

## رفتار لرزه‌ای تپه‌های دوبعدی نیم‌سینوسی در برابر امواج مهاجم قائم

محسن کمالیان\*، محمدکاظم جعفری\*\* و عبدالله سهرابی بیدار\*\*\*

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

(دریافت مقاله: ۸۳/۲/۲۱ - دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۱/۲۷)

**چکیده** - اگرچه هندسه و مشخصات مکانیکی تپه دوبعدی نیم‌سینوسی از عوامل تعیین کننده پاسخ لرزه‌ای این نوع ساختگاه به‌شمار می‌روند، اما هنوز مطالعه جامعی بر روی حساسیت پاسخ یاد شده به عوامل فوق‌الذکر و همچنین طول امواج مهاجم در ادبیات فنی ثبت نشده است. این مقاله حساسیت پاسخ لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی را در برابر هندسه و مشخصات مکانیکی آن و نیز طول امواج مهاجم درون صفحه‌ای قائم P و SV مورد بررسی قرار داده است. شکل‌های ارائه شده در فضای زمان، به خوبی تفرق فازهای مختلف شامل امواج طولی، عرضی و سطحی را نشان داده است. شکل‌های ارائه شده در فضای تبدیل یافته نیز به روشنی وابستگی بزرگنمایی نقاط مختلف تپه مزبور به پارامترهای فوق‌الذکر را تبیین کرده است. در خاتمه رابطه و جداولی ارائه شده‌اند که می‌توانند، با برآورد پارامترهایی چون پرپود مشخصه و بزرگنمایی متوسط تپه دوبعدی نیم‌سینوسی، در تکمیل و تدقیق مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای به کار گرفته شوند.

واژگان کلیدی: تپه نیم‌سینوسی، اثرات ساختگاه، توپوگرافی، تفرق، بزرگنمایی، پرپود مشخصه، ریزپهنه‌بندی.

## Seismic Behavior of 2D Semi-Sine Shaped Hills against Vertically Propagating Incident Waves

M. Kamalian, M.K. Jafari and A. Sohrabi-Bidar

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

**Abstract:** This paper presents the preliminary results of an extensive parametric study on seismic response of two-dimensional semi-sine shaped hills to vertically propagating incident P- and SV-waves. Clear perspectives of the induced diffraction and amplification patterns are given by investigation of time-domain and frequency-domain responses. It is shown that site geometry, wave characteristics, and material parameters are the key parameters governing the hill's response. Simple formula and some tables are proposed for estimating the characteristic site period and also the average amplification potential of semi-sine shaped hills, which could be easily applied in site effect microzonation studies of topographic areas.

\*\*\* - دانشجوی دکترا

\*\* - دانشیار

\* - استادیار

**Keywords:** *Semi-sine shaped hill, Site effects, Topography, Diffraction, Amplification, Characteristic period, Microzonation.*

## فهرست علائم

زمان نظیر دامنه حداکثر موج ریکر	$t_0$	نیم‌پهنای تپه	b
پریود مشخصه تپه	$T_{2D}$	سرعت موج برشی	c2
متغیر مکان	x	فرکانس غالب موج ریکر	fp
طول موج	$\lambda$	تابع موج ریکر	f(t)
تابع تپه نیم‌سینوسی	$\xi(x)$	ارتفاع تپه	h
عدد پی	$\pi$	موج طولی	P
زمان بدون بعد	$\tau$	موج برشی خارج صفحه	SH
فرکانس دورانی	$\omega$	موج برشی درون صفحه	SV
فرکانس بدون بعد	$\Omega$	نسبت شکل تپه	SR
		زمان	t

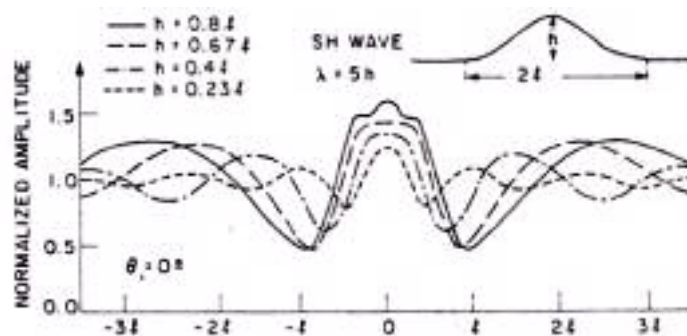
### ۱- مقدمه

دستورالعمل‌های ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای، به بررسی اثرات ساختگاهی یک بعدی بسنده کرده‌اند. سبب اصلی عدم ارزیابی اثرات توپوگرافی در آیین نامه‌ها و دستورالعمل‌های یاد شده، عدم کفایت دانش فنی موجود درباره کمیت و کیفیت تاثیر توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای زمین است. پدیده تفرق امواج توسط عوارض توپوگرافی پدیده‌ای پیچیده است که شناخت هرچه بهتر آن، انجام مطالعات تجربی، عددی و خصوصاً حساسیت سنجی گسترده‌ای را اقتضا می‌کند.

تپه‌های نیم‌سینوسی یکی از معمولترین شکل‌های ناهمواریهای طبیعی سطح زمین هستند. بوجون [۸] اولین کسی بود که به بررسی تاثیر عوارض توپوگرافی سطحی و از جمله تپه‌های نیم‌سینوسی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین پرداخت. اگرچه وی با استفاده از روش آکی-لارنر و در حوزه فرکانس، رفتار این نوع تپه‌ها را در مقابل امواج حجمی SH، SV و P مورد بررسی قرار داد، اما خود اذعان داشت که تحلیل امواج مهاجم SV و P با روش یاد شده، خصوصاً در محدوده فرکانسهای بالا، خطاهای قابل ملاحظه‌ای به همراه دارد. شاید به همین سبب بود که وی تنها به ارائه نتایج مطالعات

در طی سالیان اخیر موارد متعددی از جنبشهای شدید ثبت شده یا خسارات ناشی از زمین‌لرزه اهمیت اثرات توپوگرافی را نشان داده‌اند. تحقیقات محققان گویای آن است که حداقل یکی از اسباب شتابهای بالای ثبت شده در ساختگاههای سد پاکویما (۱/۲۵ g) طی زمین‌لرزه سال ۱۹۷۲ سان‌فرناندو [۱ و ۲] و تپه تارزانا (۱/۷۸ g) طی زمین‌لرزه سال ۱۹۹۴ نورث‌ریج [۳]، تاثیرات توپوگرافی بوده است. مشاهدات ناشی از زمین‌لرزه سال ۱۹۸۳ کولینگا [۴]، زمین‌لرزه سال ۱۹۸۵ شیلی [۵]، زمین‌لرزه سال ۱۹۸۷ سوپرسیشن هیلز [۴]، در کنار برخی مشاهدات حاصل از زمین‌لرزه‌های اخیر یونان [۶ و ۷]، تنها مثالهایی از وقایع فاجعه‌باری‌اند که طی آنها تخریب شدید ساختمانهای واقع بر مناطق مرتفع گزارش شده است.

اگرچه امروزه کاملاً آشکار است که توپوگرافی ساختگاه بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و توزیع خرابیهای ناشی از زمین لرزه، به ویژه هنگامی که ابعاد توپوگرافی (تپه یا دره) در حدود طول موج لرزه‌ای باشد [۸]، تاثیر به‌سزایی دارد؛ با این حال اغلب آیین نامه‌های موجود طراحی مقاوم در برابر زلزله و نیز اکثر

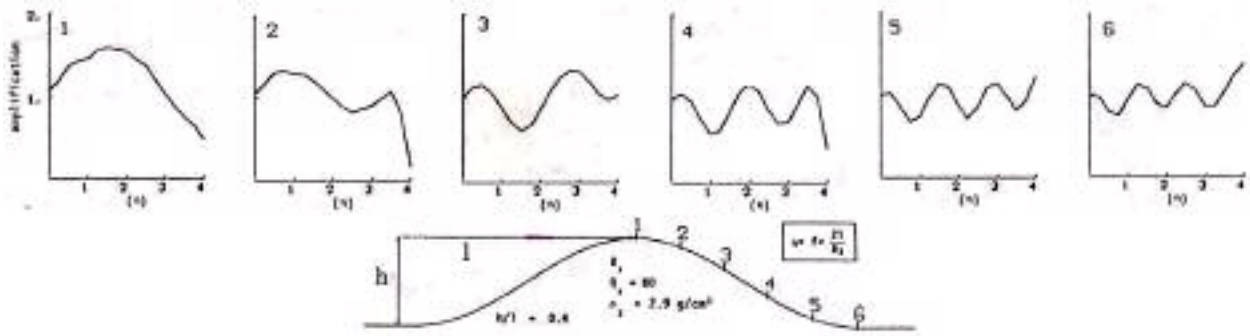


شکل ۱ - دامنه حرکت سطحی ناشی از موج مهاجم SH،  $\lambda = 5h$

قرار داده و با استفاده از روش آکی-لارنر، پاسخ لرزه‌ای این تپه‌ها در برابر امواج مهاجم قائم SH را مورد بررسی قرار دادند. اگرچه مطالعات حساسیت سنجی انجام شده توسط محققان اخیر دارای جهت‌گیری‌هایی غیر از ویژگی‌های هندسی خود عارضه بوده است، اما یافته‌های گردآوری شده و همچنین نتایج کلی به دست آمده توسط آنها حاوی اطلاعات ارزشمندی بود. از جمله یافته‌های گردآوری شده آن بود که در کلیه مطالعات نظری پیشینی که در حوزه زمان انجام گرفت، دو پدیده بزرگنمایی قله‌ها و نیز انتشار امواج تفرق یافته به سمت خارج از عارضه مشاهده شد. یکی دیگر از یافته‌ها آن بود که در حوزه زمان، نسبت ضرایب بزرگنمایی قله به کف تپه معمولاً متناسب با نسبت شکل افزایش یافته و به هر حال در تپه‌های هموار منفرد کمتر از دو باقی می‌ماند. یافته دیگر آن بود که در حوزه فرکانس، به ازای محدوده وسیعی از طول موجهای قابل مقایسه با پهنای عارضه، قله تپه پدیده بزرگنمایی و کف 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 پالهای عارضه را به عنوان بخش دیگری از نتایج مطالعات نظری پیشین مورد اشاره قرار دادند.

حساسیت‌سنجی در وضعیت موج مهاجم SH اکتفا و فرض کرد که امواج مهاجم SV و P نیز وضعیتی مشابه دارند. بر اساس نتایج مطالعات بوچون بر روی امواج SH، بزرگنمایی روی قله و کوچکنمایی بر روی یال تپه، دو پدیده مهم‌اند که در رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیم‌سینوسی شکل، خصوصاً در محدوده طول موجهای قابل مقایسه با ابعاد عارضه و بزرگتر از آن ( $\lambda = 2h$  تا  $\lambda = 20h$ )، قابل مشاهده‌اند. بوچون مطالعات حساسیت سنجی خود را بر روی تپه‌هایی انجام داد که نسبت شکل (نسبت ارتفاع به نیم‌پهنای تپه) آنها از  $0.23$  تا  $0.8$  متغیر بوده است. طول موج مهاجم برابر ( $\lambda = 5h$ ) در نظر گرفته شده بود. بوچون همچنین نتیجه گرفت که با افزایش نسبت شکل تپه، بر بزرگنمایی قله و کوچکنمایی یال تپه و همچنین بر وسعت نواحی بزرگنمایی و کوچکنمایی آن افزوده می‌شود. نتایج مطالعات حساسیت سنجی وی برای تپه‌های نیم‌سینوسی در شکل (۱) نشان داده شده است.

بعدها مطالعات نظری متعددی بر روی شکلهای متفاوتی از تپه‌ها صورت گرفت؛ اختلاف مقادیر بزرگنمایی به دست آمده از مطالعات نظری و مشاهدات تجربی، جیلی و همکاران [۹] را بر آن داشت تا مطالعات جامعی برای بررسی دلایل اختلافات مذکور انجام دهند. آنها هدف اصلی خود را بررسی میزان تاثیر ساده سازیهای در نظر گرفته شده در مدل‌های نظری بر پاسخ لرزه‌ای عوارض بیان کرده و بدین منظور مدل‌های پیچیده‌تری شامل محیطهای چند لایه و نیز ناهمواریهای مجاور هم را تحلیل کردند. آنها همچنین تپه‌های نیم‌سینوسی را مورد توجه



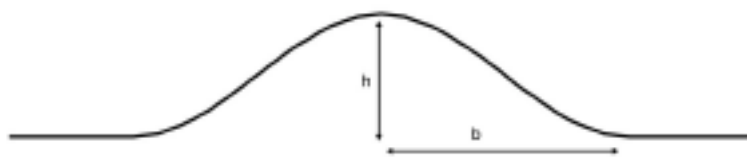
شکل ۲ - تابع انتقال نقاط مختلف روی تپه برای موج مهاجم SH [۹]

بالای تپه بود. محدوده بزرگنمایی بالای تپه به موازات قطر بزرگ گسترش یافته و عرض آن با طول موج امواج مهاجم متناسب بود. بیشینه مقدار بزرگنمایی تناسبی معکوس با طول موج امواج مهاجم داشته و به ازای طول موج  $\lambda = h$  به حدود ۱۰۰ درصد نیز بالغ شد. با تغییر جهت پلاریزاسیون موج مهاجم از قطر کوچک به قطر بزرگ بیضی، مقادیر بزرگنمایی کاهش یافتند، هرچند که الگوی آن همچنان باقی ماند. کوماتیت و ویلوت [۱۱] نیز تپه‌ای با مشخصات مشابه را با استفاده از روش اجزای طیفی تحلیل کرده و به نتایج مشابهی دست یافتند.

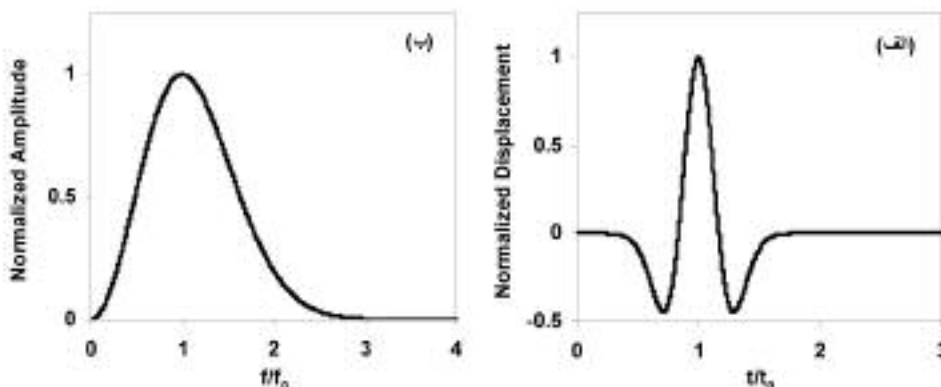
مرور بررسیهای فوق نشانگر آن است که اگرچه تپه‌های نیم‌سینوسی از زمان آغاز بررسیهای تاثیر عوارض توپوگرافی بر حرکت سطح زمین مورد توجه بوده‌اند، اما مطالعات حساسیت سنجی جامعی که در بردارنده اثرات هندسه تپه‌های مذکور بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین باشد، عملاً صورت نگرفته است. مطالعات انجام شده بر روی تپه‌های نیم‌سینوسی شکل، یا مربوط به امواج مهاجم SH بوده است، یا مربوط به حالت سه بعدی بوده است، یا تنها فرکانس خاصی را مورد توجه قرار داده است و یا آنکه اثر هندسه بر رفتار لرزه‌ای تپه را در ترکیب با عوامل دیگر مورد بررسی قرار داده است. این مقاله به ارائه نتایج مطالعه پارامتری بر روی پاسخ لرزه‌ای تپه‌های دوبعدی نیم‌سینوسی در برابر امواج مهاجم قائم درون صفحه (SV و P) اختصاص دارد. هر سه عامل هندسه، مشخصات مکانیکی و نسبت ابعاد تپه در مقایسه با طول موج امواج مهاجم مورد توجه قرار گرفته‌اند. نهایتاً و بر اساس این نتایج، رابطه و جداولی

جیلی و همکاران [۹] مطالعات نظری خود را بر روی بررسی اثر لایه‌بندی زیرسطحی بر رفتار لرزه‌ای یک تپه منفرد و همچنین تاثیرات همزمان لایه‌بندی زیرسطحی و تپه‌های مجاور بر رفتار لرزه‌ای یک تپه متمرکز ساختند. آنها در ابتدا رفتار یک تپه منفرد نیم‌سینوسی همگن واقع بر نیم‌فضا را مورد بررسی قرار دادند. تپه مزبور دارای نسبت شکلی برابر  $0/4$  و در معرض تابش امواج قائم SH قرار گرفته بود. نتایج این بررسی، شکل (۲) نشان داد که در محدوده فرکانسهای بدون بعد (نسبت پهناي تپه به طول موج مهاجم) کوچکتر از  $2/5$  حرکت قله تقویت شده و بیشینه مقدار بزرگنمایی آن به حدود  $1/6$  بالغ شده است. یال و کف تپه نیز در همان محدوده فرکانسی، تناوبی از بزرگنمایی و کوچکنمایی را تجربه کرده که به ترتیب تا حدود  $50\%$  و  $30\%$  درصد را بالغ شده است.

آخرین مطالعات مربوط به تاثیر تپه‌های نیم‌سینوسی بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین توسط بوچون و همکاران [۱۰] صورت گرفت. آنها با استفاده از یک روش نیمه تحلیلی - نیمه عددی، که بر معادله انتگرال مرزی حوزه فرکانس و توابع گرین روش عدد موج گسسته مبتنی بود، رفتار یک تپه منفرد سه بعدی با قاعده بیضی را مورد بررسی قرار دادند. تپه مورد نظر آنها که به ترتیب نسبتهای شکلی برابر  $0/2$  و  $0/4$  را نسبت به اقطار کوچک و بزرگ بیضی دارا بود، در معرض امواج مهاجم برشی‌ای قرار گرفت که در صفحات در بردارنده قطر کوچک و بزرگ بیضی پلاریزه شده بودند. نتایج به دست آمده به ازای کلیه طول موجها ( $\lambda = h, 2h, 3h, 4h$ ) بیانگر بزرگنمایی حرکت در



شکل ۳ - هندسه تپه نیم‌سینوسی شکل



شکل ۴ - الف) تاریخچه زمانی و ب) طیف دامنه فوری موج ریکر

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

در معادله فوق پارامترهای  $b$  و  $h$  به ترتیب نیم‌پهنا و ارتفاع تپه را نشان می‌دهند. همچنین امواج مهاجم  $P$  و  $SV$  از نوع ریکر انتخاب شدند که معادله‌ای به شرح زیر دارد:

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

پارامترهای  $f_p$  و  $t_0$  به ترتیب فرکانس غالب و زمان نظیر دامنه حداکثر را بیان می‌دارند. شکل (۴) تاریخچه زمانی و طیف فوری موج ریکر را بیان می‌دارد.

به منظور تسهیل در دسته‌بندی نتایج تحقیق و نیز تعمیم آنها به تپه‌های نیم‌سینوسی با ابعاد و خواص مکانیکی مختلف، کلیه پارامترها بدون بعد شدند. برای این منظور تعاریف زیر مورد استفاده قرار گرفتند:

$$\begin{aligned} SR &= h/b & \text{نسبت شکل:} \\ \Omega &= \omega b / \pi c_2 & \text{فرکانس بدون بعد:} \\ \tau &= t c_2 / 2b & \text{زمان بدون بعد:} \end{aligned}$$

برای برآورد پریود مشخصه و همچنین بزرگنمایی متوسط تپه ارائه شده‌اند که می‌توانند در تدقیق مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

## ۲- متدلوژی مطالعات

مطالعات حساسیت سنجی این تحقیق با استفاده از الگوریتم اجزای مرزی نرم افزار هیبرید [۱۲] انجام گرفته است. نرم افزار یاد شده به منظور تحلیل دینامیکی محیط‌های دوبعدی خطی و غیر خطی خشک و اشباع در فضای زمان طراحی شده است که برای این مهم هر یک از روشهای اجزای مرزی، اجزای محدود یا ترکیب آنها را مورد استفاده قرار می‌دهد. کارایی و دقت الگوریتم اجزای مرزی و نرم افزار فوق‌الذکر در تحلیل دینامیکی حالات مختلف عوارض توپوگرافی دوبعدی، با مثالهای متنوع طی مراجع [۱۳-۱۶] مورد بررسی واقع شده است.

هندسه تپه نیم‌سینوسی بر اساس معادله زیر تعریف شده است، شکل (۳):

در پارامترهای بدون بعد فوق  $\omega t$  و  $c_2$  به ترتیب زمان، فرکانس و سرعت موج برشی محیط را بیان می‌دارند. بدیهی است که 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 نسبت به حرکت میدان آزاد و بر حسب فرکانس (یا پریود) بدون بعد ارائه شدند.

تحقیق حاضر طیف وسیعی از تپه‌های نیم‌سینوسی را با نسبتهای شکل  $0/1, 0/2, 0/3, 0/4, 0/5, 0/6$  و  $0/7$  را که به طور معمول در طبیعت یافت می‌شوند، مورد توجه قرار داده است. رفتار تپه، الاستیک خطی فرض شده است و به منظور شبیه سازی آن چهار ضریب پواسون  $0/1, 0/2, 0/33$  و  $0/4$  در نظر گرفته شدند. با توجه به آنکه هر دو نوع موج مهاجم SV و P به تپه تابانده شدند، جمعا ۵۶ حالت مختلف مورد تحلیل قرار گرفتند. پارامترهای بدون بعد  $f_p$  و  $t_0$  حرکت موج مهاجم به ترتیب برابر  $1/5$  و  $0/9$  اختیار شدند.

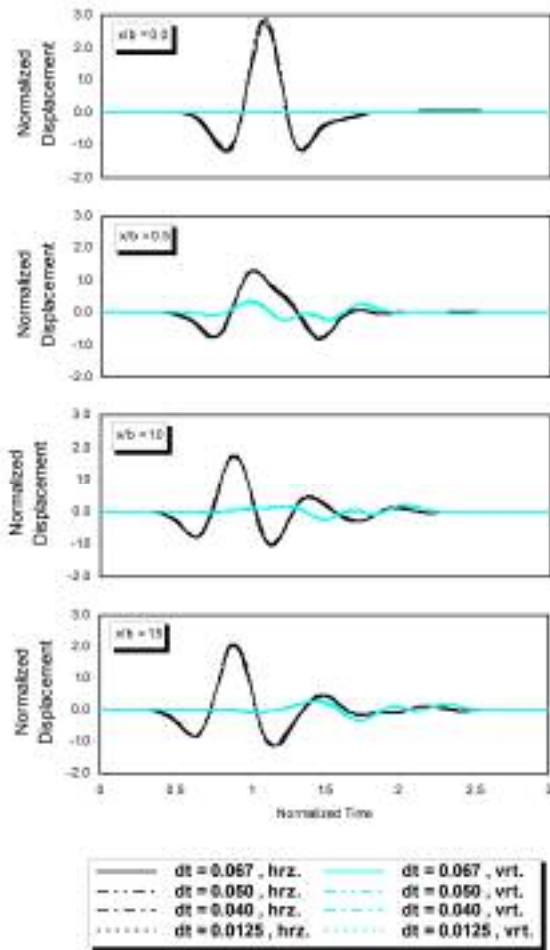
با انجام تحلیلهای دینامیکی، تاریخچه‌های تغییر مکان افقی و قائم نقاط سطح زمین به دست آمده و نتایج حاصله در هر دو حوزه زمان و فرکانس (پریود) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در تحقیق حاضر با توجه به حدود پریودهای مورد علاقه در مسائل مهندسی و نیز ابعاد متداول تپه‌ها در مناطق شهری، محدوده پریودیک  $0/25$  تا  $8/33$  مورد بررسی قرار گرفت. این بازه پریودیک امواجی را شامل می‌شود که طول موج آن از  $0/25$  تا  $8/33$  برابر پهنای عارضه متغیر است. برای ارزیابی دقیقتر و استنتاج نتایج مهندسی از رفتار تپه در حوزه پریود، محدوده پریودیک فوق‌الذکر به پنج بازه تقسیم شد. بازه‌های یک تا پنج به ترتیب پریودهای 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  $8/33$ ) را در بر می‌گیرند. به منظور ساده سازی مراحل تفسیر و کاربردی سازی نتایج تحقیق، دو نوع میانگین بزرگنمایی تعریف گردید. اول بزرگنمایی نقاط روی یال تپه است، که از محاسبه مقدار میانگین بزرگنمایی هر نقطه در بازه پریودیک مورد نظر به دست می‌آید. دوم بزرگنمایی متوسط تپه است که از محاسبه میانگین بزرگنمایی نقاط یال تپه در هر بازه پریودیک حاصل می‌شود. به هنگام محاسبه بزرگنمایی متوسط تپه، با توجه به آنکه رویکرد مهندسی مد نظر بوده است، ضرایب کوچکتر از یک برابر یک منظور شدند.

### ۳- اعتبار سنجی مدل

طبیعی است که دقت روشهای عددی در حل مسائل دینامیکی در حوزه زمان، مستلزم انتخاب اندازه‌هایی مناسب برای ابعاد مش‌بندی و طول بازه زمانی، متناسب با تابع بارگذاری است. انتخاب اندازه‌های مناسب برای این پارامترها، بهینه سازی زمان اجرای برنامه را نیز ممکن می‌سازد. به همین سبب و پیش از ارائه نتایج مطالعات حساسیت سنجی، دقت اندازه‌های اختیار شده برای ابعاد مش‌بندی، طول بازه زمانی و همچنین فرکانس غالب موج بارگذاری، برای هر دو موج مهاجم SV و P، با تحلیلهای اولیه زیر مورد بررسی قرار گرفته است. در تمامی این تحلیلهای، مقدار ضریب پواسون برابر  $0/33$  در نظر گرفته شده است. در تحلیلهای مربوط به کنترل ابعاد مش‌بندی و طول بازه زمانی، فرکانس غالب بدون بعد موج مهاجم برابر  $1/5$  اختیار شده است.

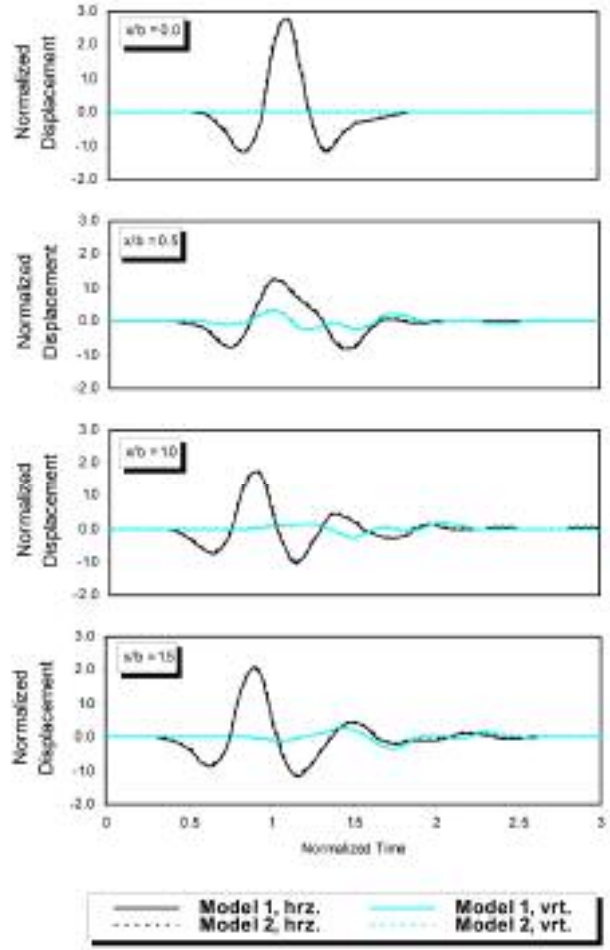
ابعاد مش‌بندی: شکل (۵) تاریخچه زمانی مولفه‌های افقی و قائم پاسخ لرزه‌ای نقاط مختلف تپه‌ای با نسبت شکل  $0/4$  را در برابر موج مهاجم SV نشان می‌دهد. نتایج یاد شده با استفاده از دو مش‌بندی متفاوت به دست آمده است. محیط تپه در مش‌بندیهای شماره یک و دو به ترتیب با استفاده از تعداد ۴۸ و ۳۴ المان مرزی مدل شده است. تعداد المانهای هر دو مش‌بندی در بخش افقی نیم‌صفحه یکسان است. چنانکه دیده می‌شود، تطابق بسیار خوبی در کلیه نقاط وجود دارد. در مورد



شکل ۶ - همگرایی تاریخچه زمانی تغییر مکان در نقاط مختلف  
عارضه به ازای چهار گام زمانی مختلف

دید می‌شود، تطابق بسیار خوبی در کلیه نقاط میان جوابهای حاصله وجود دارد. در مورد موج مهاجم P نیز نتایج مشابه با دقتی بالاتر به دست آمده است.

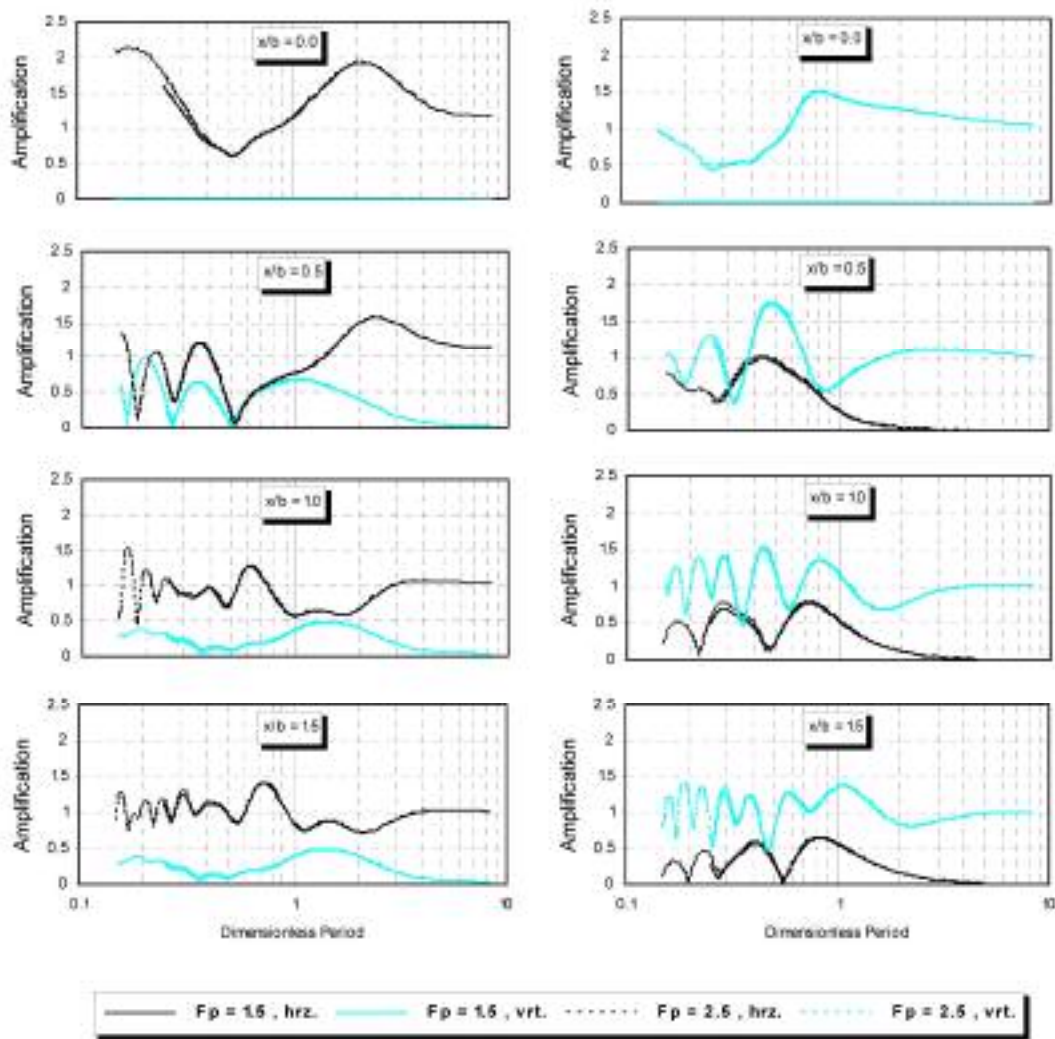
**فرکانس غالب:** فرکانس غالب موج مهاجم می‌بایست به گونه‌ای اختیار شود که بتواند پیوندهای بدون بعد مورد علاقه این تحقیق (۰/۲۵ تا ۸) را پوشش دهد. در این بخش برای کنترل دقت توابع بزرگنمایی در حوزه فرکانس و خصوصاً در فرکانسهای بالا، نتایج دو تحلیل مختلف با استفاده از فرکانسهای غالب بدون بعد ۱/۵ و ۲/۵ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. شکل (۷) توابع بزرگنمایی افقی و قائم نقاط مختلف روی تپه‌ای با نسبت شکل ۰/۷ را به ازای دو موج مهاجم SV و



شکل ۵ - همگرایی تاریخچه زمانی تغییر مکان در نقاط مختلف  
عارضه به ازای دو مدل متفاوت اجزاء مرزی

موج مهاجم P نتایج مشابه با دقتی بالاتر به دست آمده است.

**طول گام زمانی:** طول گام زمانی باید به گونه‌ای اختیار شود که در عین متناسب بودن با ابعاد مش‌بندی و نیز برخورداری از دقت مناسب برای تعریف موج مهاجم، مدت زمان اجرای برنامه را بهینه سازد. شکل (۶) تاریخچه زمانی مولفه‌های افقی و قائم پاسخ لرزه‌ای نقاط مختلف روی تپه‌ای با نسبت شکل ۰/۴ را در برابر موج مهاجم SV نشان می‌دهد. نتایج یاد شده با استفاده از مش‌بندی شماره دو و چهار گام زمانی متفاوت به دست آمده است. گامهای زمانی بدون بعد شماره یک تا چهار به ترتیب برابر ۰/۰۶۷، ۰/۰۵، ۰/۰۴ و ۰/۰۱۲۵ هستند. چنانکه



شکل ۷ - مقایسه تابع بزرگنمایی نقاط مختلف عارضه به ازای دو فرکانس متفاوت موج مهاجم؛ نمودارهای سمت چپ نتایج موج مهاجم SV و نمودارهای سمت راست نتایج موج مهاجم P را نشان می‌دهد.

فضا و زمان است که از قرار دادن تغییرمکان هر نقطه در محل فضایی آن به دست می‌آید. نمودار تغییرمکان می‌تواند نحوه انتشار امواج در محیط را به راحتی نشان دهد.

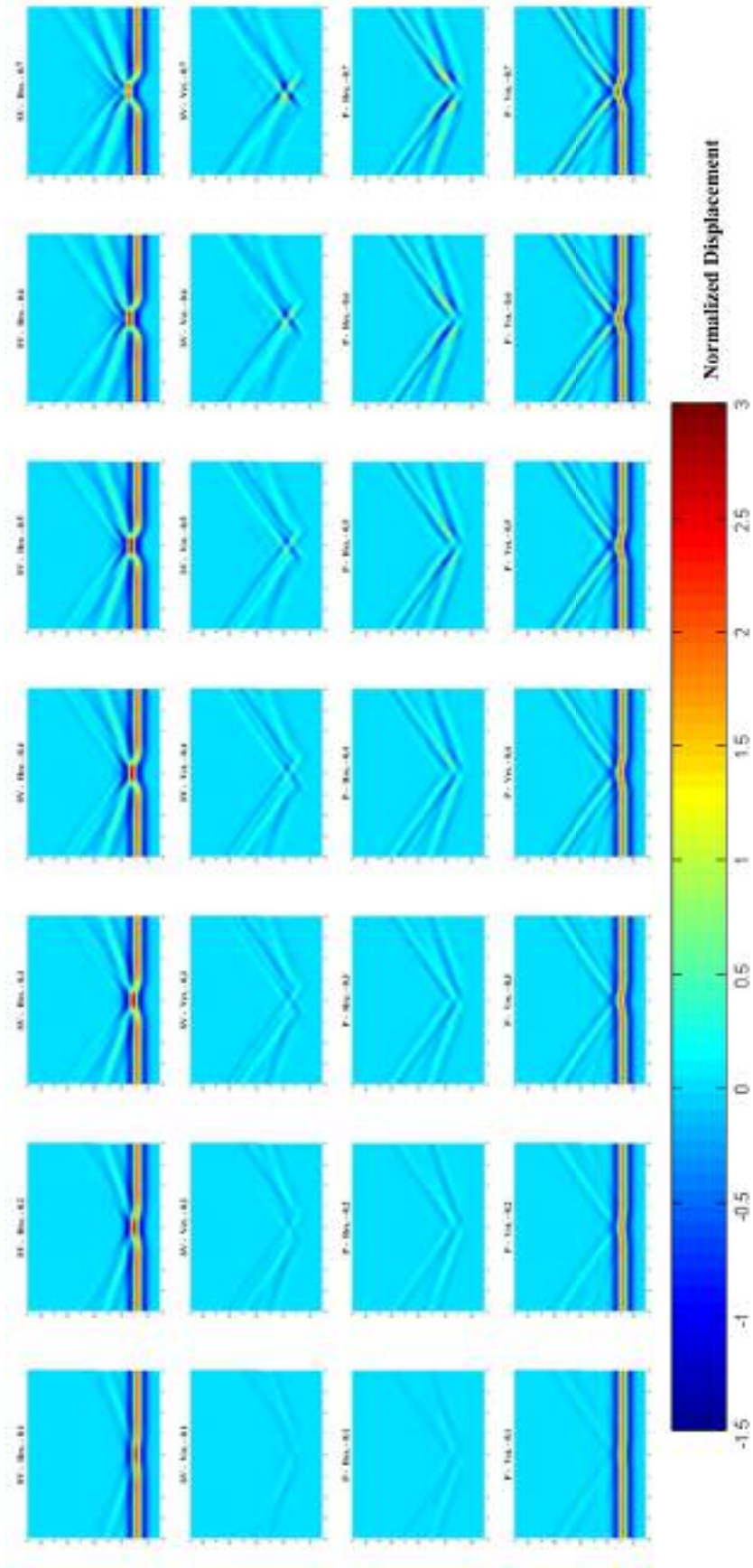
شکل (۸) نمودارهای مولفه‌های افقی و قائم تغییرمکان محدوده‌ای به طول  $4b$  در اطراف مرکز تپه را برای هر دو حالت امواج مهاجم SV و P، ضریب پواسون  $0.33$  و کلیه نسبت‌های شکل نشان می‌دهد. این نمودارها چگونگی تفرق امواج مهاجم توسط عارضه و انتشار آنها در محیط را به خوبی نشان می‌دهند. امواجی که به واسطه وجود تپه نیم‌سینوسی متفرق می‌شوند، امواج انعکاس یافته، امواج تبدیل مد یافته، امواج پراشیده شده و

P نشان داده است. در حالت موج مهاجم P ضریب پواسون برابر  $0.4$  انتخاب شده است. چنانکه دیده می‌شود، نتایج به دست آمده با استفاده از فرکانسهای غالب مختلف تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند، و حداکثر خطای موجود در محدوده فرکانسهای بالا در حد چند درصد است.

#### ۴- تفرق امواج در حوزه زمان

تاریخچه زمانی تغییر مکان یک نقطه، حرکت آن نقطه را هنگامی که امواج لرزه‌ای از آن عبور می‌کند، نشان می‌دهد. نمودار تغییرمکان، نشانگر میدان تغییرمکان به صورت تابعی از





شکل ۸ - مولفه‌های افقی و قائم تاریخچه زمانی تغییر مکان برای ضریب پواسون  $\nu = 0.33$ : در هر نمودار محور افقی موقعیت نقاط در فاصله محور قائم زمان بدون بعد را نشان می‌دهد؛ در بالای هر نمودار نوع موج مهاجم، مولفه تغییر مکان و نسبت شکل مشخص شده است.

طور همزمان دریافت می‌شود. اگرچه با افزایش فاصله از عارضه، این دو موج از یکدیگر تفکیک می‌شوند، اما با توجه به میرایی هندسی موج SV و کاهش دامنه آن، دو فاز اخیر به روشنی قابل تفکیک نیستند. دامنه کاهنده موج SV با افزایش فاصله، در مولفه افقی حرکت و خصوصاً در نسبت شکل‌های بزرگ به راحتی دیده می‌شود. موج رایلی با سرعتی کمتر از سرعت موج SV و با دامنه‌ای ثابت منتشر می‌شود، که با توجه به ماهیت دوبعدی کیفیت انتشار آن امری منطقی است. قطار موج رایلی آخرین موج دریافت شده است و پس از آن دامنه حرکت تدریجاً به صفر می‌رسد. چنانکه دیده می‌شود، امواج رایلی در مولفه قائم بهتر از مولفه افقی و امواج طولی و برشی در مولفه افقی بهتر از مولفه قائم قابل تشخیص‌اند.

در نقاط داخل تپه نیم‌سینوسی، فرایند تداخل امواج متفرق شده پیچیدگی بیشتری دارد. چنانکه دیده می‌شود، با افزایش نسبت شکل تپه و افزایش دامنه امواج تفرق یافته بر مدت زمان حرکت نقاط افزوده می‌شود. از طرفی با افزایش نسبت شکل و در نتیجه ارتفاع تپه، لحظه دریافت امواج لرزه‌ای توسط تاج تپه تاخیری متناسب با ارتفاع آن و سرعت سیر موج مهاجم دارد. با این حال در مواقع هجوم امواج SV و خصوصاً در تپه‌های با نسبت شکل بالا، مدهای تبدیل یافته امواج لرزه‌ای امکان می‌یابند تا پیش از رسیدن موج مهاجم دریافت شوند. به همین سبب است که پیچیدگی فرایند تداخل امواج متفرق شده در داخل عارضه فزونی خواهد یافت. از جمله آنکه بیشینه تغییر مکان تاج تپه رابطه مستقیمی با نسبت شکل آن نخواهد داشت، و در عوض تابع تقدم، تاخر و چگونگی تداخل فازهای مختلف امواج خواهد بود. همچنین به همین سبب است که محل وقوع بیشینه تغییر مکان، لزوماً در موقعیت تاج تپه نخواهد بود.

## ۵- بزرگنمایی تپه در فضای فرکانس

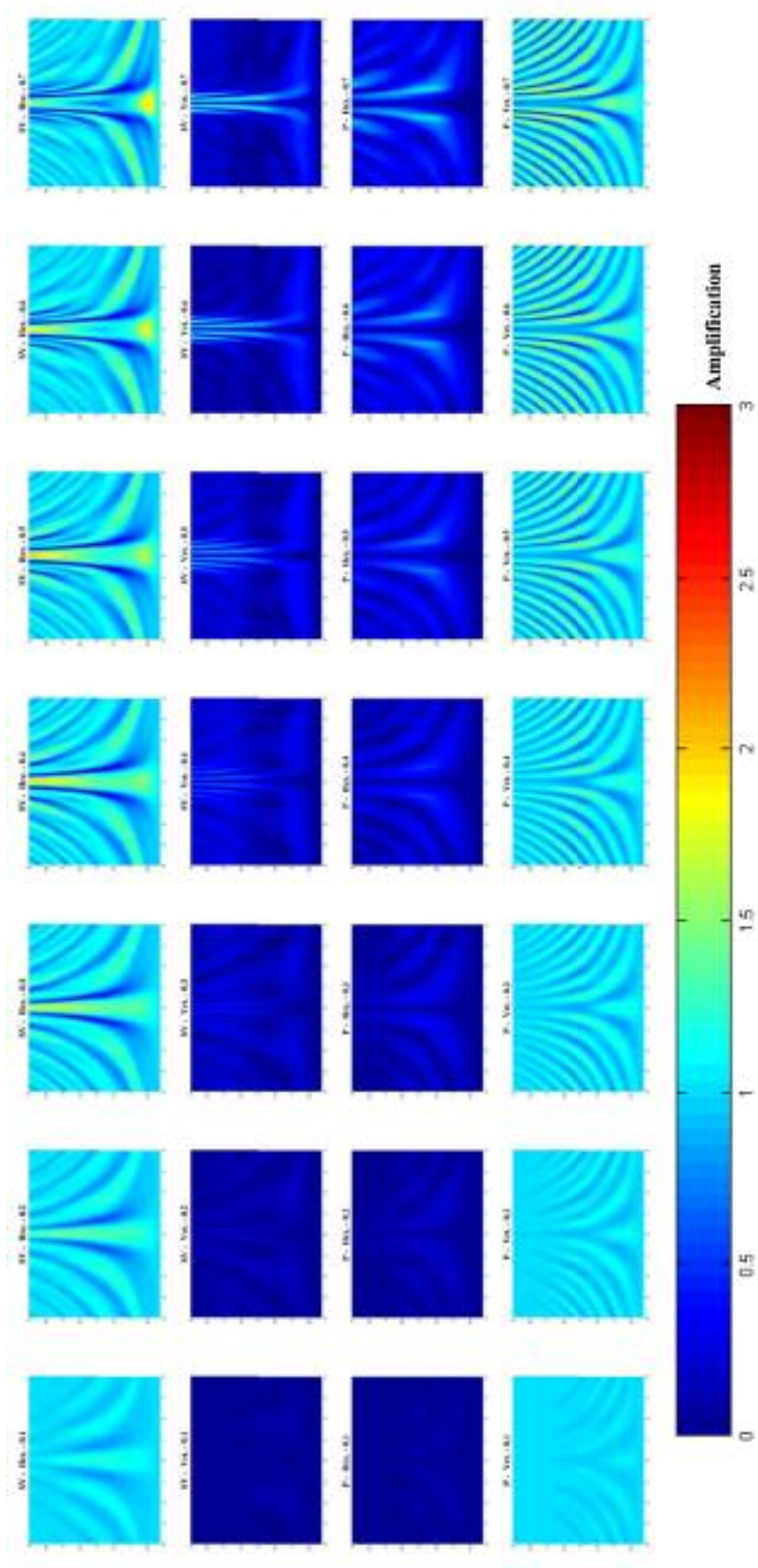
### ۵-۱- کلیات

شکل (۹) نمودارهای بزرگنمایی افقی و قائم امواج مهاجم SV و P در نواری به عرض  $4b$  از مرکز تپه‌ای با ضریب

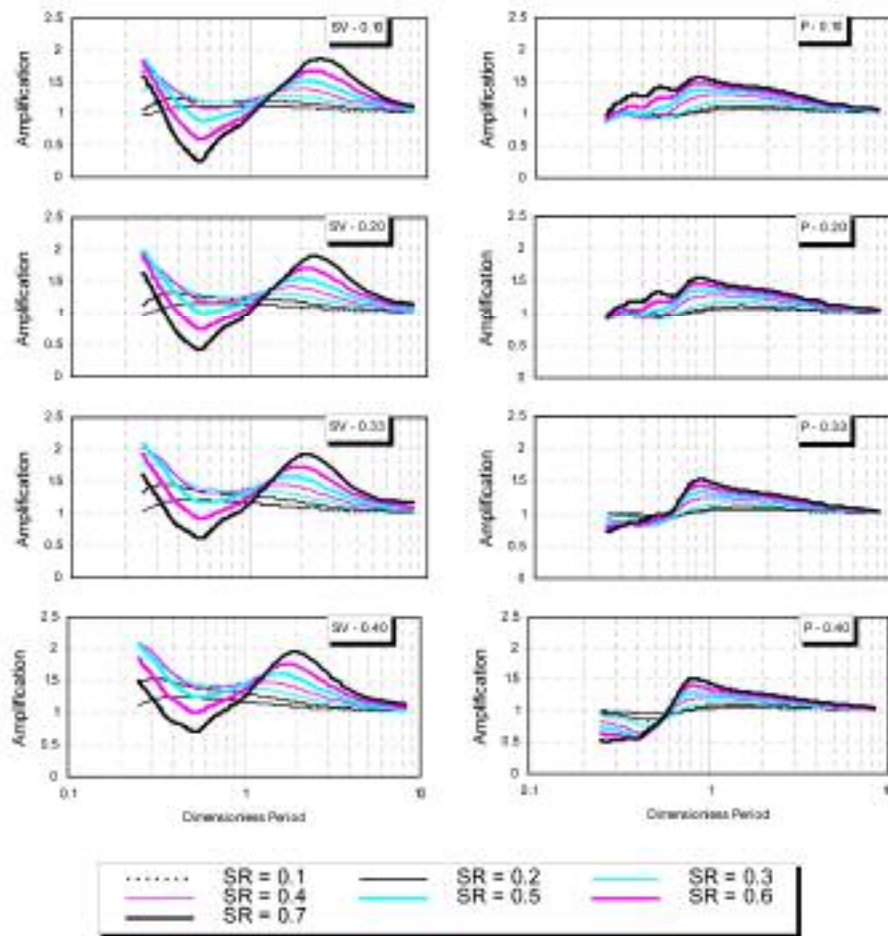
امواج تداخلی سطحی‌اند. مجموعه این امواج در داخل تپه و طی مدت زمان کوتاهی تداخل نموده و جابه‌جایی بسیار متغیر نقاط روی عارضه را ایجاد می‌کنند. اگرچه در داخل عارضه تفکیک فازهای مختلف امواج تفرق یافته ناممکن به نظر می‌آید، اما در خارج از آن می‌توان فازهای مختلف امواج را بر اساس سرعت سیر و سایر ویژگی‌های رفتاری موج در فضا و زمان شناسایی کرد.

در تپه‌های نیم‌سینوسی، با توجه به تغییر تدریجی شیب، همه نقاط روی تپه باعث تفرق امواج می‌شوند. چنانکه در نمودارهای تغییر مکان خصوصاً در مولفه مخالف حرکت ورودی قابل مشاهده است، تفرق امواج از اولین لحظات برخورد موج مهاجم به عارضه از دو نقطه پای دامنه آغاز می‌شود. هر یک از این دو نقطه باعث تفرق امواج مهاجم و انتشار فازهای مختلف موج در اطراف خود می‌شوند. با افزایش فاصله از تپه، مجموعه امواج متفرق شده از نقاط مختلف عارضه تداخل و به ازای هر فاز قطار موجی را ایجاد می‌کنند. چنانکه در نمودارهای تغییر مکان دیده می‌شود، با افزایش نسبت شکل تپه، دامنه امواج تفرق یافته افزایش می‌یابد.

همان‌طور که در نمودارهای تغییر مکان دیده می‌شود، در نقاط دور از تپه نیم‌سینوسی، پس از اتمام حرکت همزمان موج مهاجم و موج بازتابی حاصل از آن، دامنه حرکت به صفر نزدیک می‌شود. چنانکه انتظار می‌رود، دامنه حاصل از ترکیب موج مهاجم و بازتابی در مولفه موافق حرکت ورودی دو برابر موج مهاجم و در مولفه مخالف حرکت ورودی برابر صفر است. چنانکه مطالعات بوچون و همکاران [۱۰] و کوماتیت و ویلوت [۱۱] نیز نشان داد، پس از آن قطار موجی فرا می‌رسد که سرعت سیری برابر امواج P دارد. دامنه این قطار موج در نزدیک عارضه حداکثر مقدار خود را دارد و به تدریج با دور شدن از عارضه مقدار آن کاهش می‌یابد. این کاهش دامنه به خوبی میرایی ناشی از گسترش هندسی جبهه موج را که از خصوصیات ذاتی انتشار امواج است نشان می‌دهد. پس از این قطار موج، قطار موج SV دریافت خواهد شد. از آنجایی که موج اخیر با سرعتی کمی بیش از سرعت موج رایلی منتشر می‌شود، تداخل این دو موج به



شکل ۹ - مولفه‌های افقی و قائم بزرگنمایی تغییر مکان برای ضریب پواسون ۰/۳۳؛ در هر نمودار محور افقی موقعیت نقاط در فاصله محور قائم فرکانس بدون بعد و نشان می‌دهد؛ در بالای هر نمودار نوع موج مهاجم، مولفه تغییر مکان و نسبت شکل مشخص شده است.



شکل ۱۰ - منحنی بزرگنمایی نقطه تاج تپه به ازای نسبت شکل‌های مختلف؛ در بالای هر نمودار نوع موج مهاجم و ضریب پواسون مشخص شده است.

قدر پیروی موج مهاجم از پیروی مشخصه عارضه بزرگتر باشد، حرکت آنها یکنواخت‌تر و به حرکت آزاد سطح زمین نزدیکتر است. بررسی رفتار نقاط خارج از تپه نیز موید آن است که هرگاه طول موج مهاجم نسبت به ابعاد عارضه بسیار بزرگ باشد، حرکت آنها نیز یکنواخت‌تر و به حرکت آزاد سطح زمین نزدیکتر است. بالاخره آنکه در محدوده مطالعه هر قدر فاصله نقاط از مرکز تپه بیشتر شود، به سبب تاخیر قطار موج سطحی، توالی بزرگنمایی و کوچکنمایی بیشتر خواهد بود.

#### ۵-۲- بزرگنمایی تاج تپه

شکل (۱۰) تغییرات منحنی بزرگنمایی تاج تپه با نسبت شکل را بر حسب ضرایب پواسون دسته‌بندی کرده است.

پواسون  $\frac{0}{33}$  را بر حسب نسبت شکل دسته‌بندی کرده است. چنانکه مشاهده می‌شود: روند تغییرات تابع بزرگنمایی در امتداد عارضه، با توجه به هندسه هموار تپه نیم‌سینوسی، آرام و تدریجی است. هر اندازه نسبت شکل تپه افزایش یابد، وجود عارضه تاثیر بیشتری بر پاسخ لرزه‌ای می‌گذارد. الگوی بزرگنمایی امواج مهاجم SV و P مشابه هم و تناوبی از بزرگنمایی و کوچکنمایی است. با این تفاوت که محدوده فرکانسی متاثر از امواج مهاجم SV وسیعتر و پتانسیل بزرگنمایی آن بیشتر است. تپه در برابر تابش هر یک از امواج مهاجم SV و P فرکانس (یا پیروی) مشخصه‌ای دارد که به ازای آن، تمامی نقاط روی تپه دارای ضریب بزرگنمایی بزرگتر از یک و حرکت هم‌فازاند. بررسی رفتار نقاط روی تپه بیانگر آن است که هر

بعد بر حسب سرعت موج برشی، در محدوده پریودهای مورد علاقه فعال نشده است.

### ۵-۳- تغییرات بزرگنمایی بر روی یال تپه

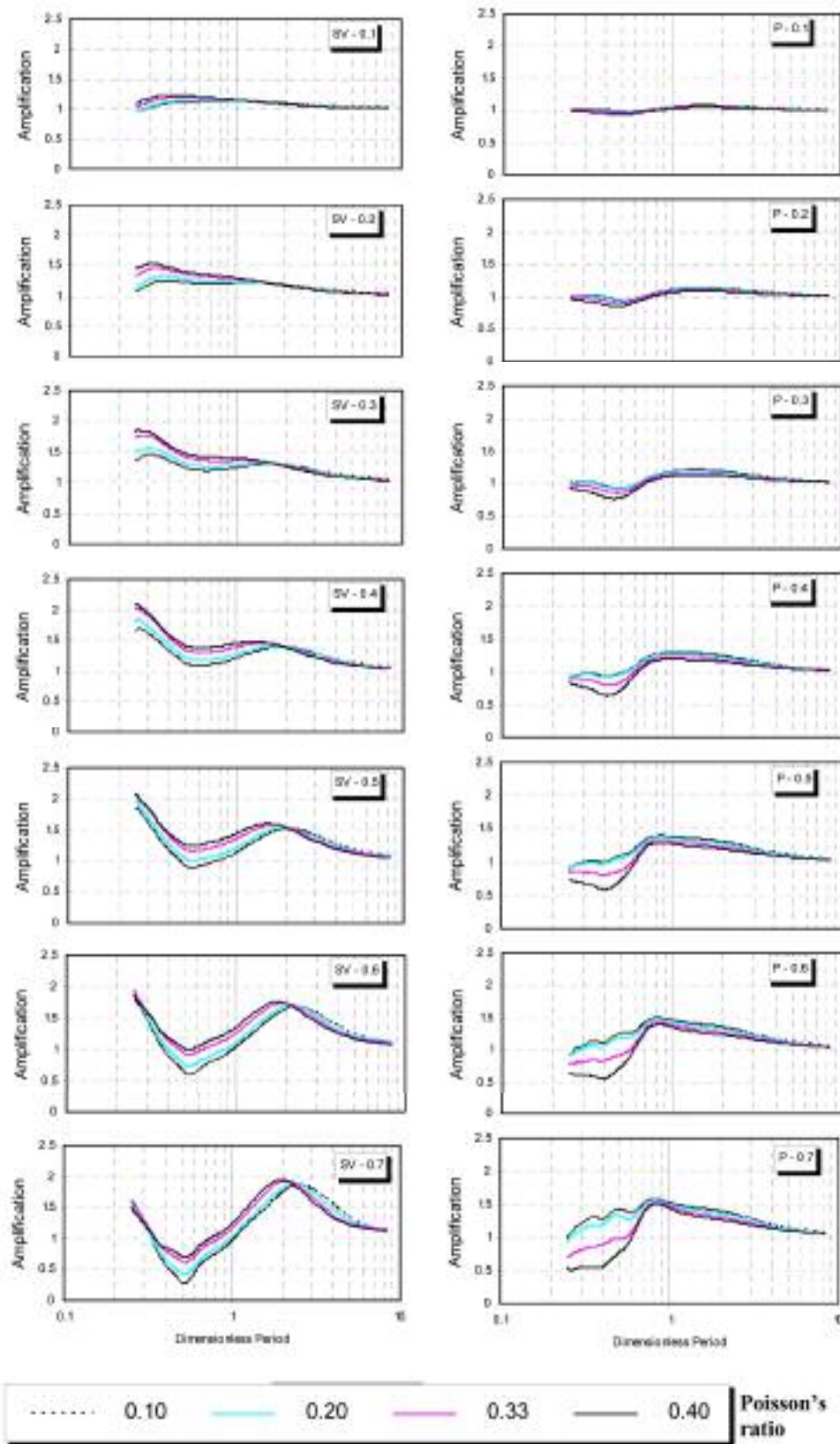
اگرچه بر اساس شکل (۹) کلیات رفتاری دیگر نقاط تپه با تاج آن مشابه است، اما بررسی دقیقتر مستلزم مقیاسی کوچکتر است. شکل (۱۲) منحنی تغییرات مولفه موافق بزرگنمایی یال تپه را بر حسب نسبت شکل در برابر امواج مهاجم SV و P دسته‌بندی کرده است. چنانکه مشاهده می‌شود، هرچند با افزایش نسبت شکل بر پتانسیل بزرگنمایی تپه افزوده می‌شود، اما تغییرات بزرگنمایی تابع طول موج مهاجم و در امتداد یال متغیر است.

شکل (۱۳) منحنی تغییرات مولفه موافق بزرگنمایی یال تپه را بر حسب طول موج مهاجم دسته‌بندی کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالت موج مهاجم SV، اگر طول موج مهاجم بلند و بزرگتر باشد، تپه هر نسبت شکلی که دارا باشد، در نقاط مختلف پدیده بزرگنمایی را تجربه خواهد کرد. در این حالت بزرگنمایی نقاط مختلف با نسبت شکل افزایش و از تاج به سمت کناره‌ها کاهش می‌یابد. در حالتی که طول موج مهاجم متوسط باشد، رفتاری مشابه مشاهده می‌شود، با این تفاوت که کناره‌ها و نقاط مجاور آن کوچکنمایی را تجربه خواهند کرد. در حالتی که طول موج مهاجم کوچکتر باشد، بر تعداد مناطق بزرگنمایی و کوچکنمایی روی تپه افزوده خواهد شد. در این حالت بزرگنمایی نقاط مختلف به ازای نسبتهای شکل میانی بیشینه خواهد شد. همچنین تپه‌های با نسبت شکل کمتر از ۰/۶ در محل تاج و تپه‌های با نسبت شکل بزرگتر در مجاورت آن، بیشینه بزرگنمایی را تجربه خواهند کرد. در حالت موج مهاجم P، الگوی بزرگنمایی تپه مشابه حالت موج SV است. با این تفاوت که بیشینه بزرگنمایی (و کوچکنمایی) موج P، اولاً نسبت به موج SV کوچکتر است، ثانیاً صرف‌نظر از طول موج مهاجم با نسبت شکل متناسب است و ثالثاً تنها در مورد امواج بسیار کوتاه در محلی غیر از تاج رخ می‌دهد.

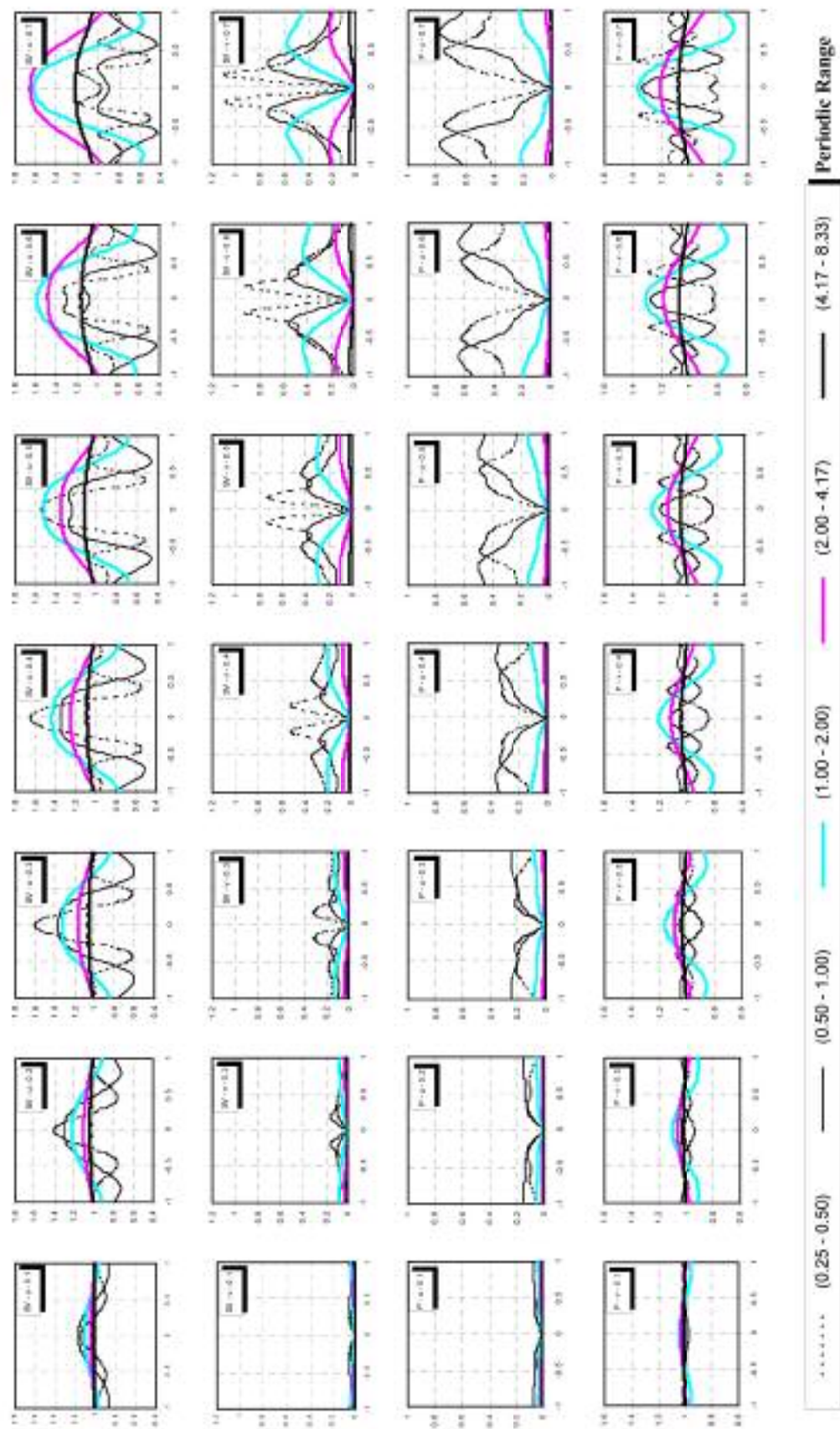
چنانکه دیده می‌شود، در حالت موج مهاجم SV، منحنی بزرگنمایی تاج تپه در محدوده پریودهای مورد علاقه، علاوه بر پریود مشخصه پریود تشدید دومی را نیز داراست، که به گروه پریودهای بسیار کوتاه تعلق دارد. این دو پریود توسط پریود تضعیفی از هم جدا شده‌اند که در نسبتهای شکل بزرگتر از ۰/۶ کوچکنمایی و در سایر موارد کمترین بزرگنمایی را نشان می‌دهد. با کاهش نسبت شکل، پریودهای مشخصه و تضعیف تدریجاً چنان در هم ادغام می‌شوند که تنها پریود تشدید دوم قابل مشاهده است. بیشینه بزرگنمایی تاج در تپه‌های با نسبت شکل بزرگتر از ۰/۶ از آن پریود مشخصه، و در تپه‌های با نسبت شکل کوچکتر از آن پریود تشدید دوم است. با افزایش نسبت شکل، اگرچه پریود مشخصه و بزرگنمایی نظیر آن هر دو افزایش می‌یابد، اما به نظر می‌رسد که پریود تشدید دوم بر خلاف بزرگنمایی نظیر آن کاهش یابد.

شکل (۱۱) تغییرات منحنی بزرگنمایی تاج تپه با ضریب پواسون را بر حسب نسبت شکل دسته‌بندی کرده است. چنانکه دیده می‌شود، در حالت موج مهاجم SV، اثر ضریب پواسون بر بزرگنمایی تاج اگرچه تابع پریود موج مهاجم و نسبت شکل است، اما در مقایسه با آن اهمیت کمتری دارد. افزایش نسبت شکل، اثر ضریب پواسون را بیشتر و حوزه تاثیر آن بر منحنی بزرگنمایی را به محدوده پریودهای بزرگتر گسترش می‌دهد. افزایش ضریب پواسون نه تنها پریود مشخصه تپه را کاهش می‌دهد، بلکه بزرگنمایی تاج را در محدوده‌های پریودیک بزرگتر و کوچکتر از آن به ترتیب کاهش و افزایش می‌دهد.

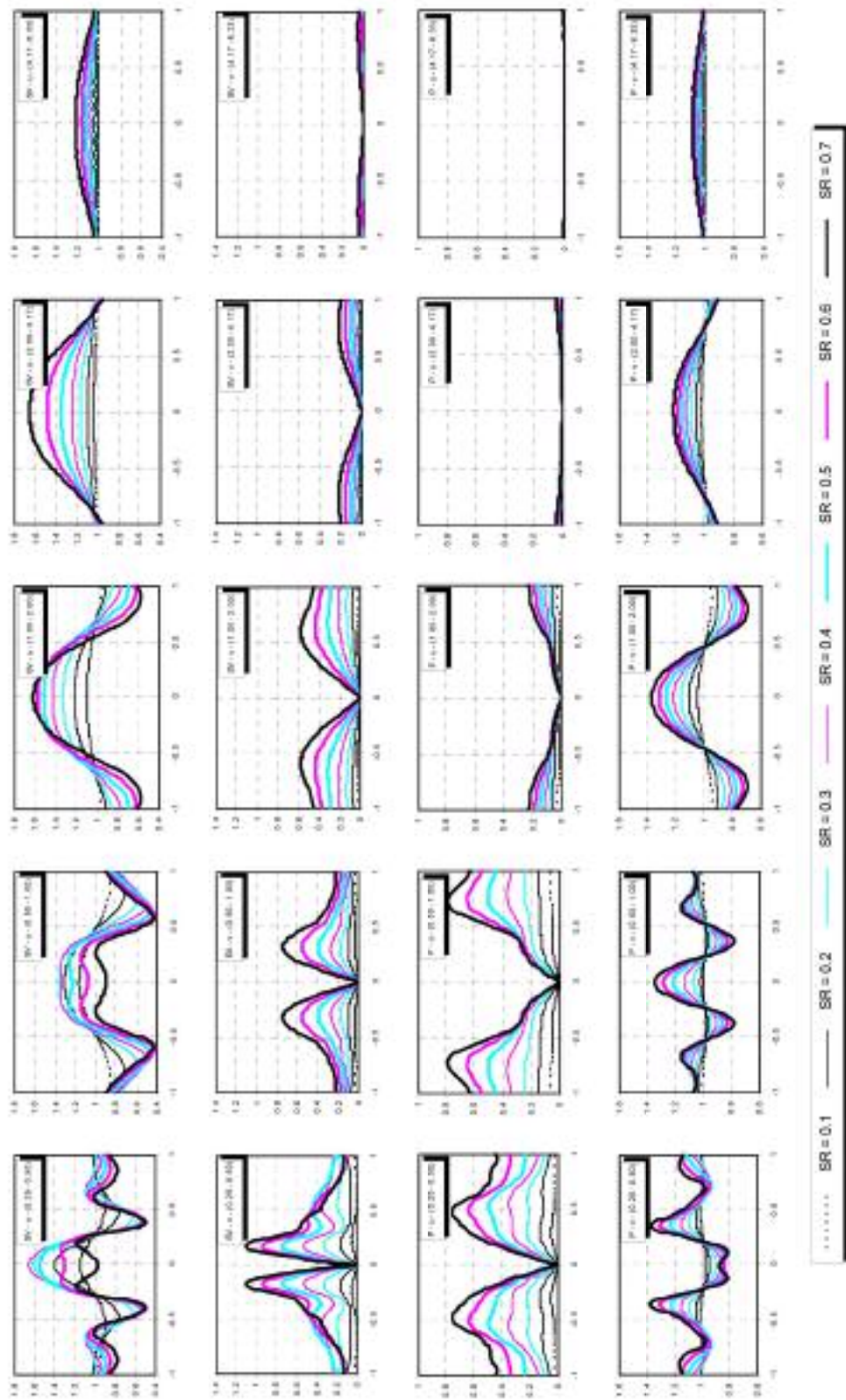
شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تغییرات منحنی بزرگنمایی تاج تپه در حالت موج مهاجم P را نیز به ترتیب، بر حسب ضریب پواسون و نسبت شکل دسته‌بندی کرده‌اند. چنانکه مشاهده می‌شود، منحنیهای بزرگنمایی تاج تپه در دو حالت امواج مهاجم SV و P الگوی رفتاری مشابهی دارند. با این تفاوت که نه تنها بزرگنمایی موج P توسط تاج تپه نسبت به موج SV کمتر است، بلکه پریود تشدید دوم به سبب تعریف پریود بدون



شکل ۱۱ - منحنی بزرگنمایی نقطه تاج تپه به ازای ضرایب پواسون مختلف؛ در بالای هر نمودار نوع موج مهاجم و نسبت شکل مشخص شده است.



شکل ۱۲ - دسته‌بندی تغییرات بزرگنمایی نقاط پال تپه بر حسب نسبت شکل به ازای ضریب پواسون  $\nu$ : در هر نمودار محور افقی موقعیت نقاط روی تپه در فاصله  $x = \pm b$  و محور قائم بزرگنمایی را نشان می‌دهد؛ در بالای هر نمودار نوع موج مهاجم، مولفه تغییر مکان و نسبت شکل مشخص شده است.



شکل ۱۳ - دسته‌بندی تغییرات بزرگنمایی نقاط پال تپه بر حسب بازه پرودیک به ازای ضریب پواسون ۳۳٪؛ در هر نمودار محور افقی موقعیت نقاط

روی تپه در فاصله  $x = \pm b$  و محور قائم بزرگنمایی رانشان می‌دهد؛ در بالای هر نمودار نوع موج مهاجم، مولفه تغییر مکان و محدوده پرودیک مشخص شده است.



شکل‌های (۱۲) و (۱۳) منحنی تغییرات مولفه مخالف بزرگنمایی یال تپه را نیز به ترتیب، بر حسب نسبت شکل و طول موج مهاجم دسته‌بندی کرده‌اند. چنانکه مشاهده می‌شود، در حالت موج مهاجم SV، 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 کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت شکل بر بزرگنمایی همه نقاط افزوده می‌شود. همچنین با افزایش طول موج، بزرگنمایی نقاط مختلف تپه کاهش و فاصله محل وقوع بیشینه مقدار آن از تاج افزایش می‌یابد. در حالت موج مهاجم P نیز الگوی بزرگنمایی تپه عملاً مشابه حالت موج SV است.

#### ۴-۵- بزرگنمایی متوسط تپه

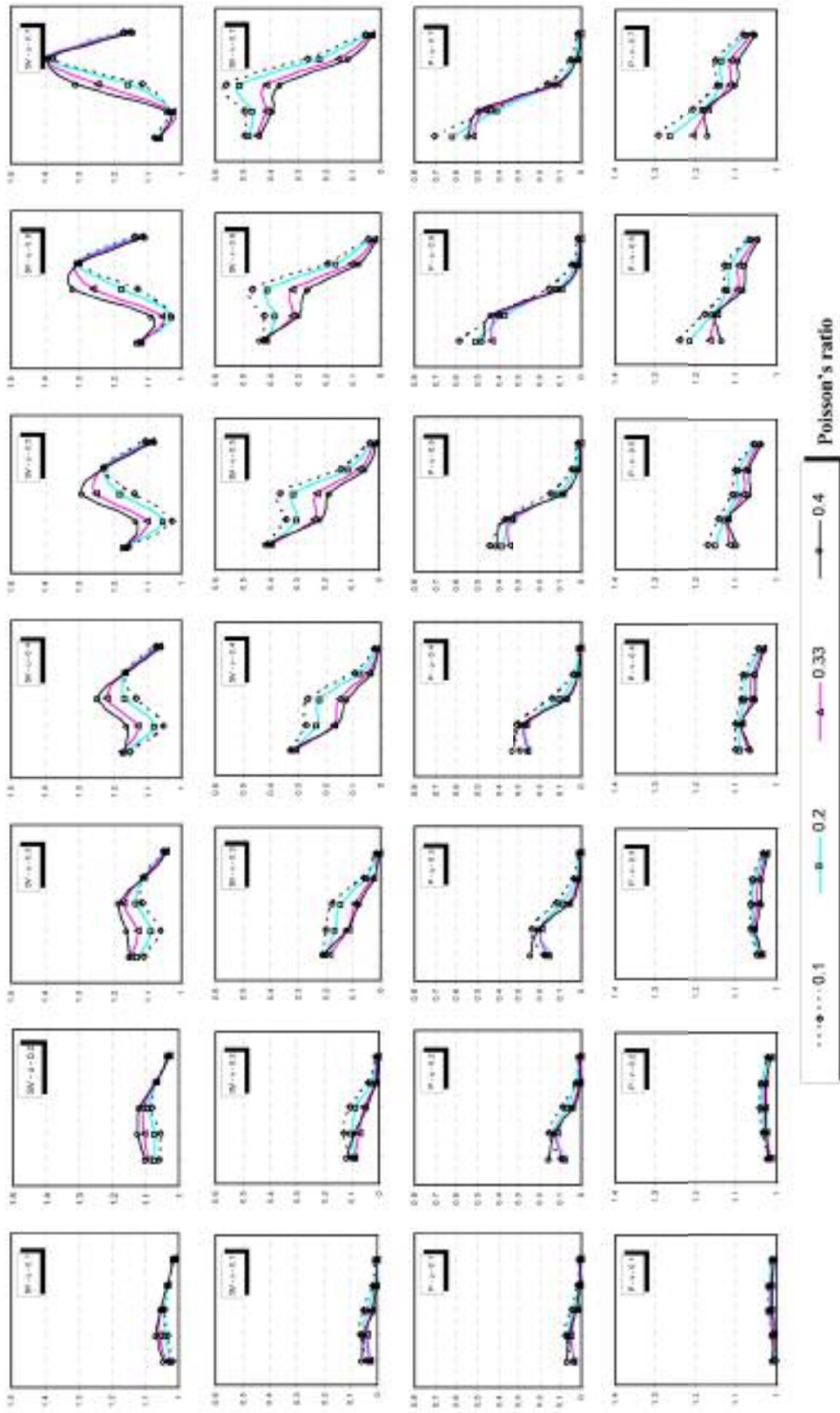
شکل (۱۴) تغییرات مولفه‌های موافق و مخالف بزرگنمایی متوسط تپه با طول موج مهاجم و ضریب پواسون را بر حسب نسبت شکل دسته‌بندی کرده است. در حالت موج مهاجم SV، چنانکه در شکل (۱۲) نیز دیده شد، بزرگنمایی متوسط تپه‌های با نسبت شکل کوچک، در مورد امواج کوتاه بیش از دیگر امواج است. با افزایش نسبت شکل، حداکثر بزرگنمایی متوسط تپه از آن امواج بلندتر خواهد بود. شکل (۱۵) تغییرات مولفه‌های موافق و مخالف بزرگنمایی متوسط تپه با نسبت شکل و ضریب پواسون را بر حسب طول موج مهاجم دسته‌بندی کرده است. در حالت موج مهاجم SV، چنانکه در شکل (۱۳) نیز دیده شد، مولفه موافق بزرگنمایی متوسط تپه در برابر امواج متوسط و بزرگتر، همگام با نسبت شکل افزایش می‌یابد. در صورتی که امواج مهاجم کوچکتر باشند، بیشترین بزرگنمایی از آن تپه‌های با نسبت شکل میانه (حدود ۰/۴) خواهد بود. همچنین مولفه مخالف بزرگنمایی متوسط تپه صرف‌نظر از طول موج مهاجم، همگام با نسبت شکل افزایش می‌یابد. شکل‌های فوق اثر ضریب پواسون بر بزرگنمایی متوسط تپه را نیز مورد بررسی قرار داده‌اند. چنانکه مشاهده می‌شود، اثر ضریب پواسون بر بزرگنمایی متوسط تپه نقش ثانویه دارد. در تپه‌های با نسبت

شکل کوچک، اثر ضریب پواسون عملاً غیر قابل توجه است. بزرگنمایی متوسط تپه‌های با نسبت شکل بزرگتر، خصوصاً در مورد امواج کوتاه تا متوسط، بیش از دیگر موارد به ضریب پواسون حساسیت دارد.

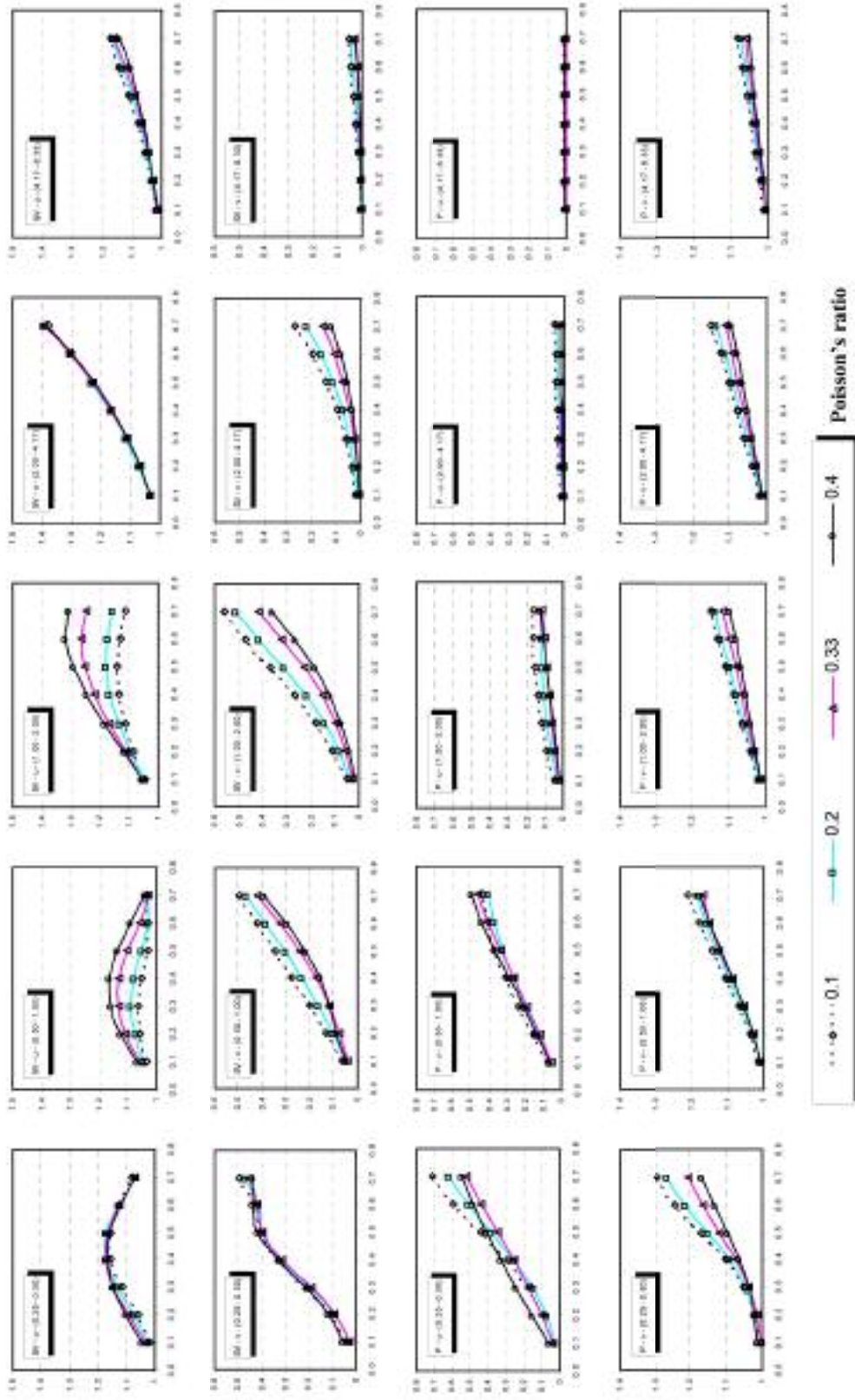
شکل (۱۴) همچنین تغییرات مولفه‌های موافق و مخالف بزرگنمایی متوسط تپه با طول موج P و ضریب پواسون را بر حسب نسبت شکل دسته‌بندی کرده است. همان‌طور که در شکل (۱۲) نیز دیده شد، هر دو مولفه بزرگنمایی متوسط تپه، صرف‌نظر از نسبت شکل آن، به ازای طول موجهای کوتاه تقریباً بیشترین مقدار است و با افزایش طول موج کاهش می‌یابد. شکل (۱۵) نیز تغییرات مولفه‌های موافق و مخالف بزرگنمایی متوسط تپه با نسبت شکل و ضریب پواسون را بر حسب طول موج مهاجم P دسته‌بندی کرده است. همان‌طور که در شکل (۱۳) نیز دیده شد، هر دو مولفه بزرگنمایی متوسط تپه، صرف‌نظر از طول موج، همگام با نسبت شکل افزایش می‌یابد. شکل‌های فوق اثر ضریب پواسون بر بزرگنمایی متوسط تپه در برابر امواج مهاجم P را نیز نشان می‌دهند. چنانکه مشاهده می‌شود، اثر ضریب پواسون بر بزرگنمایی متوسط تپه نقش ثانویه دارد. در تپه‌های با نسبت شکل کوچک تا متوسط، اثر ضریب پواسون عملاً غیر قابل توجه است. بزرگنمایی متوسط تپه‌های با نسبت شکل بزرگتر، خصوصاً در مورد امواج بسیار کوچک، بیش از دیگر موارد به ضریب پواسون حساسیت دارد. از طرفی چنانکه انتظار می‌رود، با افزایش ضریب پواسون که معادل افزایش طول موج P است، بزرگنمایی متوسط تپه کاهش می‌یابد.

#### ۶- کاربردهای مهندسی

اگرچه بسیاری از روشهای ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای بر اساس خصوصیات حرکت خفیف زمین صورت می‌گیرند، اما به دلیل محافظه‌کارانه بودن فرض رفتار الاستیک خاک، نتایج آن به زمین‌لرزه‌های قوی تعمیم داده می‌شوند. ارزیابی ضرایب متوسط بزرگنمایی آبرفت (AHSA) بر حسب سرعت موج



شکل ۱۴ - دسته‌بندی تغییرات بزرگنمایی متوسط تپه بر حسب نسبت شکل؛ در هر نمودار محور افقی محدوده‌های پرودیک ۱ تا ۵ و محور قائم بزرگنمایی را نشان می‌دهد؛ در بالای هر نمودار نوع موج مهاجم، مولفه تغییر مکان و نسبت شکل مشخص شده است.



شکل ۱۵ - دسته‌بندی تغییرات بزرگنمایی متوسط تپه بر حسب بازه پررودیک؛ در هر نمودار محور افقی نسبت شکلهای ۰/۱ تا ۰/۷ و محور قائم بزرگنمایی را نشان می‌دهد؛ در بالای هر نمودار نوع موج نمودار مکان و محدوده پررودیک مشخص شده است.

جدول ۱ - مولفه موافق بزرگنمایی متوسط تپه برای حالت موج مهاجم SV

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

#### ۶-۱- ریزپهنه‌بندی بر حسب پرپود مشخصه

معادله زیر که با توجه به شکلهای (۱۰) و (۱۱) به دست آمده است، پرپود مشخصه بدون بعد تپه نیم‌سینوسی را به صورت تابعی از پارامتر نسبت شکل (SR) ارائه می‌دهد؛ با توجه به تاثیر اندک ضریب پواسون، معادله زیر بر اساس میانگین پرپودهای مشخصه نظیر به دست آمده است.

$$T_{2D} = 2.9(SR)^{0.7} \quad (۳)$$

با استفاده از معادله فوق و با داشتن ابعاد تپه‌های دوبعدی نیم‌سینوسی شکل، به راحتی می‌توان نقشه‌های ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای بر حسب پرپود طبیعی آبرفت را اصلاح کرد.

#### ۶-۲- ریزپهنه‌بندی بر حسب بزرگنمایی متوسط تپه

جداول (۱) و (۲) مولفه‌های افقی و قائم بزرگنمایی متوسط تپه‌های نیم‌سینوسی را برای امواج مهاجم قائم SV بر حسب بازه‌های پرپودیک و نسبت شکل بیان کرده است. ضرایب بزرگنمایی ارائه شده، با توجه به اثر فرعی ضریب پواسون در قیاس با اثر بازه‌های پرپودیک و نسبت شکل، از میانگین‌گیری منحنیهای شکلهای (۱۴) و (۱۵) برای ضرایب پواسون مختلف به دست آمده است. با استفاده از جداول فوق و با داشتن ابعاد تپه‌های دوبعدی نیم‌سینوسی شکل، به راحتی می‌توان نقشه‌های

برشی متوسط ۳۰ متر فوقانی و نیز ریزپهنه‌بندی بر اساس نگاشتهای خردلرزه‌ها [۱۷] و انفجارهای هسته‌ای [۱۸]، شواهدی بر این مدعا هستند. از طرفی دقیقترین روشهای ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای که بر تحلیلهای یک‌بعدی دینامیکی آبرفت متکی اند، امواج مهاجم را قائم و لایه‌های خاک و سطح فوقانی زمین را افقی فرض می‌کنند. تشابه فرضهای تحقیق حاضر با دو فرض اخیر این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان نتایج آن را برای تدقیق مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای مورد استفاده قرار داد. اگرچه روشهای متعارف ریزپهنه‌بندی تنها رفتار زمین و تحقیق حاضر تنها هندسه سطح فوقانی آن را مد نظر قرار داده‌اند، اما ملحوظ کردن 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 [۱۹] قابل استفاده هستند، اما با توجه به توضیحات فوق‌الذکر، به محیطهای ناهمگن دارای لایه‌بندی موازی نیز قابل تعمیم‌اند. بدیهی است که تدقیق بیشتر روشهای ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای مستلزم انجام تحقیقات بیشتر است. بنابر دلایل مهندسی و نیز عرف ریزپهنه‌بندی، رابطه و جداول این بخش تنها امواج برشی را مد نظر قرار داده‌اند.

جدول ۲: مولفه مخالف بزرگنمایی متوسط تپه برای حالت موج مهاجم SV

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

حساسیت سنجی نشان داد که میزان این تاثیر صرف نظر 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 نشان داده شد 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. یک رابطه و دو جدول کاربردی برای برآورد پریود مشخصه و همچنین بزرگنمایی متوسط تپه ارائه شدند که می‌توانند در مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای بر حسب ضرایب تقویت بازه‌های پررودیک مختلف را اصلاح کرد.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شد که تپه‌های نیم‌سینوسی دوبردی می‌توانند با بزرگنمایی دامنه مولفه موافق حرکت، ایجاد مولفه 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 تاثیر قرار دهند. مطالعات

## مراجع

1. Trifunac, M. D., and Hudson, D. E., "Analysis of the Pacoima Dam Accelerograms – San Fernando Earthquake of 1971," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 61, pp. 1393-1411, 1971.
2. Boore, D. M., "The Effect of Simple Topography on Seismic Waves: Implications for the Accelerations Recorded at Pacoima Dam, San Fernando Valley, California," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 63, pp. 1603-1609, 1973.
3. 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," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 86, pp. S139-S208, 1996.
4. Celebi, M., "Topographic and Geological Amplification: Case Studies and Engineering Implications," *Structural Safety*, Vol. 10, pp. 199-217, 1991.
5. Celebi, M., "Topographical and Geological Amplifications Determined from Strong-Motion and Aftershock Records of the 3 March 1985 Chile Earthquake," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 77, pp. 1147-1167, 1987.
6. Athanasopoulos, G. A., Pelekis, P. C. and Leonidou, E. A., "Effects of Surface Topography on Seismic Ground Response in the Egion (Greece) 15-6-1995 Earthquake," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18, pp. 135-149, 1999.
7. 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.

8. Bouchon, M., "Effect of Topography on Surface Motion," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 63, pp. 615-632, 1973.
9. Geli, L., Bard, P. V., and Julien, B., "The Effect of Topography on Earthquake Ground Motion: A Review and New Results," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 78, pp. 42-63, 1988.
10. Bouchon, M., Schultz, C. A., and Toksoz, M. N., "Effect of Three-Dimensional Topography on Seismic Motion," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. B3, pp. 5835-5846, 1996.
11. Komatitsch, D., and Vilotte, J. P., "The Spectral Element Method: An Efficient Tool to Simulate the Seismic Response of 2D and 3D Geological Structures," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 88, pp. 368-392, 1998.
۱۲. کمالیان، م.، "تحلیل دینامیکی محیط متخلخل اشباع ارتجاعی خمیری در فضای زمان با استفاده از ترکیب روشهای اجزای محدود و عناصر مرزی،" رساله دکترا، دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.
13. Kamalian, M., Gattmiri, 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(2), pp. 35-45, 2003.
۱۴. کمالیان، م.، و سهرابی بیدار، ع.، "تحلیل دینامیکی عوارض توپوگرافی دوبعدی در حوزه زمان با استفاده از روش اجزای مرزی،" نشریه علمی پژوهشی استقلال؛ سال ۲۴، شماره ۲، صفحه ۵۱-۶۸، ۱۳۸۴.
15. Kamalian, M., Jafari, M. K., Dehghan, K., Sohrabi, A., and Razmkhah, A., "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, pp. 231-236, 2003.
16. Kamalian, M., Gattmiri, 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, pp. 871-887, 2007.
17. The Technical Committee for Earthquake Geotechnical Eng. (TC4), "Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard" The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Eng., 1993.
18. Rogers, A. M., Borchardt, R. D., Covington, P. A., and Perkins, D. M., "A Comparative Ground Motion Study near Los Angeles Using Recordings of Nevada Nuclear Tests and the 1971 San Fernando Earthquake," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 74, pp. 1925-1949, 1984.
۱۹. رحیمیان، م. و همکاران، "تاثیر 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، شهریور ۱۳۸۲.