مجله علمی- پژوهشی
«عمـــران مـــدرس»
دوره سیزدهم، ویژه‌نامه، بهار ۱۳۹۲

براورد اثر ساختگاه‌های دره‌ای بر امواج لرزه‌ای

ناصر خاجی[۱]*، مصطفی امینی[۲]

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرّس

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران - زلزله، دانشگاه تربیت مدرّس

nkhaji@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰٤/۲۲

چکیده- زمین با سطوح توپوگرافی نامنظم، یکی از عوامل پاسخ‌های لرزه‌ای پیچیده است. دلیل اصلی ایجاد پاسخ لرزه‌ای پیچیده، مسئله انتشار و پراکنش امواج در این سطوح است. در این نوشتار، با فرض این‌که زمین مورد مطالعه، همسان‌گرد، همگن، و ارتجاعی است، نخست فرمول‌بندی امواج منتشرشده در یک میدان موج SH دوبعدی، با استفاده از روش المان مرزی مستقیم و به کمک بسط سری نیومن بیان شده است. سپس برای صحت‌سنجی برنامه‌ی توسعه‌داده‌شده در این پژوهش، تحلیل‌های عددی متنوعی برای دره‌ها و تپه‌هایی با شکل‌های مختلف ارائه شده است. لازم است گفته شود که مسئله‌ی بالا در قلمروی بسامد حل شده و با شکل‌های مختلف نیم‌دایره، مثلث و نیم‌بیضی بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش با سایر جواب‌های تحلیلی و عددی موجود مقایسه شده است. مقایسه‌های انجام‌شده دقت روش پیشنهادی بوده و نشان می‌دهد که روش المان مرزی بر اساس بسط سری نیومن با در نظر گرفتن فقط دو جمله اول این سری، به نتایج مطلوبی منجر می‌شود.

واژگان‌کلیدی: آثار توپوگرافی، بسط سری نیومن، روش المان مرزی مستقیم، انتشار امواج لرزه‌ای

۱- مقدمه

سازه‌های زیادی در ساختگاه‌های دره‌ای قرار گرفته است که از میان آن‌ها می‌توان به سدهای بتنی دوقوسی و سایر سازه‌های هیدرولیکی مانند سرریز، دریچه‌های آب‌گیر، نیروگاه‌های برقابی پل‌های بزرگ اشاره کرد. مطالعات و بررسی‌های انجام‌شده پس از وقوع زلزله‌های بزرگ در نقاط مختلف دنیا نشان می‌دهد که ساختگاه‌های دره‌ای تأثیر مهمی در تشدید جابه‌جایی‌های سطحی دارند. تشدید امواج زلزله با نامنظمی‌های توپوگرافی، یکی از علت‌های مهم خرابی این سازه‌ها در زلزله‌ها به شمار می‌رود [۱]. یک مثال روشن از اثر پدیده‌ی تشدید توپوگرافی در ساختگاه‌های دره‌ای، ساختگاه سد "پاکویما" است که تجربه‌ی چندین زلزله بزرگ را دارد. در سال ۱۹۷۱، این سد بتنی قوسی واقع درکوه‌های سن-گابریل در زلزله‌ی معروف سن‌فرناندو با بزرگای ٦/٦، لرزید. در زمان وقوع زلزله، شتاب‌نگاری که در تکیه‌گاه چپ (حدود ۱۵ متر بالاتر از تاج سد) قرار داشت، بیشینه‌ی شتاب افقی ۱/۲۵g را ثبت کرد، در حالی‌که در کف دره و در پایاب، شتاب بیشینه فقط ۰/٤۹g بود. در سال ۱۹۷۷، ۱۷ شتاب‌نگار روی سد پاکویما و ساختگاه آن در موقعیت‌های مختلف نصب شدند. در سال ۲۰۰۱، زلزله‌ی دیگری با بزرگای ٤/۳ در ساختگاه این سد به وقوع پیوست. بر اساس شتاب‌های ثبت‌شده در امتداد دیواره‌ی این دره هنگام

رخداد این زلزله، تغییرات داده‌های ثبت‌شده در امتداد دیواره‌ی دره به روشنی دیده می‌شود و شتاب‌های ثبت‌شده در بالای دره، بزرگ‌تر از شتاب‌های ثبت‌شده در پایین دره است. بیشینه‌ی شتاب ثبت‌شده در کف و در طول تکیه‌گاه نزدیک تاج، به ترتیب برابر با ۰/۰۲g و ۰/۱g است. بدین ترتیب، شتاب‌های بزرگ ثبت‌شده در بالای سد، نشآن‌های از وقوع پدیده تشدید جدی ناشی از توپوگرافی پرشیب دره است. پس باید براورد درستی از بارهای وارد به سازه‌های موجود در ساختگاه‌های دره‌ای، هنگام زلزله ارائه شود تا یک طرح درست، بهینه و در عین حال ایمن ایجاد شود.

مطالعات گسترده‌ای که به‌وسیله‌ی محققین مختلف برای بررسی آثار توپوگرافی انجام شده است، نشان‌دهنده‌ی اهمیت این پدیده در زلزله‌ها است؛ در ادامه به بیان برخی از مطالعات مهم انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود. با توجه به این‌که معادله موج SH به صورت اسکالر است، در تحقیقات زیادی، انتشار این موج در برخورد با دره‌هایی با شکل هندسی ساده مانند نیم‌دایره، مثلث و نیم‌بیضی به صورت تحلیلی و عددی در نظر گرفته شده است. *بور* [۲] با استفاده از روش تفاضل‌های محدود، آثار توپوگرافی روی امواج لرزه‌ای SH را بررسی کرد. نتایج بررسی‌های وی نشان می‌دهد که توپوگرافی، آثار مهمی روی امواج لرزه‌ای، به‌ویژه هنگامی که طول موج‌های ورودی قابل مقایسه با اندازه‌ی ویژگی‌های توپوگرافی است، دارد. این آثار وابسته به بسامد است. *تریفوناک* [۳] مسئله‌ی انتشار و تفرق امواج را برای دره‌های با شکل نیم‌دایره با استفاده از روش جداسازی متغیرها و توابع خاص به صورت تحلیلی حل کرد. *ونگ و جنینگز* [٤] پدیده‌ی تفرق امواج SH با زاویه‌ی ورودی دلخواه به یک دره را بررسی کردند. روش ایشان، روش مجازی کاهش معادله‌ی انتگرالی به یک انتگرال محدود بود که با استفاده از روش‌های عددی قابل حل است. *ونگ* [۵] با استفاده از روش عکس گسسته‌سازی برای شرایط مرزی تقریبی، برای حل مسائل مقدار مرزی انتشار موج ارتجاعی، آثار توپوگرافی روی تفرق امواج P، SV و رایلی را بررسی کرد. *سانچزسسما و کامپیلو* [٦] نیز روش ترفتز و برای یک محیط نیم‌بی‌نهایت ارتجاعی، همگن و همسان‌گرد، همین مسئله را بررسی کردند. مسئله‌ی انتشار امواج در دره‌های آبرفتی به‌وسیله‌ی *تاکمیا و فوجیوارا* [۷] با استفاده از روش المان مرزی در حوزه زمان بررسی شد. آن‌ها موج SH را با زوایای مختلف به عنوان موج ورودی در نظر گرفتند و برای تحلیل از دره‌هایی با شکل نیم‌دایره، مثلث و ذوزنقه استفاده کردند. *رینوسو و همکاران* [۸] روش انتگرال مرزی مستقیم، مسئله‌ی انتشار امواج دوبعدی را برای امواج ورودی رایلی، P و SV در دره مکزیکوسیتی مطالعه کردند. *آتاناسوپولوس و همکاران* [۹] آثار توپوگرافی را بر پاسخ لرزه‌ای زمین در ناحیه ایجوان (یونان) بر اساس زلزله‌ی سال ۱۹۹۵، با استفاده از روش المان محدود بررسی کردند. *تادئو و همکاران* [۱۰] روش المان مرزی و برای بسامدهای مختلف و بارگذاری‌هارمونیک، انتشار امواج سه‌بعدی تولیدشده به‌وسیله‌ی بارگذاری نقطه‌ای انبساطی در یک فضای نیم‌بی‌نهایت را مطالعه کردند. *گازتاس و همکاران* [۱۱] آثار خاک و توپوگرافی را در زلزله آتن، با ترکیب روش‌های المان محدود و المان طیفی مطالعه کردند. *زپدا و همکاران* [۱۲] از ترکیب روش‌های المان مرزی غیرمستقیم و روش عدد موج مجزا، برای شبیه‌سازی پاسخ لرزه‌ای دره‌های آبرفتی با شکل دلخواه استفاده کردند. *روبیو و همکاران* [۱۳] آثار توپوگرافی یک زمین با لایه‌های متفاوت بر روی انتشار امواج ورودی P و SV با روش المان مرزی مستقیم و در حوزه بسامد بررسی کردند. *بوکووالاس و پاپادیمیتریو* [١٤] روش تفاضل محدود، اثرات توپوگرافی شیب را روی حرکت زمین بررسی کردند؛ در این مطالعه، زمین با شیب

یکنواخت و خاک به صورت ویسکو الاستیک و انتشار امواج SV به صورت قائم در نظر گرفته شده است. *فو* [۱۵] انتشار امواج سطحی را با مقایسه‌ی تئوری‌های مختلف در این زمینه و برای امواج SH دوبعدی بررسی کرد. این تئوری‌ها شامل تئوری تقریبی کرشهف، بسط تیلور بر اساس نظریه‌ی اغتشاش، تقریب فازی ریتاف، و روش سری بورن است. *کمالیان و همکاران* [۱۶] در مطالعات خود با استفاده از مدل دوبعدی با ترکیب روش‌های المان مرزی و المان محدود آثار توپوگرافی در محیط‌های با مصالح ناهمگن را بررسی کردند. ایشان از المان‌های محصورکننده برای مدل‌سازی مرزهای دوردست استفاده کردند. *تاری‌نژاد و همکاران* [۱] آثار توپوگرافی روی دره‌های سه‌بعدی را بر مبنای روش المان مرزی بررسی کردند. آن‌ها از المان‌های محصورکننده در مدل‌سازی استفاده کردند. گتمیری و همکاران [۱۷] آثار توپوگرافی دره‌های رسوبی بر روی امواج زلزله را با استفاده از ترکیب دو روش المان مرزی و المان محدود بهینه‌شده بررسی کردند. بر اساس این مطالعه، میدان نزدیک با المان محدود و میدان دور با المان مرزی مدل شد.

هدف این پژوهش آن است که با استفاده از روش‌های عددی، آثار توپوگرافی بر انتشار امواج زلزله در ساختگاه‌های دره‌ای بررسی شود. بنابراین از روش المان مرزی و بسط سری نیومن استفاده می‌شود. با استفاده از برنامه‌ی نوشته‌شده به زبان فرترن، تأثیر دره‌هایی با شکل‌های مختلف نیم‌دایره، مثلث، نیم‌بیضی و همچنین تپه‌های نیم‌دایره شکل، بر پدیده‌ی اثر توپوگرافی روی امواج زلزله بررسی می‌شود.

۲- روش‌شناسی حل مسئله

مسئله‌ی مورد در این پژوهش به صورت زیر تعریف می‌شود: برای یک موج زلزله ورودی مشخص، آثار توپوگرافی چیست؟ در ادامه، ابزار عددی توسعه‌داده‌شده برای حل مسئله‌ی مورد نظر معرفی می‌شود؛ سپس جزئیات حل مسئله‌ی مورد نظر بیان می‌شود.

در این پژوهش، از روش المان مرزی برای حل مسئله‌ی مورد نظر استفاده شده است. همان‌گونه که ادامه تشریح می‌شود، برای کاهش هر چه بیشتر حجم محاسبات و صرفه‌جویی در وقت و هزینه، از ترکیب روش المان مرزی و بسط سری نیومن استفاده می‌شود. فرمول‌بندی پیشنهادی در این پژوهش در قالب یک برنامه رایانه‌ای به زبان فرترن پیاده‌سازی شده است. در این برنامه، فرضیات زیر در نظرگرفته شده است:

الف) مسئله به صورت توپوگرافی دوبعدی در نظر گرفته می‌شود.
ب) از بررسی لایه‌های مختلف خاک چشم‌پوشی می‌شود.
پ) خاک، همگن در نظر گرفته می‌شود.
ت) رفتار مصالح به صورت ارتجاعی خطی، همگن و همسان‌گرد فرض می‌شود.
ث) امواج SH به عنوان موج ورودی در نظر گرفته می‌شوند.
ج) اثر سازه در این مطالعات در نظر گرفته نمی‌شوند.
چ) تحلیل‌ها در قلمرو بسامد است.
خ) برای هر بسامد مشخص، دامنه و زاویه‌ی برخورد موج ورودی، معلوم فرض می‌شود.

۳- روش المان مرزی

روش المان مرزی یک روش عددی قوی برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی است و بیشتر برای مسائلی به کار می‌رود که یافتن مقادیر تابع مجهول بر روی مرزها از داخل محدوده مهم‌تر است. این روش با برپایی دستگاه معادلات جبری از شکل ضعیف‌شده‌ی معادله‌ی حاکم و روش باقی‌مانده‌های وزن‌دار، به وسیله یک تابع وزن به نام تابع گرین (یا جواب اساسی)، انتگرال‌های درون حوزه را به انتگرال‌های مرزی تبدیل می‌کند؛ سپس با شبکه‌بندی

مرزهای مسئله و براورد عددی انتگرال‌ها، ماتریس‌های ضرایب مورد نیاز را به‌دست می‌آورد. یکی از مزایای این روش، امکان به‌کارگیری آن برای مسائل محیط‌های نامحدود مثل مسئله انتشار موج است. این روش با بهره‌گیری از جواب‌های اساسی مناسب، شرایط مرزی حاکم در مرز بی‌نهایت را ارضا کرده و نیاز به شبکه‌بندی یک مرز مجازی برای حوزه‌ی بی‌نهایت ندارد.

برای یک مدل دوبعدی زمین با یک سطح نامنظم، جابه‌جایی‌های ناشی از موج ورودی SH، با فرض این‌که نیروهای حجمی، برابر صفر باشند، به صورت زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$(\nabla^2 + k_\beta^2)u(\vec{X}) = 0 \qquad (۱)$$

$u(\vec{X})$ یکی از مؤلفه‌های جابه‌جایی یک نقطه‌ی دلخواه $\vec{X} = (x, z)$، $k_\beta = \omega / \beta$ بیانگر عدد موج، ω بسامد زاویه‌ای ارتعاش، و β سرعت انتشار موج است. معادله انتگرال مرزی در قلمروی بسامد را می‌توان با استفاده از تئوری تقابل اصلاح‌شده‌ی بتی بین حالت واقعی و حالت مربوط به جواب‌های اساسی به شکل اندیسی زیر نشان داد:

$$c_{lk}^j u_k^j + \int_\Gamma q_{lk}^\otimes u_k d\Gamma = \int_\Gamma u_{lk}^\otimes q_k d\Gamma + v \,. \qquad (۲)$$

رابطه‌ی (۲) مؤلفه‌های تغییر مکان u_k^j هر نقطه‌ی j روی مرز Γ را با مؤلفه‌های تغییرمکان و ترکشن روی تمام مرز و جواب‌های اساسی تغییر مکان و ترکشن روی مرز (در اثر بار واحد متمرکز در نقطه‌ی j) مرتبط می‌کند. در این رابطه، جواب‌های اساسی با بالانویس $\otimes$ مشخص شده است. همچنین j و l به ترتیب محل و جهت اعمال بار را نشان می‌دهند و v بیانگر جابه‌جایی موج ورودی است.

ضریب مستقل c_{lk}^j برای نقاطی که مرز مسطح دارند به‌صورت $c_{lk}^j = 0.5\delta_{lk}$ است. برای سایر حالات این ضریب وابسته به هندسه‌ی خاص مرز در نقطه‌ی j است و می‌تواند از ترکشن صفر جسم صلب محاسبه شود. این نکته اهمیت دارد که رابطه‌ی (۲) برای نقاط درونی نیز معتبر است و در چنین حالتی $c_{lk}^j = \delta_{lk}$ خواهد شد. با توجه به این‌که در این پژوهش از المان‌های ثابت استفاده شده است، رابطه‌ی (۲) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد [۱۸]:

$$\frac{1}{2}u^j + \int_\Gamma q^\otimes u d\Gamma = \int_\Gamma u^\otimes q d\Gamma + v \,. \qquad (۳)$$

جواب‌های اساسی تغییر مکان و ترکشن برای یک محیط ارتجاعی نامحدود، همسان‌گرد و همگن، به ترتیب، توابع هنکل نوع دوم مرتبه صفر و مرتبه یک خواهند بود:

$$u^\otimes(r) = -\frac{i}{4}H_0^2(k_\beta r)\,, \qquad (٤)$$

$$q^\otimes(r) = \frac{\partial u^\otimes}{\partial n} = \frac{ik_\beta}{4}H_1^2(k_\beta r)\frac{\partial r}{\partial n}\,, \qquad (٥)$$

r فاصله‌ی بین نقاط سرچشمه و میدان و $H_n^2(.)$ تابع هنکل نوع دوم مرتبه n است.

حال می‌خواهیم رابطه‌ی (۳) را برای یک زمین همگن با سطح آزاد حل کنیم. در این حالت برای هر نقطه‌ی میدان X که روی سطح آزاد زمین قرار دارد، ترکشن سطحی صفر است:

$$\forall X \in \Gamma;\quad q(X) = 0 \qquad (٦)$$

با جای‌گذاری رابطه‌ی بالا در رابطه‌ی (۳) داریم:

$$\frac{1}{2}u(Y) + CPV\int_\Gamma q^\otimes(X,Y)u(X)d\Gamma(X) = v(Y) \qquad (٧)$$

CPV، بیانگر انتگرال مقدار اصلی کوشی و Y معرف نقطه‌ی سرچشمه است.

برای حل عددی معادله‌ی انتگرال مرزی (۷)، مرز Γ به J المان Γ_j تقسیم می‌شود ($j=1,\ldots,J$). بنابراین $u(Y)$ و $v(Y)$ بیان‌کننده‌ی مقادیر مرزی گرهی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} u(Y) &= \lfloor u(Y_1),\ldots,u(Y_J)\rfloor^T \\ v(Y) &= \lfloor v(Y_1),\ldots,v(Y_J)\rfloor^T \end{aligned} \tag{۸}$$

Y_j نقطه‌ی وسط المان مرزی Γ_j است. با استفاده از مقادیر مرزی گرهی، معادله‌ی (۷) را می‌توان به صورت زیر گسسته‌سازی کرد:

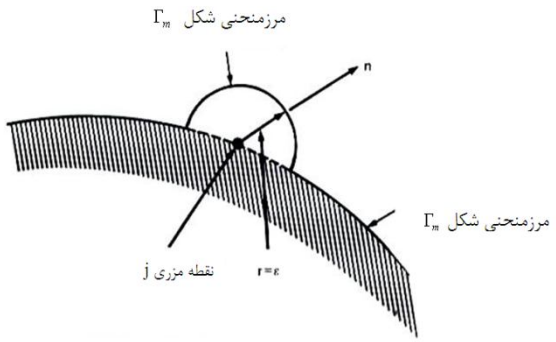
$$\begin{aligned} &\frac{1}{2}u(Y_j)+ \\ &\sum_{m=1}^{J} u(X_m)\int_{\Gamma_m} q^{\otimes}(X,Y_j)\,u(X)d\Gamma(X) \\ &=\frac{1}{2}\sum_{m=1}^{J} u(X_m)\,h'_{jm} = v(Y_j) \end{aligned} \tag{۹}$$

$$\begin{aligned} &h'_{jm} = \\ &2\int_{\Gamma_m} q^{\otimes}(X,Y_j)d\Gamma(X)+\delta_{jm} = \\ &2\int_{\Gamma_m} \frac{ik_\beta}{4}H_1^2(k_\beta r)\frac{\partial r}{\partial n(X)}d\Gamma(X) \\ &+\delta_{jm} \end{aligned} \tag{۱۰}$$

δ_{jm}، دلتای کرونکر است.

۴- انتگرال‌گیری در حالت تکینگی

برای به‌دست‌آوردن انتگرال رابطه‌ی (۱۰) که معروف به انتگرال هسته‌ی ترکشن است، در حالت $j=m$ با تکینگی قوی روبرو هستیم. برای رفع این تکینگی لازم است از مقدار اصل کوشی (*CPV*) استفاده کنیم. در این روش در نقطه مورد نظر j، مرز پیرامون آن نقطه به‌صورت یک نیم‌دایره (برای حالت دوبعدی) با شعاع بسیار کوچک ε در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱).



شکل (۱) حالت دوبعدی نیم‌دایره پیرامون نقطه مرزی j

نقطه‌ی j در مرکز این نیم‌دایره قرار گرفته و شعاع ε به سمت صفر میل می‌کند. مقدار اصل کوشی مطابق شکل ۱ به صورت زیر بیان می‌شود [۱۹]:

$$\begin{aligned} \oint_{\Gamma} F d\Gamma &= \lim_{\varepsilon\to 0}\left(\int_{\Gamma-\Gamma_\varepsilon} F d\Gamma + \int_{\Gamma_\varepsilon} F d\Gamma\right) \\ &= CPV\int_{\Gamma} F d\Gamma \end{aligned} \tag{۱۱}$$

با توجه به رابطه‌ی (۱۰)، عبارت $\frac{\partial r}{\partial n}$ بر روی نیم‌دایره فرضی در این حالت صفر می‌شود؛ پس در حالت $j=m$، انتگرال هسته‌ی ترکشن حذف می‌شود. بنابراین داریم:

$$h'_{jj} = \delta_{jj} = 1 \tag{۱۲}$$

با توجه به توضیحات بالا می‌توان رابطه‌ی (۹) را در شکل ماتریسی به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$v = \frac{1}{2}H'u \tag{۱۳}$$

H' بیانگر ماتریس المان مرزی است که درایه‌های آن از رابطه‌ی (۱۰) به دست می‌آیند. به عبارت دیگر، درایه‌های

قطر اصلی این ماتریس، برابر یک، و سایر درایه‌های آن از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Non-diagonal elements of } H' = 2\int_{\Gamma_m} \frac{ik_\beta}{4} H_1^2(k_\beta r)\frac{\partial r}{\partial n(X)} d\Gamma(X) \qquad (۱۴)$$

۵- بسط سری نیومن

در این قسمت، حل تقریبی ماتریس المان مرزی با روش سری نیومن تشریح می‌شود. هدف اصلی در استفاده از این سری، کاهش هزینه‌های محاسباتی ماتریس المان مرزی است که در مسائل با مقیاس بزرگ (و با تعداد درجات آزادی زیاد) می‌تواند چشم‌گیر باشد.

اگر ماتریس A یک ماتریس مربعی و E ماتریس واحد باشد، ماتریس A را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$A = E - T \qquad (۱۵)$$

حال می‌توان معکوس ماتریس A را به صورت زیر نوشت [۲۰]:

$$A^{-1} = (E-T)^{-1} = T^0 + T^1 + T^2 + \cdots = \sum_{n=0}^{\infty} T^n \qquad (۱۶)$$

سری بالا معروف به سری نیومن است. برای بیان هم‌گرایی این سری لازم است که نُرم ماتریس T را در نظر بگیریم. برای ماتریس $T = [t_{kl}]$ که ابعاد $J \times J$ دارد، نُرم به صورت $\|T\| = \sum_{k=1}^{J}\sum_{l=1}^{J}|t_{kl}|$ تعریف می‌شود. با بررسی درایه‌های ماتریس‌های سری نیومن و محاسبه‌ی نُرم جملات این سری، می‌توان نشان داد که $\|T^n\| \le \|T\|^n$. بنابراین، این سری برای $\|T\| \le 1$ مطلقاً هم‌گراست [۲۰].

حال با توجه به تعریف سری نیومن، ماتریس H' را به صورت زیر معرفی می‌کنیم:

$$H' = E - H \qquad (۱۷)$$

بر اساس روابط (۱۰) و (۱۲)، درایه‌های غیرقطری ماتریس H به صورت زیر خواهند بود:

$$h_{jm} = -2\int_{\Gamma_m} \frac{ik_\beta}{4} H_1^2(k_\beta r)\frac{\partial r}{\partial n(X)} d\Gamma(X) \qquad (۱۸)$$

همچنین درایه‌های قطری ماتریس H صفر است. حال با به کاربردن بسط سری نیومن در رابطه‌ی (۱۳) داریم:

$$U = H'^{-1} 2v \qquad (۱۹)$$

$$\begin{aligned} U &= (E-H)^{-1} 2v \\ &= (E + H + H^2 + \cdots) 2v \\ &= U^0 + U^1 + U^2 + \cdots \end{aligned} \qquad (۲۰)$$

$$U^n = H^n 2v \;;\; n = 0,1,2,\ldots \qquad (۲۱)$$

اولین جمله سری، مرتبه‌ی صفر بسط سری نیومن بوده و بیانگر جابه‌جایی امواج ورودی است که به‌وسیله‌ی سطح زمین دوبرابر شده است (یعنی بدون امواج تفرق‌یافته). به همین ترتیب می‌توان نشان داد که دومین جمله‌ی سری، موج تفرق‌یافته‌ی مرتبه نخست است. سومین جمله را نیز می‌توان به عنوان پاسخ به امواج تفرق‌یافته‌ای که دوبار در سطح منعکس شده است، تعبیر کرد. بنابراین، مرتبه‌ی جملات در سری را می‌توان به عنوان تعداد انعکاس سطحی در نظر گرفت.

۶- تحلیل‌های عددی

همان‌گونه که قبلاً نیز گفته شد، در این پژوهش برای انجام محاسبات لازم در ساختگاه‌های دره‌ای و تپه‌ای، یک برنامه‌ی رایانه‌ای به زبان فرترن نوشته شده است. این برنامه

توانایی حل انواع مسائل الاستودینامیک دوبعدی که شامل برخورد امواج SH به ساختگاه‌های دره‌ای و تپه‌ای است را دارد. در ادامه، نتایج مربوط به سنجش درستی برنامه و نیز اجرای آن برای مسائل خاص ارائه می‌شود.

۶-۱- سنجش درستی برنامه

برای اطمینان از درستی و ارزیابی برنامه‌ی رایانه‌ای نوشته‌شده برای به‌دست‌آوردن جابه‌جایی‌های میدان آزاد سطح دره، یک سری مقایسه با جواب‌های گزارش‌شده در مقالات مختلف، انجام شده است. برای نمونه، کارهای انجام‌شده درباره‌ی تحلیل‌های دوبعدی تغییرات مکانی در زمین‌های دارای توپوگرافی در محیط نیمه‌بی‌نهایت تحت اثر امواج زلزله، می‌توان به کارهای انجام‌شده به‌وسیله‌ی *تریفوناک* [۳]، *تساور و چنگ* [۲۱] و *فو* [۱۵] اشاره کرد. لازم به ذکر است که دامنه‌ی تغییرمکان در نمودارهای بعدی از رابطه‌ی زیر محاسبه شده است:

$$\text{Displacement Amplitude} = (u_{real}^2 + u_{imag}^2)^{0.5} \qquad (۲۲)$$

u_{real} و u_{imag} به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی پاسخ تغییر مکان است.

برای نخستین نمونه، یک دره به شکل نیم‌دایره‌ی دوبعدی بررسی می‌شود. سطح این دره با استفاده از المان‌های مرزی ثابت مدل شده است. شکل ۲، دره‌ی گفته‌شده همراه قسمتی از میدان آزاد را نشان می‌دهد. نتایج ارائه‌شده در این بخش، به ازای طول‌های آزاد مختلف و همچنین بر اساس دو جمله‌ی اول سری نیومن است. در این نمونه، مدل استفاده‌شده در قسمت دره با ۲۰۰ المان و طول‌های آزاد هر طرف با ۲۰ المان (در مجموع ۲٤۰ المان) گسسته‌سازی شده است. موج ورودی با زاویه‌ی برخورد قائم و بسامد بی‌بعد ۰/۲۵ (که با رابطه‌ی ۲۳ تعریف می‌شود) به مدل برخورد می‌کند.

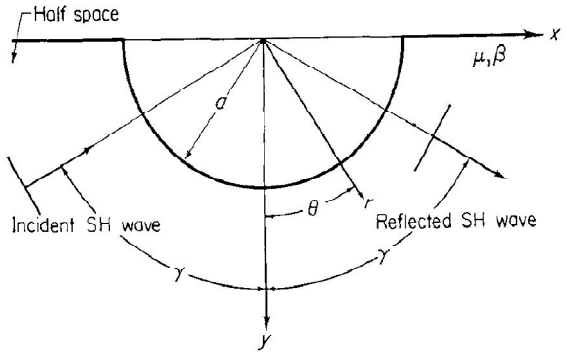
$$\eta = \frac{\omega R}{\beta \pi} \qquad (۲۳)$$

R، شعاع دره است. همچنین طول آزاد دوطرف دره، $L = 3R$ در نظر گرفته شده است. شکل ۳، مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی این پژوهش و نتایج ارائه‌شده به‌وسیله‌ی *تریفوناک* [۳] را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود، هماهنگی خوبی بین نتایج تحلیل عددی و نتایج تریفوناک وجود دارد. نتایج ارائه‌شده به‌وسیله‌ی تریفوناک مربوط به حل دقیق و تحلیلی مسئله است.

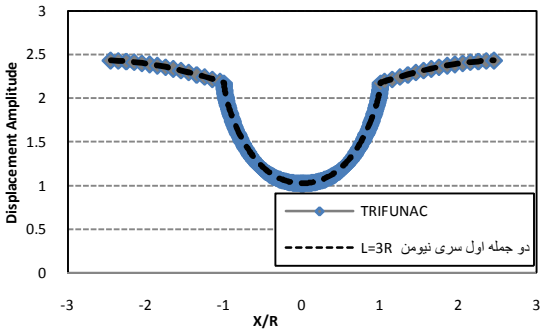
در دومین نمونه، یک دره‌ی مثلثی‌شکل درنظر گرفته شده است. شکل ٤، دره‌ی مزبور همراه طول آزاد دو طرف را نشان می‌دهد. در این مدل از ١٦ المان ثابت استفاده شده است. مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه‌شده به‌وسیله‌ی *تساور و چنگ* [۲۱] برای موج ورودی SH با زوایای مختلف و بسامد بی‌بعد واحد در شکل ۵ آمده است. همان‌گونه که در نمودارها مشاهده می‌شود، هماهنگی خوبی بین نتایج تحلیل عددی و نتایج تساور و چنگ وجود دارد. نتایج ارائه‌شده به‌وسیله‌ی تساور و چنگ بر اساس حل دقیق دوبعدی مسئله می‌باشد.

برای آخرین نمونه این بخش، روش پیشنهادی این نوشتار در تحلیل یک تپه‌ی نیم‌دایره شکل ارائه می‌شود. شکل ٦، تپه‌ی نیم‌دایره شکل دوبعدی مدل‌شده همراه با قسمتی از میدان آزاد را نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی از ۲٤۰ المان در حالت $L = 3R$ و ۳۰۰ المان در حالت $L = 6R$ استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی برای موج ورودی SH با زاویه‌ی برخورد قائم و بسامد بی‌بعد واحد با نتایج ارائه‌شده به‌وسیله‌ی [۱۵] مقایسه و در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج این

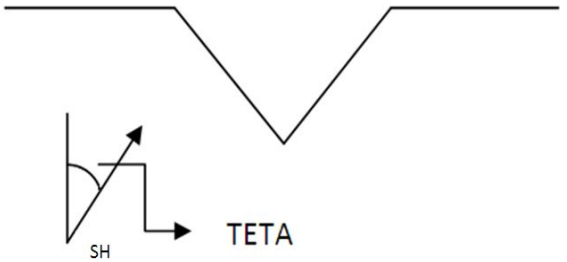
پژوهش اختلاف اندکی با نتایج ارائه شده به‌وسیله‌ی فو دارد. دلیل این امر آن است که فو از روش تقریب بورن در روش المان مرزی استفاده کرده است، در حالی‌که در این پژوهش از روش المان مرزی و بسط سری نیومن استفاده شده است.



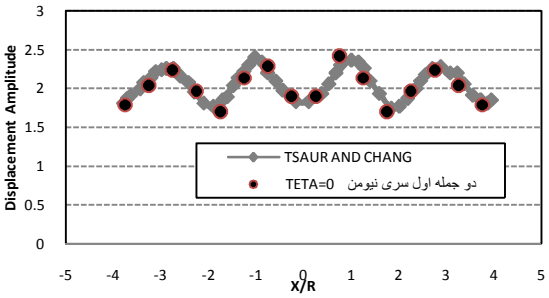
شکل (۲) دره‌ی نیم‌دایره شکل مدل‌شده همراه قسمت‌های صاف دو طرف آن



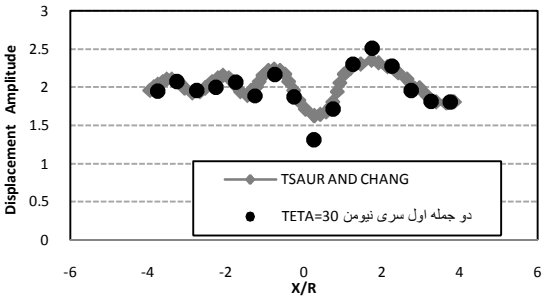
شکل (۳) مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نتایج تریفوناک برای موج ورودی SH با زاویه برخورد صفر درجه نسبت به محور قائم و بسامد بی‌بعد ۰/۲۵ برای دره‌ی نیم‌دایره شکل



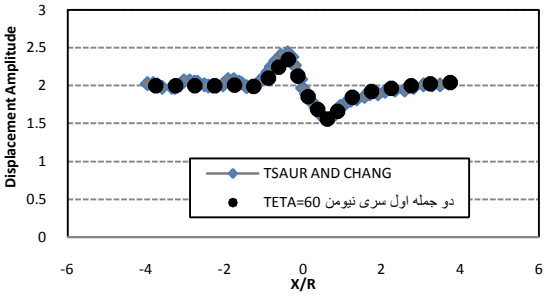
شکل (٤) دره‌ی مثلث‌شکل مدل‌شده همراه قسمت‌های صاف دو طرف آن



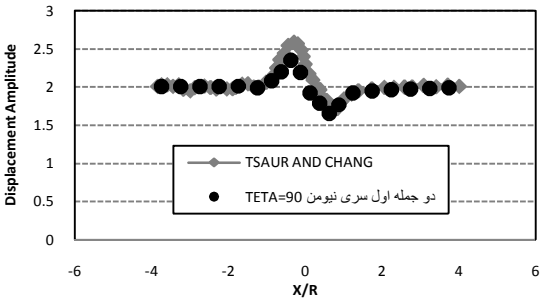
شکل (۵) (الف)



شکل (۵) (ب)

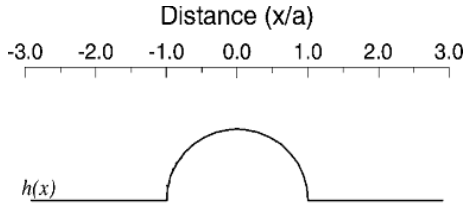


شکل (۵) (پ)

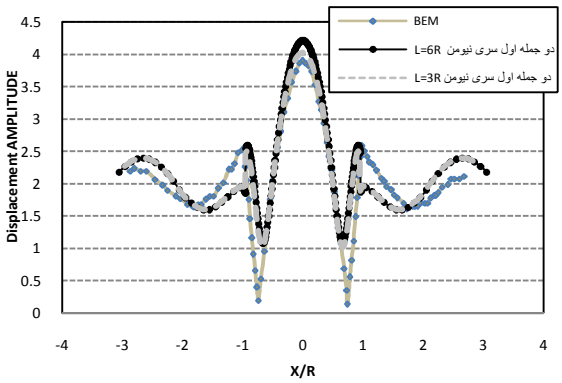


شکل (۵) (ت)

شکل (۵) مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه‌شده به‌وسیله‌ی تساور و چنگ برای موج SH ورودی با زاویه برخورد الف- صفر درجه، ب- ۳۰ درجه، پ- ٦۰ درجه، ت- ۹۰ درجه، نسبت به محور قائم و بسامد بی‌بعد واحد برای دره‌ی مثلث‌شکل



شکل (٦) تپه‌ی نیم‌دایره‌شکل مدل‌شده همراه قسمت‌های صاف دو طرف آن



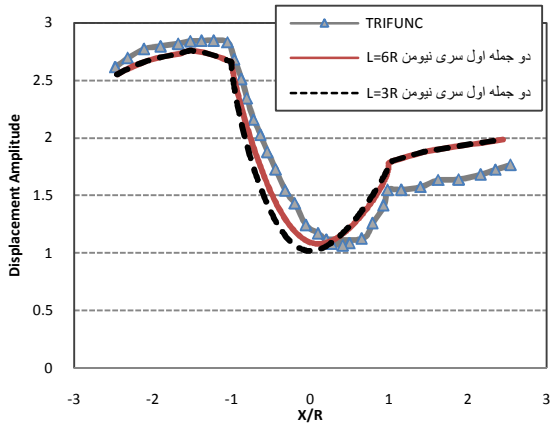
شکل (۷) مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه‌شده به‌وسیله‌ی فو برای موج ورودی SH با زاویه‌ی برخورد صفر درجه نسبت به محور قائم و بسامد بی‌بعد واحد برای تپه‌ی نیم‌دایره‌شکل

۶-۲- مطالعات پارامتریک

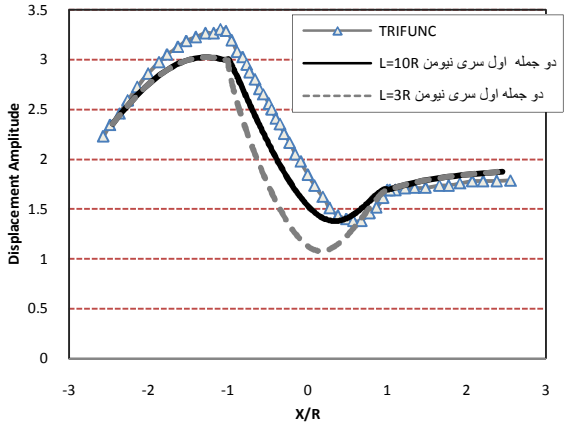
از جمله پارامترهایی که روی تحلیل‌های عددی تأثیر دارند پارامترهای مربوط به ابعاد مدل شامل ابعاد المان‌ها و طول میدان آزاد، پارامترهای مربوط به مشخصات موج، شامل نوع، محتوای بسامدی و زاویه‌ی برخورد، پارامترهای مربوط به هندسه‌ی دره، شامل عمق و شکل آن، و درنهایت پارامترهای مربوط به سری نیومن مانند تعداد جملات این سری است. در ادامه، این پارامترها بررسی می‌شوند.

در نخستین مطالعات پارامتریک، به پارامترهای مؤثر ابعاد المان‌ها و طول میدان آزاد پرداخته می‌شود. تحلیل‌های متعددی با مدل‌های مختلف (با ابعاد المان‌های متفاوت و طول‌های مختلف میدان آزاد) انجام شد.برای افزایش دقت نتایج، باید المان‌ها را به اندازه‌ی کافی، ریز انتخاب کرد. نتایج به‌دست‌آمده برای ابعاد گسسته‌سازی‌ها نشان می‌دهد که برای رسیدن به نتایج با دقت قابل قبول، ابعاد المان‌ها باید کمتر از یک‌چهارم طول موج برشی باشد. همچنین تحلیل‌های انجام‌شده روی مدل دوبعدی نشان می‌دهد که دقت نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های عددی به طول میدان آزاد مدل‌شده در دو طرف دره حساس است. در شکل ۸، نتایج به‌دست‌آمده برای مدل دره‌ی نیم‌دایره شکل، برای موج ورودی SH با بسامد بی‌بعد ۰/۲۵ و با زوایای برخورد ۳۰، ٦۰ و ۹۰ درجه نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش طول آزاد دره (دو برابر شدن آن) دقت نتایج افزایش می‌یابد.

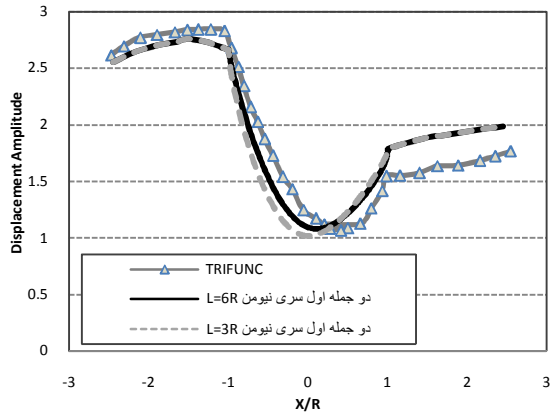
در مرحله‌ی بعد، آثار مشخصات امواج لرزه‌ای (محتوای بسامدی و زاویه‌ی برخورد) مطالعه می‌شود. در شکل ۹، نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی برای تپه‌ی نیم‌دایره شکل و برای بسامدهای بی‌بعد ۱/۲۵ و ۲/۰ و نتایج حل دقیق انجام‌شده به‌وسیله‌ی تریفوناک [۳] نشان داده شده است. در شکل ۱۰، برای ارزیابی اثر بسامد موج زلزله، تحلیل‌هایی با بسامدهای متفاوت انجام شده است. نتایج مربوط به این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تغییر در بسامد، آثار چشم‌گیری روی نتایج دارد. برای بسامد بی‌بعد ۰/۲۵، طول موج برشی، هشت برابر شعاع دره بوده و برای چنین موجی اثر وجودی دره کمتر از حالت مربوط به بسامد بی‌بعد ۱/۲۵ است که طول موج برشی آن ۱/٦ برابر شعاع دره است. برای بررسی اثر زاویه‌ی برخورد امواج به دره، تحلیل‌هایی برای موج ورودی SH با زاویه‌های مختلف، برای دره‌های نیم‌دایره شکل و مثلث‌شکل انجام شده است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). نتایج نشان می‌دهد که با تغییر زاویه‌ی موج برخوردی، الگوی تغییرات و میزان تغییر مکان‌های سطح آزاد دره تغییر می‌کنند.



(الف)

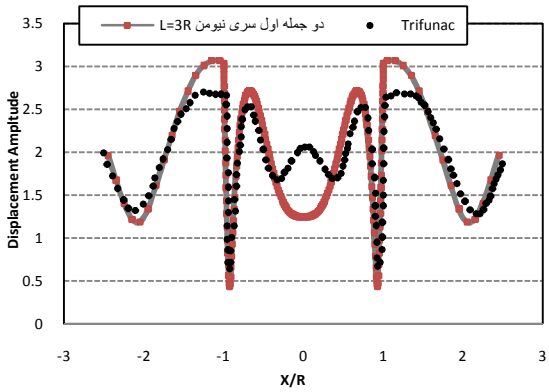


(ب)

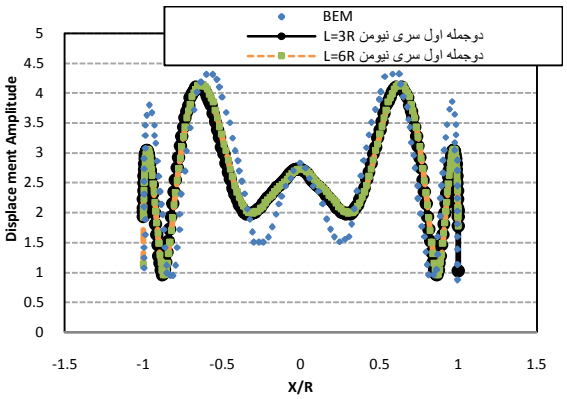


(پ)

شکل (۸) مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه‌شده به‌وسیله‌ی تریفوناک برای موج ورودی SH با زاویه‌ی برخورد الف- ۳۰ درجه، ب- ٦٠ درجه ، و پ- ۹۰ درجه نسبت به محور قائم و بسامد بی‌بعد ۰/۲۵ برای دره‌ی نیم‌دایره‌شکل

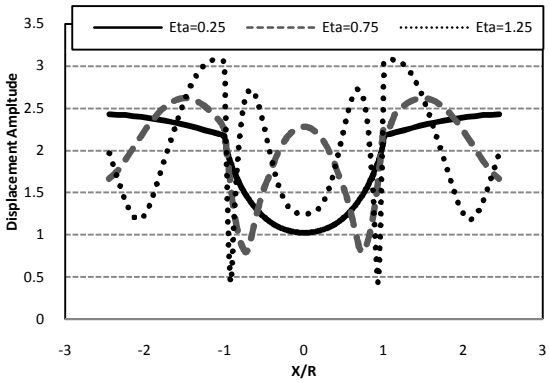


(الف)

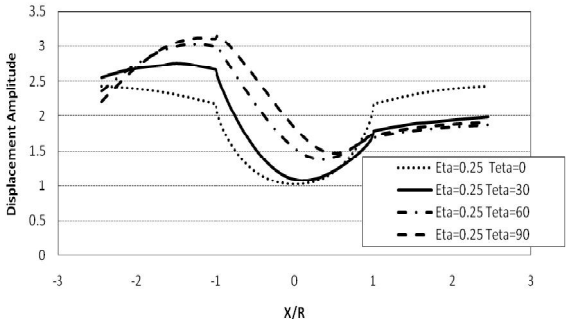


(ب)

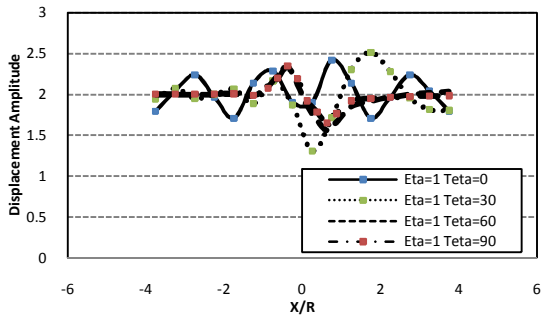
شکل (۹) مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه‌شده به‌وسیله‌ی تریفوناک برای موج ورودی SH با زاویه برخورد صفر درجه نسبت به محور قائم و الف- بسامد بی‌بعد ۱/۲۵ ، ب- بسامد بی‌بعد ۲/۰ برای تپه‌ی نیم‌دایره شکل



شکل (۱۰) مقایسه‌ی نتایج تحلیلی به‌دست‌آمده از آثار تغییر بسامد بی‌بعد برای دره‌ی نیم‌دایره شکل، در اثر موج ورودی SH با زاویه‌ی برخورد صفر درجه نسبت به محور قائم



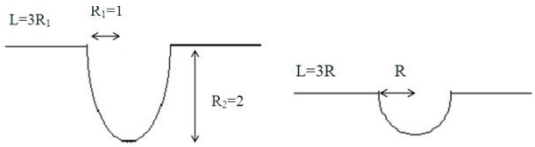
شکل (۱۱) مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی به ازای زوایای برخورد مختلف برای موج ورودی SH با بسامد بی‌بعد ۰/۲۵ برای دره نیم‌دایره شکل



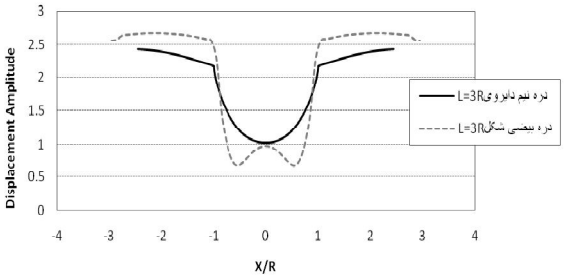
شکل (۱۲) مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی به ازای زوایای برخورد مختلف برای موج ورودی SH با بسامد بی‌بعد واحد برای دره مثلث‌شکل

برای بررسی آثار شکل و عمق دره روی امواج لرزه‌ای در دره‌های دوبعدی، تحلیل‌هایی روی مدل دره با مقاطع نیم‌دایره، نیم‌بیضی، مثلث‌خوابیده و مثلث ایستاده انجام شده است. این تحلیل‌ها برای بسامدهای مختلف انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که با تغییر در شکل و عمق دره، جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده تغییرات چشم‌گیری دارند. همچنین اثر شکل و عمق دره روی تغییر مکان‌های به‌دست‌آمده، تابع بسامد می‌باشد. شکل ۱۳ دره‌ی نیم‌بیضی و نیم‌دایره شکل مدل‌شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱٤ مشهود است، در دره‌ی نیم‌بیضی شکل، نسبت به دره‌ی نیم‌دایروی که عمق بیشتری دارد، آشفتگی و اغتشاش در تغییرمکان‌های به‌دست‌آمده بیشتر است. همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، تغییر در بسامد و افزایش آن از بسامد بی‌بعد ۰/۲۵ به ۱/۲۵ در دره‌های نیم‌بیضی و نیم‌دایره، باعث افزایش تغییر مکان‌های ایجادشده در دره‌ی نیم‌بیضی نسبت به دره‌ی نیم‌دایره شکل می‌شود. این تحلیل‌ها در دره‌ی مثلث‌شکل عمیق (با شیب دیواره‌ی ۲٦/٥٦ درجه) و کم‌عمق (با شیب دیواره‌ی ۱۳/۲۸ درجه) و بسامدهای بی‌بعد متفاوت ۰/۵ و ۱ انجام شده است (شکل ۱٦). همان‌گونه که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، هر چه عمق دره افزایش می‌یابد، (شیب دیواره بیشتر می‌شود) آشفتگی‌ها در تغییر مکان‌های به‌دست‌آمده نیز افزایش می‌یابد. این موضوع در مورد تغییر بسامد در این نوع دره‌ها نیز درست است. به عبارت دیگر، با افزایش بسامد، اغتشاشات در تغییر مکان‌های دره نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۸).

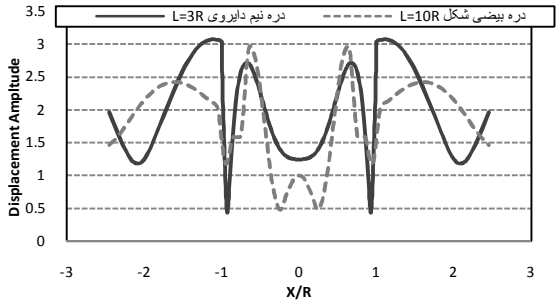
درنهایت، بررسی آثار تعداد جملات سری نیومن نشان می‌دهد که با افزایش تعداد جملات این سری به سه و چهار جمله، تفاوت چندانی در نتایج دیده نمی‌شود. مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده گویای آن است که دو جمله‌ی اول سری نیومن دقت قابل قبولی دارد (شکل ۱۹).



شکل (۱۳) دره‌ی بیضی‌شکل و دره‌ی نیم‌دایره شکل

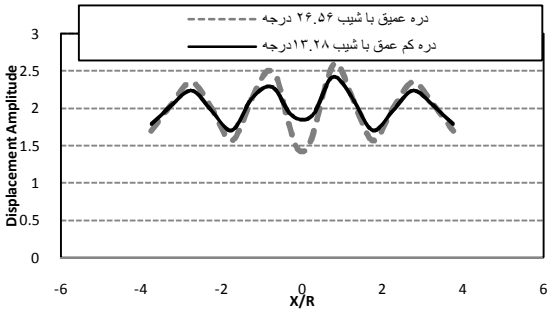


شکل (۱٤) مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی برای موج ورودی SH برای بسامد بی‌بعد ۰/۲۵ و زاویه‌ی برخورد صفر درجه نسبت به محور قائم برای دره با شکل‌های نیم‌بیضی و نیم‌دایره

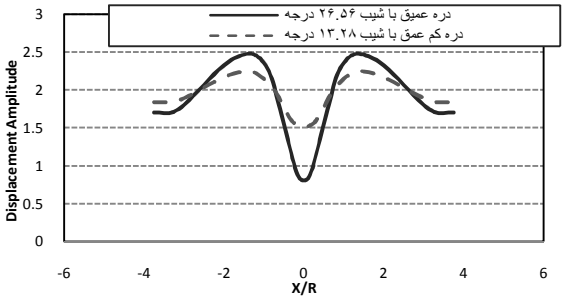


شکل (۱۵) مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی برای موج ورودی SH برای بسامد بی‌بعد ۱/۲۵ و زاویه‌ی برخورد صفر درجه نسبت به محور قائم، برای دره با شکل‌های نیم‌بیضی و نیم‌دایره

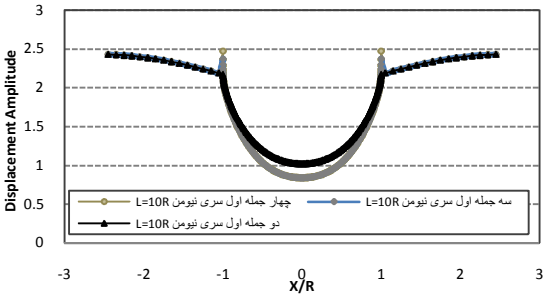
شکل (۱۶) شکل دره‌ی مثلثی عمیق و کم‌عمق مدل‌شده با شیب دیواره‌ی متفاوت



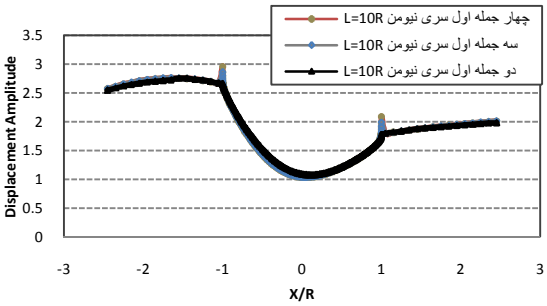
شکل (۱۷) مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی برای موج ورودی SH برای بسامد بی‌بعد واحد و زاویه‌ی برخورد صفر درجه نسبت به محور قائم برای دره‌ی مثلثی عمیق و کم‌عمق



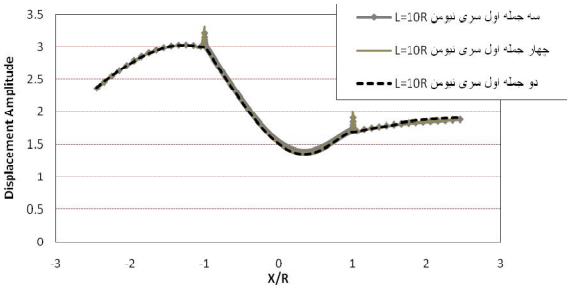
شکل (۱۸) مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی برای موج ورودی SH برای بسامد بی‌بعد ۰/۵ و زاویه‌ی برخورد صفر درجه نسبت به محور قائم برای دره‌ی مثلثی عمیق و کم‌عمق



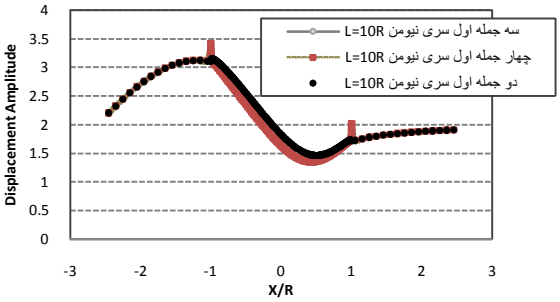
شکل (۱۹) (الف)



شکل (۱۹) (ب)



شکل (۱۹) (پ)



شکل (۱۹) (ت)

شکل (۱۹) مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی برای موج ورودی SH برای بسامد بی‌بعد ۰/۲۵ و زاویه‌ی موج الف- صفر درجه، ب- ۳۰ درجه، پ- ۶۰ درجه، ت- ۹۰ درجه و به ازای تعداد جملات متفاوت از سری نیومن

۷- بحث و جمع بندی

تاکنون در تحقیقات متعددی به روش‌های گوناگون آثار توپوگرافی روی امواج زلزله بررسی شده است. در این پژوهش، با استفاده از روش المان مرزی و بسط سری نیومن، یک برنامه‌ی رایانه‌ای به زبان فرترن نوشته شد. استفاده از روش المان مرزی و به‌کارگیری بسط سری نیومن با استفاده از فقط دو جمله اول این سری، دقت قابل قبولی داشته و باعث کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت تحلیل می‌شود. تفاوت‌های ناچیز موجود بین جواب‌های این پژوهش و سایر نتایج تحلیلی و عددی موجود در پیشینه‌ی پژوهشی را می‌توان به عواملی همچون تعداد جملات سری نیومن و مرتبه‌ی المان استفاده‌شده نسبت داد. بنابراین می‌توان با افزایش تعداد جملات سری نیومن و مرتبه‌ی المان استفاده‌شده، دقت جواب‌های به‌دست‌آمده را بهبود بخشید.

بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده به ازای پارامترهای مختلف روی مدل دره‌های دوبعدی با شکل‌های مختلف، نتایج زیر چشم‌گیر است:

به‌طور کلی با افزایش فرکانس، طول موج کاهش پیدا کرده و به ازای یک بعد ثابت دره، اثر آشفتگی و اغتشاش ایجادشده روی موج ناشی از وجود دره، بیشتر شده و نیز الگوی تغییرات پیچیده‌تری برای تغییر مکان‌های نقاط مختلف دره قابل تصور است. عکس این موضوع به گونه‌ای است که به ازای بسامدهای کوچک‌تر با طول موج بزرگ‌تر، اثر وجودی دره به عنوان یک عامل آشفتگی، کمتر احساس شده و الگوی تغییرات جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده در دره پیچیدگی کمتری برخوردار است.

اثر زاویه‌ی برخورد موج در آشفتگی و اغتشاشات تغییر مکان، در اثر افزایش زاویه برخورد موج (نسبت به محور قائم) در دره‌ی نیم‌دایره شکل کمتر از دره‌ی مثلث‌شکل است.

تحلیل‌ها نشان می‌دهند شکل و عمق دره آثار مهمی روی نتایج به‌دست‌آمده دارند. اگر تغییرات عمق در مقایسه با طول موج برخوردی چشم‌گیر باشد، این اثر تشدید می‌شود. نتایج نشان می‌دهد این اثر تابعی از زاویه‌ی برخورد موج و فرکانس آن است.

۸- مراجع

[1] Tarinejad R, Ahmadi MT, Khaji N, 2007. Analysis of Topographic Amplification Effects on Canyon Sites using 3D Boundary Element Method. Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 9(1): 25–37.

[2] Boore DM, 1972. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves. Bulletin of the Seismological Society of America, 62(1): 275–284.

[3] Trifunac MD, 1973. Scattering of plane SH-waves by a semi-cylindrical canyon. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1: 267–281.

[4] Wong HL, Jennings PC, 1975. Effects of canyon topography on strong ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, 65(5): 1239–1257.

[5] Wong HL, 1982. Effect of surface topography on the diffraction of P, SV, and Rayleigh waves. Bulletin of the Seismological Society of America, 72(4): 1167–1183.

[6] Sanchez-Sesma FJ, Campillo M, 1991. Diffraction of P, SV, and Rayleigh waves by topographic features: a boundary integral formulation. Bulletin of the Seismological Society of America, 81(6): 2234–2253.

[7] Takemiya H, Fujiwara A, 1994. SH-wave scattering and propagation analyses at irregular sites by time domain BEM. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(5): 1443–1455.

[8] Reinoso E, Wrobel LC, Power H, 1997. Two-dimensional scattering of P, SV and Rayleigh waves: preliminary results for the valley of Mexico. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26: 595–616.

[9] Athanasopoulos GA, Pelekis PC, Leonidou EA, 1999. Effects of surface topography on seismic round response in the Egion (Greece) 15 June 1995 earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 18: 135–149.

[10]Tadeo A, Santos P, Antonio J, 2001. Amplification of elastic waves due to point source in the presence of complex surface topography. Computers and Structures, 79: 1697–1712.

[11]Gazetas G, Kallou PV, Psarropoulos PN, 2002. Topography and soil effects in the MS 5.9 Parnitha (Athens) Earthquake: The Case of Adámes. Natural Hazards 27: 133–169.

[12]Zepeda SA, Montalvo-Arrieta JC, Sanchez-Sesma FJ, 2003. A hybrid indirect boundary element—discrete wave number method applied to simulate the seismic response of stratified alluvial valleys. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23: 77–86.

[13]Rubio S, Sanchez-Sesma FJ, Jose Benito J, Alarcon E, 2004. The direct boundary element method: 2D site effects assessment on laterally varying layered media (methodology). Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24: 167–180.

[14]Bouckovalas GD, Papadimitriou AG, 2005. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25: 547–558.

[15]Fu LY, 2005. Rough surface scattering: comparison of various approximation theories for 2D SH waves. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(2): 646–663.

[16]Kamalian M, Jafari MK, Sohrabi-bidar A, Razmkhah A, Gatmiri B, 2006. Time-domain two-dimensional site response analysis of non-homogeneous topographic structures by a hybrid BE/FE method. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26: 753–765.

[17]Gatmiri B, Arson C, Nguyen KV, 2008. 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: 632–645.

[18]Brebbia CA, Walker S, 1980. Boundary Element Techniques in Engineering, Butterworth Co. Ltd., London, United Kingdom.

[19]Brebbia CA, Dominguez J, 1992. Boundary Elements: An Introductory Course," Computational Mechanics Publications, Southampton, United Kingdom.

[20]Kato T, 1980. Perturbation Theory for Linear Operators. Springer-Verlag, Berlin.

[21]Tsaur DH, Chang KH, 2008. An analytical approach for the scattering of SH waves by a symmetrical V-shaped canyon: shallow case. Geophysical Journal International, 174: 255–264.

Evaluation of Canyon Site Effects on Seismic Waves

N. Khaji[1]*, M. Amini[2]

1- Associate Professor, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University
2- M.Sc. in Earthquake Engineering, Tarbiat Modares University

nkhaji@modares.ac.ir

Abstract:

It is well known that ground surface with irregular topographic features causes complicated seismic responses. The complex seismic response is mainly caused by wave scattering. In this study, for a homogeneous, isotropic, linearly elastic half-space, the formulation of a two-dimensional SH-wave field based on the direct boundary element method and Neumann series expansion is developed. By discretizing the ground surface to boundary elements, the boundary integral equation is formulated into a general matrix form. This general matrix form is then reduced to a more efficient form, which considerably reduces the size of the computational matrices using Neumann series expansion. For this purpose, a Fortran computer program is developed, whose accuracy and feasibility in the frequency domain is shown by some numerical analyses conducted for grounds with semicircular convex and concave, and symmetrical V-shaped canyon topographical configurations. Comparing the results of the present study with those available in the literature shows the accuracy of the present study by just considering two first terms of Neumann series expansion. The minor differences of the results of the present research with other reseach results may be assigned to the number of terms of Neumann series expansion and the order of used boundary elements. In other words, if the number of terms of Neumann series expansion and the order of used boundary elements incease, the accuracy of the numerical results may enhance. Based on the results of the present research for various parameters of different two-dimensional canyons, the following conclusions may be obtained:

- When the exciting frequency increases, the wave-length decreases. As a result, the violence effects of incident wave due to canyon effects may be significant for a given canyon. Moreover, the displacement field of various canyon points follows more complicated pattern. On the other hand, for smaller exciting frequencies with larger wave-lengths, the canyon effects as the main cause of disturbation source are not so remarkable, and the displacement field of various canyon points are smoother.
- The effects of incident wave angle is also remarkable on the disturbation patterns of displacement field of different canyon points. When the angle increases, the triangle canyons experience more complicated patterns compared to semicircular canyons.
- Analyses' results show important effects of shape and depth of various canyons. These effects are more considerable when depth's variations are remarkable in comparison with the wave-length of incident wave. Furthermore, the mentioned effects are functions of frequency and angle of incident wave.

Keywords: topographical effects, Neumann series expansion, direct boundary element method, seismic wave propagation, forward solution