

## الگوی بزرگ‌نمایی دره‌های نیم‌سینوسی در برابر امواج مهاجم قائم SH

مهدی پنجمی<sup>۱\*</sup>، محسن کامالیان<sup>۲</sup>، جعفر عسگری مارنانی<sup>۳</sup> و محمد کاظم جعفری<sup>۲</sup>  
۱. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه عمران، تهران، ایران  
۲. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، تهران، ایران  
۳. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، گروه عمران، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۱/۲۷ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۰۴/۳۰)

چکیده -  
(SH)

(SH)

(SV)

.SH

واژگان کلیدی:

### Amplification Pattern of Semi-Sine Shaped Valleys Subjected to Vertically Propagating Incident SH Waves

M. Panji<sup>1</sup>, M. Kamalian<sup>2</sup>, J. Asgari Marnani<sup>3</sup> and M. K. Jafari<sup>2</sup>

1. Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran
2. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran
3. Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran

**Abstract:** *In this paper, different amplification patterns of 2-D semi-sine shaped valleys and their surroundings subjected to vertically propagating incident out-of-plane SH waves are presented. The half-plane time-domain BEM approach proposed by the authors was used to obtain the results. Compared to the previous studies on boundary elements, avoiding a wide range of ground surface meshing and focusing the elements only on the valley surface were the obvious distinctions of the present study. In this regard, effects of key parameters such as shape ratio of the valley and wavelength of incident waves were considered. Evaluation*

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.panji@srbiau.ac.ir

of the results indicated significant influence of the mentioned parameters on the valley surface behavior. Also, the amplification potential of semi-sine shaped valley under vertically out-of-plane SH wave had a higher amplitude than in-plane SV wave. The obtained results can be used for seismic micro-zonation discussion in order to correct and complete the existing studies.

**Keywords:** Half-plane BEM, Time-domain, Semi-sine shaped valley, Amplification pattern, SH wave.

$U^{N-n+1}, Q^{N-n+1}$ به ترتیب هسته دینامیکی تغییر مکان و تنش نیم صفحه		دامنه حداکثر (متر)	$a_{max}$
نسبت شکل دره	SR	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	c
پریود بی بعد	T	فرکانس غالب موج مهاجم (۱/۰ ثانیه)	$f_p$
پارامتر شیفت زمان (ثانیه)	$t_0$	به ترتیب ماتریس ضرایب حاصل از هسته های دینامیکی تنش و تغییر مکان	H, G
حرکت آزاد سطح زمین	$u^{ff}$	به ترتیب نیم پهنا (متر) و عمق (متر) دره	b, h
به ترتیب اختلاف فاز موج مهاجم و انعکاس یافته	$\alpha^{inc}, \alpha^{ref}$	تابع هویساید	H(.)
طول موج مهاجم	$\lambda$	بردار نرمال عمود بر سطح زمین	n
به ترتیب مدول برشی و چگالی جرمی نیم صفحه	$\mu, \rho$	به ترتیب تغییر مکان و تنش مرزی	u, q
فرکانس بی بعد	$\eta$	به ترتیب حل اساسی تغییر مکان و تنش نیم صفحه	$u^*, q^*$

## ۱- مقدمه

در دانش زلزله شناسی و لرزه خیزی امروز که حاصل مطالعات گسترده پژوهشگران این عرصه است همواره به موضوع اثرات ساختگاه<sup>۱</sup> به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی اذعان شده است. پیچیدگی پنهان در مسئله مزبور موجب می شود که نتوان از آن به ویژه برای کشور پهناور ایران که در منطقه ای با لرزه خیزی بالا و شرایط ناهمسان توپوگرافی واقع شده به سادگی عبور کرد. مدل سازی ساده تر و در عین حال دقیق تر ناهمواری های سطحی و زیر سطحی می تواند در بالا بردن گستره این دانش مثمر ثمر واقع شود.

ادبیات فنی نشان داد [۱]، تهیه مدل عوارض توپوگرافی قابل تقسیم به سه دسته روش تحلیلی، نیمه تحلیلی و عددی است. هرچند در روش های تحلیلی و نیمه تحلیلی دقت پاسخ ها بهتر و تقریب های استفاده شده کمتر است اما مدل ها محدود به برخی از هندسه های ساده و غیر مرکب می شوند. از

آن جمله می توان به مطالعات تحلیلی تریفوناک [۲] و وانگ و تریفوناک [۳] و نتایج نیمه تحلیلی ژو و چن [۴] و چن و همکاران [۵] اشاره داشت. عدم همخوانی این مدل ها با طبیعت، ناگزیر مطالعات پژوهشگران و محققان را به سمت روش های انعطاف پذیرتر همچون روش های عددی رهنمون ساخت.

روش های عددی به کار گرفته شده در مهندسی عمران و به طور خاص در ژئوتکنیک لرزه ای، به روش های حجمی<sup>۲</sup>، مرزی<sup>۳</sup> و تلفیقی<sup>۴</sup> [۶] محدود می شود. از نام آشناترین روش های حجمی می توان به روش اجزای محدود<sup>۵</sup> و روش تفاضل محدود<sup>۶</sup> اشاره داشت. در این روش ها دامنه محیط مورد بررسی گسسته شده و شرایط مرزی حاکم از قبیل شرایط تشعشع امواج<sup>۷</sup> در بی کران [۷] با تعریف یکسری مرزهای تقریبی جاذب انرژی<sup>۸</sup> در پیرامون ناحیه مورد نظر برقرار می شود. علی رغم وجود مبانی ریاضیات ساده، قدمت

یک سده و توسعه یافتن این روش‌ها به محیط‌های غیرخطی، برای مدل‌سازی محیط‌های نامحدود و نیمه‌نامحدود (عوارض توپوگرافی)، کاهش دقت و پیچیدگی در مدل‌سازی با آن‌ها همراه است. در مقابل، روش‌های مرزی همچون روش اجزای مرزی<sup>۹</sup> به چشم می‌خورند. هرچند فرمول‌بندی این روش صرفاً برای تحلیل محیط‌های الاستیک خطی توسعه داده شده منتها این قابلیت را به کاربر می‌دهد که بتواند تنها با مش بندی مرز هندسی جسم به بررسی مسئله بپردازد. اقتناع خودکار شرایط تشعشع امواج در بی‌کران از جمله مزایای مهم روش مزبور است. با این توصیف، با گذشت بیش از چهار دهه روش اجزای مرزی همواره یک روش مطلوب برای مدل‌سازی عوارض توپوگرافی به حساب می‌آید.

روش اجزای مرزی برای تحلیل عوارض توپوگرافی در دو حوزه زمان و فرکانس توسعه داده شده است. منتها استفاده از محاسنی چون تلفیق با دیگر روش‌های عددی و تحلیل محیط‌های غیر خطی، تحلیل مسایل مختلف مشتمل بر هندسه‌های وابسته به زمان و استخراج مقادیر پاسخ حقیقی، تنها در تحلیل‌های حاکم در حوزه زمان امکانپذیر است. فریدمن و شاو [۸] را شاید بتوان از جمله اولین محققان پیشرو در استفاده از فرمول‌بندی اجزای مرزی در حوزه زمان برای بررسی مسئله پراکنش امواج دانست. کل و همکاران [۹] توانستند نخستین شکل از هسته‌های دینامیکی محیط کامل<sup>۱۰</sup> معادله موج اسکالر را برای فرمول‌بندی اجزای مرزی در حوزه زمان پیشنهاد دهند. اما با توجه به عدم رایجی هسته‌های خارج از صفحه ترکشن<sup>۱۱</sup> توسط این محققان و دقت ضعیف هسته‌های تغییر مکان آن‌ها، فرمول‌بندی پیشنهاد شده آن‌ها امروزه نتوانسته است در تحلیل مسایل مختلف لرزه‌ای گسترش یابد. اولین فرمول‌بندی جامع اجزای مرزی در حوزه زمان برای مسایل الاستودینامیک خارج از صفحه به همراه هسته‌های محیط کامل تغییر مکان و ترکشن، توسط منصور [۱۰] ارائه شد. با توجه به در نظر گرفتن توابع هویساید<sup>۱۲</sup> در استخراج فرمول‌بندی توسط این محقق، ضمن کاهش دقت

هسته‌های ترکشن، نتایج آن بر حسب حالات مختلف جبهه موج گزارش شده است. در ادامه تحقیقات منصور، دمیرل و وانگ [۱۱]، یو و همکاران [۱۲] و سوآرس و منصور [۱۳] توانستند با بهبود در فرمول‌بندی اجزای مرزی در حوزه زمان شکل بهتری از آن‌ها به نمایش بگذارند. هسته‌های محیط کامل خارج از صفحه رایج شده توسط اسرائیل و بنرجی [۱۴] را می‌توان به عنوان شکل‌ترین و دقیق‌ترین نتایج ارائه شده در این خصوص تا آن زمان دانست. این محققان بدون در نظر گرفتن توابع هویساید در فرایند ریاضیات استخراج هسته‌ها توانستند برخلاف نتایج دیگر پژوهشگران، شکل بسته و فشرده‌ای از آن‌ها ارائه دهند. بعدها کمالیان و همکاران [۱۵] با اصلاح هسته‌های محیط کامل درون صفحه این مؤلفان [۱۶] از آن‌ها در الگوریتم‌های اجزای مرزی در حوزه زمان و تحلیل مسایل مختلف ژئوتکنیک لرزه‌ای بهره گرفتند [۱۷-۱۸].

در استفاده از فرمول‌بندی اجزای مرزی برای مدل‌سازی عوارض توپوگرافی چه در حوزه زمان و چه در حوزه‌های تبدیل یافته دو روش حل پیشنهاد شده است [۱۹]. در روش اول، محققان از فرمول‌بندی اجزای مرزی محیط کامل بهره می‌گیرند. در این صورت مش بندی سطح زمین تا یک فاصله خیلی دور از عارضه به جهت اقتناع تقریبی شرایط تنش آزاد بر روی آن اجتناب ناپذیر است. همچنین به سبب دوری از مشکلات انتگرال گیری عددی لازم است محیط مورد نظر با یکسری اجزای مجازی [۲۰] بسته شود. از جمله محققانی که بدین طریق توانستند به مدل‌سازی و تحلیل لرزه‌ای عوارض دره‌ای شکل بپردازند می‌توان به پاپاجورجیو و کیم [۲۱] و دراوینسکی [۲۲] در حوزه فرکانس و تاکمیا و فوجی‌وارا [۲۳] و کمالیان و همکاران [۲۴-۲۶] در حوزه زمان اشاره داشت. از سوی دیگر و در روش دوم، پژوهشگران می‌توانند از فرمول‌بندی اجزای مرزی نیم‌صفحه<sup>۱۳</sup> استفاده کنند. در این حالت عددی سازی و تهیه الگوریتم‌های اجزای مرزی نسبت به محیط کامل پیچیده‌تر است. منتها استلزام به گسسته‌سازی سطح صاف زمین از بین رفته و شبکه بندی تنها در سطح

ناهموار شده عارضه تمرکز می‌یابد. علاوه بر این شرایط تنش آزاد سطح زمین به طور دقیق اقناع می‌شود. کاهش بسیار چشم‌گیر زمان تحلیل به ویژه در حوزه زمان از مهم‌ترین مزایای استفاده از این نوع فرمول‌بندی است. به جهت سهولت فرمول‌بندی در حوزه فرکانس می‌توان از محققان بیشتری همچون وانگ و جنینگ [۲۷]، سانچزسما و روزن بلو [۲۸]، سانچزسما و اسکواول [۲۹]، رینوز و همکاران [۳۰] و آسیلیو و همکاران [۳۱] برای تحلیل عوارض دره‌ای شکل به کمک اجزای مرزی نیم‌صفحه نام برد. ولیکن در حوزه زمان تنها نتایج هابری [۳۲] و بلاچکو و چانگ [۳۳] به چشم می‌خورد. اخیراً پنجی و همکاران [۳۴] توانسته‌اند به ارایه یک فرمول‌بندی توسعه یافته اجزای مرزی نیم‌صفحه در حوزه زمان به همراه هسته‌های دینامیکی آن پردازند و از آن‌ها در تحلیل مسایل مختلف لرزه‌ای و انتشار امواج گذرا بهره بگیرند.

مقاله حاضر بر آن است تا با به‌کارگیری روش اجزای مرزی نیم‌صفحه و هسته‌های دینامیکی اسکالر دوبعدی نیم‌صفحه، رفتار لرزه‌ای دره‌های نیم‌سینوسی را در برابر امواج مهاجم قائم برون از صفحه‌ی (SH) مورد بررسی قرار دهد. تا جایی که مؤلفان اطلاع دارند، این اولین بار است که این مسئله مورد مطالعه حساسیت‌سنجی قرار می‌گیرد. البته بوشون [۳۵] نیز پیش از این پاسخ لرزه‌ای دره‌های نیم‌سینوسی در برابر امواج مهاجم SH را با روش اکی‌لارنر در فضای فرکانس تحلیل کرده بود. اما دامنه تحقیقات او محدود و نتایج صرفاً در برخی از نسبت شکل‌های دره (کمتر از ۰/۸) ارایه شده بود. گستره‌ی مطالعات به امواج مهاجم SH قائم محدود شده است؛ چه کاهش تدریجی سختی لایه‌های تحت‌الارضی با نزدیک شدن به سطح زمین راستای انتشار امواج حجمی مهاجم را قائم می‌سازد و طبیعتاً این حالت کاربرد مهندسی بیشتری دارد. مقاله‌ی حاضر بر آن است تا با بررسی رفتار لرزه‌ای دره‌های نیم‌سینوسی در برابر امواج برون صفحه SH سه سؤال اساسی را پاسخ گوید: الگوی بزرگ‌نمایی دره

نیم‌سینوسی در برابر امواج مهاجم قائم SH و نیز تغییرات آن در امتداد عارضه چگونه است؟ بیشینه پتانسیل بزرگ‌نمایی امواج قائم در کدام نقطه از عارضه رخ می‌دهد و تغییرات آن با پارامترهای نسبت شکل و طول موج چگونه است؟ دره‌های نیم‌سینوسی در برابر امواج مهاجم قائم SH پتانسیل بزرگ‌نمایی بیشتری دارد یا در برابر امواج مهاجم قائم SV، که بیشتر توسط برخی مؤلفان مقاله حاضر با استفاده از روش اجزای مرزی محیط کامل مورد بررسی قرار گرفتند [۲۶]؟ آیا می‌توان برای عمق دره و نیز طول موج مهاجم مقادیری حدی پیدا کرد که فراتر از آن اثر عارضه قابل صرف‌نظر کردن باشد؟ بدیهی است تمودارها و جداولی که در مقاله‌ی حاضر ارائه شده‌اند، از آنجایی که بر اساس یک روش عددی نوین برآورد گردیده‌اند، می‌توانند به عنوان محکی جدید برای اعتبارسنجی روش‌های عددی سابق و لاحق مورد استفاده قرار گیرند.

## ۲- فرمول‌بندی اجزای مرزی نیم‌صفحه

معادله موج اسکالر دوبعدی و شرایط مرزی حاکم بر سطح زمین برای یک محیط الاستیک خطی همگن و همسان به ترتیب مطابق زیر ارایه می‌شود [۷]:

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

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

$$\mu \left. \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial n} \right|_{y=0} = 0 \quad \text{و} \quad (2)$$

به طوری که در معادله فوق  $c$  سرعت موج برشی،  $u(x, y, t)$  و  $b(x, y, t)$  به ترتیب تغییر مکان و نیروهای حجمی خارج از صفحه در مختصات  $(x, y)$  و زمان حاضر  $t$ ،  $\mu$  مدول برشی و  $n$  بردار قائم سطح زمین است. حل منفرد<sup>۱۴</sup> معادله (۱) با اقناع شرایط مرزی (۲) منجر به تعیین حل اساسی نیم صفحه<sup>۱۵</sup> می‌شود [۳۶]. از اعمال انتگرال باقیمانده‌های وزندار<sup>۱۶</sup> بر معادله (۱) و با صرف نظر از جملات حجمی و

شرایط اولیه، معادله انتگرال مرزی در حوزه زمان به دست می‌آید [۳۷] که در نهایت با در نظر گرفتن اصول پراکنش امواج در یک نیم صفحه به شکل زیر قابل اصلاح است [۳۰ و ۳۸-۳۹]:

$$u(\xi, t) = \int_{\Gamma} \left\{ \int_0^t \left[ u^*(x, t; \xi, \tau) \cdot q(x, \tau) - q^*(x, t; \xi, \tau) \cdot u(x, \tau) \right] d\tau \right\} d\Gamma(x) + u^{ff}(\xi, t) \quad (۳)$$

در این معادله  $u^*(x, t; \xi, \tau)$  حل اساسی نیم صفحه تغییر مکان در موقعیت  $x$  و زمان حاضر  $t$  تحت یک پالس واحد خارج از صفحه در موقعیت  $\xi$  و زمان پیشین  $\tau$  است. مشتق حل اساسی تغییر مکان نسبت به امتداد قائم به دست می‌آید.  $q$  و  $u$  نیز به ترتیب مقادیر تغییر مکان و تنش مرزی،  $c(\xi)$  زاویه شکست مرزی (که بر اساس امتداد قائم اجزای مجاور هم قابل تعیین است) و  $\Gamma(x)$  نشانگر مرز محیط مورد نظر است.  $u^{ff}$  نیز حرکت آزاد سطح زمین<sup>۱۸</sup> در عدم حضور هیچ‌گونه ناهمواری سطحی یا زیر سطحی است که به برای اقیانوس دقیق شرایط مرزی مسئله ناگزیر از این نوع فرض شده است. برای حل معادله (۳) لازم است محور زمان و مرز هندسی جسم گسسته شوند. با گسسته‌سازی محور زمان از 0 تا  $t$  به  $N$  بازه مساوی با حد فاصل  $\Delta t$  و با منظور داشتن تغییرات خطی در هر بازه زمانی، اثر انتگرال در بازه زمان بر حل‌های اساسی به صورت کاملاً تحلیلی قابل بررسی است به طوری که پس از همپوشانی گره‌های زمانی مجاور و حذف جملات منفرد ظاهری جبهه موج برای معادله فوق خواهیم داشت:

$$c(\xi) u^N(\xi) = \sum_{n=1}^N \int_{\Gamma} \left\{ \left[ U_1^{N-n+1}(x, \xi) + U_2^{N-n}(x, \xi) \right] q^n(x) - \left[ Q_1^{N-n+1}(x, \xi) + Q_2^{N-n}(x, \xi) \right] u^n(x) \right\} d\Gamma(x) + u^{ff.N}(\xi) \quad (۴)$$

در این معادله  $U_1^{N-n+1} + U_2^{N-n}$  و  $Q_1^{N-n+1} + Q_2^{N-n}$  به ترتیب هسته‌های دینامیکی نیم صفحه تغییر مکان و تنش برای معادله اسکالر موج هستند که توسط پنجمی و همکاران [۳۴] به

صورت تحلیلی ارایه شده است؛  $u^N$  و  $u^{ff.N}$  به ترتیب تغییر مکان و تغییر مکان میدان آزاد سطح زمین در گام زمانی  $N$ ،  $u^n$  و  $q^n$  به به ترتیب بردارهای تغییر مکان و تنش گره‌های مرزی‌اند. تا بدین قسمت از فرمول‌بندی، فرایند محاسبات کاملاً دقیق می‌باشد. با گسسته‌سازی مرز هندسی جسم (تنها سطح عارضه) با اجزای ایزوپارامتریک درجه دو و انجام انتگرال گیری عددی گوس<sup>۱۹</sup> و لگاریتمی ویژه به ترتیب برای انتگرال‌های نامنفرد و منفرد، معادله (۴) به شکل ماتریسی زیر قابل حصول است:

$$\sum_{n=1}^N H^{N-n+1} \{u^n\} = \sum_{n=1}^N G^{N-n+1} \{q^n\} + \{u^{ff.N}\} \quad (۵)$$

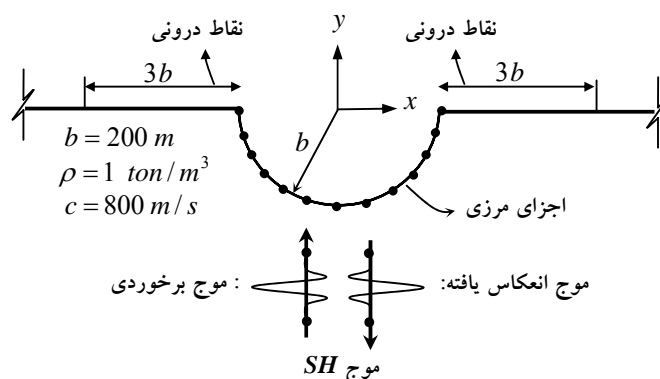
به طوری که  $H^{N-n+1}$  و  $G^{N-n+1}$  ماتریس‌هایی هستند که عناصر آن به ترتیب از انتگرال گیری عددی هسته‌های نیم صفحه تنش و تغییر مکان بر روی اجزای مرزی به دست می‌آیند. پس از اعمال شرایط مرزی حاکم در گره‌ها و آرایش ستون‌های متناظر با مقادیر مجهول مرزی در سمت چپ معادله فوق برای شکل قابل حل آن می‌توان نوشت:

$$[A_1^1] \{X^N\} = [B_1^1] \{Y^N\} + \{R^N\} + \{u^{ff.N}\} \quad (۶)$$

در معادله فوق  $X^N$  و  $Y^N$  به ترتیب مؤید مقادیر مجهول و معلوم مرزی و  $R^N$  اثر تاریخیچه زمانی لحظات پیشین بر گره زمانی  $N$  مطابق زیر است:

$$\{R^N\} = \sum_{n=1}^{N-1} \left( G^{N-n+1} \{q^n\} - H^{N-n+1} \{u^n\} \right) \quad (۷)$$

پس از حل معادله (۶) و تعیین کلیه پاسخ‌ها اعم از تغییر مکان و تنش بر روی نقاط گرهی سطح دره، با برابر واحد قرار دادن زاویه شکست مرزی در معادله (۳) برای هر نقطه درونی از محیط نیم صفحه یا سطح زمین مجاور دره مقادیر تغییر مکان نیز قابل استخراج است.



شکل ۱- مدل شماتیک مش بندی شده یک دره نیم دایره‌ای با اجزای مرزی نیم صفحه

### ۳- صحنه گذاری

فرمول‌بندی اجزای مرزی نیم صفحه در حوزه زمان تشریح شده در فوق در یک الگوریتم جامع موسوم به DASBEM<sup>۲</sup> به کار گرفته شده است. برای اعتبارسنجی این الگوریتم، یک دره نیم دایره‌ای که پاسخ‌های تحلیلی و عددی آن در دسترس است شکل (۱) تحت امواج مهاجم قائم SH مورد بررسی و تحلیل لرزه‌ای قرار گرفته است. چنانچه در شکل (۱) مشاهده می‌شود مبتنی بر فرمول‌بندی اجزای مرزی نیم صفحه تنها سطح دره نیم دایره‌ای با اجزای مرزی گسسته شده است. حرکت ورودی از نوع موجک ریکر<sup>۱۱</sup> و ناگزیر از جنس حرکت آزاد سطح زمین فرض شده که با در نظر گرفتن اثرات اختلاف فاز ناشی از عمق استقرار گره مرزی و انعکاس از سطح زمین برای انتشار قائم مطابق زیر قابل اصلاح و بازنویسی است [۳۴]:

$$u^{ff}(y, t) = a_{max} \cdot \left[ \left[ 1 - 2 \left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc} \right)^2 \right] e^{-\left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{inc} \right)^2} + \left[ 1 - 2 \left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref} \right)^2 \right] e^{-\left( \frac{\pi f_p}{c} \alpha^{ref} \right)^2} \right] \times H \left( t - \frac{|y|}{c} \right) \quad (8)$$

در معادله فوق  $a_{max}$  دامنه حداکثر تاریخچه زمانی،  $f_p$  فرکانس غالب موج ورودی،  $H(\cdot)$  تابع هویساید،  $\alpha^{inc}$

و  $\alpha^{ref}$  نیز به ترتیب اختلاف فاز موج مهاجم و انعکاس یافته مطابق زیر است:

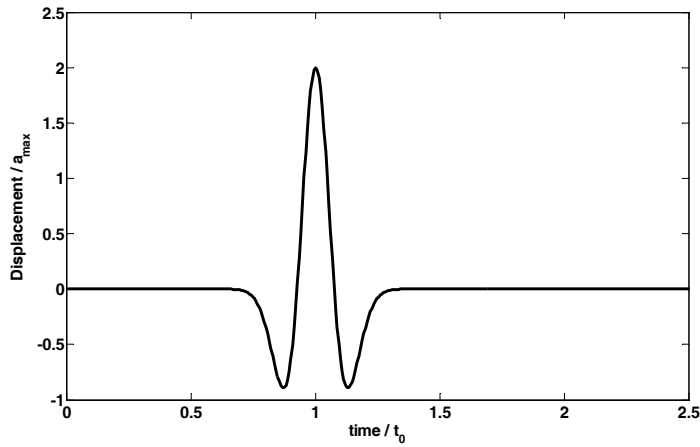
$$\alpha^{inc} = c(t - t_0) + |y| \quad (9)$$

$$\alpha^{ref} = c(t - t_0) - |y|$$

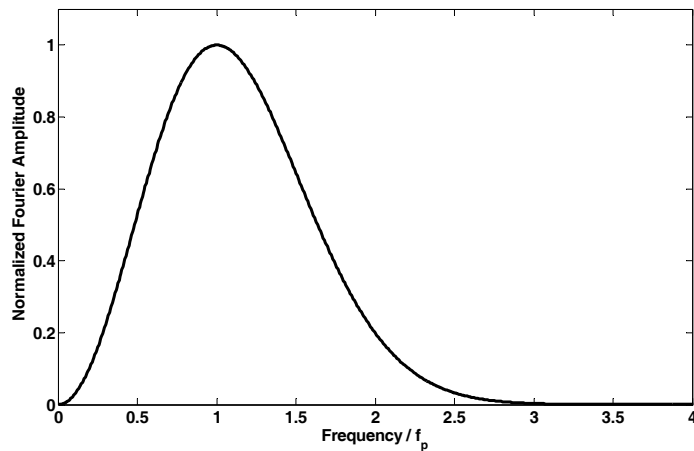
به طوری که  $t_0$  مبین زمان متناظر با دامنه حداکثر تاریخچه زمانی موج (پارامتر اختلاف زمان) است. در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) نمونه‌ای از حرکت ورودی برای یک نقطه واقع بر سطح زمین به ترتیب در حوزه زمان و فرکانس نشان داده شده است. با توجه به مقادیر مفروض در شکل (۱) و در نظر گرفتن حداقل ۲۰ متر برای گره‌های مرزی، به سطح دره ۳۱ گره و در هر طرف آن ۲۰ نقطه درونی تخصیص داده شده است. این مسئله با ۱۲۰ گام زمانی ۰/۰۲۵ ثانیه حل شده است. دامنه حداکثر، فرکانس غالب و پارامتر تغییر مبدا زمانی به ترتیب برابر ۰/۰۱ متر، ۳ هرتز و ۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. با علم بر اینکه اکثر نتایج ارایه شده برای مسئله مزبور در حوزه فرکانس و بر حسب فرکانس‌های بی بعد ارایه شده لازم است این پارامتر مطابق زیر تعریف شود:

$$\eta = \frac{\omega b}{\pi c} \quad (10)$$

در رابطه فوق  $\eta$  فرکانس بی بعد<sup>۲۲</sup>،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $b$  نیم پهنا دره و  $c$  سرعت موج برشی است. در



(الف)



(ب)

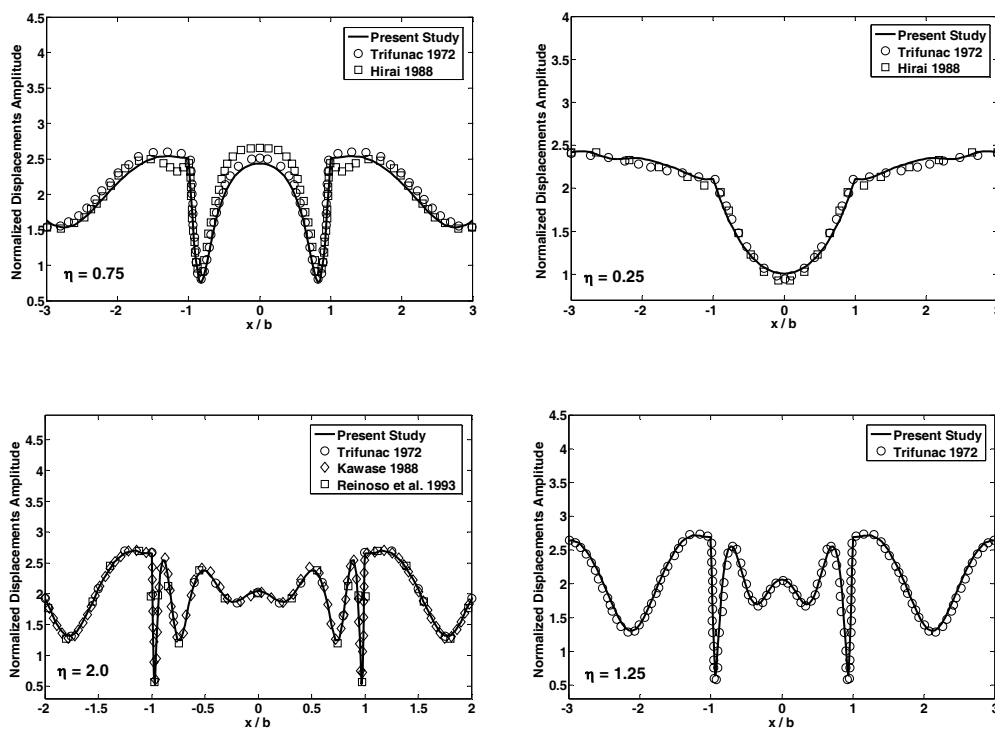
شکل ۲- تغییر مکان نرمالایز شده موج مهاجم ورودی (موجک ریکر) برای یک نقطه واقع بر سطح زمین  
(الف) در حوزه زمان (ب) در حوزه فرکانس

مرزی مستقیم در حوزه زمان هابری [۳۲] مقایسه شده است. چنانچه ملاحظه می شود نتایج مطالعه حاضر از دقت مطلوب برخوردار است.

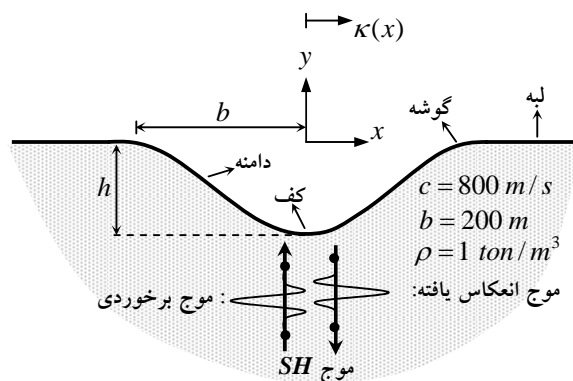
#### ۴- متدولوژی مطالعه عددی

به لحاظ همخوانی هندسه دره های دوعدی نیم سینوسی

شکل (۳) پاسخ نرمالایز شده (نسبت دامنه فوریه پاسخ به دامنه فوریه موج مهاجم) سطح دره و مجاور آن در فرکانس های بی بعد ۰/۲۵، ۰/۷۵، ۱/۲۵ و ۲/۰ ارایه شده و با نتایج تحلیلی تریفوناک [۲]، اجزای مرزی نامستقیم در حوزه فرکانس کیواس [۳۸] و رینوز و همکاران [۳۰] و اجزای



شکل ۳- صحنه‌گذاری نتایج حاصل از مطالعه حاضر با برخی از پاسخ‌های تحلیلی و عددی موجود برای تغییر مکان نرمالایز شده سطح دره نیم دایره‌ای و مجاور آن در فرکانس‌های بی‌بعد مختلف ( $\eta$ )



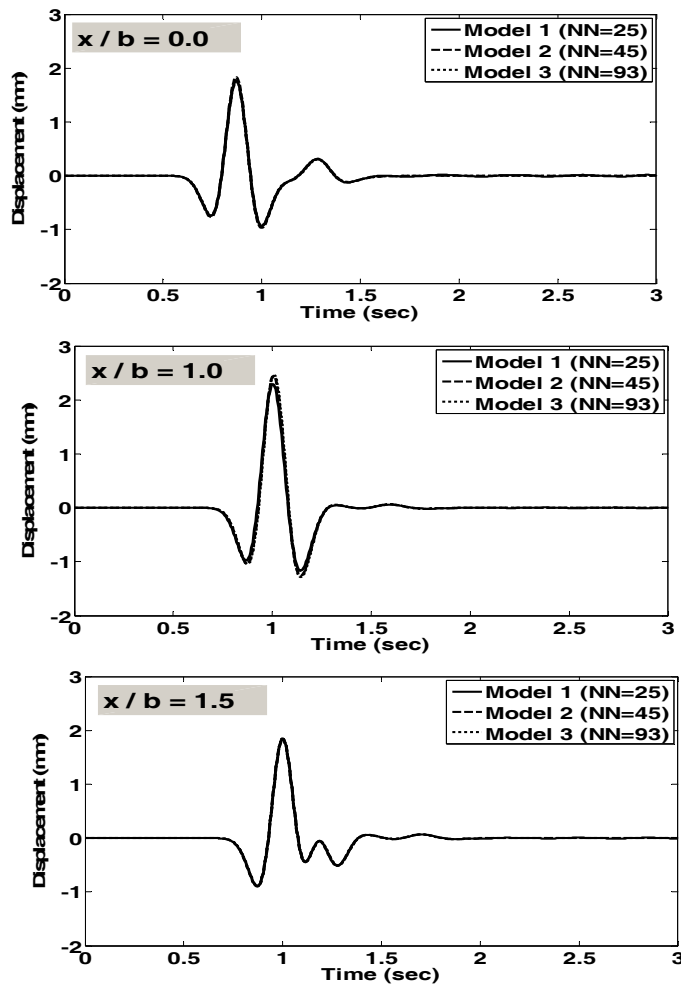
شکل ۴- دره دوبعدی نیم‌سینوسی تحت امواج مهاجم قائم SH با مشخصات مفروض (مطالعه عددی)

شده است:

$$\begin{aligned} \kappa(x) &= -0.5h(1 + \cos(\pi x/b)) & |x| \leq b \\ \kappa(x) &= 0 & |x| > b \end{aligned} \quad (11)$$

با آنچه در طبیعت به صورت فیزیکی یافت می‌شود، از این مقطع بر اساس تابع زیر و مطابق مشخصات مفروض در شکل (۴) برای مطالعه عددی بهره گرفته





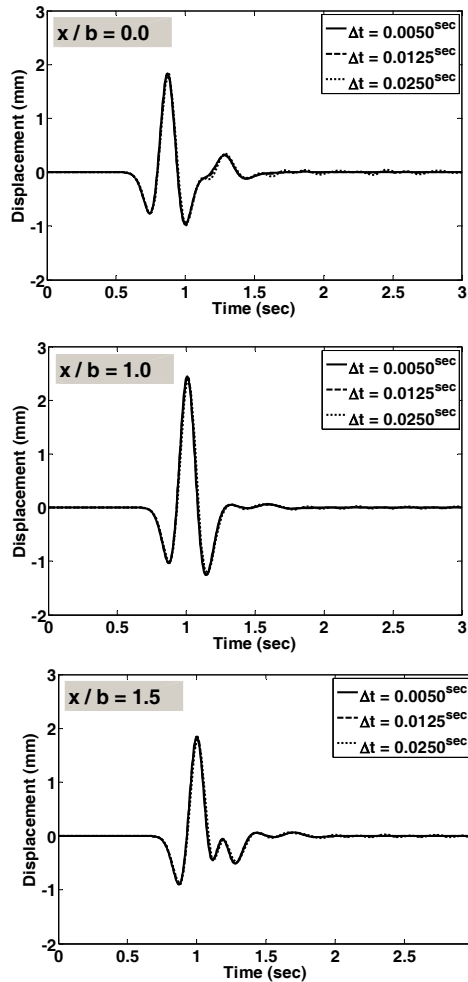
شکل ۵- همگرایی تاریخچه زمانی تغییر مکان نقاط مختلف سطح دره و مجاور آن برای سه مدل تهیه شده (NN) تعداد گره‌های در نظر گرفته شده بر روی سطح دره است و  $x/b$  برابر ۰/۰، ۱/۰ و ۱/۵ به ترتیب مبین کف، گوشه و یک نقطه از لبه دره است)

$$T = \frac{\lambda}{\eta} = \frac{\pi c}{\omega b} = \frac{\lambda}{v b} \quad (۱۲-الف)$$

$$SR = \frac{h}{b} \quad (۱۲-ب)$$

به طوری که  $T$  پریود بی بعد<sup>۳</sup>،  $SR$  نسبت شکل دره و برابر نسبت عمق به نیم پهنای عارضه و  $\lambda$  طول موج مهاجم است. به تعبیر فیزیکی، مقادیر مختلف پریود بی بعد مبین طول موج‌هایی برابر همان مقادیر متناهی بر حسب پهنای کل

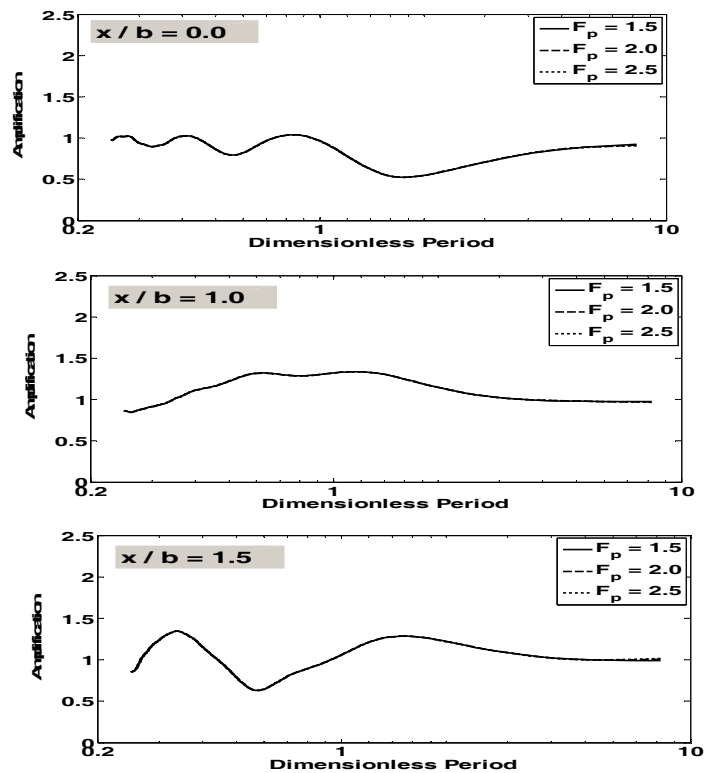
در این معادله  $h$  عمق دره و  $\kappa(x)$  مبین تغییرات تابع سینوس بر حسب فاصله از مرکز آن است. برای دستیابی به پاسخ سؤالات مطرح شده در بند آخر مقدمه لازم است پارامتر پریود بی بعد و نسبت شکل دره که با توجه به علایق مهندسی و همخوانی آن با طبیعت برابر مقادیر ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷، ۱، ۱/۵ و ۲ فرض شده به ترتیب مطابق معادلات زیر تعریف شود:



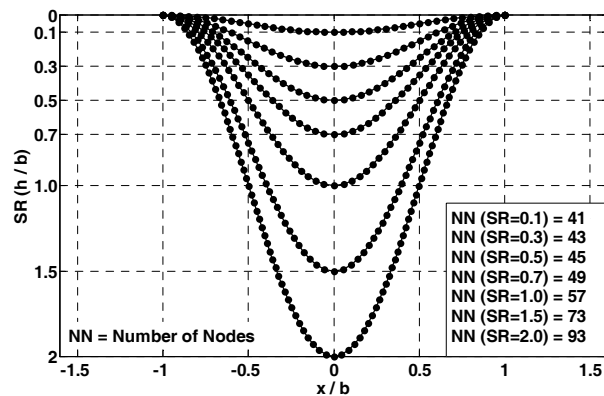
شکل (۶) همگرایی تاریخیچه زمانی تغییر مکان نقاط مختلف سطح دره و مجاور آن برای سه گام زمانی  $x/b$  برابر ۰/۰، ۱/۰ و ۱/۵ به ترتیب مبین نقاط کف، گوشه و یک نقطه از لبه دره است)

شده، بهره گرفته می‌شود. مبتنی بر این روش، پس از تقسیم محدوده پریودیک مزبور به ۵ بازه کوچکتر ۰/۲۵ تا ۰/۵۰ (P1)، ۰/۵۰ تا ۱/۰۰ (P2)، ۱/۰۰ تا ۲/۰۰ (P3)، ۲/۰۰ تا ۴/۱۷ (P4) و ۴/۱۷ تا ۸/۳۳ (P5) به ترتیب متناظر با طول موج‌های خیلی کوتاه، کوتاه، متوسط، بلند و خیلی بلند، میانگین پاسخ‌ها در این نواحی تعیین شده و در نهایت برای هر گره مرزی تنها یک مقدار بزرگ‌نمایی (نسبت دامنه فوریه مؤلفه حرکت به دامنه فوریه حرکت آزاد سطح زمین) میانگین در هر بازه ارایه می‌شود. بهره‌گیری از مفهوم بزرگ‌نمایی

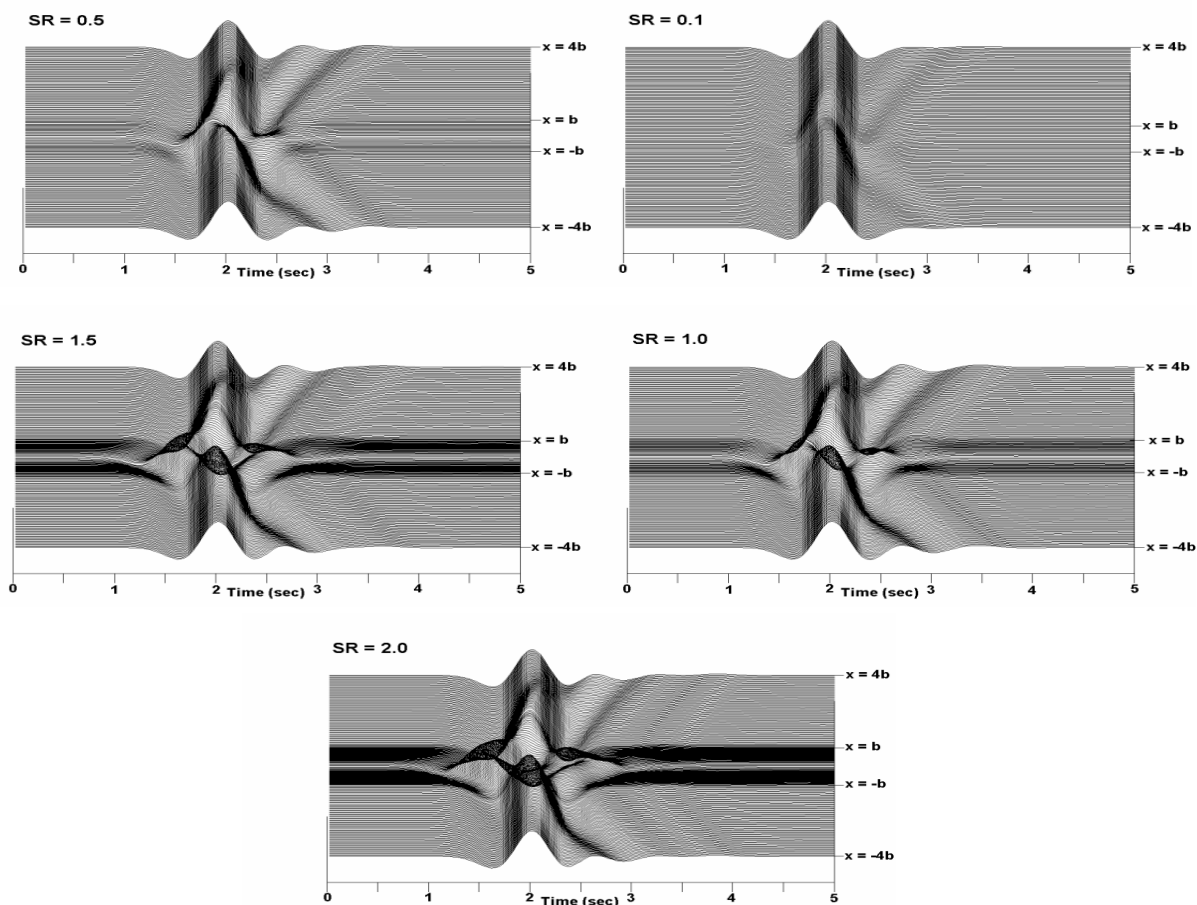
عارضه‌اند. حرکت ورودی مطابق معادله (۸) از نوع موجک ریکر فرض شده و با توجه به عدم موضوعیت امواج مایل برای مسایل حوزه دور، راستای انتشار امواج به صورت قائم در نظر گرفته شده است [۱۷-۱۸ و ۲۶]. از یک سو با توجه به رغبت دانش مهندسی به مشاهده پاسخ در محدوده پریودیک ۰/۲۵ تا ۸/۳۳ که متناظر با طول موج‌هایی با ۰/۲۵ تا ۸/۳۳ برابر عرض دره هستند و از سوی دیگر تجمیع کلیه پاسخ‌ها در پریودهای مختلف، از بزرگ‌نمایی طیفی افقی میانگین<sup>۲۴</sup> موسوم به AHSA که توسط بورچرت [۴۰] پیشنهاد



شکل ۷- مقایسه حساسیت ضرایب بزرگ‌نمایی نقاط مختلف سطح دره نیم سینوسی و مجاور آن نسبت به سه فرکانس غالب بی‌بعد ( $F_p$ ) بر حسب پریود بی‌بعد ( $x/b$ ) برابر ۰/۰، ۱/۰ و ۱/۵ به ترتیب مبین نقاط کف، گوشه و یک نقطه از لبه دره است)



شکل ۸- نحوه شبکه بندی دقیق سطح دره نیم سینوسی با اجزای مرزی درجه دو در نسبت شکل‌های مختلف (فاصله بین گره‌ها ۱۰ متر فرض شده و اعداد مشخص شده در این شکل مبین تعداد گره‌های مرزی در هر نسبت شکل است)



شکل ۹- الگوی کلی پاسخ تاریخچه زمانی حاصل از پراکنش امواج ناشی از سطح دره دو بعدی نیم سینوسی ( $-b \leq x \leq b$ ) و مجاور آن ( $\pm b \leq x \leq \pm 4b$ ) تحت هجوم امواج قائم SH در نسبت شکل‌های مختلف (اعداد مشخص شده در بالای هر شکل نسبت شکل دره را نشان می‌دهد)

گرفتن مقادیر مناسب برای ابعاد اجزا، طول گام زمانی و فرکانس غالب موج مهاجم را بر رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تسهیل می‌بخشد. با این تفاسیر، در ادامه نتایج حاصل از مطالعه عددی بر حسب دو نوع مقدار یعنی بزرگ‌نمایی واقعی و بزرگ‌نمایی میانگین ارائه شده است.

۵- همگرایی پاسخ

از جمله عوامل مؤثر در تعیین پاسخ‌های پایدار و قابل قبول به کمک روش اجزای مرزی در حوزه زمان، در نظر

گرفتن مقادیر مناسب برای ابعاد اجزا، طول گام زمانی و فرکانس غالب موج مهاجم است. در این راستا و برای سنجش همگرایی پاسخ‌های حاصل، حساسیت پارامترهای مزبور با تخصیص مقادیر مختلف به آن‌ها برای یک دره دو بعدی نیم سینوسی با نسبت شکل ۰/۵ در کف، گوشه و یک نقطه از لبه آن بررسی شده است. برای ارزیابی ابعاد مش و طول گام زمانی، فرکانس غالب بی‌بعد موج مهاجم برابر ۱/۵ در نظر گرفته شده است.

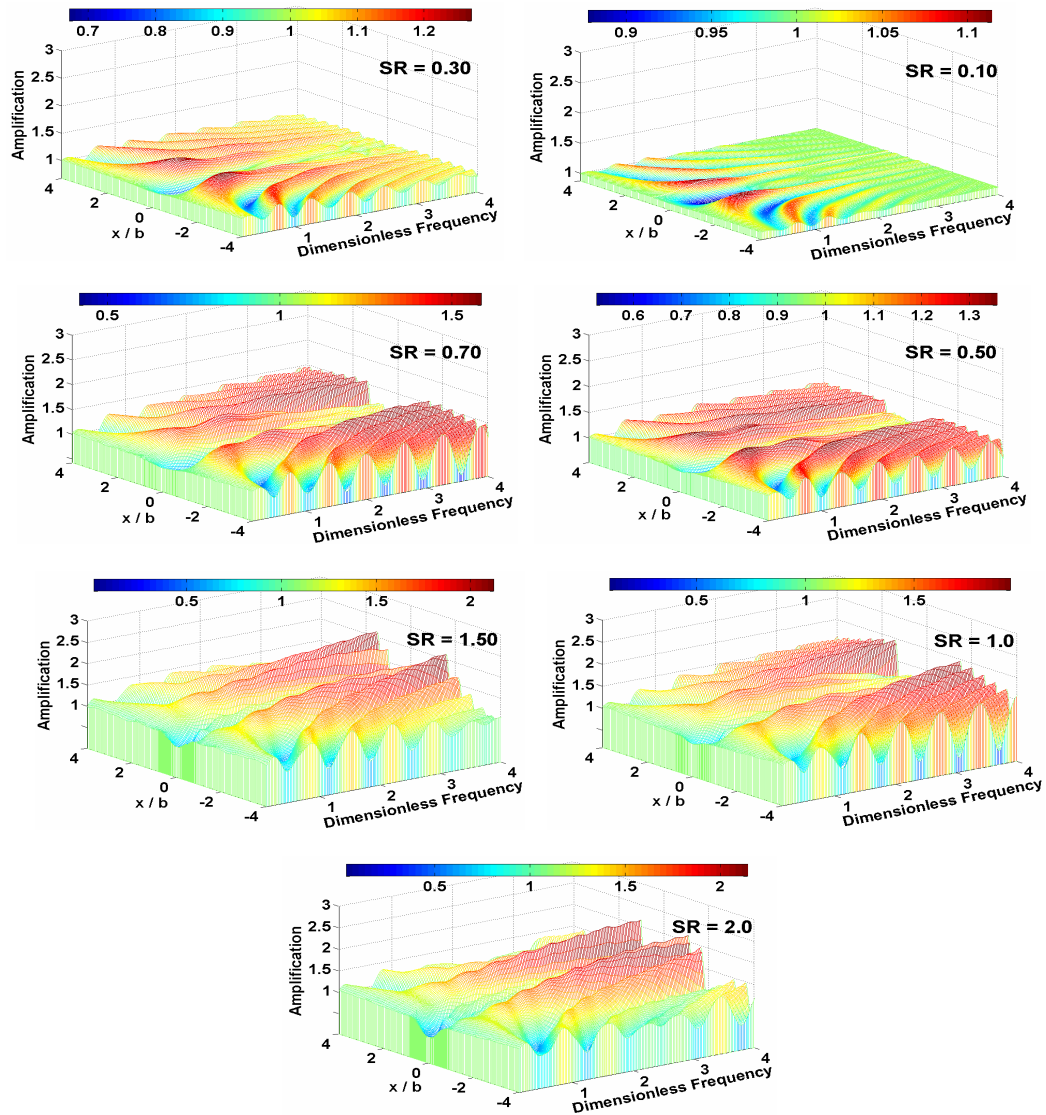
میانگین درک چگونگی تأثیر طول موج مهاجم را بر رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تسهیل می‌بخشد. با این تفاسیر، در ادامه نتایج حاصل از مطالعه عددی بر حسب دو نوع مقدار یعنی بزرگ‌نمایی واقعی و بزرگ‌نمایی میانگین ارائه شده است.

## ۵- همگرایی پاسخ

از جمله عوامل مؤثر در تعیین پاسخ‌های پایدار و قابل قبول به کمک روش اجزای مرزی در حوزه زمان، در نظر

خارج از صفحه قرار داده شده است. چنانچه در شکل (۵) مشاهده می‌شود در کف، گوشه و لبه دره، دقت پاسخ‌ها برای ابعاد مختلف شبکه بندی از همگرایی و همخوانی مطلوب برخوردارند. لازم به ذکر است برای تسریع در همگرایی

ابعاد اجزا: برای بررسی تدقیق پاسخ‌ها در حوزه زمان نسبت به تغییر ابعاد اجزا سه نوع مدل مشتمل بر ۲۵، ۴۵ و ۹۳ گره که به ترتیب متناظر با فاصله بین گره‌ای ۲۰، ۱۰ و ۵ متر بر روی سطح دره است، تهیه شده و تحت امواج مهاجم قائم



شکل ۱۰- الگوی کلی بزرگ‌نمایی سطح دره دوبعدی نیم سینوسی و مجاور آن بر حسب فرکانس بی‌بعد در نسبت شکل‌های مختلف تحت هجوم امواج قائم SH (اعداد مشخص شده در بالای هر شکل نسبت شکل دره را نشان می‌دهد)

پاسخ‌ها و افزایش دقت نتایج از ابعاد جزء یکسان بر روی سطح عارضه استفاده شده است [۴۱].

**طول گام زمانی:** برای ارزیابی همگرایی پاسخ‌ها نسبت به مقادیر مختلف گام زمانی، سه مقدار ۰/۰۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۰۵ ثانیه برای آن در نظر گرفته است. از مدل شماره دو (فاصله بین گره‌ای ۱۰ متر) برای این منظور بهره گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود در نقاط مختلف سطح دره، مقادیر پاسخ در حوزه زمان به طور مناسب همگرا شده‌اند.

**فرکانس غالب:** تعیین پاسخ‌های قابل قبول در حوزه فرکانس به ویژه در فرکانس‌های بالا، مستلزم انتخاب مناسب فرکانس غالب موج مهاجم است. بنابراین برای مدل شماره دو با گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه، دره نیم سینوسی تحت موج مهاجم با فرکانس‌های غالب بی‌بعد برابر ۱/۵، ۲/۵ و ۲ قرار داده شده است. در شکل (۷) تأثیر این مقادیر در تعیین ضرایب بزرگ‌نمایی کف، گوشه و یک نقطه از لبه بر حسب پیروید بی‌بعد نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود نتایج کاملاً همگرا و تدقیق آن‌ها مطلوب به نظر می‌رسد. با این توصیف، نتایج ارایه شده در ادامه برای کلیه نسبت شکل‌های دره، بر اساس مدل شماره دو شکل (۸)، گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه و فرکانس غالب بی‌بعد ۱/۵ است.

## ۶- الگوی کلی پاسخ در حوزه زمان

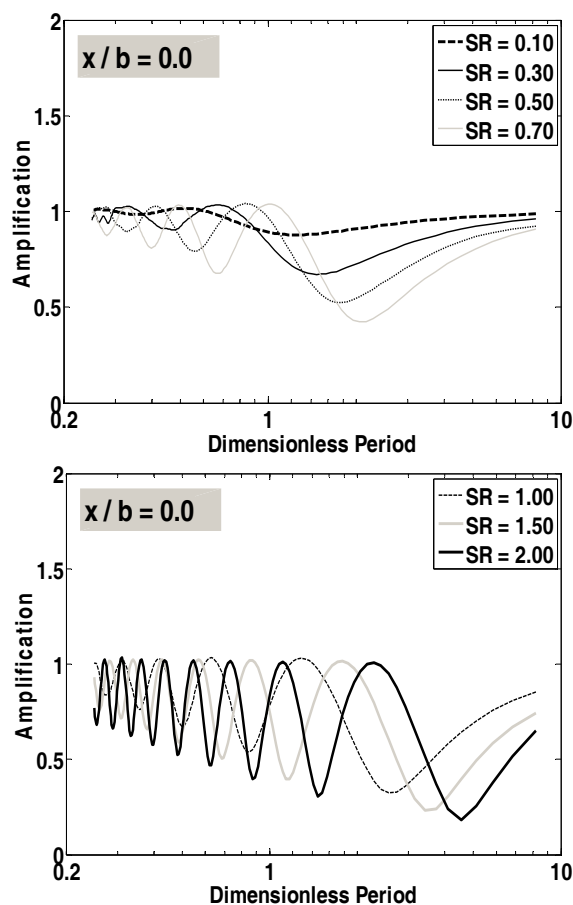
برای مشاهده نحوه کلی پراکنش امواج ناشی از دره دوبعدی نیم سینوسی در برابر هجوم امواج قائم SH، شکل (۹) برای نسبت شکل‌های ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ ارایه شده است. چنانچه در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود در محدوده عرض دره  $(-b \leq x \leq b)$  با افزایش نسبت شکل یا عمیق‌تر شدن دره، ضمن ایجاد اختلاف فاز بین موج برخوردی و انعکاس یافته، دامنه پاسخ نیز کاهش می‌یابد به طوری که در محدوده مجاور آن  $(\pm b \leq x \leq \pm 4b)$ ، دامنه پاسخ‌ها یکنواخت‌تر به نظر می‌رسد. علت این موضوع را می‌توان در فاصله زمانی ایجاد شده بین زمان برخورد موج

مهاجم تا زمان اثر موج انعکاس یافته از سطح زمین دانست به نحوی که هر چه این فاصله بیشتر می‌شود جدایش به وجود آمده بین دامنه این دو موج بیشتر شده و الگوی پاسخ‌ها از حرکت آزاد سطح زمین دورتر می‌شوند. با توجه به اینکه در تفرق امواج خارج از صفحه بر خلاف امواج درون صفحه، تبدیل موج صورت نگرفته و قطار موج منتشر شده همواره تک مؤلفه‌ای است لذا پیچیدگی پراکنش امواج در این حالت کمتر است و به تبع سرعت همگرایی نیز افزایش می‌یابد.

## ۷- پاسخ در حوزه فرکانس

### ۷-۱- الگوی کلی

گرچه برای مشاهده پاسخ‌ها و نحوه پراکنش امواج ارایه نتایج در حوزه زمان مطلوب به نظر می‌رسد، لیکن ضریب بزرگ‌نمایی و نمایش الگوی رفتاری آن‌ها در حوزه‌های تبدیل یافته امکانپذیر است. بنابراین در شکل (۱۰) الگوی سه بعدی بزرگ‌نمایی سطح دره و مجاور آن  $(-4b \leq x \leq 4b)$  بر حسب فرکانس بی‌بعد و در نسبت شکل‌های مختلف ارایه شده است. آنچه بدیهی است با عمیق‌تر شدن دره، ضمن افزایش نوسان ضریب بزرگ‌نمایی نسبت به تغییر فاصله در سطح زمین، مقدار آن نیز در فرکانس‌های بی‌بعد بالا همواره افزایش می‌یابد. چنانچه در شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود در نسبت شکل‌های کوچک، اوج بزرگ‌نمایی در فرکانس‌های پایین تمرکز یافته که این موضوع با افزایش نسبت شکل دره کم رنگ‌تر می‌شود. همچنین، در نسبت شکل‌های کمتر از یک، قله‌های بزرگ‌نمایی عموماً در محدوده گوشه‌های دره قابل مشاهده است به نحوی که با دور شدن از این محدوده پتانسیل بزرگ‌نمایی غالباً با کاهش مواجه می‌شود. آنچه بیش از همه در نسبت شکل‌های بزرگ‌تر از یک به چشم می‌خورد آن است که لبه‌های مجاور دره در فرکانس‌های بالا، بعد از اوج بزرگ‌نمایی به سرعت به سمت حرکت آزاد سطح زمین همگرا می‌شوند به طوری که این موضوع در نسبت‌های ۰/۵ تا ۱/۰ برقرار نیست.

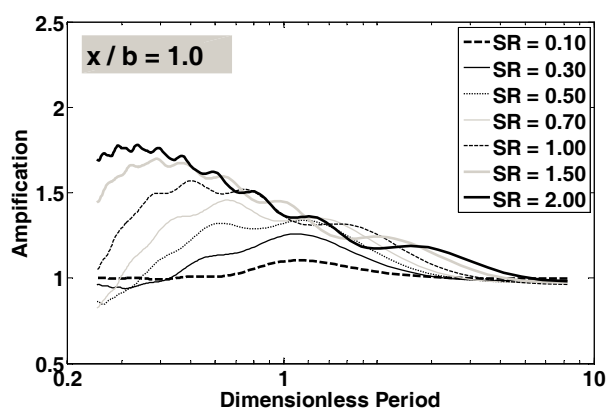


شکل ۱۱- منحنی بزرگ‌نمایی واقعی نقطه کف دره دوبعدی نیم سینوسی بر حسب پریود بی بعد در نسبت شکل‌های مختلف ( $x/b$  برابر ۰/۰ نشانگر نقطه کف دره است)

## ۲-۷- بزرگ‌نمایی کف و گوشه

در هجوم امواج برشی درون صفحه نیز قابل مشاهده است [۲۶] عدم انکسار قطار موج انتشار یافته از منبع در آن نقطه و حداکثر اختلاف فاز بین اثرات دامنه امواج ورودی و خروجی است. از سوی دیگر در گوشه‌های دره با توجه به وجود اختلاف فاز صفر، رفتار به گونه دیگری است. در شکل (۱۲) ضرایب بزرگ‌نمایی گوشه دره ( $x/b=1.0$ ) نیم سینوسی در مقابل پریود بی بعد برای نسبت شکل‌های مختلف قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در کلیه پریودها، گوشه دره تقریباً با بزرگ‌نمایی پاسخ مواجه است و بر خلاف

در شکل (۱۱) بزرگ‌نمایی کف دره ( $x/b=0$ ) بر حسب پریود بی بعد (۰/۲۵ تا ۸/۳۳) برای نسبت شکل‌های مختلف آن به تصویر کشیده شده است. آنچه در وهله اول رخ می‌دهد افزایش نوسان پاسخ است که همسو با عمیق‌تر شدن دره اتفاق می‌افتد. چنانچه مشاهده می‌شود کف دره در پریودهای مختلف همواره کوچک‌نمایی پاسخ را تجربه کرده و با افزایش نسبت شکل، به طور تقریباً خطی افزایش می‌یابد. از نگاه پدیده انتشار و تفرق امواج، علت کوچک‌نمایی کف دره که



شکل ۱۲- منحنی بزرگ‌نمایی واقعی نقطه گوشه دره دوبعدی نیم سینوسی بر حسب پررود بی‌بعد در نسبت شکل‌های مختلف ( $x/b$  برابر  $1/0$  نشانگر نقطه گوشه دره است)

از محل دره ضمن کاهش اندازه پاسخ و افزایش سرعت همگرایی که دور از انتظار نیست، الگوهای پاسخ، نوسان و تغییر نواحی از بزرگ‌نمایی به کوچک‌نمایی و بالعکس بیشتر را تجربه می‌کنند. از این گذشته، با دور شدن از گوشه‌های دره، علی‌رغم توقع که در دره‌های عمیق‌تر مقادیر بزرگ‌تر بزرگ‌نمایی ثبت می‌شود، در پررودهای کوتاه یا فرکانس‌های بالا برقرار نیست و در محدوده پررودیک کمتر از یک، بیشترین مقادیر مختص دره با نیم پهنای برابر عمق ( $SR = 1.0$ ) است.

#### ۷-۴- حداکثر بزرگ‌نمایی

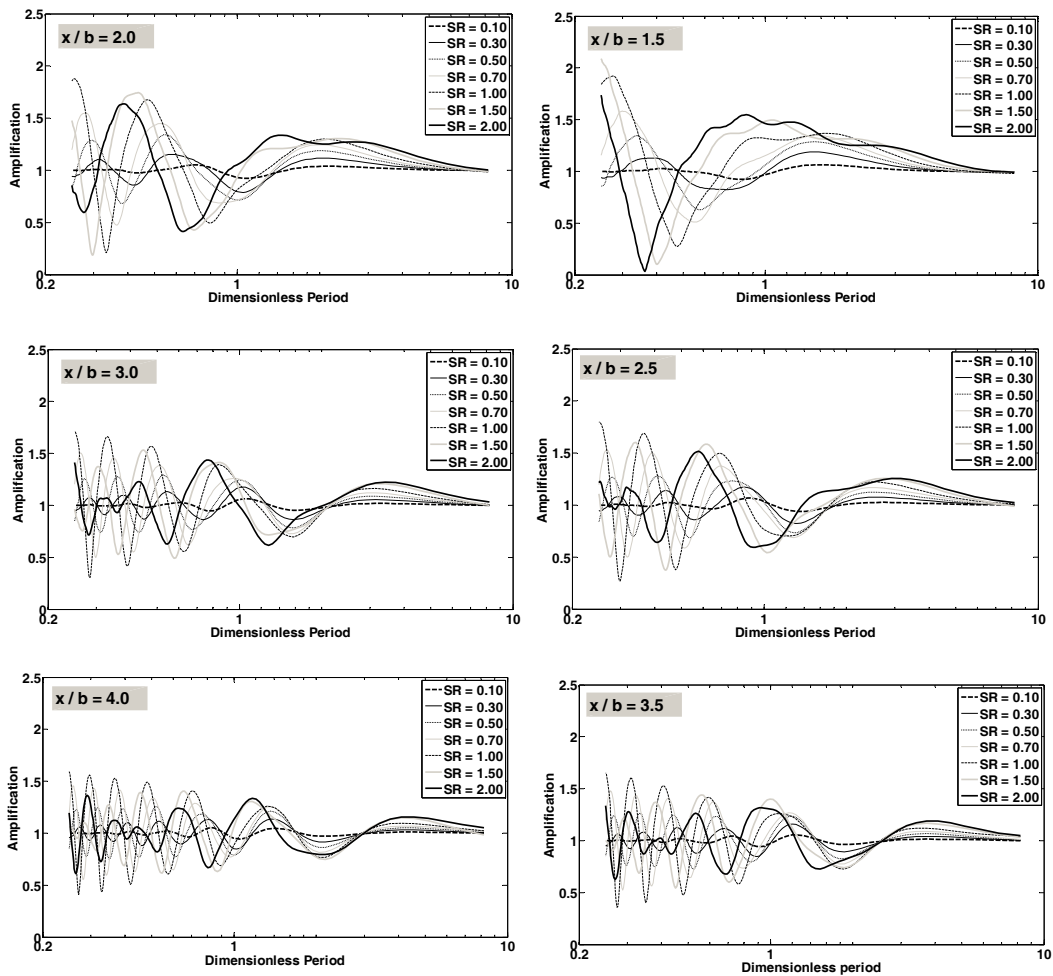
چنانچه از شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) قابل مشاهده است حداکثر مقادیر بزرگ‌نمایی همواره در لبه‌های دره نیم‌سینوسی به چشم می‌خورد. بنابراین در هر نسبت شکل، حداکثر مقدار بزرگ‌نمایی میانگین در لبه دره تعیین شده و بر حسب محدوده‌های مختلف پررودیک در شکل (۱۴) ارایه شده است. همان‌طور که نشان داده شده است افزایش نسبت شکل دره پیک حداکثر بزرگ‌نمایی را از محدوده  $P3$  که متعلق به طول موج‌های متوسط است به سمت محدوده  $P1$  یعنی طول موج‌های خیلی کوتاه سوق می‌دهد؛ لذا می‌توان این موضوع را استنباط کرد که امواج لاغر در دره‌های عمیق

کف آن با سرعت بیشتری به سمت حرکت آزاد سطح زمین همگرا می‌شوند. از نکات قابل توجه در الگوی بزرگ‌نمایی گوشه دره، حرکت قله بزرگ‌نمایی به سمت پررودهای کوتاه همگام با عمیق‌تر شدن آن است. این موضوع دور از انتظار نیست که هرچه نسبت شکل دره در مقابل طول موج مهاجم بزرگ‌تر باشد تأثیرپذیری آن نیز افزایش خواهد یافت.

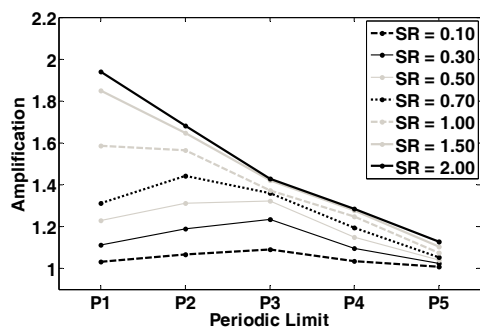
#### ۷-۳- بزرگ‌نمایی در لبه‌ها

با علم بر اینکه همواره توسعه بافت شهری بیشتر در لبه‌های عوارض توپوگرافی قابل مشاهده است، لذا بررسی آن نقاط می‌تواند در مطالعات ریزپهنه بندی قابل توجه قرار گیرد. در شکل (۱۳) برای چند نقطه از لبه دره ( $x/b = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$ ) ضرایب بزرگ‌نمایی واقعی بر حسب پررود بی‌بعد در نسبت شکل‌های مختلف نشان داده است. چنانچه ملاحظه می‌شود افزایش نسبت شکل تأثیر به‌سزایی در اندازه پاسخ‌های منتج دارد به نحوی که در نسبت شکل‌های کوچک، الگوهای پاسخ در محدوده حرکت آزاد سطح زمین نوسان می‌کنند و با عمیق‌تر شدن دره به سمت مقادیر بزرگ‌نمایی محسوس‌تر و بزرگ‌تر می‌روند. از نکات قابل توجه در این شکل‌ها این است که با فاصله گرفتن





شکل ۱۳- منحنی بزرگ‌نمایی واقعی نقاط مختلف از لبه دره دوبعدی نیم سینوسی در نسبت شکل‌های گوناگون آن (اعداد مشخص شده در گوشه سمت چپ بالای هر نمودار فاصله از مرکز دره را نشان می‌دهد)



شکل ۱۴- منحنی حداکثر ضرایب بزرگ‌نمایی میانگین در لبه دره دوبعدی نیم سینوسی بر حسب محدوده‌های پررودیک و نسبت شکل‌های مختلف

جدول ۱- حداکثر ضرایب بزرگ‌نمایی میانگین در لبه دره نیم سینوسی تحت امواج مهاجم قائم SH در نسبت شکل‌ها

و محدوده‌های پرریودیک (طول موج) مختلف

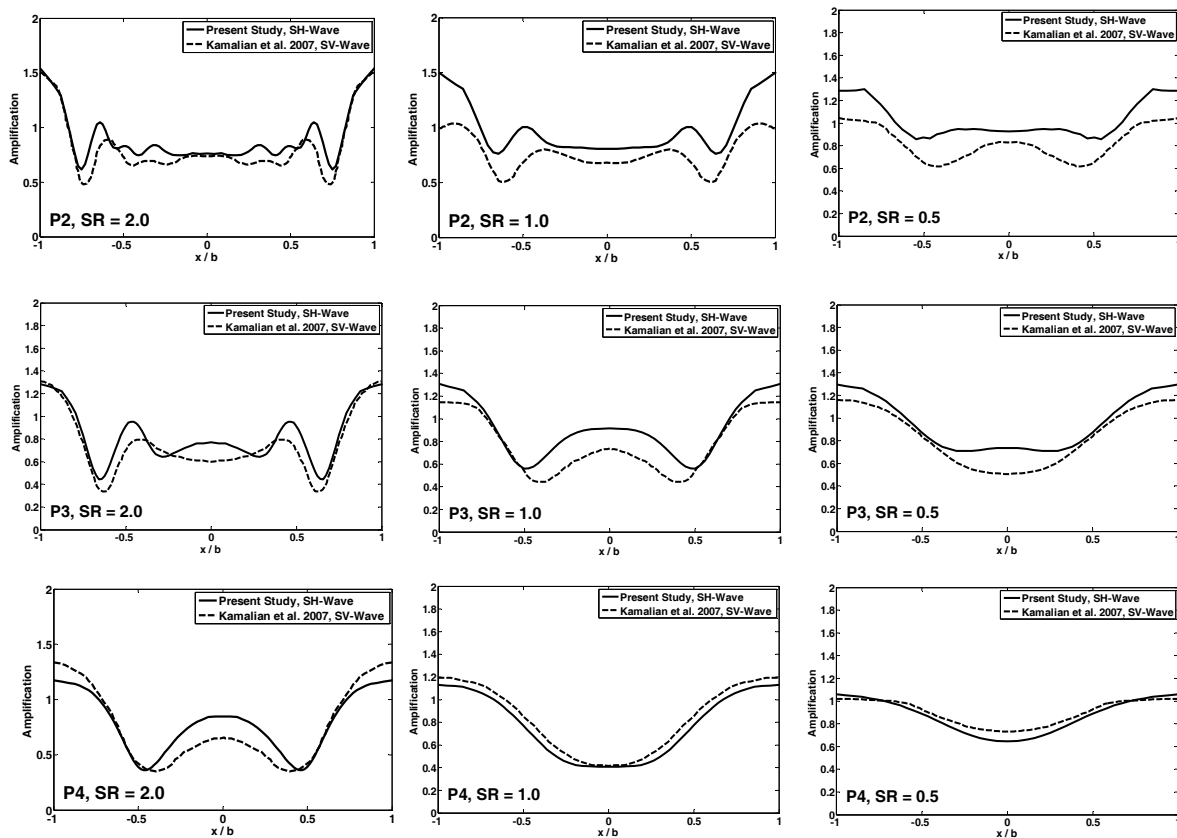
نسبت شکل	بسیار کوتاه	کوتاه	متوسط	بلند	بسیار بلند
۰/۱	۱/۰	۱/۱	۱/۱	۱/۰	۱/۰
۰/۳	۱/۱	۱/۲	۱/۲	۱/۱	۱/۰
۰/۵	۱/۲	۱/۳	۱/۳	۱/۱	۱/۰
۰/۷	۱/۳	۱/۴	۱/۳	۱/۲	۱/۰
۱/۰	۱/۶	۱/۶	۱/۴	۱/۲	۱/۱
۱/۵	۱/۸	۱/۶	۱/۴	۱/۳	۱/۱
۲/۰	۱/۹	۱/۷	۱/۴	۱/۳	۱/۱

بزرگتر به موج SH اختصاص داده می‌شود. در شکل (۱۶) موضوع مذکور بهتر نمایش داده شده است. در این شکل حداکثر ضرایب بزرگ‌نمایی میانگین لبه دره در نسبت شکل‌های مختلف که با یک خط راست تقریب زده شده، برای دو حالت موج مهاجم برشی با یکدیگر مقایسه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود شیب نمودار مربوط به ضرایب حداکثر موج برشی SH تقریباً  $1/67$  برابر موج برشی SV است. گرچه مطالعات محققان پیشین، همچون جیلی و همکاران [۴۲] برای تپه‌های دوبعدی نیم سینوسی افزایش اندک پاسخ حاصل از امواج برشی درون صفحه را در مقابل امواج برشی خارج از صفحه مبین می‌سازند، ولیکن برای دره نیم سینوسی از یک سو به سبب میرایی تشعشعی<sup>۲۵</sup> بیشتر هندسه توپوگرافی‌های دره‌ای با نیم صفحه و از سوی دیگر تک مؤلفه‌ای بودن پاسخ امواج برشی خارج از صفحه و عدم تبدیل به امواج با قدرت بزرگ‌نمایی کمتر همچون امواج فشاری، عکس این حالت مشاهده می‌شود. ذکر این نکته نیز

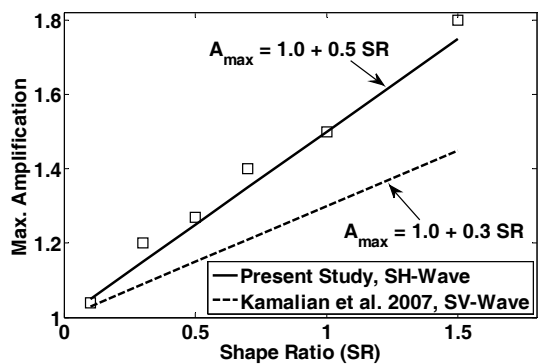
شرایط به مراتب بحرانی‌تری ایجاد خواهند کرد. مقادیر ترسیم شده در شکل (۱۴)، در جدول (۱) نیز بعد از گرد شدن تا یک رقم اعشار نشان داده شده است.

#### ۷-۵- مقایسه با SV

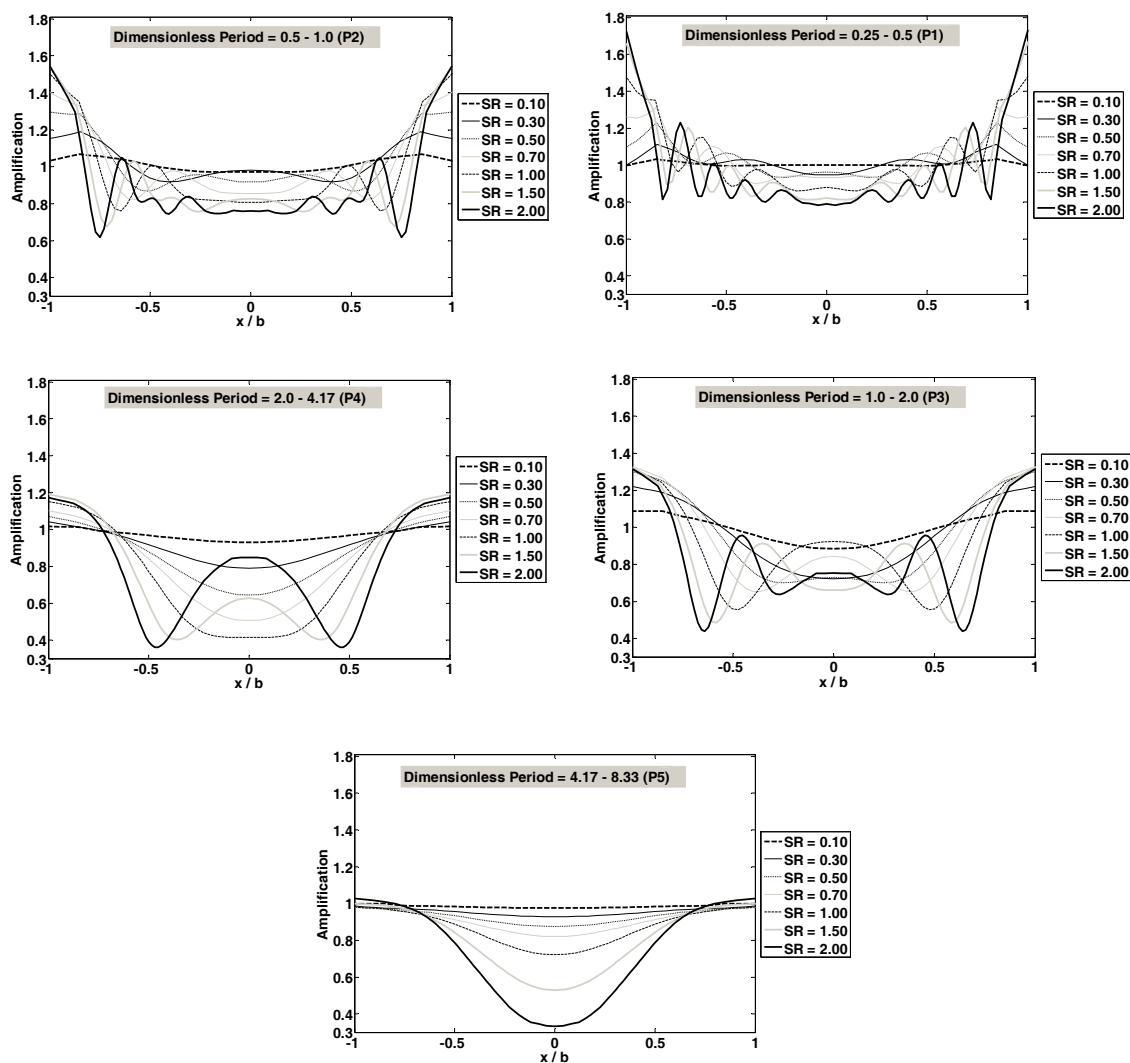
در شکل (۱۵) ضرایب بزرگ‌نمایی میانگین موافق حرکت به‌دست آمده از سطح دره نیم سینوسی، تحت هجوم امواج قائم SV [۲۶]، با نتایج تحقیق حاضر مقایسه شده است. شکل‌های مذکور برای محدوده‌های پرریودیک P2، P3 و P4 و در نسبت شکل‌های ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۰ ارزیابی شده است. چنانچه مشاهده می‌شود روند تغییر ضرایب بزرگ‌نمایی در سطح دره در دو حالت موج برشی تقریباً یکسان است. هرچند در پرریودهای بلند، پاسخ‌های حاصل از موج SV در مناطق نزدیک به گوشه دره اندکی شامل اندازه‌های بزرگتر می‌شوند لیکن آنچه مسلم است در پرریودهای متوسط و کوتاه به ویژه در نسبت شکل‌های ۰/۵ و ۱/۰ ضرایب بزرگ‌نمایی



شکل ۱۵- مقایسه بین نتایج حاصل از مطالعه حاضر (موج مهاجم قائم SH) و تحقیقات کامالیان و همکاران [۲۶] (مؤلفه موافق حرکت موج مهاجم قائم SV) برای ضرایب بزرگ‌نمایی میانگین در سطح یک دره دوبعدی نیم سینوسی در نسبت شکل‌ها و محدوده‌های پریودیک مختلف (در گوشه سمت چپ پایین هر نمودار به ترتیب محدوده پریودیک و نسبت شکل دره مشخص شده است)



شکل ۱۶- برازش خطی از حداکثر ضرایب بزرگ‌نمایی میانگین در لبه دره دوبعدی نیم سینوسی تحت امواج مهاجم قائم SH (مطالعه حاضر) و مقایسه آن با نتایج حاصل از مطالعات کامالیان و همکاران [۲۶] برای مؤلفه موافق حرکت موج مهاجم قائم SV



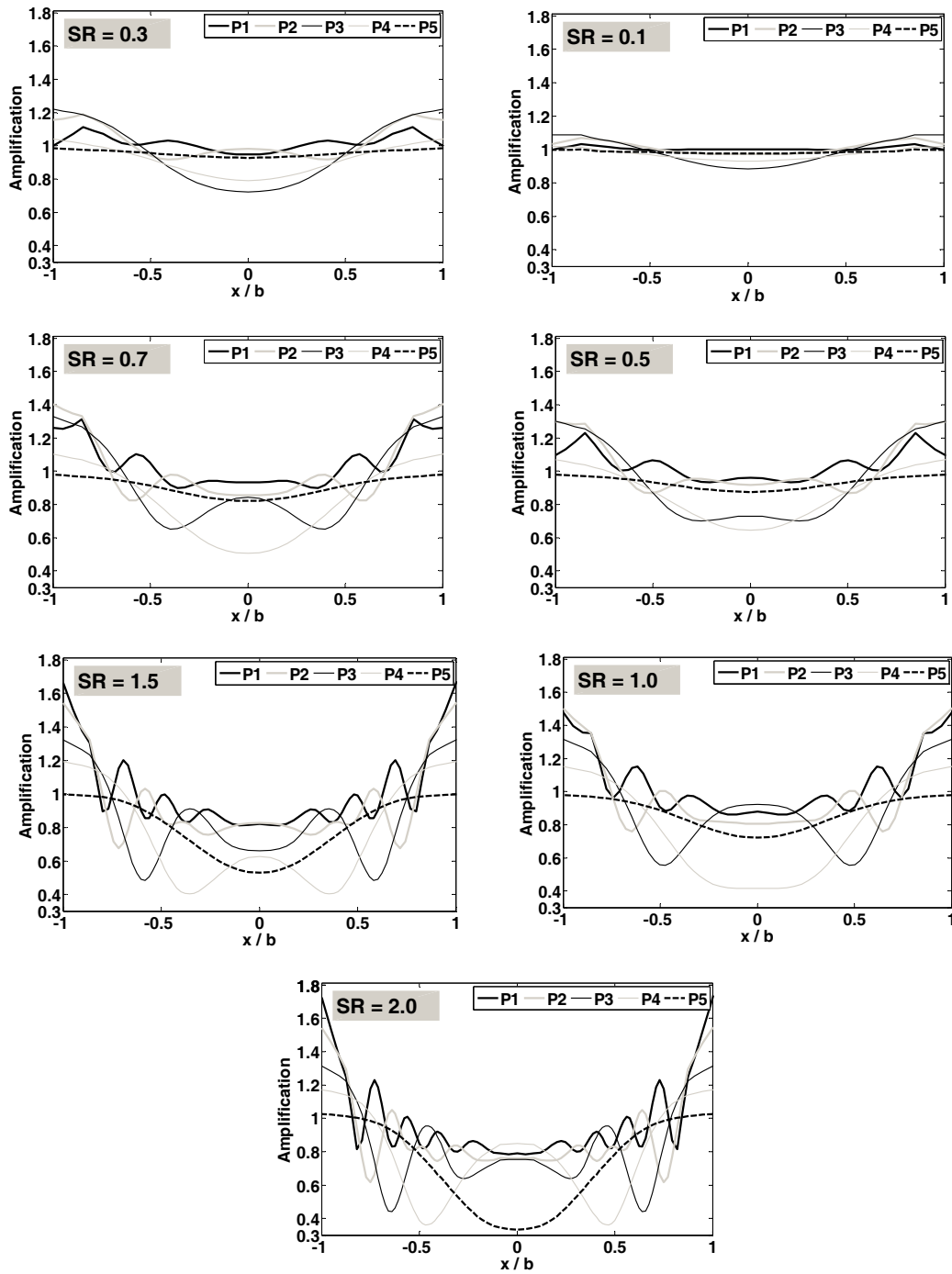
شکل ۱۷- منحنی بزرگ‌نمایی میانگین سطح دره دوبعدی نیم سینوسی در نسبت شکل‌های مختلف (اعداد مشخص شده در بالای هر نمودار محدوده پریودیک پاسخ یا طول موج مهاجم را نشان می‌دهد)

دره تعیین کرد که فراتر از آن تأثیر عارضه در تغییر الگوی پاسخ قابل نظر کردن باشد می‌توان شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) را در نظر داشت. در شکل (۱۷) ضرایب بزرگ‌نمایی میانگین سطح دره ( $-b \leq x \leq +b$ ) در نسبت شکل‌ها و محدوده‌های پریودیک مختلف قابل مشاهده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با بلندتر شدن طول موج مهاجم (یا همان محدوده‌های پریودیک)، افزایش

حائز اهمیت است، مقادیر حاصل از معادله خط برازش یافته از مطالعه حاضر در مقایسه با حداکثر ضریب بزرگ‌نمایی  $1/4$  پیشنهاد شده در آیین‌نامه AFPS [۴۳] تنها برای نسبت شکل‌های کمتر از ۱ برقرار است.

#### ۶-۷- آستانه تأثیر طول موج و عمق دره

برای آنکه بتوان مقادیر حدی از طول موج مهاجم و عمق



شکل ۱۸- منحنی بزرگ‌نمایی میانگین دامنه دره دوبعدی نیم سینوسی در محدوده‌های پررودیک مختلف (اعداد مشخص شده در گوشه سمت چپ بالای هر نمودار نسبت شکل دره را نشان می‌دهد)

نسبت شکل تأثیر کمتری بر پتانسیل بزرگ‌نمایی سطح دره دارد. تنها در طول موج‌های متوسط و کمتر از آن، شکل گیری الگوهای مختلف پاسخ در گرو عمیق‌تر شدن دره است. به جز اندکی تغییرات، آن هم در مقادیر کوچک‌نمایی در نسبت شکل‌های  $1/5$  و  $2/0$ ، طول موج‌های بلند و خیلی بلند (P4 و P5) تأثیر بسیار اندکی در تغییر الگوی پاسخ دامنه دره دارند و همواره در بروز رفتار از هندسه مسئله تبعیت می‌کنند. در یک نسبت شکل ثابت، شکل (۱۸) بهتر می‌تواند تأثیر طول موج مهاجم و عمق دره را بر الگوهای پاسخ مشخص کند. در این شکل ضرایب بزرگ‌نمایی میانگین دامنه دره برای یک نسبت شکل و در طول موج‌های مختلف نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود در نسبت شکل‌های کوچک، امواج مهاجم با هر طول موجی نمی‌تواند الگوهای پاسخ را مشابه آنچه در نسبت شکل‌های بزرگ به وجود می‌آید، تحت تأثیر قرار دهد. با این توصیف این نتیجه قابل استنباط است که تحت هجوم امواج با طول موج‌های بزرگتر از هشت برابر پهنای عارضه و دره‌هایی با اعماق کمتر از  $1/10$  نیم‌پهنای آن بزرگ‌نمایی پاسخ کمتر از  $1/10$  است و می‌توان از تأثیر عارضه در برهم کنش الگوی پاسخ صرف نظر کرد. برای مشاهده نتیجه مذکور در لبه‌های دره نیز شکل (۱۹) ارائه شده است. در این شکل برای طول موج‌های خیلی کوتاه تا خیلی بلند، ضرایب بزرگ‌نمایی میانگین بر حسب فاصله از گوشه دره  $(b \leq x \leq 4b)$  در نسبت شکل‌های مختلف ارائه شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود با افزایش طول موج، اندازه بزرگ‌نمایی به ویژه در نواحی نزدیک به گوشه دره با کاهش قابل توجهی مواجه است. علاوه بر این، آنچه بیش از همه قابل مشاهده است اثر طول موج بر الگوی نوسانی پاسخ لبه‌های دره است به طوری که با بلندتر شدن آن، عمیق‌تر شدن دره نمی‌تواند در برهم کنش پاسخ مؤثر باشد و در نسبت شکل‌های مختلف الگوهای بزرگ‌نمایی همواره در بروز یک نوع رفتار سهیم هستند.

## ۸- نتیجه گیری

در این مقاله برای اولین بار به حساسیت سنجی جامع و

تحلیل لرزه‌ای دره‌های دوبعدی نیم سینوسی تحت امواج مهاجم قائم SH پرداخته شد. از فرمول‌بندی اجزای مرزی نیم صفحه‌ی پیشنهاد شده توسط مؤلفان که شبکه بندی را تنها بر روی سطح عارضه متمرکز می‌سازد، برای استخراج نتایج کمک گرفته شد. اشکال ریاضی متفاوت، نحوه اقتناع شرایط مرزی و جنس عامل تحریک از جمله نقاط تمایز مطالعه حاضر در قیاس با پیشینه‌ی اجزای مرزی محیط کامل در حوزه زمان است [۱۵، ۱۷-۱۸ و ۲۴-۲۶]. الگوهای بزرگ‌نمایی نقاط مختلف از سطح دره نیم سینوسی و مجاور آن با محوریت پارامترهای کلیدی چون نسبت شکل و طول موج مهاجم ارائه شد. حداکثر بزرگ‌نمایی میانگین تعیین و نتایج حاصل با مؤلفه موافق حرکت حاصل از هجوم امواج برشی قائم درون صفحه مقایسه شد. در نهایت تأثیر طول موج و عمق دره در تعیین یک مقدار آستانه برای چشم‌پوشی از اثرات عارضه بر کمیت بزرگ‌نمایی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده و تفسیر نتایج مطابق زیر قابل جمع‌بندی است:

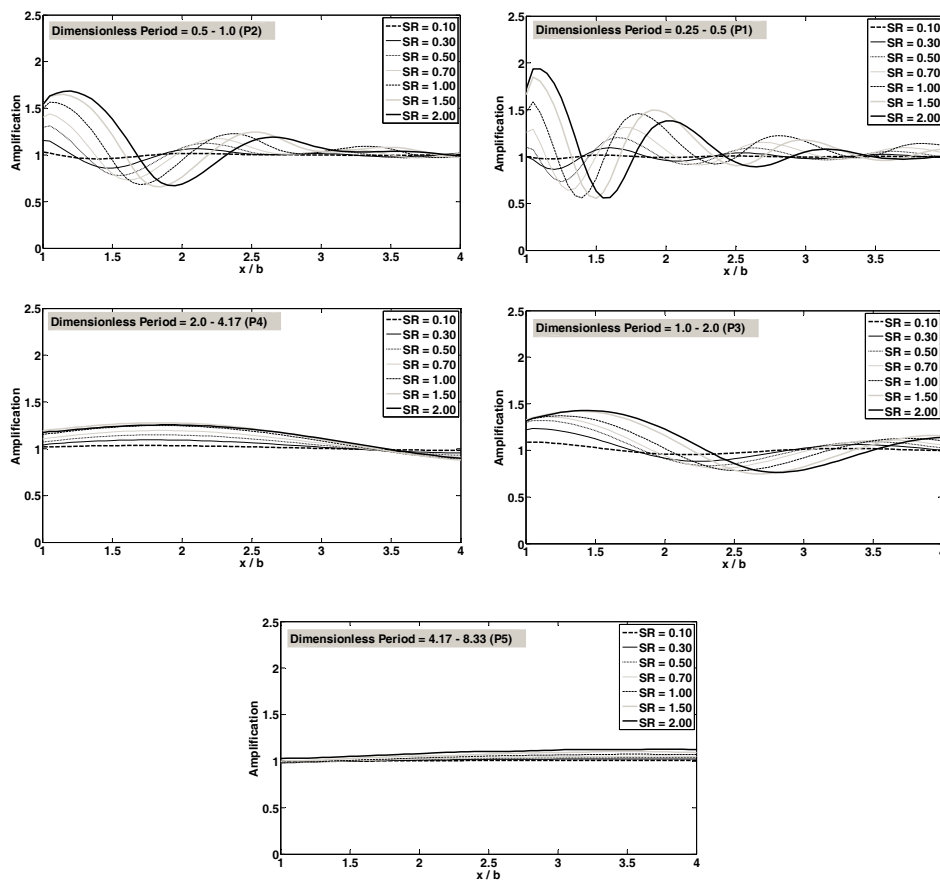
۱- پتانسیل بزرگ‌نمایی و الگوهای حاصل کاملاً وابسته به طول موج مهاجم و نسبت شکل دره هستند.

۱- در مرکز دره عموماً کوچک‌نمایی و در گوشه‌ها و لبه‌ها غالباً بزرگ‌نمایی حاکم است.

۲- تأثیر تغییر طول موج مهاجم بر کمیت پتانسیل بزرگ‌نمایی گوشه‌های دره در قیاس با اثر نسبت شکل آن بیشتر است.

۳- حداکثر ضریب بزرگ‌نمایی در لبه‌های دره مشاهده شده و بر حسب نسبت شکل آن با شیب تقریباً  $5/0$  افزایش می‌یابد. از رابطه ارائه شده در شکل (۱۶) می‌توان برای تخمین ضریب مزبور در نسبت شکل‌های کمتر از  $1/5$  بهره جست.

۵- با افزایش نسبت شکل دره حداکثر ضریب بزرگ‌نمایی در لبه‌ها از طول موج متوسط به سمت طول موج خیلی کوتاه تغییر می‌کند.



شکل ۱۹- منحنی بزرگ‌نمایی میانگین لبه دره دو بعدی نیم سینوسی ( $b \leq x \leq 4b$ ) در نسبت شکل‌های مختلف (اعداد مشخص شده در گوشه سمت چپ بالای هر نمودار محدوده پریودیک پاسخ یا طول موج مهاجم را مشخص می‌سازد)

مسائل الاستودینامیک اسکالر دوبعدی امکانپذیر شد، لیکن تحلیل دینامیکی مسائل سه‌بعدی همگن و ناهمگن و همچنین مدل‌سازی محیط‌های ویسکوز تنها با بهره‌گیری از اجزای مرزی محیط کامل قابل بررسی است. نمودارهای بزرگ‌نمایی و ضرایب ارایه شده در مقاله حاضر می‌تواند در تکمیل و تدقیق مطالعات ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای ساختگاه و همچنین در استخراج ایده‌های اولیه مناسب برای اصلاح طیف طرح پیشنهادی آیین نامه برای ساختگاه‌های تخت مشابه مورد استفاده قرار بگیرد [۱۸].

۶- در مقایسه با پاسخ‌های منتج از هجوم امواج برشی درون صفحه (SV) [۲۶]، پتانسیل بزرگ‌نمایی قوی‌تر رفتار خارج از صفحه (SH) در لبه‌های دره مبین می‌شود.

۷- با افزایش طول موج مهاجم تا ۸ برابر پهنای دره و یا از سوی دیگر با کاهش عمق دره تا ۱/۰ نیم پهنای آن، پتانسیل بزرگ‌نمایی تا حدی کاهش یافته (کمتر از ۱۰٪) که تأثیر عارضه در برهم کنش الگوهای پاسخ قابل چشم‌پوشی است، جدول (۱).

گرچه استفاده از اجزای مرزی نیم‌صفحه برای تحلیل

## واژه‌نامه

1. site effects

2. volumetric methods

3. boundary methods

- |  |  |  |
|--|--|--|
| 4. hybrid methods                            | 12. Heaviside functions                      | 20. Dynamic Analysis of Structures by BEM (DASBEM)   |
| 5. finite element method (FEM)               | 13. half-plane boundary element              | 21. Ricker wavelets                                  |
| 6. finite difference method (FDM)            | 14. singular solution                        | 22. dimensionless frequency                          |
| 7. radiation conditions of waves             | 15. half-plane fundamental solution          | 23. dimensionless period                             |
| 8. approximate boundaries of energy absorber | 16. weighted residual method                 | 24. average horizontal spectral amplification (AHSA) |
| 9. boundary element method (BEM)             | 17. traction half-plane fundamental solution | 25. radiation damping                                |
| 10. full-plane dynamic kernels               | 18. free field motion                        |  |
| 11. traction anti-plane kernels              | 19. Gaussian numerical integration           |  |

## مراجع

۱. پنجی، م.، کمالیان، م.، عسگری مارنانی، ج. و جعفری، م. ک.، "مروری بر ادبیات فنی تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تحت امواج مهاجم SH"، پژوهشنامه زلزله شناسی و مهندسی زلزله، سال ۱۵، شماره ۴ ص ۱-۱۵، زمستان ۱۳۹۱.
2. Trifunac, M. D., "Scattering of Plane SH Waves by a Semi-Cylindrical Canyon", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 1, No. 3, pp. 267-281, 1972.
3. Wong, H. L., and Trifunac, M. D., "Scattering of Plane SH Waves by a Semi-Elliptical Canyon", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 3, pp. 157-169, 1974.
4. Zhou, H. and Chen, X., "A New Approach to Simulate Scattering of SH Waves by an Irregular Topography", *Geophysical Journal International*, Vol. 164, pp. 449-459, 2006.
5. Chen, J. T., Chen, P. Y. and Chen C. T., "Surface Motion of Multiple Alluvial Valleys for Incident Plane SH-Waves by using a Semi-Analytical Approach", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28, pp. 58-72, 2008.
۶. کمالیان، م.، "تحلیل دینامیکی محیط متخلخل اشباع ارتجاعی خمیری در فضای زمان با استفاده از ترکیب روش‌های اجزای محدود و عناصر مرزی"، رساله دکتری، دانشگاه تهران، تهران، ایران، ۱۳۸۰.
7. Eringen, A. C., and Suhubi, E. S., *Elastodynamics*, Academic Press, New York, 1975.
8. Friedman, M.B., and Shaw, R., "Diffraction of Pulses By Cylindrical Obstacles of Arbitrary Cross Section", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 29, No. 1, pp. 40-46, 1962.
9. Cole, D. M., Kosloff, D. D., and Minster, J. B., "A Numerical Boundary Integral Method for Elastodynamics", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 68, No. 5, pp. 1331-1357, 1978.
10. Mansur, W. J., "A Time-Stepping Technique to Solve Wave Propagation Problems Using the Boundary Element Method", Ph.D. Dissertation, University of Southampton, 1983.
11. Demirel, V., and Wang, S., "An Efficient Boundary Element Method for Two-Dimensional Transient Wave Propagation Problems", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 11, No. 6, pp. 411-416, 1987.
12. Yu, G., Mansur, W. J., Carrer, J. A. M., and Gong, L., "Stability of Galerkin and Collocation Time Domain Boundary Element Methods as Applied to the Scalar Wave Equation", *Computers and Structures*, Vol. 74, No. 4, pp. 495-506, 2000.
13. Soares, J. D., and Mansur, W. J., "An Efficient Time-Truncated Boundary Element Formulation Applied to the Solution of the Two-Dimensional Scalar Wave Equation", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 33, No. 1, pp. 43-53, 2009.
14. Israil, A. S. M., and Banerjee, P. K., "Advanced Development of Time-Domain BEM for Two-Dimensional Scalar Wave Propagation", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 29, No. 5, pp. 1003-1020, 1990a.
15. Kamalian, M., Gatmiri, B., and Sohrabi-Bidar, 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.
16. 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, No. 7, pp. 1421-1440, 1990b.
۱۷. کمالیان، م.، جعفری، م. ک. و سهرابی بیدار، ع.، "رفتار لرزه‌ای تپه‌های دوبعدی نیم سینوسی در برابر امواج مهاجم قائم"، مجله استقلال، سال ۲۶، شماره ۱ ص ۱۳۰-۱۰۹، شهریور ۱۳۸۶.
18. Kamalian, M., Jafari, M. K., Sohrabi-Bidar, A., and Razmkhah, A., "Seismic Response of 2D Semi-Sines Shaped Hills to Vertically Propagating Incident Waves: Amplification Patterns and Engineering Applications", *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No. 2, pp. 405-430, 2008.



19. Dominguez, J., and Meise, T., "On the use of the BEM for Wave Propagation in Infinite Domains", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 8, No. 3, pp. 132-138, 1991.
20. Ahmad, S., and Banerjee, P. K., "Multi-Domain BEM for Two-Dimensional Problems of Elastodynamics", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 891-911, 1988.
21. Papageorgiou, A. S., and Kim, J., "Study of the Propagation and Amplification of Seismic Waves in Caracas Valley with Reference to the 29 July 1967 Earthquake: SH Waves", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 81, No. 6, pp. 2214-2233, 1991.
22. Dravinski, M., "Scattering of Waves by a Sedimentary Basin with a Corrugated Interface", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97(1B), pp. 256-264, 2007.
23. Takemia, H., and Fujiwara, A., "SH-Wave Scattering and Propagation Analysis at Irregular Sites by Time Domain BEM", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 5, pp. 1443-1455, 1994.
۲۴. کامالیان، م.، و سهرابی بیدار، ع.، "تحلیل دینامیکی عوارض توپوگرافی دوبعدی ناهمگن در فضای زمان با استفاده از روش اجزای مرزی"، *مجله استقلال*، سال ۲۴، شماره ۲، ص ۵۱-۵۸، اسفند ۱۳۸۴.
25. 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, No. 8, pp. 753-765, 2006.
26. Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A., and Khalaj, A., "Amplification Pattern of 2D Semi-Sine Shaped Valleys Subjected to Vertically Propagating Incident Waves", *Communication in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 23, No. 10, pp. 871- 887, 2007.
27. Wong, H. L., and Jennings, P. C., "Effects of Canyon Topography on Strong Ground Motion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65, No. 5, pp. 1239-1257, 1975.
28. Sanchez-Sesma, F.J., and Rosenblueth, E., "Ground Motion at Canyons of Arbitrary Shape Under Incident SH Waves", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 7, No. 5, pp. 441-450, 1979.
29. Sanchez-Sesma, F. J., and Esquivel, J. A., "Ground Motion on Alluvial Valleys Under Incident Plane SH Waves", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 69, No. 4, pp. 1107-1120, 1979.
30. Reinoso, E., Wrobel, L. C., and Power, H., "Preliminary Results of the Modeling of the Mexico City Valley with a Two-Dimensional Boundary Element Method for the Scattering of SH Waves", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 12, No. 8, pp. 457-468, 1993.
31. Ausilio, E., Conte, E., and Dente, G., "Seismic Response of Alluvial Valleys to SH Waves", *Seismic Engineering Conference, AIP Conference Proceedings*, Vol. 1020, pp. 199-206, 2008.
32. Hirai, H., "Analysis of Transient Response of SH Wave Scattering in a Half-Space by the Boundary Element Method", *Engineering Analysis*, Vol. 5, No. 4, pp. 189-194, 1988.
33. Belytschko, T., and Chang, H. S., "Simplified Direct Time Integration Boundary Element Method", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 114, No. 1, pp. 117-134, 1988.
34. Panji, M., Kamalian, M., Asgari Marnani, J., and Jafari, M. K., "Transient Analysis of Wave Propagation Problems by Half-plane BEM", *Geophysical Journal International*, Vol. 194, No. 3, pp. 1849-1865, 2013.
35. Bouchon, M., "Effect of Topography on Surface Motion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 63, No. 3, pp. 615-632, 1973.
36. Kausel, E., *Fundamental solutions in elastodynamic*, Cambridge University Press, New York, 2006.
37. Brebbia C. A., and Dominguez, J., *Boundary Elements, an Introductory Course*, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston, 1989.
38. Kawase, H., "Time-Domain Response of a Semi-Circular Canyon for Incident SV, P, and Rayleigh Waves Calculated by the Discrete Wavenumber Boundary Element Method", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 78, No. 4, pp. 1415-1437, 1988.
39. Hadley, 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.
40. Borchardt, R. D., "Estimates of Site-Dependent Response Spectra for Design (Methodology and Justification)", *Earthquake Spectra*, Vol. 10, pp. 617-653, 1994.
41. Dominguez, J., and Gallego, R., "The Time Domain Boundary Element Method for Elastodynamic Problems", *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 15, No. 3-5, pp. 119-129, 1991.
42. Geli, L., Bard, P.-Y., and Jullien, B., "The Effect of Topography on Earthquake Ground Motion: a Review and New Results", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 78, No. 1, pp. 42-63, 1988.
43. Association Française du Genie Parasismique (AFPS), *Recommandations de la AFPS*, Paris: AFPS, 1990.