تحلیل دینامیکی عوارض توپوگرافی دوبعدی ناهمگن در حوزه زمان با استفاده از روش اجزای مرزی

محسن کمالیان* و عبداله سهرابی بیدار**

پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

(دریافت مقاله: ۸۲/۱۰/۳۰ – دریافت نسخه نهایی: ۸٤/۳/۲۸)

چکیده – این مقاله، الگوریتم کامل تحلیل مستقیم پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دوبعدی ناهمگن در فضای زمان توسط روش اجزای مرزی را ارائه داده است. پاسخ لرزه‌ای چند عارضه توپوگرافی متنوع، شامل دره خالی، نیم فضا، دره آبرفتی و تپه، در برابر امواج مهاجم درون‌صفحه SV و P محاسبه شده‌اند که کارایی الگوریتم ارائه شده و امکان جایگزینی روشهای مشابه در فضاهای تبدیل‌یافته توسط آن را در حوزه تحلیل لرزه‌ای ساختگاههای دوبعدی ناهمگن بیان می‌دارند.

واژگان کلیدی : روش اجزای مرزی، حوزه زمان، تاثیرات ساختگاه، ناهمگن، توپوگرافی دوبعدی، تفرق، بزرگنمایی

Transient Site Response Analysis of Nonhomogeneous Two-dimensional Topographic Features Using BEM

M. Kamalian and A. Sohrabi Bidar

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

Abstract: ***This paper presents the complete algorithm of site response analysis of nonhomogeneous topographic structures using transient two-dimensional boundary element method (BEM). Seismic behaviour of various topographic features including canyon, half plane, sedimentary filled valley and ridge sections, subjected to incident SV and P waves are analysed. The analysis shows the efficiency of the proposed algorithm and its advantage over common transformed domains methods in forming a basis for extension to non-linear behaviour.***

Keywords: ***Boundary element method, Time domain, Site effect, Nonhomogeneous, Two-dimensional topography effects, Scattering, Amplification***

* – استادیار   ** – دانشجوی دکترا

[DOR: 20.1001.1.22287698.1384.24.2.4.9]

فهرست علائم

b_i	نیروهای پیکری	r	فاصله بین نقاط تحریک و گیرنده
$c_{1,2}$	سرعت امواج طولی و عرضی	t_i	بردار تنش
G_{ij} and F_{ij}	حل‌های اساسی تغییرمکان و تنش	$t,\Delta t$	زمان، گام زمانی
Gij^{N+1-n} and Fij^{N+1-n}	هسته‌های الاستودینامیک تغییر مکان و تنش	u_i	تغییر مکان
$M_1(\tau)$ and $M_2(\tau)$	توابع شکل خطی زمان	λ and μ	ضرایب لامه
N^m	توابع شکل المان	ρ	دانسیته جرمی

۱- مقدمه

امروزه کاملا آشکار است که شرایط ساختگاهی، شامل ویژگیهای رفتاری و نیز هندسه آبرفت، بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین و توزیع خرابیهای ناشی از زمین‌لرزه تاثیر به سزایی دارند. هندسه یک ساختگاه زمانی اثر قابل ملاحظه خواهد داشت که ابعاد آن در حدود طول موج امواج لرزه‌ای باشد[۱]. از آنجایی که محدوده فرکانسی یک زمین‌لرزه نیرومند از ۰/۳ تا ۱۰ هرتز و همچنین محدوده سرعت امواج لرزه‌ای لایه‌های سطحی از ۰/۱ تا ۳ کیلومتر بر ثانیه متغیرند، رفتار لرزه‌ای تپه‌ها و دره‌هایی که دارای ابعاد دهها متر تا دهها کیلومتر باشند، عموما از هندسه آنها متاثر خواهد بود.

اغلب آیین‌نامه‌های زلزله موجود، به رغم اهمیت هندسه ساختگاه، تنها ویژگیهای رفتاری آن را مورد توجه قرار داده‌اند. سبب اصلی نگاه یک‌بعدی آیین‌نامه‌ها به شرایط ساختگاهی، نبود شناخت کافی از قوانین حاکم بر رفتار لرزه‌ای ساختگاههای چند بعدی است، که خود از فقدان ابزارهای مناسب برای تحلیل دینامیکی آنها ناشی شده است. چه تفرق امواج مهاجم توسط عوارض توپوگرافی پدیده‌ای پیچیده است که حل دقیق، کارامد و توام با صرفه آن، مستلزم استفاده از روشهای کارامد عددی است.

روشهای عددی تحلیل لرزه‌ای ساختگاههای چند بعدی به سه گروه عمده قابل تقسیم‌اند: روشهای حجمی مانند روش اجزای محدود (FEM)، روشهای مرزی مانند روش اجزای مرزی (BEM)، و روشهای مرکب (HYBRID) که از ترکیب دو روش حجمی و مرزی پدید می‌آید. بدیهی است که فرمولبندی هر یک از این روشها در فضای زمان، به فرمولبندی آن در فضای تبدیل‌یافته رجحان دارد. چه نه تنها امکان آن فراهم خواهد شد تا تاریخچه زمانی پاسخها به شکلی طبیعی و مستقیم براورد شوند، بلکه زمینه‌ای پدید خواهد آمد تا بتوان مسائل غیرخطی را نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

کاربرد روشهای حجمی در مسائلی که ابعاد نامحدود دارند، با مشکلاتی همراه است. چه مش‌بندی احجام موجب انعکاس کاذب امواج در مرزها و به تبع آن انتشار خطا در سراسر محیط خواهد بود. تنها در برخی حالات خاص است که می‌توان امواج انعکاسی کاذب را با تمهیداتی چون مرزهای جاذب انرژی، مرزهای آرام یا مرزهای ویسکوز حذف کرد [۲و۳]. روشهای دیگر از قبیل روش المانهای بی نهایت بزرگ یا روش سلولهای سازگار بی‌نهایت کوچک نیز که به حل این مشکل پرداخته‌اند، به دلیل فرمولبندی در فضای تبدیل یافته، در حل مسائل دینامیکی غیرخطی ناتوان هستند. روش اجزای مرزی ابزار عددی موثری برای تحلیل دینامیکی محیطهای محدود و نامحدود کشسانی خطی است، که در حل مسائل انتشار امواج جذابیت فراوانی دارد. چه اولا مش‌بندی را به مرزها و در نتیجه ابعاد دستگاه معادلات حاکم را محدود می‌کند؛ ثانیا شرط تشعشع را ارضا و در نتیجه نیاز به مدلسازی حوزه دور را در تحلیل دینامیکی محیطهای بی نهایت و نیمه

بی نهایت، به حداقل می‌رساند.

در رابطه با کاربرد روش اجزای مرزی در تحلیل پاسخ لرزه‌ای ساختگاههای دوبعدی، تا آنجایی که مولفان اطلاع دارند، کارهای کمی انجام گرفته است که عمدتا در فضاهای تبدیل یافته هستند [۴-۱۶]. منصور [۱۷] و آنتس [۱۸] اولین کسانی بودند که یک الگوریتم اجزای مرزی گام به گام در فضای زمان را با استفاده از هسته‌های دوبعدی گذرا فرموله کردند. از آنجایی که هسته تنش پیشنهادی آنها پیچیده و تنها به صورت ضمنی در معادلات اجزای مرزی حاضر بود، عددی‌سازی این الگوریتم با مشکلاتی توام بود. بعدها اسرائیل و بانرجی [۱۹-۲۱] عبارتی ساده‌تر و صریح برای هسته یاد شده استخراج کردند که با سهولت بیشتر در الگوریتم اجزای مرزی حل مسائل الاستودینامیک دوبعدی در فضای زمان قابل استفاده بود؛ با این حال عبارت ریاضی چاپ شده در ادبیات فنی فاقد دقتهای لازم و در نتیجه برای دیگر محققان غیر قابل استفاده بود. اخیرا کمالیان [۲۲]، کمالیان و همکاران [۲۳و۲۴] و گتمیری و همکاران [۲۵و۲۶]، ضمن نشان دادن عدم دقت و اصلاح هسته‌های اخیر، آنها را در قالب الگوریتمهای اجزای مرزی یا ترکیب اجزای مرزی و عناصر محدود، برای حل مسائل انتشار امواج در محیطهای خطی و کشسانی خمیری یک و دو فازه مورد استفاده قرار دادند.

الگوریتم اجزای مرزی دوبعدی در فضای زمان اگرچه طی سالهای اخیر در حل برخی مسائل دینامیکی به کار گرفته شد، اما دامنه کاربرد آن هنوز به حوزه تحلیل لرزه‌ای ساختگاههای دو بعدی گسترش نیافته است. تاکمیا و فوجی وارا [۲۷] اگرچه روش اجزای مرزی دوبعدی را برای تحلیل لرزه‌ای دره‌های خالی و آبرفتی در فضای زمان به کار بردند، اما فرمولبندی آنها متناسب با امواج مهاجم خارج از صفحه (SH) تنظیم شده بود، که در قیاس با امواج درون صفحه (SV و P) پیچیدگی محاسباتی و همچنین کاربرد کمتری دارد. کمالیان و همکاران [۲۳و۲۴] از اولین کسانی هستند که کاربرد الگوریتم اجزای مرزی دوبعدی در فضای زمان را به حوزه تحلیل پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دوبعدی در برابر امواج مهاجم SV و P تعمیم دادند. با این حال الگوریتم ارائه شده توسط آنها تنها به مسائل همگن محدود بود. این مقاله، الگوریتم کامل تحلیل پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دوبعدی ناهمگن در برابر امواج مهاجم SV و P در فضای زمان توسط روش اجزای مرزی را شرح داده است. به منظور نشان دادن کارایی و دقت الگوریتم یاد شده، رفتار لرزه‌ای چند عارضه مختلف توپوگرافی، که حالات دره خالی، نیم‌فضا، دره آبرفتی و تپه را در بر می‌گیرد، تحت تاثیر امواج صفحه‌ای SV و P مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۲- معادلات اساسی

معادله دیفرانسیل حاکم بر تعادل دینامیکی محیطهای کشسان، همسان و همگن، در محدوده تغییرشکلهای کوچک، توسط معادله زیر بیان می‌شود:

$$\left(c_1^2 - c_2^2\right) \cdot u_{j,ij} + c_2^2 \cdot u_{i,jj} + b_i - \ddot{u}_i = 0 \qquad (۱)$$

u_i بیانگر تغییرمکان و b_i بیانگر نیروی پیکری خاک است. c_1 و c_2 سرعتهای امواج طولی و عرضی خاک را نشان می‌دهند که به ترتیب از معادلات $c_1^2=(\lambda+2\mu)/\rho$ و $c_2^2=\mu/\rho$ به دست می‌آیند. λ و μ ضرایب لامه و ρ دانسیته جرمی خاک‌اند.

معادلهٔ انتگرال مرزی حاکم بر محیطهای کشسان، همسان و همگن، با اعمال روش باقیمانده‌های وزنی[۲۸] بر معادله دیفرانسیل (۱)، مطابق زیر به دست می‌آید:

$$c_{ij}\left(\xi\right) \cdot u_i\left(\xi,t\right) = \int_{\Gamma} \left(G_{ij} * t_i\left(x,t\right) - F_{ij} * u_i\left(x,t\right)\right) \cdot d\Gamma \qquad (۲)$$

G_{ij}و F_{ij} پاسخهای اساسی معادله دیفرانسیل (۱) و بیانگر مولفه‌های i ام بردارهای تغییرمکان و تنش مرزی نقطه x در لحظه t هستند که به واسطه اعمال یک بار متمرکز واحد موازی محور j، در نقطه ξ و در لحظه $\tau \leq t$ پدید آمده‌اند. عبارات $G_{ij}*t_i$ و $F_{ij}*u_i$ انتگرالهای کانولوشن ریمن هستند. t_i تنش وارده بر روی سطح مماس بر مرز Γ را بیان می‌دارد. $c_{ij}(\xi)$ ضریب شناخته شده ناپیوستگی در نقطه ξ است که از منفرد بودن هسته

F_{ij} ناشی می‌شود. این ضریب تنها تابع هندسه مرز بوده و در هر دو بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مقدار یکسانی دارد.

در صورتی که محیط مورد بررسی در معرض هجوم امواج لرزه‌ای قرار گیرد، معادله انتگرال مرزی حاکم را می‌توان به شرح زیر اصلاح کرد [۸، ۹و۱۶]:

$$c_{ij}(\xi)\cdot u_i(\xi,t)= \int_\Gamma \Big(G_{ij} * t_i(x,t) - F_{ij} * u_i(x,t)\Big)\cdot d\Gamma + u_j^{inc.}(\xi,t) \tag{۳}$$

$u_j^{inc.}$ تغییرمکان حاصله از موج مهاجم را بیان می‌دارد.

۳- جداسازی زمانی و مکانی

حل معادلات (۲) یا (۳) مستلزم آن است که متغیرهای مسئله در هر دو حوزه زمان و مکان جداسازی شوند. برای این منظور به شکل زیر عمل می‌شود:

۳-۱- جداسازی در زمان

برای جداسازی زمانی، محور زمان به N بازه مساوی تقسیم شده است، به گونه‌ای که معادله $T_N=N\Delta t$ برقرار باشد. با فرض تغییرات خطی در هر بازه زمانی، می‌توان متغیرهای تغییرمکان و تنش مرزی را به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} u_i(x,\tau) &= M_1(\tau)\cdot u_i^n(x) + M_2(\tau)\cdot u_i^{n-1}(x) \\ t_i(x,\tau) &= M_1(\tau)\cdot t_i^n(x) + M_2(\tau)\cdot t_i^{n-1}(x) \end{aligned} \tag{۴}$$

$M_1(\tau)$ و $M_2(\tau)$ توابع شکل خطی زمان هستند که به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\begin{aligned} &T_{n-1} \prec \tau \prec T_n : \\ &M_1(\tau) = \frac{\tau - T_{n-1}}{\Delta t} \qquad \& \qquad M_2(\tau) = \frac{T_n - \tau}{\Delta t} \end{aligned} \tag{۵}$$

با توجه به معادله (۴)، می‌توان معادله (۲) را به شکل زیر در فضای زمان جداسازی نمود:

$$c_{ij}\cdot u_i^N(\xi) = \sum_{n=1}^{N}\int_\Gamma \left(\begin{bmatrix} G_{ij1}^{N+1-n}(r)\cdot t_i^n(x) + \\ G_{ij2}^{N+1-n}(r)\cdot t_i^{n-1}(x) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{ij1}^{N+1-n}(r)\cdot u_i^n(x) + \\ F_{ij2}^{N+1-n}(r)\cdot u_i^{n-1}(x) \end{bmatrix} \right)\cdot d\Gamma \tag{۶}$$

$G_{ij1,2}^{N+1-n}$ و $F_{ij1,2}^{N+1-n}$ به ترتیب هسته‌های دینامیکی تغییر مکان و تنش‌اند که به شرح زیر تعریف شده‌اند:

$$\begin{aligned} G_{ijk}^{N+1-n}(r) &= \int_{(n-1)\cdot\Delta t}^{n\cdot\Delta t} G_{ij}(r,t-\tau)\cdot M_k(\tau)\cdot d\tau \\ F_{ijk}^{N+1-n}(r) &= \int_{(n-1)\cdot\Delta t}^{n\cdot\Delta t} F_{ij}(r,t-\tau)\cdot M_k(\tau)\cdot d\tau \end{aligned} \tag{۷}$$

معادله (۶) را می‌توان به شکل ساده تر زیر نیز بازنویسی کرد:

$$c_{ij}\cdot u_i^N(\xi) = \sum_{n=1}^{N}\int_\Gamma \Big(G_{ij}^{N+1-n}(r)\cdot t_i^n(x) - F_{ij}^{N+1-n}(r)\cdot u_i^n(x)\Big)\cdot d\Gamma \tag{۸}$$

که در آن:

$$\begin{aligned} G_{ij}^{N+1-n}(r) &= G_{ij1}^{N+1-n}(r) + G_{ij2}^{N-n}(r) \\ F_{ij}^{N+1-n}(r) &= F_{ij1}^{N+1-n}(r) + F_{ij2}^{N-n}(r) \end{aligned} \tag{۹}$$

مزیت معادله (۸) بر معادله (۶) آن است که به سبب ترکیب هسته‌ها، جملات منفرد ظاهری موجود در جبهه موج هسته‌های تنش، که مرتبه‌ای برابر $r^{-1/2}$ دارند، حذف شده‌اند. به عبارت دیگر هسته‌های دینامیکی (۹) نسبت به هسته‌های دینامیکی (۷) رفتار مناسبتری دارند. شایان ذکر است که هسته‌های G^1_{ij} و F^1_{ij} منفرد و ما بقی هسته‌ها غیر منفردند. همچنین هسته‌های منفرد یاد شده از همان نوع و مرتبه انفراد برخوردارند که هسته‌های نظیر الاستواستاتیک. هسته‌های G_{ij}^{N+1-n} و F_{ij}^{N+1-n} در مرجع [۲۳] ارائه شده‌اند.

۳-۲- جداسازی در مکان

برای جداسازی مکانی، از المانهای ایزوپارامتریک درجه دو استفاده شده است. اگر در سیستم مختصات کمکی (η) از توابع شکل $N_k(\eta)$ استفاده شود، می‌توان معادله (۸) را در فضای مکان به صورت زیر جداسازی کرد:

$$c_{ij}\cdot u_i^N(\xi) = \sum_{n=1}^{N}\sum_{q=1}^{Q} \left\{ \begin{aligned} &T_{ik}^n \cdot \int_{\Gamma_q} G_{ij}^{N+1-n}(r)\cdot N_k(\eta)\cdot|J|\cdot d\eta - \\ &U_{ik}^n \cdot \int_{\Gamma_q} F_{ij}^{N+1-n}(r)\cdot N_k(\eta)\cdot|J|\cdot d\eta \end{aligned} \right\} \tag{۱۰}$$

Q بیانگر تعداد کل المانهای مرزی و $|J|$ بیانگر ژاکوبین تبدیل است.

[DOR: 20.1001.1.22287698.1384.24.2.4.9]

المانی که نقطه تحریک بر یکی از گره‌های آن واقع باشد، منفرد و در غیر این صورت عادی نامیده می‌شود. انتگرالهای معادله (۱۰) به راحتی با استفاده از قاعده متعارف گوس بر روی المانهای عادی قابل محاسبه‌اند. در المانهای منفرد، براورد آن دسته از انتگرالهای معادله (۱۰) که حاوی هسته‌های G^1_{ij} و F^1_{ij} و همچنین تابع شکل نظیر نقطه تحریک‌اند، تمهیدات دقیقتری طلب می‌کند:

انتگرال منفرد حاوی هسته G^1_{ij} : این انتگرال که انفراد آن ضعیف نامیده می‌شود، همانند انتگرال المانهای عادی با قاعده متعارف گوس قابل محاسبه است، مشروط بر آنکه المان منفرد به تعداد قابل توجهی المانهای کوچکتر تقسیم شود، تا حاصل ضرب هسته در تابع شکل توابع در ژاکوبین، بر روی هر زیر المان رفتاری مناسب یابد.

انتگرال منفرد حاوی هسته F^1_{ij}: این انتگرال که انفراد آن قوی نامیده می‌شود، با استفاده از یک روش غیر مستقیم که بر مفهوم حرکت جسم صلب مبتنی است، مطابق معادله زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned}&\int_{\Gamma_q} F^1_{ij}\cdot N_k\cdot|J|\cdot d\eta = \\ &\int_{\Gamma_q} F^{static}_{ij}\cdot N_k\cdot|J|\cdot d\eta + \int_{\Gamma_q}\left(F^1_{ij}-F^{static}_{ij}\right)\cdot N_k\cdot|J|\cdot d\eta\end{aligned} \qquad (۱۱)$$

انتگرالهای اول و دوم سمت راست تساوی فوق به ترتیب منفرد و عادی‌اند. انتگرال اول که همان انتگرال منفرد حالت الاستواستاتیک است، به راحتی با استفاده از روش غیر مستقیم مبتنی بر حرکت جسم صلب محاسبه می‌شود. انتگرال دوم نیز که به دلیل یکسان بودن نوع و مرتبه انفراد هسته‌های الاستواستاتیک و الاستودینامیک عادی است، همانند دیگر انتگرالهای عادی با کمک قاعده متعارف گوس براورد می‌شود. یاداور می‌شود که تکنیک حرکت جسم صلب و در نتیجه معادله (۱۱) تنها در شرایطی قابل استفاده است، که مرزهای مسئله بسته باشد. در مسائلی که با محیطهای نیمه بی نهایت سر و کار دارند، می‌توان ابتدا با استفاده از المانهای مجازی[۱۹-۲۱ و ۲۹] مرز مش‌بندی شده را بست، و سپس به محاسبه انتگرالهای منفرد قوی اقدام کرد. بدیهی است که المانهای مجازی، که صرفا برای بستن محیط و استفاده از معادله (۱۱) بکار برده می‌شوند، تعداد درجات آزادی مسئله را افزایش نخواهند داد.

۳-۳- الگوریتم حل

اگر معادله (۱۰) برای هر یک از نقاط مرزی نوشته شود و مجموعه معادلات در کنار هم قرار گیرند، دستگاه معادلات زیر پدید خواهد آمد:

$$\sum_{n=1}^{N}\left(G^{N+1-n}\cdot T^n - F^{N+1-n}\cdot U^n\right)=0 \qquad (۱۲)$$

با انتقال تمامی جملات معلوم به سمت راست تساوی، می‌توان معادله (۱۲) را به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$F^1\cdot U^N = G^1\cdot T^N + Z^N \qquad (۱۳)$$

که در آن:

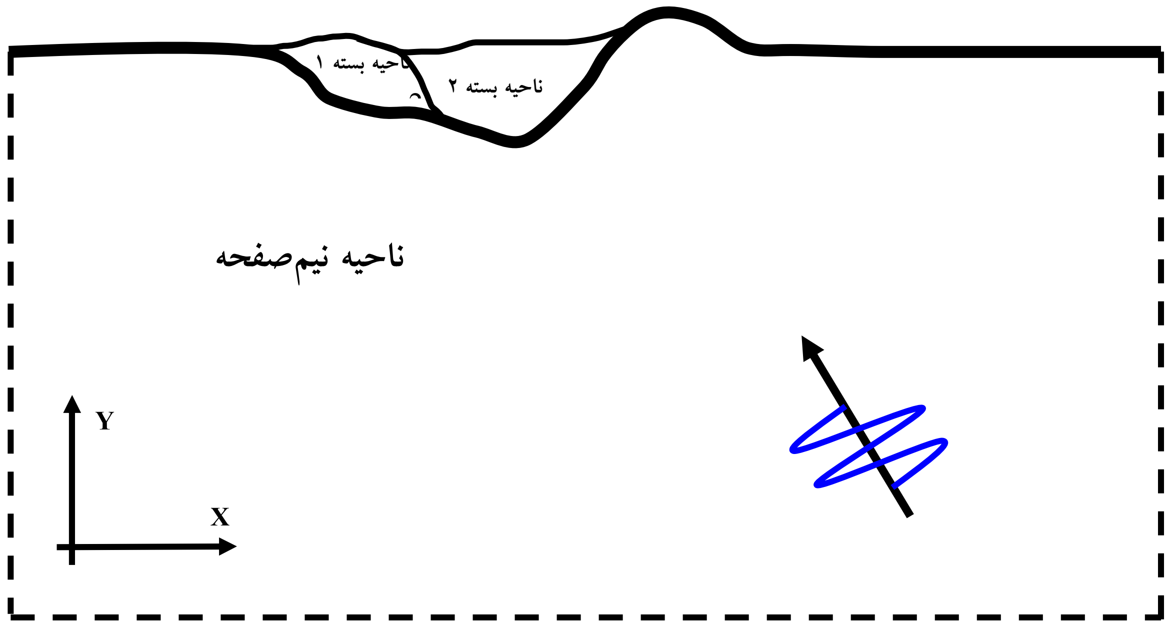
$$Z^N = \sum_{n=1}^{N-1}\left(G^{N+1-n}\cdot T^n - F^{N+1-n}\cdot U^n\right)+U^{inc.N} \qquad (۱۴)$$

چنانکه از معادله (۱۴) بر می‌آید، بردار Z^N تاریخچه تغییرمکان و تنش لحظات قبل، و در صورت بارگذاری لرزه‌ای تغییرمکان لحظه کنونی ناشی از موج مهاجم را شامل می‌شود.

۴- مثالهای عددی

شکل (۱) هندسه کلی یک عارضه توپوگرافی ناهمگن را به طور شماتیک نشان می‌دهد. امواج حجمی زلزله که از اعماق پایین به سوی سطح زمین حرکت می‌کنند، ابتدا محیط نیم صفحه و از طریق آن محیطهای بسته فوقانی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. محیط نیم‌صفحه که در معرض تابش مستقیم امواج مهاجم لرزه‌ای قرار دارد، توسط معادله انتگرال مرزی (۳)، و هر یک از محیطهای بسته فوقانی توسط معادله انتگرال مرزی (۲) تحلیل می‌شوند. صفر بودن تنشها بر روی مرزهای آزاد و سازگاری تغییرمکانها و تعادل تنشها بر روی مرزهای مشترک، شرایط مرزی مسئله را تشکیل می‌دهند. بدیهی است که اگر

[DOR: 20.1001.1.22287698.1384.24.2.4.9]



شکل ۱ - هندسه قابل تحلیل توسط نرم‌افزار Hybrid

محیط تنها یک نیم‌صفحه همگن باشد، معادله انتگرال مرزی (۳) برای حل مسئله کفایت خواهد کرد.

الگوریتم اجزای مرزی فوق الذکر در قالب نرم افزار دوبعدی هیبرید، که برای تحلیل دینامیکی محیطهای خطی و غیرخطی خشک و اشباع با استفاده از ترکیب روشهای اجزای مرزی و اجزای محدود طراحی شده، به کار گرفته شده است[۲۲]. نرم افزار اخیر قادر است برای حل هر مسئله، فراخور حال آن، هر یک از روشهای اجزای مرزی، اجزای محدود و ترکیب آنها را مورد استفاده قرار دهد. مش‌بندی بخش اجزای مرزی با استفاده از المانهای ایزوپارامتریک سه گرهی انجام می‌گیرد.

مثالهای عددی این بخش به گونه‌ای طراحی شده‌اند تا کارایی و دقت الگوریتم اجزای مرزی فوق الذکر را در تحلیل دینامیکی عوارض توپوگرافی دوبعدی ناهمگن در فضای زمان به نمایش گذارند. هر چهار عارضه دره خالی، نیم‌فضا، دره آبرفتی و تپه مورد توجه قرار گرفته‌اند. موج مهاجم در تمامی مثالها از نوع ریکر انتخاب شده است که معادله‌ای به شرح زیر دارد:

$$f(t)=\left[1-2\cdot(\pi\cdot f_p\cdot(t-t_0))^2\right]e^{-(\pi\cdot f_p\cdot(t-t_0))^2} \qquad (۱۵)$$

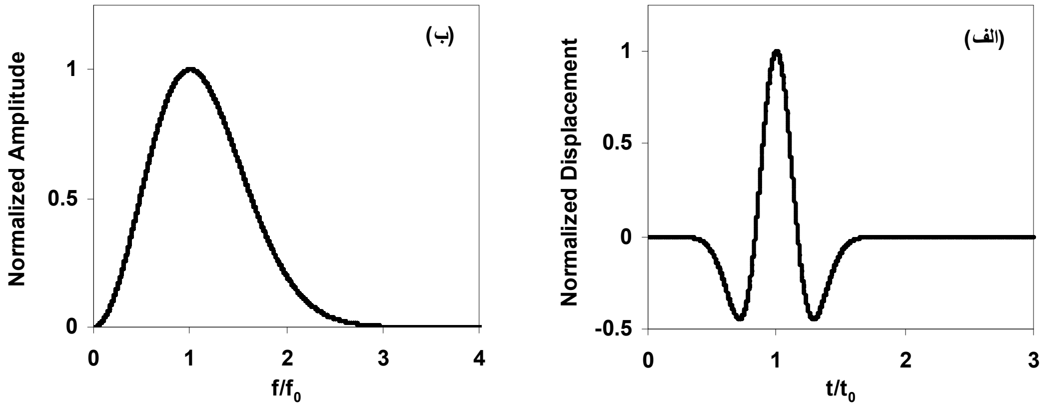
پارامترهای f_p و t_0 به ترتیب فرکانس غالب و زمان نظیر دامنه حداکثر را بیان می‌دارند. بدیهی است که در معادله فوق، مقدار t برای هر یک از نقاط روی مرز نیم‌صفحه، بر اساس سرعت موج مهاجم و فاصله نقطه از جبهه موج در لحظه $t=0$ اصلاح می‌شود. شکل (۲) تاریخچه زمانی و طیف فوریه موج ریکر را بیان می‌دارد.

برای سهولت بررسی، نتایج به دست آمده در حوزه زمان به دامنه حداکثر حرکت ورودی نرمالیزه و به ازای زمان بدون بعد ($T=tc_2/2b$) نمایش داده شده‌اند. در حوزه فرکانس نیز نتایج به دست آمده در قالب منحنیهای بزرگنمایی و به ازای فرکانس بدون بعد ($\Omega=\omega b/\pi c_2$) ارائه شده‌اند. در این معادلات t، ω و b، به ترتیب زمان، فرکانس زاویه‌ای و نیم پهنای عارضه را بیان می‌دارند. یادآور می‌شود که مفهوم فیزیکی فرکانس بدون بعد، همان نسبت پهنای عارضه به طول موج برشی محیط نیم‌صفحه است.

۴-۱- دره خالی با مقطع نیم دایره

هدف این مثال آن است که توانمندی الگوریتم اجزای مرزی ارائه شده را در تحلیل دینامیکی پاسخ لرزه‌ای یک دره

[DOR: 20.1001.1.22287698.1384.24.2.4.9]



شکل ۲ – الف- تاریخچه زمانی و ب- طیف دامنه فوریه موج ریکر

همگن نشان دهد. شکل (۳) دره‌ای با مقطع نیم دایره را نشان می‌دهد که در معرض تابش امواج SV و P قرار گرفته است. دره نیم دایره شعاعی برابر (r)، سرعت موج برشی‌ای برابر (c_2) و ضریب پواسونی برابر ۰٫۳۳ دارد. محیط دره و سطح نیم‌صفحه به ترتیب با استفاده از ۱۶ و ۱۰۷ المان مرزی مدل شده است. شایان ذکر است که این مثال توسط وانگ [۴]، دراوینسکی و موسسیان [۵]، موسسیان و دراوینسکی [۶]، کاواسه [۸] و سانچز سزما و کامپیلو [۱۰] نیز مورد توجه قرار گرفته است. محققان یاد شده محیط دره را همانند تحقیق حاضر، کاملا کشسان یا دارای خصوصیات بسیار ضعیف غیر کشسان فرض کرده‌اند. نتایج به دست آمده به ازای چند فرکانس بدون بعد، در قالب منحنیهای بزرگنمایی ارائه شده‌اند.

الف) تابش قائم

شکلهای (۴)، (۵) و (۶)، منحنیهای بزرگنمایی به دست آمده در این تحقیق را با مقادیر ارائه شده توسط مراجع [۴-۶، ۸ و ۱۰]، به ازای فرکانسهای بدون بعد ۰٫۵، ۱٫۰ و ۲٫۰ مورد مقایسه قرار داده است. چنانکه دیده می‌شود، در هر دو حالت امواج مهاجم قائم SV و P، همخوانی مناسبی میان جوابها، در هر دو مولفه قائم و افقی تغییر مکان دیده می‌شود. در مواردی که اختلاف اندکی میان نتایج محققان، خصوصا جوابهای وانگ با دیگران وجود دارد، منحنیهای بزرگنمایی به دست آمده در این تحقیق از میانه نتایج دیگر محققان عبور کرده‌است.

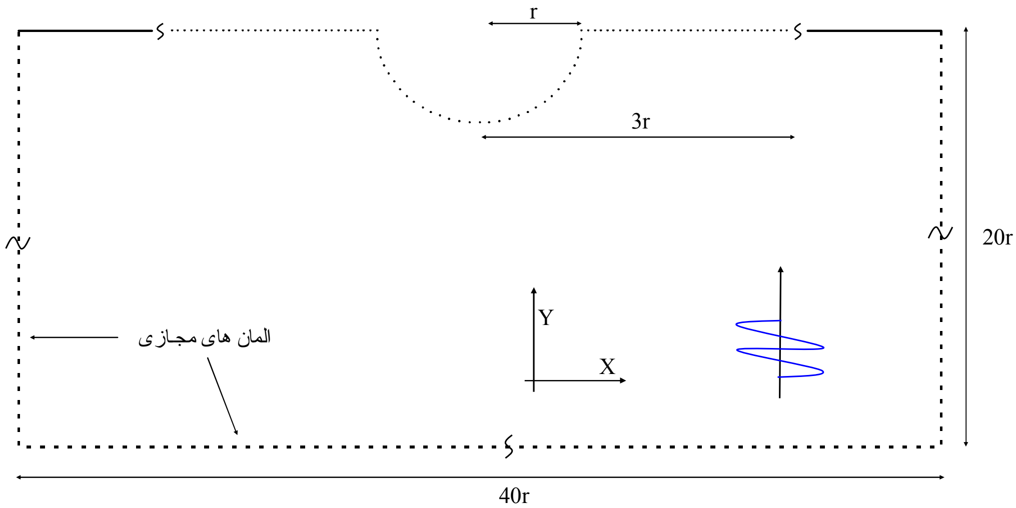
ب) تابش مایل

موج مهاجم P با زاویه هجوم ۶۰ درجه و با فرکانس غالب بدون بعدی برابر ۰٫۸۹۶ بر روی دره تابیده شده است. شکلهای (۷) و (۸) منحنیهای بزرگنمایی به دست آمده در تحقیق حاضر را با مقادیر ارائه شده توسط مراجع [۴-۶]، به ازای فرکانسهای بدون بعد ۰٫۵ و ۱٫۰ مقایسه کرده است. همان طور که دیده می‌شود، در هر دو مولفه قائم و افقی تغییر مکان، همخوانی مناسبی میان جوابها دیده می‌شود. شکل(۹) مولفه‌های قائم و افقی تاریخچه زمانی تغییرمکان نقطه‌ای با موقعیت (x/r=-۱۰٫۷۱۴۳) را در لحظات قبل از رسیدن امواج متفرق شده توسط دره، مورد بررسی قرارداده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود، همخوانی بسیار خوبی میان مولفه‌های محاسبه شده تغییرمکان و مولفه‌های تحلیلی حرکت آزاد سطح زمین [۴و۳۰] وجود دارد. یاداور می‌شود که دامنه‌های دو مولفه قائم و افقی حرکت آزاد زمین، به ترتیب ۱٫۷۴ و ۰٫۹۶ برابر دامنه موج مهاجم P است [۴].

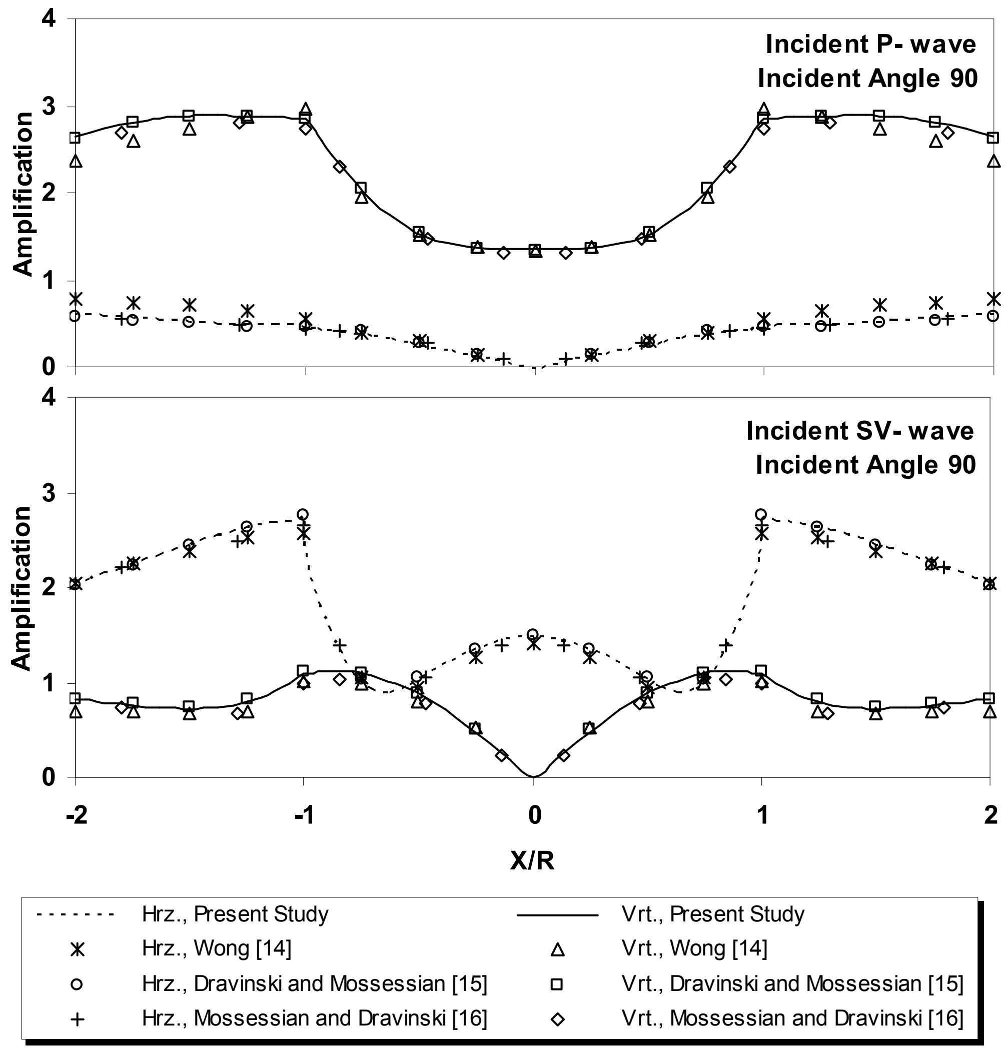
۴-۲- دره آبرفتی با مقطع نیم دایره

هدف این مثال آن است که توانمندی الگوریتم اجزای مرزی ارائه شده را در تحلیل دینامیکی پاسخ لرزه‌ای دره‌های آبرفتی همگن و ناهمگن نشان دهد. شکل (۱۰) دره آبرفتی با مقطع نیم دایره را نشان می‌دهد که در معرض تابش امواج

[DOR: 20.1001.1.22287698.1384.24.2.4.9]

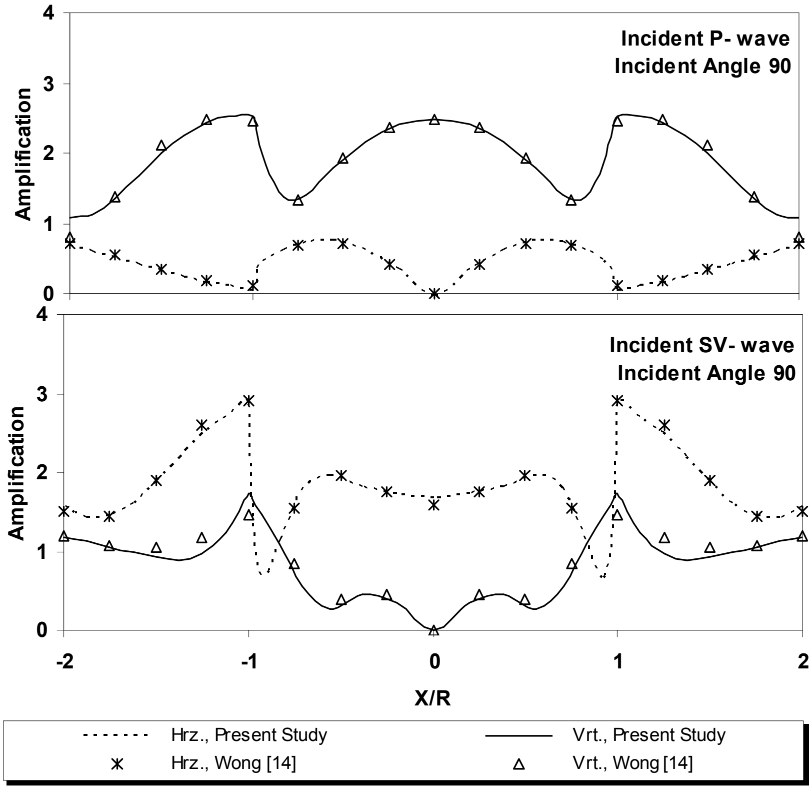


شکل ۳ – هندسه دره خالی با مقطع نیم‌دایره

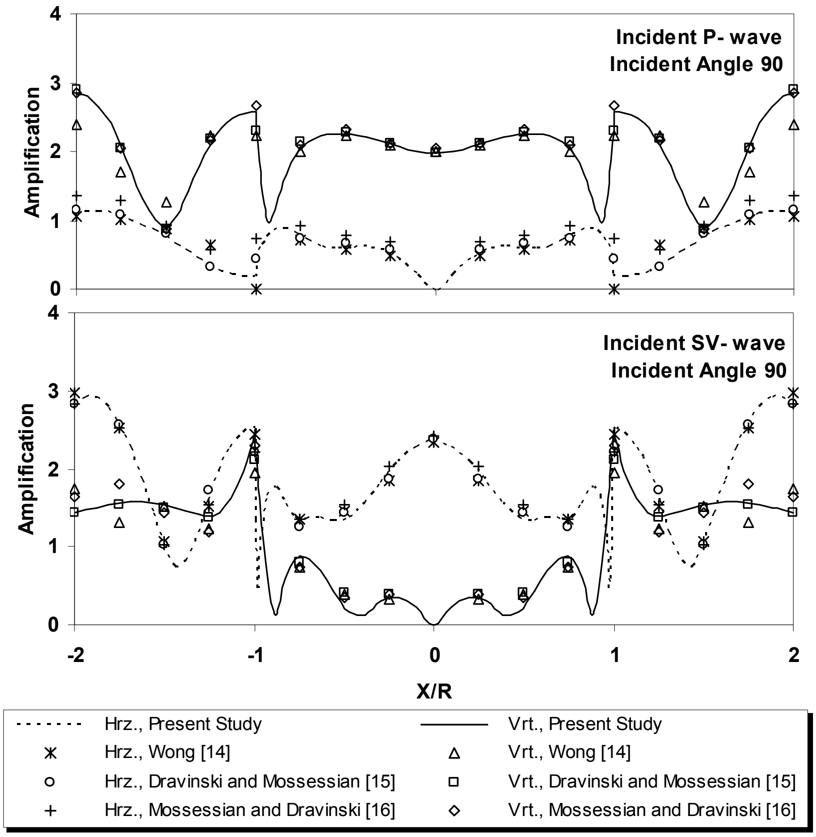


شکل ۴ – بزرگنمایی حرکت سطحی به ازای فرکانس بدون بعد ۰٫۵ در تابش قائم

[DOR: 20.1001.1.22287698.1384.24.2.4.9]

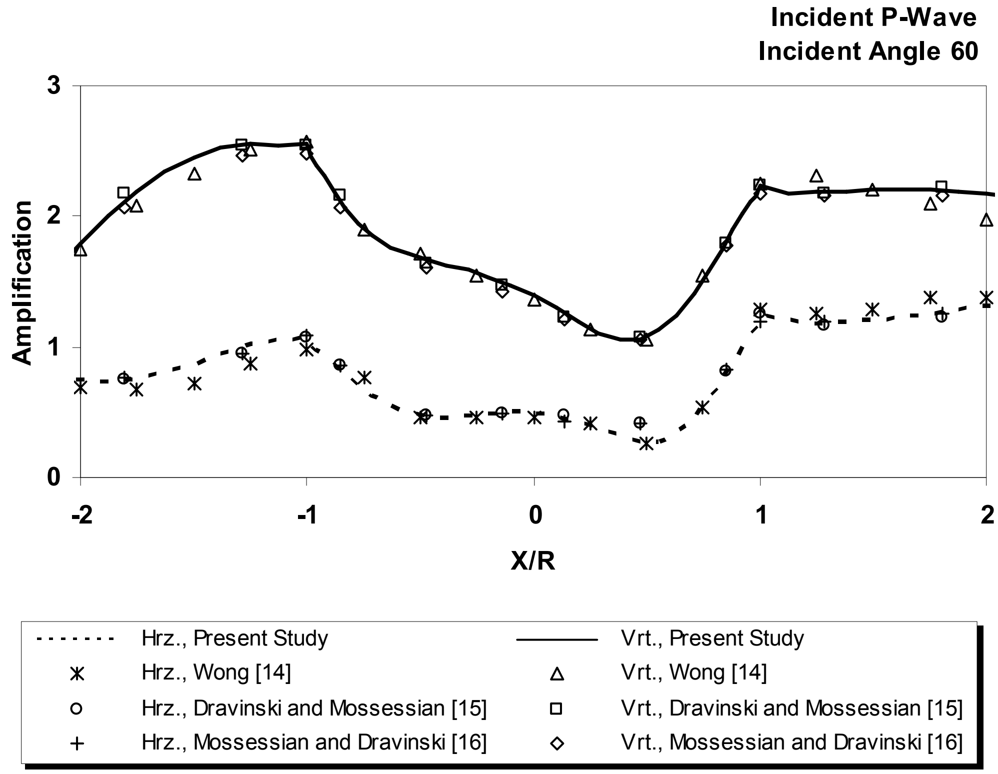


شکل ۵ - بزرگنمایی حرکت سطحی به ازای فرکانس بدون بعد ۱/۰ در تابش قائم

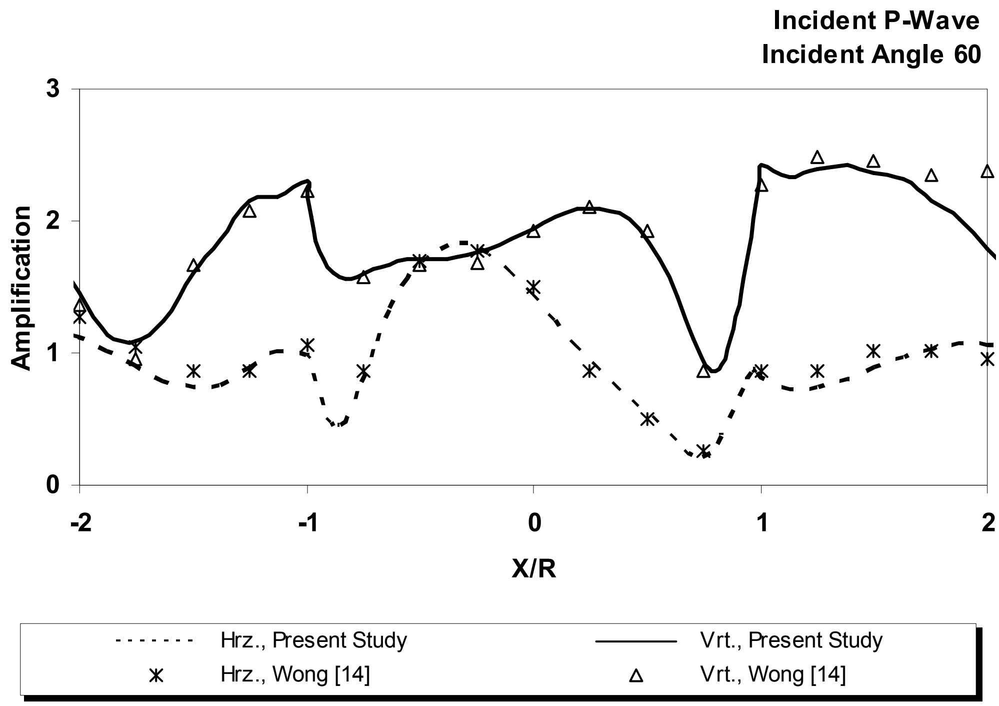


شکل ۶ - بزرگنمایی حرکت سطحی به ازای فرکانس بدون بعد ۲/۰ در تابش قائم

[DOR: 20.1001.1.22287698.1384.24.2.4.9]

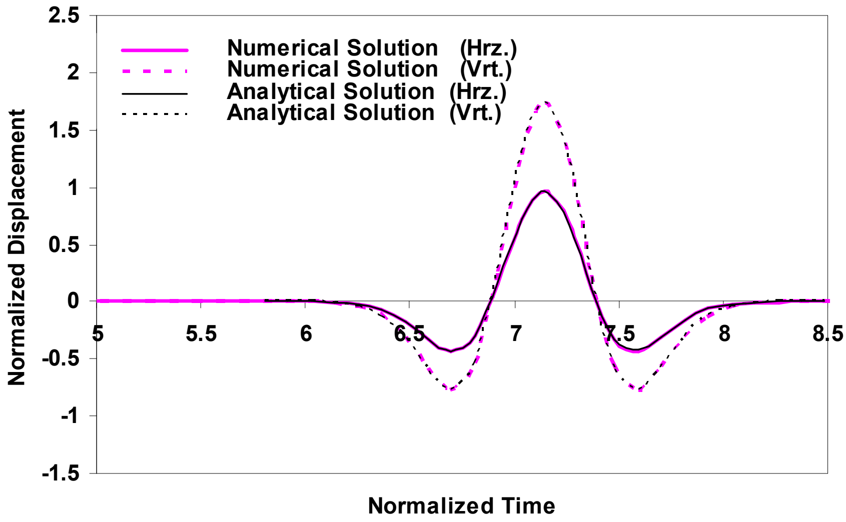


شکل ۷ – بزرگنمایی حرکت سطحی به ازای فرکانس بدون بعد ۰/۵در تابش با زاویه ۶۰ درجه و موج مهاجم P

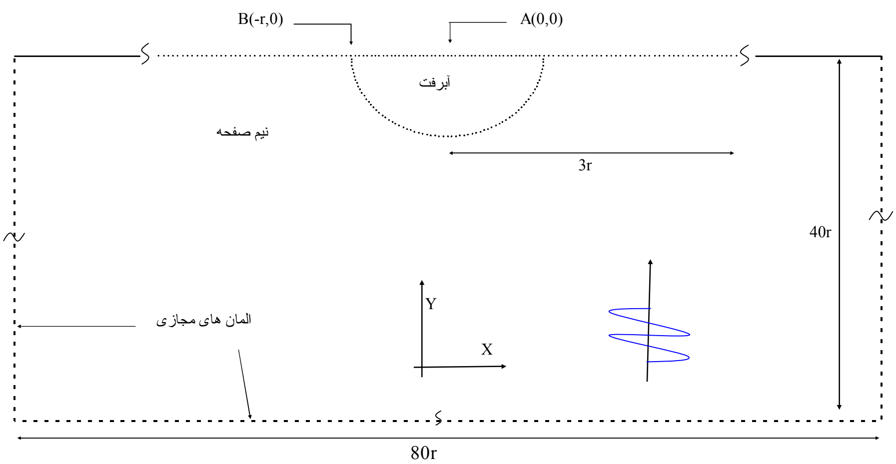


شکل ۸ – بزرگنمایی حرکت سطحی به ازای فرکانس بدون بعد ۱/۰در تابش با زاویه ۶۰ درجه و موج مهاجم P

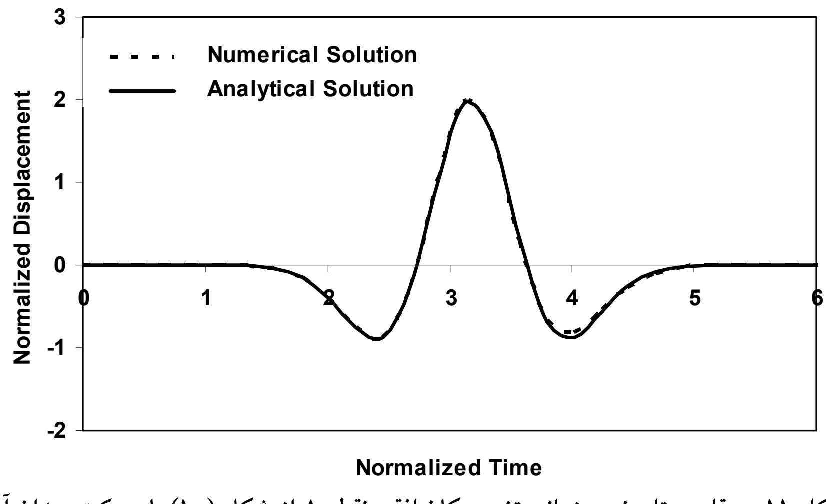
[DOR: 20.1001.1.22287698.1384.24.2.4.9]



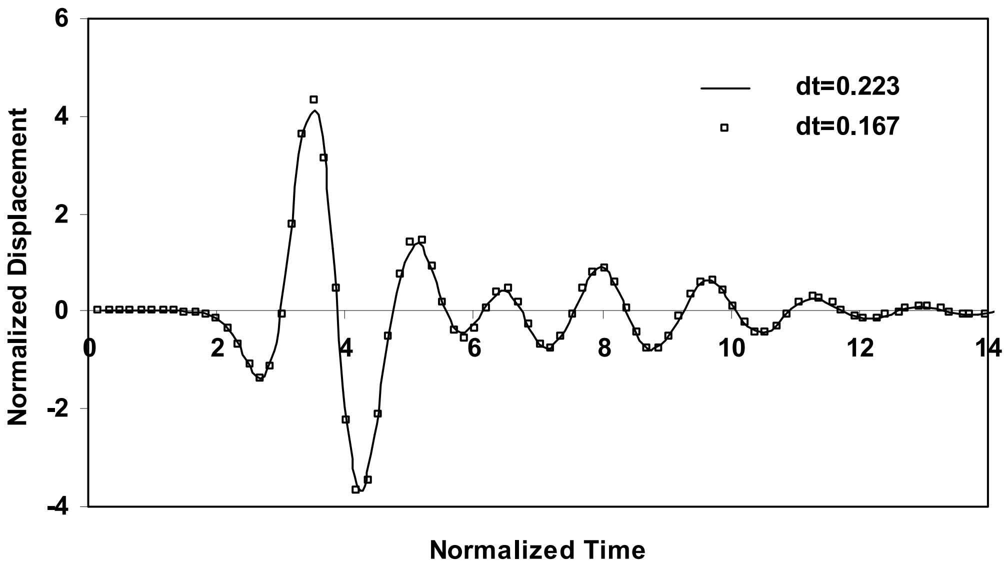
شکل ۹ – مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان نقطه‌ای به مختصات (x/r=-۱۰٫۷۱۴۳) با حرکت میدان آزاد حاصله از تابش موج P با زاویه هجوم ۶۰ درجه



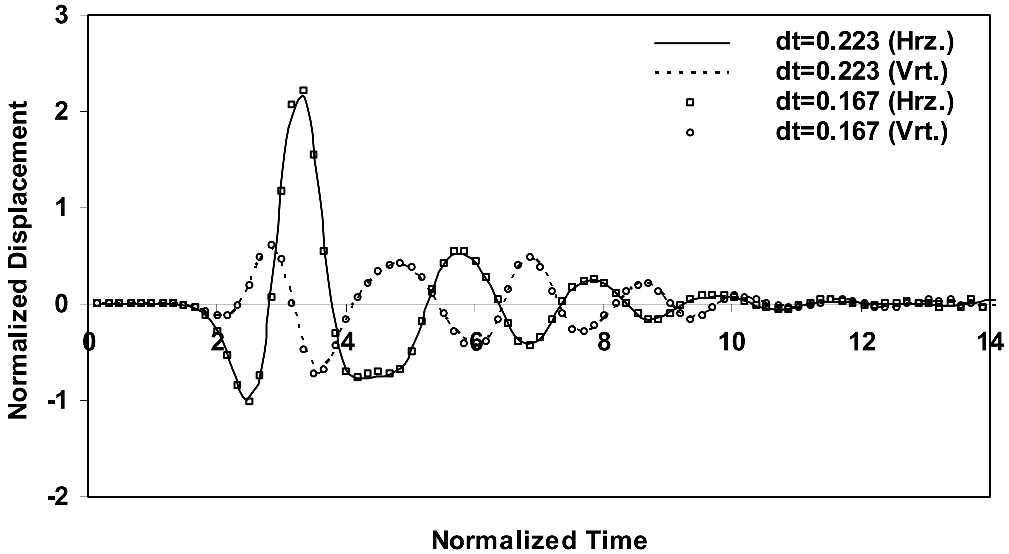
شکل ۱۰ – هندسه دره آبرفتی با مقطع نیم‌دایره



شکل ۱۱ – مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی نقطه A از شکل (۱۰) با حرکت میدان آزاد

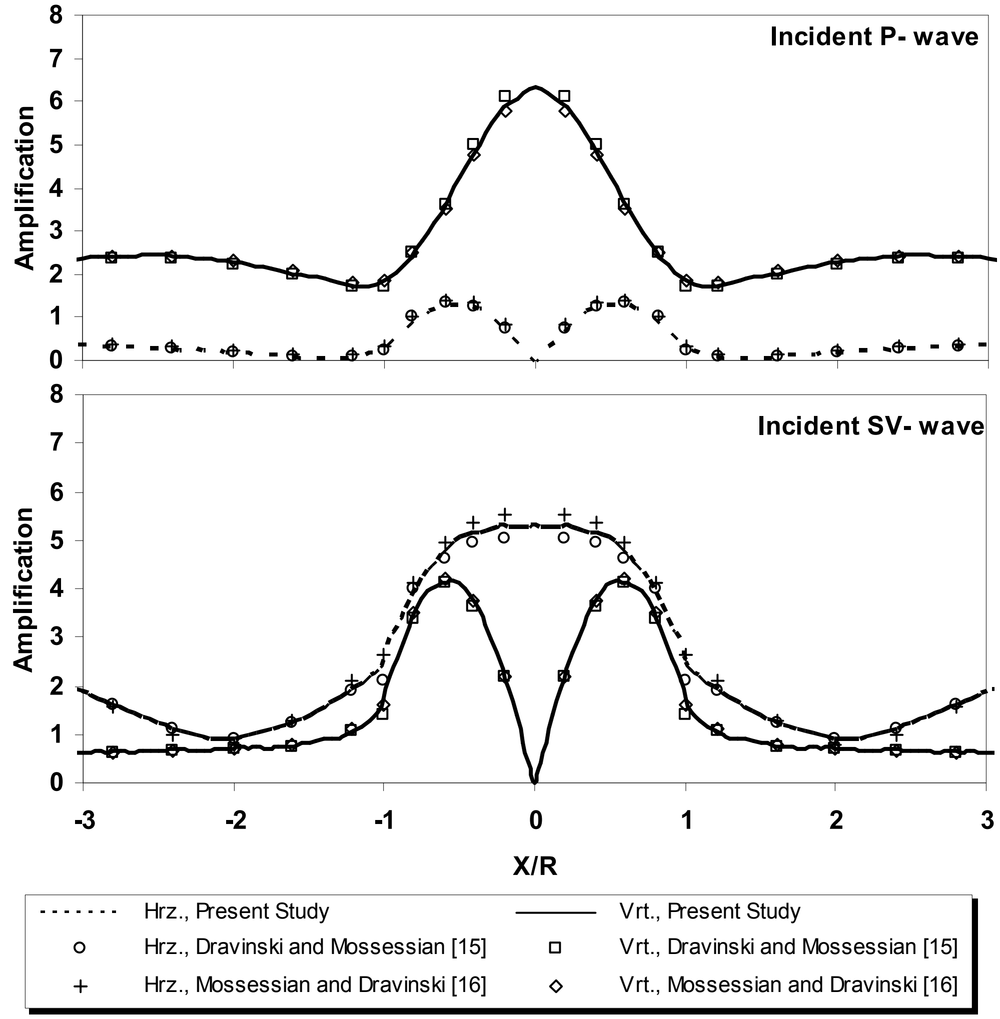


شکل ۱۲ - تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی نقطه A از شکل (۱۰) در دو گام زمانی مختلف



شکل ۱۳ - تاریخچه زمانی تغییر مکان نقطه B از شکل (۱۰) در دو گام زمانی مختلف

[DOR: 20.1001.1.22287698.1384.24.2.4.9]



شکل ۱۴ - بزرگنمایی حرکت سطحی به ازای فرکانس بدون بعد ۰/۵

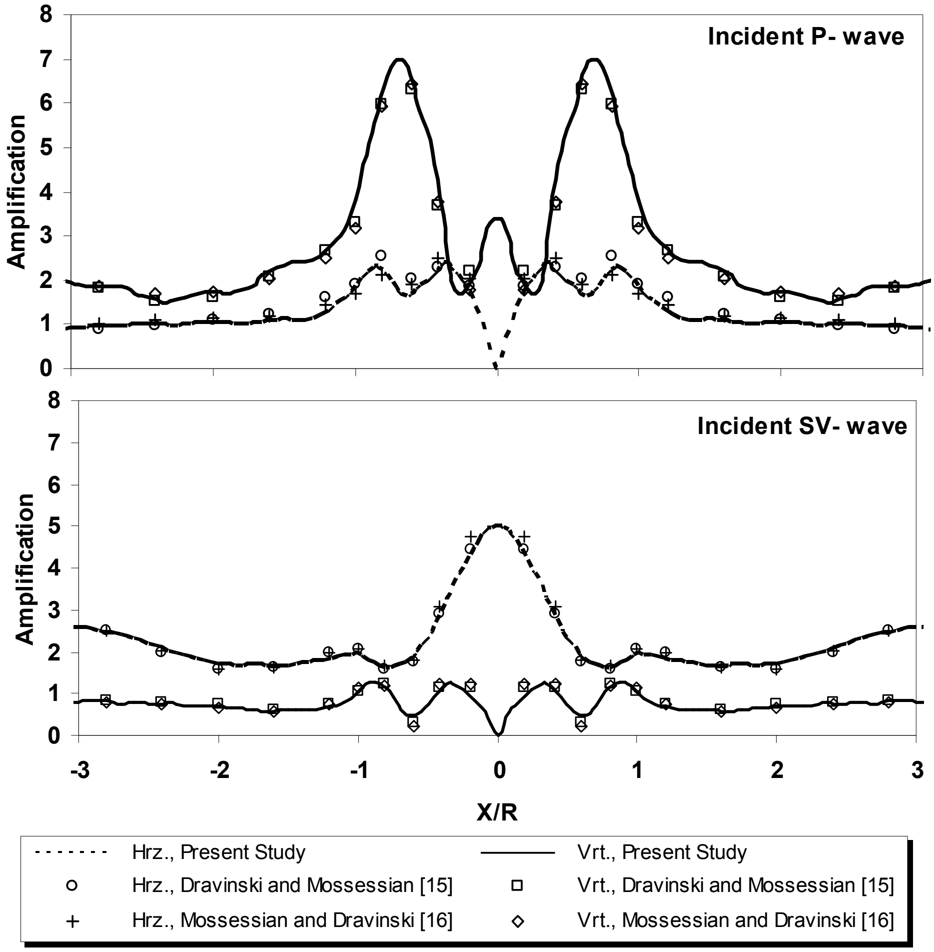
قائم SV و P با فرکانس غالب ۰/۵ قرار گرفته است. محیط آبرفت و محیط نیم‌صفحه به ترتیب با استفاده از ۶۰ و ۱۷۴ المان مرزی مدل شده است. دو حالت همگن و ناهمگن در نظر گرفته شده است. یاداور می‌شود که معادلات (۲) و (۳)، به ترتیب رفتار لرزه‌ای محدوده‌های آبرفت و نیم‌صفحه را بیان می‌دارند.

الف) حالت همگن

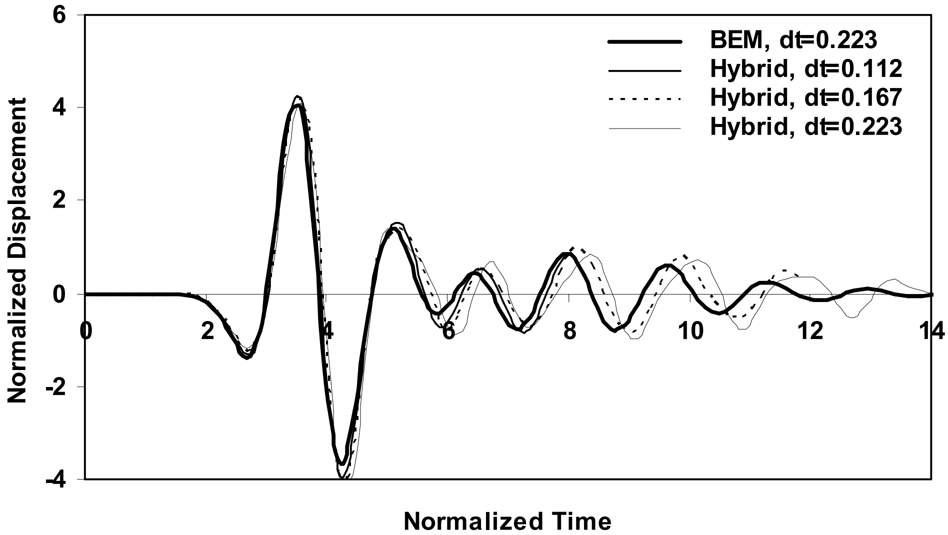
در این حالت فرض بر آن است که مصالح آبرفت و محیط دره از همان خصوصیات مثال قبل برخوردارند. شکل (۱۱) مولفه‌های قائم و افقی تاریخچه زمانی تغییرمکان نیم صفحه (حرکت آزاد) را با مقادیر تحلیلی آن [۳۰] در وضعیت موج مهاجم SV مورد مقایسه قرار داده است. چنانکه دیده می‌شود، همخوانی بسیار خوبی میان نتایج محاسباتی و تحلیلی وجود دارد و همانگونه که انتظار می‌رود دامنه تغییر مکان مولفه قائم در همه زمانها برابر صفر است. برای وضعیت موج مهاجم P نیز نتایج مشابهی، با جابه جایی مولفه‌های تغییر مکان به دست می‌آید.

ب) حالت ناهمگن

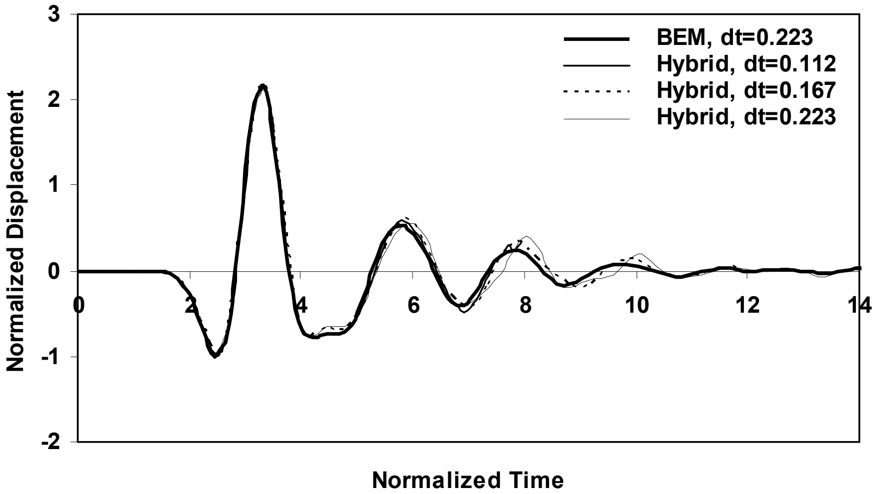
در حالت اخیر فرض بر آن است که ضریب پواسون، سرعت موج برشی و مدول برشی مصالح آبرفتی به ترتیب، مساوی، نصف و یک ششم مقادیر نظیر در محیط دره هستند. این مسئله توسط دراوینسکی و موسسیان [۵] و موسسیان و



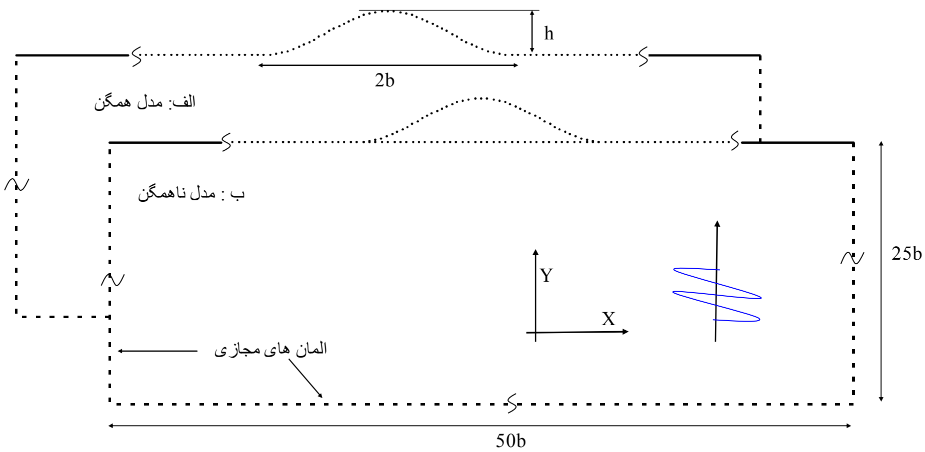
شکل ۱۵ – بزرگنمایی حرکت سطحی به ازای فرکانس بدون بعد ۰/۷۵



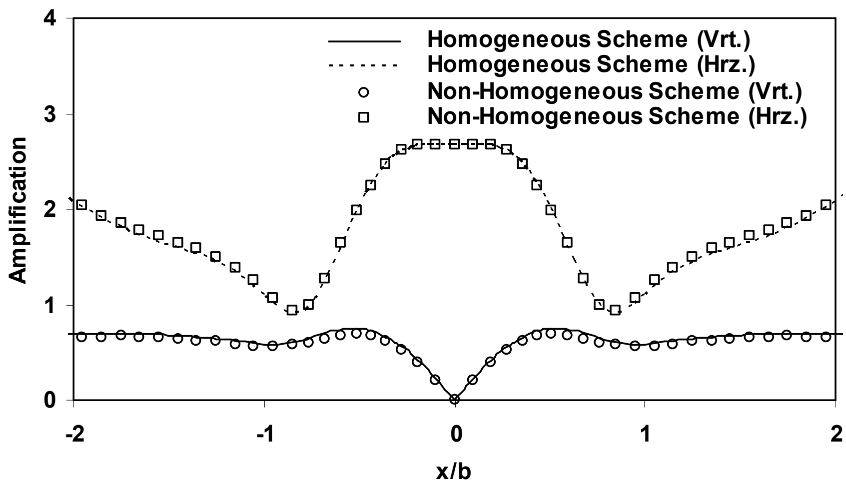
شکل ۱۶– مقایسه تاریخچه زمانی تغیر مکان افقی نقطه A از شکل (۱۰) با استفاده از روش المان مرزی و مرکب در گامهای زمانی مختلف



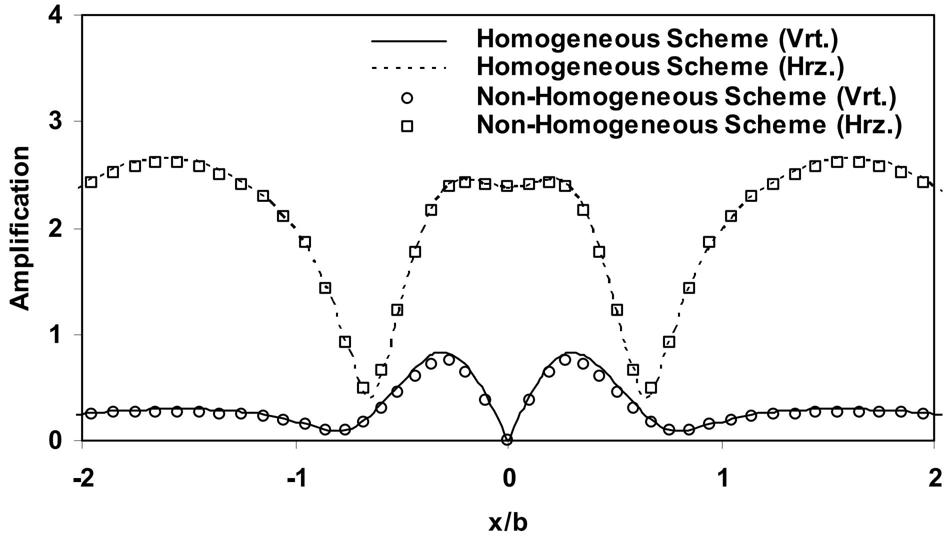
شکل ۱۷ – مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی نقطه B از شکل (۱۰) با استفاده از روش المان مرزی و مرکب در گامهای زمانی مختلف



شکل ۱۸ – هندسه تپه سینوسی شکل در (الف) الگوریتم حل همگن و (ب) الگوریتم حل ناهمگن



شکل ۱۹ – مقایسه منحنیهای بزرگنمایی به دست آمده از الگوریتم حل همگن و الگوریتم حل ناهمگن به روش اجزای مرزی به ازای فرکانس بدون بعد ۱٫۰ و موج مهاجم SV



شکل ۲۰ – مقایسه منحنیهای بزرگنمایی به دست آمده از الگوریتم حل همگن و الگوریتم حل ناهمگن به روش اجزای مرزی به ازای فرکانس بدون بعد ۱/۵ و موج مهاجم SV

دراوینسکی [۶] نیز حل شده است. محققان یاد شده محیط دره را همانند مثال قبل، کاملا کشسان یا با میرایی بسیار ضعیف فرض کرده‌اند. شکلهای (۱۲) و (۱۳) مولفه‌های قائم و افقی تاریخچه زمانی تغییرمکان دو نقطه A و B از شکل (۱۰) را به ازای دو گام زمانی ۰/۲۲۳ و ۰/۱۶۷ مورد مقایسه قرار داده است. چنانکه دیده می‌شود، همخوانی بسیار خوبی میان جوابها وجود دارد. شکلهای (۱۴) و (۱۵) منحنیهای بزرگنمایی به دست آمده در تحقیق حاضر را با مقادیر ارائه شده توسط مراجع [۵] و [۶]، به ازای فرکانسهای بدون بعد ۰/۵ و ۰/۷۵ مقایسه کرده است. همانطور که دیده می‌شود، در هر دو مولفه قائم و افقی تغییر مکان، همخوانی بسیار مناسبی میان جوابها دیده می‌شود. شکلهای (۱۶) و (۱۷) به ترتیب در هر یک از نقاط A و B از شکل (۱۰)، مولفه‌های افقی تاریخچه زمانی تغییر مکان را که با استفاده از دو روش اجزای مرزی و ترکیب آن با روش اجزای محدود [۳۱] به دست آمده‌اند، مورد مقایسه قرار داده است. نتایج روش اجزای مرزی با استفاده از گام زمانی ۰/۲۲۳ و نتایج روش مرکب با استفاده از گامهای زمانی ۰/۲۲۳ ، ۰/۱۶۷ و ۰/۱۱۲ به دست آمده‌اند. چنانکه دیده می‌شود، در حالی که روش اجزای مرزی به ازای گام زمانی بی‌بعد ۰/۲۲۳ نتیجه‌ای رضایت‌بخش به دست می‌دهد، نتایج حاصله از روش مرکب تنها به ازای گامهای زمانی کوچکتر از ۰/۱۱۲ دارای دقتی قابل قبول‌اند. به عبارت دیگر حل مسئله با استفاده از روش اجزای مرزی، در قیاس با روش مرکب، تعداد گامهای زمانی کمتری را نیاز خواهد داشت.

۴-۳- تپه با مقطع سینوسی

هدف این مثال آن است که توانمندی الگوریتم اجزای مرزی ارائه شده را در تحلیل دینامیکی پاسخ لرزه‌ای تپه‌ها نشان دهد. بدین منظور تپه‌ای با مقطع نیم‌سینوسی، با نسبت شکلی (ارتفاع به نیم پهنا) برابر ۰/۵ و همان خصوصیات رفتاری مصالح مثال اول در نظر گرفته شده است. تپه در معرض تابش موج قائم SV با فرکانس غالب ۱/۵ قرار گرفته است. برای حل مسئله از دو مدل همگن و ناهمگن استفاده شده است. در مدل همگن، شکل (۱۸– الف)، مجموعه تپه و نیم‌صفحه به صورت یک محیط یکپارچه در نظر گرفته شده و برای مش‌بندی آن از تعداد ۱۷۸ المان مرزی استفاده شده است. در مدل ناهمگن، شکل (۱۸– ب)، محیط تپه و نیم‌صفحه زیرین آن به صورت جداگانه مدل شده‌اند و برای مش‌بندی آنها به ترتیب از ۴۳ و

[DOR: 20.1001.1.22287698.1384.24.2.4.9]

۱۶۴ المان مرزی استفاده شده است.

شکلهای (۱۹) و (۲۰) منحنیهای بزرگنمایی نقاط روی تپه و پایین آن را که با استفاده از دو روش فوق به دست آمده‌اند، به ازای فرکانسهای بدون بعد ۱/۰ و ۱/۵ مورد مقایسه قرار داده است. همان طور که دیده می‌شود، در هر دو مولفه قائم و افقی تغییر مکان، همخوانی بسیار خوبی میان نتایج به دست آمده از دو روش دیده می‌شود.

۵- نتیجه

این مقاله، الگوریتم کامل تحلیل پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دوبعدی ناهمگن در برابر امواج مهاجم درون‌صفحه SV و P در فضای زمان توسط روش اجزای مرزی را ارائه داده است. با حل چند مثال عددی، که هر چهار حالت دره خالی، نیم‌فضا، دره آبرفتی و تپه را در بر می‌گیرد، نشان داده شده است که دامنه کاربرد روش اجزای مرزی دوبعدی در فضای زمان، می‌تواند به حوزه تحلیل لرزه‌ای ساختگاههای ناهمگن گسترش یابد. ترکیب الگوریتم ارائه شده با روش اجزای محدود زمینه‌ای فراهم خواهد کرد تا بتوان پاسخ لرزه‌ای ساختگاههای ناهمگن با رفتار غیرخطی را در آینده تجزیه و تحلیل کرد.

مراجع

1. Bouchon, M., "Effect of Topography on Surface Motion," Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 63, pp. 615-632, 1973.
2. Lysmer, J., and Kuhlemeyer, R. L., "Finite Dynamic Model for Infinite Media," *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. EM4, pp. 859-877, 1969.
3. White, W., Valliappan, S., and Lee, I. K., "Unified Boundary for Finite Dynamic Models," *J. of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 103(5), pp. 969-964, 1977.
4. Wong, H. L., "Effects of Surface Topography on the Diffraction of P, SV and Rayleigh Waves," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 72, pp. 1167-1183, 1982.
5. Dravinski, M., and Mossessian, T. k., "Scattering of Plane Harmonic P, SV, and Reyleigh Waves by Dipping Layers of Arbitrary Shape," *Bull. Seismol. Soc. Am*., Vol. 77, pp. 212–235, 1987.
6. Mossessian, T. K., and Dravinski, M., "Application of a Hybrid Method for Scattering of P, SV, and Reyleigh Waves by Near-Surface Irregularities," *Bull. Seismol. Soc. Am*., Vol. 77, pp. 1784-1803, 1987.
7. Kawase, H., "Irregular Ground Analysis to Interpret Time Characteristics of Strong Ground Motion Recorded in Mexico City during 1985 Mexico Earthquake," In *Ground Motion and Engineering Seismology*, Ed. Cakmak A.S., *Development in Geotechnical Engineering*, Vol. 44, pp. 467-476, 1987.
8. Kawase, H., "Time-Domain Response of a Semi-Circular Canyon for Incident P, SV and Rayleigh Waves Calculated by the Discrete Wavenumber Boundary Element Method," *Bull. Seismol. Soc. Am*., Vol. 78, pp. 1415-1437, 1988.
9. Kawase, H., and Aki, K., "A Study of the Response of a Soft Basin for Incident S, P and Rayleigh Waves with Special Reference to the Long Duration Observed in Mexico City," *Bull. Seismol. Soc. Am*., Vol. 79, pp. 1361-1382, 1989.
10. Sanchez-Sesma, F. J., and Campillo, M., "Diffraction of P, SV and Rayleigh Waves by Topographic Features: a Boundary Integral Formulation," *Bull. Seismol. Soc. Am*., Vol. 81, pp. 2234-2253, 1991.
11. Sanchez-Sesma, F. J., and Campillo, M., "Topographic Effects for Incident P, SV and Rayleigh Waves," *Tectonophysics*, Vol. 218, pp. 113-125, 1993.
12. Sanchez-Sesma, F. J., and Luzon, F., "Seismic Response of Three Dimensional Alluvial Valleys for Incident P, SV and Rayleigh Waves," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 85, pp. 269-284, 1995.
13. Papageorgiou, A. S., and Kim, J., "Propagation and Amplification of Seismic Waves in 2D Valleys Excited by Obliquely Incident P- and SV- Waves," *Int. J. Earthq. Eng. and Struct. Dyn*., Vol. 22, pp. 167-182, 1993.
14. Pedersen, H. A., Sanchez-Sesma, F. J., and Campillo, M., "Three-Dimensional Scattering by Two-Dimensional Topographies," *Bull. Seismol. Soc. Am*., Vol. 84, pp. 1169-1183, 1991.
15. Reinoso, E., Wrobel, L. C., and Power, H., "Two-Dimensional Scattering of P, SV and Rayleigh Waves: Preliminary Results for the Valley of Mexico," *Int. J. Earthq. Eng. and Struct. Dyn*., Vol. 26, pp. 595-616, 1997.
16. Hadely, P. K., Askar, A., and Cakmak, A. S., "Scattering Of Waves By Inclusions In A

[DOR: 20.1001.1.22287698.1384.24.2.4.9]

Nonhomogeneous Elastic Half Space Solved By Boundary Element Methods," Technical Report NCEER-89-0027, 1989.

17. Mansur, W. J., "A Time-Stepping Technique to Solve Wave Propagation Problems Using the Boundary Element Method," Ph.D. Thesis, Southampton University, 1983.

18. Antes, H., "A Boundary Element Procedure for Transient Wave Propagation in Two-Dimensional Isotropic Elastic Media," *Finite Element Analysis Design*, Vol. 1, pp. 313-322, 1985.

19. Israil, A. S. M., and Banerjee, P. K., "Advanced time Domain Formulation of BEM for Two-Dimensional Transient Elastodynamics," *Int. J. for Num. Methods in Eng*., Vol. 29, pp. 1421-1440, 1990.

20. Israil, A. S. M., and Banerjee, P. K., "Two-Dimensional Transient Wave Propagation by Time Domain BEM," *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 26, pp. 851-864, 1990.

21. Israil, A. S. M., and Banerjee, P. K., "Advanced Development of Boundary Element Method for Two-Dimensional Dynamic Elasto-Plasticity," *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 29, pp. 1433-1451, 1992.

22. Kamalian, M., "Time Domain Two-Dimensional Hybrid FEM / BEM Dynamic Analysis Of Non-Linear Saturated Porous Media," Ph.D. Thesis, Tehran University, 2001,(In Farsi).

23. Kamalian, M., Gatmiri, B., and Sohrabi, A., "On Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures by BEM," *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, Vol. 5(2), pp. 35-45, 2003.

24. Kamalian, M., Jafari, M. K., Dehghan, K., Sohrabi, A., and Razmkhah, A., "Two-Dimensional Hybrid Response Analysis Of Trapezoidal Shaped Hills In Time Domain," *Advances in Boundary Element Techniques IV*, Ed. R. Gallego, and M.H. Aliabadi, pp. 231-236, 2003.

25. Gatmiri, B., Kamalian, M., "Time Domain Two-Dimensional Hybrid FEM / BEM Dynamic Analysis Of Non-Linear Saturated Porous Media," *2nd Canadian Specialty Conference On Computing In Geotechnique,* pp. 216-221, 2002.

26. Gatmiri, B., and Kamalian, M., "Combination of Boundary Element and Finite Element Methods for Evaluation of Dynamic Response of Saturated Porous Media," *5th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, pp. 947-955, 2002.

27. Takemiya, H., and Fujiwara, A., "SH-Wave Scattering And Propagation Analysis At Irregular Sites By Time Domain BEM," Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 84, pp. 1443-1455, 1994.

28. Brebbia, C. A., and Dominguez, J., *Boundary Elements, An Introductory Course*, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston, 1989.

29. Ahmad, S., and Banerjee, P. K., "Multi-Domain BEM for Two-Dimensional Problems of Elastodynamics," *Int. J. for Num. Methods in Eng*., Vol. 26, pp. 891-911, 1988.

30. Wolf, J. P., *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Prentice Hall, 1985.

31. 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 Dyn. Earthquake Eng*., Accepted, 2005.