

بررسی طیف ایجاد شده در نقاط مختلف دره با استفاده از روش اجزای مرزی سه بعدی

محسن ایشاری^{*}، رضا تارنی نژاد و محمد تقی اعلمی
۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۱/۲۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۰۴/۲۲)

چکیده -

()

واژگان کلیدی:

Investigation of Displacement Spectrum Created in Different Parts of Canyon Using Three-Dimensional Boundary Element Method

M. Isari, R. Tarinejad and M. T. Aalami

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract: Several earthquake experiences in the world have displayed that the amount of damage of structures with similar characteristics for a certain earthquake is strongly influenced by site conditions called site effects. These effects can cause non-uniform stimulation to crucial structures which are made on these sites. In this research, a three-dimensional boundary element method, which is one of the most powerful numerical techniques for analyzing problems, was used. This method is important especially for the issues related to the wave propagation, and for the investigation of displacement spectrum in different parts of canyon under different parameters (angles and materials). The results of this paper indicated that the displacement spectrum for a canyon site depended on soil type and wave incident angle, and could have various values in different parts of the same site. Therefore, these effects must be considered in designing important structures such as dams.

Keywords: displacement spectrum, canyon site, scattering waves, site effects, boundary element metho .

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.isari89@ms.tabrizu.ac.ir

دره‌ها که معمولاً ساختگاه‌های سازه‌های مهمی از جمله سدها و پل‌ها هستند، بزرگ‌ترین اختلالات را در انتشار امواج زلزله ایجاد کرده و باعث انکسار و تفرق^۱ امواج زمین لرزه می‌شوند. در نتیجه یک الگوی پیچیده حرکت دیواره دره به وجود می‌آید که از نظر دامنه و فاز از یک نقطه به نقطه دیگر در امتداد این دیواره متفاوت است. یک سد قوسی یا هر سازه دیگری که دیواره‌ی این دره تکیه‌گاه آن است، با یک چنین حرکتی تحریک شده و پاسخ آن نسبت به حالتی که حرکت دیواره دره یکنواخت است، متفاوت خواهد بود. تحقیقات متعددی زیادی در خصوص بررسی پدیده تفرق امواج لرزه‌ای به روش‌های مشاهده‌ای، تحلیلی و عددی انجام شده است که در ادامه به بیان موارد مهم آن پرداخته می‌شود. اشراقی و دراوینسکی [۱] با استفاده از بسط توابع موج در مختصات کروی، مسئله تفرق امواج هارمونیک در برخورد با دره سه بعدی را تحلیل کردند. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داده است که تفرق امواج در حالت سه بعدی ممکن است تغییرات اساسی در الگوی تغییر مکان در مقایسه با حالت دو بعدی داشته باشد و لذا بر لزوم استفاده از مدل‌های سه بعدی در مسائل واقعی تاکید کردند. پائولوچی [۲] در سال ۲۰۰۲ بزرگ‌نمایی تحریکات زمین را توسط توپوگرافی نامنظم تند زمین مورد مطالعه قرار داد. در مطالعه ایشان ابتدا با روش رابلی فرکانس ارتعاش پایه عارضه همگن به دست آمد. سپس بر پایه تقریب جزء طیفی پاسخ سه بعدی بعضی از عارضه‌های واقعی توپوگرافی را که با امواج سطحی S منتشر شده در راستای قائم تحریک شده به دست آمد. برای هر حالت خاص ضریب بزرگ‌نمایی محاسبه شده و در نهایت بین حالت‌های تحلیل دو بعدی و سه بعدی و ضرایب پیشنهادی EC8 مقایسه‌ای انجام شد. در مطالعات ایشان ضرایب پیشنهادی EC8 تا حدود ۴۵ درصد در بعضی موارد با پاسخ به دست آمده از حل سه بعدی تفاوت نشان

می‌داد. کمالیان و همکاران [۳] تحلیل‌های پارامتری متعددی را روی دره به شکل نیم سینوسی تحت اثر امواج فشاری و برشی منتشر شده در راستای قائم در حالت دو بعدی با استفاده از روش اجزای اجزای مرزی مستقیم در حوزه زمان انجام دادند، که طول موج و هندسه ساختگاه و در درجه‌ای پایین‌تر مشخصات مصالح و نوع موج مشخصه‌های حاکم بر الگوی بزرگ‌نمایی این دره‌ها شناسایی شدند. کمالیان و همکاران [۴ و ۵] در ادامه تحقیقات خود فرمول‌بندی پیشرفته حوزه زمانی روش هیبرید اجزای مرزی و اجزای محدود را به منظور استفاده در تحلیل ساختگاه‌های توپوگرافی تحت اثر امواج لرزه‌ای درون صفحه‌ای با محیط‌های هموزن و ناهموزن ارائه کرده و با توسعه کد نرم‌افزاری هیبرید، به منظور نشان دادن قابلیت و کارایی روش به تحلیل انواع ساختگاه‌های توپوگرافیکی شامل دره و تپه پرداختند. ایشان در این تحلیل‌ها به این نتیجه مهم رسیدند که برای رسیدن به دقت همسان گام زمانی در روش هیبرید بایستی به اندازه حداقل نصف گام زمانی مورد استفاده در روش اجزای مرزی باشد. کمالیان و همکاران [۶] مطالعات پارامتریکی را به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای تپه‌های نیم سینوسی، نیم بیضی و دوزنقه‌ای شکل در برابر امواج قائم SV و P انجام دادند. در این مطالعات که با استفاده از روش اجزای مرزی انجام شد تاثیرات نسبت شکل، نسبت طول موج برخوردی به ابعاد عارضه و ضریب پواسون به طور جداگانه در پاسخ لرزه‌ای تپه‌های یاد شده مورد بررسی قرار گرفتند. سهرابی بیدار و همکاران [۷] با استفاده از روش اجزای مرزی سه بعدی مستقیم در حوزه زمان پاسخ دره سه بعدی گوسی شکل را به صورت پارامتریک مورد مطالعه قرار دادند. طول موج و هندسه ساختگاه و تا حدودی نوع موج مهاجم پارامترهای موثر بر بزرگ‌نمایی این نوع تپه‌ها شناسایی شدند. دره‌های دو بعدی بزرگ‌نمایی و کوچک‌نمایی کوچک‌تری را نسبت به دره‌های سه بعدی با هندسه و ابعاد مشابه نشان می‌دهند. فرمول‌بندی روش

اجزای مرزی سه بعدی در حوزه زمان برای تحلیل مسئله تفرق امواج لرزه‌ای از ساختگاه‌های توپوگرافی توسط سهرابی بیدار و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۹ ارائه شد. به منظور نشان دادن دقت فرمول‌بندی ارائه شده تحلیل‌های متعددی روی انواع ساختگاه‌ها شامل دره و تپه انجام شدند. تحلیل توپوگرافی تپه گوسی شکل سه بعدی و نیم دایره استوانه‌ای نشان داد که دره سه بعدی بزرگ‌نمایی بزرگ‌تری نسبت به دره استوانه‌ای تجربه می‌کند.

موسسیان و دراوینسکی [۹، ۱۰] در سال ۱۹۹۰ مسئله بزرگ‌نمایی امواج الاستیک توسط یک دره سه بعدی به شکل دلخواه را مورد مطالعه قرار داده و پاسخ‌های حالت دائم و گذرا را به دست آوردند. ایشان از فرمول‌بندی انتگرال مرزی غیر مستقیم برای حل مسئله استفاده کردند. مقایسه نتایج مدل‌های دوبعدی و سه بعدی نشان می‌دهد که صحت مدل‌های دوبعدی وابستگی زیادی به زاویه، نوع و فرکانس موج برخوردار دارد. خطای مدل‌سازی دوبعدی برای حالت موج SH بیشتر است. اندرکنش بین مودهای مختلف امواج SV، P و SH به‌طور کلی در مدل دوبعدی وجود ندارد. تغییر شکل دره از حالت نیمکره به نیمه دوکی ایستاده شکل افزایش قابل توجهی در بزرگ‌نمایی امواج سطحی نزدیک لبه ایجاد می‌کند اما پیشینه بزرگ‌نمایی در مرکز دره کاهش می‌یابد. این حالت مخصوصاً برای مولفه موج P مشخص‌تر است. در مقایسه با پاسخ‌های دو بعدی متناظر بزرگ‌نمایی نزدیک مرکز دره برای مدل سه بعدی بزرگ‌تر است. هوانگ و چو [۱۱] در سال ۱۹۹۵ با نصب ۶ شتاب‌نگار در سطح دره فیت سوی در تایوان و انجام تحلیل‌های عددی پدیده تشدید توپوگرافی را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان با استفاده از روش معادله انتگرالی در یک مدل دو بعدی دره و انتخاب شتاب‌نگاشت کف دره به عنوان ورودی نشان دادند که رکوردهای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده از تحلیل تطابق خوبی در تغییر مکان و سرعت نشان می‌دهند. با این وجود،

شتاب‌های شبیه‌سازی شده در فرکانس‌های بالا تخمین دست پایینی را به دست داد. تاری نژاد و همکاران [۱۲] با استفاده از روش اجزای مرزی سه بعدی در حوزه فرکانس به بررسی اثرات ساختگاهی بر بزرگ‌نمایی ایجاد شده در ناشی از زمین لرزه پرداختند. آن‌ها در این تحقیق به بررسی پارامترهای مختلفی مانند طول آزاد در دو طرف دره، طول در امتداد دره و همچنین اثرات میرایی و نسبت پواسون بر رفتار دینامیکی دره پرداختند. عمده کارهای انجام شده تا به حال معطوف به مدل‌های ساده دو بعدی‌اند و مطالعه خاصی برای بررسی طیف ایجاد شده در نقاط مختلف ساختگاه‌های دره‌ای انجام نگرفته است. آنچه در این تحقیق به آن پرداخته شده است بررسی طیف ایجاد شده در نقاط مختلف دره با استفاده از روش اجزای مرزی سه بعدی است.

۲- روش تحلیل تفرق امواج لرزه‌ای

روش عددی کارا و دقیق که معمولاً در مسائل مهندسی استفاده می‌شود روش اجزای محدود^۲ است ولی با توجه به ویژگی‌های مسئله تفرق امواج لرزه‌ای استفاده از تکنیک اجزای محدود با مشکلاتی مواجه است. با عنایت به اینکه در این نوع مسائل با محیط بی‌نهایت یا نیم بی‌نهایت سرو کار هست با استفاده از اجزای محدود فقط می‌توان قسمت محدودی از مسئله را مدل‌سازی کرد و همین محدود کردن خود ازدقت حل مسئله می‌کاهد. علاوه بر این در مرزهای قطع شده از ناحیه مدل شده با توجه به انتشار موج از محیط بی‌نهایت، شاهد انعکاس‌های مصنوعی و در نتیجه عدم دقت جواب‌ها خواهد بود. این دلایل از جمله مواردی است که روش اجزای محدود را در برخورد با مسائل انتشار امواج با مشکل مواجه می‌سازد لذا معمولاً برای این نوع مسائل در صورت نیاز یا ترکیبی از روش اجزای محدود با یکی از روش‌های کارآمدتر دیگر (مثل روش اجزای مرزی) استفاده می‌شود (مسائلی مانند تحلیل دینامیکی نایکناخت سازه‌ها)

(بدون وجود دره) در محل تکیه‌گاه‌هاست. در حالت سه بعدی فرض می‌شود که بردار عمود بر جبهه امواج لرزه ای حجمی با بردار انتشار موج زاویه‌های θ_v با محور قائم (z) و θ_h با محور طولی دره (x) می‌سازد. در شکل (۱) مشخصات سیستم و یک مقطع عرضی دلخواه از ساختگاه به همراه

زوایای برخورد افقی و قائم امواج نشان داده شده است. در دستگاه مختصات $x'-y'-z'$ های امواج برخوردی هارمونیک در هر نقطه دلخواه از ناحیه نیم بی‌نهایت زمین را می‌توان توسط سه مولفه زیر معرفی کرد:

$$\{u'(x')\}_{inc} = A\{u'\}e^{-ik'x'+i'v'z'+i\omega t} \quad (1)$$

که در آن A دامنه، ω فرکانس موج، $k' = (\omega/c_p) \sin \theta_0$ و $v' = (\omega/c_p) \cos \theta_v$ برای امواج فشاری و $k' = (\omega/c_s) \sin \theta_v$ و $v' = (\omega/c_s) \cos \theta_v$ برای امواج برشی‌اند. c_p و c_s به ترتیب سرعت امواج P و S بوده و بردار $\{u'\}$ عبارت است از:

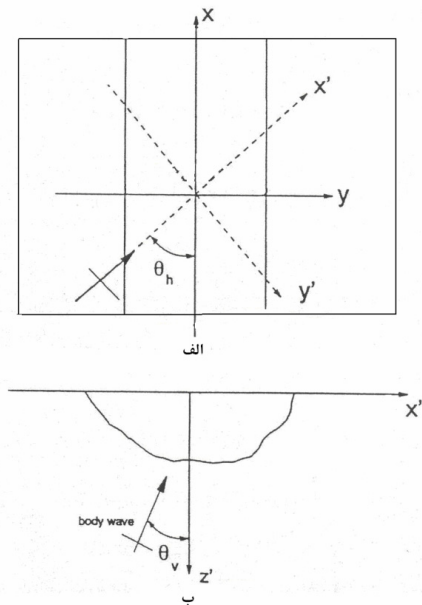
$$\{u'\} = \begin{cases} (\sin \theta_v, 0, -\cos \theta_v)^T & \text{for } p\text{-wave} \\ (\cos \theta_v, 0, \sin \theta_v)^T & \text{for } SV\text{-wave} \\ (0, 1, 0)^T & \text{for } SH\text{-wave} \end{cases} \quad (2)$$

جابه‌جایی‌های میدان آزاد زمین با مجموع‌های برخوردی و جابه‌جایی‌های ناشی از امواج منعکس شده برابر است. در دستگاه مختصات $x'-y'-z'$ که امواج در صفحه $x'-z'$ منتقل می‌شوند، جابه‌جایی‌های حالت آزاد را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد. به منظور اختصار در رابطه‌های ارائه شده در ادامه ضریب $e^{i\omega t}$ حذف شده است:

$$\{u'_{ff}(x')\} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} e^{k_s(-\sin \theta_v x' + \cos \theta_v z')} t + \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} e^{k_s(-\sin \theta_v x' - \cos \theta_v z')} t \end{cases} \quad (3)$$

۴- معادله حاکم بر حل مسئله

معادلات حاکم بر مسائل الاستودینامیک از معادلات ناویر تبعیت می‌کند که به صورت برداری و براساس مولفه‌های



شکل ۱ - مشخصات سیستم و یک مقطع عرضی دلخواه از دره

و یا ترجیحاً روش‌های اجزای مرزی (برای مطالعات ساختگاهی) به تنهایی به کار برده می‌شوند. بنا به دلایل فوق در این تحقیق به منظور حل مسئله تفرق امواج لرزه‌ای از یک دره سه بعدی همگن و ایزوتروپ از روش اجزای مرزی استفاده می‌شود. در حالت سه بعدی زاویه برخورد امواج زمین لرزه با ساختگاه با دو زاویه قابل توصیف است. زاویه با محور طولی دره در صفحه افق (θ_h یا زاویه افقی) و زاویه با محور قائم دره در صفحه قائم (θ_v یا زاویه قائم). شکل (۱) مدل یک دره سه بعدی با طول محدود را که امواج لرزه‌ای با زوایای دلخواه تعریف شده به آن برخورد می‌کنند را نشان می‌دهد. دره سه بعدی می‌تواند منشوری یا غیرمنشوری و با هر شکل مقطع دلخواه باشد.

۳- حرکات سطح آزاد زمین و دره

گام نخست در بررسی رفتار دینامیکی سازه‌های واقع در ساختگاه‌های دره‌ای در اثر زلزله، شناسایی امواج ایجاد شده و محاسبه‌های به‌وجود آمده در محیط نیم بی‌نهایت زمین مسطح

سرعت امواج به شکل زیر قابل ارائه است:

$$c_1^2 \nabla(\nabla \cdot u) - c_2^2 \nabla \times \nabla \times u - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -b \quad (4)$$

در این معادله $c_1 = (\lambda + 2\mu/\rho)^{0.5}$ و $c_2 = (\mu/\rho)^{0.5}$ به ترتیب سرعت امواج فشاری و برشی در محیط، b نیروهای حجمی در جرم واحد و u بردارها هستند. ضمن اینکه λ و μ ثابت‌های لامه و ρ جرم حجمی جسم مورد نظر هستند. در صورت استفاده از روش تحلیل در حوزه فرکانس، بردارها برای تحریک هارمونیک با فرکانس ω به شکل زیر در می‌آید:

$$u(t) = \bar{u}(\omega)e^{i\omega t} \quad (5)$$

در معادله فوق، $\bar{u}$ دامنه بردارها در حوزه فرکانس است. با استفاده از معادله (۴) معادله برداری (۵) به شکل مستقل از زمان به صورت زیر قابل بازنویسی است:

$$c_1^2 \nabla(\nabla \cdot \bar{u}) - c_2^2 \nabla \times \nabla \times \bar{u} + \omega^2 \bar{u} = -b \quad (6)$$

معادله انتگرال مرزی حاکم بر مسئله می‌تواند از نظریه تقابل دینامیکی به شکل زیر به دست آید:

$$c^i u^i + \int_{\Gamma} p^* u d\Gamma = \int_{\Gamma} u^* p d\Gamma \quad (7)$$

در این معادله u^i ، مولفه‌های تغییر مکان در نقطه مرزی i ، u و p مولفه‌های تغییر مکان و ترکشن روی تمام مرز، u^* و p^* جواب‌های اساسی تغییر مکان و ترکشن روی مرز در اثر بار واحد متمرکز در نقطه i هستند. ضریب مستقل c^i معروف به ترم پرش وابسته به هندسه خاص مرز در نقطه i است و می‌تواند از ترکشن صفر جسم صلب محاسبه شود [۱۵ و ۱۶].

زمانی که مرز به تعداد ne جزء گسسته سازی شد با جایگذاری معادلات پارامترهای گسسته سازی شده در معادله (۷)، معادله زیر به دست خواهد آمد:

$$c^i u^i + \sum_{j=1}^{ne} \left\{ \int_{\Gamma_j} p^* \Phi d\Gamma \right\} u^j = \sum_{j=1}^{ne} \left\{ \int_{\Gamma_j} u^* \Phi d\Gamma \right\} p^j \quad (8)$$

که Γ_j نشان دهنده سطح جزء j است. معادله فوق را می‌توان به فرم زیر بازنویسی کرد:

$$c^i u^i + \sum_{m=1}^n \hat{H}^{im} u^m = \sum_{j=1}^{ne} G^{ij} p^j \quad (9)$$

بنابراین برای تمام گره‌های i می‌توان سیستم معادلات را به شکل کلی زیر بیان کرد:

$$HU = GP \quad (10)$$

۵- جواب‌های اساسی

جواب‌های معادله (۶) به ازای بار نقطه‌ای هارمونیک با دامنه واحد که در جهت اختیاری (بردار واحد) اعمال شود، جواب‌های اساسی یا توابع گرین نامیده می‌شوند. این توابع با استفاده از تجزیه هلمهولتز معادلات حاکم به دست می‌آیند. در ادامه جواب‌های اساسی مربوط به تغییر مکان و ترکشن ارائه می‌شوند. این جواب‌ها در منابع موجود همواره با غلط‌های تایپی همراه بوده که در این جا فرمول‌های دقیق آن‌ها ارائه می‌شوند [۱۹]:

$$u_{lk}^* = \frac{1}{\alpha \pi \rho c_2^2} [\psi \delta_{lk} - \chi r_{l,k}] \quad (11)$$

که در آن ψ و χ برابر مقادیر زیر هستند.

$$\psi = \frac{\exp(-k_2 r)}{r} + \left(\frac{1}{k_2^2 r^2} + \frac{1}{k_2 r} \right) \frac{\exp(-k_2 r)}{r} - \frac{c_2^2}{c_1^2} \left(\frac{1}{k_1^2 r^2} + \frac{1}{k_1 r} \right) \frac{\exp(-k_1 r)}{r}$$

$$\chi = \left(\frac{3}{k_2^2 r^2} + \frac{3}{k_2 r} + 1 \right) \frac{\exp(-k_2 r)}{r} - \frac{c_2^2}{c_1^2} \left(\frac{3}{k_1^2 r^2} + \frac{3}{k_1 r} + 1 \right) \frac{\exp(-k_1 r)}{r}$$

هم‌چنین $\alpha = 4$ و δ_{ij} نشان دهنده تابع دلتای کرونگر و $k_1 = \frac{i\omega}{c_1}$ و $k_2 = \frac{i\omega}{c_2}$ ، به ترتیب اعداد امواج فشاری و برشی‌اند. اندیس‌هایی که شامل کاما هستند به منظور مشتق‌گیری نسبت به جهت مورد نظر است. لازم به ذکر است از روی جواب اساسی مربوط به تغییر مکان می‌توان جواب اساسی مربوط به ترکشن را محاسبه کرد. این کار با استفاده از روابط موجود بین تنش، کرنش و تغییر مکان و نیز رابطه تنش و ترکشن (قانون استوکس) صورت می‌گیرد. جواب اساسی مربوط به ترکشن محاسبه شده از روی جواب اساسی تغییر مکان به صورت زیر است [۱۹]:

$$P_{lk}^* = \frac{1}{\alpha\pi} \left[\left(\frac{d\psi}{dr} - \frac{1}{r}\chi \right) (\delta_{lk} \frac{\partial r}{\partial n} + r_{,k} n_l) - \frac{2}{r} \chi (n_k r_{,l} - 2r_{,l} r_{,k} \frac{\partial r}{\partial n}) - \right. \quad (12)$$

$$\left. 2 \frac{d\chi}{dr} r_{,l} r_{,k} \frac{\partial r}{\partial n} + \left(\frac{c_1^2}{c_2^2} - 2 \right) \left(\frac{d\psi}{dr} - \frac{d\chi}{dr} - \frac{\alpha}{2r} \chi \right) r_{,l} n_k \right]$$

که در آن $d\psi/dr$ و $d\chi/dr$ به شکل زیر هستند.

$$\frac{d\psi}{dr} = \left(-\frac{2}{r} - k_2 - \frac{3}{k_2 r^2} - \frac{3}{k_2^2 r^3} \right) \times \frac{\exp(-k_2 r)}{r} +$$

$$\frac{c_2^2}{c_1^2} \left(\frac{1}{r} + \frac{3}{k_1 r^2} + \frac{3}{k_1^2 r^3} \right) \frac{\exp(-k_1 r)}{r}$$

$$\frac{d\chi}{dr} = \left(-\frac{4}{r} - k_2 - \frac{9}{k_2 r^2} - \frac{9}{k_2^2 r^3} \right) \frac{\exp(-k_2 r)}{r} +$$

$$\frac{c_2^2}{c_1^2} \left(\frac{4}{r} + k_1 + \frac{9}{k_1 r^2} + \frac{9}{k_1^2 r^3} \right) \frac{\exp(-k_1 r)}{r}$$

۶- برآورد انتگرال‌های تکین

برای انتگرال‌گیری از هسته با تکین بودن از نوع ضعیف (در بیش‌تر معادلات انتگرال مرزی هسته انتگرال‌گیری شامل توابع تکین است. روش‌های مختلفی برای محاسبه این انتگرال‌ها وجود دارد که با توجه به درجه تکین بودن و نوع مسئله باید از روش مناسب برای حل این انتگرال‌های تکین استفاده کرد) [۱۹]. مشابه آنچه در هسته تغییر مکان (برای هسته تغییر مکان به علت جمله $1/r$) وجود دارد با استفاده از تکنیک تبدیل انتگرال‌گیری روی اجزای مستطیلی به انتگرال‌گیری روی جزء مثلثی می‌توان از تکین بودن رهایی یافته و از روش گوس-لژاندر انتگرال‌های اجزا مثلثی را برآورد کرد. به این منظور ابتدا جزء مستطیلی برحسب اینکه نقطه منبع منطبق بر کدامیک از نقاط جزء مرزی باشد به تعداد مناسبی اجزای مثلثی تقسیم می‌گردد. سپس با تبدیل مختصات مناسب انتگرال‌گیری روی اجزای مستطیلی به انتگرال‌گیری روی اجزای مثلثی تبدیل می‌شوند. اساس روش، تعریف سیستم مختصاتی است که ژاکوبین در نقطه منبع صفر شود به صورتی که با صفر موجود در مخرج هسته انتگرال رفع ابهام شود. برای این منظور سیستم مختصات مطابق شکل (۲) طوری تعریف می‌شوند که ژاکوبین در نقطه منبع صفر شود.

رابطه بین مختصات s_1 و s_2 و مختصات ξ_1 ، ξ_2 به صورت زیر هستند:

$$\xi_i = (1-s_1)\xi_i^1 + s_1(1-s_2)\xi_i^2 + s_1s_2\xi_i^3 \quad (13)$$

که در معادله فوق $i=1,2$ و اعداد بالای ξ نشان دهنده گره‌های گوشه مثلث‌اند:

$$d\xi_1 d\xi_2 = |J_2| ds_1 ds_2 = 2As_1 ds_1 ds_2 \quad (14)$$

که در آن A مساحت مثلث در مختصات بی بعد $\xi_1 - \xi_2$ است.

برای استفاده از روش انتگرال‌گیری گوس، حوزه مربعی در سیستم s_1s_2 بایستی به مربعی به طول وجوه معادل ۲ انتقال یابد. بنابراین بایستی انتقال دوم به شکل زیر انجام گیرد:

$$s_i = \frac{1+t_i}{2} \quad (15)$$

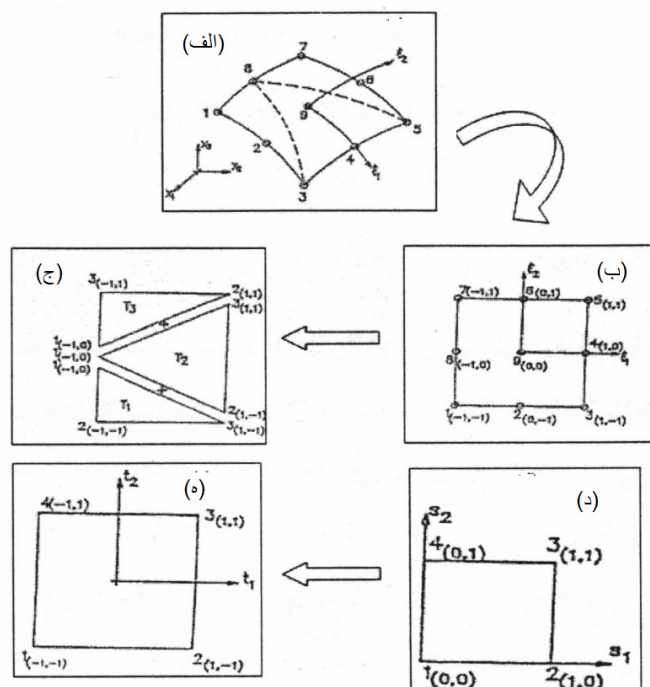
بنابراین معادله $ds_1 ds_2 = |J_3| dt_1 dt_2 = \frac{1}{4} dt_1 dt_2$ به دست می‌آید.

انتگرال مستطیلی با استفاده از تبدیل‌های فوق به انتگرال‌های مثلثی در حوزه $t_1 - t_2$ تبدیل شده و با استفاده از روش استاندارد گوس محاسبه می‌شود [۱۵ و ۱۶]:

$$G(k) = \sum_{\text{no. of Triangles}} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 u^*(t_1, t_2) \phi_k(t_1, t_2) |G(t_1, t_2)| (t_1+1) \frac{A}{4} dt_1 dt_2 \quad (16)$$

برای محاسبه انتگرال هسته ترکشن با توجه به اینکه با تکین بودن از نوع قوی (به علت جمله $1/r^2$) مواجه هست لذا لازم است از CPV (مقدار اصلی کوشی) [۱۸] استفاده شود.

انتگرال‌گیری تحلیلی چه در حوزه فرکانس و چه در حوزه زمان از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است. برای محاسبه انتگرال‌های موجود در هسته ترکشن می‌توان از روش غیرمستقیم نیز استفاده کرد. این روش برای مسائل الاستواستاتیک توسط لاچات و واتسون به کار گرفته شد [۱۶]. نکته اساسی در این روش فرض یک حرکت صلب برای مسئله موردنظر است چرا که برای چنین حرکتی ترکشن‌های متناظر صفر خواهند بود. براساس این تکنیک



شکل ۲- الف و ب) جزء مستطیلی ۹ گره‌ای اصلی و مادر، ج) جزء تقسیم شده به زیر جزء مثلثی با تکینگی در گره شماره ۸، د و ح) تبدیل‌های لازم برای انتگرال‌گیری از جزء مثلثی [۱۲]

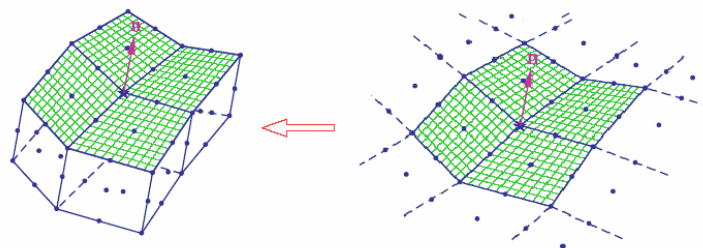
کننده که توسط احمد و بنرجی پیشنهاد شده، استفاده شده است [۱۷].

اساس روش عددی پیشنهاد شده توسط دومینگوئز و احمد و بنرجی برای دامنه‌های بسته این است که تکین بودن در پاسخ دینامیکی حوزه فرکانس مشابه پاسخ استاتیکی است. از این رو ماتریس تابع گرین دینامیکی $\hat{H}$ برای ترکشن را می‌توان به صورت مجموع پاسخ استاتیکی $\hat{H}_S$ و ماتریس باقی‌مانده دینامیکی $\hat{H}_R$ بیان کرد:

$$\hat{H} = \hat{H}_S + \hat{H}_R \quad (17)$$

تکین بودن فقط در قسمت استاتیکی وجود داشته و لازم است با روش خاصی برآورد صورت گیرد و جمله باقی‌مانده به دلیل نداشتن تکین بودن می‌تواند با روش استاندارد گوس-لژاندر برآورد شود. فرض کنیم حرکت صلب u_k برابر بردار واحد به شکل استاتیکی معادله (۸) اعمال شود، P_k برابر صفر بوده و خواهیم داشت:

عناصر قطری ماتریس مربوطه (که حاوی انتگرال‌های تکین‌اند) بر حسب عناصر غیرقطری (که تکین بودن در آن‌ها وجود ندارد) بیان می‌شوند. با توجه به اینکه در مسائل دینامیکی رفتار هسته ترکشن در حالتی که نقطه منبع و حوزه به هم میل کنند مشابه رفتار هسته استاتیک است می‌توان این روش را برای مسائل الاستودینامیک هم بسط داد. تکین بودن تابع گرین ترکشن و بنابراین تکین بودن ماتریس H در حالت سه بعدی در حالتی که نقطه منبع و حوزه برهم منطبق باشند از نوع $1/r^2$ است. در این تحقیق برای فرار از تکین بودن قوی از تکنیک غیر مستقیم که برپایه در نظر گرفتن تعادل استاتیکی برای ترکشن‌های سطحی که به صورت نرمال روی دامنه‌های بسته اثر می‌کنند استفاده شده است. برای تعمیم این روش برای استفاده در مسائل با دامنه‌های باز (که در واقع قسمتی از مرز مدل نشده باشد) یک روش اصلاح شده مبتنی بر به کارگیری تکنیک اجزای محصور



شکل ۳- تبدیل مسئله نامحدود با استفاده از اجزای محصور کننده به مسئله مشابه محدود در حالت سه بعدی

که N_1 تابع شکل برای گره تکیه و S_1 سطح اجزای تکیه است. با توجه به اینکه عبارت زیر انتگرال در این معادله شامل جمله $(P_{ij}^{*d} - P_{ij}^{*s})$ غیر تکیه است برآورد D_{ij}^d به سادگی امکانپذیر خواهد بود.

در ادامه روش جسم صلب، تکنیک تعمیم به مسائل نامحدود با استفاده از اجزای محصورکننده برای محاسبه D_{ij}^d ارائه شده است. فرض پایه‌ای این تکنیک این است که تغییر مکان‌ها و ترکشن‌ها روی مرز مجازی (محصورکننده مسئله) به فاصله مناسب از مرز اصلی تاثیری روی تغییر مکان‌ها هر نقطه از مرز مدل شده را ندارد. با استفاده از این تکنیک بلوک‌های قطری D_{ij}^s ماتریس H توسط مجموع انتگرال‌های ناتکیه هسته ترکشن استاتیکی روی تمام اجزای مرز اصلی مدل شده همراه با تمام اجزای مرز محصور کننده به دست می‌آیند:

$$D_{ij}^s = - \left[\sum_{\alpha=2}^A \int_{S_1} P_{ij}^{*s} N_{\alpha} dS + \sum_{q=2}^{ne} \sum_{\alpha=1}^A \int_{S_q} P_{ij}^{*s} N_{\alpha} dS + \sum_{e=1}^L \sum_{\alpha=1}^A \int_{S_e} P_{ij}^{*s} N_{\alpha} dS \right] \quad (22)$$

که عبارت سوم مربوط به انتگرال‌های متناظر با اجزای روی مرز محصورکننده (L تعداد اجزای روی این مرز) است. زمانی که D_{ij}^s برآورد شدند ترم‌های قطری D_{ij}^d مرتبط با مسئله دینامیکی می‌توانند به راحتی با استفاده از معادله (۲۱) به دست آیند. شکل (۳) چگونگی محصور کردن مسئله ناحیه

$$c_{lk}^i + \sum_{q=1}^{ne} \int_{\Gamma_q} p_{lk}^* \phi d\Gamma = c_{lk}^i + \sum_{q=1}^{ne} \sum_{a=1}^A \int_{S_q} p_{lk}^{*s} N_a dS = 0 \quad (18)$$

که در آن بالانویس s نشان دهنده حالت استاتیکی، ne تعداد اجزا و A تعداد گره‌های هر جزء و N_a تابع شکل متناظر با گره a است. با فرض اینکه $q=1$ نشان دهنده اجزای تکیه و $a=1$ نیز گره تکیه باشد در معادله (۱۸) بلوک‌های قطری D_{ij}^s از ضرایب ماتریس ترکشن برای مسئله استاتیک با هندسه مشابه می‌تواند با به کار بردن جسم صلب به دست آید. به بیان دیگر معادله (۱۸) به صورت زیر می‌تواند بازنویسی شود:

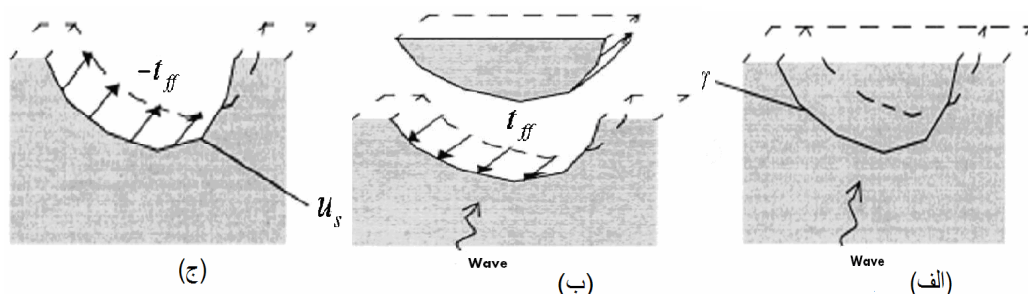
$$D_{ij}^s = c_{lk}^i + \int_{S_1} P_{ij}^{*s} N_1 dS = - \sum_{a=2}^A \int_{S_1} P_{ij}^{*s} N_a dS - \sum_{q=2}^{ne} \sum_{a=1}^A \int_{S_q} P_{ij}^{*s} N_a dS \quad (19)$$

به این ترتیب بلوک تکیه استاتیکی D_{ij}^s بر حسب جمله‌های غیر تکیه غیر قطری قابل بیان است. بلوک قطری 3×3 از ماتریس H شامل تانسور c_{ij} و مقدار اصلی کوشی از هسته ترکشن است که برای مسائل دینامیک به صورت زیر قابل بیان است:

$$D_{ij}^d = c_{lk}^i + \int_{S_1} P_{ij}^{*d} N_1 dS \quad (20)$$

با حذف جمله پرش بین دو معادله (۱۹) و (۲۰) خواهیم داشت:

$$D_{ij}^d = D_{ij}^s + \int_{S_1} (P_{ij}^{*d} - P_{ij}^{*s}) N_1 dS \quad (21)$$



شکل ۴- الف) تغییر مکان‌های حاصل از مسئله میدان آزاد (حالت مسطح)، ب) تنش‌های مربوط به مسئله میدان آزاد و ج) حضور دره در محیط نیمه‌بی‌نهایت و اعمال $-t_{ff}$ [۱۲]

میدان آزاد و حرکت تفرق یافته به دست می‌آید:

$$u_{total} = u_{ff} + u_s \quad (23)$$

شرط بدون بار بر روی مرز دره، Γ_c ، ایجاب می‌کند که:

$$t_s = -t_{ff} \quad (24)$$

۸- صحت سنجی کد رایانه‌ای به‌کار رفته در

تحقیق

مقایسه نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه شده توسط سانچز سسما [۱۳] برای موج ورودی P با زوایای برخورد افقی و قائم ۴۵ و فرکانس بی بعد ۰/۵ برای دره نیم دایره‌ای منشوری در شکل (۵) ارائه شده است. مقایسه نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه شده توسط ژانگ و چوپرا [۱۴] برای موج ورودی SV با $\theta_v = 0^\circ$ ، $\theta_h = 90^\circ$ و فرکانس بی بعد واحد در شکل (۶) ارائه شده است. همان‌طوری که در این شکل مشخص است نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی با نتایج به‌دست آمده از تحلیل‌های چوپرا اندک اختلافی نشان می‌دهند که می‌تواند به دلایل زیر قابل توجیه باشد. روش استفاده شده چوپرا روش اجزای مرزی دو بعدی بوده که با انتگرال گیری تحلیلی در بعد سوم برای دره به طول بی‌نهایت به حالت سه بعدی تعمیم یافته است این در حالی است که در تحلیل حاضر مدل سه بعدی از دره به طول محدود (۵ برابر شعاع دره) با روش اجزای مرزی به کار گرفته شده است.

باز را با استفاده از اجزای محصور کننده در حالت سه بعدی نشان می‌دهد. حداقل فاصله مرز مجازی از مرز اصلی به اندازه یک برابر بعد جزء به‌کار رفته است. هندسه به‌کار گرفته شده برای مرز مجازی در این تحقیق که همانند اجزای روی سطح زمین (دره) به صورت اجزای‌های ۹ گره‌اند، بسته به هندسه مرز اصلی مسئله، نیم دایره‌ای یا مستطیلی است و اساساً هندسه آن تاثیری در جواب‌های به‌دست آمده نخواهد داشت [۱۹].

۷- حل مسئله تفرق موج در نیم فضای سه بعدی

یک دره با شکل دلخواه

برای به‌دست آوردن حرکت کل ناشی از برخورد امواج به دره، ابتدا از حل میدان آزاد^۳، یعنی برای محیط نیم بی‌نهایت مسطحی که دره‌ای در آن قرار ندارد، جابه‌جایی‌های میدان آزاد محاسبه شده و سپس جواب به‌دست آمده با استفاده از فرمول‌بندی روش اجزای مرزی در الاستودینامیک، اصلاح می‌شود. به این ترتیب می‌توان تغییرات حرکت در امتداد دیواره دره که حاصل از پخش شدگی و انکسار امواج توسط دیواره دره است را محاسبه کرد. در شکل (۴) مراحل حل مسئله تفرق امواج لرزه‌ای از یک ساختگاه دره‌ای نشان داده شده است.

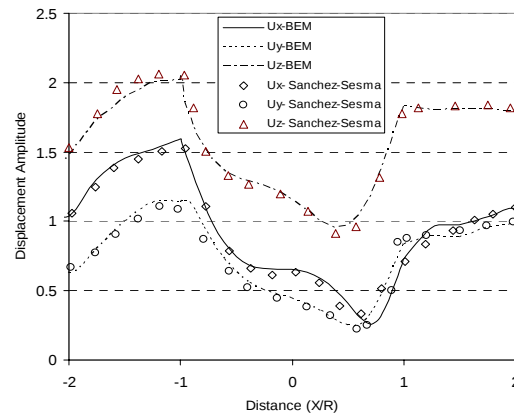
در سطح محیط نیمه‌بی‌نهایت هم ترکشن‌ها خودبه‌خود صفر می‌شوند چون حل میدان آزاد شرایط بدون ترکشن را ارضا می‌کند. حرکت کل ناشی از برخورد امواج زلزله به دره از مجموع حرکت

شکل (۷) ارائه شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل حاضر با نتایج ارائه شده توسط کمالیان و همکاران اندک اختلافی نشان می‌دهند ضمن اینکه روند کلی کاملاً یکسان است. نتایج ارائه شده توسط کمالیان برای دره دو بعدی بوده در حالی که در تحلیل حاضر مدل سه بعدی از دره به طول محدود (۵ برابر شعاع دره) با روش اجزای مرزی به کار گرفته شده است. به طور کلی جوابهای به دست آمده از مدل‌های دو بعدی نسبت به مدل‌های سه بعدی اندکی کوچک‌تر می‌باشد و این مورد در مقایسه نتایج به دست آمده به وضوح نمایان است. براساس مقایسه نتایج انجام گرفته با مراجع متعدد کد اجزای مرزی توسعه یافته در این تحقیق صحت سنجی شده و از نتایج به دست آمده از آن برای انجام تحلیل‌های بعدی اطمینان حاصل شد.

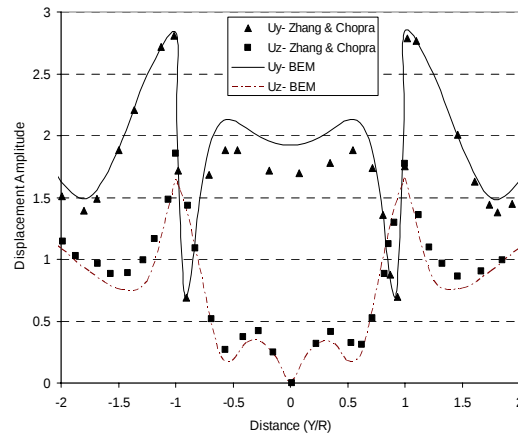
۹- تحلیل‌های انجام شده

برای به دست آوردن طیف‌های نقاط مختلف دره با استفاده از روش اجزای مرزی مدلی به صورتی که در شکل (۸) نشان داده شده است، مش بندی و آماده شده است. در این تحقیق از مدل‌هایی به شکل نیم دایره منشوری و مثلثی استفاده شده که این مدل‌ها از ۱۸۰ اجزای ۹ گره‌ای، با طول آزاد ۳ برابر شعاع دره در جهت Y و با طول ۱۰ برابر شعاع دره در جهت X تشکیل شده‌اند. شکل (۹) نمودار مربوط به دره نیم دایره منشوری تحت زاویه قائم و موج SH نشان می‌دهد که مطابق آن، ایجاد شده به صورت کاملاً متقارن است.

برای بررسی رفتار دینامیکی نقاط مختلف دره و به دست آوردن طیف‌ها، چهار نقطه روی دره نیم دایره منشوری مطابق شکل (۱۰) در نظر گرفته شده که این تحلیل‌ها برای خاک‌های نوع یک و چهار انجام شده است. همچنین طیف‌های به دست آمده برای این نقاط تحت دو زاویه مختلف در شکل (۱۱) آورده شده است. تغییر این رفتارها با تغییر زاویه نشان دهنده اثرات زاویه برخورد موج بر رفتار دینامیکی دره است.

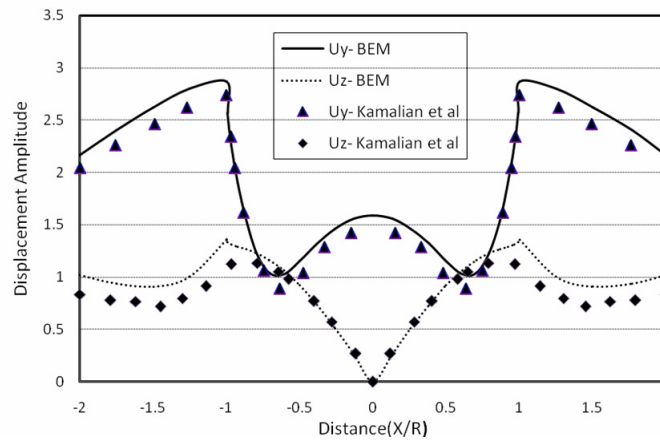


شکل ۵- مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه شده توسط سانچز سسما [۱۳] برای موج ورودی P با زوایای برخورد افقی و قائم ۴۵ و فرکانس بی بعد ۵٪ برای دره نیم دایره‌ای منشوری

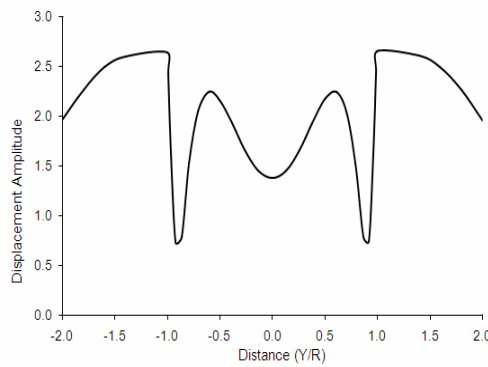


شکل ۶- مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه شده توسط ژانگ و چوپرا [۱۴] برای موج ورودی SV با $\theta_v = 0$ ، $\theta_h = 90$ و فرکانس بی بعد واحد برای دره نیم دایره منشوری

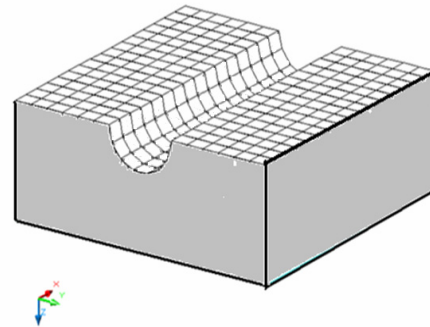
مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه شده توسط کمالیان و همکاران [۳] برای موج ورودی SV با $\theta_v = 0^\circ$ و $\theta_h = 90^\circ$ به ازای فرکانس بی بعد مساوی نیم در



شکل ۷- مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و نتایج ارائه شده توسط کامالیان و همکاران [۳] برای موج ورودی SV با $\theta_v = 0$ ، $\theta_h = 90^\circ$ و فرکانس بی بعد نیم دره نیم دایره منشوری



شکل ۹- مقادیر جابه جایی به دست آمده تحت زاویه قائم و موج SH

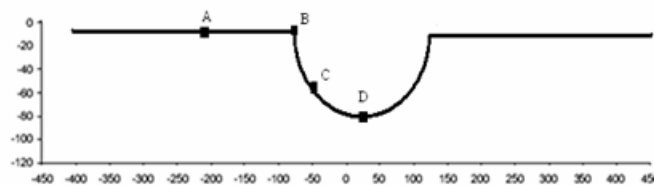


شکل ۸- تصویر سه بعدی دره مدل شده

سمت رفتارهای سطح آزاد دره میل کرده و باعث کاهش اثرگذاری و مانع شوندگی دره می شود. در نهایت، با افزایش زاویه قائم، الگوی طیف ها دچار افزایش محسوسی نسبت به حالتی که این زاویه برابر صفر است، می شود.

در ادامه تحقیقات انجام شده در این مقاله طیف های نقاط مشخص شده در راستای Z مطابق شکل (۱۲) ارائه شده است. مطابق شکل (۱۲) که بیانگر وابستگی الگوی طیف های به نقطه مورد بررسی و زاویه برخورد موج با دره است، طیف های

با توجه به نتایج به دست آمده از طیف های مختلف در نقاط مشخص شده اولاً می توان گفت در قسمت های لبه و میانه دره (نقاط B, C) با تغییر زاویه برخورد موج، بیشترین اختلاف دو طیف در محدوده (T زمان تناوب) بین 90° ایجاد می شود. ثانیاً در حالت کلی می توان گفت اگر طول موج برخوردی به دره قابل مقایسه با ابعاد دره باشد، اثرات تفرق امواج لرزه ای محسوس خواهد بود. هم چنین با کمتر شدن فرکانس بی بعد رفتارهای مشاهده شده در نقاط مختلف به



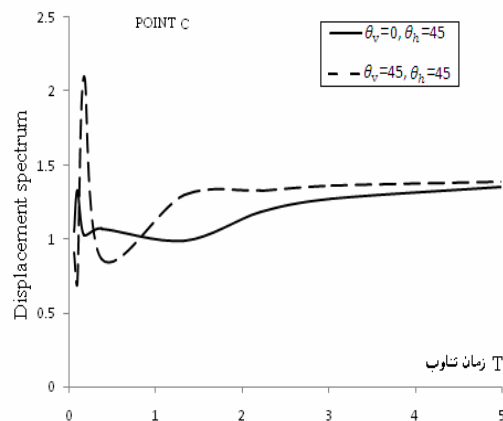
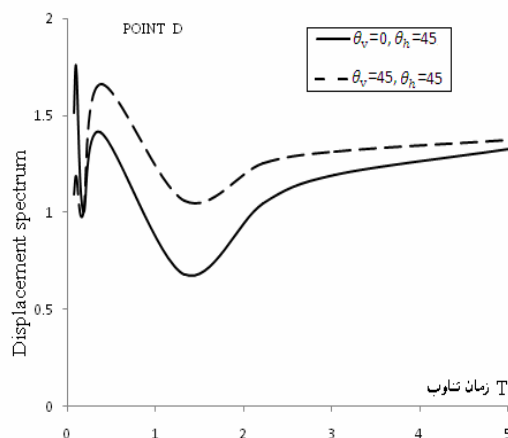
شکل ۱۰- نقاط مشخص شده بر روی دره نیم دایره برای بررسی طیف جابه‌جایی

بررسی به دلیل تغییر در شیب دیواره و تفرق امواج لرزه‌ای است. در ادامه، تحلیل‌های انجام شده برای خاک نوع چهار و طیف‌های تحت موج SH قائم در شکل (۱۳) آورده شده است. همان‌گونه که این نمودارها نشان می‌دهند، نقطه B که بر روی لبه ی دره قرار دارد دارای بیشترین مقدار و بزرگ‌نمایی و نقطه D که در قعر دره قرار دارد دارای بیشترین نوسانات حرکتی است. مطابق تحلیل‌های انجام شده در قسمت قبل، می‌توان نتیجه گرفت که طیف‌های به‌دست آمده به نقطه مورد بررسی و زاویه برخورد موج وابسته‌اند.

شکل (۱۴) تحلیل‌های انجام شده بر روی دره نیم دایره منشوری و خاک نوع یک تحت موج SH قائم را نشان می‌دهد. مطابق نتایج به‌دست آمده از این شکل، الگوی طیف‌های به‌دست آمده برای خاک نوع یک پیچیدگی کمتری نسبت به سایر طیف‌های به‌دست آمده داشته و نوسانات ایجاد شده در آن به سرعت یکنواخت می‌شود.

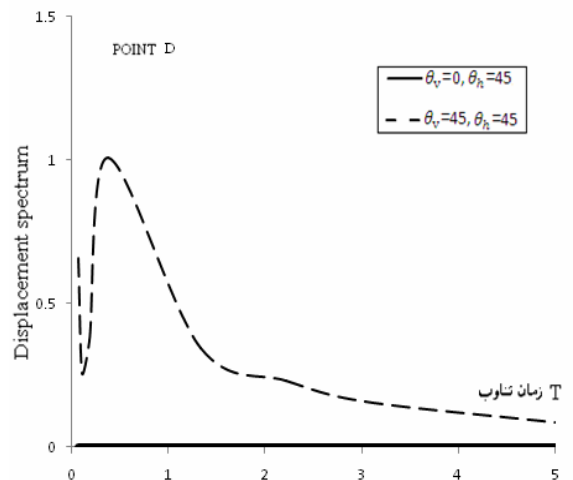
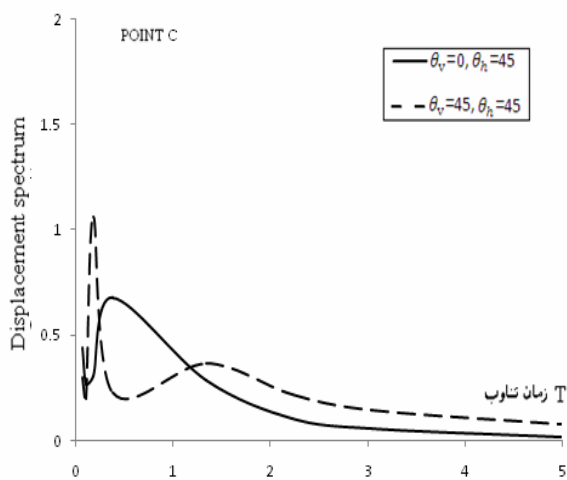
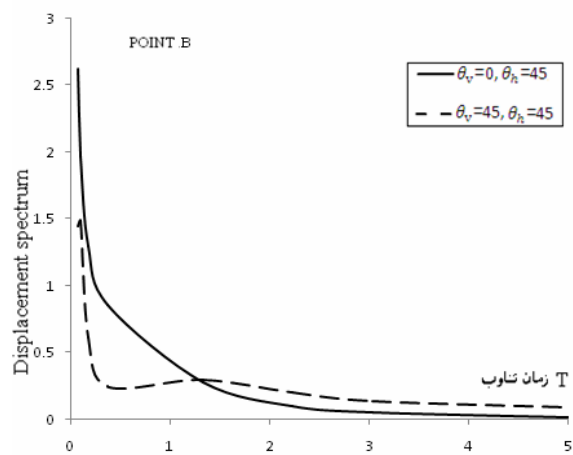
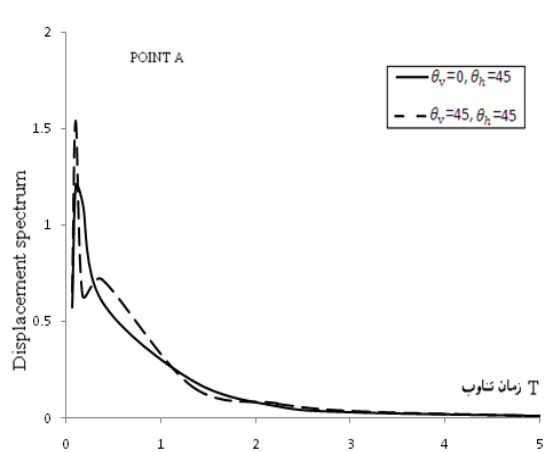
در ادامه این تحقیق به بررسی طیف‌های ایجاد شده در نقاط مختلف مربوط به دره‌ی مثلثی شکل (۱۵) که دارای دهانه‌ی دو برابر عمق دره است، پرداخته‌ایم. هم‌چنین طیف‌های نقاط بیرون از دره روی سطح آزاد، لبه، روی دیواره دره و قعر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج به‌دست آمده برای خاک نوع چهار در زاویه قائم در شکل (۱۶) ارائه شده است.

نتایج نشان می‌دهد که طیف به‌دست آمده در نقطه D دارای بیشترین نوسان و پیچیدگی در الگوی به‌دست آمده بوده که مطابق قسمت‌های قبلی بستگی به زاویه برخورد،

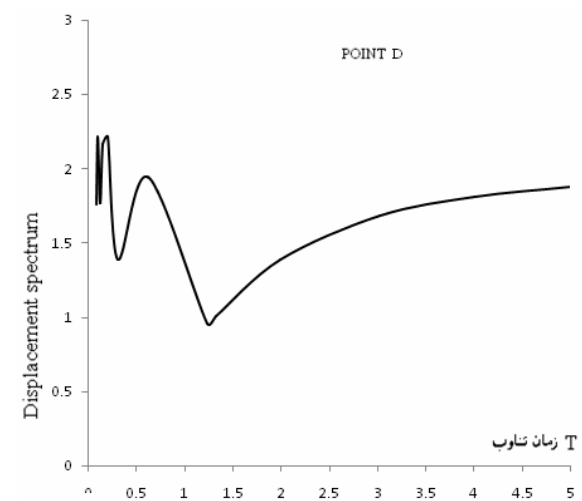
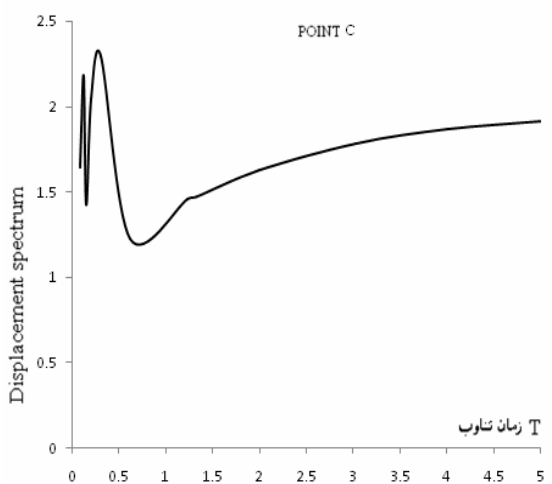
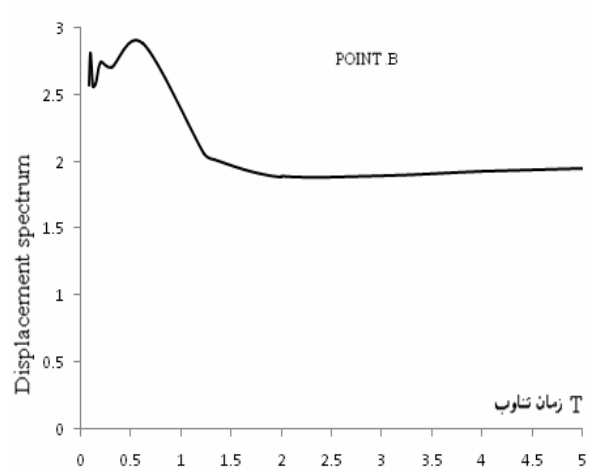
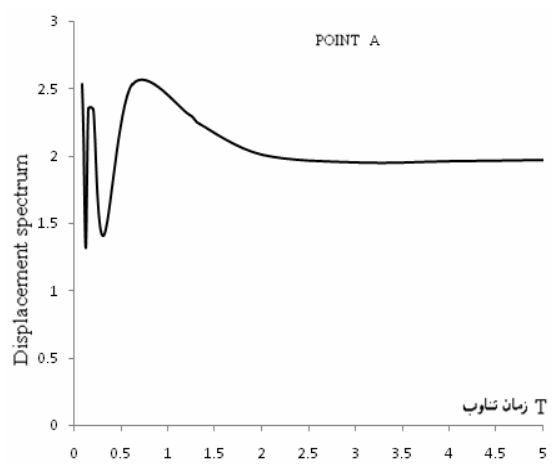


شکل ۱۱- مقایسه طیف جابه‌جایی ایجاد شده در نقاط مختلف دره در راستای x تحت موج SH و خاک نوع چهار

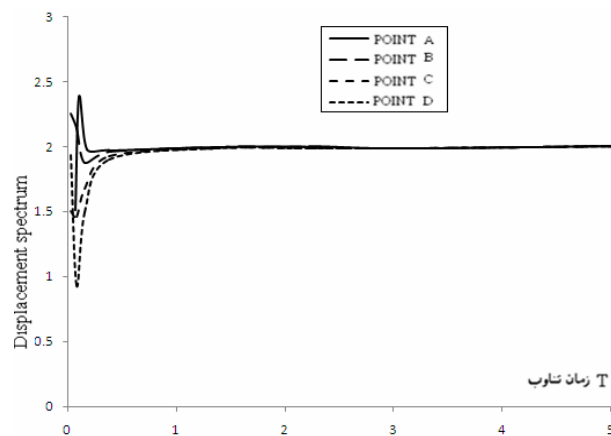
به‌دست آمده در راستای z با افزایش زمان تناوب بی بعد به سمت صفر میل می‌کنند که علت این وابستگی به نقطه مورد



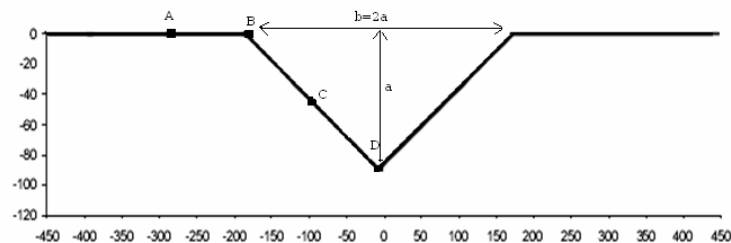
شکل ۱۲- مقایسه طیف جابه‌جایی ایجاد شده در نقاط مختلف دره در راستای z تحت موج SH و خاک نوع چهار



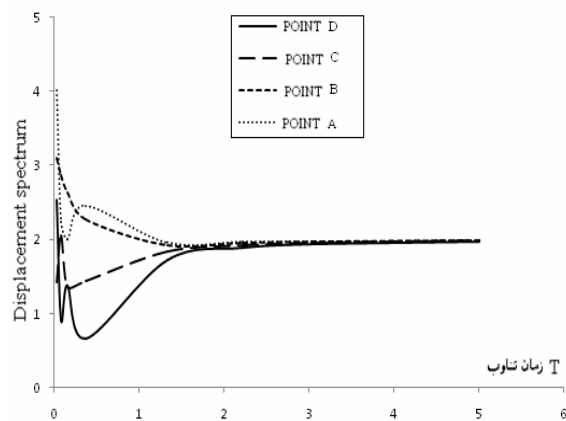
شکل ۱۳- مقایسه طیف جابه‌جایی ایجاد شده در نقاط مختلف دره در راستای x تحت موج SH قائم و خاک نوع چهار



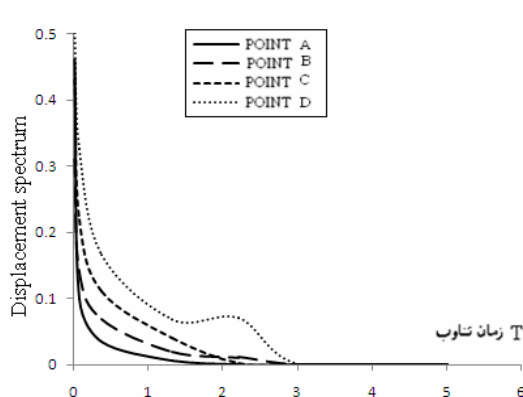
شکل ۱۴- مقایسه طیف جابه‌جایی ایجاد شده در نقاط مختلف دره در راستای x تحت موج SH قائم و خاک نوع یک



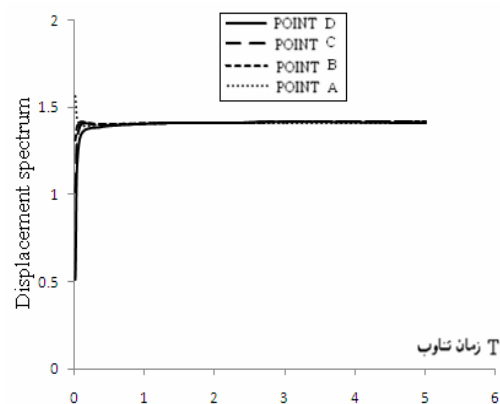
شکل ۱۵- نقاط مشخص شده بر روی دره مثلثی برای بررسی طیف جابه‌جایی



شکل ۱۶- مقایسه طیف جابه‌جایی ایجاد شده در نقاط مختلف دره در راستای x تحت موج SH قائم و خاک نوع چهار



شکل ۱۸- مقایسه طیف جابه‌جایی ایجاد شده در نقاط مختلف دره در راستای z تحت موج SH



شکل ۱۷- مقایسه طیف جابه‌جایی ایجاد شده در نقاط مختلف دره در راستای x تحت موج SH و خاک نوع یک

فرکانس بر اساس روش توسعه یافته توسط احمد و بنرجی [۱۷] که به روش اجزای محصور کننده معروف است، استفاده شده است. نتایج این روش از دقت قابل قبولی نسبت به سایر روش‌ها برای بررسی اثرات ساختگاهی، که می‌تواند باعث ایجاد تحریک‌های نایک‌نواخت در نقاط مختلف دره شود، برخوردار است [۱۹]. در این مقاله به بررسی طیف به‌وجود آمده در نقاط مختلف دره (نقاط روی طول آزاد، لبه، دیواره و قعر دره) با شکل‌های نیم دایره و مثلثی پرداخته شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد طیف‌های در نقاط مختلف دره از پارامترهای مختلفی از جمله زاویه برخورد امواج، جنس مصالح و شیب نقاط مورد بررسی تاثیر پذیر است. بنابراین این اثرات باید به دقت در طراحی سازه‌های حساسی مانند سدها در نظر گرفته شود.

جنس مصالح و نقطه مورد بررسی دارد. مطابق شکل (۱۶)، با حرکت از نقطه A به سمت D که در قعر دره قرار دارد، مشاهده می‌شود که فرورفتگی نمودارها به دلیل اثرات وجود دره در مسیر امواج و تغییر شیب نقاط مورد بررسی نمودارها افزایش می‌یابد. در نهایت، نتایج تحقیق انجام شده روی دره مثلثی و خاک نوع یک تحت موج SH، $450_h = 450_h$ در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) در راستاهای مختلف ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که در راستای z وقتی از نقطه A به سمت نقطه D که در قعر دره قرار گرفته حرکت می‌کنیم بالا آمدگی طیف‌ها افزایش می‌یابد و پیچیدگی الگوی به‌دست آمده بیشتر می‌شود.

۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش اجزای مرزی سه بعدی در حوزه

واژه‌نامه

- | | | |
|---------------|-------------------|---------------|
| 1. scattering | 2. finite element | 3. free field |
|---------------|-------------------|---------------|

1. Eshraghi, H., and Dravinski, M., "Scattering of Plane Harmonic SH, SV, P and Rayleigh Waves by Non-Axisymmetric Three Dimensional Canyons: a Wave Function Expansion approach", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 18, pp. 983-998, 1989.
 2. Paolucci, R., "Amplification of Earthquake Ground Motion by Steep Topographic Irregularities", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 31, pp. 1831-1853, 2002.
 3. Kamalian, M., Gatmiri, B., Sohrabi-Bidar, A., and Khalaj, A., "Amplification Pattern of 2D Semi-Sine-Shaped Valleys Subjected to Vertically Propagating Incident Waves", *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Vol. 25, pp. 871-887, 2007.
 4. Kamalian, M., Gatmiri B., and Sohrabi-Bidar, A., "On Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures by BEM", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, Vol. 5(2), pp. 35-45, 2003.
 5. Kamalian, M., Jafari, M. K., and Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., and Gatmiri, B., "Time-Domain Two-Dimensional Site Response Analysis of Non-Homogeneous Topographic Structures by a Hybrid FE/BE Method", *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, Vol. 26, No. 8, pp. 753-765, 2006.
 6. Kamalian, M., Jafari, M. K., Sohrabi-Bidar, A., Razmkhah, A., "Shape Effects on Amplification Potential of Two Dimensional Hills", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering (JSEE)*, Vol. 8 No.2, pp. 58-70 (In Farsi).
 7. Sohrabi-Bidar, A., Kamalian, M. and Mohammad Kazem Jafari, "Seismic Response of 3-D Gaussian-Shaped Valleys to Vertically Propagating Incident Waves", *Geophysical Journal International*, Vol. 183, 1429-1442, 2010.
 8. Sohrabi-Bidar, A., M., Kamalian, M. K., and Jafari, "Time-Domain BEM for Three-Dimensional Site Response Analysis of Topographic Structures", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 79, No. 12, pp. 1467-1492, 2009.
 9. Mossessian, Tomi, K., and Dravinski, M., "Amplification of Elastic Waves by a Three Dimensional Valley, Part1: Steady-State Response", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 19, pp. 667-680, 1990.
 10. Mossessian, T. K., and Dravinski, M., "Amplification of Elastic Waves by a Three Dimensional Valley, Part2: Transient Response", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 19, pp. 681-691, 1990.
 11. Huang, H. C., and Chiu, H. C., "The Effect of Canyon Topography on Strong Ground Motion at Feitsui Damsite: Quantitative Results", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 24, pp. 977-990, 1995.
 12. Tarinejad R. Ahmadi M. T. and Khaji N., "Analysis of Topographic Amplification Effects on Canyon Sites Using 3D Boundary Element Method", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 25-37, 2007.
 13. Sanchez-Sesma, F. J., and Campillo, M., "Topographic Effects for Incident P, SV, and Rayleigh Waves", *Tectonophysics*, Vol. 218, pp. 113-125, 1993.
 14. Zhang, L., and Chopra, A. K., "Three-Dimensional Analysis of Spatially Varying Ground Motions Around a Uniform Canyon in a Homogeneous Half-Space", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 20, pp. 911-926, 1991.
 15. Dominguez, J., "Boundary Elements in Dynamics", Elsevier, 1993.
 16. Manolis, G. D., and Beskos, D. E., "Boundary Element Methods in Elasto dynamics", *Unwin Hyman Ltd, ISBN: 004-620019-3*, 1988.
 17. Ahmad, S., and Banerjee, P. K., "Multi-Domain BEM for Two Dimensional Problems of Elastodynamics", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 26, pp. 891-911, 1988.
 18. Kupradze, V. D., Gegelia, T. G., Bachelishvili, M.O. and Burkhuladze, T. V. "Three Dimensional Problems of the Mathematical Theory of Elasticity and Thermo Elasticity", Moscow, Nauka, English translation, North-Holland, Amsterdam., 1976.
۱۹. تاربی نژاد، ر.، "بارگذاری زلزله برای سازه‌های واقع در ساختگاه‌های دره‌ای"، رساله دکتری با راهنمایی دکتر محمدتقی احمدی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۶.

