (۲): ضرایب بزرگ‌نمایی توپوگرافی در پایداری شیب‌ها و طراحی سازه‌های واقع بر آنها [۲۶].

شکل شیب	میانگین زاویه شیب ( $\beta$ )	ST
	$> 15$	$1/2 \geq$
	۱۵ تا ۳۰	$1/2 \geq$
	$> 30$	$\geq 1/4$
ST: ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی $\beta$ : میانگین زاویه شیب		

بالای دره به سمت پایین دره بیشینه کوچک‌نمایی‌ها به سمت دوره تناوب‌های بزرگ‌تر حرکت می‌کنند، به طوری که مقدار آن از ۰/۳ در بالای دره به ۲/۵ در کف دره می‌رسد.

همان‌طور که در نمودارها دیده می‌شود، در سمت متقارن دره‌ها (نقاط S1 و S2) تغییر در نسبت تقارن سبب تغییر در پاسخ لرزه‌ای دره‌ها نمی‌شود، درحالی‌که به تدریج از کف به سمت لبه دره، در قسمت نامتقارن، افزایش نسبت تقارن تغییر ناچیزی را به صورت کاهش در میزان کوچک‌نمایی نشان می‌دهد. در کف دره (S3) نیز می‌توان تأثیر سمت نامتقارن دره را مشاهده نمود. با کاهش نسبت تقارن، مقادیر کوچک‌نمایی در کف دره در دوره تناوب بدون بعد حدود ۲ تا ۳ تشدید می‌شود. مسئله قابل توجه دیگر این است که در میانه دره در سمت نامتقارن S4 برخلاف سمتی که دارای نسبت تقارن ثابت است مقادیر نسبت بزرگ‌نمایی برای نسبت تقارن‌های مختلف تغییرات چشمگیری نشان می‌دهد. در لبه دره نیز در قسمت نامتقارن (S5) تغییرات پاسخ‌ها برای نسبت تقارن‌های مختلف برخلاف لبه دره در قسمت متقارن (S1) تفاوت‌های اساسی نشان می‌دهد. با این حال دوره تناوب‌های شاخص وقوع تغییرات در این نقاط نیز (S5 و S4) برای نسبت‌های بزرگ‌نمایی تغییر چندانی را نشان نمی‌دهند.

## ۵- رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی و آیین‌نامه‌های طراحی

با توجه به مطالعات انجام شده و به‌رغم اثرات شدید عوارض توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین، معدودی از آیین‌نامه‌ها به این موضوع پرداخته‌اند. در این آیین‌نامه‌ها نیز این اثرات جدای از سایر پارامترهای مؤثر بر پاسخ لرزه‌ای بوده و صرفاً به ارائه ضریب بزرگ‌نمایی پرداخته شده است. به‌طور کلی مسائل در نظر گرفته شده در این آیین‌نامه‌ها، AFPS90، EC8 به‌صورت زیر است:

- حداکثر ضریب بزرگ‌نمایی قابل اعمال ۱/۴ است.
- بزرگ‌نمایی برای ساختمان‌های واقع در تاج تپه قابل اعمال است.
- بزرگ‌نمایی و محدوده تأثیر آن مستقل از نوع حرکت ورودی، محدوده فرکانسی حرکت ورودی و همچنین

تناوب بدون بعد انجام شده است نشان می‌دهد که تأثیر نسبت شکل بر طیف بزرگ‌نمایی موج پاسخ از پای تپه به سمت بالای تپه افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، دوره تناوبی که در آن پیشینه بزرگ‌نمایی دیده می‌شود با افزایش نسبت شکل افزایش می‌یابد.

– در دره‌های متقارن افزایش نسبت شکل سبب کاهش کمینه نسبت‌های بزرگ‌نمایی در داخل دره‌ها می‌شود. با فاصله گرفتن از دره‌ها تناوبی از بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی در امواج دیده می‌شود که با افزایش نسبت شکل بر تعداد این محدوده‌ها افزوده می‌شود.

– مطالعه رفتار لرزه‌ای تپه‌های نامتقارن نشان می‌دهد که مشابه تپه‌های متقارن، در عوارض نامتقارن نیز دو محدوده بزرگ‌نمایی قابل مشاهده است؛ درحالی‌که رفتار عوارض نامتقارن کاملاً متفاوت است. در این حالت افزایش نسبت تقارن موجب کاهش نسبت بزرگ‌نمایی بالای تپه در محدوده فرکانس‌های بدون بعد کمتر از ۰/۵ و افزایش نسبت بزرگ‌نمایی در محدوده فرکانس‌های بدون بعد بالای ۴ می‌شود. بررسی‌های موردی انجام شده در پنج نقطه متفاوت از تپه‌های نامتقارن، بیان می‌کند که هرچه نسبت تقارن افزایش یابد، تأثیر توپوگرافی بر رفتار لرزه‌ای عارضه کاهش می‌یابد، به‌خصوص در بالای تپه این مورد به‌روشنی قابل مشاهده است. علاوه بر آن بیشترین بزرگ‌نمایی‌ها در هر نسبت شکل در قسمت نامتقارن تپه (پال تپه که شیب آن در نسبت تقارن‌های مختلف تغییر می‌کند).

– در تپه‌های نامتقارن با افزایش نسبت شکل تأثیر عارضه تا فاصله بیشتری دیده می‌شود.

– دره‌های نامتقارن، تأثیر نامتقارنی را به‌صورت تشدید در تناوب بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی در لبه‌ای که دارای شیب بیشتر است نشان می‌دهند. علاوه بر آن، در داخل دره با افزایش نسبت تقارن از مقدار کوچک‌نمایی کاسته می‌شود (نسبت تقارن و کوچک‌نمایی رابطه عکس دارند). همچنین مشاهده می‌شود که در دره‌های نامتقارن با نسبت تقارن ۴، نسبت‌های بزرگ‌نمایی

جدول (۳): ضرایب بزرگ‌نمایی برای بالای تپه با استفاده از نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های پژوهش حاضر.

نسبت تقارن	نیم پهنای	زاویه شیب*	ضریب بزرگ‌نمایی برای بالای تپه	ضریب بزرگ‌نمایی پیشنهادی آیین‌نامه
۰/۲۵	۱۲۵	۷۵	۴/۵	۱/۴
۰/۵	۲۵۰	۶۲/۸	۳/۸	۱/۴
۱	۵۰۰	۴۴	۲/۶	۱/۴
۲	۱۰۰۰	۲۶/۱	۱/۹	۱/۲
۴	۲۰۰۰	۱۳/۸۸	۱/۷	-
نسبت تقارن	ارتفاع شکل	زاویه شیب	ضریب بزرگ‌نمایی برای بالای تپه	ضریب بزرگ‌نمایی پیشنهادی آیین‌نامه
۰/۲۵	۱۲۵	۱۳	۱/۲	-
۰/۵	۲۵۰	۲۳/۵	۱/۵	۱/۲
۰/۷۵	۳۷۵	۳۶	۲	۱/۴

\* زاویه شیب در اینجا عبارت است از زاویه بین خط مستقیم رسم شده از رأس تپه (کف دره) و نقطه صفر در پای تپه با خط افق

جدول (۴): ضرایب بزرگ‌نمایی برای کف دره با استفاده از نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های پژوهش حاضر.

نسبت تقارن	نیم پهنای	زاویه شیب	ضریب بزرگ‌نمایی در کف دره	ضریب بزرگ‌نمایی پیشنهادی آیین‌نامه
۰/۲۵	۱۲۵	۷۵	۰/۱۶	-
۰/۵	۲۵۰	۶۲/۸	۰/۲	-
۱	۵۰۰	۴۴	۰/۲۶	-
۲	۱۰۰۰	۲۶/۱	۰/۳۵	-
۴	۲۰۰۰	۱۳/۸۸	۰/۵	-
نسبت تقارن	ارتفاع شکل	زاویه شیب	ضریب بزرگ‌نمایی در کف دره	ضریب بزرگ‌نمایی پیشنهادی آیین‌نامه
۰/۲۵	۱۲۵	۱۳	۰/۶۶	-
۰/۵	۲۵۰	۲۳/۵	۰/۴۳	-
۰/۷۵	۳۷۵	۳۶	۰/۳۳	-
۱	۵۰۰	۴۴	۰/۲۳	-

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی رفتار لرزه‌ای تپه‌ها و دره‌های دو بعدی و همگن در دو حالت متقارن و نامتقارن تحت تأثیر موج مهاجم ریکر از نوع SV با استفاده از روش اجزای مرزی پرداخته شده است. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از این مطالعه عبارت است از:

– در تپه‌های متقارن مورد بررسی در این پژوهش، مطالعاتی که در سه نقطه از عارضه بر اساس نسبت بزرگ‌نمایی و دوره



6. Babaie Mahani, A. and Kazemian, J. (2018) Strong ground motion from the November 12, 2017, M 7.3 Kermanshah earthquake in western Iran. *J. Seismol.*, **22**(6), 1339-1358.
7. Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C., and Leonidou, E.A. (1999) Effects of surface topography on seismic ground response in the Egion (Greece) 15 June 1995 earthquake. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **18**(2), 135-149.
8. Bouckovalas, G.D. and Kouretzis, G.P. (2001) Stiff soil amplification effects in the 7 September 1999 Athens (Greece) earthquake. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **21**, 671-687.
9. Sohrabi-Bidar, A., Kamalian, M., Maghami, S., and Ghaed-amini, M. (2016) Effects of Quaternary Alluvium on Seismic Response of Qom City. *GSI Conference*, 2016, February.
10. Shareghi, A., Amelsakhi, M., and Sohrabi-Bidar, A. (2015) Investigation of magnification of earthquake waves caused by a trapezoidal hill in one-dimensional and two-dimensional state in the time domain. *J. Eng. Geol. Kharazmi Univ.*, **4** (in Persian).
11. Amelsakhi, M., Sohrabi-Bidar, A., and Shareghi, A. (2014) Spectral Assessing of Topographic Effects on Seismic Behavior of Trapezoidal Hill. *International Journal of Environmental, Earth Science and Engineering*, **8**, 6-13.
12. Anggraeni, D. (2010) *Modelling the Impact of Topography on Seismic Amplification at Regional Scale*. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, M.Sc. Thesis, Enschede, the Netherlands.
13. Geli, L., Bard, P., and Jullien, B. (1988) The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **78**(1), 42-63.
14. Kamalian, M., Jafari, M.K., and Sohrabi-Bidar, A. (2007) Seismic behavior of two-dimensional semi-sin hills adjacent vertical incident waves. *Comput. Methods Eng.*, **26**(1).
15. Semblat, J.F., Dangla, P., Kham, M., and Duval, A.M. (2002) Seismic site effects for shallow and deep alluvial basins: In-depth motion and focusing effect. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **22**(9), 849-854.

در قسمت نامتقارن به سمت پاسخ میدان آزاد میل کرده و در واقع وجود عارضه تأثیر ناچیزی در پاسخ لرزه‌ای دارد.

- نکته قابل توجه این است که در دره‌های نامتقارن، سمتی از دره که دارای نسبت تقارن ثابت می‌باشد در تمام دره‌ها (دره‌های دارای نسبت تقارن متفاوت) رفتار یکسانی را نشان می‌دهند؛ درحالی‌که در تپه‌های نامتقارن این امر به وضوح دیده می‌شود که عدم تقارن بر رفتار لرزه‌ای سمتی از تپه هم که دارای نسبت تقارن ثابت می‌باشد تأثیر گذار است.

- در این پژوهش، مقادیر بزرگ‌نمایی‌های به‌دست آمده برای عوارضی با نسبت شکل‌های مختلف، با مقادیر پیشنهاد شده توسط آیین‌نامه‌های ساختمانی مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج، گواه بر این موضوع است که میزان تأثیر ابعاد عارضه و عدم تقارن بر پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی به مقدار چشمگیری بیش از ضرایب در نظر گرفته شده در این آیین‌نامه‌هاست.

## مراجع

1. Mayoral, J.M., Asimaki, D., Tepalcapa, S., Wood, C., Roman-de la Sancha, A., Hutchinson, T., and Franke, K. (2019) Site effects in Mexico City basin: Past and present. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **121**, 369-382.
2. Panji, M. and Yasemi, F. (2017) Pattern of ground magnification in the presence of subsurface circular heterogeneity against invading SH waves. *J. Civ. Environ. Res.*, **3**(2).
3. Ehsani, N., Ghaemian, M., Fazlavi, M., and Haghshenas, E. (2017) Investigation of the site effects using experimental and numerical methods in Karaj. *J. Eng. Geol.*, **11**(1).
4. Spudich, P., Hellweg, M. and Lee, W.H.K. (1996) Directional topographic site response at Tarzana observed in aftershocks of the 1994 Northridge, California, earthquake: Implications for mainshock motions. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **86**(1B), 193-208.
5. Çelebi, M. (1987) Topographical and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **77**(4), 1147-1167.



25. Kamalian, M., Gatmiri, B., and Sohrabi-bidar, A. (2003) On Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures by BEM. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **5**(2), 35-45.
26. Standing Committee for Review of Earthquake Design Regulations (2014) *Earthquake Design Code, Standard 2800* (in Persian).
16. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M.K. (2013) Transient analysis of wave propagation problems by half-plane BEM. *Geophys. J. Int.*, **194**(3), 1849-1865.
17. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M.K. (2014) Analysing seismic convex topographies by a half-planetime-domain BEM. *Geophys. J. Int.*, **197**(1), 591-607.
18. Meunier, P., Hovius, N., and Haines, J.A. (2008) Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **275**(3-4), 221-232.
19. Maghoul, P., Gatmiri, B., le Pense, S., Amini, D., and Foroutan, Talat (2015) A Review of Seismic Site Amplification by Considering Geometrical and Geotechnical Characteristics of Sites. *Geo Quebec Conference*, September.
20. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., and Razmkhah, A. (2008) Seismic response of 2-D semi-sine shaped hills to vertically propagating incident waves: Amplification patterns and engineering applications. *Earthq. Spectra*, **24**(2), 405-430.
21. Poursartip, B., Fathi, A., and Kallivokas, L.F. (2017) Seismic wave amplification by topographic features: A parametric study. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **92**, 503-527.
22. Kamalian, M. (2001) *Time Domain Two-Dimensional Hybrid FEM / BEM Dynamic Analysis of Non-Linear Saturated Porous Media*. Ph.D. Dissertation.
23. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-bidar, A., Razmkhah, A., and Gatmiri, B. (2006) Time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid BE/FE method. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **26**(8), 753-765.
24. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., and Razmkhah, A. (2008) Seismic response of 2-D semi-sine shaped hills to vertically propagating incident waves: Amplification patterns and engineering applications. *Earthq. Spectra*, **24**(2), 405-430.

## Numerical Study of the Effect of Geometry on the Seismic Behavior of Symmetric and Asymmetric Two-Dimensional Semi-Sin Topographic Features

Niloufar Babaadam<sup>1</sup>, Ali Uromeihy<sup>2\*</sup>, Abdollah Sohrabi-Bidar<sup>3</sup>,  
Ebrahim Haghshenas<sup>4</sup> and Shahram Maghami<sup>5</sup>

1. Ph.D. Candidate, Department of Engineering Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2. Professor, Department of Engineering Geology, Faculty of Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, \*Corresponding Author, email: uromeiea@modares.ac.ir
3. Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
4. Associate Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
5. Ph.D., School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

In recent years, many reports of damages caused by earthquakes have been observed in different parts of the world, especially after observing the severity of damage in the Mexico City earthquake in 1985, special attention was paid to the discussion of site effect, and many researchers have investigated this issue in Mexico City and also investigated the site effect on the seismic response in other regions. The effects of topography have been stated as an important factor in the amplification of earthquake waves. Due to the great importance of the effect of these features, including valleys and hills, on the seismic response, many researchers investigated this field, while most research on the effect of topography on seismic behavior has been focused on symmetric topographic features.

In this research, the seismic behavior of topographic features, including symmetrical and asymmetrical semi-sine valleys and hills with different shape ratios, has been studied. The reason for choosing semi-sine features is that they are the most common form of topographic features in nature, and this is very important in applying the results of the studies. The most important reason for the current study is that in nature, topographic features are rarely seen symmetrically, and studying asymmetric features in seismic studies is necessary.

The results in this research have been obtained by using numerical modeling, in order to carry out numerical modeling, the Boundary Element Method (BEM) has been used, which has shown very high accuracy in modeling the distribution of seismic waves among the existing numerical methods.

The main goal of this research is to investigate the seismic behavior of symmetric and asymmetric homogeneous two-dimensional semi-sine topographic features. According to the literature review, different studies have investigated the seismic response in different parts of the topographic features, and have pointed out the importance of the topographic shape in the seismic response. In this regard, two symmetric and asymmetric semi-sine topographic features have been studied and their effects on seismic waves with frequency domains of 3 and 5 Hz have been investigated. The symmetrical features consist of eight valleys and semi-sine hills with a half-width of 500 meters and different heights of 125, 250, 375, and 500 meters, which have shape ratios of 0.25, 0.5, 0.75, and 1 respectively. The seismic response has been examined at three points at the top, middle, and bottom of the features. The second part of the study is investigating the seismic behavior of homogeneous and asymmetric topographic features. For this purpose, 10 asymmetric valleys and hills with the same height of 500 meters and different half-widths of 125, 250, 500, 1000, and 2000 meters, have symmetry ratios of 0.25, 0.5, 1, 2, and 4, respectively.

In this research, the amplification obtained for features with different shape ratios has been compared with the values suggested by the building codes and the results prove that the effect of features dimensions and asymmetry on the seismic response of topographic features is significantly more than the suggested coefficients in these codes.

In the following, the most important results of this study are briefly discussed:

- In symmetrical hills, the effect of the shape ratio on the spectral amplification increases from the foot to the top of the hills. In addition, the period of the maximum spectral amplification increases with the increase of the aspect ratio.
- In symmetrical valleys, increasing the shape ratio causes a decrease in the minimum spectral amplification inside the valleys. By moving away from the valleys, a fluctuation of amplification and de-amplification is seen in the seismic wave, which increases the number of these fluctuations with the increase of the shape ratio.
- The study of the seismic behavior of asymmetric hills shows that as the symmetry ratio increases, the effect of topography on the seismic behavior decreases, especially at the top of the hill, this is clearly visible. In addition, the highest spectral amplification in each symmetry ratio is in the asymmetric part of the hill (the slope with different symmetry ratios).
- Asymmetric valleys show the effect of asymmetry in the form of intensification in the fluctuation of amplification and de-amplification at the edge that has a greater slope. In addition, in the valley, decreasing in de-amplification is seen with the increase in the symmetry ratio (the symmetry ratio and de-amplification show an opposite relationship).
- In asymmetric valleys, a side of the valley that has a constant symmetry ratio shows the same behavior in all valleys (valleys with different symmetry ratios), while in asymmetric hills, it can be seen that the asymmetry affects the seismic behavior of the side of the hill that has a constant symmetry ratio.

**Keywords:** Topographic Features, Shape Ratio, Asymmetric Ratio, 2-Dimensional, SV Incident Wave.