

## رفتار لرزه‌ای تپه‌های دوبعدی مرکب دوگانه در برابر امواج مهاجم برشی قائم

محسن کمالیان<sup>۱\*</sup>، کیاوش مهذب<sup>۱</sup>، عبدالله سهرابی بیدار<sup>۲</sup> و ابراهیم حق‌شناس<sup>۱</sup>

۱. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۲. دانشکده زمین‌شناسی پردیس علوم دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۸/۱۸ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۰/۴/۱)

چکیده -

(SV)

واژگان کلیدی :

## Seismic Behavior of 2D Semi-sine Shaped Hills against Vertical SV Waves

M. Kamalian<sup>1</sup>, K. Mohazzab<sup>1</sup>, A. Sohrabi Bidar<sup>2</sup> and E. Haghshenas<sup>1</sup>

1. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

2. University of Tehran

**Abstract:** The past numerical studies on seismic behavior of topographic features have been actually limited to individual single shapes. However, realistic observations in nature show that ground surface variation and its complexity is much greater and topographic features appear almost in complex forms. The main objective of this paper is presenting the results of a numerical study on seismic behavior of two adjacent 2D homogenous semi-sine shaped hills subjected to vertically propagating incident SV waves. It is shown that the combination of two adjacent hills generates an amplification pattern qualitatively similar to that of a single hill. The adjacency of the hills increases the amplification potential at both crests, especially on that hill which

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mohsen@mkamalian.ir

possesses a smaller shape ratio. Although the area created amid the two adjacent hills shows a seismic behavior similar to the valley qualitatively, it is not equivalent quantitatively to the valley of the same shape ratio. The inside base of adjacent hills demonstrates a greater amplification potential compared to the edges of the single valley with the same shape ratio, particularly against short and medium incident waves. It is also shown that adjacency effect could be considered as an effective factor in justifying some large amplification potentials reported in experimental observations.

**Keywords:** Seismic behavior, Topographic features, Adjacent hills, Amplification potential.

|             |                                |                  |                                |
|-------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|
| $t_0$       | زمان نظیر دامنه حداکثر (ثانیه) | $b$              | نیم‌پهنای تپه (متر)            |
| $T$         | پریود بدون بعد                 | $c_2$            | سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)   |
| $t_i$       | بردار تنش                      | $f_p$            | فرکانس غالب موج ریکر (۱/ثانیه) |
| $u_i$       | تغییر مکان (متر)               | $f(t)$           | تابع موج ریکر (متر)            |
| $u_j^{inc}$ | تغییر مکان حاصله از موج مهاجم  | $G_{ij}, F_{ij}$ | پاسخهای اساسی تغییر مکان و تنش |
| $x$         | موقعیت (متر)                   | $h$              | ارتفاع تپه (متر)               |
| $\xi(x)$    | تابع تپه نیم‌سینوسی (متر)      | $P$              | موج طولی                       |
| $\pi$       | عدد پی                         | $SH$             | موج برشی خارج از صفحه          |
| $\tau$      | زمان بدون بعد                  | $SV$             | موج برشی درون صفحه             |
| $\omega$    | فرکانس دورانی                  | $SR$             | نسبت شکل تپه                   |
| $\Omega$    | فرکانس بدون بعد                | $t$              | زمان (ثانیه)                   |

## ۱- مقدمه

پیشین توجه محققان را به این نکته جدید معطوف کرد که عوارض توپوگرافی نیز چون لایه‌بندی تحت‌الارضی، به‌عنوان بخشی از اثر ساختگاه، ظرفیت قابل ملاحظه‌ای را برای تقویت یا تضعیف امواج زلزله دارا هستند [۴-۹]. طی دو دهه گذشته مطالعات تحلیلی، تجربی و عددی متعددی در سرتاسر جهان [۱۰-۲۰] و از جمله ایران [۲۱-۳۲] انجام گرفت تا الگوی بزرگنمایی<sup>۷</sup> امواج لرزه‌ای توسط عوارض توپوگرافی را کیفی و کمی تبیین کند. با این همه، پیچیدگی پدیده تفرق<sup>۸</sup> امواج توسط عوارض توپوگرافی تاکنون مانع از آن بوده است تا اثرات بزرگنمایی منتج از آن، در طیفهای طرح استاندارد اغلب آیین‌نامه‌های جهان ملحوظ شود.

تحقیقات عددی پیشین بر روی رفتار لرزه‌ای<sup>۹</sup> عوارض توپوگرافی عمدتاً به انواع منفرد آنها محدود بوده است. در همین حال نگاه واقع‌بینانه به طبیعت اطراف نشان می‌دهد که تنوع و

اثر ساختگاه<sup>۱</sup> نیز چون اثرات چشمه و مسیر انتشار امواج در درون پوسته سنگی، یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر کنترل پاسخ لرزه‌ای سطح زمین است. در اواسط نیمه دوم قرن گذشته میلادی مطالعات تحلیلی، عددی و تجربی متعددی توسط محققان وقت انجام گرفت تا تصویری روشن را از اثر لایه‌بندی تحت‌الارضی بر تقویت امواج لرزه‌ای در محیطهای یک و چند بعدی آبرفتی ارائه کند. نرم‌افزارهای اولیه و مشهوری چون شیک [۱]، لاش [۲]، فلاش [۳] و امثال آنها در همین مقطع و برای نیل به همین هدف توسط پیش‌کسوتانی چون شناییل<sup>۲</sup>، لایسمر<sup>۳</sup>، روست<sup>۴</sup>، کاوزل<sup>۵</sup>، سید<sup>۶</sup> و دیگر محققان طراحی و به‌کار گرفته شد و آیین‌نامه‌های جهان تدریجاً تفکیک طیفهای طرح استاندارد را بر اساس نوع آبرفت در دستور کار خود قرار دادند. در اواخر قرن گذشته اما تأمل بیشتر در تجربه زلزله‌های

پیچیدگی ناهمواریهای سطح زمین بسیار بیشتر است و عوارض توپوگرافی غالباً به شکل مرکب ظاهر می‌شوند.

در میان مطالعات عددی انجام شده بر روی رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی، حجم قابل توجهی از آنها به تپه‌های نیم‌سینوسی اختصاص داده شده است [۱۵، ۱۷ و ۲۱]. این بدان سبب است که تپه‌های نیم‌سینوسی، معمولترین شکل ناهمواریهای طبیعی سطح زمین به شمار می‌رود.

بوچون [۱۵] اولین محقق بود که با به‌کارگیری روش اکی‌لارنر<sup>۱۰</sup> [۱۴] به بررسی رفتار لرزه‌ای تپه‌های دوبعدی نیم‌سینوسی منفرد پرداخت. نتایج ارائه شده عمدتاً به امواج مهاجم SH<sup>۱۱</sup> اختصاص داشت. بر اساس نتایج مطالعات بوچون، بزرگنمایی روی قله و کوچکنمایی بر روی یال تپه، دو پدیده مهم هستند که در رفتار لرزه‌ای تپه‌های سینوسی شکل، خصوصاً در محدوده طول موجهای قابل مقایسه با ابعاد عارضه قابل مشاهده هستند. بوچون همچنین نتیجه گرفت که با افزایش نسبت شکل<sup>۱۲</sup> (نسبت ارتفاع به نیم‌پهنای) تپه، بر بزرگنمایی قله و کوچکنمایی یال تپه و همچنین بر وسعت نواحی بزرگنمایی و کوچکنمایی آن افزوده می‌شود.

جلی و همکاران [۱۷] دومین گروهی بودند که رفتار تپه‌های دوبعدی نیم‌سینوسی منفرد را با روش عددی آکی-لارنر مورد بررسی قرار دادند. این محققان ضمن تأیید نتایج مطالعات بوچون [۱۵] به این نتیجه رسیدند که در حوزه فرکانس، به ازای محدوده وسیعی از طول موجهای قابل مقایسه با پهنای عارضه، قله تپه پدیده بزرگنمایی و دامنه آن تناوبی از پدیده‌های بزرگنمایی و کوچکنمایی را تجربه می‌کند. بیشینه مقدار نسبت ضرایب بزرگنمایی قله به کف تپه در مواردی مشاهده شد که طول موج امواج مهاجم اندکی بیش از عرض عارضه بوده است. محققان اخیر همچنین بزرگنمایی کمتر امواج طولی در مقایسه با امواج عرضی، بزرگنمایی بیشتر امواج درون صفحه (P-SV) در مقایسه با امواج خارج از صفحه (SH) و همچنین تغییرات شدید دامنه و فاز حرکت بر روی یالهای عارضه را مورد اشاره قرار دادند.

کمالیان و همکاران [۲۱] گروه دیگری بودند که رفتار لرزه‌ای تپه‌های دوبعدی نیم‌سینوسی منفرد را با روش اجزای مرزی در فضای زمان مورد بررسی قرار دادند. آنها روش اجزای مرزی را به این سبب بر روشهای عددی دیگر از جمله اجزای محدود ترجیح دادند که در ملحوظ ساختن پدیده میرایی تشعشی و حذف مرزهای بی‌نهایت دور موفقتر و از انواع مرزهای جاذب انرژی بی‌نیاز است [۳۳-۳۸]. این محققان با بررسی رفتار لرزه‌ای تپه‌های دارای نسبت شکل ۱/۷ تا ۷/۷ نشان دادند که این عوارض می‌توانند با بزرگنمایی دامنه مؤلفه موافق حرکت، ایجاد مؤلفه مخالف حرکت و همچنین ایجاد اختلاف فاز میان حرکت نقاط مجاور، پاسخ لرزه‌ای زمین در برابر امواج مهاجم صفحه‌ای SV و P را به شکل قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهند. آنها نشان دادند که میزان این تأثیر صرف‌نظر از نوع موج مهاجم، در درجه اول تابع نسبت شکل تپه و نیز نسبت عرض آن به طول موج مهاجم، و در درجه دوم تابع ضریب پواسون محیط است. همچنین آنها نشان دادند که به ازای نسبتهای شکل کوچک و نیز امواج با طول خیلی بلند، پاسخ لرزه‌ای تپه به سمت پاسخ لرزه‌ای آزاد زمین میل خواهد کرد. مطالعات آنها نشان داد که بیشترین پتانسیل بزرگنمایی معمولاً به تاج تپه مربوط است که با نسبت شکل افزایش می‌یابد و در تپه‌های دارای نسبت شکل ۷/۷ بر عدد ۲/۰ نیز بالغ می‌شود. این محققان نهایتاً روابط و جداول اولیه‌ای را ارائه کردند که می‌تواند در مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای و همچنین در مطالعات استخراج طیف طرح شتاب مورد استفاده قرار گیرد.

جلی و همکاران [۱۷] اولین گروهی بودند که رفتار لرزه‌ای تپه‌های دوبعدی نیم‌سینوسی مرکب را با همان روش عددی آکی-لارنر در فضای فرکانس مورد مطالعه قرار دادند. آرایشی که آنها در نظر گرفته بودند، سه تپه مجاور هم و موج مهاجم از نوع SH بود. آنها نشان دادند که الگوی بزرگنمایی تپه‌ها در دو حالت منفرد و مرکب اگرچه به‌طور کیفی یکسان است، اما به لحاظ کمی تفاوتی وجود دارد. حضور تپه مجاور باعث می‌شود تا در فرکانسهای اندکی کوچکتر از یک، بزرگنمایی در تاج و

تحلیل نتایج مطالعه حساسیت سنجی عددی، پاسخهایی اولیه برای سه سؤال کلیدی زیر استنباط شود: نفس مجاورت تپه‌های مرکب دوگانه نیم‌سینوسی، چگونه و تا چه حد می‌تواند پتانسیل بزرگنمایی هر یک از آنها را افزایش دهد؟ آیا رفتار میان دره ایجاد شده بین دو تپه مجاور، می‌تواند با رفتار لرزه‌ای یک دره منفرد دارای نسبت شکل مشابه، معادل‌سازی شود؟ و بالأخره آنکه آیا عامل مجاورت تپه‌ها، می‌تواند تفسیر مقادیر بزرگ نسبتهای بزرگنمایی مشاهده شده در مطالعات تجربی محققان پیشین را تسهیل نماید؟

## ۲- متدولوژی مطالعات حساسیت سنجی عددی

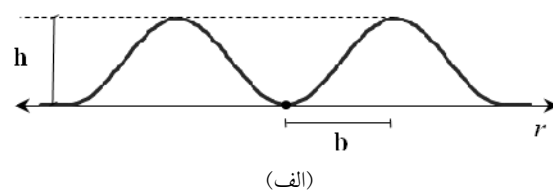
شکل (۱-الف) هندسه تپه‌های مرکب دوگانه همسان موضوع تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. نسبت شکل این تپه‌ها برابر ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ اختیار شده است. همچنین شکل (۱-ب) هندسه تپه‌های مرکب دوگانه ناهمسان را نشان می‌دهد. پهنای تپه‌ها یکسان و تنها ارتفاع آنها متفاوت اختیار شد. نسبت شکل تپه مرجع (تپه سمت راست) برابر ۰/۳ و ۰/۵ اختیار شد و در هر یک از این دو حالت نسبت شکل تپه مجاور از ۰/۱ تا ۰/۷ تغییر داده شد. هندسه تپه نیم‌سینوسی بر اساس معادله زیر تعریف شده است، شکل (۱-ج):

$$\begin{aligned} \xi(x) &= 0.5h(1 + \cos(\pi x / b)) & |x| \leq b \\ \xi(x) &= 0 & |x| \geq b \end{aligned} \quad (1)$$

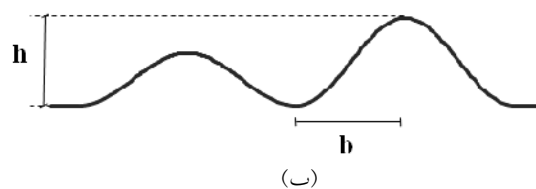
پارامترهای  $b$  و  $h$  به ترتیب نیم‌پهنا و ارتفاع تپه و پارامترهای  $x$  و  $\xi$  به ترتیب طول و عرض از مبدأ نقاط روی یال تپه را نشان می‌دهند.

رفتار تپه‌ها، ارتجاعی، خطی و همسان فرض شد. با توجه به نتیجه تحقیقات پیشین [۲۱، ۲۳ و ۲۴] در خصوص اهمیت تنها مرتبه دوم نقش ضریب پواسون، مقدار آن برابر ۰/۳۳ در نظر گرفته شد.

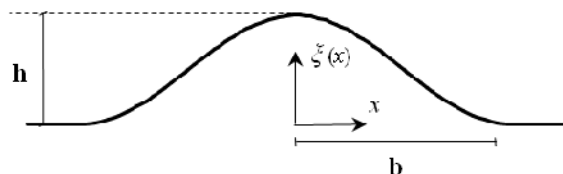
مطالعات حساسیت سنجی با تاباندن امواج مهاجم قائم SV به مجموعه تپه‌ها، تحلیل دینامیکی محیط و محاسبه توابع بزرگنمایی در نقاط مختلف انجام گرفت. شکل (۲) نمای شماتیک مسئله لرزه‌ای مورد نظر را نشان می‌دهد. مرز  $\Gamma$  که



(الف)



(ب)

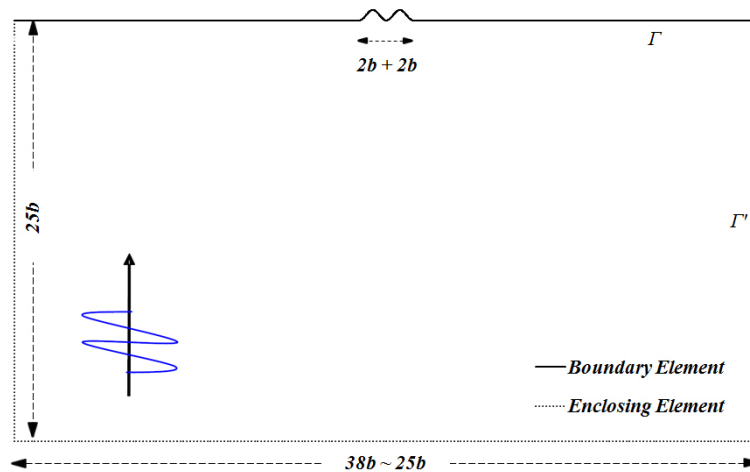


(ج)

شکل ۱- هندسه تپه‌های نیم سینوسی: (الف) تپه‌های مرکب دوگانه همسان، (ب) تپه‌های مرکب دوگانه ناهمسان، (ج) تپه منفرد

کوچکنمایی در دامنه و کناره تپه‌ها به‌طور محسوس افزایش یابد. آنها همچنین نشان دادند که شدت این افزایش در تاج تپه مرکزی نسبت به تپه‌های کناری بیشتر و به همین سبب نسبت بزرگنمایی تاج تپه مرکزی به کناره آن بزرگتر است.

کار جلی و همکاران [۱۷] اگرچه اولین مطالعات عددی بود که بر روی رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب صورت گرفت، اما به هر دلیل دنبال نشد. مرور ادبیات فنی و خصوصاً کارهای فوق بیانگر آن است که تا کنون مطالعات عددی جامعی بر روی رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب صورت نگرفته است. مقاله حاضر بر آن است تا با انجام یک مطالعه حساسیت سنجی<sup>۱۳</sup> عددی، رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب را مورد بررسی قرار دهد. برای این منظور ساده‌ترین ترکیب تپه‌های مرکب، که تپه‌های مرکب دوگانه نیم‌سینوسی هستند، مد نظر قرار گرفتند. ابتدا رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب دوگانه همسان بررسی و با تپه منفرد مقایسه شده است؛ پس از آن رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب دوگانه غیر همسان و همچنین میان دره ایجاد شده بین دو تپه مورد توجه قرار گرفته است. تلاش شده است تا با تجزیه و



شکل ۲- نمای شماتیک محدوده مدلسازی تپه‌های مرکب دوگانه

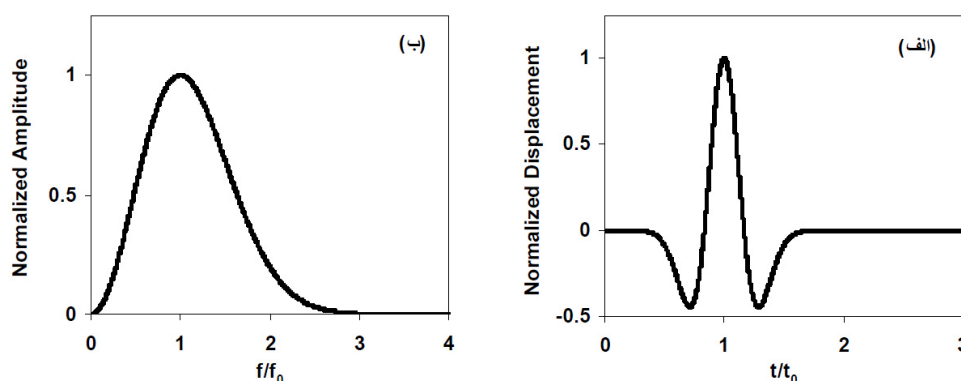
لحظه  $t \leq \tau$  پدید آمده‌اند [۳۳]. عبارات  $G_{ij} * u_i$  و  $F_{ij} * t_i$  انتگرانهای انتگرال کانولوشن ریمن هستند [۳۶-۳۸].  $C_{ij}(\xi)$  ضریب شناخته شده ناپیوستگی در نقطه  $\xi$  است که از منفرد بودن هسته  $F_{ij}$  ناشی می‌شود. این ضریب تنها تابع هندسه مرز است و در هر دو بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مقدار یکسانی دارد.  $u_j^{inc}$  تغییر مکان حاصله از موج مهاجم را بیان می‌دارد. برای حل مسئله توسط الگوریتم اجزای مرزی فوق‌الذکر، از نرم‌افزار هیبرید<sup>۱۶</sup> [۳۸] استفاده شد که برای تحلیل دینامیکی محیطهای دوبعدی خشک و اشباع ارتجاعی خمیری در فضای زمان طراحی گشته است. نرم‌افزار مزبور، انتگرالهای منفرد قوی<sup>۱۷</sup> را با استفاده از تکنیک معروف حرکت جسم صلب<sup>۱۸</sup> [۳۹] محاسبه می‌کند. برای این منظور تعدادی اجزای مجازی<sup>۱۹</sup> [۴۰] تعریف می‌شود تا ضمن معرفی مرز مجازی  $\Gamma'$  (خطوط نقطه‌چین در شکل (۲)) دامنه مسئله را محدود کند. اجزای مجازی یاد شده بدون آنکه تعداد درجات آزادی مسئله را افزایش دهند، تنها یک بار، در گام اول محاسبات و صرفاً به منظور برآورد انتگرالهای منفرد قوی، استفاده می‌شوند و در حل معادله انتگرالی حاکم، معادله (۲)، نقش نخواهند داشت. انتگرالهای غیر منفرد، با روش متعارف گاوس و با استفاده از تعداد ۲۰ نقطه گاوسی محاسبه می‌شود. انتگرالهای منفرد ضعیف<sup>۲۰</sup>، با استفاده از روش تقسیم<sup>۲۱</sup> اجزای منفرد به اجزای

شامل سطح تپه‌ها و همچنین سطح آزاد زمین در طرفین تپه‌ها است، در لحظه برخورد امواج مهاجم تحریک می‌شود. از آنجایی که امواج لرزه‌ای از اعماق پایین به سمت سطح زمین در حرکت است، نقاطی که در رقوم پایینتر واقع است، زودتر به حرکت در می‌آید. مقدار تنش مرزی در امتداد مرز  $\Gamma$  برابر صفر است. سطح آزاد زمین، بسته به ابعاد تپه‌ها، در فاصله‌ای حدود ۱۲ تا ۱۹ برابر عرض تپه از مرکز توپوگرافی قطع<sup>۲۴</sup> شده است تا امواج خطایی که از نقاطی قطع انتشار می‌یابند، پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را در محدوده مورد نظر عوارض متأثر نسازد.

عملیات تحلیل دینامیکی با حل مبتنی بر الگوریتم اجزای مرزی<sup>۱۵</sup> معادله انتگرالی حاکم بر تعادل لرزه‌ای محیطهای ارتجاعی خطی همسان در فضای زمان صورت گرفت [۳۳-۳۶]:

$$c_{ij}(\xi) \cdot u_i(\xi, t) = \int_{\Gamma} (G_{ij} * t_i(x, t) - F_{ij} * u_i(x, t)) \cdot d\Gamma + u_j^{inc}(\xi, t) \quad (2)$$

$u_i$  و  $t_i$  به ترتیب مولفه‌های تغییر مکان و تنش وارده بر روی سطح مماس بر مرز  $\Gamma$  را بیان می‌دارند.  $G_{ij}$  و  $F_{ij}$  پاسخهای اساسی محیط الاستودینامیک و بیانگر مولفه‌های  $i$  ام بردارهای تغییر مکان و تنش مرزی نقطه  $x$  در لحظه  $t$  هستند که به واسطه اعمال یک بار متمرکز واحد موازی محور  $j$ ، در نقطه  $\xi$  و در



شکل ۳- تاریخچه زمانی و طیف فوریه موج ریکر

با انجام تحلیلهای دینامیکی، تاریخچه‌های تغییر مکان افقی نقاط سطح زمین به دست آمده و نتایج حاصله در هر دو حوزه زمان و فرکانس (پریود) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. به منظور تسهیل در پردازش و نمایش نتایج تحقیق و نیز تعمیم آنها به تپه‌های مرکب دوگانه نیم‌سینوسی با ابعاد و خواص مکانیکی مختلف، کلیه پارامترها بدون بعد شدند. برای این منظور تعاریف زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

$$(۴) \quad \text{نسبت شکل: } SR=h/b$$

$$(۵) \quad \text{فرکانس بدون بعد}^{۲۴}: \Omega=\omega b/\pi c_2$$

$$(۶) \quad \text{پریود بدون بعد}^{۲۵}: T=\pi c_2/\omega b$$

$$(۷) \quad \text{زمان بدون بعد: } \tau=tc_2/2b$$

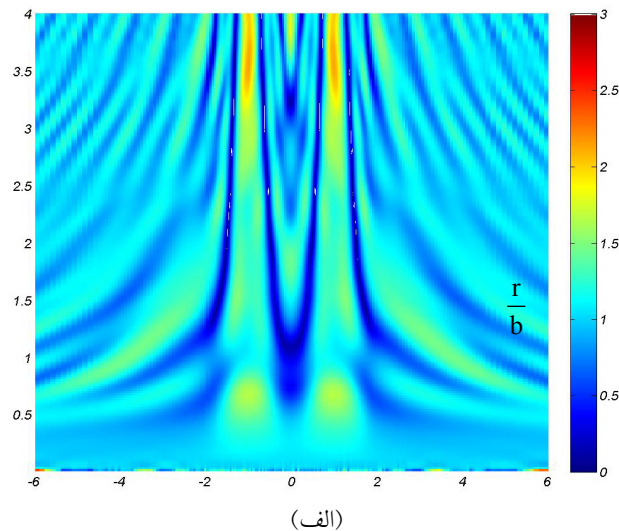
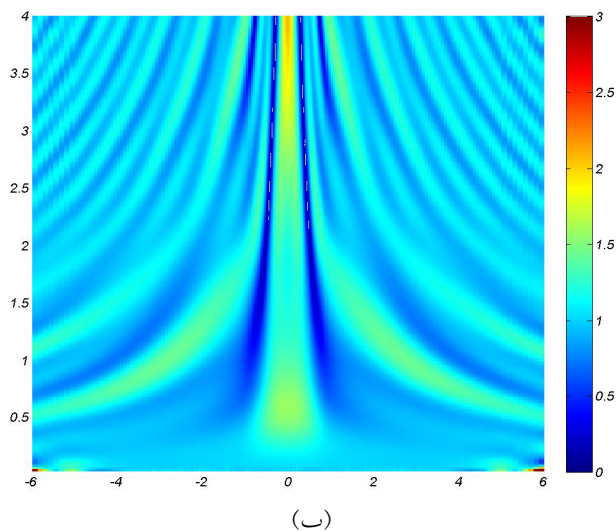
در پارامترهای بدون بعد فوق  $\omega$  و  $c_2$  به ترتیب فرکانس و سرعت موج برشی محیط را بیان می‌دارند. پریود بدون بعد عکس فرکانس بدون بعد است که معنای فیزیکی آن، نسبت طول موج مهاجم به پهنای عارضه است. در ادامه این مقاله هرگاه از زمان، فرکانس و پریود سخن به میان آمد، منظور مقادیر بدون بعد نظیر آنها بوده است. در حوزه زمان، نتایج به دست آمده بر حسب زمان بدون بعد و تغییر مکان نرمالیزه شده به بیشینه دامنه حرکت ورودی نمایش داده شدند. در حوزه فرکانس نیز نتایج به دست آمده در قالب منحنیهای بزرگنمایی تغییر مکان افقی هر نقطه نسبت به حرکت میدان آزاد و بر حسب فرکانس (یا پریود) بدون بعد ارائه شدند. همچنین یادآور

کوچکتر و اعمال روش متعارف گاوس محاسبه می‌شوند. کلیه اجزای مرزی، از نوع ایزوپارامتریک درجه دوم و سه گرهی هستند. کارایی و دقت الگوریتم اجزای مرزی و نرم یادشده در تحلیل پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دوبعدی، به تفصیل و با حل مثالهای متنوع طی کارهای پیشین [۳۶ و ۴۱-۴۴] نشان داده شد. تحلیلهای دینامیکی تحقیق حاضر، شکل (۲)، با استفاده از حدود ۵۰۰ جزء اصلی (مرز  $\Gamma$ ) و ۴۰۰ اجزا مجازی (مرز  $\Gamma'$ ) انجام گرفت.

با توجه به اینکه هدف نهایی مطالعات حاضر، محاسبه و مقایسه توابع بزرگنمایی نقاط مختلف تپه‌های مرکب دوگانه بود و نه خود تغییر مکان، سرعت یا شتاب آنها، موج مهاجم مانند اغلب کارهای عددی مشابه در ادبیات فنی [۳۲، ۳۴، ۴۵ و ۴۶]، از نوع ساده و معروف ریکر<sup>۲۲</sup> انتخاب شد. معادله این موج به شرح زیر است:

$$(۳) \quad f(t) = \left[ 1 - 2 \cdot (\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2 \right] e^{-(\pi \cdot f_p \cdot (t - t_0))^2}$$

پارامترهای  $f_p$  و  $t_0$  به ترتیب فرکانس غالب<sup>۲۳</sup> و زمان نظیر دامنه حداکثر را بیان می‌دارند. شکل (۳) تاریخچه زمانی و طیف فوریه موج ریکر را نشان می‌دهد. بدیهی است که در محیطهای دارای رفتار ارتجاعی خطی، توابع بزرگنمایی نقاط مختلف از تاریخچه زمانی موج مهاجم مستقل است و بنابراین استفاده از هر موج دیگری به جای موج ریکر، نتایج مطالعات حاضر را متأثر نمی‌ساخت.



شکل ۴- نمودار بزرگنمایی حرکت افقی تپه‌های با نسبت شکل ۰/۵؛ (الف) تپه‌های مرکب دوگانه همسان، (ب) تپه منفرد. [محورهای افقی و قائم به ترتیب، فاصله از مرکز عارضه توپوگرافی (شکلهای (۱-الف) و (۱-ج)) و فرکانس بدون ( $\Omega$ ) بعد را نمایش می‌دهند].

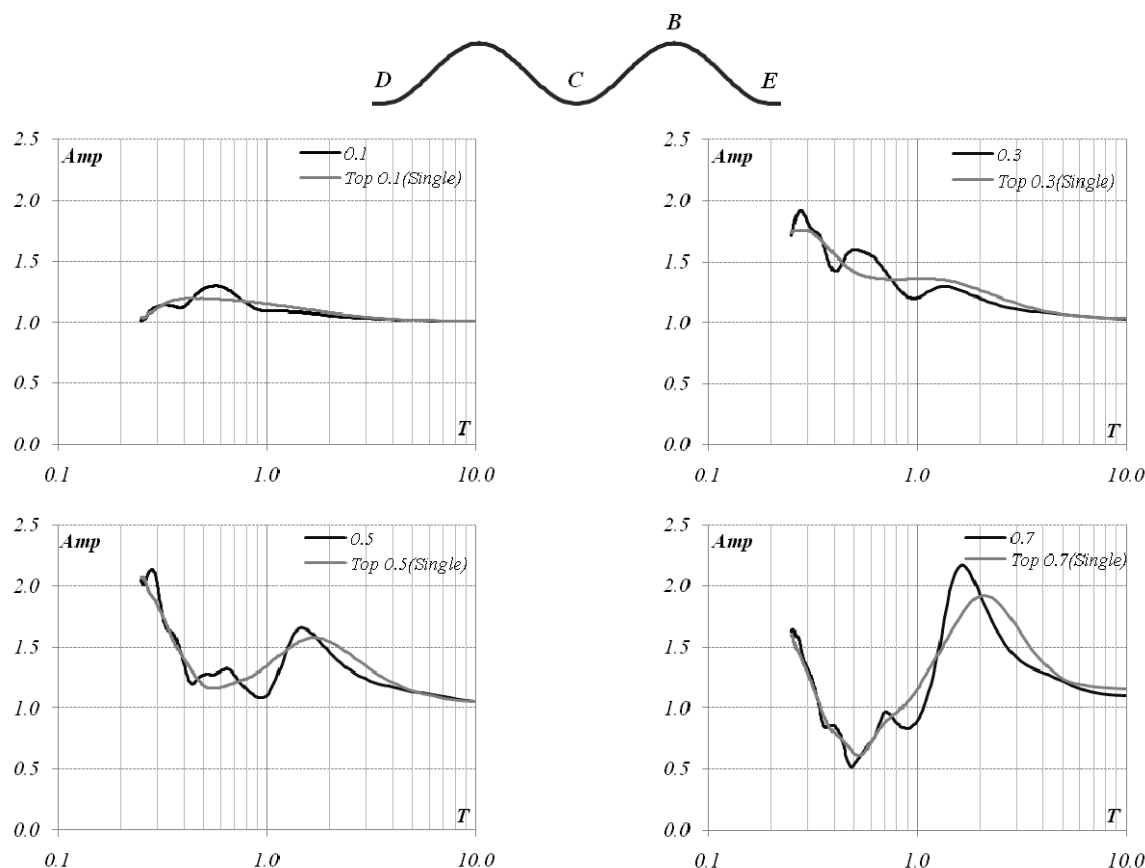
از یک و حرکت هم‌فاز هستند. هر قدر پریود موج مهاجم از پریود مشخصه عارضه بزرگتر باشد، حرکت آنها یکنواخت‌تر و به حرکت آزاد سطح زمین نزدیکتر است. در نقاط خارج از عارضه نیز هرگاه طول موج مهاجم نسبت به ابعاد عارضه بسیار بزرگ باشد، حرکت یکنواخت‌تر و به حرکت آزاد سطح زمین نزدیکتر است. هر قدر فاصله نقاط از مرکز عارضه بیشتر شود، امواج سطحی پدید آمده در اثر وقوع پدیده تفرق، به سبب سرعت انتشار کمتر آنها در قیاس با امواج حجمی فشاری و برشی، دیرتر می‌رسند و لذا توالی بزرگنمایی و کوچکنمایی بیشتر خواهد بود.

شکل (۵) منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه‌های همسان (نقطه B) را به ازای نسبتهای شکل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ نشان می‌دهد. محور افقی، پریود بدون بعد  $T$  در معادله (۶) را بیان می‌دارد. به منظور مقایسه، منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه‌های منفرد دارای نسبت شکل نظیر نیز نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، تاج تپه‌های دوگانه همسان در قیاس با تاج تپه‌های منفرد دارای نسبت شکل مشابه، پتانسیل و بیشینه بزرگنمایی بزرگتری دارد. مقدار این تفاوت اگرچه با افزایش نسبت شکل افزایش می‌یابد، اما در محدوده نسبتهای شکل

می‌شود که پارامترهای بدون بعد  $t_0$  و  $f_p$  مربوط به موج ریکر، به ترتیب برابر ۳ و ۰/۴۵ اختیار شدند.

### ۳- رفتار لرزه‌ای تپه‌های دوگانه همسان

شکل (۴-الف) نمودار بزرگنمایی حرکت افقی تپه‌های مرکب دوگانه همسان دارای نسبت شکل ۰/۵ را نشان می‌دهد. محدوده مورد مطالعه، نواری به عرض  $6b$  از مرکز عارضه توپوگرافی در نظر گرفته شده است. به منظور مقایسه، نمودار بزرگنمایی حرکت افقی تپه منفرد دارای نسبت شکل نظیر نیز نشان داده شده است، شکل (۴-ب). محورهای افقی و قائم به ترتیب فاصله از مرکز عارضه توپوگرافی، شکلهای (۱-الف) و (۱-ج) و فرکانس بدون ( $\Omega$ ) بعد، معادله (۵) را نمایش می‌دهند چنانکه مشاهده می‌شود: روند تغییرات تابع بزرگنمایی در امتداد تپه‌های مرکب دوگانه همسان، همانند تپه‌های منفرد، با توجه به هندسه هموار شکل نیم‌سینوسی، آرام و تدریجی است. الگوی بزرگنمایی تناوبی از بزرگنمایی و کوچکنمایی است. تپه‌های مرکب دوگانه همسان نیز مانند تپه‌های منفرد، فرکانس (یا پریود) مشخصه‌ای دارد که به ازای آن، تمامی نقاط روی عارضه دارای ضریب بزرگنمایی بزرگتر



شکل ۵- منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه‌های همسان (نقطه B) به ازای نسبت‌های شکل ۰/۷ و ۰/۵، ۰/۳، ۰/۱  
[محور افقی، پی‌ریود بدون بعد (T در معادله (۶)) را نمایش می‌دهد].

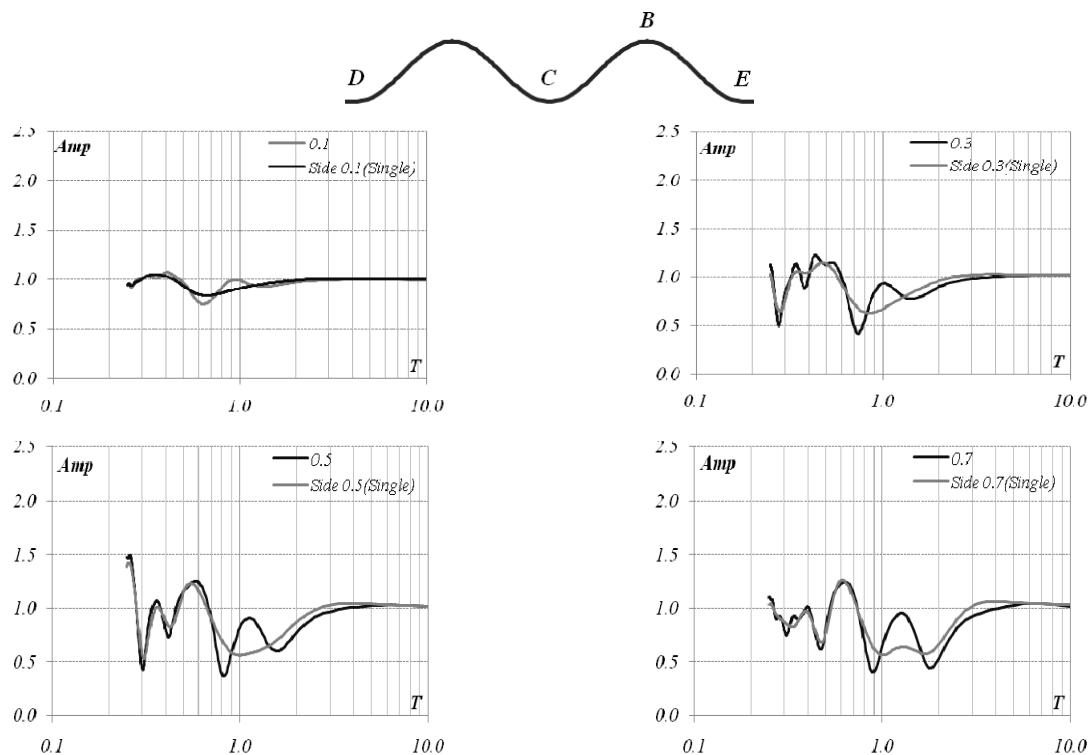
مقایسه، منحنیهای بزرگنمایی کناره تپه‌های منفرد دارای نسبت شکل نظیر نیز نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، کناره تپه‌های دوگانه همسان در قیاس با کناره تپه‌های منفرد دارای نسبت شکل مشابه، پتانسیل و بیشینه کوچکنمایی بزرگتری دارد. نفس تعدد تپه‌ها، خصوصیات فرکانسی منحنی بزرگنمایی و تعداد نقاط قله و قعر را افزایش داده است. در نقطه کناره خارجی تپه نیز مانند نقطه تاج آن، به هنگام هجوم امواج کوتاه و بلند، رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب دوگانه همسان و تپه‌های منفرد نظیر، مشابه است.

#### ۴- رفتار لرزه‌ای تپه‌های دوگانه ناهمسان

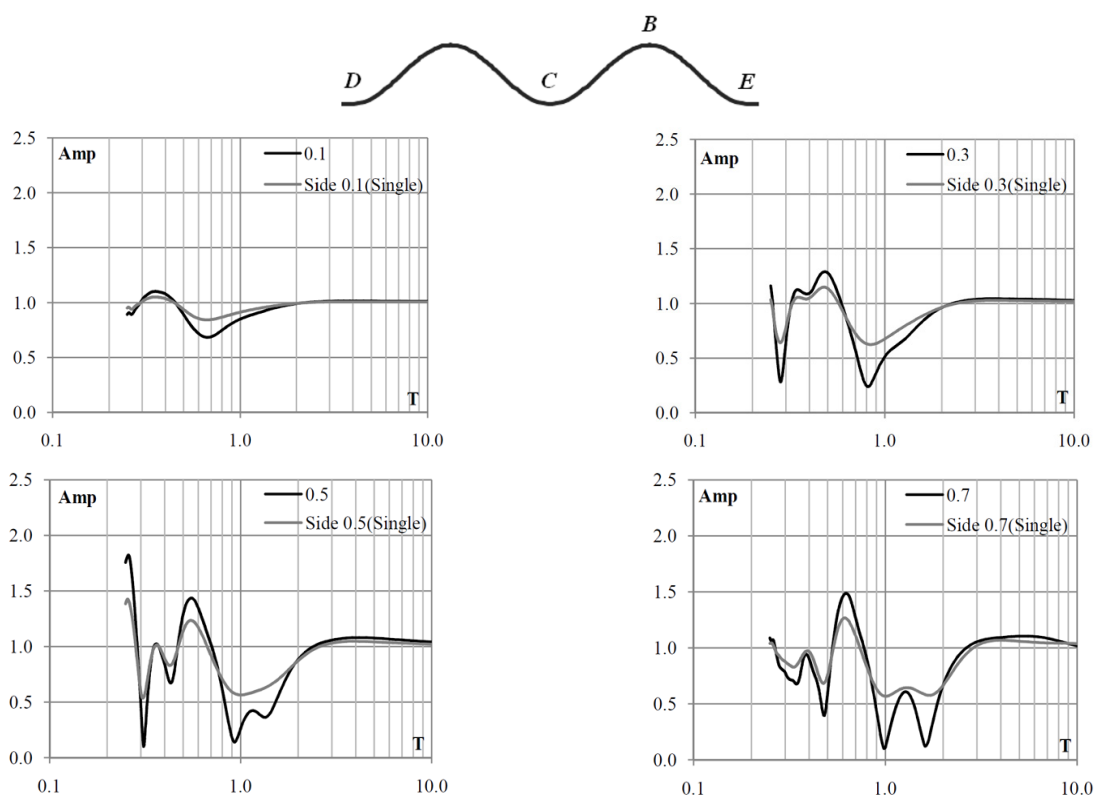
شکل (۸-الف) منحنیهای بزرگنمایی تاج (نقطه B) یک تپه مرکب ناهمسان دارای نسبت شکل ۰/۵ را که تپه مرجع نامیده

مورد بررسی، چندان قابل توجه نیست. همچنین نفس تعدد تپه‌ها، خصوصیات فرکانسی منحنی بزرگنمایی و تعداد نقاط قله و قعر را افزایش داده است. نکته قابل توجه دیگر، رفتار نسبتاً مشابه تاج تپه‌های مرکب دوگانه همسان و تپه‌های منفرد نظیر در برابر امواج مهاجم کوتاه و بلند است. در مورد امواج کوتاه این تشابه رفتاری از آنجا ناشی شده که پاسخ تاج تپه عمدتاً از هندسه همان نقطه و حداکثر همسایگی آن متأثر است که در تپه‌های مرکب و منفرد وضعیت یکسانی دارد. در مورد امواج بلند نیز این تشابه رفتاری ناشی از آن است که پاسخ تاج هر دو تپه مرکب و منفرد در حال میل به سمت پاسخ لرزه‌ای آزاد زمین است.

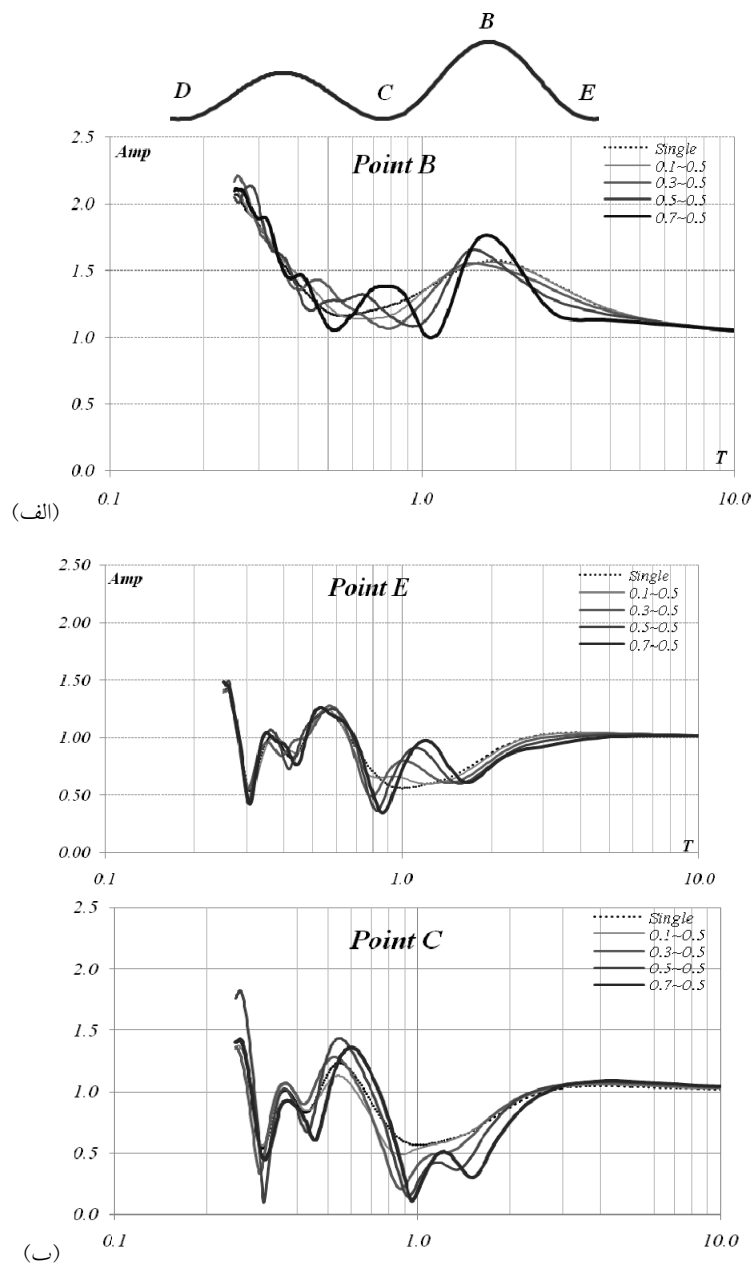
شکلهای (۶) و (۷) منحنیهای بزرگنمایی را در به ترتیب کناره خارجی (نقطه E) و داخلی (نقطه C) تپه‌های همسان، به ازای نسبت‌های شکل چهارگانه فوق نشان می‌دهند. به منظور



شکل ۶- منحنیهای بزرگنمایی کناره خارجی تپه‌های همسان (نقطه E) به ازای نسبت‌های شکل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷



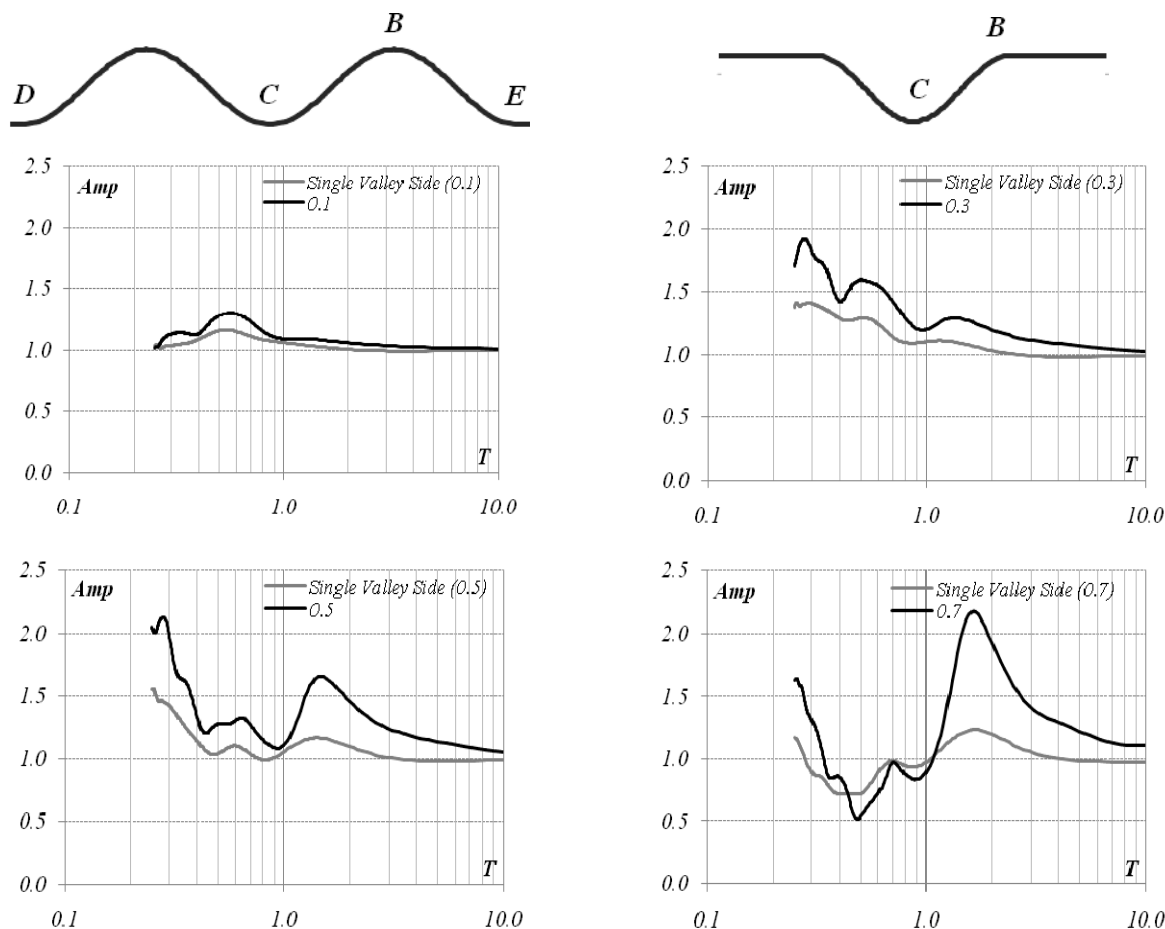
شکل ۷- منحنیهای بزرگنمایی کناره داخلی تپه‌های همسان (نقطه C) به ازای نسبت‌های شکل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷



شکل ۸- منحنیهای بزرگنمایی تاج، کناره داخلی و خارجی تپه مرجع با نسبت شکل ۵/۰ در تپه‌های ناهمسان به ازای نسبتهای شکل ۱/۰، ۳/۰، ۵/۰ و ۷/۰ برای تپه مجاور؛ (الف) تاج، (ب) کناره داخلی و خارجی

بزرگنمایی تاج تپه مرجع را متأثر می‌سازد، و میزان تأثیر با افزایش نسبت شکل عارضه مجاور فزونی می‌یابد. در تپه‌های مرکب دوگانه ناهمسان نیز مانند حالت همسان، پتانسیل بزرگنمایی امواجی که طول موج متوسطی دارند بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر بزرگنمایی تاج تپه مرجع، صرف‌نظر از نسبت شکل تپه مجاور، در برابر امواج مهاجم

می‌شود در حالاتی نشان می‌دهد، که نسبت شکل تپه مجاور از ۱/۰ تا ۷/۰ متغیر است. به منظور مقایسه، منحنی بزرگنمایی تاج تپه منفرد دارای نسبت شکل ۵/۰ نیز نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، حضور عوارض کوچکتر، اثر قابل توجهی بر پتانسیل و بیشینه بزرگنمایی تاج تپه مرجع بر جای نگذاشته است. حضور عوارض بزرگتر اما پتانسیل و بیشینه



شکل ۹- منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه‌های همسان (نقطه B) در مقایسه با منحنیهای بزرگنمایی کناره‌های دره‌های منفرد دارای نسبت شکل مشابه به ازای نسبتهای شکل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷

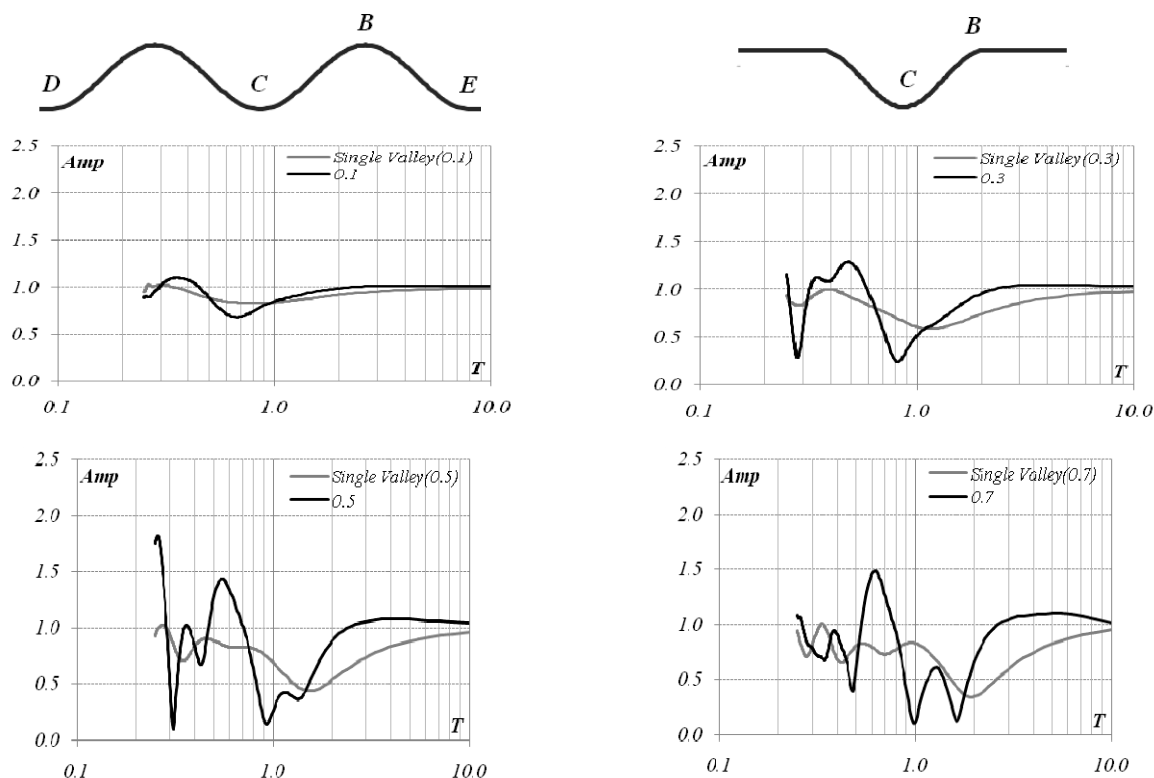
را بیشتر متأثر می‌سازد و میزان تأثیر با افزایش نسبت شکل عارضه مجاور فزونی می‌یابد. در کناره‌های تپه مرجع نیز مانند نقطه تاج آن، پتانسیل بزرگنمایی (و کوچکنمایی) امواجی که طول موج متوسطی دارند بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

##### ۵- رفتار لرزه‌ای میان‌دره‌ها

شکل (۹) منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه‌های همسان (نقطه B) را به ازای نسبتهای شکل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ با منحنیهای بزرگنمایی نقاط کناره دره‌های منفرد دارای نسبت شکل مشابه مقایسه کرده است. همچنین شکل (۱۰) منحنیهای بزرگنمایی کناره داخلی تپه‌های همسان (نقطه C) را به ازای همان نسبتهای

کوتاه و بلند تقریباً ثابت است.

شکلهای (۸-ب) و (۸-ج) منحنیهای بزرگنمایی به ترتیب کناره خارجی (نقطه E) و داخلی (نقطه C) تپه مرجع اخیرالذکر را به ازای حالات چهارگانه فوق نشان می‌دهند. به منظور مقایسه، منحنیهای بزرگنمایی نظیر این نقاط در حالت تپه منفرد نیز نشان داده شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، هر دو کناره تپه مرجع در قیاس با نقاط نظیر در تپه منفرد دارای نسبت شکل مشابه، پتانسیل و بیشینه کوچکنمایی بزرگتری دارند. نفس تعدد تپه‌ها، خصوصیات فرکانسی منحنی بزرگنمایی و تعداد نقاط قله و قعر را افزایش داده است. حضور عوارض مجاور بزرگتر، پتانسیل کوچکنمایی (و بزرگنمایی) کناره‌های تپه مرجع



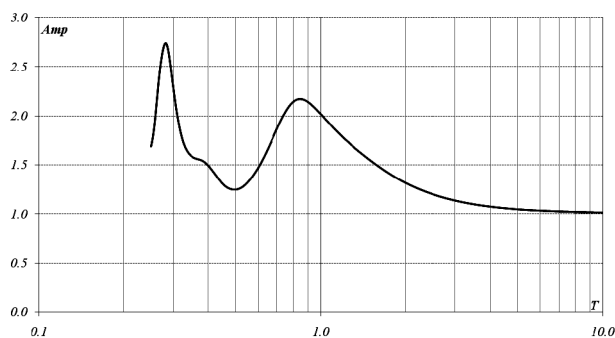
شکل ۱۰- منحنیهای بزرگنمایی کناره داخلی تپه‌های همسان (نقطه C) در مقایسه با منحنیهای بزرگنمایی قعر دره‌های منفرد دارای نسبت شکل مشابه به ازای نسبتهای شکل ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷

سبب افقی بودن سطح زمین از کناره دره به بعد (نقطه B)، در قیاس با میان‌دره ایجاد شده بین دو تپه، به سبب شیب منفی یال خارجی تپه‌های خارجی، بیشتر است. بدیهی است که وقتی میرایی افزایش یابد، پتانسیل بزرگنمایی عارضه نیز کاهش خواهد یافت. مجموعه مشاهدات فوق گویای آن است که اولاً میان‌دره ایجاد شده بین دو تپه مجاور پتانسیل بزرگنمایی قابل توجهی دارد که نمی‌توان از آن صرف‌نظر کرد؛ ثانیاً رفتار لرزه‌ای این میان‌دره‌ها را نمی‌توان با رفتار لرزه‌ای دره‌های منفرد دارای نسبت شکل مشابه معادل‌سازی کرد.

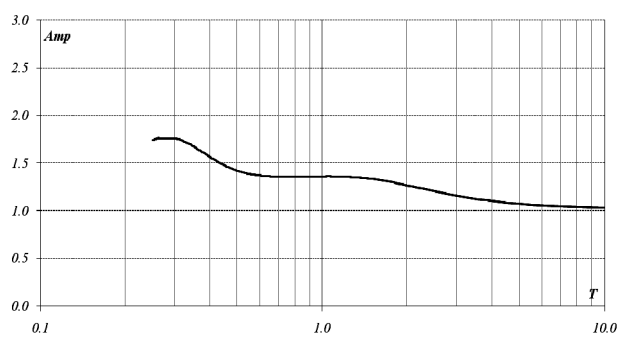
## ۶- قیاس نتایج عددی و تجربی

شکل (۱۱) منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه منفرد دارای نسبت شکل ۰/۳ را در مقایسه با (الف) حرکت آزاد زمین و (ب) کناره تپه (نقطه C) ارائه و با یکدیگر مقایسه کرده است.

شکل با منحنیهای بزرگنمایی نقاط قعر دره‌های منفرد دارای نسبت شکل مشابه مقایسه کرده است. چنانکه مشاهده می‌شود، پتانسیل بزرگنمایی میان دره ایجاد شده بین دو تپه مجاور، در قیاس با دره‌های منفرد، بیشتر است. تاج تپه‌های دوگانه همسان، در قیاس با کناره دره‌های منفرد دارای نسبت شکل مشابه، پتانسیل و بیشینه بزرگنمایی بزرگتری دارد. همچنین کناره تپه‌های دوگانه همسان، در قیاس با قعر دره‌های منفرد دارای نسبت شکل مشابه، خصوصاً در برابر امواج مهاجم کوتاه و متوسط، پتانسیل و بیشینه بزرگنمایی قابل توجهی دارد. از طرفی پتانسیل کوچکنمایی میان دره ایجاد شده بین دو تپه نیز، در قیاس با دره‌های منفرد دارای نسبت شکل مشابه، در برابر همان امواج مهاجم کوتاه و متوسط، افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده، همان چیزی است که انتظار می‌رفت مشاهده شود. میرایی تشعشعی<sup>۲۶</sup> دره‌های منفرد، به

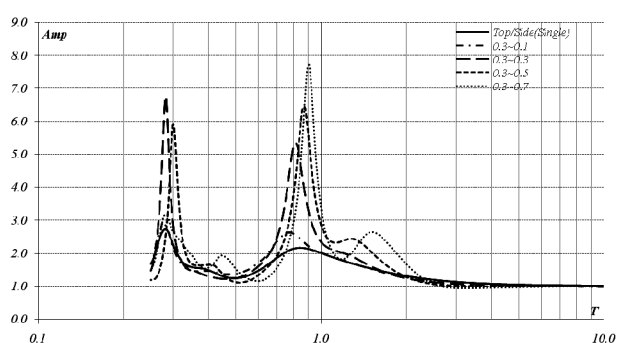


(ب)

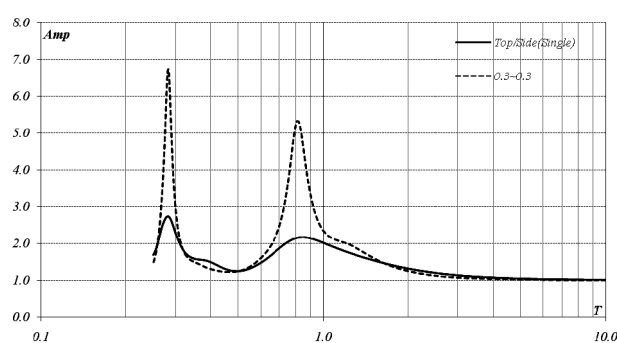


(الف)

شکل ۱۱- منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه منفرد با نسبت شکل ۳/۰؛ (الف) نسبت به حرکت آزاد زمین، (ب) نسبت به کناره تپه (نقطه C)



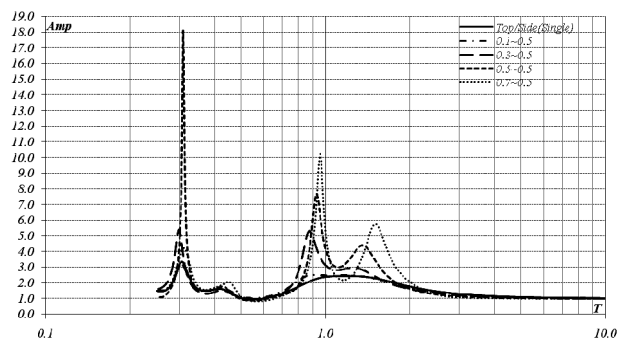
شکل ۱۳- منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه مرجع با نسبت شکل ۳/۰ نسبت به کناره داخلی در تپه‌های مرکب دوگانه ناهمسان به ازای نسبتهای شکل ۱/۰ تا ۷/۰ برای تپه مجاور



شکل ۱۲- منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه منفرد با نسبت شکل ۳/۰ نسبت به کناره آن در مقایسه با منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه‌های مرکب دوگانه همسان نسبت به کناره داخلی (نقطه C)

است. حرکت نقاط تاج و کناره تپه منفرد، در قیاس با حرکت آزاد زمین، معمولاً به ترتیب قویتر و ضعیفتر است. شکل (۱۲) منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه منفرد دارای نسبت شکل ۳/۰ نسبت به کناره آن را با منحنی بزرگنمایی تاج تپه مرکب دوگانه همسان دارای همان نسبت شکل نسبت به نقطه کناری میانی (نقطه C) مقایسه کرده است. چنانکه دیده می‌شود، تپه مرکب در قیاس با تپه منفرد، منحنی بزرگنمایی تاج به کناره قویتری دارد. سبب این مسئله نیز با توجه به مباحث بخشهای قبل روشن است؛ کناره تپه مرکب در قیاس با کناره تپه منفرد، پتانسیل کوچکنمایی بزرگتری دارد، شکل (۱۲).

شکلهای (۱۳) و (۱۴) به ترتیب منحنیهای بزرگنمایی تاج به کناره میانی دو تپه مرکب ناهمسان دارای نسبتهای شکل ۳/۰ و ۵/۰ را در حالاتی نشان می‌دهد، که نسبت شکل تپه مجاور از



شکل ۱۴- منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه مرجع با نسبت شکل ۵/۰ نسبت به کناره داخلی در تپه‌های مرکب دوگانه ناهمسان به ازای نسبتهای شکل ۱/۰ تا ۷/۰ برای تپه مجاور

چنانکه دیده می‌شود، منحنی بزرگنمایی تاج نسبت به کناره تپه در اغلب بازه‌های پریودی قویتر و دارای قله‌های بزرگتر است. سبب این مسئله با توجه به تحقیقات پیشین [۲۱ و ۲۵] روشن

جدول ۱- بیشینه ضرایب بزرگنمایی ثبت شده در ادبیات فنی

| نام محققان                     | نام تپه    | نسبت شکل | بزرگنمایی مشاهده شده | آرایش تپه | ابعاد عارضه | وضع لایه بندی تحت الارضی |
|--------------------------------|------------|----------|----------------------|-----------|-------------|--------------------------|
| دیویس و وست (۱۹۷۳)<br>[۱۰]     | کاگل       | ۰/۲۸     | ۲۰~۳۰                | مرکب      | سه بعدی     | تقریباً همگن             |
|                                |            |          | ۱۰                   |           |             |                          |
|                                | باتلر      | ۰/۲۹     | ۷~۹                  | مرکب      | سه بعدی     | تقریباً همگن             |
| نیخت شتاین (۱۹۹۴)<br>[۱۱]      | کاستیلون   | ۰/۴      | ۱۰                   | مرکب      | -           | ناهمگن                   |
|                                |            |          | ۱۰                   |           |             |                          |
|                                | پین        | ۰/۴۵     | ۱۰                   | مرکب      | -           | ناهمگن                   |
|                                |            |          | ۲۵~۳۰                |           |             |                          |
| پاولوسی (۱۹۹۹)<br>[۱۲]         | اوشیارا    | ۰/۵      | ۸~۱۰                 | مرکب      | سه بعدی     | ناهمگن                   |
| لبرون و همکاران (۱۹۹۹)<br>[۱۳] | کیسریون    | ۰/۱۷۵    | ۷~۱۰                 | مرکب      | سه بعدی     | تقریباً همگن             |
| چلبی (۱۹۸۷)<br>[۶]             | کانال بیگل | ۰/۳      | ۱۰~۱۱                | مرکب      | سه بعدی     | همگن                     |
|                                |            |          | ۱۲~۱۴                |           |             |                          |

۰/۱ تا ۰/۷ متغیر است. به منظور مقایسه، منحنی بزرگنمایی تاج به کناره تپه منفرد دارای نسبت شکل مشابه نیز نشان داده شده است. چنانکه دیده می شود، ضرایب بزرگنمایی تاج به کناره بسیار قابل توجه و قله هایی با بزرگی ۱۰ تا ۱۸ را شامل است. تپه های مرکب در همه حالات نسبت به تپه های منفرد نظیر پتانسیل بزرگنمایی قویتری دارد. این بزرگنمایی، خصوصاً در برابر امواج مهاجم دارای طول کوتاه و متوسط، با افزایش نسبت شکل شدت بیشتری می یابد.

جدول (۱) برخی ضرایب بزرگنمایی ثبت شده در ادبیات فنی [۶ و ۱۰-۱۳] را که به تپه ها و اندازه گیری های واقعی مربوط هستند، نشان می دهد. در تمامی موارد، بزرگنمایی تاج تپه نسبت به کناره آن ارزیابی شده است. چنانکه دیده می شود، اغلب تپه ها از نوع مرکب گزارش شده اند. نسبت های شکل آنها از حدود ۰/۳ تا ۰/۵ و ضرایب بزرگنمایی آنها از حدود ۱۰ تا ۳۰ متغیر هستند. مقایسه ضرایب بزرگنمایی ارائه شده برای تپه های

مرکب در مقاله حاضر با ضرایب ثبت شده در ادبیات فنی گویای آن است که نتایج مطالعات عددی و تجربی به یکدیگر نزدیک شده اند. به عبارت دیگر محاسبات عددی اکنون قادر است دلایل مشاهده ضرایب قوی بزرگنمایی را در طبیعت توجیه کند. کنار هم نهادن نتایج شکل های (۱۱) تا (۱۴) و جدول (۱) نشان می دهد که به منظور شبیه سازی عددی رفتار لرزه ای عوارض توپوگرافی واقعی، آنها را باید همان طور که در طبیعت هستند، به طور مرکب نه منفرد مدل سازی کرد. ساده سازی مسئله و منفرد پنداشتن عوارض مرکب، پتانسیل بزرگنمایی تاج به کناره را کمتر از واقعیت ارزیابی خواهد کرد. یکی از دلایل بزرگتر بودن برخی ضرایب بزرگنمایی جدول (۱) نسبت به ضرایب شکل های (۱۱) تا (۱۴) را می توان چنین برشمرد که تپه های مرکب موجود در طبیعت، ممکن است سه گانه و چند گانه باشند و نه دو گانه. وقتی نفس دو گانه بودن عوارض توپوگرافی می تواند پتانسیل بزرگنمایی آنها را افزون کند، بدیهی

است که افزایش تعداد عوارض می‌تواند اثر مضاعف داشته باشد. دلیل احتمالی دیگر، سه بعدی بودن اغلب تپه‌ها در طبیعت است. مطالعات حساسیت‌سنجی سهرابی [۲۷] و سهرابی و همکاران [۲۸ و ۲۹] نشان داد که تپه‌های منفرد سه بعدی نسبت به تپه‌های منفرد دو بعدی دارای همان نسبت شکل، از پتانسیل بزرگنمایی بیشتری برخوردار هستند. بدیهی است که وقتی تپه‌ها مرکب شدند، باید همین انتظار را داشته باشیم. از دیگر دلایل احتمالی تفاوت، می‌توان به نوع امواج مهاجم و نیز زاویه هجوم آنها نیز اشاره کرد.

## ۷- نتیجه‌گیری

این مقاله بر آن بود تا با استفاده از روش اجزای مرزی در فضای زمان، رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب دوگانه همسان و ناهمسان را در برابر امواج مهاجم برشی قائم مورد بررسی قرار دهد. نتایج به دست آمده نشان داد که در صورت تابش امواج مهاجم برشی قائم (SV)، حضور تپه‌ای کوچکتر در کنار یک تپه، اثر قابل توجهی بر پتانسیل و بیشینه بزرگنمایی تاج و کناره

## واژه نامه

- |                     |                                   |                             |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1. site effect      | 10. Aki-Larner method             | 19. enclosing element       |
| 2. Schnabel, P.B.   | 11. incident waves                | 20. weak singular integral  |
| 3. Lysmer, J.       | 12. shape ratio                   | 21. sub-segmentation        |
| 4. Roesset, J.M.    | 13. parametric study              | 22. Ricker wave             |
| 5. Kausel, E.       | 14. truncate                      | 23. predominant frequency   |
| 6. Seed, H.B.       | 15. boundary element method (BEM) | 24. dimensionless frequency |
| 7. amplification    | 16. HYBRID code                   | 25. dimensionless period    |
| 8. scattering       | 17. strong singular integral      | 26. radiation damping       |
| 9. seismic behavior | 18. rigid body motion             |                             |

## مراجع

1. Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B., "SHAKE- A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites," Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1972.
2. Lysmer, J., Udaka, T., Seed, H. Bolton., and Hwang, Richard N., "LUSH – A Computer Program for Complex Response Analysis of Soil Structure Systems," Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1974.
3. Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, Chan-Feng., and Seed, H. Bolton., "FLUSH: A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems," Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.
4. Trifunac, M. D., and Hudson, D. E., "Analysis of the Pacoima Dam accelerograms-San Fernando, California, earthquake of 1971," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61 No.5,

تپه مرجع بر جای نمی‌گذارد. حضور تپه‌ای بزرگتر اما پتانسیل و بیشینه بزرگنمایی تاج و کناره تپه مرجع را متأثر می‌سازد. میزان این تأثیر با افزایش نسبت شکل تپه دوم فزونی می‌یابد.

رفتار لرزه‌ای میان‌دره‌های ایجاد شده بین دو تپه مجاور را نمی‌توان با رفتار لرزه‌ای دره‌های منفرد دارای نسبت شکل مشابه معادل‌سازی کرد. تاج تپه‌های دوگانه همسان در قیاس با کناره دره‌های منفرد دارای نسبت شکل مشابه، و همچنین کناره این تپه‌ها در قیاس با قعر دره‌ها، خصوصاً در برابر امواج مهاجم کوتاه و متوسط، پتانسیل و بیشینه بزرگنمایی بزرگتری دارد.

عامل مجاورت تپه‌ها، می‌تواند رمزگشایی مقادیر بزرگ نسبتهای بزرگنمایی ثبت شده در مطالعات تجربی را تسهیل سازد. به منظور شبیه‌سازی عددی رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی واقعی، باید آنها را همان‌طور که در طبیعت هستند، یعنی به‌طور مرکب و نه منفرد، مدل کرد. ساده‌سازی مسئله و منفرد پنداشتن عوارض مرکب، پتانسیل بزرگنمایی تاج به کناره را کمتر از واقعیت ارزیابی خواهد کرد

- pp. 1393-1411, 1971.
5. Spudich, P., Hellweg, M., and Lee, W. H. K., "Directional Topographic Site Response at Tarzana Observed in Aftershocks of the 1994 Northridge, California, Earthquake: Implications for mainshock Motions," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, pp. 139-208, 1996.
  6. Celebi, M., "Topographical and Geological Amplifications Determined from Strong-motion and Aftershock Records of the 3 march 1985 Chile Earthquake," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, No. 4, pp. 1147-1167, 1987.
  7. Celebi, M., "Topographic and Geological Amplification: Case Studies and Engineering Implications," *Structural Safety*, Vol. 10, pp. 199-217, 1991.
  8. Athanasopoulos, G. A., Pelekis, P. C., and Leonidou, E. A., "Effects of Surface Topography on Seismic Ground Response in the Egeon (Greece) 15-6-1995 Earthquake," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18, pp. 135-149, 1999.
  9. Bouckovalas, G. D., and Kouretzis, G., "Review of Soil and Topography Effects in the September 7, 1999 Athens (Greece) Earthquake," *Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics And Symposium in Honor of Professor WD Liam Finn*, San Diego, California, 2001.
  10. Davis, L.L. and West, L.R., "Observed Effects of Topography on Ground Motion," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 63, No. 1, pp. 283-298, 1973.
  11. Nechtschein, S., Bard, P.Y., Gariel, J.C., Meneroud, J.P., Dervin, P., Cushing, M., Gaubert, C., Vidal, S., and Duval, A.M., "A Topographic Study in the Nice Region," *Proceedings of 5<sup>th</sup> International conference on seismic zonation*, Nice, France, Vol. II, pp. 1067-1074, 1995.
  12. Paolucci, R., Faccioli, E., and Maggio, F., "3D Response Analysis of an Instrumented Hill at Matsuzaki, Japan, by a Spectral Method," *Journal of Seismology* 3, pp. 191-209, 1999.
  13. Lebrun, B., Hatzfeld, D., Bard, P.Y., and Bouchon, M., "Experimental Study of the Ground Motion on a Large Scale Topography Hill at Kitherion (Greece)," *Journal of Seismology* 3, pp. 1-15, 1999.
  14. Aki, K., and K. Larner, "Surface Motion of a Layered Medium Having an Irregular Interface Due to Incident Plane SH Waves," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, pp. 933-954, 1970.
  15. Bouchon, M., "Effect of Topography on Surface Motion," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 63, pp. 615-632, 1973.
  16. Beskos, D. E., "Boundary Element Methods in Dynamic Analysis," *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 40, pp. 1-23, 1987.
  17. Geli, L., Bard, P. V., and Julien, B., "The Effect of Topography on Earthquake Ground Motion: a Review and New Results," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 78, pp. 42-63, 1988.
  18. Sanchez-Sesma, F. J., "Site Effects on Strong Ground Motion," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 6, pp. 124-132, 1987.
  19. Beskos, D.E., "Boundary Element Methods in Dynamic Analysis: Pt. II (1986-1996)," *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 50, pp. 149-197, 1997.
  20. Sanchez-Sesma, F. J., Palencia, V. J., and Luzon, F., "Estimation of Local Site Effects During Earthquakes: an Overview," *ISSET Journal of Earthquake Technology*, Vol. 39, pp. 167-193, 2002.
  ۲۱. کمالیان، م.، جعفری، م.ک. و سهرابی بیدار، ع.، رفتار لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی نیم‌سینوسی در برابر امواج مهاجم قائم مجله استقلال، سال ۲۶، شماره ۱ ص ۱۰۹-۱۳۰، شهریور ۱۳۸۶.
  ۲۲. درخشان، ح.، امیدوار، ب.، رحیمیان، م. و نورزاد، ا.، بررسی اثر ناهمواری تپه گیشا بر تشدید دامنه تحریکات زمین، نشریه‌ی دانشکده‌ی فنی، سال ۳۹، شماره ۵ ص ۵۹۵-۶۰۷، ۱۳۸۴.
  ۲۳. کمالیان، م.، جعفری، م.ک.، سهرابی بیدار، ع. و رزم‌خواه، آ.، الگوی بزرگنمایی امواج مهاجم قائم توسط تپه‌های دو بعدی دوزنقه‌ای شکل، مجله فنی مهندسی مدرس، سال ۲۹، شماره پاییز ص ۱۱-۳۰، ۱۳۸۶.
  ۲۴. کمالیان، م.، جعفری، م.ک.، سهرابی بیدار، ع. و رزم‌خواه، آ.، اثر شکل تپه‌های دوبعدی بر بزرگنمایی امواج مهاجم قائم، مجله زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، جلد ۸، شماره ۲، ۱۳۸۵.
  25. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi Bidar A., and Razmkhah, A., "Seismic Response of 2D Semi-Sine Shaped Hills to Vertically Propagating Incident Waves: Amplification Patterns and Engineering Applications," *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No. 2, pp. 405-430, 2008.
  26. Kamalian, M., Sohrabi Bidar, A., Razmkhah, A., Taghavi A.A., and Rahmani, I., "Considerations on Seismic Microzonation in Areas with Two-Dimensional Hills," *Journal of Earth System Science (JESS)*, Vol. 117, S2, pp. 783-796, 2008.
  ۲۷. سهرابی بیدار، ع.، بررسی رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی

سطحی با استفاده از روش اجزاء مرزی سه بعدی در حوزه  
زمان، پایان نامه دکتری، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و  
مهندسی زلزله، تهران، ۱۳۸۷.

28. Sohrabi Bidar, A., Kamalian, M., and Jafari M.K., "Time-Domain BEM for Three-Dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures," *International Journal for Numerical Methods in Engineering (NME)*, Vol. 79, No. 12, pp. 1467-1492, 2009.
29. Sohrabi Bidar, A., Kamalian M., and Jafari M.K., "Seismic Response of 3D Gaussian Shaped Valleys to Vertically Propagating Incident Waves," *Geophysical Journal International*, Vol. 183, No. 3, pp. 1429-1442, 2010.
30. Nguyen, K. V., and Gatmiri, B., "Evaluation of Seismic Ground Motion Induced By Topographic Irregularity," *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 27, pp. 183-188, 2007.
31. Gatmiri, B., Nguyen, K. V., and Dehghan, K., "Seismic Response Of Slopes Subjected To Incident SV Wave By An Improved Boundary Element Approach," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 31, pp. 1183-1195, 2007.
32. Gatmiri, B., Arson, C., and Nguyen, K. V., "Seismic site Effects by an Optimized 2D BE/FE Method I. Theory, Numerical Optimization and Application to Topographical Irregularities," *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28, pp. 632-645, 2008.
33. Israil, A. S. M., and Banerjee, P. K., "Advanced Time Domain Formulation of BEM for Two-Dimensional Transient Elastodynamics," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 29, pp. 1421-1440, 1990a.
34. Kawase H., "Irregular Ground Analysis to Interpret Time Characteristics of Strong Ground Motion Recorded in Mexico City During 1985 Mexico Earthquake, in *Ground Motion and Engineering Seismology*," *Development in Geotechnical Engineering*, Vol. 44, pp. 467-476, Elsevier, Amsterdam, 1987.
35. Hadely P. K., Askar A., and Cakmak A.S., "Scattering of Waves By Inclusions In A Nonhomogeneous Elastic Half Space Solved By Boundary Element Methods", *Technical Report NCEER-89-0027*, 1989.
36. Kamalian, M., Gatmiri, B., and Sohrabi, A., "On Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures by BEM," *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, Vol. 5, No, 2, pp. 35-45, 2003.
37. Israil, A. S. M., and Banerjee, P. K., "Two-

Dimensional Transient wave Propagation by Time Domain BEM," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 26, pp. 851-864, 1990b.

۳۸. کامالیان، م.، تحلیل دینامیکی محیط متخلخل اشباع ارتجاعی  
خمیری در فضای زمان با استفاده از ترکیب روش های اجزاء  
محدود و عناصر مرزی، رساله دکترا، دانشگاه تهران، تهران،  
۱۳۸۰.

39. Brebbia C. A., and Dominguez J., *Boundary Elements- an Introductory Course*, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston, 1989.

40. Ahmad, S., and Banerjee, P. K., "Multi-Domain BEM for Two-Dimensional Problems of Elastodynamics," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 26, pp. 891-911, 1988.

۴۱. کامالیان، م و سهرابی بیدار، ع.، تحلیل دینامیکی عوارض  
توپوگرافی دوبعدی ناهمگن در فضای زمان با استفاده از  
روش اجزاء مرزی، مجله استقلال، سال ۲۴، شماره ۲ ص  
۵۱-۶۸، اسفند ۱۳۸۴.

۴۲. کامالیان، م.، گتمیری، ب.، سهرابی بیدار، ع. و رزم خواه، آ.،  
حل مسائل انتشار امواج در محیط های خطی دو بعدی در  
فضای زمان با استفاده از ترکیب روش های اجزای محدود و  
اجزای مرزی، امیرکبیر، سال هفدهم، شماره ۶۴- ج  
(مهندسی عمران) ص ۱-۱۱، ۱۳۸۵.

43. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., and Gatmiri, B., "Time Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Non-Homogeneous Topographic Structures by a Hybrid FE / BE Method," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 26, pp. 753-765, 2006.

44. Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi Bidar, A., and Khalaj, A., "Amplification Pattern of 2D Semi-Sine Shaped Valleys Subjected To Vertically Propagating Incident Waves," *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 23, No. 9, pp. 871-887, 2007.

45. Sanchez-Sesma F.J., and Campillo M., "Diffraction of P, SV and Rayleigh Waves by Topographic Features: a Boundary Integral Formulation," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 81, pp. 2234- 2253, 1991.

46. Dravinski M., and Mossessian T. K., "Scattering of Plane Harmonic P, SV, and Reyleigh Waves by Dipping Layers of Arbitrary Shape," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, pp. 212 – 235, 1987.