

## کاربرد روش المان محدود مرزی مقیاس شده در بررسی اثرات توپوگرافی بر امواج لرزه‌ای

حسین موسیوند<sup>۱</sup>، ناصر خاجی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۴/۲۹	<p>به سهولت می‌توان دریافت که زمین با سطوح توپوگرافی نامنظم، یکی از عوامل پاسخ‌های لرزه‌ای پیچیده می‌باشد. دلیل اصلی ایجاد پاسخ لرزه‌ای پیچیده، مساله انتشار و پراکنش امواج در این سطوح است. در این مطالعه، با فرض اینکه زمین، همگن، همسانگرد و ارتجاعی باشد، نخست مبانی ریاضی موج منتشر شده، با استفاده از المان مرزی محدود مقیاس شده بیان می‌گردد. طی دو دهه‌ی اخیر، این روش با ترکیب مزایای روش‌های المان محدود و المان مرزی توسعه یافته است. در این روش، فقط مرزهای محیط موردنظر به کمک المان‌های سطحی گسسته سازی می‌شود و نیازی به گسسته سازی درون قلمرو نیست. برخلاف روش المان مرزی، این روش نیازی به حل اساسی (یا تابع گرین) ندارد. سپس به کمک این روش، برای اولین بار تحلیل‌های عددی برای تپه‌ها و دره‌هایی با اشکال هندسی مشخص در قلمرو فرکانس در اثر برخورد موج قائم SH انجام می‌شود. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که روش المان محدود مرزی مقیاس شده در مقایسه با سایر روش‌های عددی و تحلیلی، به نتایج مطلوبی منجر می‌شود.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۲۳	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
روش المان محدود مرزی	
مقیاس شده،	
انتشار امواج،	
اثرات توپوگرافی.	

### ۱- مقدمه

این روش در ابتدا در سال ۱۹۹۵ توسط سانگ و ولف برای آنالیز دینامیکی حوزه نامحدود تحت عنوان روش سلول المان محدود کوچک پایدار گسترش یافته است [۱]. ولف با جمع آوری پژوهش‌های انجام شده یک کتاب با نام روش المان محدود مرزی مقیاس شده مدون و ارائه نمود که در آن به بررسی معادلات مسائل محدود و نامحدود الاستواستاتیک و الاستودینامیک برای حرکت درون صفحه

تحقیق حاضر برای اولین بار با استفاده از روش المان محدود مرزی مقیاس شده به بررسی اثرات توپوگرافی تپه و دره و دو بعدی بر امواج لرزه‌ای در یک میدان موج SH با فرض رفتار خطی و همگن بودن مصالح می‌پردازد. این روش نیمه تحلیلی در دو دهه گذشته توسعه پیدا کرده و در واقع از مزایای دو روش المان محدود و المان مرزی بهره می‌جوید.

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: nkhaji@modares.ac.ir

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران - مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استاد مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس

و یا برون صفحه‌ی دوبعدی و مسائل سه بعدی پرداخته است [۲].

یانگ و همکاران بر پایه سری فروبنیوس یک روش تحلیلی جدید برای معادلات روش المان محدود مرزی مقیاس شده ارائه نمودند [۳].

انتظار می‌رود با شناخت بیشتر این روش در بین محققین، بسیاری از مسایل پیچیده الاستودینامیک با استفاده از این روش با هزینه محاسباتی بسیار کم و سرعت و دقت بسیار زیادی قابل حل باشد.

وضعیت و شکل هندسی ناهمواری‌های سطح زمین یکی از عوامل مهم و مؤثر بر میزان و دامنه لرزش ناشی از انتشار امواج زمین لرزه می‌باشد. آنچه در زمین لرزه‌های مخرب اخیر اغلب مشاهده شده این است که ساختمان‌هایی که در ارتفاعات بالاتری روی تپه واقع بوده‌اند، دچار آسیب شدیدتری گردیده‌اند. مطالعات گسترده و زیادی که در زمینه اثر توپوگرافی بر امواج توسط محققین مختلف صورت گرفته است، نشان دهنده اهمیت این پدیده در زمین لرزه‌ها می‌باشد.

با توجه به اینکه معادله موج SH به صورت اسکالر می‌باشد لذا در تحقیقات متعددی انتشار این موج در برخورد با دره-هایی با شکل هندسی ساده مثل نیم دایره، دره‌های مثلثی شکل و نیم بیضی به صورت تحلیلی و عددی در نظر گرفته شده است.

تریفوناک مساله‌ی انتشار و انکسار امواج را برای دره‌های با هندسه‌ی نیم دایره‌ای با استفاده از تکنیک جداسازی متغیرها و توابع خاص به صورت تحلیلی حل نموده و پاسخ برشی صفحه عمود بر مقطع دره را به دست آورد [۴].

لی و همکاران به مطالعه پراکنش امواج برشی در تپه‌های نیم دایره‌ای با استفاده از معادلات با فرم بسته برای تابع موج در یک محیط دو بعدی همگن پرداختند که به نتایج مطلوبی منجر گردیده است. مطالعات ایشان بخوبی نشان می‌داد که شکل توپوگرافی سطحی اثرات بسیار مهمی بر انکسار موج می‌گذارد [۵].

گتمیری و همکارانش پاسخ لرزه‌ای شیب‌ها را به موج ورودی SV با بهبود روش المان مرزی به دست آوردند و براساس این روش اندازه مش‌های المان مرزی و زمان محاسبات را به شدت کاهش دادند. نتایج نشان می‌دهند که گسترش‌های بزرگی در سطح بالاتر در نزدیک شیب اتفاق می‌افتد. نتایج همچنین نشان می‌دهند که امواج سطحی، هنگامی که طول موج ورودی قابل مقایسه با اندازه شیب است، پیچیده می‌شود. این مطلب، در مورد شیب‌های پله‌ای نیز صادق است [۶].

تحلیل انتشار امواج بر روی زمین با توپوگرافی نامنظم و با استفاده از روش المان مرزی مستقیم و بسط سری‌های نیومن توسط موجی و کاواکامی مطالعه شد. بر اساس این تحقیق در ته یک دره امواج پراکنده شده‌ی تولیدی امواج حاکم هستند و این به دلیل فاصله‌ی کمی است که از منبع انتشار امواج دارند. برعکس در نوک تپه‌ها امواج پراکنده شده تولیدی دارای قطبیت مثبت هستند و همیشه باعث افزایش دامنه‌ی پاسخ می‌شوند [۷].

گتمیری و همکاران در سال ۲۰۰۸ از ترکیب روش‌های المان مرزی و المان محدود به مطالعه اثرات توپوگرافی بر روی انتشار امواج پرداختند. آنها اثرات ژئوتکنیکی خاک و همچنین دره‌های رسوبی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که در غیاب رسوبات، حرکت زمین به طور کلی در نوک تپه‌ها گوشه بالای شیب‌ها و لبه‌های دره‌ها افزایش می‌یابد [۸].

تساو و چنگ با استفاده از فرمول ضمیمه گراف<sup>۱</sup>، انتشار امواج SH را بر روی دره‌های متقارن مثلثی شکل مورد مطالعه قرار دادند. آنها ناحیه تحلیلی را به دو قسمت ناحیه باز و ناحیه بسته توسط معرفی یک مرز کمکی نیم دایره‌ای تقسیم کردند. در هر ناحیه، میدان جابجایی به صورت مجموع بی‌نهایت از توابع موج مناسب، شرایط مرزی هر بخش را به ترتیب ارضا می‌کند. آنها مساله را در هر دو حوزه‌ی زمان و فرکانس و با استفاده از پارامترهای فیزیکی متفاوت مورد بررسی قرار دادند [۹].

<sup>۱</sup> Graf

در حل مسائل اثرات توپوگرافی بر امواج لرزه‌ای استفاده شده است.

روش المان محدود مرزی مقیاس شده، روشی نوین در زمینه مدل‌سازی‌های عددی می‌باشد. در واقع این روش یک روش المان مرزی است که اساس آن المان محدود می‌باشد. این روش با ترکیب مزایای دو روش المان محدود و المان مرزی توسعه یافته اما باید توجه داشت که ویژگی‌های مختص به خود را بصورت مجزا دارا می‌باشد. ایده اصلی این روش ترکیب مزایای روندهای عددی و تحلیلی است.

این روش عددی نیمه تحلیلی تاکنون در هیچ تحقیقی در زمینه مسائل اثرات توپوگرافی بکار گرفته نشده است. هدف از این تحقیق استفاده از روش المان محدود مرزی مقیاس شده برای اولین بار در بررسی اثرات توپوگرافی بر امواج لرزه‌ای و در واقع صحت سنجی این روش در مقایسه با سایر روش‌های عددی و تحلیلی در پاسخ به این نوع مسائل می‌باشد.

به همین دلیل در این تحقیق با استفاده از خواص یک نوع از امواج لرزه‌ای، یعنی موج قائم SH به عنوان تحریک ورودی سیستم، اثرات عوارض توپوگرافی منظم هندسی دوبعدی بر این نوع موج در قیاس با سایر روش‌های تحقیقاتی با فرض رفتار خطی مصالح مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- معادلات روش المان محدود مرزی مقیاس شده

### ۲-۱- هندسه روش

در روش المان محدود مرزی مقیاس شده، از یک سیستم مختصات محلی استفاده می‌شود. مرکز مقیاس<sup>۲</sup> که O نامیده می‌شود، باید در نقطه‌ای انتخاب شود، که از آن نقطه تمام مرز به طور مستقیم قابل دیدن باشد. اگر چنین نقطه‌ای وجود نداشت محیط را به چند محیط کوچکتر تقسیم کرده و برای هر کدام یک مرکز مقیاس در نظر گرفته می‌شود.

تساور و چنگ موفق به بررسی اثرات توپوگرافی بر امواج SH در یک تپه نیم دایروی به روش بسط توابع موج شدند [۱۰].

لیو و همکاران اثرات توپوگرافی تپه مثلثی و نیم دایروی در کنار هم با فاصله معین در یک میدان موج SH را با استفاده از توابع بسط و انتگرال فوریه بررسی نمودند [۱۱]. تساور و همکاران با ارائه یک روش تحلیلی جدید، مطالعاتی بر روی اثرات دره‌های مثلثی عمیق متقارن بر روی امواج SH در یک محیط دوبعدی انجام دادند. این تحلیل‌ها در حوزه زمان و فرکانس انجام پذیرفته و انطباق خوبی با نتایج قبلی داشته‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از سری‌های هدف منجر به دست یافتن به نتایج قابل اعتمادی تحت اثر تحریک‌های با فرکانس بالا می‌گردد [۱۲].

در تحقیقات اخیر تساور به بررسی اثرات توپوگرافی تپه نیم بیضوی بر پراکنش امواج SH با استفاده از روش تحلیلی تطبیق ناحیه<sup>۱</sup> پرداخته است. در این تحقیق هندسه نیم بیضی به گونه‌ای انتخاب شده که نسبت ارتفاع به نیم دهانه بیضی از یک کوچکتر است. نتایج نشان می‌دهد که در نقاط مشخصی در زیر سطح تپه، تمرکز انرژی موج به وضوح قابل مشاهده بوده و می‌تواند اثرات قابل توجهی بر سازه‌های زیرزمینی از جمله تونل‌ها داشته باشد [۱۳].

با توجه به تحقیقاتی که تاکنون انجام شده، در نظر گرفتن اثرات توپوگرافی یکی از ضروریات در تحلیل لرزه‌ای سازه‌های واقع در تپه‌ها و دره‌ها می‌باشد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که توپوگرافی سطح زمین، پاسخ‌های سطح زمین به موج ورودی به سیستم را به طور محسوسی تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین می‌توان گفت که اکثر مدل‌سازی‌های صورت گرفته بسیار پیچیده بوده و مستلزم انجام محاسبات سنگین و صرف وقت زیادی می‌باشد. از طرفی بیشتر این مطالعات با استفاده از ایده‌های قدیمی انجام شده است و بنابراین استفاده از ایده‌های جدید جهت کاهش محاسبات و کاهش وقت ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین در این پژوهش از روش المان محدود مرزی مقیاس شده

<sup>2</sup> Scaling Center

<sup>1</sup> Region-matching

$$[\hat{J}(\xi, \eta, \zeta)] = \begin{bmatrix} \hat{x}_{,\xi} & \hat{y}_{,\xi} & \hat{z}_{,\xi} \\ \hat{x}_{,\eta} & \hat{y}_{,\eta} & \hat{z}_{,\eta} \\ \hat{x}_{,\zeta} & \hat{y}_{,\zeta} & \hat{z}_{,\zeta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

با استفاده از روابط قبل و روابطی که بصورت مبسوط در مرجع [۲] آمده است، کرنش به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\varepsilon(\xi, \eta, \zeta) = [B^1(\eta, \zeta)]\{u(\xi)\}_{,\xi} + \frac{1}{\xi}[B^2(\eta, \zeta)]\{u(\xi)\} \quad (3)$$

$$[B^1(\eta, \zeta)] = [b^1(\eta, \zeta)][N^u(\eta, \zeta)] \quad (4)$$

$$[B^2(\eta, \zeta)] = [b^2(\eta, \zeta)][N^u(\eta, \zeta)]_{,\eta} + [b^3(\eta, \zeta)][N^u(\eta, \zeta)]_{,\xi} \quad (5)$$

دامنه تنش نیز به شکل رابطه (۶) قابل محاسبه است.

$$\sigma\{\xi, \eta, \zeta\} = [D(\eta, \zeta)][B^1(\eta, \zeta)]\{u(\xi)\}_{,\xi} + [D(\eta, \zeta)][B^2(\eta, \zeta)]\{u(\xi)\}_{,\xi} \quad (6)$$

## ۲-۲- ماتریس سختی دینامیکی محیط نامحدود

ماتریس سختی دینامیکی، نیروهای گره‌ای  $\{R(\xi)\}$ ، را به جابجایی  $\{u(\xi)\}$  ربط می‌دهد و برای یک حوزه نامحدود بر روی یک سطح با  $\xi$  ثابت بصورت زیر می‌باشد ( $\infty$  نشان حوزه نامحدود می‌باشد).

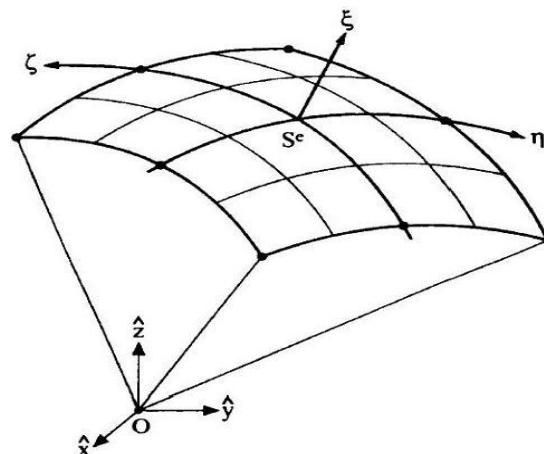
$$\{R(\xi)\} = [S^\infty(\omega, \xi)]\{u(\xi)\} \quad (7)$$

ضمن استفاده از معادله اصلی این روش و جای گذاری فرمولاسیون مربوطه که بطور مفصل در مرجع [۲] آمده است، معادله زیر برای سختی دینامیکی بر روی مرز با  $\xi=1$  بدست می‌آید.

$$([S^\infty(\omega)] + [E^1])[E^0]^{-1}([S^\infty(\omega)] + [E^1]^T) - (s-2)[S^\infty(\omega)] - \omega[S^\infty(\omega)]_{,\omega} - [E^2] + \omega^2[M^0] = 0 \quad (8)$$

این معادله بیان کننده معادله سختی دینامیکی المان محدود با مرز مقیاس شده<sup>۱</sup> در حوزه فرکانس، برای محیط سه بعدی الاستودینامیک می‌باشند، که یک معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه اول غیر خطی، با فرکانس  $\omega$  به

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، محورهای جانبی  $\eta$  و  $\zeta$  موازی با مرز، یا بر روی آن انتخاب می‌شوند و محور  $\xi$ ، به طور شعاعی از مرکز مقیاس می‌گذرد و بیان کننده ضریب مقیاس می‌باشد. مختصات شعاعی بدون بعد  $\xi$  از مرکز مقیاس اندازه‌گیری می‌شود و برای نقاط روی مرز  $\xi = 1$ ، برای نقاط درون مرز  $0 < \xi < 1$  و برای نقاط خارج از مرز  $\xi > 1$  می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت مرکز مقیاس و دستگاه‌های مختصات

در این روش عددی نیمه تحلیلی، مرزهایی که امتدادشان از مرکز مقیاس می‌گذرد، مش بندی نمی‌گردند. برای یک مساله سه بعدی، مختصات گره‌ای یک المان در مختصات دکارتی به وسیله  $\{x\}$ ،  $\{y\}$  و  $\{z\}$  بیان می‌شود. با استفاده از توابع شکل المان ایزوپارامتریک را به مختصات محلی منتقل می‌کنیم.

$$\begin{aligned} x(\eta, \zeta) &= [N(\eta, \zeta)]\{x\}, \\ y(\eta, \zeta) &= [N(\eta, \zeta)]\{y\}, \\ z(\eta, \zeta) &= [N(\eta, \zeta)]\{z\}, \\ N(\eta, \zeta) &= [N_1(\eta, \zeta) N_2(\eta, \zeta) \dots] \end{aligned} \quad (1)$$

برای انتقال اپراتور دیفرانسیلی، از مختصات  $(x, y, z)$  به مختصات  $(\xi, \eta, \zeta)$ ، به ماتریس ژاکوبین زیر نیاز داریم:

<sup>1</sup> Dynamic Stiffness Equation of Scaled Boundary Finite Element

زمانی که تنها ماتریس سختی استاتیکی مورد نظر است، معادله جبری ریچاتی<sup>۱</sup> (۹) به صورت زیر حل می‌شود.

$$\begin{bmatrix} [E^0]^{-1}[E^1]^T - \frac{s-2}{2}[I] & -[E^0]^{-1} \\ -[E^2] + [E^1][E^0]^{-1}[E^1]^T & -([E^1][E^0]^{-1} - \frac{s-2}{2}[I]) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [\psi_{11}] & [\psi_{12}] \\ [\psi_{21}] & [\psi_{22}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\lambda_{11}] & [\lambda_{12}] \\ 0 & [\lambda_{22}] \end{bmatrix} \quad (12)$$

اولین ماتریس سمت چپ معادله فوق را برابر  $[Z]$  فرض می‌کنیم. بنابراین  $[Z][\psi] = [\psi][\lambda]$  یک مساله مقدار ویژه است که با حل آن  $[\lambda]$  و  $[\psi]$  بدست می‌آید. یک ماتریس تبدیل با ستون‌های مستقل (ماتریس بردار ویژه) که توابع پایه نام‌گذاری شده، می‌باشد. طبق رابطه زیر با داشتن  $[\psi]$  ماتریس سختی حوزه نامحدود بدست می‌آید.  $[\lambda]$  به صورتی تنظیم می‌شود که قسمت‌های حقیقی مقادیر ویژه  $[\lambda_{11}]$  منفی و  $[\lambda_{22}]$  مثبت می‌باشند.

$$[K^\infty] = -[\psi_{22}][\psi_{21}]^{-1} \quad (13)$$

#### ۲-۴- ماتریس سختی استاتیکی حوزه محدود

ماتریس سختی دینامیکی، نیروهای گره‌ای  $\{R(\xi)\}$ ، را به جابجایی  $\{u(\xi)\}$  ربط می‌دهد و برای یک حوزه محدود بر روی یک سطح با  $\xi$  ثابت بصورت زیر می‌باشد (b نشان حوزه محدود می‌باشد).

$$-\{R(\xi)\} = [S^b(\omega, \xi)]\{u(\xi)\} \quad (14)$$

با طی روندی کاملاً مشابه با بخش پیشین معادله سختی دینامیکی المان محدود با مرز مقیاس شده در حوزه فرکانس (برای حوزه محدود) به شکل زیر بدست می‌آید.

$$[K^b] = [\psi_{21}][\psi_{11}]^{-1} \quad (15)$$

#### ۲-۵- ماتریس سختی دینامیکی محیط محدود

معادله سختی دینامیکی محیط محدود بصورت زیر بیان می‌گردد.

$$[S^b(\omega)] = [K^b] - \omega^2[M^b] \quad (16)$$

$[K^b]$  از معادله (۱۵) بدست می‌آید. جایگذاری معادله بالا در معادله سختی دینامیکی حوزه محدود، منجر به یک ثابت مستقل از  $(i\omega)$  و  $(i\omega)^2$  می‌شود (با صرف نظر از

عنوان متغیر مستقل می‌باشند. مجهول معادله (۶)،  $[S^\infty(\omega)]$  می‌باشد.

برای حل معادله (۶) و تعیین ماتریس سختی دینامیکی و برای تعیین شرط بازتابشی، یک بسط مجانب مطابق با روش بیان شده در فصل هفت مرجع [۲]، تعیین می‌شود. ماتریس سختی دینامیکی به صورت سری توانی زیر بیان می‌شود:

$$[S^\infty(\omega)] = (i\omega)[C_\infty] + [K_\infty] + \sum_{i=1} [A^{(i)}](i\omega)^{-1} \quad (9)$$

در این معادله  $[C_\infty]$  و  $[K_\infty]$  به ترتیب ماتریس ضریب میرایی و ماتریس ضریب فنریت می‌باشند. برای مواد غیرقابل تراکم ( $\nu = 0.5$ ) یک مؤلفه اضافی  $(i\omega)^2$  نیز به معادله بالا اضافه می‌شود [۲].

برای بدست آوردن یک فرمول ساده‌تر یک مساله مقدار ویژه حل می‌شود.

$$[M^0][\Phi] = [E^0][\Phi][\lambda^2] \quad (10)$$

ماتریس‌های  $[E^0]$  و  $[M^0]$  مثبت و معین اند و مقادیر ویژه  $[\lambda^2]$  مثبت اند.

برای یافتن مقدار ماتریس‌ها از یک سری روابط بازگشتی که در مرجع [۱] به تفصیل آمده است، استفاده می‌شود. لازم به ذکر است، حوزه نامحدود بر اساس روابط نیز همواره به صورت یک صادر کننده انرژی عمل می‌کند.

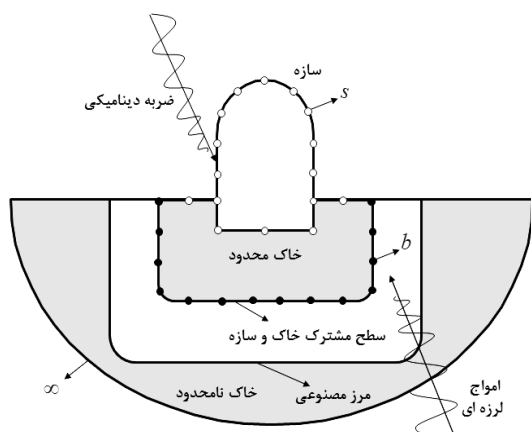
#### ۲-۳- ماتریس سختی استاتیکی حوزه نامحدود

با قرار دادن  $\omega = 1$  در معادله مربوط به سختی دینامیکی حوزه نامحدود، معادله المان محدود با مرز مقیاس شده برای حالت استاتیکی مربوط به حوزه نامحدود با درجات آزادی روی مرز به صورت زیر بدست می‌آید.

$$[k^\infty][E^0]^{-1}[k^\infty] + \left([E^1][E^0]^{-1} - \frac{s-2}{2}[I]\right)[k^\infty] + [k^\infty] \left([E^0]^{-1}[E^1]^T - \frac{s-2}{2}[I]\right) - [E^2] + [E^1][E^0]^{-1}[E^1]^T = 0 \quad (11)$$

<sup>1</sup> Algebraic Riccati equation

مرز مشترک محیط محدود و نامحدود از یکدیگر جدا می-شوند. مرز مصنوعی که در واقع تحریک‌های لرزه‌ای بر روی آن به وقوع می‌پیوندد، در فاصله‌ای مناسب بسته به دقت آنالیز، می‌تواند دورتر و یا نزدیک‌تر به سازه تعریف شود. گره‌های موجود بر روی سازه با  $s$  و گره‌های موجود بر روی مرز مشترک خاک و سازه با  $b$  نشان داده می‌شود. بارگذاری دینامیکی می‌تواند به صورت بار خارجی و یا بار لرزه‌ای به سیستم وارد شود [۱۴].



شکل ۲- کلیات نحوه مدل‌سازی محیط‌های نیم نامحدود [۱۴]

یک روش معمول در آنالیز دینامیکی محیط محدود و نامحدود این است که مرز مصنوعی در اطراف سازه در فاصله محدودی معرفی شود. شرایط مرزی خاصی که شرایط بازتابی را در بی‌نهایت ارضا می‌کند بر روی مرز مصنوعی تعریف می‌شود. این شرایط مرزی با معادله حرکت حوزه محدود که با المان محدود مرزی مقیاس شده یا روش‌های دیگر مثل المان محدود مدل شده است، ترکیب می‌شود. برای رسیدن به این هدف و در نهایت برای آنالیز دینامیکی این دو محیط، دو روش وجود دارد: روش مستقیم<sup>۱</sup> و روش زیرسازه<sup>۲</sup>. در ادامه به معرفی روش زیر سازه پرداخته شده است.

در این روش مرز مصنوعی می‌تواند در نزدیک‌ترین موقعیت نسبت به سازه، یعنی حتی بر روی مرز مشترک خاک و سازه منطبق شود. در این روش کل سیستم به یک سری زیر سازه‌های ساده‌تر تقسیم می‌شود و سپس هر کدام

ترم‌های با درجه بالاتر، ماتریس ضرایب ترم  $(i\omega)^2$  به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned} & \left( (-[K^b] + [E^1])[E^0]^{-1} - \frac{S}{2}[I] \right) [M^b] - \\ & [M^b] \left( [E^0]^{-1}(-[K^b] + [E^1]) - \frac{S}{2}[I] \right) + \\ & [M^0] = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

این معادله برای محاسبه  $[M^b]$  استفاده می‌شود. رابطه بالا یک معادله لیاپانوف است.

$$[A][X] + [X][A]^T = [C] \quad (18)$$

با مجهول  $[X] = [M^b]$  و ماتریس‌های ضرایبی که به راحتی تعیین می‌شوند.

### ۳- معرفی تکنیک زیرسازه

در این قسمت به ترکیب فرمولاسیون روش المان محدود با مرز مقیاس‌شده مربوط به دامنه محدود و نامحدود در حوزه فرکانس تحت بار خارجی و لرزه‌ای پرداخته شده است.

در محیط نیم نامحدود سطح زمین، حجم خاک در برابر حجم عارضه توپوگرافی مدل شده، بسیار بیشتر می‌باشد پس به طور کلی، رفتار سطوح توپوگرافی مدل شده، تحت تأثیر خاک اطرافش می‌باشد. بدین معنی که رفتار هر یک بر دیگری اثر دارد. بنابراین آنالیز سطوح توپوگرافی به عنوان یک محیط محدود به تنهایی مجاز نمی‌باشد و در بسیاری از حالات مهم (به عنوان مثال، نوسانات لرزه‌ای) که بارگذاری به خاک اطراف وارد می‌شود باید اثر خاک در نظر گرفته شود به این معنا که در هر صورت حوزه اطراف محیط محدود باید مدل شود. حوزه نیم نامحدود سطح زمین، معمولاً می‌تواند به دو محیط محدود و نامحدود تقسیم شده و آنالیزها انجام پذیرند. حوزه محدود می‌تواند توسط روش المان محدود یا المان محدود مرزی مقیاس شده مدل شود. برای مدل کردن حوزه نامحدود شرایط بازتابی باید در بی‌نهایت ارضا شود.

همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد، خاک یک محیط نیمه نامحدود است. خاک محدود و نامحدود توسط

<sup>2</sup> Substructure method

<sup>1</sup> Direct method

$$\{R(\omega)\} = [S^\infty(\omega)]\{u(\omega)\} \quad (۱۹)$$

که در آن نشانه  $\infty$  بیانگر حوزه نامحدود می‌باشد.

### ۳-۱- ترکیب معادلات حوزه محدود و نامحدود تحت بارگذاری خارجی دینامیکی در حوزه فرکانس

همانطور که بیان گردید، برای آنالیز دینامیکی خاک و سازه در محیط‌های نیم نامحدود، دو زیرسازه تعریف می‌گردد: محیط محدود و محیط نیم نامحدود. محیط مساله به دو قسمت سطح زمین با عارضه توپوگرافی به عنوان محیط محدود و سطح زمین با وجود قسمت گود شده به عنوان محیط نیم نامحدود لحاظ گردیده‌اند. در این تحقیق برای بررسی اثرات توپوگرافی بر امواج لرزه‌ای که از محیط نیم نامحدود به سمت سطح زمین با وجود پستی یا بلندی انتشار یافته‌اند، از این تکنیک استفاده گردیده است. همانطور که در بخش قبل بیان گردید، دو محیط محدود و نیم نامحدود در مرز مشترک در تماس هستند و مش بندی این قسمت همسان می‌باشد.

معادلات دیفرانسیل حاکم بر محیط مساله معرفی شده در دامنه زمان برای بار دینامیکی وارد شده بر مرز آزاد محیط محدود بصورت زیر بیان می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] \\ [M_{bs}] & [M_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s(t) \\ \ddot{u}_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sb}] \\ [K_{bs}] & [K_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s(t) \\ u_b(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \int_0^t S_r^\infty(t-\tau)u_b(\tau)d\tau \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_s(t)\} \\ \{P_b(t)\} \end{Bmatrix} \quad (۲۰)$$

زیرنویس s برای گره‌هایی استفاده شده که روی محیط محدود بوده و در تماس با محیط نیم نامحدود نیستند. زیرنویس b برای گره‌های مشترک بین هر دو محیط استفاده شده است. برای نوشتن معادله در دامنه فرکانس کافیهست از جایگذاری‌های معادل زیر در رابطه بالا استفاده شود.

$$\{u(t)\} = \{u(\omega)\}e^{i\omega t} \quad (۲۱)$$

$$\{\ddot{u}(t)\} = -\omega^2\{u(\omega)\}e^{i\omega t} \quad (۲۲)$$

جداگانه تحلیل شده و در مرحله آخر با استفاده از اصل جمع آثار قوا، نتایج با هم ترکیب می‌شوند. زیرسازه حوزه محدود و زیرسازه حوزه نامحدود به صورت مستقل مدل می‌شود. مش بندی بر روی مرز مشترک خاک و سازه در هر دو زیرسازه سازگار و یکسان می‌باشد. به علت استفاده از اصل برهم نهی، رفتار محیط باید خطی در نظر گرفته شود.

ابتدا کل سیستم توسط یک مرز مصنوعی به دو زیر سازه تقسیم می‌شود. زیر سازه اول شامل سطح زمین و خاک محدود اطراف آن می‌باشد و می‌توان آن را با استفاده از روش المان محدود مرزی مقیاس شده به راحتی مدل کرد. زیر سازه دوم شامل حوزه نامحدود خاک است.

ابعاد ناحیه محدود تأثیری بر نتایج آنالیز نخواهد داشت، اما معمولاً این ناحیه تا سطح مشترک محیط محدود و نامحدود تعریف می‌شود. تأثیر محیط نامحدود نیز به صورت شرایط مرزی دقیق در مرز مصنوعی اعمال می‌شود. این شرایط مرزی در حقیقت همان روابط اندرکنش نیرو-جابجایی در سطح مشترک ناحیه محدود و نامحدود هستند و مشخص کننده شرط بازتابشی در بی‌نهایت می‌باشند.

خصوصیت دینامیکی یک حوزه نامحدود می‌تواند توسط یک رابطه نیرو-جابجایی که بر روی مرز مشترک محیط محدود و نامحدود تنظیم شده و شرایط بازتابشی را در بی-نهایت ارضا کرده، بیان شود.

این رابطه با رابطه زیرسازه حوزه محدود بر روی مرز مشترک محیط محدود و نامحدود ترکیب شده و به معادله حاکم کل سیستم دینامیکی منجر می‌شود. پس این حالت می‌تواند یک شرط مرزی برای زیرسازه حوزه محدود در نظر گرفته شود.

در حوزه فرکانس، این شرط مرزی می‌تواند به عنوان ماتریس سختی دینامیکی  $[S^\infty(\omega)]$  بر روی مرز بیان شود، ماتریسی که می‌تواند بردار نیروی اندرکنش  $\{R(\omega)\}$  را به بردار جابجایی  $\{u(\omega)\}$  مرتبط کند. این شرط مرزی برای فرکانس تحریک نوسانی  $\omega$  به صورت زیر نوشته می‌شود.

جابجایی برای اندرکنش محیط محدود و نیم نامحدود تحت

تحریک لرزه‌ای بصورت رابطه‌ی زیر بیان می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}(\omega)] & [S_{sb}(\omega)] \\ [S_{bs}(\omega)] & [S_{bb}(\omega)] + [S^{\infty}(\omega)] \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \{u_s^t(\omega)\} \\ \{u_b^t(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S^{\infty}(\omega)]\{u_b^g(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (27)$$

#### ۴- تحلیل‌های عددی

برای تحلیل‌های عددی با استفاده از روش المان محدود مرزی مقیاس شده، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.

(الف) مساله به صورت توپوگرافی دو بعدی در نظر گرفته می‌شود.

(ب) از بررسی لایه‌های مختلف خاک صرف نظر می‌شود.

(ج) خاک به صورت همگن در نظر گرفته می‌شود.

(د) لایه خاک مدل شده در مسائل، ایزوتروپ با رفتار خطی فرض می‌گردد.

(ه) امواج SH به عنوان موج ورودی بصورت قائم در نظر گرفته می‌شوند.

(و) اثر سازه در این مطالعات در نظر گرفته نمی‌شوند.

(ز) تحلیل‌ها در قلمرو فرکانس انجام پذیرفته‌اند.

(ح) از تأثیر میرایی مصالح محیط صرف نظر شده است.

به منظور اطمینان از صحت و ارزیابی کد کامپیوتری که با استفاده از نرم افزارهای فترن و متلب تهیه شده، برای محاسبه جابجایی‌های میدان آزاد سطح دره و تپه، یک سری مقایسه با جواب‌های به دست آمده در مقالات مختلف انجام شده است. از جمله کارهای انجام شده در زمینه تحلیل‌های دو بعدی تغییرات مکانی جابجایی در زمین‌های دارای توپوگرافی در محیط نیمه بی نهایت همگن تحت اثر امواج لرزه‌ای می‌توان به کارهای تحلیلی صورت گرفته توسط تساور و چنگ اشاره کرد که از نتایج آن‌ها برای مقایسه و صحت سنجی کد نوشته شده استفاده شده است.

در این قسمت از دو مدل تپه نیم دایروی و تپه نیم بیضوی و همچنین دره مثلثی برای مدل‌سازی و صحت سنجی استفاده شده است.

$$\{P(t)\} = \{P(\omega)\}e^{i\omega t} \quad (23)$$

$$\{R(t)\} = \{R(\omega)\}e^{i\omega t} \quad (24)$$

$$\{R(\omega)\} = [S^{\infty}(\omega)]\{u_b(\omega)\} \quad (25)$$

که منجر به استخراج معادلات اندرکنش محیط محدود و نیم نامحدود در دامنه فرکانس در معرض بارگذاری خارجی بر روی گره‌های آزاد محیط محدود می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}(\omega)] & [S_{sb}(\omega)] \\ [S_{bs}(\omega)] & [S_{bb}(\omega)] + [S^{\infty}(\omega)] \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \{u_s(\omega)\} \\ \{u_b(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{P_s(\omega)\} \\ \{P_b(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (26)$$

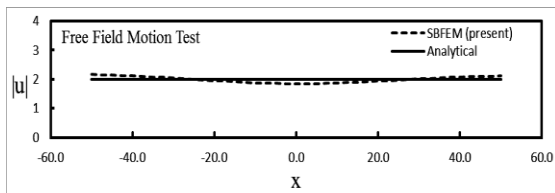
ماتریس‌های سختی محیط محدود و نیم نامحدود از روابط بخش قبل بدست آمده‌اند و در این رابطه مورد استفاده واقع می‌شوند.

#### ۳-۲- ترکیب معادلات حوزه محدود و نامحدود

##### تحت بارگذاری لرزه‌ای در حوزه فرکانس

در این تکنیک تحلیل محیط محدود را می‌توان به روش‌های متنوعی از جمله المان محدود انجام داد. در تحقیق حاضر برای محاسبه‌ی ماتریس سختی محیط محدود از روش المان محدود مرزی مقیاس شده با استفاده از رابطه (۱۶) استفاده شده است. سطح زمین برای محیط نیم نامحدود در دو طرف قسمت حفر شده نیازی به مش بندی ندارد، چراکه در امتداد مرکز مقیاس قرار گرفته است. رفتار دینامیکی خاک بوسیله رابطه اندرکنش نیرو- جابجایی در مرز مشترک بصورت ماتریس سختی دینامیکی  $[S^{\infty}(\omega)]$  بیان می‌گردد. برای بارگذاری لرزه‌ای، دامنه جابجایی لرزه-ای مؤثر ورودی  $\{u_b^g(\omega)\}$  بر روی گره‌های مرز مشترک اثر می‌کند. بالانویس  $g$  به سیستم نیم نامحدود اشاره دارد.  $\{u_b^g(\omega)\}$  از طریق حرکت میدان آزاد خاک بدون گودال سطحی قابل محاسبه می‌باشد. سپس این جابجایی به بار معادل گره‌ی روی مرز مشترک تبدیل می‌شود و بر روی کل سیستم درگیر شده اثر می‌نماید. در اعمال بارهای لرزه-ای گره‌های آزاد محیط محدود بارگذاری نمی‌شوند. در نهایت معادلات حرکت در دامنه فرکانس در قالب دامنه

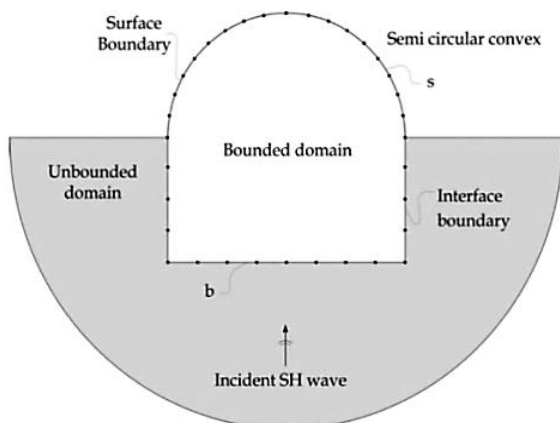




شکل ۳- نتایج صحت سنجی مساله حرکت میدان آزاد سطح افقی در مقایسه با نتایج تحلیلی

#### ۴-۲- صحت سنجی مساله اثرات تپه‌ها بر موج SH

در قسمت اول، سطح تپه نیم دایروی با ۹۰ المان سه گرهی مدل سازی گردیده است. تعداد کل گره‌های سیستم محدود و نامحدود در این مدل برابر ۲۵۲ بوده و به روشی که در بخش قبل اشاره گردید، بصورت تلفیق محیط محدود و نامحدود همانند در نظر گرفته شده است. موج ورودی SH با زاویه برخورد  $\theta = 0^\circ$  نسبت به محور قائم و فرکانس بی بعد<sup>۱</sup> برابر ۰، ۵، ۱ و ۲ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- نحوه مدل سازی تپه نیم دایروی به روش زیر سازه لازم به ذکر است که فرکانس بدون بعد بصورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\eta = \frac{a}{\pi C_s} = \frac{2a}{\lambda} \quad (28)$$

که در آن  $\omega$  فرکانس موج تحریک،  $a$  شعاع تپه،  $C_s$  سرعت موج برشی و  $\lambda$  طول موج تحریک می‌باشند. در شکل ۵ نتایج بدست آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه شده توسط تساور و چنگ برای تپه نیم دایروی تحت اثر برخورد موج SH نشان داده شده است.

در تحقیقات سال‌های گذشته در زمینه گسترش روش‌های عددی و تحلیلی، از صحت سنجی با استفاده از تپه نیم دایروی به دفعات استفاده شده است. اما مدل سازی تپه نیم بیضوی برای اولین بار توسط تساور در سال ۲۰۱۱ ارائه گردیده است.

پارامترهای متعددی بر روی نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی مؤثر می‌باشند. در تحقیقاتی که در این زمینه انجام گرفته است، معمولاً اثرات چند عامل اصلی مورد بررسی قرار گرفته است.

(الف) پارامترهای مربوط به ابعاد مدل شامل ابعاد المان‌ها و طول میدان آزاد در روش‌هایی که لزوماً طول آزاد طرفین مدل سازی می‌گردد؛

(ب) پارامترهای مربوط به مشخصات موج شامل نوع و محتوای فرکانسی؛

(ج) پارامترهای مربوط به هندسه دره و تپه شامل عمق و شکل دره.

در این تحقیق نیز با بررسی برخی از پارامترها در مقایسه با سایر تحقیقات انجام گرفته، روش عددی مورد استفاده در تحقیق حاضر، مورد صحت سنجی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱- مدل سازی مساله انتشار امواج لرزه ای روی سطح افقی زمین (میدان آزاد)

نخست با استفاده از مساله حرکت سطح افقی در میدان آزاد تحت تحریک امواج برشی به صحت سنجی کد کامپیوتری پرداخته شده است.

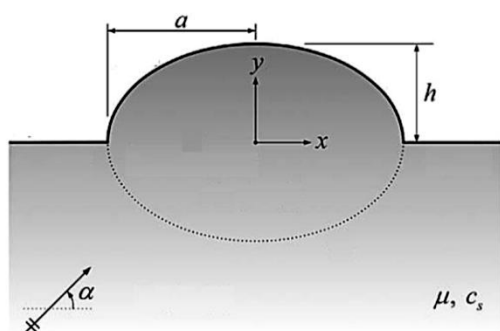
در این مساله سطح زمین به طول ۱۰۰ متر با ۱۰۰ المان مرتبه دو مورد مدل سازی و مش بندی واقع شده و نتایج تحلیل عددی با مقدار تحلیلی پاسخ مساله برای موج ورودی SH که بصورت قائم به سطح برخورد نموده، مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد انطباق مناسبی میان پاسخ سطح زمین در روش عددی حاضر و آنچه روش تحلیلی ارائه می‌دهد یعنی دو برابر شدن دامنه پاسخ سطح زمین نسبت به دامنه موج ورودی، وجود دارد.

<sup>۱</sup> Dimensionless frequency

روش عددی حاضر در تحلیل مساله تپه نیم دایروی نیز در حد مطلوبی قرار دارد.

برای فرکانس بی بعد برابر ۰,۵، طول موج برشی معادل چهار برابر شعاع دره بوده و لذا برای چنین موجی اثر وجودی تپه کمتر از حالت مربوط به فرکانس بی بعد ۱ که طول موج برشی آن ۲ برابر شعاع تپه هست، خواهد بود که این مورد کاملاً در نتایج آشکار می‌باشد.

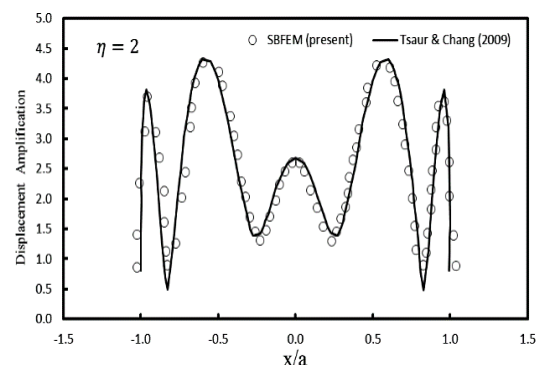
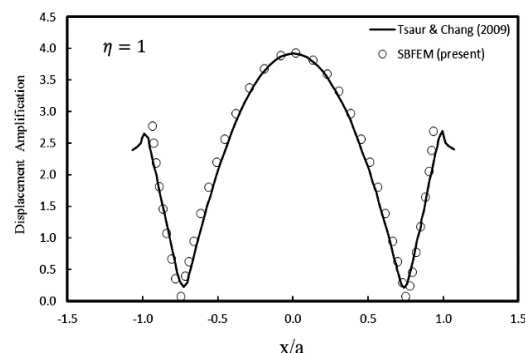
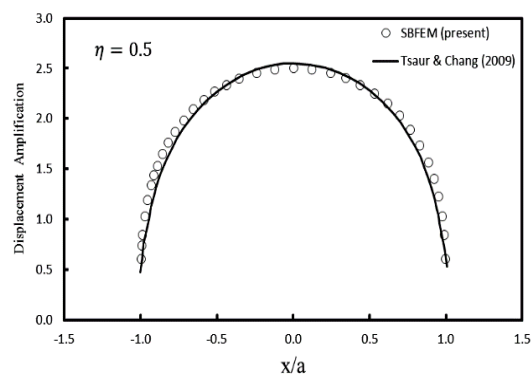
دومین مساله‌ای که در این قسمت بررسی گردیده، تپه نیم بیضوی می‌باشد.



شکل ۶- معرفی ابعاد هندسی تپه نیم بیضوی

همانطور که بیان گردید، حل مساله اثرات توپوگرافی تپه نیم بیضوی برای اولین بار توسط تساور در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روش تحلیلی مطرح گردیده است و مدل‌سازی به روش حاضر در قیاس با نتایج این روش مورد بررسی واقع می‌شود. برای مدل‌سازی سطح تپه نیم بیضوی از ۲۲۵ گره استفاده شده است. در این مساله نیز با استفاده از روش زیر سازه و تقسیم حوزه مساله به دو زیر سازه محدود و نامحدود تحلیل عددی انجام می‌پذیرد. تپه نیم بیضوی مدل شده در این قسمت تپه عریض می‌باشد. در واقع قطر بزرگ نیم بیضی به عنوان عرض تپه در نظر گرفته شده است.

فرکانس بدون بعد موج ورودی به سیستم در این تحلیل ۵,۰، و زاویه موج ورودی ۹۰ درجه نسبت به محور افقی، و نسبت ارتفاع تپه به شعاع بزرگ نیم بیضی ۰,۳ در نظر گرفته شده است. در شکل ۷، نتایج تحلیل عددی حاضر در مقایسه با تحلیل تساور مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین پاسخ‌های

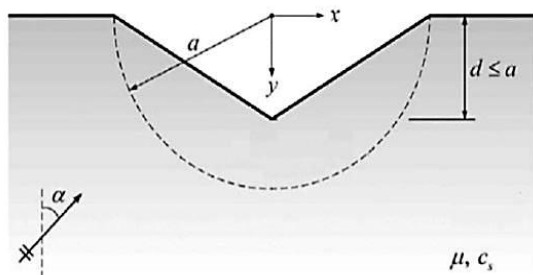


شکل ۵- مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل عددی حاضر و نتایج ارائه شده توسط تساور و چنگ [۱۰] برای موج ورودی SH با زاویه برخورد صفر درجه نسبت به محور قائم و فرکانس بی بعد ۰,۵ برای تپه نیم دایروی

همانطور که نمودارهای ارائه شده نشان می‌دهند، انطباق خوبی بین نتایج تحلیل عددی حاضر و نتایج ارائه شده توسط تساور و چنگ وجود دارد. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده توسط تساور و چنگ مربوط به حل دقیق و تحلیلی دو بعدی این مساله می‌باشد. به منظور ارزیابی صحت تحلیل‌ها تحت اثر فرکانس‌های مختلف موج زمین لرزه‌ای، تحلیل‌هایی با فرکانس‌های بدون بعد ۰,۵، ۱ و ۲ انجام شده است.

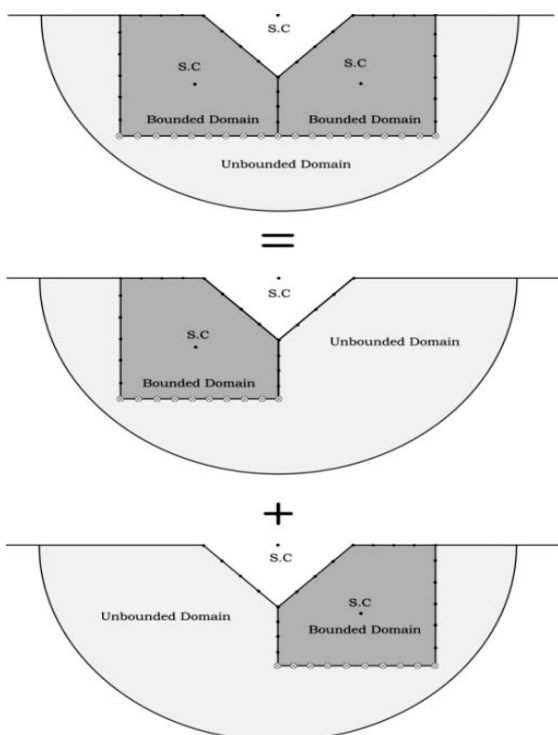
نتایج مربوط به این تحلیل‌ها نشان می‌دهد ضمن اینکه تغییر در فرکانس اثرات چشمگیری بر روی نتایج دارد، دقت

نمایش داده شده است، به تحلیل یک قسمت از مدل پرداخته شده و جابجایی‌های بدست آمده با نقاط متناظر در قسمت دوم مدل جمع شده است.



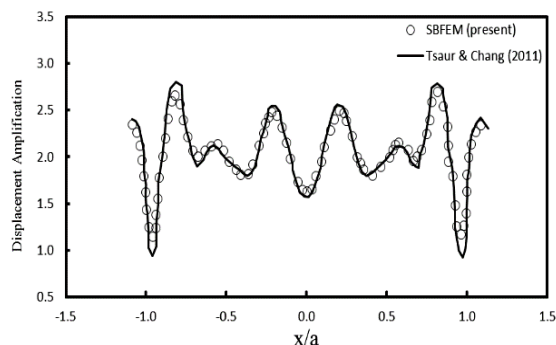
شکل ۸- معرفی ابعاد هندسی دره مثلثی

با توجه به اینکه پاسخ‌های این دو مدل قرینه یکدیگر می‌باشند، پس ضرورتی برای مدل‌سازی هر دو قسمت وجود ندارد و تحلیل و مدل‌سازی قسمت اول یا دوم مدل کافی می‌باشد. لازم به ذکر است روش استفاده شده صرفاً برای مساله دره متقارن قابل استفاده بوده و موج تحریک ورودی باید بصورت قائم به سیستم اعمال شود.



شکل ۹- نحوه استفاده از اصل جمع آثار قوا در برخورد قائم موج SH به دره مثلثی

تحلیل عددی حاضر و آن چه تساور بصورت تحلیلی انجام داده، وجود دارد.



شکل ۷- مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل عددی حاضر و نتایج ارائه شده توسط تساور [۱۳] برای موج ورودی SH با زاویه برخورد ۹۰ درجه نسبت به افق و فرکانس بی بعد ۵,۰ برای تپه نیم بیضوی با نسبت ارتفاع به شعاع بزرگ ۰,۳

#### ۳-۴- صحت سنجی مساله اثرات دره ها بر موج SH

به منظور صحت سنجی تحلیل عددی حاضر در مسائل اثرات دره‌ها بر روی موج SH، دره مثلثی با ابعاد هندسی مختلف در نسبت عمق به عرض دره مدل شده است. پیش از این تساور و چنگ یک دره مثلثی را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۹]. در شکل ۸ پارامترهای ابعاد هندسی دره مثلثی نمایش داده شده است. پس از آن نتایج تحلیلی عددی در قیاس با کار تحلیلی انجام شده توسط تساور و چنگ با فرکانس بدون بعد ۱ برای چهار مدل با نسبت عمق به عرض دره متفاوت ارائه شده است. در شکل ۱۰، نتایج تحلیل برای نسبت عمق به عرض دره ۰,۲۵، ۰,۵، ۰,۷۵ و ۱,۰ نمایش داده شده است.

همانطور که بیان گردید، کد کامپیوتری نوشته شده قابلیت حل مسائل نیم نامحدود به روش زیرسازه را دارا می‌باشد. برای اینکه بتوان مساله دره مثلثی را با استفاده از همان دو زیرسازه مورد تحلیل قرار داد. همچنین جهت عدم افزایش تعداد درجات آزادی اضافی در حل این مساله به روش زیرسازه، از یک روش ابتکاری استفاده گردیده است. در این روش با استفاده از اصل جمع آثار قوا و با توجه به متقارن بودن هندسه و بارگذاری مساله، همان‌گونه که در شکل ۹

برای انجام صحت سنجی در مسائل مدل سازی دره ها، تحلیل های لازم بر روی مسائل برای فرکانس های مختلف انجام شده است. نتایج نشان می دهند که با تغییر در شکل و عمق دره جابجایی های بدست آمده تغییرات قابل توجهی دارند همچنین اثر شکل و عمق دره روی تغییر مکان های بدست آمده تابع فرکانس می باشد.

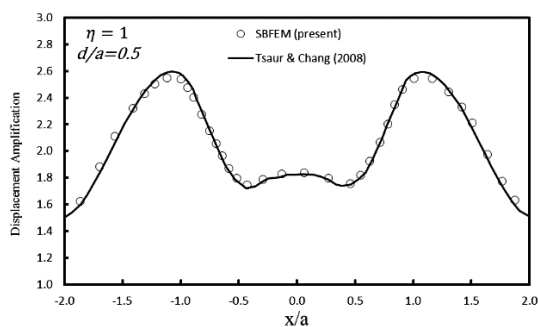
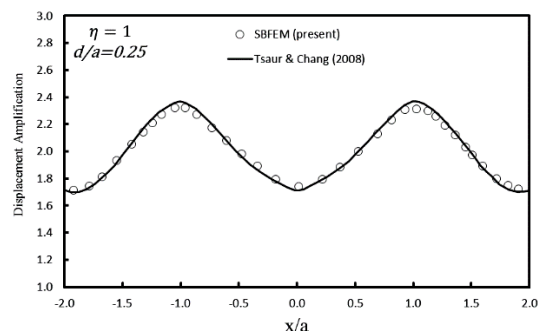
این تحلیل ها در دره مثلی شکل کم عمق با شیب دیواره متفاوت و فرکانس بی بعد ۱ انجام شده است. پس از آن یک مدل با نسبت عمق دره به نیم طول دهانه ۰٫۱ و فرکانس بدون بعد ۵ نیز مدل سازی گردیده است.

همانطور که بیان گردید، شکل ۸ مدل هندسی دره مثلی شکل را نشان می دهد. تحلیل های انجام شده بر روی دره مثلی به ازای فرکانس بدون بعد ۱ برای نسبت  $d/a$  برابر با ۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱ در شکل ۱۰ ارائه گردیده است. همانطور که در این شکل ها مشاهده می گردد، هرچقدر عمق دره افزایش می یابد (شیب دیواره بیشتر می شود) آشفتگی ها در تغییر مکان های بدست آمده از دره نیز افزایش می یابد.

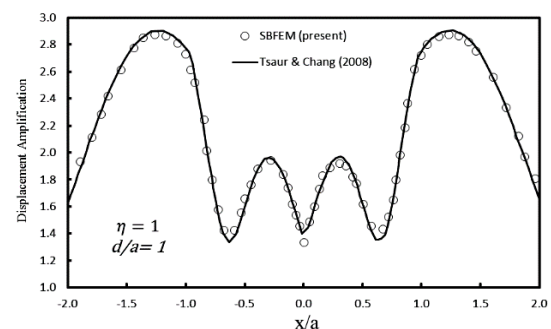
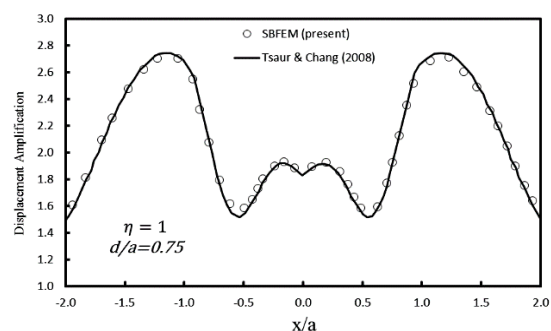
## ۵- نتیجه گیری

تاکنون موارد متعددی از تحقیقات به روش های گوناگون در زمینه بررسی اثرات توپوگرافی بر روی امواج زمین لرزه پرداخته اند. در تحقیق حاضر هدف اصلی تحلیل مسائل اثرات توپوگرافی بر امواج SH بود که بتوان با داشتن فرکانس موج قائم ورودی به سیستم، و هندسه توپوگرافی مورد نظر، جابجایی در کلیه نقاط روی تپه و دره را برای اولین بار با استفاده از روش المان محدود مرزی مقیاس شده بدست آورد.

همانطور که در نمودارهای ذکر شده مشاهده می شود، تطابق مناسبی بین پاسخ های بدست آمده از جابجایی سطح زمین تحت موج تحریک قائم SH به روش المان محدود مرزی مقیاس شده و پاسخ های سایر روش های تحلیلی برای انواع مسائل تپه و دره وجود دارد.



شکل ۱۰- مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل عددی حاضر و نتایج ارائه شده توسط تساور و چنگ [۹] برای موج ورودی SH با زاویه برخورد صفر درجه نسبت به محور قائم و فرکانس بی بعد ۱ برای دره مثلی با نسبت  $d/a$  برابر ۰٫۲۵ و ۰٫۵



شکل ۱۱- مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل عددی حاضر و نتایج ارائه شده توسط تساور و چنگ [۹] برای موج ورودی SH با زاویه برخورد صفر درجه نسبت به محور قائم و فرکانس بی بعد ۱ برای دره مثلی با نسبت  $d/a$  برابر ۰٫۷۵ و ۱

براساس تحلیل‌های انجام شده به ازای پارامترهای مختلف روی مدل دره‌ها و تپه‌های دو بعدی به شکل‌های مختلف، صحت سنجی نتایج تحقیقات گذشته قابل توجه است:

- در تحقیقات گذشته نشان داده شده که به طور کلی با افزایش فرکانس، طول موج کاهش پیدا کرده و لذا به ازای یک بعد ثابت دره اثر آشفتگی و اغتشاش ایجاد شده روی موج ناشی از وجود دره بیشتر شده و نیز الگوی تغییرات پیچیده تری برای تغییر مکان‌های بدست آمده در دره قابل تصور است که این موضوع در تحقیق حاضر نیز بخوبی نمایان است. و برعکس، به ازای فرکانس‌های کوچکتر با طول موج بزرگتر اثر وجودی دره به عنوان یک عامل آشفتگی کمتر احساس شده و الگوی تغییرات جابجایی‌های بدست آمده در دره از پیچیدگی کمتری برخوردار است.

- تحلیل‌های عددی انجام پذیرفته نشان می‌دهند شکل و عمق دره، همانطور که در تحقیقات گذشته نیز اثبات گردیده، اثرات مهمی روی نتایج بدست آمده دارند. اگر تغییرات عمق در مقایسه با طول موج برخوردی قابل ملاحظه باشد، این اثر تشدید می‌گردد.

نتایج نشان می‌دهد استفاده از روش المان محدود مرزی مقیاس شده برای حل مسائل اثرات توپوگرافی سطح زمین بعنوان محیط نیم نامحدود، دارای دقت قابل قبولی بوده و باعث کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت می‌گردد. برای رسیدن به این خواسته، با استفاده از روش المان محدود مرزی مقیاس شده، برنامه‌ای کامپیوتری تحت فرترن و متلب نوشته شد.

در این تحقیق برای حل مسائل اثر توپوگرافی سطح زمین بعنوان محیط با هندسه نیم نامحدود بر موج لرزه‌ای، از روش زیرسازه استفاده گردید. در واقع با مقایسه نتایج تحلیل به روش عددی حاضر با سایر تحقیقات انجام گرفته به روش‌های دیگر، نشان داده شد که استفاده از دو زیرسازه محدود و نامحدود برای حل اینگونه مسائل کافی بنظر می‌رسد. با توجه به اینکه محاسبات مدل‌های مختلف به وسیله کد کامپیوتری در کسری از دقیقه صورت پذیرفته، در نتیجه با در نظر گرفتن دو زیر سازه می‌توان از افزایش حجم محاسبات و پیچیدگی در حل مساله جلوگیری نمود و به دقت مطلوبی دست پیدا کرد.

## ۶- مراجع

- [1] Song, Ch., Wolf, J.P. (1995), "Consistent infinitesimal finite element cell method: out-of-plane motion", *Journal of Engineering Mechanics*, vol.121, pp.613-619
- [2] Wolf, J.P., *The Scaled Boundary Finite Element Method*, England, John Wiley & Sons, (2003).
- [3] Yang, Z. J., Deeks, A. J., and Hao, H. (2007), "A Frobenius solution to the scaled boundary finite element equations in frequency domain for bounded media", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol.70, pp.1387-1408
- [4] Trifunac, M.D. (1973), "Scattering of plane SH-waves by a semi-cylindrical canyon", *Earthquake Engineering and structural Dynamics*, vol.1, pp.267-281
- [5] Lee, V.W., Luo, H., and Liang, J. (2006), "Antiplane (SH) Waves diffraction by a semicircular cylindrical hill Revisited: An improved analytic wave series solution", *Journal of Engineering Mechanics*, vol.132, no.10, pp.1106-1114
- [6] Gatmiri, B., Nguyen, Kh., and Dehghan, K. (2007), "Seismic response of slopes subjected to incident SV wave by an improved boundary element approach", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol.31, pp.1183-1195
- [7] Mogi, H., Kawakami, H. (2007), "Analysis of scattered waves on ground with irregular topography using the direct boundary element method and Neumann series expansion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.97, pp.1144-1157
- [8] Gatmiri, B., Arson, C., and Nguyen, K.V. (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*, vol.28, pp.632-645

- [9] Tsaur, D.H., Chang, K.H. (2008), "An analytical approach for the scattering of SH waves by a symmetrical V-shaped canyon: shallow case", *Geophysical Journal International*, vol.174, pp.255-264
- [10] Tsaur, D.H., Chang, K.H. (2009), "Scattering and focusing of SH waves by a convex circular-arc topography", *Geophysical Journal International*, vol.177, pp.222-234
- [11] Liu, G., Chen, H., and Liu, D. and Khoo, B.C. (2010), "Surface motion of a half-space with triangular and semicircular hills under incident SH waves", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.100, pp.1306-1319
- [12] Tsaur, D.H., Chang, K.H. and Hsu, M.S. (2010), "An analytical approach for the scattering of SH waves by a symmetrical V-shaped canyon: deep case", *Geophysical Journal International*, vol.183, pp.1501-1511
- [13] Tsaur, D.H. (2011), "Scattering and focusing of SH waves by a lower semielliptic convex topography", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.101, pp.2212-2219,.
- [14] Basirat, B., Baziyar, M.H. (2011), "Dynamic Soil-Structure Interaction Analysis Under Seismic Loads Using The Scaled Boundary Finite Element Method", 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran, May 16-18.