

## بررسی اثر شکل بر پتانسیل بزرگنمایی لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی

### Shape Effects on Amplification Potential of Two-Dimensional Hills

محسن کمالیان<sup>۱</sup>، محمد کاظم جعفری<sup>۱</sup>، عبدالله سهرابی‌بیدار<sup>۱</sup> و آرش رزم‌خواه<sup>۲</sup>

۱- پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران- جنوب، تهران، ایران

Email: kamalian@iiees.ac.ir

**چکیده:** اگرچه شکل تپه نیز مانند ابعاد هندسی و خصوصیات مکانیکی آن رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دوبعدی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما هنوز تحقیق جامعی وزن این عامل را مشخص نکرده است. تحقیق حاضر با استفاده از روش عددی اجزاء مرزی، پاسخ لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی، نیم‌بیضی و دوزنقه‌ای را در برابر امواج مهاجم قائم  $P$  و  $SV$  به ازای نسبت‌های شکل، ضرایب پواسون و طول موجهای مختلف مورد مقایسه قرار داده است. نتایج این مقایسه گویای آن است که تغییر شکل تپه اگرچه کلیات رفتاری آن را در برابر امواج یاد شده تغییر نمی‌دهد، اما جزئیات رفتاری نقاط مختلف یال را بسته به طول موج مهاجم و نیز نسبت شکل عارضه، کاملاً متأثر می‌سازد. نهایتاً رابطه و جداولی ارائه شده‌اند که می‌توانند با برآورد پرریود مشخصه و بزرگنمایی متوسط تپه‌ای با شکل دلخواه، در تدقیق مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

**کلید واژه‌ها:** اثرات ساختگاه، توپوگرافی، اثر شکل تپه، تفرق، بزرگنمایی، پرریود مشخصه، ریز پهنه‌بندی

**Abstract:** Although the seismic behavior of a hill could be considerably affected by its geometrical shape, no comprehensive research has been reported in the literature, clarifying the weight of this parameter. This paper compares numerically the seismic behavior of two-dimensional semi-sinusoidal, semi-elliptical and trapezoidal shaped hills subjected to vertically propagating incident  $P$ - and  $SV$ - waves, using the well known 2D transient boundary element method. It is shown that although altering the shape would not change some general observations common to all hills, but could affect the amplification patterns along the hill significantly, depending on its shape ratio as well as the length of the incident wave. Some approximate formula and tables are proposed for estimating the characteristic site period and the average amplification potential of an arbitrary shaped homogeneous single hill, which could be applied in site effect microzonation studies of topographic areas.

#### ۱- مقدمه

بعدی را بر پارامترهای حرکت لرزه‌ای زمین مورد توجه قرار می‌دهند [۲-۴]. سبب اصلی عدم توجه به اثرات ساختگاهی چند بعدی، فقدان شناختی جامع از چگونگی این اثرات است. از طرفی هر اندازه شناخت کنونی بشر از اثرات ساختگاهی دو بعدی در قیاس با اثرات ساختگاهی یک بعدی اندک است، رفتار لرزه‌ای تپه‌ها نیز در قیاس با دیگر انواع عوارض توپوگرافی دو بعدی به همان اندازه ناشناخته باقی مانده است. تاکنون مطالعه پارامتریک جامعی در ادبیات فنی گزارش نشده است که اثر نوع و طول موج مهاجم و همچنین اثر شکل، ابعاد و مشخصات مکانیکی تپه را به طور جداگانه بر پاسخ لرزه‌ای آن مورد بررسی قرار داده باشد. مطالعات انجام شده بر روی رفتار لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی انگشت‌شمار و هدف آنها عمدتاً ارزیابی کارایی روشهای

امروزه کاملاً آشکار است که اثرات ساختگاهی دو بعدی، پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و توزیع خسارت ناشی از زمین‌لرزه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. اثرات ساختگاهی دو بعدی زمانی قابل‌ملاحظه خواهند بود که ابعاد توپوگرافی (تپه یا دره) با طول امواج لرزه‌ای قابل مقایسه باشد [۱]. از آنجاییکه محدوده فرکانسی یک زمین‌لرزه نیرومند از  $0/3$  تا  $10$  هرتز و همچنین محدوده سرعت امواج لرزه‌ای لایه‌های سطحی از  $0/1$  تا  $3$  کیلومتر بر ثانیه متغیر هستند، رفتار لرزه‌ای پستیها و بلندیهای که دارای ابعاد دهها متر تا دهها کیلومتر باشند، عموماً از هندسه دوبعدی ساختگاه متأثر خواهد بود.

اغلب آیین‌نامه‌های زلزله موجود، به رغم آشکار شدن اهمیت اثرات ساختگاهی چند بعدی، هنوز تنها اثرات ساختگاهی یک

## ۲- مدل‌ری مطالعات

به منظور مقایسه رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی، نیم‌بیضی و دوزنقه‌ای (با زاویه یال ۴۵ درجه)، پاسخ لرزه‌ای این تپه‌ها در برابر امواج مهاجم ریکر  $SV$  و  $P$  محاسبه و نتایج حاصله در هر دو حوزه زمان و فرکانس (پریود) تجزیه و تحلیل شدند. نسبت‌های شکل مورد مطالعه از ۰/۱ تا ۰/۷ متغیر بوده و همچنین چهار ضریب پواسون ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳۳ و ۰/۴ مورد توجه قرار گرفتند. هندسه و مساحت تپه‌ها در جدول (۱) تعریف شده‌اند. شکل (۱) مساحت تپه‌ها را به ازاء نسبت‌های شکل مختلف با یکدیگر مقایسه کرده است. چنانکه دیده می‌شود، اگرچه تپه نیم‌بیضی همواره بر تپه نیم‌سینوسی محیط است، اما تپه دوزنقه‌ای رفتاری بینابین دارد. در صورتیکه نسبت شکل تپه کوچک باشد، مساحت تپه دوزنقه‌ای از مساحت تپه نیم‌بیضی بزرگتر و در مابقی موارد عکس قضیه صادق است.

جدول ۱: مشخصات هندسی تپه‌ها.

معادله تپه	مساحت تپه	شکل تپه
$ x \leq b : \xi(x) = 0.5h(1 + \cos(\pi x/b))$ $ x \geq b : \xi(x) = 0$	$S = SR \cdot b^2$	نیم‌سینوسی
$ x \leq b : \xi(x) = h\sqrt{1 - (x^2/b^2)}$ $ x \geq b : \xi(x) = 0$	$S = \frac{\pi}{2} SR \cdot b^2$	نیم‌بیضی
زاویه یال ۴۵ درجه است	$S = (2 - SR) \cdot SR \cdot b^2$	دوزنقه‌ای

پارامترهای  $b$  و  $h$  به ترتیب نیم‌پهنا و ارتفاع و پارامتر  $SR=h/b$  نسبت شکل تپه را نشان می‌دهند.

مطالعات پارامتریک تحقیق حاضر با حل معادله انتگرالی حاکم بر تعادل دینامیکی محیط‌های ارتجاعی خطی همسان در فضای زمان با استفاده از روش اجزاء مرزی صورت گرفته است [۱۴-۱۵]:

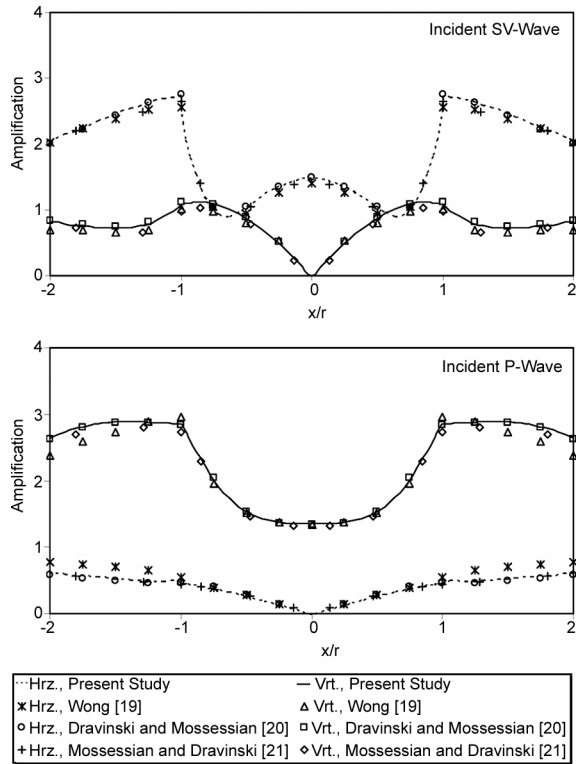
$$c_{ij}(\xi) \cdot u_i(\xi, t) = \int_{\Gamma} (G_{ij} * t_i(x, t) - F_{ij} * u_i(x, t)) \cdot d\Gamma \quad (1)$$

$u_i$  و  $t_i$  به ترتیب مؤلفه‌های تغییر مکان و تنش وارده بر روی سطح تماس بر مرز  $\Gamma$  را بیان می‌دارند.  $G_{ij}$  و  $F_{ij}$  پاسخهای اساسی محیط الاستودینامیک و بیانگر مؤلفه‌های نام بردارهای تغییر مکان و تنش مرزی نقطه  $x$  در لحظه  $t$  هستند که به واسطه اعمال یک بار متمرکز واحد موازی محور  $z$  در نقطه  $\xi$  و در لحظه  $\tau \leq t$  پدید آمده‌اند. عبارات  $G_{ij} * t_i$  و  $F_{ij} * u_i$  انتگرالهای کنولوشن ریمن هستند.  $c_{ij}(\xi)$  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. برای حل مسأله توسط الگوریتم اجزاء مرزی فوق‌الذکر از نرم‌افزار هیبرید [۱۶] استفاده شده که جهت تحلیل دینامیکی

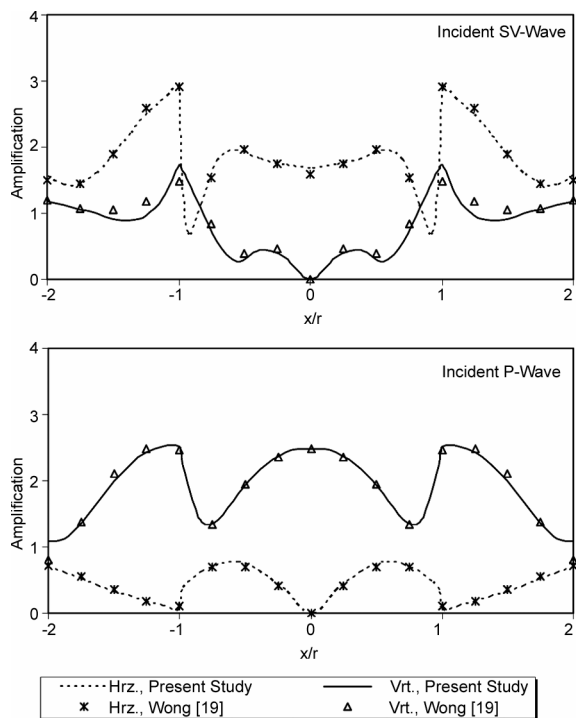
محاسباتی بدون تجزیه و تحلیل رفتار لرزه‌ای آنها بوده است. بوجون [۱] اولین محقق بود که تأثیر تپه‌های نیم‌سینوسی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را مورد بررسی قرار داد. وی هر چند در مطالعات خود نسبت‌های شکل مختلفی را مورد توجه قرار داد، اما نتایجی که ارائه نمود، تنها به موج مهاجم  $SH$  مربوط بودند. بعدها جیلی و همکاران [۵] اثر لایه‌بندی زیرسطحی و همچنین حضور ناهمواریهای مجاور را بر پاسخ لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی مورد بررسی قرار دادند؛ اما حوزه مطالعات آنها نیز تنها به موج مهاجم  $SH$  و نهایتاً به یک نسبت شکل محدود شده بود. سانچزسما و کامپیلو [۶-۷] اولین گروهی بودند که تأثیر تپه‌های نیم‌بیضی را بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مورد بررسی قرار دادند. آنها اگرچه هر دو موج حجمی  $SV$  و  $P$  را مورد توجه قرار دادند، اما حوزه مطالعاتشان تنها یک نسبت شکل و فقط یک ضریب پواسون را در بر گرفت. بعدها پدرسون و همکاران [۸] نیز اگرچه در بررسی پاسخ لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی نیم‌بیضی، زوایای هجوم و آزمون مختلف را مورد توجه قرار دادند، اما حوزه مطالعات آنها نیز همچنان به یک نسبت شکل و یک ضریب پواسون محدود شده بود. سانچزسما [۹] اولین محقق بود که رفتار لرزه‌ای تپه‌های تیزگوشه را مورد بررسی قرار داد. اما حوزه مطالعات وی تنها تپه‌های مثلثی شکل، موج مهاجم  $SH$  و یک ضریب پواسون خاص را شامل گردید. بعدها موکزو و همکاران [۱۰] پاسخ لرزه‌ای تپه‌های دوزنقه‌ای شکل را مورد بررسی قرار دادند. اما حوزه مطالعات آنها نیز تنها موج مهاجم  $SV$ ، یک نسبت شکل، یک زاویه یال و یک ضریب پواسون را در بر گرفت. کمالیان و همکاران اولین گروهی بودند که مطالعه پارامتریک گسترده‌ای را به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی [۱۱]، نیم‌بیضی [۱۲] و دوزنقه‌ای شکل [۱۳]، در برابر امواج قائم  $SV$  و  $P$  به اجرا در آوردند. در این مطالعه که با استفاده از روش عددی اجزاء مرزی انجام گردید، تأثیرات نسبت شکل، نسبت طول موج مهاجم به ابعاد عارضه، زاویه یال (در تپه‌های دوزنقه‌ای) و ضریب پواسون، به طور جداگانه بر پاسخ لرزه‌ای تپه‌های یاد شده مورد بررسی قرار گرفتند. این مقاله بر آن است تا با مقایسه پاسخ لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی، نیم‌بیضی و دوزنقه‌ای در برابر امواج قائم  $SV$  و  $P$ ، اثر شکل تپه بر رفتار آن را مورد بررسی قرار دهد. نهایتاً و بر اساس نتایج این بررسی، رابطه و جداولی جهت برآورد پیروید مشخصه و بزرگنمایی متوسط تپه‌ای با شکل دلخواه ارائه شده‌اند که می‌توانند در تدقیق مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

اشکال (۲) و (۳)، منحنی‌های بزرگنمایی به دست آمده با استفاده از الگوریتم یادشده برای یک دره با مقطع نیم دایره را با مقادیر ارائه شده توسط وانگ [۱۹]، موسسیان و دراوینسکی [۲۰] و دراوینسکی و موسسیان [۲۱]، به ازای فرکانسهای بدون بعد  $(\Omega = \omega b / \pi c_2)$

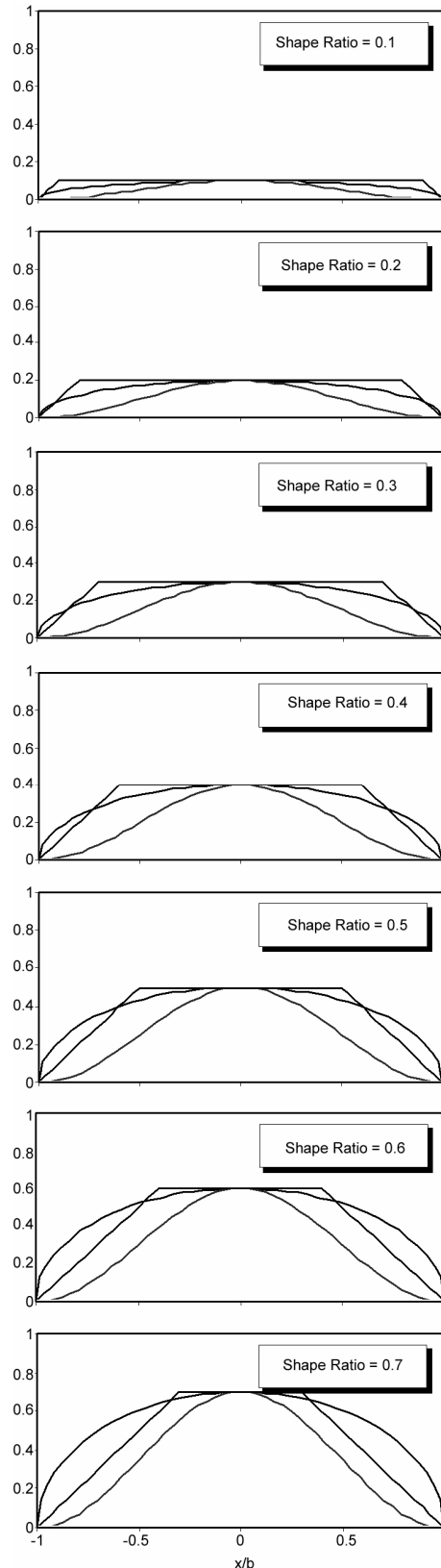
محیطهای دو بعدی خشک و اشباع ارتجاعی خمیری در فضای زمان طراحی گشته است. کارایی و دقت الگوریتم اجزاء مرزی و نرم افزار یادشده در تحلیل پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دو بعدی با حل مثالهای متنوعی طی مراجع [۱۴-۱۸] نشان داده شده است.



شکل ۲- بزرگنمایی حرکت سطحی دره نیم دایره‌ای به ازاء فرکانس بدون بعد ۰/۵.



شکل ۳- بزرگنمایی حرکت سطحی دره نیم دایره‌ای به ازاء فرکانس بدون بعد ۱/۰.



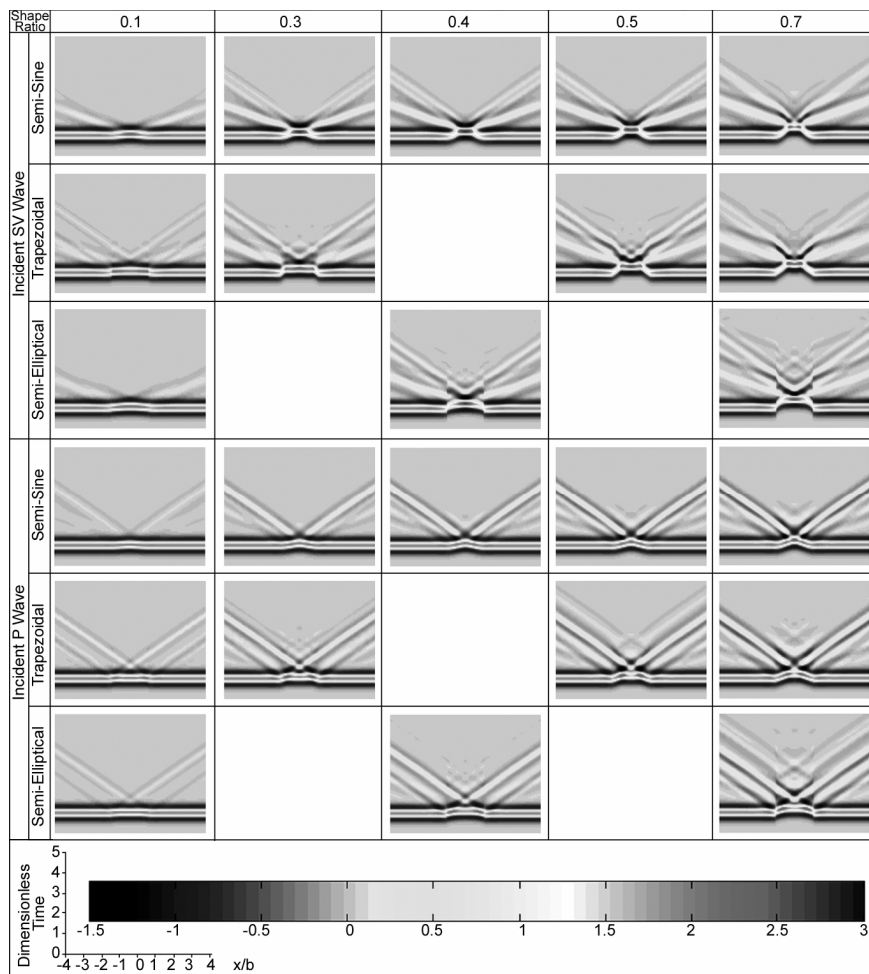
شکل ۱- مقایسه مساحت تپه‌های نیم‌سینوسی، نیم‌بیضی و دوزنقه‌ای.

در برگرفته است که طول موج آنها از  $0.25$  تا  $8/33$  برابر پهنای عارضه متغیر بوده است. جهت ارزیابی دقیقتر و همچنین استنتاج نتایج مهندسی، محدوده پریودی فوق‌الذکر به پنج بازه بسیار کوتاه ( $0.25$  تا  $0.5$ )، کوتاه ( $0.5$  تا  $1.0$ )، متوسط ( $1.0$  تا  $2.0$ )، بلند ( $2.0$  تا  $4/17$ ) و بسیار بلند ( $4/17$  تا  $8/33$ )، که به ترتیب  $P1$  تا  $P5$  نامیده می‌شوند، تقسیم گردید. به منظور ساده‌سازی مراحل تفسیر و نیز کاربردی نمودن نتایج تحقیق، دو نوع میانگین بزرگنمایی برای نقاط روی و کل تپه تعریف گردید. اول بزرگنمایی نقاط یال تپه است، که از محاسبه مقدار میانگین بزرگنمایی هر نقطه در بازه پریودی مورد نظر به دست می‌آید. دوم بزرگنمایی متوسط تپه است که از محاسبه میانگین بزرگنمایی نقاط یال تپه در هر بازه پریودی حاصل می‌گردد. به هنگام محاسبه بزرگنمایی متوسط تپه، با توجه به آنکه رویکرد مهندسی مد نظر بوده است، ضرائب کوچکتر از یک برابر یک منظور گردیدند.

### ۳- تفرق امواج در حوزه زمان

شکل (۴) نمودارهای تغییر مکان محدوده‌ای به طول  $4b$  در اطراف

$0.5$  و  $1.0$  مورد مقایسه قرار داده است.  $\omega$  و  $c_2$  به ترتیب فرکانس زاویه‌ای و سرعت موج برشی محیط را بیان می‌دارند. چنانکه دیده می‌شود، در هر دو حالت امواج مهاجم قائم  $SV$  و  $P$ ، همخوانی مناسبی میان جوابها، در هر دو مؤلفه قائم و افقی تغییر مکان دیده می‌شود. به منظور دسته‌بندی ساده‌تر نتایج مطالعات پارامتریک و همچنین تعمیم آنها به تپه‌های با ابعاد و خواص مکانیکی دیگر، از پارامترهای بدون بعد فرکانس (یا پریود) و زمان بدون بعد  $(T = tc_2/2b)$  استفاده گردید. پریود بدون بعد عکس فرکانس بدون بعد و تعبیر فیزیکی آن، نسبت طول موج مهاجم به پهنای عارضه است. در ادامه این مقاله هرگاه از زمان، فرکانس و پریود سخن به میان آمده، مقادیر بدون بعد نظیر آنها مد نظر بوده است. تغییر مکانهای نمایش داده شده در حوزه زمان به بیشینه دامنه حرکت ورودی نرمالیزه شدند. منحنی‌های بزرگنمایی ارائه شده در حوزه فرکانس نیز نسبت به حرکت میدان آزاد محاسبه گردیدند. بازه پریودی که در تحقیق حاضر مورد توجه قرار گرفته است، با توجه به مشخصات متعارف هندسی و مکانیکی تپه‌ها و همچنین پریودهای مورد علاقه در مسائل مهندسی، امواجی را



شکل ۴- مؤلفه موافق تاریخچه زمانی تغییر مکان برای ضریب پواسون  $0.33$ ؛ در هر نمودار محور افقی موقعیت نقاط در فاصله  $-4b \leq x \leq 4b$  و محور قائم زمان بدون بعد از  $0$  تا  $5$  را نشان می‌دهد.

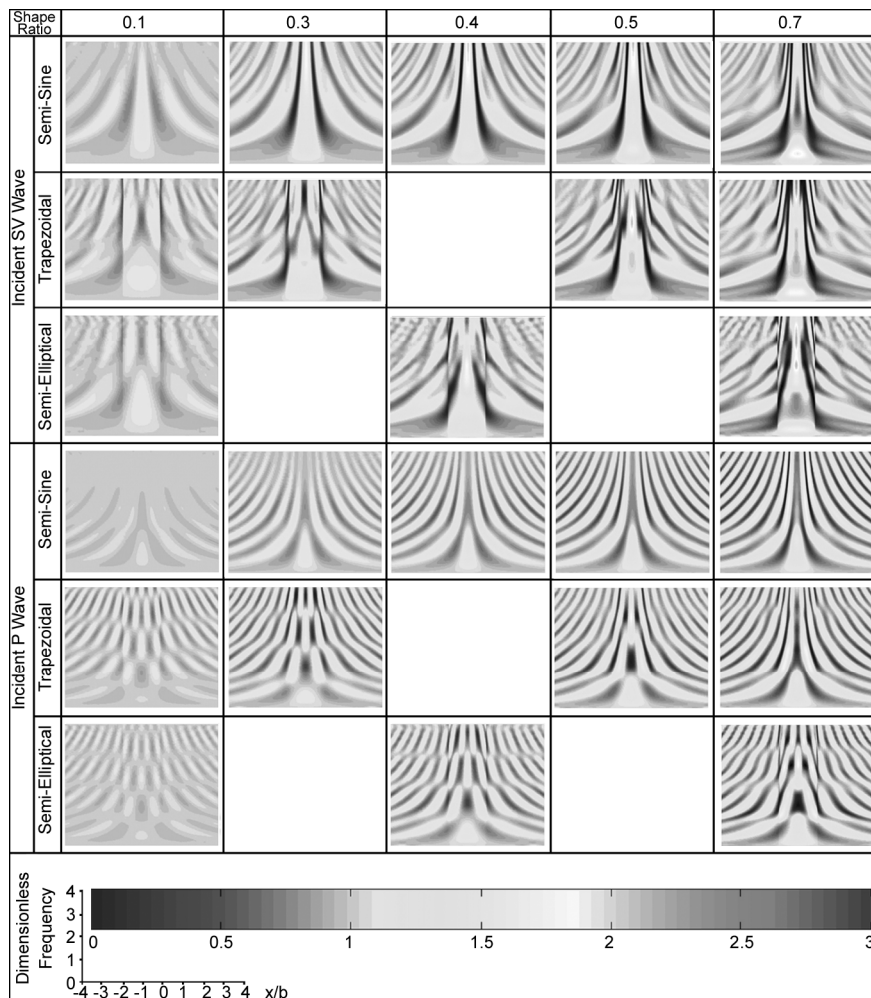
دارد، در قیاس با تپه‌های نیم‌بیضی و ذوزنقه‌ای شکل، همواره دامنه امواج متفرق شده و همچنین مدت زمان حرکت کوچکتری دارد. در صورتیکه نسبت شکل تپه کوچک باشد، تپه ذوزنقه‌ای که مساحت بزرگتری دارد، در قیاس با تپه‌های نیم‌بیضی و نیم‌بیضی، دامنه امواج متفرق شده و همچنین مدت زمان حرکت بزرگتری دارد. در صورتی نیز که نسبت شکل تپه بزرگ باشد، تپه نیم‌بیضی که مساحت بزرگتری دارد، در قیاس با تپه‌های نیم‌بیضی و ذوزنقه‌ای، دامنه امواج متفرق شده و همچنین مدت زمان حرکت بزرگتری دارد.

#### ۴- بزرگنمایی تپه در فضای فرکانس ۴-۱- کلیات

شکل (۵) نمودارهای بزرگنمایی افقی و قائم امواج مهاجم  $SV$  و  $P$  توسط نواری به عرض  $4b$  از مرکز عارضه را بر حسب شکل تپه و نسبت شکل آن دسته‌بندی کرده است. ضریب پواسون محیط برابر  $0/33$  است. چنانکه مشاهده می‌شود، الگوی تغییرات

مرکز تپه را برای مؤلفه‌های موافق حرکت ورودی، به ازاء امواج مهاجم  $SV$  و  $P$ ، ضریب پواسون  $0/33$  و کلیه نسبت‌های شکل نشان داده است. چنانکه دیده می‌شود، تغییر شکل تپه، کلیات الگوی تفرق امواج مهاجم توسط عارضه و انتشار آنها در محیط را تغییر نمی‌دهد. شکل تپه هر چه باشد، امواجی که توسط عارضه متفرق می‌گردند، امواج انعکاس یافته، امواج تبدیل مد یافته، امواج پراشیده شده و امواج تداخلی سطحی هستند. صرف‌نظر از شکل تپه، مجموعه امواج مهاجم و متفرق شده در داخل تپه تداخل نموده و جابجایی متنوع نقاط روی عارضه را ایجاد می‌نمایند. همچنین در هر سه نوع شکل مورد مطالعه، افزایش نسبت شکل، دامنه امواج متفرق شده و همچنین مدت زمان کل حرکت را افزایش می‌دهد.

با این حال همانطور که در شکل (۴) دیده می‌شود، دامنه امواج متفرق شده و همچنین مدت زمان کل حرکت، نه تنها از شکل تپه متأثر، بلکه میزان این تأثر تابع مساحت و نتیجتاً نسبت شکل عارضه است. تپه نیم‌بیضی که مساحت کمتری



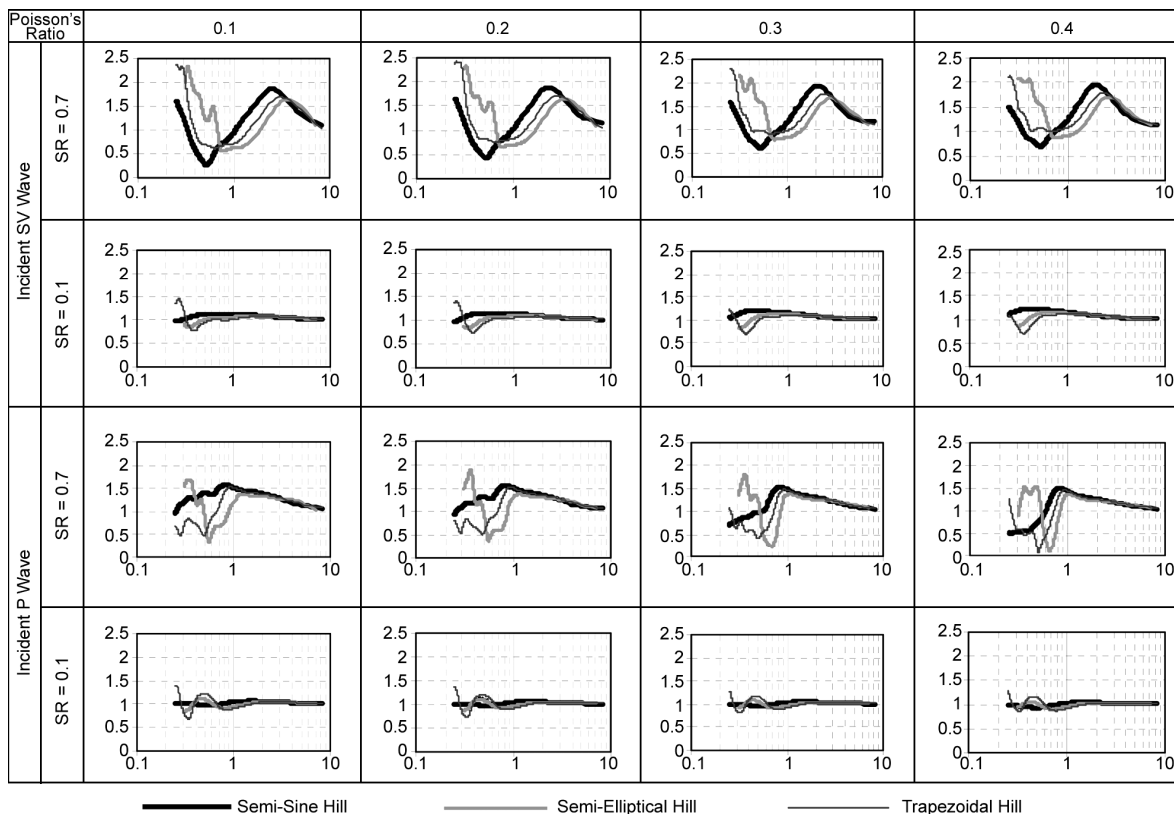
شکل ۵- مؤلفه موافق بزرگنمایی برای ضریب پواسون  $0/33$ ؛ در هر نمودار محور افقی موقعیت نقاط در فاصله  $-4b \leq x \leq 4b$  و محور قائم فرکانس بدون بعد از  $0$  تا  $4$  را نشان می‌دهد.

#### ۴-۲- بزرگنمایی تاج تپه

شکل (۶) منحنی‌های بزرگنمایی تاج تپه‌های با اشکال مختلف را بر حسب نسبت شکل و ضریب پواسون دسته‌بندی کرده است. چنانکه دیده می‌شود، در حالت موج مهاجم  $SV$ ، تغییر شکل تپه، کلیات رفتاری نقطه تاج را تغییر نمی‌دهد. برای هر سه شکل از تپه‌ها، منحنی بزرگنمایی تاج علاوه بر پیوند مشخصه، پیوند تشدید دومی را نیز در گروه پیوندهای بسیار کوتاه دارا می‌باشد که توسط پیوند تضعیفی از آن جدا شده است. همچنین شکل تپه هر چه باشد، کاهش نسبت شکل، پیوند مشخه را کاهش، پیوند تشدید دوم را افزایش و بزرگنمایی نظیر آنها را کاهش می‌دهد. با این حال همانطور که در شکل (۶) دیده می‌شود، در حالت موج مهاجم  $SV$ ، جزئیات رفتاری تاج تپه کاملاً از شکل آن متأثر و البته میزان این تأثیر تابع پیوند موج مهاجم است. در صورتیکه پیوند موج مهاجم از پیوند مشخصه تپه بزرگتر باشد، اثر شکل تپه بر منحنی بزرگنمایی تاج عملاً غیرقابل توجه است. در صورتیکه پیوند موج مهاجم مساوی یا کوچکتر از پیوند مشخصه تپه باشد، اثر شکل تپه کاملاً قابل توجه است. تپه‌های نیم‌سینوسی که مساحت کمتری دارند، پیوند مشخصه کوچکتر و بزرگنمایی نظیر بزرگتری دارند. تپه‌هایی که مساحت بینابینی دارند، منحنی بزرگنمایی بینابینی را دارا هستند. در صورتیکه نسبت شکل تپه‌ها برابر

بزرگنمایی نقاط روی و خارج از عارضه، صرفنظر از نوع موج مهاجم، به ازای تمامی اشکال تپه، مشابه و تناوبی از بزرگنمایی و کوچکنمایی است، با این تفاوت که محدوده فرکانسی متأثر از امواج مهاجم  $SV$  وسیع‌تر و پتانسیل بزرگنمایی آن بیشتر است. برای هر سه شکل مطالعه شده، تپه در برابر تابش هر یک از امواج مهاجم  $SV$  و  $P$  فرکانس (یا پیوند) مشخصه‌ای دارد که به ازای آن، تمامی نقاط روی تپه دارای ضریب بزرگنمایی بزرگتر از یک و حرکت هم‌فاز هستند. همچنین شکل تپه هر چه باشد، افزایش نسبت شکل، تأثیر پاسخ لرزه‌ای نقاط مختلف را از وجود عارضه بیشتر، و افزایش پیوند موج مهاجم نسبت به پیوند مشخصه، پاسخ لرزه‌ای نقاط مختلف را به حرکت آزاد زمین نزدیکتر خواهد ساخت.

با این حال همانطور که شکل (۵) نشان می‌دهد، الگوی تغییرات بزرگنمایی نقاط روی و خارج از تپه، از شکل تپه نیز متأثر است. نمودار بزرگنمایی تپه نیم‌سینوسی به ازاء تمامی نسبت‌های شکل، در قیاس با تپه‌های نیم‌بیضی و دوزنقه‌ای شکل، رفتاری هموارتر و تناوب بزرگنمایی و کوچکنمایی کمتری دارد. در صورتیکه نسبت شکل تپه کوچک یا بزرگ باشد، تپه‌های دوزنقه‌ای شکل و نیم‌بیضی که به ترتیب بیشترین مساحت را دارا هستند، بیشترین وابستگی فرکانسی را نیز دارا می‌باشند.



شکل ۶- اثر شکل تپه بر منحنی‌های بزرگنمایی تاج، محور افقی بر حسب پیوند بدون بعد می‌باشد.

بزرگنمایی تپه را افزایش می‌دهد و میزان بزرگنمایی تابع طول موج مهاجم و در امتداد یال متغیر است. همچنین شکل تپه هر چه باشد، در صورتیکه طول موج مهاجم بلند و بزرگتر باشد، بزرگنمایی نقاط مختلف با نسبت شکل افزایش و از تاج به سمت کناره‌ها کاهش می‌یابد. در صورتیکه طول موج مهاجم متوسط باشد، بزرگنمایی نقاط یال نه تنها کماکان از تاج به سمت کناره‌ها کاهش می‌یابد، بلکه کناره‌های تپه به جای بزرگنمایی کوچک‌نمایی را تجربه می‌کنند. در صورتیکه طول موج مهاجم کوتاه و کوچکتر باشد، منحنی تغییرات بزرگنمایی یال شاهد نقاط فراز و فرود بیشتری خواهد بود و بیشینه بزرگنمایی هر نقطه لزوماً به ازای نسبت شکل بیشینه حاصل نخواهد شد.

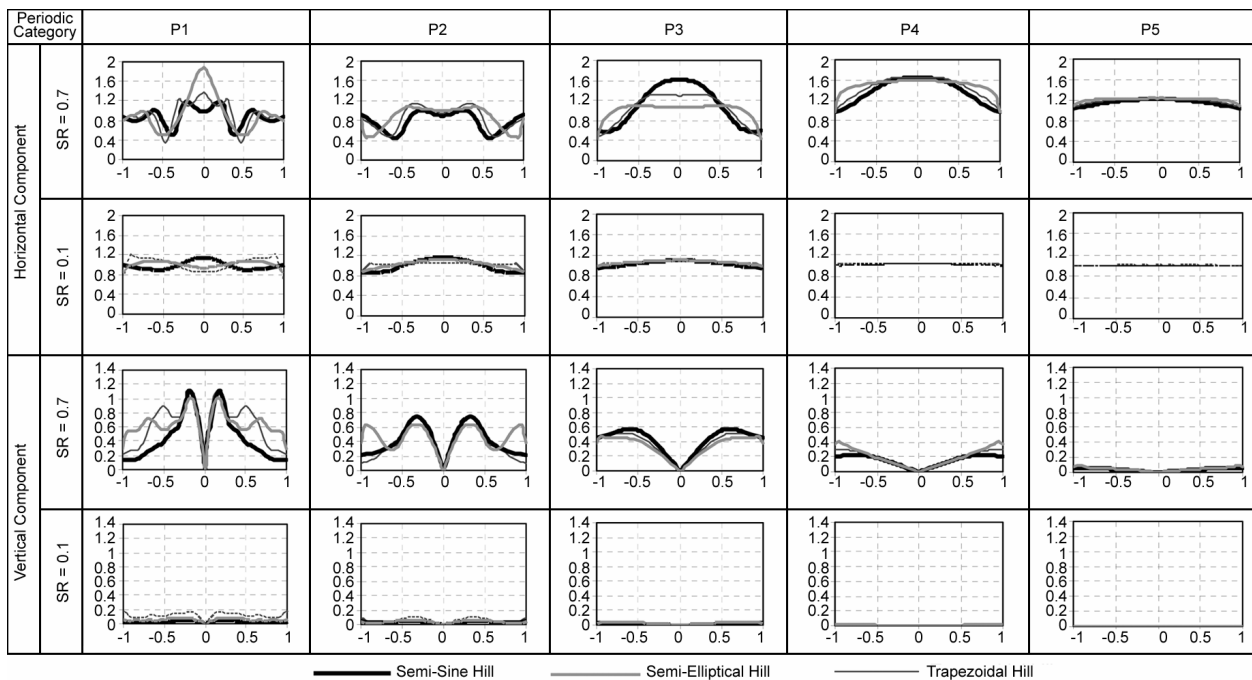
با این حال همانطور که در شکل (۷) دیده می‌شود، در حالت موج مهاجم  $SV$ ، جزئیات رفتاری یال کاملاً از شکل آن متأثر و بنا بر انتظار، میزان این تأثیر تابع پریود موج مهاجم است. در محدوده طول موج‌های بلند و بزرگتر، که پریود موج مهاجم از پریود مشخصه تپه بزرگتر است، اثر شکل تپه بر بزرگنمایی یال اندک و در داخل هسته مرکزی آن (با طول  $b/2$  در اطراف تاج) عملاً غیرقابل توجه است. یال تپه‌های نیم‌بیضی یا دوزنقه‌ای شکل که مساحت بزرگتری دارند، خصوصاً در خارج از هسته مرکزی، اینگونه امواج را بیش از تپه نیم‌سینوسی تقویت می‌کنند. اما در محدوده طول موج‌های متوسط و کوچکتر، که پریود موج مهاجم از پریود مشخصه تپه کوچکتر است، اثر شکل

باشد، تپه نیم‌بیضی که مساحتی بینابین دارد، رفتاری بینابین تپه‌های نیم‌سینوسی و دوزنقه‌ای شکل خواهد داشت. در صورتی نیز که نسبت شکل تپه‌ها برابر  $0.7$  باشد، تپه دوزنقه‌ای شکل که مساحتی بینابین دارد، رفتاری بینابین تپه‌های نیم‌سینوسی و نیم‌بیضی خواهد داشت. با افزایش نسبت شکل تپه، اثر شکل آن بر بزرگنمایی تاج افزایش و حوزه تأثیر آن به محدوده پریودهای بزرگتر گسترش می‌یابد.

شکل (۶) منحنی‌های بزرگنمایی تاج تپه‌های با اشکال مختلف در حالت موج مهاجم  $P$  را نیز مورد بررسی قرار داده است. چنانکه مشاهده می‌شود، منحنی‌های بزرگنمایی تاج تپه در دو حالت امواج مهاجم  $SV$  و  $P$  الگوی رفتاری مشابهی دارند، با این تفاوت که بزرگنمایی موج  $P$  توسط تاج تپه نسبت به موج  $SV$  کمتر است.

#### ۴-۳- تغییرات بزرگنمایی بر روی یال تپه

اگرچه بر اساس شکل (۵) کلیات رفتاری دیگر نقاط تپه با تاج آن مشابه است، اما بررسی دقیق‌تر اثر شکل تپه بر رفتار لرزه‌ای دیگر نقاط آن مستلزم مقیاسی کوچکتر است. شکل (۷) منحنی‌های تغییرات مؤلفه موافق بزرگنمایی بر روی یال تپه‌های مختلف را در حالت موج مهاجم  $SV$ ، بر حسب طول موج مهاجم و نسبت شکل دسته‌بندی کرده است. چنانکه دیده می‌شود، تغییر شکل تپه، کلیات رفتاری نقاط واقع بر روی یال را تغییر نمی‌دهد. شکل تپه هر چه باشد، افزایش نسبت شکل پتانسیل



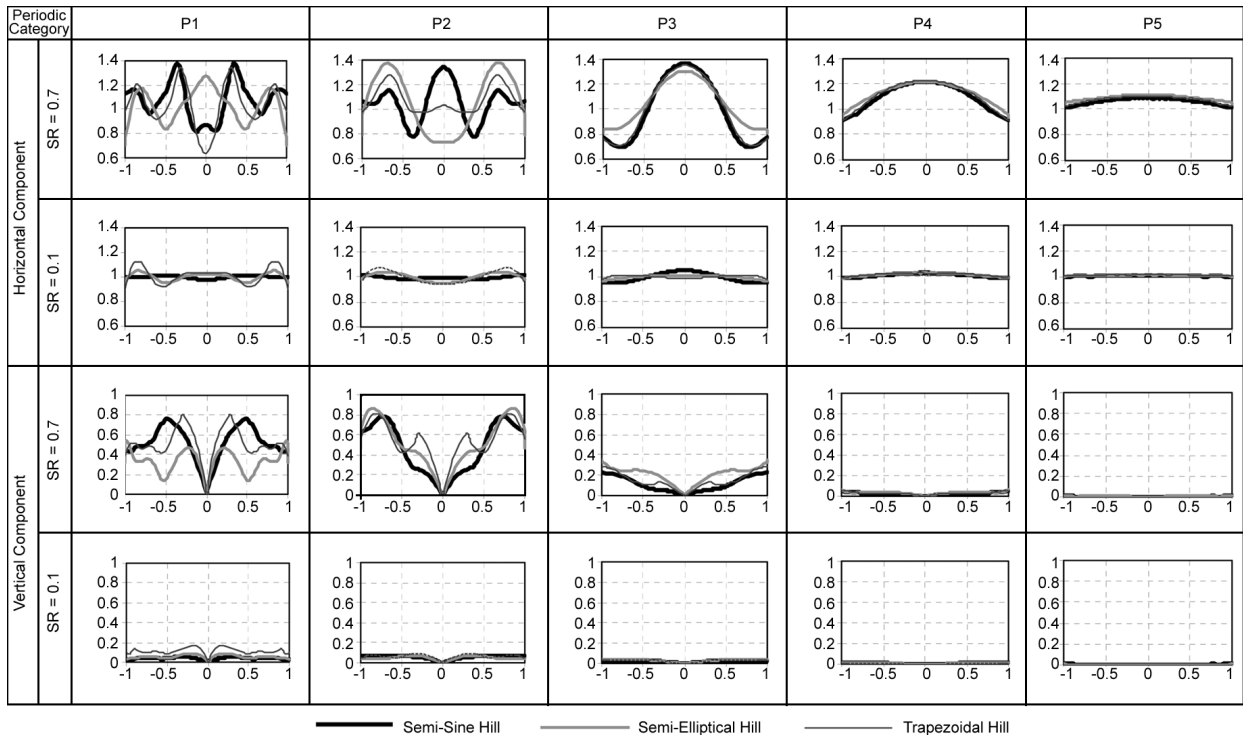
شکل ۷- اثر شکل تپه بر بزرگنمایی یال در حالت موج مهاجم  $SV$ ، در هر نمودار محور افقی موقعیت نقاط در فاصله  $-b \leq x \leq b$  و محور قائم بزرگنمایی را نشان می‌دهد.

تپه کاملاً قابل توجه است. در محدوده طول موج‌های متوسط، بزرگنمایی نقاط داخل و خارج هسته مرکزی تپه نیم‌سینوسی که مساحت کمتری دارد، در مقایسه با دیگر اشکال تپه‌ها، به ترتیب بزرگتر و کوچکتر است. یال تپه‌هایی که مساحت بینابینی دارند، منحنی بزرگنمایی بینابینی را نیز دارا هستند. در صورتیکه نسبت شکل تپه‌ها برابر  $0/1$  باشد، یال تپه نیم‌بیضی که مساحتی بینابین دارد، رفتاری بینابین تپه‌های نیم‌سینوسی و دوزنقه‌ای شکل خواهد داشت. در صورتیکه نسبت شکل تپه‌ها برابر  $0/7$  باشد، نیز یال تپه دوزنقه‌ای شکل که مساحتی بینابین دارد، رفتاری بینابین تپه‌های نیم‌سینوسی و نیم‌بیضی خواهد داشت. همانطور که انتظار می‌رود، هر قدر طول موج مهاجم کوچکتر و فاصله پریود آن از پریود مشخصه تپه بیشتر شود، اثر موضعی انحناء و شکستگی‌های یال بر پاسخ لرزه‌ای آن پررنگ‌تر خواهد شد. افزایش نسبت شکل تپه، اثر شکل آن را بر بزرگنمایی یال افزایش و حوزه تأثیر آن را به محدوده پریودهای بزرگتر گسترش می‌دهد.

شکل (۷) منحنی‌های تغییرات مؤلفه مخالف بزرگنمایی را نیز بر روی یال تپه‌های مختلف در حالت موج مهاجم  $SV$ ، بر حسب طول موج مهاجم و نسبت شکل دسته‌بندی کرده است. چنانکه دیده می‌شود، تغییر شکل تپه، کلیات رفتاری نقاط واقع بر روی یال را تغییر نمی‌دهد. شکل تپه هر چه باشد، با حرکت از تاج تپه به سمت کناره‌ها، صرفنظر از نسبت شکل و طول موج مهاجم، بزرگنمایی از صفر تا مقدار بیشینه خود افزایش و

سپس همراه برخی نوسانات کاهش می‌یابد. همچنین شکل تپه هر چه باشد، با کاهش نسبت شکل و نیز افزایش طول موج مهاجم نسبت به امواج کوتاه، بزرگنمایی نقاط مختلف تپه کاهش می‌یابد. با این حال همانطور که شکل نشان می‌دهد، جزئیات رفتاری یال تپه کاملاً از شکل آن متأثر و میزان این تأثیر تابع پریود موج مهاجم است. در محدوده طول موج‌های بلند و بزرگتر، که پریود موج مهاجم از پریود مشخصه تپه بزرگتر است، اثر شکل تپه بر بزرگنمایی یال اندک است. یال تپه‌های نیم‌بیضی یا دوزنقه‌ای شکل که مساحت بزرگتری دارند، اینگونه امواج را بیش از تپه نیم‌سینوسی تقویت می‌کنند. اما در محدوده طول موج‌های متوسط و کوچکتر، که پریود موج مهاجم از پریود مشخصه تپه کوچکتر است، اثر شکل تپه کاملاً قابل توجه است. بزرگنمایی یال تپه‌های نیم‌سینوسی که مساحت کمتری دارند، در مقایسه با دیگر اشکال تپه‌ها، در محدوده طول موج‌های متوسط بزرگتر است. یال تپه‌هایی که مساحت بینابینی دارند، خصوصاً منحنی بزرگنمایی بینابینی را نیز دارا هستند. همانطور که انتظار می‌رود، هر قدر طول موج مهاجم کوچکتر و فاصله پریود آن از پریود مشخصه تپه بیشتر شود، اثر موضعی انحناء و شکستگی‌های یال بر پاسخ لرزه‌ای آن پررنگ‌تر خواهد شد. افزایش نسبت شکل تپه، اثر شکل آن را بر بزرگنمایی یال افزایش و حوزه تأثیر آن را به محدوده پریودهای بزرگتر گسترش می‌دهد.

شکل (۸) منحنی‌های تغییرات هر دو مؤلفه بزرگنمایی بر



شکل ۸- اثر شکل تپه بر بزرگنمایی یال در حالت موج مهاجم  $P$ ، در هر نمودار محور افقی موقعیت نقاط در فاصله  $-b \leq x \leq b$  و محور قائم بزرگنمایی را نشان می‌دهد.



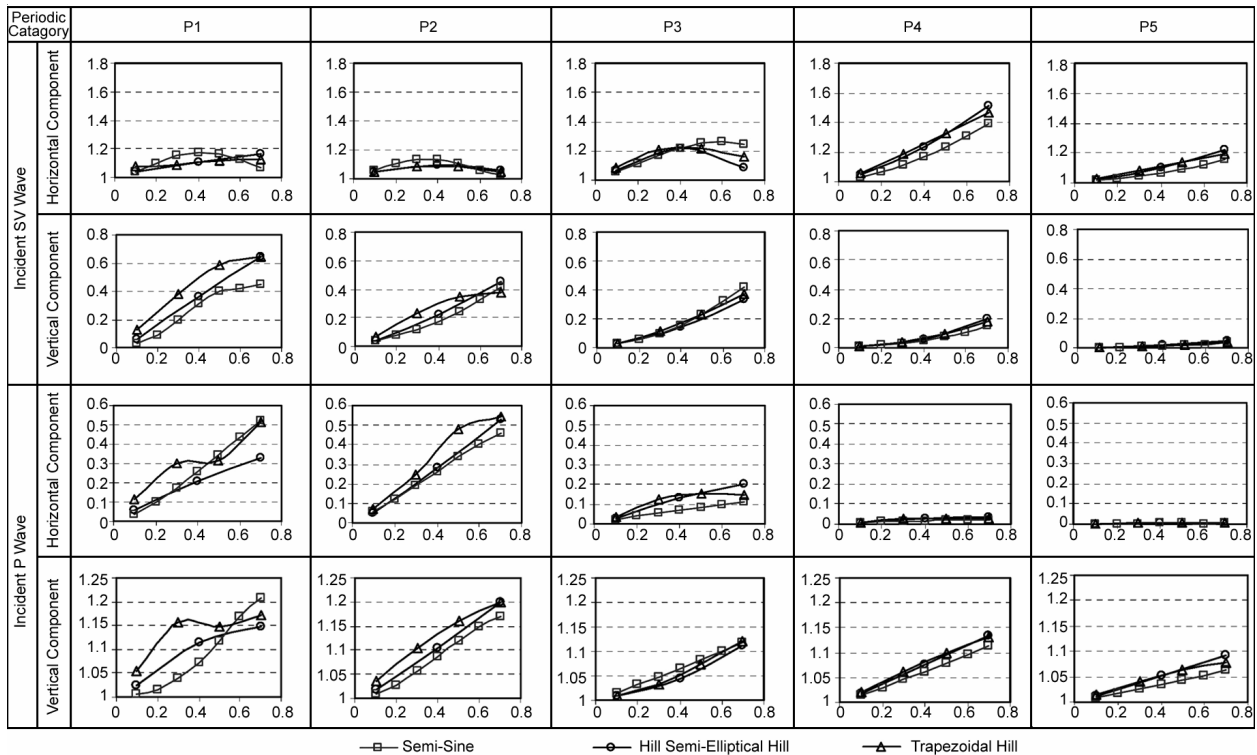
پریود موج مهاجم  $P$ ، بر حسب طول موج مهاجم و نسبت شکل دسته‌بندی کرده است. مقایسه اشکال (Y) و (۸) بیانگر آن است که اثر شکل تپه بر پاسخ لرزه‌ای نقاط مختلف یال در هر دو حالت امواج مهاجم  $P$  و  $SV$  مشابه است.

**۴-۴- بزرگنمایی متوسط تپه**

شکل (۹) منحنی تغییرات مؤلفه‌های موافق و مخالف بزرگنمایی متوسط تپه‌های گوناگون با نسبت شکل را بر حسب طول موج مهاجم دسته‌بندی کرده است. همانطور که در شکل (Y) نیز دیده شد، در حالت موج مهاجم  $SV$ ، تغییر شکل تپه، کلیات رفتار میانگین تپه را تغییر نمی‌دهد. شکل تپه هر چه باشد، مؤلفه موافق بزرگنمایی متوسط تپه در برابر امواج بلند و بزرگتر، همگام با نسبت شکل افزایش می‌یابد. در صورتیکه امواج مهاجم کوچکتر باشند، بیشترین بزرگنمایی مؤلفه موافق از آن تپه‌های با نسبت شکل میانه خواهد بود. همچنین شکل تپه هر چه باشد، مؤلفه مخالف بزرگنمایی متوسط تپه صرفنظر از طول موج مهاجم، همگام با نسبت شکل افزایش می‌یابد.

با این حال همانطور که شکل (۹) نشان می‌دهد، در حالت موج مهاجم  $SV$ ، جزئیات رفتار میانگین تپه نیز کاملاً از شکل آن متأثر و البته همانند تاج و یال، میزان این تأثیر تابع پریود موج مهاجم است. در محدوده طول موجهای بلند و بزرگتر، که

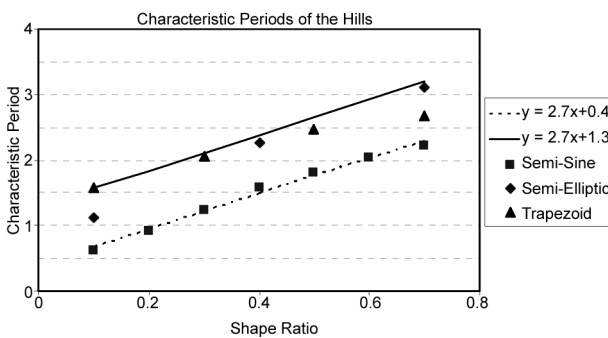
شکل (۹) منحنی تغییرات مؤلفه‌های موافق و مخالف بزرگنمایی متوسط تپه‌های گوناگون با نسبت شکل را بر حسب طول موج مهاجم دسته‌بندی کرده است. همانطور که در شکل (Y) نیز دیده شد، در حالت موج مهاجم  $SV$ ، تغییر شکل تپه، کلیات رفتار میانگین تپه را تغییر نمی‌دهد. شکل تپه هر چه باشد، مؤلفه موافق بزرگنمایی متوسط تپه در برابر امواج بلند و بزرگتر، همگام با نسبت شکل افزایش می‌یابد. در صورتیکه امواج مهاجم کوچکتر باشند، بیشترین بزرگنمایی مؤلفه موافق از آن تپه‌های با نسبت شکل میانه خواهد بود. همچنین شکل تپه هر چه باشد، مؤلفه مخالف بزرگنمایی متوسط تپه صرفنظر از طول موج مهاجم، همگام با نسبت شکل افزایش می‌یابد.



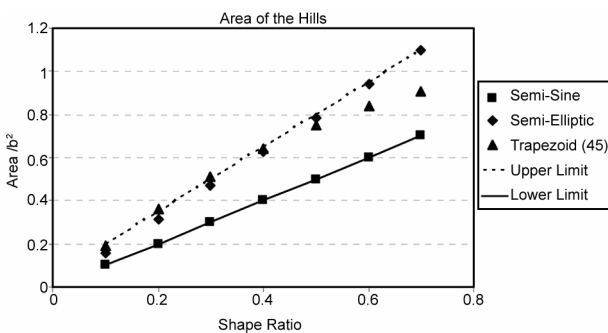
شکل ۹- اثر شکل تپه بر بزرگنمایی متوسط تپه، در هر نمودار محور افقی نسبت شکل و محور قائم بزرگنمایی تپه را نشان می‌دهد.

نیز سطح مقطع تپه‌های سه‌گانه را به ازاء نسبت‌های شکل مختلف با یکدیگر مقایسه کرده است. چنانکه دیده می‌شود، تپه‌های نیم-سینوسی که سطح مقطع کمتری دارند، کمترین مقادیر پریود مشخصه را نیز دارا هستند. در صورتیکه نسبت شکل برابر  $0.4$  باشد، سطح مقطع و پریود مشخصه تپه‌های نیم‌بیضی و دوزنقه‌ای شکل با یکدیگر برابر هستند. در صورتیکه نسبت شکل کوچکتر یا بزرگتر از این مقدار باشد، سطح مقطع و پریود مشخصه تپه نیم-بیضی در قیاس با تپه دوزنقه‌ای شکل، به ترتیب کوچکتر یا بزرگتر است. بررسی اشکال اخیر الهام‌بخش این معنا است که می‌توان با قیاس مساحتها، پریود مشخصه تپه‌ای با شکل دلخواه، اما دارای نسبت شکل معین را توسط رابطه ساده خطی زیر، بر حسب پریود مشخصه تپه‌ای نیم‌سینوسی با همان نسبت شکل برآورد نمود:

$$T_c(SR) = T_c^{Sin}(SR) + (T_c^{max}(SR) - T_c^{Sin}(SR)) \times \frac{(S(SR, b) - S^{Sin}(SR, b))}{(S^{max}(SR, b) - S^{Sin}(SR, b))} \quad (2)$$



شکل ۱۰- اثر شکل تپه بر پریود مشخصه.



شکل ۱۱- تغییرات سطح مقطع تپه‌های سه‌گانه با نسبت شکل.

در رابطه (۲)  $SR$ ،  $S$  و  $T_c$ ، به ترتیب نسبت شکل، سطح مقطع و پریود مشخصه تپه را بیان می‌دارند.  $T_c^{max}$  نمایانگر بیشینه پریود مشخصه تپه‌های سه‌گانه به ازای نسبت شکل معین ( $SR$ ) است.  $S^{max}$  نیز نمایانگر بیشینه سطح مقطع تپه‌های سه‌گانه است که از نیم‌پهنا ( $b$ ) و نسبت شکل ( $SR$ ) یکسانی برخوردار هستند. پارامترهای اخیر که حدود بالای پریود مشخصه و سطح مقطع تپه‌های سه‌گانه هستند، در اشکال

به محدوده پریودهای بزرگتر گسترش می‌دهد. شکل (۹) منحنی‌های تغییرات مؤلفه‌های موافق و مخالف بزرگنمایی متوسط تپه‌های گوناگون با نسبت شکل را در حالت موج مهاجم  $P$  نیز بر حسب طول موج دسته‌بندی کرده است. چنانکه دیده می‌شود، اثر شکل تپه بر بزرگنمایی متوسط تپه تقریباً با حالت امواج مهاجم  $SV$  مشابه است.

## ۵- کاربردهای مهندسی

دقیقترین روشهای ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای که بر تحلیلهای دینامیکی یک‌بعدی آبرفت متکی هستند، امواج مهاجم را قائم و لایه‌های خاک و سطح فوقانی زمین را افقی فرض می‌کنند. از طرف دیگر امروز متدولوژی‌های متعددی رایج شده است که بر اساس آنها، ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای بر اساس خصوصیات حرکت خفیف زمین صورت می‌گیرد. تخمین ضرائب بزرگنمایی آبرفت بر حسب سرعت موج برشی متوسط  $30$  متر فوقانی و نیز ریزپهنه‌بندی بر اساس نگاشتهای خردلرزه‌ها [۲۲] و انفجارهای هسته‌ای [۲۳]، شواهدی بر این مدعا هستند. بدیهی است که با توجه به افزایش میرایی خاک در زمین‌لرزه‌های قوی، ریز پهنه-بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای بر اساس خصوصیات حرکت خفیف زمین نتایج محافظه‌کارانه در بر خواهد داشت. مشابهت مفروضات تحقیق حاضر با دو فرض اخیر این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان نتایج آن را جهت تدقیق مطالعات ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای مورد استفاده قرار داد. اگرچه روشهای متعارف ریز پهنه‌بندی تنها رفتار زمین و تحقیق حاضر تنها هندسه سطح فوقانی آن را مد نظر قرار داده‌اند، اما ملحوظ نمودن جداگانه این دو اثر با توجه به مقیاس ریزپهنه‌بندی امری توجیه‌پذیر است. بالاخره آنکه نتایج تحقیق حاضر اگرچه قبل از همه در محیطهای همگن چون برخی مناطق شمال تهران، ارومیه و تبریز [۲۴] قابل استفاده هستند، اما با توجه به توضیحات فوق‌الذکر، به محیطهای ناهمگن دارای لایه‌بندی موازی نیز قابل تعمیم می‌باشند. بدیهی است که تدقیق هر چه بیشتر نتایج ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای مستلزم در نظر گرفتن انواع ناهمگنی‌های محیط، مدل‌های رفتاری غیرخطی و نیز زوایای هجوم متناسب با حوزه نزدیک گسل است، که باید در ادامه تحقیقات حاضر مورد توجه قرار گیرد. بنا بر دلایل مهندسی و نیز عرف ریزپهنه‌بندی، در روابط و جداول این بخش تنها امواج برشی مد نظر قرار گرفته است.

## ۵-۱- ریزپهنه‌بندی بر حسب پریود مشخصه

شکل (۱۰) پریودهای مشخصه تپه‌های سه‌گانه را به ازاء نسبت‌های شکل متفاوت با یکدیگر مورد مقایسه قرار داده است. شکل (۱۱)

جدول ۳: مؤلفه قائم بزرگنمایی متوسط تپه برای حالت موج مهاجم SV

نسبت شکل	بازه پرودی	بسیار کوتاه	متوسط	بلند	بسیار بلند
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۰/۱
۰/۴	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۱
۰/۵	۰/۵	۰/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۱
۰/۶	۰/۶	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۱
۰/۷	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۰/۱	۰/۱

سه گانه هستند. همچنین با توجه به اثر ثانوی ضریب پواسون در قیاس با اثر بازه‌های پرودی و نسبت شکل، ضرائب بزرگنمایی ارائه شده از میانگین گیری ضرایب نظیر ضرایب پواسون مختلف بدست آمده است. با استفاده از جداول (۲) و (۳) و با داشتن ابعاد تپه‌های دو بعدی، می‌توان نقشه‌های ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای بر حسب ضرایب تقویت بازه‌های پرودی مختلف را اصلاح نمود.

### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شد که تغییر شکل تپه از نیم‌سینوسی به نیم‌بیضی و دوزنقه، اگرچه کلیات رفتاری آن را در برابر امواج مهاجم قائم SV و P تغییر نمی‌دهد، اما جزئیات رفتاری تاج و دیگر نقاط یال را بسته به طول موج مهاجم و نیز نسبت شکل عارضه، کاملاً متأثر می‌سازد. در محدوده طول موجهای بلند و بزرگتر، که پرید موج مهاجم از پرید مشخصه تپه بزرگتر است، اثر شکل تپه بر بزرگنمایی یال اندک است. در صورتیکه نسبت شکل تپه از حدود ۰/۴ کمتر باشد، مساحت و رفتار لرزه‌ای تپه نیم‌بیضی، بینابین مساحت و رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی و دوزنقه‌ای خواهد بود. در صورتیکه نسبت شکل تپه بزرگتر باشد، مساحت و رفتار لرزه‌ای تپه دوزنقه‌ای، بینابین مساحت و رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی و نیم‌بیضی خواهد بود. در محدوده طول موجهای بسیار کوتاه که فاصله پرید موج مهاجم از پرید مشخصه تپه بیشتر است، تأثیرات موضعی انحنای یال بر رفتار لرزه‌ای آن پررنگتر است. افزایش نسبت شکل تپه، اثر شکل آن را بر بزرگنمایی یال افزایش و حوزه تأثیر آن را به محدوده پریدهای بزرگتر گسترش می‌دهد. در خاتمه مقاله رابطه و جداولی ارائه شده‌اند که می‌توانند با برآورد پرید مشخصه و بزرگنمایی متوسط تپه‌ای با شکل دلخواه، در تدقیق مطالعات ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

### مراجع

1. Bouchon, M. (1973). "Effect of Topography on Surface Motion", Bull. Seism. Soc. Am., 63, 615-632.
2. International Council of Building Officials (ICBO) (1997). Uniform Building Code.

(۱۰) و (۱۱) به صورت توابع زیر نشان داده شده‌اند:

$$T_c^{max}(SR) = 2.7 \cdot SR + 1.3 \quad (3)$$

$$S^{max}(SR, b) = (1.5 \cdot SR + 0.05) \cdot b^2 \quad (4)$$

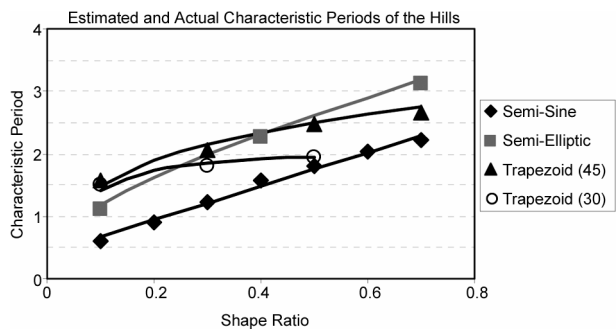
در صورتیکه پرید مشخصه تپه نیم‌سینوسی با رابطه تقریبی نظیر حد پایین شکل (۱۰) بیان گردد:

$$T_c^{Sin}(SR) = 2.7 \cdot SR + 0.4 \quad (5)$$

همچنین اگر روابط (۳) تا (۵) در رابطه (۲) قرار گیرند، رابطه تقریبی زیر جهت برآورد پرید مشخصه یک تپه دلخواه با نسبت شکل (SR) بدست خواهد آمد:

$$T_c(SR) = (2.7 \cdot SR + 0.4) + 18 \cdot \frac{(S(SR, b) - SR \cdot b^2)}{(10 \cdot SR + 1) \cdot b^2} \quad (6)$$

شکل (۱۲) دقت رابطه (۶) را در برآورد پرید مشخصه تپه‌های نیم‌سینوسی، نیم‌بیضی و دوزنقه‌ای شکل با زوایای یال ۳۰ و ۴۵ درجه نشان داده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، رابطه پیشنهاد شده از دقت مناسبی برخوردار است و به راحتی می‌تواند در تهیه نقشه‌های ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای بر حسب پرید طبیعی آبرفت مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۲- مقایسه پریدهای مشخصه تخمین زده شده توسط رابطه ۶ (خطوط پیوسته) با مقادیر واقعی.

### ۵-۲- ریز پهنه‌بندی بر حسب بزرگنمایی متوسط تپه

جداول (۲) و (۳) میانگین ضرایب بزرگنمایی مؤلفه‌های افقی و قائم تپه‌ای با شکل دلخواه را برای موج مهاجم قائم SV، بر حسب بازه‌های پرودی و نسبت شکل بیان کرده است. ضرائب بزرگنمایی ارائه شده، میانگین ضرائب بزرگنمایی به دست آمده نظیر تپه‌های

جدول ۴: مؤلفه افقی بزرگنمایی متوسط تپه برای حالت موج مهاجم SV

نسبت شکل	بازه پرودی	بسیار کوتاه	متوسط	بلند	بسیار بلند
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۱
۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۱
۰/۴	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۲	۰/۱
۰/۵	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۳	۰/۲
۰/۶	۰/۲	۰/۱	۰/۳	۰/۴	۰/۲
۰/۷	۰/۱	۰/۱	۰/۲	۰/۵	۰/۲

۱۵. کمالیان، محسن و سهرابی‌بیدار، عبدالله (۱۳۸۴). "تحلیل دینامیکی عوارض توپوگرافی دوبعدی در حوزه زمان با استفاده از روش اجزای مرزی"، نشریه علمی پژوهشی استقلال، ۲۴(۲)، ۵۱-۶۸.
۱۶. کمالیان، محسن (۱۳۸۰). "تحلیل دینامیکی محیط متخلخل اشباع ارتجاعی خمیری در فضای زمان با استفاده از ترکیب روشهای اجزاء محدود و عناصر مرزی"، رساله دکترا، دانشگاه تهران.
17. Kamalian, M., Jafari, M.K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., and Gatmiri, B. (2006). "Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Non-Homogeneous Topographic Structures by a Hybrid FE / BE Method", *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, **26**, 753-765
18. Kamalian, M., Jafari, M.K., Dehghan, K., Sohrabi-Bidar, A., and Razmkhah, A. (2003). "Two-Dimensional Hybrid Response Analysis of Trapezoidal Shaped Hills in Time Domain", *Advances in Boundary Element Techniques IV*, Ed. R. Gallego, and M.H. Aliabadi, 231-236.
19. Wong, H.L. (1982). "Effects of Surface Topography on the Diffraction of P, SV and Rayleigh Waves", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **72**, 1167-1183
20. Dravinski, M. and Mossessian, T.K. (1987). "Scattering of Plane Harmonic P, SV, and Rayleigh Waves by Dipping Layers of Arbitrary Shape", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **77**, 212-235.
21. Mossessian, T.K. and Dravinski, M. (1987). "Application of a Hybrid Method for Scattering of P, SV, and Rayleigh Waves by Near-Surface Irregularities", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **77**, 1784-1803.
22. The Technical Committee for Earthquake Geotechnical Eng. (TC4) (1993). "Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard", The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Eng.
23. Rogers, A.M., Borchardt, R.D., Covington, P.A., and Perkins, D.M. (1984). "A Comparative Ground Motion Study Near Los Angeles Using Recordings of Nevada Nuclear Tests and the 1971 San Fernando Earthquake", *Bull. Seism. Soc. Am.*, **74**, 1925-1949.
۲۴. رحیمیان، محمد و همکاران (۱۳۸۲). "تأثیر رفتار توپوگرافی در مقابل زلزله در چند شهر مجاور کوه"، گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، کمیته فرعی تخصصی مقابله با خطرات ناشی از زلزله و لغزش لایه‌های زمین، کمیته ملی کاهش اثرات بلایای طبیعی کشور.
3. Building Seismic Safety Council (BSSC) (2003). Edition, The NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 1: Provisions (FEMA 368).
4. International Council of Building Officials (ICBO), 2003. International Building Code.
5. Geli, L., Bard, P.V., and Julien, B. (1988). "The Effect of Topography on Earthquake Ground Motion: A Review and New Results", *Bull. Seism. Soc. Am.*, **78**, 42-63.
6. Sanchez-Sesma, F.J. and Campillo, M. (1991). "Diffraction of P, SV and Rayleigh Waves by Topographic Features: A Boundary Integral Formulation", *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 2234-2253.
7. Sanchez-Sesma, F.J. and Campillo, M. (1993). "Topographic Effects for Incident P, SV and Rayleigh Waves", *Tectonophysics*, **218**, 113-125.
8. Pedersen, H.A., Sanchez-Sesma, F.J., and Campillo, M. (1994). "Three-Dimensional Scattering by Two-Dimensional Topographies", *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 1169-1183.
9. Sanchez-Sesma, F.J. (1987). "Site Effects on Strong Ground Motion", *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, **6**, 124-132.
10. Moczo, P., Bystricky, E., Kristek, J., Carcione J.M., and Bouchon, M. (1997). "Hybrid Modeling of P-SV Seismic Motion at Inhomogeneous Viscoelastic Topographic Structures", *Bull. Seism. Soc. Am.*, **87**, 1305-1323.
۱۱. کمالیان، محسن، جعفری، محمد کاظم و سهرابی‌بیدار، عبدالله (۱۳۸۳). "رفتار لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی نیم‌سینوسی در برابر امواج مهاجم قائم"، ارائه شده جهت داوری به نشریه استقلال.
۱۲. کمالیان، محسن، جعفری، محمد کاظم، رزم‌خواه، آرش و سهرابی‌بیدار، عبدالله (۱۳۸۳). "الگوی بزرگنمایی امواج مهاجم قائم توسط تپه‌های دو بعدی نیم‌بیضی"، ارائه شده جهت داوری به نشریه امیرکبیر.
۱۳. کمالیان، محسن، جعفری، محمد کاظم، سهرابی‌بیدار، عبدالله، و رزم‌خواه، آرش (۱۳۸۴). "الگوی بزرگنمایی امواج مهاجم قائم توسط تپه‌های دو بعدی دوزنقه‌ای"، مجله فنی و مهندسی مدرس، پذیرفته شده.
14. Kamalian, M., Gatmiri, B., and Sohrabi-Bidar, A. (2003). "On Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures by BEM", *JSEE*, **5**(2), 35-45.