

# ارزیابی اثرات بازشدگی دره در پراکنش امواج زمین لرزه

رضا قاری نژاد\* (دانشیار)

محسن انباری (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

سید امیر علوی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۶ (۱۴۹۶)  
دوره ۲، شماره ۱/۲، ص. ۹۳-۱۰۵

در نوشتار حاضر، اثرات ساختگاهی با استفاده از روش المان مرزی سه بعدی مدل سازی شده و مطالعه جامع حساسیت در دره سه بعدی و تغییرات آن در طول، که وجه تمایز بارز پژوهش حاضر در قیاس با مطالعات پیشین است و به شکل نسبت بازشدگی تعریف می شود، انجام شده است. علاوه بر بررسی پارامتر مذکور، اثر پارامترهای مشخصات موج ورودی، شامل: بسامد، نوع و جهت برخورد موج، و همچنین مقایسه بین رفتار دینامیکی دره های نیم منشوری، منشوری، و غیر منشوری انجام و الگوهای مختلف بزرگ نمایی سطح دره های سه بعدی در برابر برخورد امواج برشی SH و SV ارائه شده است. نتایج نشان می دهند پارامتر نسبت بازشدگی در طول دره تأثیر محسوسی در جواب های به دست آمده از مدل سه بعدی دارد. علاوه بر این قابل مشاهده است که اثر تغییرات طول دره در نتایج به دست آمده تابعی از بسامد است.

r\_tarinejad@tabrizu.ac.ir  
isari.mohsen@tabrizu.ac.ir  
amir.shahamiri@yahoo.com

واژگان کلیدی: نسبت بازشدگی، المان مرزی، اثرات توپوگرافی، تفرق امواج.

## ۱. مقدمه

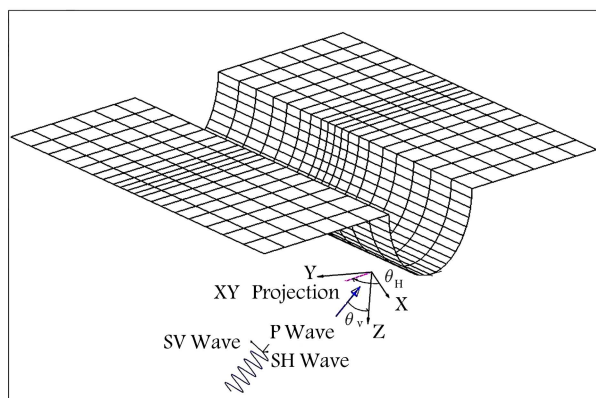
ادامه مطالعات اخیر، برخی پژوهشگران<sup>[۴-۲]</sup> توانسته اند فرمول بندی اجزاء مرزی را بهبود بخشند.<sup>[۵]</sup> همچنین با استفاده از روش المان مرزی، به مطالعه پارامتریک رفتار لرزه ای تپه ی گوسی شکل سه بعدی، که تحت امواج عمودی قرار گرفته است، پرداخته شده و نتایج حاصل نشان داده است که نوع موج، هندسه ی ساختگاه و طول موج از پارامترهای کلیدی مؤثر در رفتار لرزه ای تپه هستند.<sup>[۶]</sup>

در سال ۲۰۱۵، به بررسی اثرات وجود تونل در بزرگ نمایی سطح زمین با استفاده از روش المان مرزی پرداخته شده و این نتیجه به دست آمده است که بزرگ نمایی سطح زمین، که در آن تونل وجود دارد، در دوره های تناوب بلند افزایش می یابد.<sup>[۷]</sup> همچنین در مطالعات انجام شده یی، فرمولاسیون پیشرفته ی حوزه ی زمانی روش هیبرید المان مرزی و المان محدود به منظور استفاده در تحلیل ساختگاه های توپوگرافی تحت اثر امواج لرزه ای درون صفحه یی با محیط های هموزن و غیر هموزن ارائه شده و با توسعه ی کد نرم افزاری هیبرید، به منظور نشان دادن قابلیت و کارایی روش به تحلیل انواع ساختگاه های توپوگرافیکی شامل دره و تپه پرداخته شده است.<sup>[۸،۹]</sup> و نیز با استفاده از روش المان مرزی سه بعدی مستقیم در حوزه ی زمان، پاسخ دره ی سه بعدی گوسی شکل به صورت پارامتریک مورد مطالعه قرار گرفته است.<sup>[۱۰]</sup> همچنین برخی پژوهشگران در ادامه ی مطالعات خود به پیش بینی طیف ویژه ی ساختگاه در دره های همگن و آبرفتی پرداخته و براساس تحلیل های انجام شده، پاسخ های طیفی به دست آمده برای دره ی همگن را با استفاده از یک پارامتر نسبت سطح باز شو دره به زاویه ی دیواره ی دره ها در بالاترین نقطه از دره با سطح افقی دسته بندی کرده اند.<sup>[۱۱،۱۲]</sup>

با توجه به لرزه خیزی مناطق مختلف ایران و برای جلوگیری از ایجاد خسارت های سنگین و جبران ناپذیر، به خصوص در مکان هایی که سازه های حساسی در آنجا ساخته شده یا ساخته خواهد شد، لازم است برآورد مناسب و دقیقی از بارهای لرزه ای وارده روی سازه ها انجام شود و اثرات عوامل مختلف تأثیرگذار مورد ارزیابی قرار گیرد. یکی از عوامل مذکور، تشدید امواج لرزه ای رسیده به سطح زمین ناشی از اثرات ساختگاهی است، که از مدت ها قبل مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. تفرق امواج لرزه ای باعث ایجاد شتاب های لرزه ای مختلف در نقاط گوناگون با مصالح نرم و سخت خواهد شد، که مسئله ی ذکر شده می تواند روی جابه جایی های ایجاد شده ی ناشی از زمین لرزه در سطح زمین تأثیرگذار باشد. استفاده از روش المان مرزی برای محیط های نامحدود به دلیل آنکه گسسته سازی فقط در مرز حوزه انجام می گیرد و باعث می شود تا حجم مدل سازی و محاسبات لازم به شدت کاهش یابد، بسیار مناسب است. بنابراین در مطالعه ی حاضر از روش المان مرزی استفاده شده است. پژوهش های متعددی درخصوص بررسی پدیده ی تفرق امواج لرزه ای به روش های مشاهده یی، تحلیلی، و عددی انجام شده است، که در ادامه به بیان موارد مهم آن پرداخته شده است. اولین فرمول بندی جامع المان مرزی در حوزه ی زمان در سال ۱۹۸۳ ارائه شده است،<sup>[۱]</sup> که در آن پژوهشگر برای استخراج فرمول بندی از توابع هوپساید کمک گرفته است، که منجر به کاهش دقت هسته های ترکشن شده است. در

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۵/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۰/۱۲، پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۱۲.



شکل ۱. دره‌ی سه‌بعدی به طول محدود با امواج لرزه‌یی دلخواه.

برای حوزه‌ی بی‌نهایت ندارد. در کنار این‌گونه مزایا و برتری‌ها، روش مذکور یک نارسایی مهم دارد، که همانا طولانی بودن زمان تحلیل و برآورد انتگرال‌های موجود در روش ذکرشده است. معادلات حاکم بر مسائل الاستودینامیک از روابط ناویر تبعیت می‌کنند، که به صورت برداری و براساس مؤلفه‌های سرعت امواج است (رابطه‌ی ۱):

$$c_1^2 \nabla (\nabla \cdot u) - c_2^2 \nabla \times \nabla \times u - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -b \quad (1)$$

که در آن،  $c_1 = (\lambda + 2\mu/\rho)^{1/2}$  و  $c_2 = (\mu/\rho)^{1/2}$  به ترتیب سرعت امواج فشاری و برشی در محیط،  $b$  نیروهای حجمی در جرم واحد، و  $u$  بردار جابه‌جایی‌ها هستند. ضمن اینکه  $\lambda$  و  $\mu$  ثابت‌های لامه و  $\rho$  جرم حجمی جسم موردنظر هستند. در صورت استفاده از روش تحلیل در حوزه‌ی بسامد، بردار جابه‌جایی‌ها برای تحریک هارمونیک با بسامد  $\omega$  به صورت رابطه‌ی ۲ در می‌آید:

$$u(t) = \bar{u}(\omega) e^{i\omega t} \quad (2)$$

که در آن،  $\bar{u}$  دامنه‌ی بردار جابه‌جایی‌ها در حوزه‌ی بسامد است. با استفاده از رابطه‌ی ۲، معادله‌ی برداری ۱ به شکل مستقل از زمان به صورت رابطه‌ی ۳ قابل بازنویسی است:

$$c_1^2 \Delta (\Delta \cdot \bar{u}) - c_2^2 \Delta \times \Delta \times \bar{u} + \omega^2 \bar{u} = -b \quad (3)$$

معادله‌ی انتگرال مرزی حاکم بر مسئله می‌تواند از تئوری تقابل دینامیکی به صورت رابطه‌ی ۴ به دست آید:

$$c^i u^i + \int_{\Gamma} p^* u d\Gamma = \int_{\Gamma} u^* p d\Gamma \quad (4)$$

که در آن،  $u^i$  مؤلفه‌های تغییرمکان در نقطه‌ی مرزی  $i$ ،  $u$  و  $p$  مؤلفه‌های تغییرمکان و ترکشن روی تمام مرز،  $u^*$  و  $p^*$  جواب‌های اساسی تغییرمکان و ترکشن روی مرز در اثر بار واحد متمرکز در نقطه‌ی  $i$  هستند. ضریب مستقل  $c^i$  معروف به ترم پرش وابسته به هندسه‌ی خاص مرز در نقطه‌ی  $i$  است و می‌تواند از ترکشن صفر جسم صلب محاسبه شود.<sup>[۱۹]</sup> زمانی که مرز به تعداد  $ne$  المان گسسته‌سازی شود، با جایگذاری معادلات اخیر در معادله‌ی ۴، معادله‌ی ۵ به دست می‌آید:

$$c^i u^i + \sum_{j=1}^{ne} \left\{ \int_{\Gamma_j} p^* \Phi d\Gamma \right\} u^j = \sum_{j=1}^{ne} \left\{ \int_{\Gamma_j} u^* \Phi d\Gamma \right\} p^j \quad (5)$$

در نوشتاری نیز با عنوان «اثرات سه‌بعدی توپوگرافی در بزرگ‌نمایی امواج هارمونیک حجمی و مسطح»، به بررسی تفرق سه‌بعدی امواج هارمونیک مسطح بر روی سطوح با توپوگرافی خاص با استفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی پرداخته شده و نتایج به دست آمده از کارهای دوبعدی و یک‌بعدی صورت‌گرفته نشان داده است که برای حصول جواب دقیق، باید از تحلیل‌های سه‌بعدی استفاده کرد.<sup>[۱۳]</sup> در سال ۲۰۱۳، برای شبیه‌سازی پاسخ لرزه‌یی یک ساختمان به صورت سه‌بعدی به توسعه‌ی روش المان مرزی غیرمستقیم پرداخته شده و روش اندازه‌ی ماتریس برای حل مسئله‌ی المان مرزی به مقدار یک چهارم روش قبلی کاهش یافته است.<sup>[۱۴]</sup> در سال ۲۰۰۵، نیز برای بیان توانایی‌های روش المان مرزی، به بررسی رفتار لرزه‌یی دره‌های دوبعدی با توپوگرافی نامنظم و بستر رسوبی پرداخته شده است.<sup>[۱۵]</sup> همچنین برای بررسی و آنالیز تأثیر بزرگ‌نمایی توپوگرافی در ساختمان دره‌یی، از روش المان مرزی سه‌بعدی استفاده شده و با در نظر گرفتن بعضی از پارامترهای تأثیرگذار در بزرگ‌نمایی جابه‌جایی حاصل از زلزله، مانند: امواج لرزه‌یی با زاویه و بسامد مختلف و مصالح با خصوصیات مانند میرایی و ضریب پواسون و همچنین دره به شکل دلخواه به بررسی جداگانه‌ی عوامل مذکور پرداخته شده است.<sup>[۱۶-۱۸]</sup> پژوهش حاضر بر آن است تا با استفاده از روش المان مرزی، رابطه‌ی بین رفتار لرزه‌یی دره‌های سه‌بعدی و تغییرات دهانه‌ی دره در طول را در برابر امواج لرزه‌یی SV و SH مورد بررسی قرار دهد و نیز سعی شده است به سوالات اساسی همچون چگونگی رابطه‌ی الگوی بزرگ‌نمایی دره با تغییرات دهانه‌ی دره در طول، همچنین بیشینه‌ی پتانسیل بزرگ‌نمایی تحت امواج لرزه‌یی برشی در کدام نقطه از دره ایجاد می‌شود، و نیز تغییرات آن با پارامترهایی همچون بسامد امواج و نسبت بازشدگی چگونه خواهد بود، پاسخ داده شود.

## ۲. فرمول‌بندی روش المان مرزی

در مسائل مربوط به تفرق امواج لرزه‌یی با محیط بی‌نهایت یا نیم‌بی‌نهایت سر و کار داریم و با توجه به اینکه با استفاده از روش المان محدود فقط می‌توان قسمت محدودی از مسئله را مدل‌سازی کرد، ممکن است محدودیت مذکور منجر به کاهش دقت محاسبات شود. علاوه بر این، در مرزهای قطع‌شده از ناحیه‌ی مدل‌شده با توجه به انتشار موج از محیط بی‌نهایت، شاهد انعکاس‌های مصنوعی و در نتیجه عدم دقت جواب‌ها خواهیم بود. این دلایل از جمله مواردی است که روش المان محدود را در برخورد با مسائل انتشار امواج با مشکل مواجه می‌سازد، لذا معمولاً برای این قبیل مسائل در صورت نیاز، ترکیبی از روش المان محدود با یکی از روش‌های کارآمدتر دیگر (مانند روش المان مرزی در مسائلی مانند تحلیل دینامیکی غیریکنواخت سازه‌ها) و یا ترجیحاً روش‌های المان مرزی (برای مطالعات ساختگاهی) به تنهایی استفاده می‌شوند. بنا به دلایل ذکرشده، در پژوهش حاضر به منظور حل مسئله‌ی تفرق امواج لرزه‌یی از یک دره‌ی سه‌بعدی همگن و ایزوتروپ از روش المان مرزی استفاده شده است. در حالت سه‌بعدی، زاویه‌ی برخورد امواج زمین‌لرزه با ساختمان به‌وسیله‌ی دو زاویه قابل توصیف است: ۱. زاویه با محور طولی دره در صفحه‌ی افق ( $\theta_h$  یا زاویه‌ی افقی)، ۲. زاویه با محور قائم دره در صفحه‌ی قائم ( $\theta_v$  یا زاویه‌ی قائم). شکل ۱، مدل یک دره‌ی سه‌بعدی با طول محدود را که امواج لرزه‌یی با زوایای دلخواه تعریف شده به آن برخورد می‌کنند، نشان می‌دهد.

یکی از مزایای روش مذکور، امکان به‌کارگیری آن برای مسائل محیط‌های نامحدود مثل مسئله‌ی انتشار موج است. این روش با بهره‌گیری از جواب‌های اساسی، شرایط مرزی حاکم در مرز بی‌نهایت را ارضا کرده است و نیازی به شبکه‌بندی مرزی مجازی

انتگرال‌گیری روی المان مثلثی می‌توان از تکین‌بودن رهایی یافت و از روش گوس - لژاندر، انتگرال‌های اجزاء مثلثی را برآورد کرد. به این منظور ابتدا المان مستطیلی بر حسب اینکه نقطه‌ی منبع منطبق بر کدامیک از نقاط المان مرزی باشد، به تعداد مناسبی المان مثلثی تقسیم می‌شود. سپس با تبدیل مختصات مناسب انتگرال‌گیری روی المان مستطیلی به انتگرال‌گیری روی المان‌های مثلثی تبدیل می‌شوند. اساس روش، تعریف سیستم مختصاتی است که ژاکوبین در نقطه‌ی منبع صفر شود، به صورتی که با صفر موجود در مخرج هسته‌ی انتگرال، رفع ابهام شود. برای این منظور، سیستم مختصات مطابق شکل ۲ طوری تعریف می‌شود که ژاکوبین در نقطه‌ی منبع صفر شود.

رابطه‌ی بین مختصات  $s_1$  و  $s_2$  و مختصات  $\xi_1$  و  $\xi_2$  به صورت روابط ۱۱ و ۱۲ هستند:

$$\xi_i = (1 - s_1)\xi_i^1 + s_1(1 - s_2)\xi_i^2 + s_1s_2\xi_i^3 \quad (11)$$

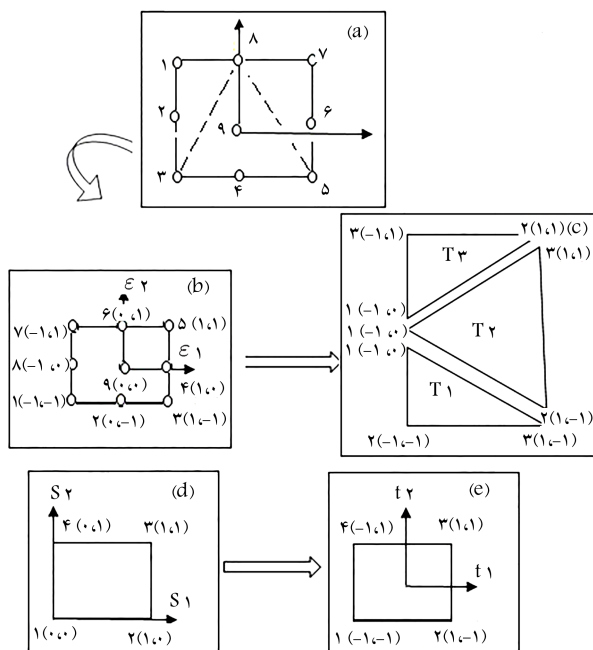
که در آن‌ها،  $i = 1, 2$  و اعداد بالای  $\xi$  نشان‌دهنده‌ی گروه‌های گوشه‌ی مثلث هستند.

$$d\xi_1 d\xi_2 = |J_2| ds_1 ds_2 = 2A s_1 ds_1 ds_2 \quad (12)$$

که در آن،  $A$  مساحت مثلث در مختصات بی‌بعد  $\xi_1 - \xi_2$  است. جهت استفاده از روش انتگرال‌گیری گوس، حوزه‌ی مربعی در سیستم  $s_1 s_2$  باید به مربعی به طول و جوه معادل ۲ انتقال یابد. بنابراین باید انتقال دوم به صورت رابطه‌ی ۱۳ انجام شود:

$$s_i = \frac{1 + t_i}{2} \quad (13)$$

بنابراین رابطه‌ی  $ds_1 ds_2 = |j_2| dt_1 dt_2 = \frac{1}{4} dt_1 dt_2$  به دست می‌آید. انتگرال مستطیلی با استفاده از تبدیل‌های ارائه‌شده به انتگرال‌های مثلثی در حوزه‌ی  $t_1 - t_2$



شکل ۲. a و b) المان مستطیلی ۹ گروه‌ی اصلی و مادر؛ c) المان تقسیم‌شده به زیرالمان‌های مثلثی با تکینگی در گروه‌ی شماره‌ی ۸؛ d و e) تبدیل‌های لازم برای انتگرال‌گیری از المان مثلثی.

که در آن،  $\Gamma$  نشان‌دهنده‌ی سطح المان  $z$  است. معادله‌ی ۵ را می‌توان به فرم رابطه‌ی ۶ بازنویسی کرد:

$$c^i u^i + \sum_{m=1}^n \hat{H}^{im} u^m = \sum_{j=1}^{n_e} G^{ij} p^j \quad (6)$$

## ۱.۲. توابع گرین

جواب‌های معادله‌ی ۳ به ازاء بار نقطه‌یی هارمونیک با دامنه‌ی واحد که در جهت اختیاری (بردار واحد) اعمال می‌شود، جواب‌های اساسی یا توابع گرین نامیده می‌شوند. این توابع با استفاده از تجزیه‌ی هلمهولتز معادلات حاکم به دست می‌آیند. در ادامه، جواب‌های اساسی مربوط به تغییرمکان و ترکشن ارائه شده‌اند (رابطه‌ی ۷):

$$u_{lk}^* = \frac{1}{\alpha \pi \rho c_T^2} [\psi \delta_{lk} - \chi r_{,l} r_{,k}] \quad (7)$$

که در آن،  $\psi$  و  $\chi$  برابر این مقادیر هستند (روابط ۸):

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{\exp(-k_2 r)}{r} + \left( \frac{1}{k_1^2 r^2} + \frac{1}{k_2 r} \right) \frac{\exp(-k_2 r)}{r} \\ &\quad - \frac{c_T^2}{c_1^2} \left( \frac{1}{k_1^2 r^2} + \frac{1}{k_1 r} \right) \frac{\exp(-k_1 r)}{r} \\ \chi &= \left( \frac{3}{k_1^2 r^2} + \frac{3}{k_2 r} + 1 \right) \frac{\exp(-k_2 r)}{r} \\ &\quad - \frac{c_T^2}{c_1^2} \left( \frac{3}{k_1^2 r^2} + \frac{3}{k_1 r} + 1 \right) \frac{\exp(-k_1 r)}{r} \end{aligned} \quad (8)$$

همچنین  $\alpha = 4$  و  $\delta_{ij}$  نشان‌دهنده‌ی تابع دلتای کرونکر و  $k_1 = \frac{i\omega}{c_1}$  و  $k_2 = \frac{i\omega}{c_T}$  به ترتیب اعداد امواج فشاری و برشی هستند. اندیس‌هایی که شامل کاما هستند، به منظور مشتق‌گیری نسبت به جهت موردنظر است. لازم به ذکر است از روی جواب اساسی مربوط به تغییرمکان می‌توان جواب اساسی مربوط به ترکشن را محاسبه کرد. این کار با استفاده از روابط موجود بین تنش، کرنش، و تغییرمکان و نیز رابطه‌ی تنش و ترکشن (قانون استوکس) صورت می‌گیرد. جواب اساسی مربوط به ترکشن محاسبه‌شده از روی جواب اساسی تغییرمکان به صورت رابطه‌ی ۹ است: [۲۰]

$$\begin{aligned} p_{lk}^* &= \frac{1}{\alpha \pi} \left[ \left( \frac{d\psi}{dr} - \frac{1}{r} \chi \right) (\delta_{lk} \frac{\partial r}{\partial n} + r_{,k} n_l) - \frac{2}{r} \chi (n_k r_{,l} - 2 r_{,l} r_{,k} \frac{\partial r}{\partial n} \right. \\ &\quad \left. - 2 \frac{d\chi}{dr} r_{,l} r_{,k} \frac{\partial r}{\partial n} + \left( \frac{c_1^2}{c_T^2} - 2 \right) \left( \frac{d\psi}{dr} - \frac{d\chi}{dr} - \frac{\alpha}{2r} \chi \right) r_{,l} n_k \right] \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن،  $d\psi/dr$  و  $d\chi/dr$  به شکل روابط ۱۰ هستند:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dr} &= \left( -\frac{2}{r} - k_2 - \frac{3}{k_2 r^2} - \frac{3}{k_1^2 r^2} \right) \frac{\exp(-k_2 r)}{r} \\ &\quad + \frac{c_T^2}{c_1^2} \left( \frac{1}{r} + \frac{3}{k_1 r^2} + \frac{3}{k_1^2 r^2} \right) \frac{\exp(-k_1 r)}{r} \\ \frac{d\chi}{dr} &= \left( -\frac{4}{r} - k_2 - \frac{9}{k_2 r^2} - \frac{9}{k_1^2 r^2} \right) \frac{\exp(-k_2 r)}{r} \\ &\quad + \frac{c_T^2}{c_1^2} \left( \frac{4}{r} + k_1 + \frac{9}{k_1 r^2} + \frac{9}{k_1^2 r^2} \right) \frac{\exp(-k_1 r)}{r} \end{aligned} \quad (10)$$

## ۲.۲. برآورد انتگرال‌های تکین

برای انتگرال‌گیری از هسته با تکین‌بودن از نوع ضعیف مشابه آنچه در هسته‌ی تغییرمکان وجود دارد، با استفاده از روش تبدیل انتگرال‌گیری روی المان مستطیلی به

تبدیل و با استفاده از روش استاندارد گوس محاسبه می شود (رابطه ی ۱۴):<sup>[۲۱]</sup>

$$G(k) = \sum_{no. of Triangles} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 u^*(t_1, t_2) \phi_k(t_1, t_2) |G(t_1, t_2)| (t_1 + 1) \frac{A}{4} dt_1 dt_2 \quad (14)$$

برای محاسبه ی انتگرال هسته ی ترکشن با توجه به اینکه با تکین بودن از نوع قوی مواجه هست، لذا لازم است از CPV (مقدار اصلی کوشی) استفاده شود. انتگرال گیری تحلیلی چه در حوزه ی بسامد و چه در حوزه ی زمان، پیچیدگی های خاصی دارد. همچنین برای محاسبه ی انتگرال های موجود در هسته ی ترکشن می توان از روش غیرمستقیم استفاده کرد، که برای مسائل الاستواستاتیک توسط لاچات و واتسون نیز استفاده شده است.<sup>[۲۲]</sup> نکته ی اساسی در روش مذکور، فرض یک حرکت صلب برای مسئله ی موردنظر است، چرا که برای چنین حرکتی ترکشن های متناظر صفر خواهند بود. براساس شیوه ی غیرمستقیم، عناصر قطری ماتریس مرتبط (که حاوی انتگرال های تکین هستند)، بر حسب عناصر غیرقطری (که تکین بودن در آنها وجود ندارد) بیان می شوند. با توجه به اینکه در مسائل دینامیکی رفتار هسته ی ترکشن در حالتی که نقطه ی منبع و حوزه به هم میل کنند، مشابه رفتار هسته ی استاتیک است، می توان روش مذکور را برای مسائل الاستودینامیک نیز بسط داد. تکین بودن تابع گرین ترکشن و بنابراین، تکین بودن ماتریس  $H$  در حالت سه بعدی در حالتی که نقطه ی منبع و حوزه بر هم منطبق باشند، از نوع  $1/r^2$  است. در پژوهش حاضر، برای فرار از تکین بودن قوی از روش غیرمستقیم که بر پایه ی در نظر گرفتن تعادل استاتیکی برای ترکشن های سطحی، که به صورت نرمال روی دامنه های بسته اثر می کنند، استفاده شده است. برای تعمیم روش غیرمستقیم جهت استفاده در مسائل با دامنه های باز (که در واقع قسمتی از مرز مدل نشده باشد)، یک روش اصلاح شده ی مبتنی بر به کارگیری روش المان های محصورکننده ی پیشنهادی در پژوهشی در سال ۱۹۸۸، استفاده شده است.<sup>[۲۳]</sup>

اساس روش عددی پیشنهادی در برخی پژوهش ها،<sup>[۲۳، ۲۴]</sup> برای دامنه های بسته این است که تکین بودن در پاسخ دینامیکی حوزه ی بسامد مشابه پاسخ استاتیکی است. از این رو ماتریس تابع گرین دینامیکی  $\hat{H}$  برای ترکشن را می توان به صورت مجموع پاسخ استاتیکی  $\hat{H}_S$  و ماتریس باقیمانده ی دینامیکی  $\hat{H}_R$  بیان کرد (رابطه ی ۱۵):

$$\hat{H} = \hat{H}_S + \hat{H}_R \quad (15)$$

تکین بودن فقط در قسمت استاتیکی وجود دارد و لازم است با روش خاصی برآورد شود و ترم باقیمانده به دلیل نداشتن تکین بودن می تواند با روش استاندارد گوس - لژاندر برآورد شود. فرض کنیم حرکت صلب  $u_k$  برابر بردار واحد به فرم استاتیکی معادله ی ۵ اعمال شود، برابر صفر خواهد بود و رابطه ی ۱۶ را خواهیم داشت:

$$c_{lk}^i + \sum_{q=1}^{ne} \int_{\Gamma_q} p_{lk}^* \phi d\Gamma = c_{lk}^i + \sum_{q=1}^{ne} \sum_{a=1}^A \int_{S_q} p_{lk}^* N_a dS = 0 \quad (16)$$

که در آن، بالانویس  $s$  نشان دهنده ی حالت استاتیکی،  $ne$  تعداد المان ها،  $A$  تعداد گره های هر المان، و  $N_a$  تابع شکل متناظر با گره ی  $a$  است. با فرض اینکه  $q = 1$  نشان دهنده ی المان تکین و  $a = 1$  نیز گره ی تکین باشد، در معادله ی ۱۵ بلوک های قطری  $D_{ij}^s$  از ضرایب ماتریس ترکشن برای مسئله ی استاتیک با هندسه ی مشابه می تواند با به کار بردن جابه جایی جسم صلب به دست آید. به بیان دیگر، معادله ی

۱۶ می تواند به صورت معادله ی ۱۷ بازنویسی شود:

$$D_{ij}^s = c_{lk}^i + \int_{S_1} P_{ij}^{*s} N_\alpha dS = - \sum_{a=2}^A \int_{S_1} P_{ij}^{*s} N_a dS - \sum_{q=2}^{ne} \sum_{a=1}^A \int_{S_q} P_{ij}^{*s} N_a dS \quad (17)$$

به این ترتیب بلوک تکین استاتیکی  $D_{ij}^s$  بر حسب ترم های غیرتکین غیرقطری قابل بیان است. بلوک قطری  $3 \times 3$  از ماتریس  $H$  شامل تانسور  $c_{ij}$  و مقدار اصلی کوشی از هسته ی ترکشن است، که برای مسائل دینامیک به صورت رابطه ی ۱۸ بیان می شود:

$$D_{ij}^d = c_{lk}^i + \int_{S_1} P_{ij}^{*d} N_\alpha dS \quad (18)$$

با حذف ترم پرش بین دو معادله ی ۱۷ و ۱۸، رابطه ی ۱۹ را خواهیم داشت:

$$D_{ij}^d = D_{ij}^s + \int_{S_1} (P_{ij}^{*d} - P_{ij}^{*s}) N_\alpha dS \quad (19)$$

که در آن،  $N_\alpha$  تابع شکل برای گره ی تکین و  $S_1$  سطح المان تکین است. با توجه به اینکه عبارت زیر انتگرال در رابطه ی اخیر شامل ترم  $(P_{ij}^{*d} - P_{ij}^{*s})$  غیرتکین است، برآورد  $D_{ij}^d$  به سادگی امکان پذیر خواهد بود.

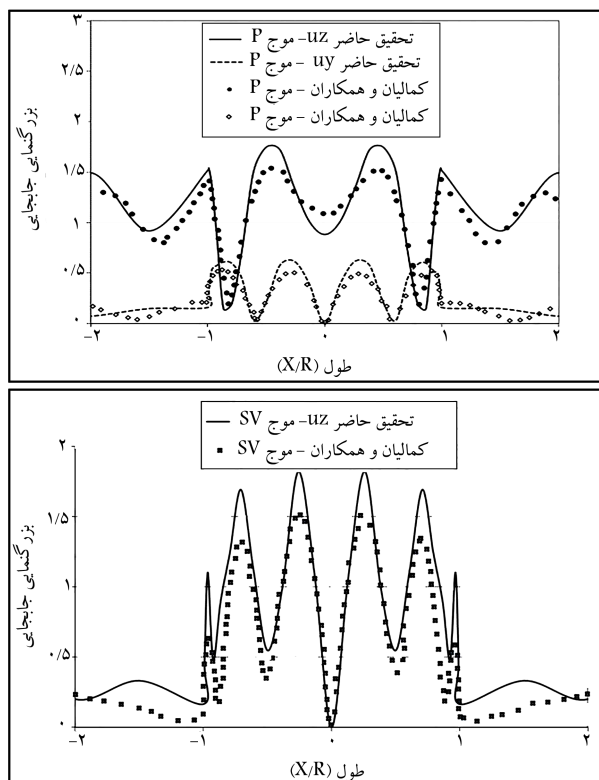
در ادامه، روش جابه جایی جسم صلب، روش تعمیم به مسائل نامحدود با استفاده از المان های محصورکننده برای محاسبه ی  $D_{ij}^d$  ارائه شده است. فرض پایه یی روش مذکور این است که تغییر مکان ها و ترکشن ها روی مرز مجازی (محصورکننده ی مسئله) به فاصله ی مناسب از مرز اصلی تأثیری در تغییر مکان های هر نقطه از مرز مدل شده را ندارد. با استفاده از روش مذکور، بلوک های قطری  $D_{ij}^s$  ماتریس  $H$  از طریق مجموع انتگرال های غیرتکین هسته ی ترکشن استاتیکی روی تمام المان های مرز اصلی مدل شده همراه با تمام المان های مرز محصورکننده به دست می آیند (رابطه ی ۲۰):

$$D_{ij}^s = - \left[ \sum_{\alpha=2}^A \int_{S_1} P_{ij}^{*s} N_\alpha dS + \sum_{q=2}^{ne} \sum_{\alpha=1}^A \int_{S_q} P_{ij}^{*s} N_\alpha dS + \sum_{e=1}^L \sum_{\alpha=1}^A \int_{S_e} P_{ij}^{*s} N_\alpha dS \right] \quad (20)$$

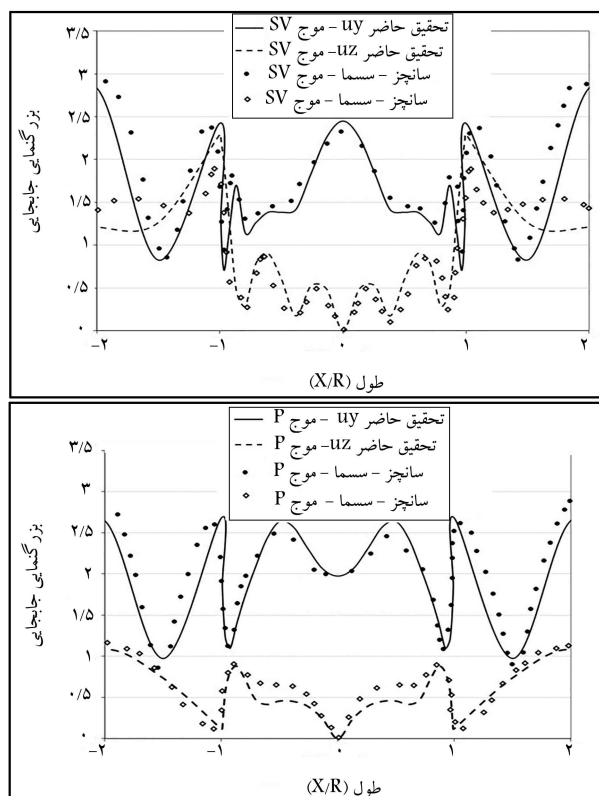
که عبارت سوم در آن، مربوط به انتگرال های متناظر با المان های روی مرز محصورکننده ( $L$  تعداد المان های روی مرز محصورکننده) است. زمانی که  $D_{ij}^s$  برآورد شدند، ترم های قطری  $D_{ij}^d$  مرتبط با مسئله ی دینامیکی می توانند به راحتی با استفاده از معادله ی ۱۹ به دست آیند.

### ۳.۲. حل مسئله ی تفرق موج در نیم فضای سه بعدی یک دره با شکل دلخواه

برای به دست آوردن حرکت کل ناشی از برخورد امواج به دره، ابتدا از حل میدان آزاد، یعنی برای محیط نیم بی نهایت مسطحی که دره یی در آن قرار ندارد، جابه جایی های میدان آزاد محاسبه و سپس جواب به دست آمده با استفاده از فرمول بندی روش المان مرزی در الاستودینامیک اصلاح می شود. به این ترتیب می توان تغییرات حرکت در



شکل ۳. مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه‌شده‌ی کمالیان و همکاران،<sup>[۹]</sup> برای موج ورودی P - SV.



شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه‌شده‌ی سانچز - سسما،<sup>[۲۴]</sup> برای موج ورودی P - SV.

امتداد دیواره‌ی دره را که حاصل از پخش‌شدگی و انکسار امواج توسط دیواره‌ی دره است، محاسبه کرد.

در سطح محیط نیمه‌بی‌نهایت هم ترکشن‌ها خودبه‌خود صفر می‌شوند، چون حل میدان آزاد شرایط بدون ترکشن را ارضا می‌کند. حرکت کل ناشی از برخورد امواج زلزله به دره از مجموع حرکت میدان آزاد و حرکت تفرقی‌یافته به‌دست می‌آید (رابطه‌ی ۲۱):

$$u_{total} = u_{ff} + u_s \quad (21)$$

شرط بدون بار بر روی مرز دره ( $\Gamma_c$ )، رابطه‌ی ۲۲ را ایجاب می‌کند:

$$t_s = -t_{ff} \quad (22)$$

### ۳. صحت‌سنجی کد رایانه‌یی به‌کار رفته در پژوهش

به منظور انجام محاسبات لازم در روی ساختگاه‌های دره‌یی، کد رایانه‌یی به زبان فرترن (TDASC) نوشته شده است، که قابلیت حل انواع مسائل الاستودینامیک سه‌بعدی را که شامل برخورد امواج حجمی زمین‌لرزه به ساختگاه‌های دره‌یی است، دارد. به منظور اطمینان از صحت و ارزیابی کد TDASC برای محاسبه‌ی جابه‌جایی‌های میدان آزاد سطح دره، یک‌سری مقایسه با جواب‌های به‌دست‌آمده در نوشتارهای مختلف انجام شده است، که در ادامه به بعضی از آن‌ها اشاره شده است:

۱. نتایج ارائه‌شده در شکل ۳، نشان‌دهنده‌ی مقایسه‌ی بزرگ‌نمایی ایجادشده بر روی یک تپه‌ی نیم‌دایره‌یی در حالت دوبعدی تحت امواج P - SV و بسامد بی‌بعد ۲ توسط کمالیان و همکاران،<sup>[۹]</sup> و پژوهش حاضر است. مطابق شکل مذکور، انطباق خوبی بین پژوهش حاضر و کمالیان وجود دارد. اختلاف اندک بین نتایج به دلیل سه‌بعدی‌بودن پژوهش حاضر و دوبعدی‌بودن مدل کمالیان است.

۲. مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه‌شده‌ی سانچز - سسما و کامپایلو،<sup>[۲۴]</sup> برای دره‌ی نیم‌دایره‌یی تحت موج ورودی P و SV با  $\theta_h = 90^\circ$  و  $\theta_v = 0^\circ$  و بسامد بی‌بعد ۲ در شکل ۴ ارائه شده است؛ که مطابق آن، نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی با نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های سانچز - سسما انطباق خوبی را نشان می‌دهند.

### ۴. نتایج تحلیل‌های پارامتریک

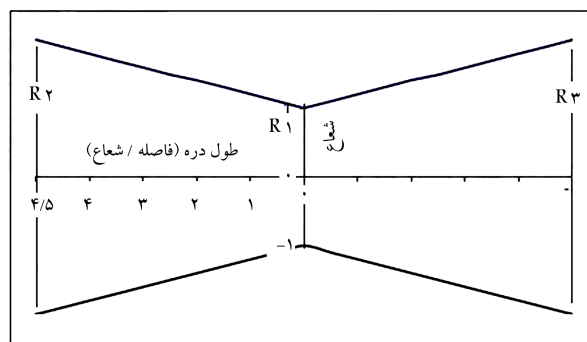
در پژوهش حاضر، با استفاده از کد توسعه‌یافته‌ی المان مرزی، به مطالعه‌ی رفتار دینامیکی دره‌ی سه‌بعدی همگام با تغییرات در راستای طول آن، تحت امواج حجمی SH و SV پرداخته شده است. علاوه بر مطالعه‌ی اثر پارامتر نسبت بازشدگی دره، که کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و در پژوهش حاضر سعی شده است به طور تفصیلی مورد ارزیابی قرار گیرد، رفتار دینامیکی موقعیت‌های مختلف روی دره نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۵، دره به شعاع  $R_1$  دره‌ی اصلی (میانی) و اثرات بازشدگی روی آن مشاهده می‌شود. ناهمواری به شکل دره‌های منشوری، نیم‌منشوری، و غیرمنشوری در نظر گرفته شده است. تعریف‌های مربوط به منشوری، نیم‌منشوری، و غیرمنشوری در ادامه ارائه شده است.

با توجه به نسبت بازشدگی ( $WR$ )<sup>۱</sup>، که بیان‌گر نسبت شعاع دره در انتها به دره‌ی میانی، که موقعیت ساختگاه سازه است، اگر نسبت‌های بازشدگی برابر واحد

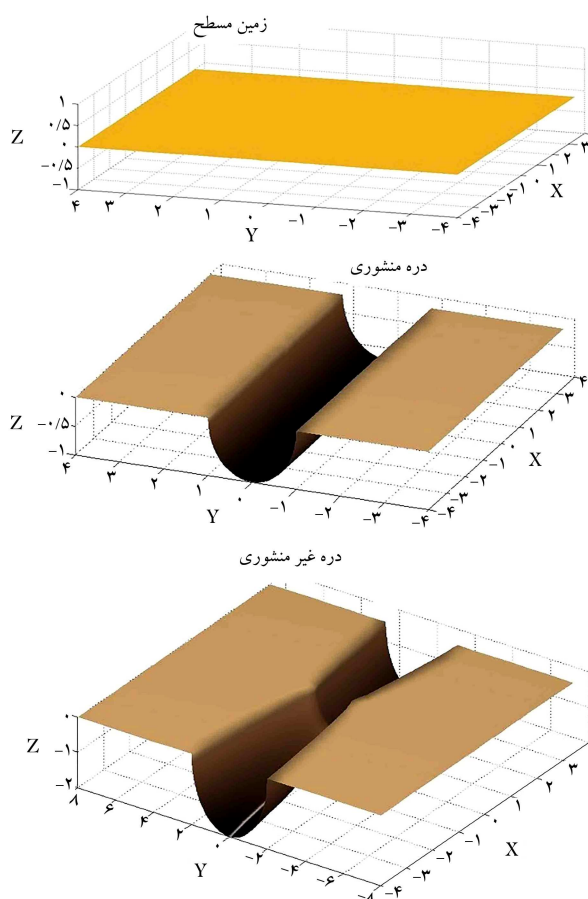
باشد ( $R_2/R_1 = R_3/R_1 = 1$ ) دره منشوری و اگر یکی از این نسبت‌ها مخالف ۱ و نسبت دیگر برابر ۱ باشد ( $R_2/R_1 \neq 1$  و  $R_3/R_1 = 1$ ) دره نیم‌منشوری و در نهایت، اگر هر دو این نسبت‌ها مخالف ۱ باشند، دره غیرمنشوری است.

#### ۱.۴. بررسی اثرات تفرق امواج لرزه‌یی در برخورد با سطح زمین

برای مشاهده‌ی نحوه‌ی کلی پراکندگی امواج زمین‌لرزه (SH)، ناشی از برخورد با سطح زمین، همان‌طور که در شکل ۶ ارائه شده است، سطح زمین در ۳ موقعیت سطح،



شکل ۵. پلان دره، که نشان‌دهنده‌ی تغییرات دهانه در طول است.



شکل ۶. به ترتیب نشان‌دهنده‌ی سطح زمین بدون دره، با دره‌ی منشوری، و با دره‌ی غیرمنشوری است.

دره‌ی منشوری و در نهایت، دره با نسبت بازشدگی ۲ (غیرمنشوری) در نظر گرفته شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

ابتدا به بررسی بزرگ‌نمایی‌های جابه‌جایی ایجادشده در سطح زمین مسطح پرداخته شده است (شکل‌های ۷ الی ۹). پارامترهای مورد استفاده در این قسمت عبارت‌اند از: بسامد بی‌بعد ( $\eta$  رابطه‌ی ۲۳)، دوره‌ی تناوب بی‌بعد (T رابطه‌ی ۲۴)، و طول موج برخوردی ( $\lambda$ ).

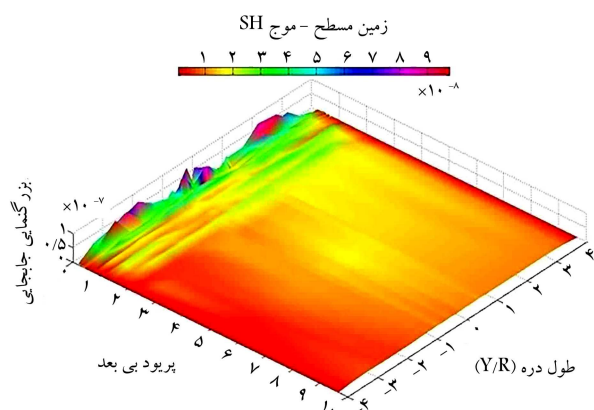
$$\eta = (\omega R / \pi c) \quad (23)$$

که در آن،  $\pi$  بسامد بی‌بعد،  $\omega$  سرعت زاویه‌یی،  $c$  سرعت موج برشی و  $R$  شعاع دره است.

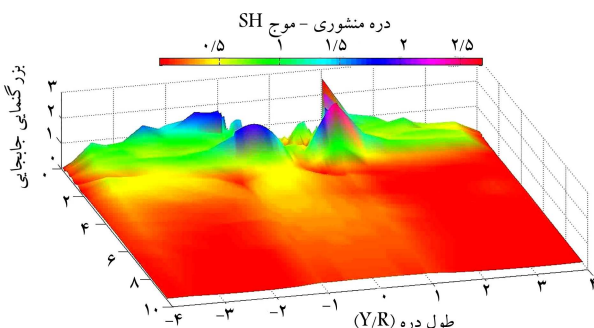
$$T (\text{Dimensionless Period}) = 1/\eta = \lambda/2R \quad (24)$$

که در آن،  $T$  دوره‌ی تناوب بی‌بعد و  $\lambda$  طول موج وارد است. به عبارت دیگر می‌توان گفت مقادیر مختلف دوره‌ی تناوب بی‌بعد، نشان‌دهنده‌ی طول موج‌هایی برابر همان مقادیر ولی برحسب قطر دره است.

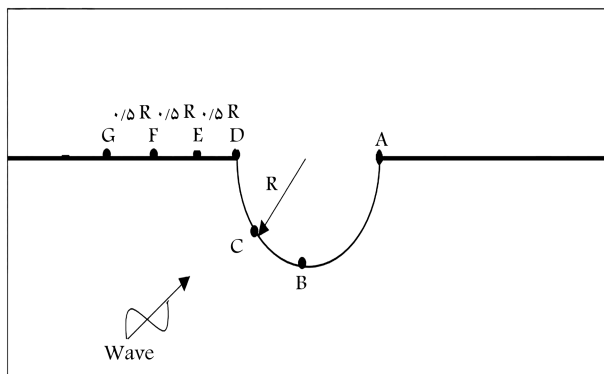
آنچه که از مقایسه‌ی شکل‌های ۷ الی ۹ به طور کاملاً مشهودی قابل مشاهده است، اثرات وجود ناهم‌واری به خصوص در محدوده‌ی دوره‌ی تناوب بی‌بعد  $0.1$  تا  $0.4$  است. آنچه که مطابق شکل‌های مذکور بدیهی به نظر می‌رسد، این است که در زمین مسطح به دلیل عدم پراکندگی امواج زمین‌لرزه، تفاوت در جابه‌جایی نقاط مختلف زمین چندان قابل توجه نیست و قابل صرف‌نظر کردن است. تفاوت بسیار اندک جابه‌جایی‌ها در راستای عرض دره به دلیل راستای برخورد موج و همچنین



شکل ۷. بزرگ‌نمایی ایجادشده در سطح زمین مسطح در اثر زمین‌لرزه در دوره‌های تناوب بی‌بعد مختلف.



شکل ۸. بزرگ‌نمایی ایجادشده در سطح زمین با دره به شکل منشوری در اثر زمین‌لرزه در دوره‌های تناوب بی‌بعد مختلف.



شکل ۱۰. موقعیت نقاط مختلف روی دره‌ی میانی به منظور بررسی اثرات تفرق امواج زمین‌لرزه.

مشاهده شده می‌تواند به دلیل کم‌بودن اثرات تفرق امواج لرزه‌یی در کف دره باشد. در شکل ۱۱، که در آنها دره تحت برخورد موج SV قرار گرفته است، می‌توان مشاهده کرد که دره‌ی نیم‌منشوری تقریباً جابه‌جایی بیشتری را نسبت به دره‌ی غیرمنشوری با همان نسبت بازشدگی دارد. در ادامه‌ی تحلیل‌های انجام شده روی ۳ دره، پاسخ دینامیکی دره‌های مذکور تحت موج SH نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده و ارائه شده در شکل ۱۲، مشابه موج SV برای دوره‌ی تناوب بی‌بعد کمتر از ۲، نوسانات پاسخ‌ها بیشتر و همچنین دره‌ی غیرمنشوری، بزرگ‌نمایی بیشتری نسبت به سایر دره‌ها دارد. همچنین با توجه به اینکه در امواج SH برخلاف امواج SV تبدیل موج صورت نگرفته و موج منتشر شده همواره تک‌مؤلفه‌یی است، بنابراین پیچیدگی الگوی جابه‌جایی مشاهده شده در موج SH نسبت به موج SV کمتر و سرعت همگرایی به سمت حرکت سطح آزاد زمین نیز بیشتر است.

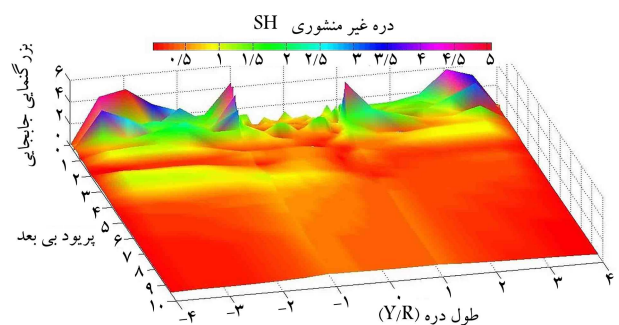
با توجه به نتایج حاصله در این بخش مشهود است که میزان جابه‌جایی در سطح زمین با وجود دره با شعاع افزاینده در طول (مسئله‌یی که کمتر مورد توجه قرار گرفته است) نسبت به دره‌یی که برای سادگی به صورت منشوری فرض شده است، مقدار بزرگ‌تری را نشان می‌دهد. این رفتار دره با پارامتر بازشدگی در طول، که شباهت بیشتری با حالت واقعی در طبیعت دارد، می‌تواند با افزایش تفرق و همچنین با توجه به افزایش شعاع در راستای طول، اثرگذاری ساختگاه نیز افزایش و به دلیل پیوستگی محیط و انتقال این رفتار به دره‌ی میانی موجب افزایش میزان بزرگ‌نمایی در روی دره‌ی میانی شود.

## ۶. مقایسه‌ی الگوی بزرگ‌نمایی موقعیت‌های مختلف

### روی دره‌های منشوری و نیم‌منشوری

مطابق شکل ۱۰، هفت نقطه در موقعیت‌های مختلف روی دره‌های منشوری و نیم‌منشوری در نظر گرفته شده و پاسخ دینامیکی نقاط مذکور روی هر کدام از دره‌های ذکر شده تحت امواج SH و SV با زاویه‌ی برخورد ۴۵ درجه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نقاط مذکور روی لبه‌ی دره در دو طرف، بر روی دیواره، کف دره، و همچنین بر روی سطح آزاد زمین و در فواصل دور از دره در نظر گرفته شده‌اند (شکل‌های ۱۳ الی ۱۶).

همان‌گونه که در شکل‌های ۱۳ الی ۱۶ مشاهده می‌شود، قله‌های بزرگ‌نمایی عموماً در محدوده‌ی گوشه‌های دره ایجاد شده است. علاوه بر این، در بین نقاط



شکل ۹. بزرگ‌نمایی ایجاد شده در دره‌ی غیرمنشوری با نسبت بازشدگی  $WR = 2$ .

تفاوت در راستای طول دره نیز به دلیل تغییر طول موج برخوردی به سطح زمین است. این در حالی است که در زمین با ناهمواری به شکل دره، الگوی بزرگ‌نمایی به خصوص در نقاط لبه‌ی دره ( $Y/R = 1, -1$ )، تفاوت آشکاری به خصوص در دوره‌های تناوب بی‌بعد پایین با زمین مسطح دارد. بزرگ‌نمایی مشاهده شده در نقاط لبه‌ی دره می‌تواند به دلایلی مانند افزایش تفرق و یا نوعی گیرافتادن امواج در گوشه‌های دره باشد. کاملاً مشهود است که وجود ساختگاه دره‌یی شکل در زمین به خصوص در طول موج‌هایی که نزدیک ابعاد دره هستند، باعث تغییر در الگوی جابه‌جایی و افزایش میزان بزرگ‌نمایی می‌شود. با مقایسه بین دو دره‌ی منشوری و غیرمنشوری در شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان به تأثیر پارامتر بازشدگی در طول دره پی برد. در ادامه‌ی تحلیل‌های انجام شده در پژوهش حاضر به بررسی دقیق‌تر پارامتر بازشدگی پرداخته شده است.

## ۵. مقایسه‌ی پاسخ دینامیکی دره‌های منشوری،

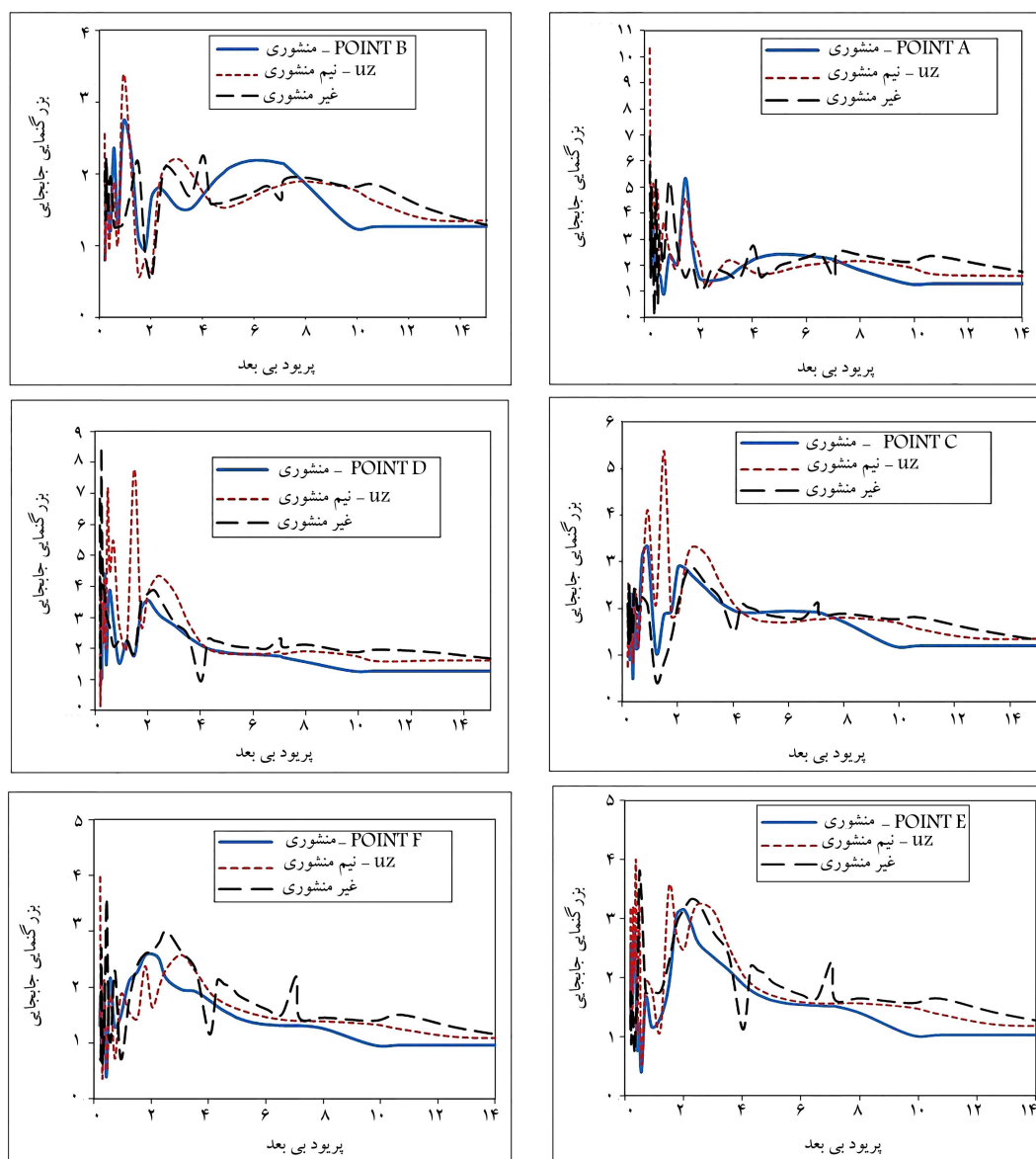
### نیم‌منشوری، و غیرمنشوری

در بخش ۵، به مقایسه‌ی پاسخ دینامیکی دره‌ی منشوری و دره‌های نیم‌منشوری ( $R_2/R_1 = 2$  و  $R_2/R_1 = 1$ ) و غیرمنشوری ( $WR = 2$ ) در دوره‌های تناوب بی‌بعد بین ۰/۱-۱/۵، نسبت پواسون ۰/۳۳، موج برشی با سرعت (۱۰۲/۵ m/s)، تحت امواج SH و SV، با زاویه‌ی برخورد ۴۵ درجه روی موقعیت‌هایی که در شکل ۱۰ ارائه شده، پرداخته شده است.

با توجه به نتایج حاصله از مقایسه‌ی بین سه دره‌ی منشوری، نیم‌منشوری، و غیرمنشوری تحت موج SV با نسبت بازشدگی ( $WR = 2$ ) می‌توان مشاهده کرد که دره‌ی منشوری، بزرگ‌نمایی کمتری نسبت به دو دره‌ی دیگر دارد. بین دو دره‌ی نیم‌منشوری و غیرمنشوری در محدوده‌ی دوره‌ی تناوب بی‌بعد بین ۰/۱-۲/۰ اختلاف محسوسی در جابه‌جایی نقاط روی دره مشاهده می‌شود، این تفاوت در نقاط خارج از دره در محدوده‌ی دوره‌ی تناوب مذکور بی‌بعد کمتر می‌شود. چنانچه در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، کم‌تر شدن دوره‌های تناوب بی‌بعد (افزایش بسامد امواج ورودی) موجب افزایش نوسان الگوی بزرگ‌نمایی و تمرکز اوج بزرگ‌نمایی در دوره‌های تناوب کمتر از ۲ می‌شود.

در دوره‌های تناوب بی‌بعد بزرگ‌تر از ۲، رفتار این دو دره تقریباً مشابه یکدیگر است و تفاوت چندانی در بزرگ‌نمایی مشاهده نمی‌شود. همچنین در نقاط A و D، که در گوشه‌های دو طرف ناهمواری واقع هستند، بیشترین جابه‌جایی در دو راستای افقی و قائم مشاهده می‌شود. نقطه‌ی B نیز که در کف دره واقع شده است، کمترین میزان بزرگ‌نمایی را در بین نقاط مورد بررسی دارد. دلیل رفتار





شکل ۱۱. مقایسه‌ی الگوی بزرگ‌نمایی تحت موج SV.

انتهایی به دره‌ی میانی است، به ترتیب برابر  $WR = 1, 1/5, 2, 3, 4, 6, 8$  است. دره به صورت نیم‌دایره، همگن، تحت امواج برشی SV و SH با زاویه‌ی برخورد  $45^\circ$  درجه، نسبت پواسون  $0.33$ ، و سرعت موج برشی  $102/5$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. تحلیل‌ها در بسامدهای بی بعد  $0.1, 0.3, 0.5, 1, 1/5, 2$  انجام شده است. در شکل ۱۷، نتایج مربوط به اثرات پارامتر بازشدگی تحت موج SV ارائه شده است.

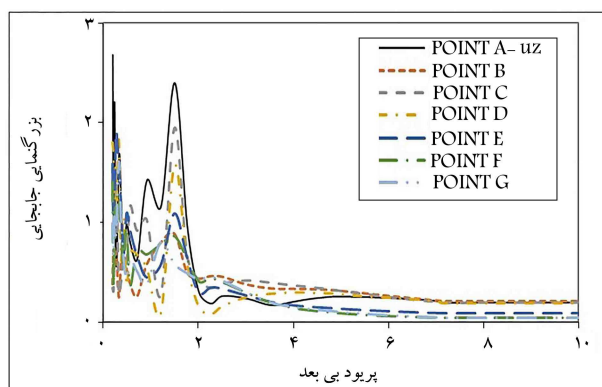
مطابق شکل ۱۷، با تغییر نسبت بازشدگی در میزان جابه‌جایی و بزرگ‌نمایی دره نیز تغییرات قابل ملاحظه‌ی تجربه می‌شود. چنانچه ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت بازشدگی دره، الگوی بزرگ‌نمایی جابه‌جایی نیز افزایش پیدا می‌کند. بیشینه‌ی مقادیر بزرگ‌نمایی در لبه‌ی دره تجربه شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، در بسامدهای بی بعد کمتر از ۱، الگوی بزرگ‌نمایی بسیار منظم و افزایش WR موجب افزایش جابه‌جایی شده است. افزایش بسامد موجب پیچیده‌تر شدن الگوی بزرگ‌نمایی و عموماً منجر به افزایش جابه‌جایی شده است.

مورد مطالعه، کف دره در دوره‌های تناوب بی بعد مختلف همواره بزرگ‌نمایی کمتری را تجربه کرده است، این پاسخ را می‌توان با عدم پراکندگی امواج زمین‌لرزه در کف دره توجیه کرد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که نقطه‌ی مذکور با سرعت بیشتری نسبت به سایر نقاط به سمت حرکت آزاد سطح زمین همگرا می‌شود. هر چه به دره نزدیک می‌شویم، به دلیل افزایش اثرات انکسار امواج زمین‌لرزه در نقاط مجاور دره، الگوهای بزرگ‌نمایی، نوسان و مقدار بزرگ‌تری را نشان می‌دهند.

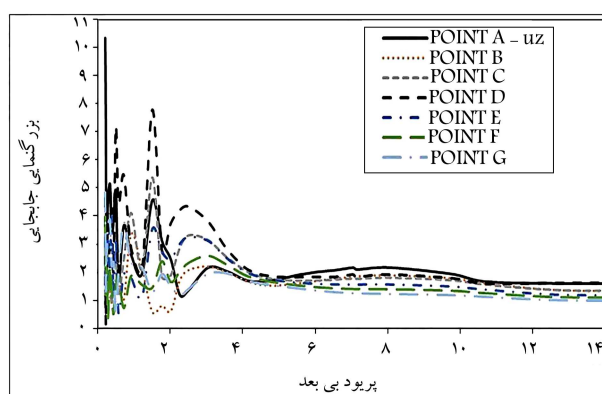
## ۷. بررسی اثرات بازشدگی دره

درادامه‌ی تحلیل‌های انجام‌شده در نوشتار حاضر به بررسی و مطالعه‌ی پارامتر بازشدگی دره (WR) پرداخته شده است. نسبت بازشدگی (WR) که برابر نسبت شعاع دره

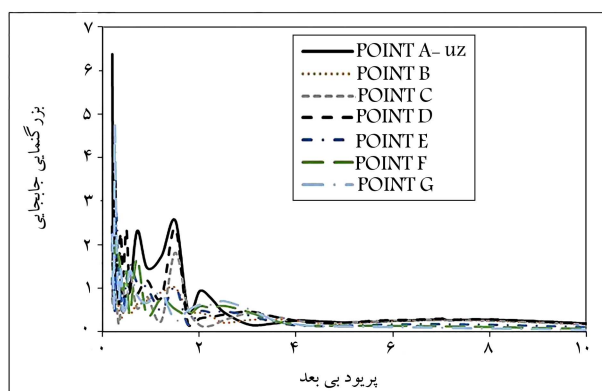




شکل ۱۴. مقایسه‌ی الگوی بزرگ‌نمایی نقاط مختلف روی دره‌ی منشوری تحت موج SH.

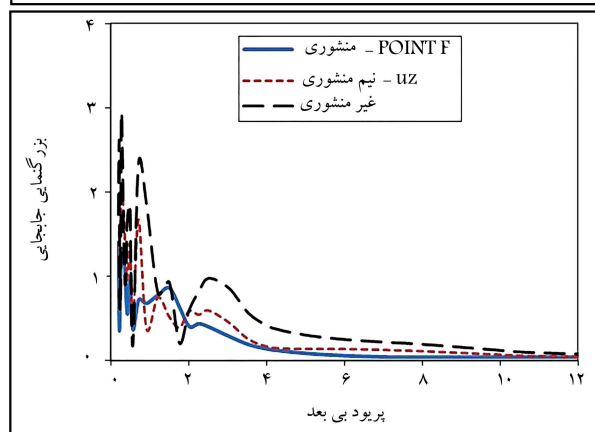
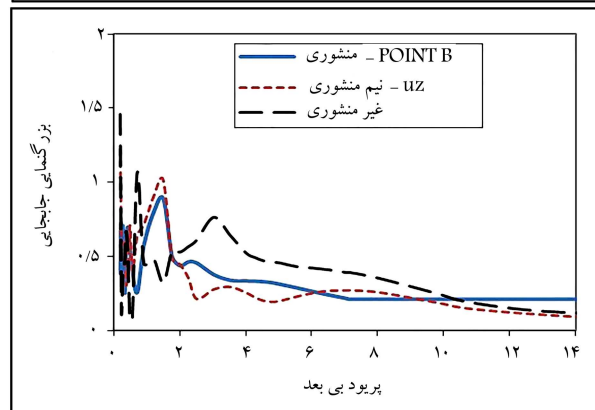
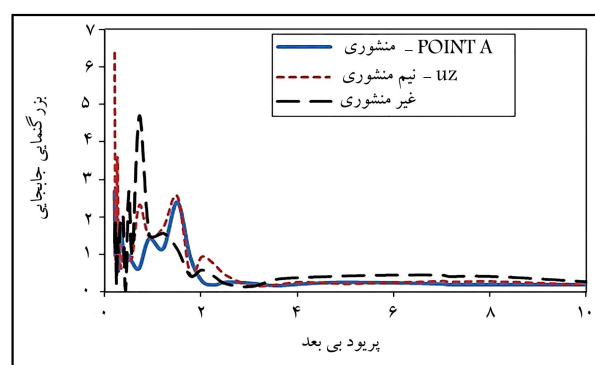


شکل ۱۵. مقایسه‌ی الگوی بزرگ‌نمایی نقاط مختلف روی دره‌ی نیم‌منشوری تحت موج SV.

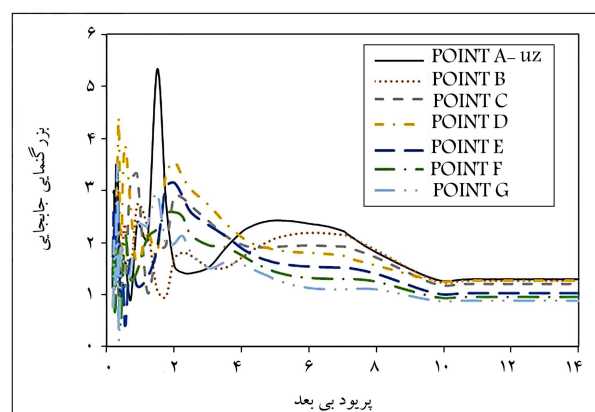


شکل ۱۶. مقایسه‌ی الگوی بزرگ‌نمایی نقاط مختلف روی دره‌ی نیم‌منشوری تحت موج SH.

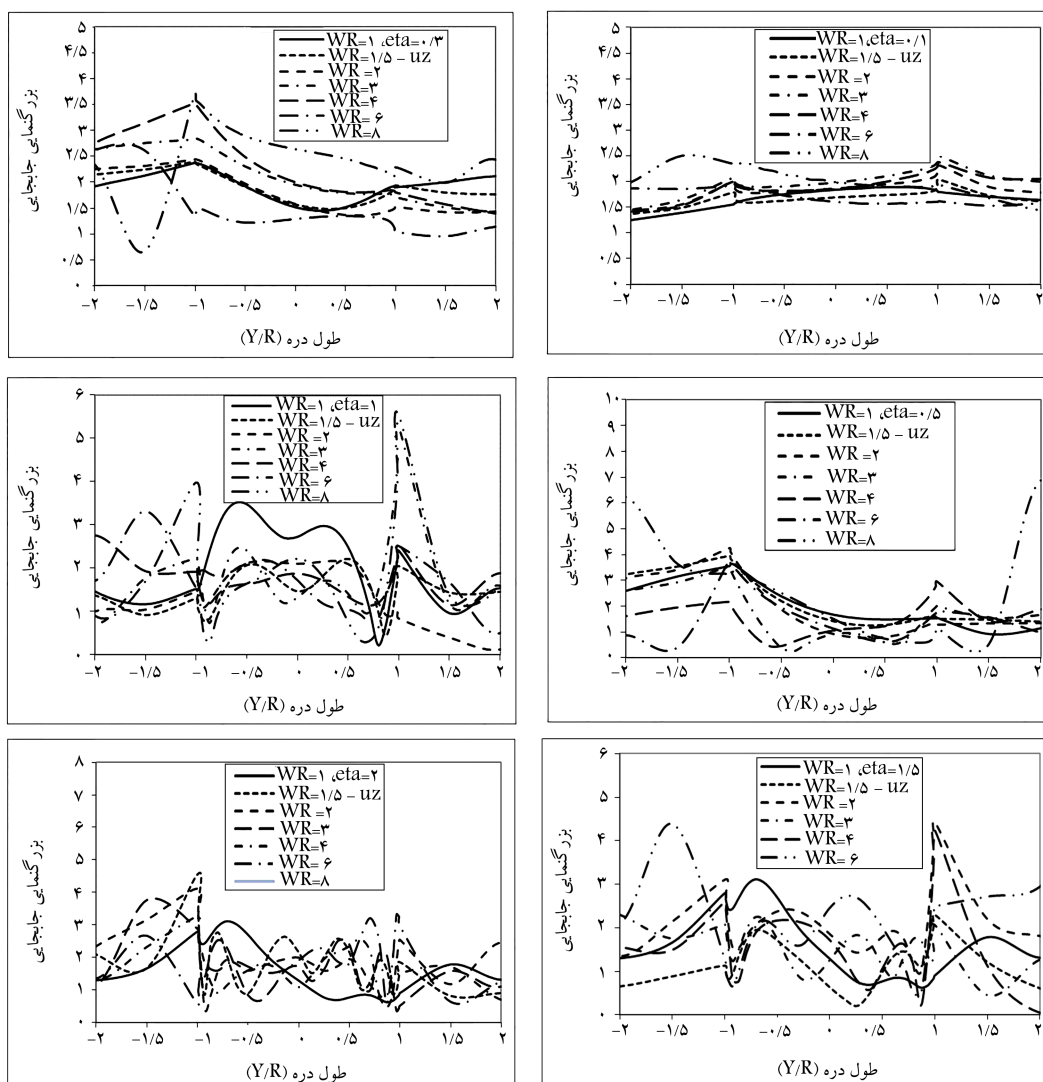
به طوری که این رفتار با افزایش نسبت بازشدگی دره تشدید شده است و در بسامدهای بی‌بعد بزرگ‌تر از ۱، الگوی رفتاری منظمی از دره‌ها مشاهده نمی‌شود. با مقایسه بین نمودارهای حاصل شده می‌توان مشاهده کرد که نقاط ۱ و ۱- که در واقع نقاط گوشه‌ی دره (A و D) هستند، بیشترین پتانسیل برای بزرگ‌نمایی را دارند. این پتانسیل با افزایش بسامد و رشد نسبت بازشدگی WR، افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی الگوی بزرگ‌نمایی تحت موج SH.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی الگوی بزرگ‌نمایی نقاط مختلف روی دره‌ی منشوری تحت موج SV.



شکل ۱۷. مقایسه‌ی الگوی بزرگ‌نمایی تحت موج SV.

جدول ۱. طول موج‌هایی که به ازاء مقادیر بزرگ‌تر و مساوی آن‌ها، می‌توان از اثرات دره صرف‌نظر کرد.

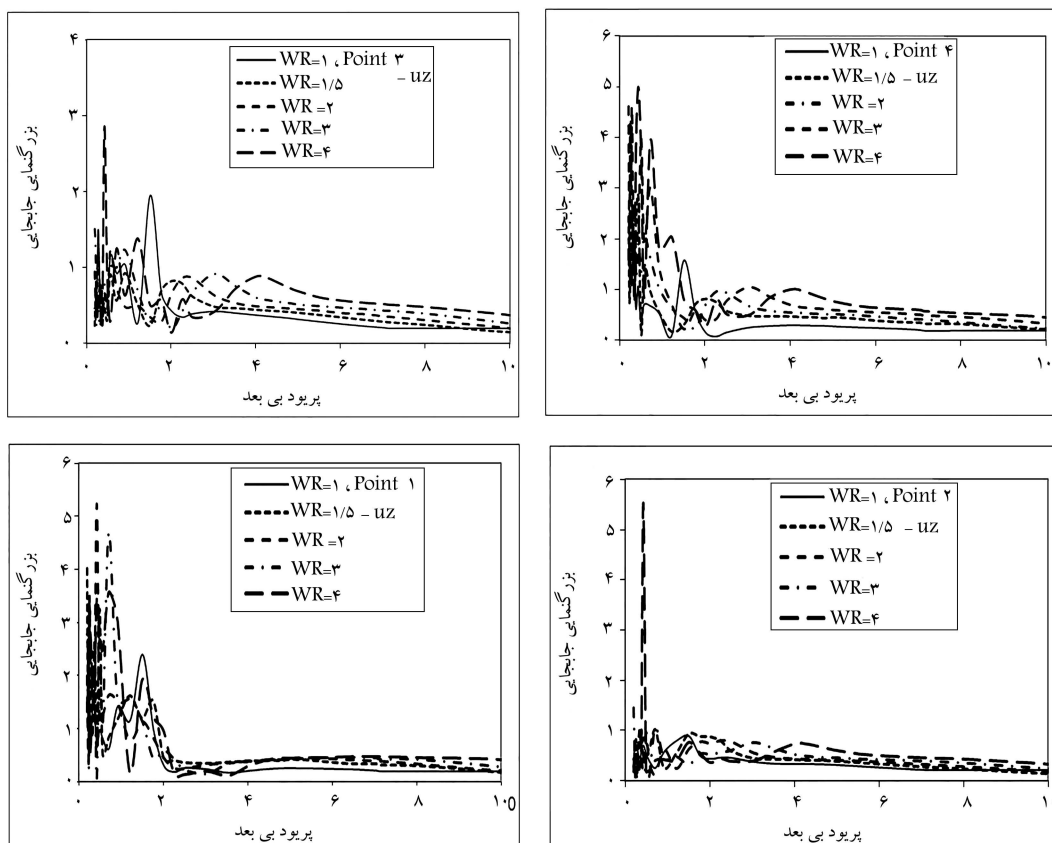
$\lambda$ (SV)	$\lambda$ (SH)	WR
۸	۴	۱
۹٫۵	۴٫۵	۱٫۵
۷	۴	۲
۹٫۵	۴	۳
۹٫۵	۶	۴
۱۵	۱۰	۶
۱۵	۱۰	۸

در واقع مشاهده می‌شود که طول موج‌های مذکور به دلیل بزرگ‌تر بودن از ابعاد ناهمواری، اثر مانع‌شوندگی ناهمواری و انکسار امواج چندان جدی تلقی نمی‌شود. علاوه بر این، در موقعیت‌های مختلف دره با افزایش WR بزرگ‌نمایی بیشتری مشاهده می‌شود. این مسئله را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزایش نسبت

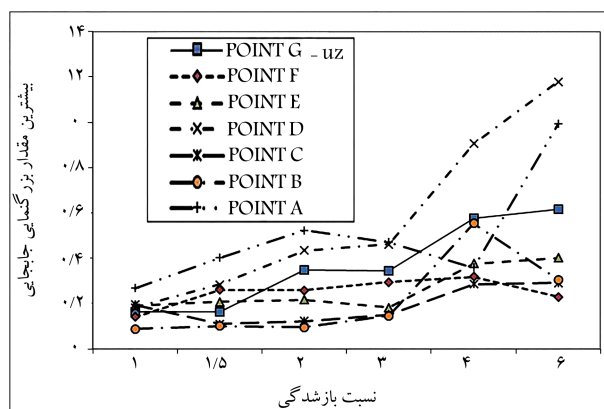
## ۸. بررسی رابطه‌ی بین پتانسیل بزرگ‌نمایی و طول موج مهاجم

با توجه به تحلیل‌های ارائه‌شده در این بخش، که تحت دو موج SH و SV و نسبت بواسون  $\nu = 0.33$  انجام شده است، رابطه‌ی بین طول موج برخوردی و میزان اثرگذاری دره در پراکندگی امواج مورد مطالعه قرار گرفته است.

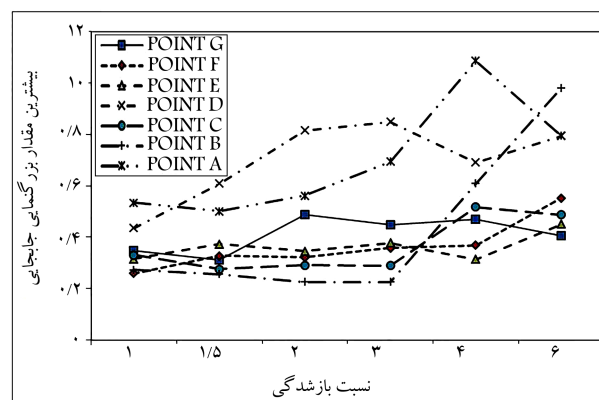
با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۸ می‌توان دریافت که برای موج SH با استفاده از رابطه‌ی ۲۴ و  $WR = 1$  در طول موج‌هایی که بزرگ‌تر از ۴ برابر پهنای دره ( $2R$ ) باشند، تغییر و نوسان چندانی در میزان جابه‌جایی‌ها در نقاط مختلف دره که با اعداد ( $A = 1, B = 2, C = 3, D = 4$ ) مشخص شده‌اند، مشاهده نمی‌شوند. برای سایر نسبت‌های بازشدگی، نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که ذکر شده است، برای طول موج‌های بزرگ‌تر از مقدار ارائه‌شده در جدول ۱، تغییرات چندانی در میزان بزرگ‌نمایی مشاهده نمی‌شود.



شکل ۱۸. مقایسه‌ی الگوی بزرگ‌نمایی روی دره تحت موج SH.



شکل ۲۰. مقایسه‌ی الگوی پیشینه‌ی بزرگ‌نمایی تحت موج SH.



شکل ۱۹. مقایسه‌ی الگوی پیشینه‌ی بزرگ‌نمایی تحت موج SV.

## ۹. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش المان مرزی سه‌بعدی در حوزه‌ی بسامد، به حساسیت‌سنجی جامع و تحلیل لرزه‌ی دره‌های سه‌بعدی با معرفی پارامتر نسبت بازشدگی دره پرداخته شده است. سه دره‌ی نیم‌دایره‌ی به شکل‌های منشوری، نیم‌منشوری، و غیرمنشوری با نسبت‌های بازشدگی مختلف تحت دو موج SV و SH مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. الگوهای بزرگ‌نمایی موقعیت‌های مختلف دره با محوریت پارامترهای مهمی چون نسبت بازشدگی و طول موج مهاجم ارائه شده است. نتایج

بازشدگی به‌خصوص در دوره‌های تناوب بی‌بعد کوچک، که نشان‌دهنده‌ی طول موج برخوردی کوچک نسبت به ابعاد عارضه است، پراکنش امواج و اثر مانع‌شوندگی ناهمواری در برابر امواج برخوردی بیشتر می‌شود.

در ادامه‌ی تحلیل‌های انجام‌شده، در شکل‌های ۱۹ و ۲۰، الگوی پیشینه‌ی بزرگ‌نمایی موقعیت‌های مختلف دره، با افزایش نسبت‌های بازشدگی ارائه شده است، که مطابق آن‌ها تحت امواج SV و SH، در راستای قائم برای هر دو موج، رفتاری تقریباً صعودی مشاهده می‌شود. افزایش نسبت بازشدگی موجب افزایش جابه‌جایی پیشینه‌ی دره می‌شود.

۴. نقاط گوشه‌ی دره، بیشترین پتانسیل بزرگ‌نمایی را دارند.
۵. تغییرات طول موج، بیشترین تأثیر نسبت به سایر پارامترها در الگوی بزرگ‌نمایی را دارند.
۶. الگوی تغییرمکان کف دره، کمترین نوسان و در بعضی حالات کوچک‌نمایی دارند.
۷. با توجه به نسبت بازشدگی می‌توان طول موج‌هایی را به‌دست آورد که از آن به بعد، بتوان از اثرات اندرکنشی عارضه و همچنین اثرات تفرق امواج لرزه‌یی در الگوی تغییرمکان دچار کوچک‌نمایی می‌شود. این رفتار با افزایش طول موج برخوردی بیشتر نمایان می‌شود.
۱. پارامتر بازشدگی دره، اثرات محسوسی در بزرگ‌نمایی دره دارد. به‌طوری که با افزایش این نسبت، بزرگ‌نمایی نیز بیشتر می‌شود.
۲. الگوی تغییرمکان و پتانسیل بزرگ‌نمایی وابسته به پارامترهای مورد مطالعه مانند بسامد و به‌خصوص طول موج مهاجم هستند.
۳. با افزایش فاصله از دره، میزان اثرات اندرکنشی و تفرق امواج لرزه‌یی کاسته شده و الگوی تغییرمکان دچار کوچک‌نمایی می‌شود. این رفتار با افزایش طول موج برخوردی بیشتر نمایان می‌شود.

## پانویس

1. widening ratio

## منابع (References)

- Mansur, W.J. "A time-stepping technique to solve wave propagating problems using the boundary element method", Ph.D. Dissertation, University of Southamppton (1983).
- Demirel, V. and Wang, S. "An efficient boundary element method for two-dimensional transient wave propagating problems", *Applied Mathematical Modeling*, **11**(6), pp. 411-416 (1987).
- Soares, J.D. and Mansur, W.J. "An efficient time-truncated boundary element formulation applied to the solution of the two-dimentional scalar wave equation", *Engineering Analysis with Boundary Element*, **33**(1), pp.43-53 (2009).
- Qu, W., Chen, W. and Fu, Z. "Solutions of 2D and 3D non-homogeneous potential problems by using a boundary element-collocation method", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, **60**, pp. 2-9 (November 2015).
- Panji, M., Kamlian, M., Asgari Marnani, J. and Jafari, M. "Amplification pattern of semi-sine shaped valleys subjected to vertically propagating SH waves", *Journal of Engineering*, Isfahan University of Technology, Esteghlal, **32**(2), pp. 87-111 (Winter 2014).
- Sohrabi-Bidar, A. and Kamalian, M. "Effects of three-dimensionality on seismic response of Gaussian-shaped hills for simple incident pulses", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering (Elsevier)*, **52**, pp. 1-12 (September 2013).
- Hamid, A.V., Kamalian, M. and Adampira, M. "Seismic ground amplification by unlined tunnels subjected to vertically propagating SV and P waves using BEM", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **71**, pp. 63-79 (April 2015).
- Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A. and Khalaj, A. "Amplification pattern of 2D semi-sine-shaped valleys subjected to vertically propagating incident waves", *Communications in Numerical Methods in Engineering*, **23**(9), pp. 871-887 (2007).
- 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 Dynamic and Earthquake Engineering*, **26**(8), pp. 753-765 (2006).
- Sohrabi-Bidar, A., Kamalian, M. and Jafari, M.K. "Seismic response of 3-D Gaussian-shaped valleys to vertically propagating incident waves", *Geophys. J. Int.*, **183**(3), pp. 1429-1442 (2010).
- Gatmiri, B., Maghoul, P. and Arson, C. "Site-specific spectral response of seismic movement due to geometrical and geotechnical characteristics of sites", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(1), pp. 51-70 (2009).
- Gatmiri, B., Arsonb, C. and Nguyen, K.V. "Seismic site effects by an optimized 2D BE/FE method I. Theory, numerical optimization and application to topographical irregularities", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(8), pp. 632-645 (2008).
- Omidvar, B. and Rahimian, M. "3D topography effects on amplification of plane harmonic body and surface waves", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **12**(1-2), pp. 25-38 (Spring-Summer 2010).
- Lee, J. "Earthquake site effect modeling in the Granada basin using a 3-D indirect boundary element method", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **63**, pp. 102-115 (2013).
- Álvarez-Rubio, S., José Benito, J., Sánchez-Sesma, F.J. and Alarcón, E. "The use of direct boundary element method for gaining insight into complex seismic site response", *Computers and Structures*, **83**(10-11), pp. 821-835 (April 2005).
- Tarinejad, R. and Ahmadi, M.T. "Three dimensional nonprismatic canyons effects of the scattering of seismic waves", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, **31**(5-6), pp. 792-804 (2011).
- Tarinejad, R., Ahmadi, M.T. and Khaji, N. "Analysis of topographic amplification effects on canyon sites using 3D boundary element method", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **9**(1), pp. 25-37 (2007).
- Tarinejad, R. and Ahmadi, M.T. "The effects of 3D non-prismatic canyon on the scattering of seismic wave", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, University of Tabriz, **41**(1) (in Persian) (2011).

19. Manolis, G.D. and Beskos, D.E., *Boundary Element Methods in Elasto Dynamics*, Unwin Hyman Ltd, ISBN: 004-620019-3, 282 p. (1988).
20. Ahmad, S. and Banerjee, P.K. "Multi-domain BEM for two dimensional problems of elastodynamics", *Int. Journal for Numerical Methods in Engineering*, **26**(4), pp. 891-911 (1988).
21. Tarinejad, R. "Seismic loading for canyon site structures", Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran (2008).
22. Trifunac, M.D. "Scattering of plane SH-waves by a semi-cylindrical canyon", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **1**(3), pp. 267-281 (1973).
23. Dominguez, J., *Boundary Elements in Dynamics*, Elsevier (1993).
24. Sanchez-Sesm, F.J. and Campillo, M. "Diffraction of P, Sv, and Rayleigh waves by topographic features", *Bulletin of The Seismological Society of America*, **81**(6), pp. 2234-2253 (December 1991).