

مدل اجزای مرزی تقابل دوگانه برای محیط نیم‌فضای حفره‌دار تحت پالس اسکالر سطحی

بویا کاوندی^۱، نوید گنجیان^۱ و مهدی پنبی^{۲*}

۱- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

چکیده - در این مقاله به ارائه مدل یک محیط نیم‌فضای دوبعدی در حضور یک حفره دایره‌ای زیرسطحی تحت پالس اسکالر یکنواخت سطحی پرداخته شده است. در این میان از روش اجزای مرزی تقابل دوگانه استفاده شده است که فرآیند مش‌بندی را بر روی مرز هندسه مدل و در صورت نیاز در اندک نقاط درونی متمرکز می‌سازد. سهولت در فرمولبندی و تحلیل گام به گام گذرا در عدم نیاز به هسته‌ها و حل اساسی حوزه زمان از مشخصات بارز این روش محسوب می‌شود. ابتدا ضمن معرفی روش و ارائه مختصر فرمولبندی، با تحلیل یک مثال کاربردی، الگوریتم تهیه شده مبتنی بر رویکرد مزبور صحت‌سنجی شده است. سپس با مدل‌سازی یک محیط نیم‌فضای حفره‌دار، تغییر مکان گذرا در نقاط مختلف سطح زمین و پیرامون حفره در برابر پالس سطحی از نوع موجک ریکر حساسیت‌سنجی شده است. نتایج نشان داد حضور حفره نه تنها در تغییر الگوی پراکنش بلکه در تشکیل نواحی امن در پشت جبهه موج مؤثر است. استفاده از این روش کارا در حوزه ژئوتکنیک لرزه‌ای به ویژه در تحلیل‌های حاصل از انفجار سطحی^۱ به کلیه محققان توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: روش اجزای مرزی تقابل دوگانه، پالس سطحی، محیط نیم‌فضای حفره‌دار، پاسخ دینامیکی.

A DR-BEM Model for a Half-Space Including the Cavity under Scalar Surface Pulse

Abstract: In this paper, a two-dimensional half-space model was presented in the presence of a subsurface circular cavity under a uniform surface scalar pulse. In this regard, a dual reciprocity boundary element method (DR-BEM) was successfully developed in which the discretizing process only was applied on the boundary of the model as well as in a few internal points. The simple formulation and step-by-step transient analysis in the absence of time-domain fundamental solutions were some of the characteristics of the used approach. First, by introducing the method and briefly presenting the formulation, a time-domain algorithm was prepared based on the mentioned approach, and then it was validated by comparing the existing analytical responses. Moreover, by modeling a half-space domain including a subsurface circular cavity, the transient displacement was obtained at different points of the ground surface and cavity wall subjected to the surface pulse of the Ricker wavelet type function. The results showed that the presence of the cavity was effective not only in changing the distribution pattern but also in the formation of safe areas behind the wavefront. The efficient approach is recommended to all researchers in the field of geotechnical earthquake engineering, especially in the analysis of surface explosions.

Keywords: DR-BEM, half-space, Transient response, Subsurface cavity, Surface Pulse.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.panji@iauz.ac.ir

فهرست علائم

u	تغییر مکان اسکالر	Γ	مرز
\dot{u}	شتاب	Ω	دامنه
C_s	سرعت موج برشی	r_m	فاصله نقطه منبع از نقطه m
G	مدول برشی	$\alpha(t)$	تابع تقریب زمانی
ρ	چگالی	Δt	طول گام زمانی
u^*	حل اساسی تغییر مکان	∇^2	عملگر لاپلاس
P^*	حل اساسی ترکشن		

۱- مقدمه

انتشار امواج از سطح زمین به درون لایه‌های خاک از جمله پدیده‌هایی است که بصورت انفجار، انتشار موج مصنوعی و حرکت وسائط نقلیه سنگین ایجاد می‌شود. این نوع امواج در علوم و صنایع مختلف نظیر صنایع نظامی، مهندسی معدن و بهسازی ژئوتکنیکی خاک مورد توجه می‌باشند. در اغلب موارد انتشار موج سطحی می‌تواند بر سازه‌های مجاور و زیرسطحی مؤثر باشد، بطوریکه تونل‌های زیرزمینی و سازه‌های سطحی پیرامون حوزه انتشار موج تحت تاثیر اثر ناشی از جبهه موج قرار گرفته و دچار آسیب می‌شوند. همچنین موج انعکاس یافته از سطح زمین و سازه‌های زیرسطحی و برگشت آن به درون محیط خاک موجب تداخل امواج شده و متعاقباً موجب پیچیده‌تر شدن الگوی پراکنش و ضرایب بزرگنمایی موج در سطح را به همراه خواهد داشت [۱].

به منظور تحلیل دقیق اثر انتشار موج از سطح، روش‌های متعددی توسعه داده شده است. این روش‌ها در دو دسته عمومی روش‌های صحرایی-آزمایشگاهی و روش‌های محاسباتی تقسیم‌بندی می‌شوند. به‌زعم بسیاری از محققان، روش‌های صحرایی-آزمایشگاهی و نتایج تجربی مستخرج از آن، دقیق‌ترین روش‌ها جهت بررسی اثر انفجار هستند [۲ و ۳]. چارلز و همکاران [۲] با دسته‌بندی روش‌های آزمایشگاهی مختلف در بررسی پدیده انتشار موج حاصل از سطح، یک مطالعه مروری جامع در این

زمینه ارائه کردند. همچنین ان و همکاران [۳] نیز با مدل‌سازی آزمایشگاهی پدیده انفجار سطحی، نحوه انتشار موج و اثر آن بر سازه‌های مجاور را ارزیابی نمودند. با وجود مزایای زیاد روش‌های صحرایی-آزمایشگاهی، با این حال پیاپی این دست روش‌ها بسیار هزینه‌بر بوده و با توجه به شرایط محیطی واقعی همواره قابل اجرا نیست. بنابراین روش‌های محاسباتی می‌تواند به عنوان یک مکمل مهم در کنار روش‌های آزمایشگاهی و تجربی مورد استفاده قرار بگیرد. روش‌های محاسباتی قابل تقسیم به روش‌های تحلیلی و عددی می‌باشد. رویکردهای تحلیلی در مدل‌سازی انتشار موج حاصل از سطح زمین و بخصوص موج ناشی از انفجار عمدتاً با ارائه حل بسته^۷ معادلات حاکم در محیط دوبعدی و سه‌بعدی همراه هستند. فلدگان و همکاران [۴] از جمله محققانی هستند که برای اولین بار با ترکیب تئوری پروالاستیسته و روش تیرالاستیک تیموشنکو توانستند سرعت ذرات و همچنین تنش‌های حاصل در اثر انتشار موج سطحی را در حضور حفره دایره‌ای پوشش‌دار زیرسطحی بصورت حل بسته ارائه دهند. در مطالعه‌ی عابدی و همکاران [۵] با اعمال برخی فرضیات ساده‌کننده، لوله‌های زیرسطحی مبتنی بر تیر بر بستر الاستیک مدل‌سازی شده و پاسخ تحلیلی برای مؤلفه تغییر مکان ارائه شده است. اخیراً وو و همکاران [۶] یک روش شبه‌تحلیلی برای تعیین شعاع پلاستیک موج انفجار سطحی پیشنهاد کردند. به کمک روش مذکور می‌توان یک تخمین از شعاع القایی انفجار و نقاط پلاستیک در محیط خاک تعیین نمود. روش‌های تحلیلی

به دلیل ارائه حل بسته برای پدیده انتشار موج از سرعت بالایی در مدل سازی برخورداری هستند. با این حال امکان در نظر گرفتن شرایط پیچیده در این قسم روش ها دشوار است.

عددی سازی معادلات از جمله روش هایی است که در آن امکان مدل سازی اثر ناشی از مرزها و هندسه های پیچیده و همچنین اثر غیرخطی ناشی از رفتار مصالح فراهم می شود. روش های عددی به دو دسته روش حجمی^۹ و مرزی تقسیم می شوند. در دسته روش های عمدتاً روش اجزای محدود^{۱۰} (FEM) و روش تفاضل محدود^{۱۱} (FDM) مورد توجه قرار می گیرد. این روش ها با گسسته سازی دامنه مسئله موجب می شوند تا بصورت دقیق تمام نقاط محیط در تحلیل شرکت داده شوند. تحقیقات گسترده ای در زمینه مدل سازی عددی پدیده انتشار موج حاصل از سطح بدلیل انفجار سطحی به کمک روش های حجمی نظیر اجزای محدود صورت گرفته است. هوآنگ و همکاران [۷] از جمله محققانی هستند که به کمک نرم افزار تجاری انسیس^{۱۲} اقدام به مدل سازی اندرکنش شمع-سازه در هنگام برخورد امواج منتشر شده از سطح کردند. در این تحقیق علاوه بر ارائه تغییر مکان و فشار وارده شمع، تلاش شده تا اثر موج مؤثر بر سازه های دور دست نیز ارزیابی شده و نتایج حاصل در تدقیق آیین نامه های موجود مورد استفاده قرار گیرد. سیدان و حسینی-نیا [۸] با استفاده از روش تفاضل محدود به مدل سازی تراکم دینامیکی خاک حاصل از موج انفجار پرداختند و اثر حضور حفرات زیرزمینی را ارزیابی نمودند. در مطالعه ملکشاهی و آقاویسی [۹] بصورت آزمایشگاهی و عددی اثر انفجار سطحی بر سازه های سطحی و زیرسطحی شبیه سازی شد. اخیراً نیز مندل و گونل [۱۰] به کمک روش اجزای محدود اثر مواد مصنوعی نظیر ژئومتریال را در میرایی و جذب موج منتشر شده از سطح در حضور تونل زیرسطحی مطالعه نمودند. با وجود دقت بالای روش های حجمی، حجم بالای محاسبات در این روش ها موجب شده تا در سال های اخیر روش های مرزی مورد توجه باشند. در این روش ها عمدتاً گسسته سازی مکانی بر روی مرزهای مسئله

صورت می گیرد و نقاط دامنه کمتر در محاسبات نقش داده می شوند. روش های مرزی به دو دسته روش مستقیم^{۱۳} و روش تقابل دوگانه قابل تقسیم هستند. در روش مستقیم مجهولات مسئله اعم از تغییر مکان و تنش مرزی (ترکشن) مستقیماً از حل سینگولار معادلات تعادل حاصل می شوند، در حالیکه در روش تقابل دوگانه نیاز است تا برای رفع اثر ناشی از اینترگرال-های مضاعف مرزی استفاده شود [۱۳-۱۱]. تحقیقات عمده ای در مدل سازی پدیده انتشار موج^۳ سطحی به کمک روش های مرزی مستقیم صورت گرفته که از آن جمله می توان به تحقیقات آرج و اسمید [۱۴]، چن و همکاران [۱۵] و ابطی و همکاران [۱۶] اشاره کرد. لازم به ذکر است، از سوی دیگر قابلیت کاربردی روش مزبور در تحلیل های استاتیکی و دینامیکی حفرات زیرزمینی کاملاً مشهود است [۱۷ و ۱۸]. استفاده از روش غیر مستقیم با تقابل دوگانه^۲ اولین بار توسط ناردینی و بریبا گزارش شده است [۲۰]. این محققان با توسعه روش مزبور مفهوم و نحوه بکارگیری توابع تقریب را در این روش شرح دادند. روبل و بریبا استفاده از این روش را برای محیط های غیرخطی توسعه دادند [۲۲]. بعدها پاتریج و بریبا توابع تقریب، فرمول بندی و الگوریتم های روش تقابل دوگانه را برای حل مسائل مختلف ارائه نمودند [۲۳]. در پژوهش آندریچ از روش اجزای مرزی تقابل-دوگانه برای مدل سازی پدیده انتشار موج ناشی از حرکت اتومبیل های سنگین بر لایه های راه سازی استفاده شد [۲۹]. یان و همکاران با توسعه روش تقابل دوگانه یک روش جدید با عنوان روش هیبرید دوگانه را معرفی نمودند که ترکیبی از روش های تقابل دوگانه، روش نقطه مرزی و روش تقریب شعاعی است [۳۰]. در مطالعه یو و همکاران ضمن توسعه روش تقابل-دوگانه، شکل جدید از روش مزبور با عنوان روش تقابل دوگانه ایزومتریک پیشنهاد شد که برای تحلیل انتقال حرارت دینامیکی مناسب می باشد. مهمترین تفاوت این روش با روش های متداول تقابل دوگانه استفاده از توابع تقریب بی-اسپیلاین در روند تحلیل است [۳۱]. گالویس و همکاران یک نرم افزار محاسباتی کامل، برای تحلیل مسائل مختلف الاستودینامیک خطی به کمک روش

تقابل دوگانه توسعه دادند [۳۳]. اخیراً نیز نارواژ و یوسچی روش جدیدی جهت بهینه‌سازی انتگرالهای روش تقابل دوگانه استفاده کرده و قابلیت‌های آن را توسعه دادند [۳۴]. روش تقابل دوگانه به دلیل فرمولبندی ساده‌تر، استفاده از حل‌های اساسی مستقل از زمان و امکان مدل‌سازی مسائل غیرخطی که پیشتر توسط روش‌های مرزی به سختی انجام می‌شد، از مزیت‌های عمده‌ای نسبت به سایر روش‌های تحلیل دینامیکی موجود برخوردار است. چنانچه ادبیات فنی نشان داد توسعه‌ی روش‌های مرزی در قالب روش تقابل دوگانه برای تحلیل دینامیکی محیط نیم‌فضا تحت پالس سطحی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین در این پژوهش ضمن گسترش فرمولبندی روش اجزای مرزی تقابل دوگانه در مدل‌سازی مسأله مزبور و عددی‌سازی آن در یک کد رایانه‌ای، به ارزیابی صحت و سقم نتایج حاصل در مقایسه با ادبیات فنی پرداخته می‌شود. سپس با تهیه مدل یک بار سطحی در حضور حفره زیرزمینی، تغییر مکان دینامیکی سطح زمین و پیرامون حفره حساسیت‌سنجی می‌شود. توسعه یک روش کارا در تسهیل مدل‌های انفجار و ارائه برخی نتایج جدید بر نقاط قوت و نوآوری در سهم دانش تحقیق حاضر صحنه می‌گذارد.

۲- معادله حاکم و حل تقابل دوگانه

با اعمال تجزیه هلمهولتز بر معادلات تعادل سه‌بعدی الاستودینامیک، دو دسته معادله قابل استخراج هستند که یک دسته شامل معادلات برداری معرف تغییر مکان درون‌صفحه و دسته دوم معادله موج اسکالر^۴ معرف تغییر مکان برون‌صفحه است [۱۱-۱۳ و ۱۹]. بدین ترتیب معادله انتشار موج اسکالر دوبعدی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۹]:

$$C_s^2 \nabla^2 u = \ddot{u} \quad (1)$$

که در آن C_s مبین سرعت موج برشی می‌باشد. این پارامتر برحسب چگالی ρ و مدول برشی G بصورت $C_s = \sqrt{G/\rho}$ قابل محاسبه است. همچنین، در این رابطه u معرف مؤلفه تغییر مکان برون‌صفحه و \ddot{u} مبین شتاب حرکت است. به منظور حل معادله مذکور به کمک روش تقابل دوگانه با پیش ضرب حل اساسی

استاتیکی فضای کامل به طرفین معادله و استفاده از روش باقیمانده‌های وزن‌دار و سپس فرآیند مرزی‌سازی، معادله انتگرال مرزی-حجمی زیر حاصل می‌شود [۲۰]:

$$C_s^2 \left[c^i u^i + \int_{\Gamma} p^* u \, d\Gamma - \int_{\Gamma} u^* p \, d\Gamma \right] = \int_{\Omega} u^* \ddot{u} \, d\Omega \quad (2)$$

که در آن u^* و p^* به ترتیب حل‌های اساسی استاتیکی برای مؤلفه‌های تغییر مکان^{۱۳} و ترکشن^{۱۴} بوده و در مرجع مختلف [۱۲ و ۱۳ و ۲۰-۲۲] در دسترس می‌باشند. در این معادله p و u به ترتیب مؤلفه تغییر مکان و ترکشن است. وجود عامل اینرسی \ddot{u} و انتگرال حجمی مرتبط با آن موجب می‌شود که معادله فوق کاملاً مرزی (Γ) نباشد و گسسته‌سازی حجمی محیط مسأله ضروری گردد. به منظور حل این مشکل از مفهوم تابع تقریب^{۱۵} استفاده می‌شود. بنابراین لازم است ابتدا تابع تغییر مکان به شکل زیر تقریب زده شود:

$$\ddot{u} = \sum_{m=1}^M (K - r_m) \ddot{\alpha}_m(t) \quad (3)$$

که در آن K یک عدد ثابت بین ۰ تا $2[20-22]$ r_m فاصله منبع بار از نقطه گیرنده m ام و $\ddot{\alpha}_m$ ثابت زمانی مجهول m ام است. طبق معادله فوق برای تقریب میدان تغییر مکان مجموعاً از M عدد تابع تقریب استفاده شده است. بنابراین براساس اینکه عامل زمان بصورت $\ddot{\alpha}_m$ تنها مجهول معادله (۳) است، می‌توان انتگرال‌های حجمی مرتبط با توابع فاصله را در یک فرآیند مرزی‌سازی مجدد قرار داد. بدین منظور و جهت مرزی‌سازی مجدد با جایگذاری رابطه (۳) در معادله انتگرالی (۲)، جملات موجود در طرف راست معادله به شکل زیر بازنویسی می‌شوند [۱۳]:

$$\int_{\Omega} u^* \ddot{u} \, d\Omega = \sum_{m=1}^M \int_{\Omega} u^* (K - r_m) \, d\Omega \ddot{\alpha}_m(t) \quad (4)$$

همانطور که در رابطه فوق قابل مشاهده است انتگرال حجمی سمت راست، کاملاً معلوم بوده و می‌توان به کمک تئوری تقابل دوطرفه بتی آن را به انتگرال مرزی تبدیل کرد [۲۱، ۲۳]:

$$H = C_s^2 \sum_{i=1}^{NE} \int_{\Gamma_i} p^* d\Gamma_i \quad (8)$$

$$G = C_s^2 \sum_{i=1}^{NE} \int_{\Gamma_i} u^* d\Gamma_i \quad (9)$$

$$M = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{NE} \left\{ - \int_{\Gamma_i} p^* \left[\frac{K}{4} + \frac{r_m}{9} \right] r_m^2 d\Gamma_i + \int_{\Gamma_i} u^* \left[\frac{Kr_m}{2} + \frac{r_m^2}{3} \frac{\partial r}{\partial n} \right] d\Gamma_i \right\} \quad (10)$$

همچنین طبق رابطه (۳) می توان نوشت:

$$\{\ddot{U}\} = [F]\{\ddot{\alpha}\} \rightarrow \{\ddot{\alpha}\} = [F]^{-1}\{\ddot{U}\} \quad (11)$$

با جایگذاری رابطه (۱۱) در رابطه (۷) در نهایت فرم گسسته معادله موج بر حسب تغییر مکان و شتاب بشکل زیر تعیین می شود:

$$[H]\{U\} + [G]\{P\} = [M][F]^{-1}\{\ddot{U}\} \quad (12)$$

علاوه بر گسسته سازی مکانی معادلات مرزی، نیاز است تا تغییرات زمانی میدان تغییر مکان در رابطه (۱۲) نیز گسسته سازی شوند. محققان مختلف از روش هایی نظیر تقاضل محدود [۲۱]، هوبلت^{۱۷} [۲۶] و بتای نیومارک^{۱۸} [۲۷] در این جهت بهره برده اند. با این حال ناردینی و بریبا [۲۰، ۲۴، ۲۵] در مطالعات خود نشان داده اند که روش هوبلت به دلیل ایجاد نوعی میرایی محاسباتی از ناپایدار شدن پاسخها در روش اجزای مرزی با تقابل دوگانه جلوگیری می کند و بنابراین در این تحقیق از روش هوبلت جهت گسسته سازی جملات زمانی استفاده شده است. از گسسته سازی محور زمان با N گام زمانی به طول Δt، روش هوبلت برای تخمین مؤلفه اینرسی به صورت زیر قابل استفاده

است:

$$\{\ddot{U}\} = \frac{2\{U\}^{t+\Delta t} - 5\{U\}^t + 4\{U\}^{t-\Delta t} - \{U\}^{t-2\Delta t}}{\Delta t^2} \quad (13)$$

که در آن {U}^{t+Δt}، {U}^t، {U}^{t-Δt} و {U}^{t-2Δt} به ترتیب مبین تغییر میدان تغییر مکان در گام های زمانی t + Δt، t، t - Δt و t - 2Δt هستند. در نهایت معادله گسسته شده (۱۲) با بکارگیری معادله (۱۳) در یک کد رایانه ای به زبان متلب پیاده سازی شده و نتایج حاصل از آن به کمک حل های بنچمارک در ادامه

$$\int_{\Omega} u^* (K - r_m) d\Omega = -c^{(i)} \left[\frac{K}{4} + \frac{r_m^{(i)}}{9} \right] r_m^{2(i)} - \int_{\Gamma} p^* \left[\frac{K}{4} + \frac{r_m^{(i)}}{9} \right] r_m^{2(i)} d\Gamma + \int_{\Gamma} u^* \left[\frac{Kr_m^{(i)}}{2} + \frac{r_m^{2(i)}}{3} \frac{\partial r}{\partial n} \right] d\Gamma \quad (5)$$

در نهایت فرم کلی و مرزی شده معادله انتشار موج را به صورت زیر حاصل کرد [۱۳، ۲۱، ۲۳]:

$$C_s^2 \left[c^{(i)} u^{(i)} + \int_{\Gamma} p^* u d\Gamma - \int_{\Gamma} u^* p d\Gamma \right] = \sum_{m=1}^M \left\{ -c^{(i)} \left[\frac{K}{4} + \frac{r_m^{(i)}}{9} \right] r_m^{2(i)} - \int_{\Gamma} p^* \left[\frac{K}{4} + \frac{r_m^{(i)}}{9} \right] r_m^{2(i)} d\Gamma + \int_{\Gamma} u^* \left[\frac{Kr_m^{(i)}}{2} + \frac{r_m^{2(i)}}{3} \frac{\partial r}{\partial n} \right] d\Gamma \right\} \ddot{\alpha}_m(t) \quad (6)$$

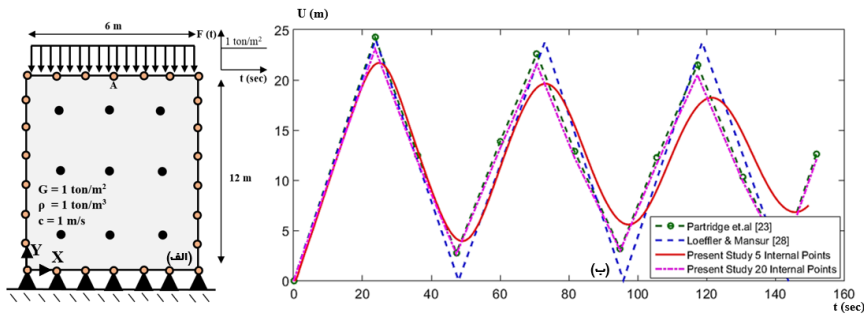
که در رابطه فوق n مبین مؤلفه بردار نرمال عمود بر مرز، r_m^{(i)} تابع فاصله در گره مورد ارزیابی ام و c^{(i)} زاویه شکست مرزی گره نام است. با وجود اینکه معادله (۶) کاملاً مرزی است، ولی مطالعات مختلف [۲۰، ۲۴، ۲۵] نشان داده است که انتخاب تعداد معینی نقاط درونی^{۱۶} در دامنه مسئله یک امر ضروری در روش تقابل دوگانه است و موجب تسهیل و تدقیق فرآیند تحلیل می شود.

۳- عددی سازی

از گسسته سازی مکانی معادله انتگرال مرزی (۶) به کمک NE المان مرزی درجه ثابت و M تابع تقریب، فرم قابل حل معادله موج بصورت زیر حاصل می شود:

$$[H]\{U\} + [G]\{P\} = [M]\{\ddot{\alpha}\} \quad (7)$$

که در آن {U} و {P} به ترتیب مبین تغییر مکان و تنش مرزی در نقاط گره ای بوده [H]، [G] و [M] ماتریس ضرایب به شکل زیر هستند:



شکل ۱- مدل اجزای مرزی تقابل دوگانه یک محیط پیوسته دوبعدی بصورت تیر یک سرگیردار (الف) هندسه مدل تحت مطالعه ب) تغییر مکان اسکالر نقطه A

که برای مسأله مشابه توسط پارتریج و همکاران [۲۲] حل شده نیز در شکل (ب-۱) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می شود روش تقابل دوگانه بخوبی قابلیت مدل سازی اثر انتشار بار دینامیکی سطحی را دارا می باشد.

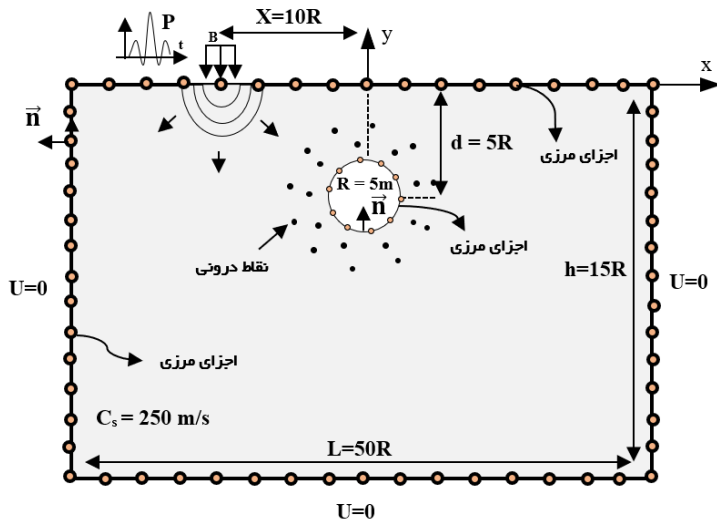
۵- مطالعه پارامتریک

یکی از مهمترین مسائل دینامیکی مطرح در علوم مهندسی معدن و ژئوتکنیک پدیده انتشار بار به صورت ضربه آبی در سطح زمین است. در مهندسی ژئوتکنیک این گروه از امواج در دسته امواج انفجاری برای تراکم خاک یا به شکل ضربه برشی دینامیکی در روش های صحرائی برای شناسایی خاک کاربرد دارد. همواره از پدیده انفجار سطحی برای تراکم بزرگ مقیاس بسیار استفاده شده است [۲ و ۳]. همچنین در مهندسی معدن از روش انفجار برای استخراج و روآوری ذخایر زیرزمینی معادن بهره برده می شود [۴]. وجود روش های قابل اعتماد عددی همواره از چالش های تحلیل انفجار و انتشار موج از سطح بوده است. روش مرزی^۱ به دلیل گسسته سازی مرزی می تواند یک راه حل بهینه برای مدل سازی بزرگ مقیاس پدیده انتشار موج از سطح به حساب بیاید. بنابراین در این قسمت با مدل سازی مسأله انتشار موج حاصل از سطح زمین به کمک روش اجزای مرزی تقابل دوگانه تلاش می شود تا کارایی این روش عددی در این زمینه به اثبات برسد.

صحت سنجی شده است.

۴- صحت سنجی

به منظور صحت سنجی فرمولبندی و کد رایانه ای توسعه داده شده، از یک مسأله دینامیکی کلاسیک با پاسخ های تحلیلی در دسترس استفاده شده است. در این راستا مطالعه لوفر و منصور [۲۸] مورد توجه قرار گرفته است که در آن تغییر مکان و تنش های دینامیکی یک محیط پیوسته دوبعدی بصورت تیر یک سرگیردار تحت فشار یکنواخت گذرا ارائه شده است. این پاسخ تحلیلی برای مؤلفه تغییر مکان دینامیکی در نقطه میانی سطح بارگذاری (نقطه A در شکل ۱-الف) استخراج شده و با پاسخ دینامیکی حاصل از کد رایانه ای مقایسه شده است. به منظور مدل سازی تقابل دوگانه این هندسه تنها از ۲۰ المان مرزی و ۹ نقطه درونی استفاده شده است. طول گام زمانی برابر $\Delta t = 0.5 \text{ sec}$ در نظر گرفته شده و تعداد گام های زمانی برابر ۳۰۰ انتخاب شده است. بارگذاری از نوع ثابت دینامیکی با شدت ۱ تن بر متر مربع بر وجه آزاد تیر وارد شده است. سایر مشخصات مدل در شکل (۱-الف) ارائه شده است. در شکل (ب-۱) نتایج حاصل از روش تقابل دوگانه و روش تحلیلی لوفر و منصور [۲۸] برای مؤلفه تغییر مکان نقطه A مقایسه شده است. همچنین به منظور مقایسه هر چه بهتر، نتایج حاصل از روش اجزای مرزی



شکل ۲- مدل اجزای مرزی تقابل دوگانه یک لایه خاک مشتمل بر حفره دایره‌ای زیر سطحی در برابر یک پالس تنش سطحی از نوع موجک ریکر

۵-۱- مشخصات مدل

در شکل (۲) نمای کلی مدل یک محیط خاک شامل یک حفره دایره‌ای زیرزمینی با شعاع R و مدفون در عمق $5R$ نشان داده شده است. محیط مورد نظر دارای مشخصات مصالح با سرعت موج برشی C_s معادل 250 متر بر ثانیه و مدول برشی G ، 10° نیوتن بر متر مربع است. سطح زمین بصورت تنش آزاد بوده و موج منتشر شده از نوع تنش بصورت تابع ریکر است که بصورت ناگهانی در نقطه X در فاصله $10R$ در سطح وارد می‌شود. به منظور تحلیل مدل به روش تقابل دوگانه از 50 المان مرزی و 20 نقطه درونی استفاده شده است. نحوه چیدمان نقاط درونی مطابق شکل (۲) انجام گرفته است. موجک ریکر بصورت یک موج فشاری با دامنه P برابر، یک تن بر متر مربع در عرض B به طول یک متر ($R/5$) در سطح وارد می‌شود. پارامتر شیفیت زمان موجک ریکر معادل 1.5 ثانیه و فرکانس آن 2.5 هرتز در نظر گرفته شده است. شمای کلی موجک ریکر مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۳) نمایش داده شده است. شایان ذکر است، برای حل

این مسأله از 200 گام زمانی با حدافاصل 0.1 ثانیه استفاده شده است.

محققان مختلف از یک پارامتر بی‌بعد با عنوان β جهت تعیین رابطه بین حداکثر فاصله بین گره مرزی و طول گام زمانی بهره می‌برند. این پارامتر به کمک رابطه زیر قابل تعریف است [۳۲]:

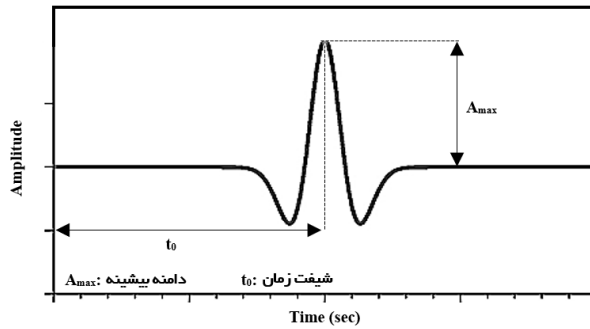
$$\beta = \frac{C_s \Delta t}{L} \quad (14)$$

که در آن C_s سرعت موج برشی، Δt طول گام زمانی و L فاصله بین گره مرزی است. طبق تحقیقات انجام شده مدل عددی اجزای مرزی زمانی دارای پایداری و همگرایی است که پارامتر β به یک نزدیک باشد. بدین ترتیب می‌توان با در دسترس بودن مشخصات مصالح و طول گام زمانی حداکثر طول المان مرزی را طبق رابطه زیر تعیین نمود:

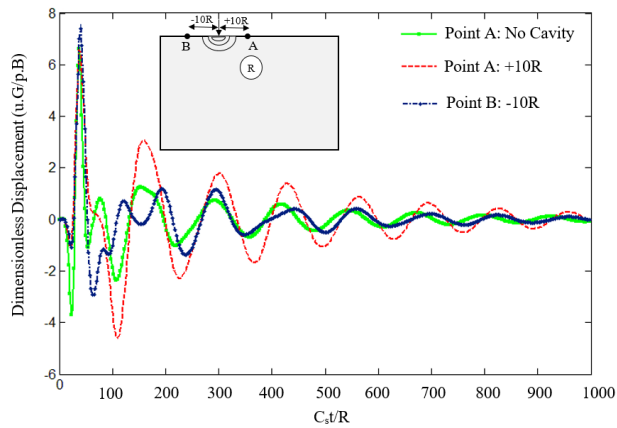
$$L \cong C_s \Delta t \quad (15)$$

۵-۲- نتایج حوزه زمان

یکی از قابلیت‌های مهم روش اجزای مرزی تقابل دوگانه امکان



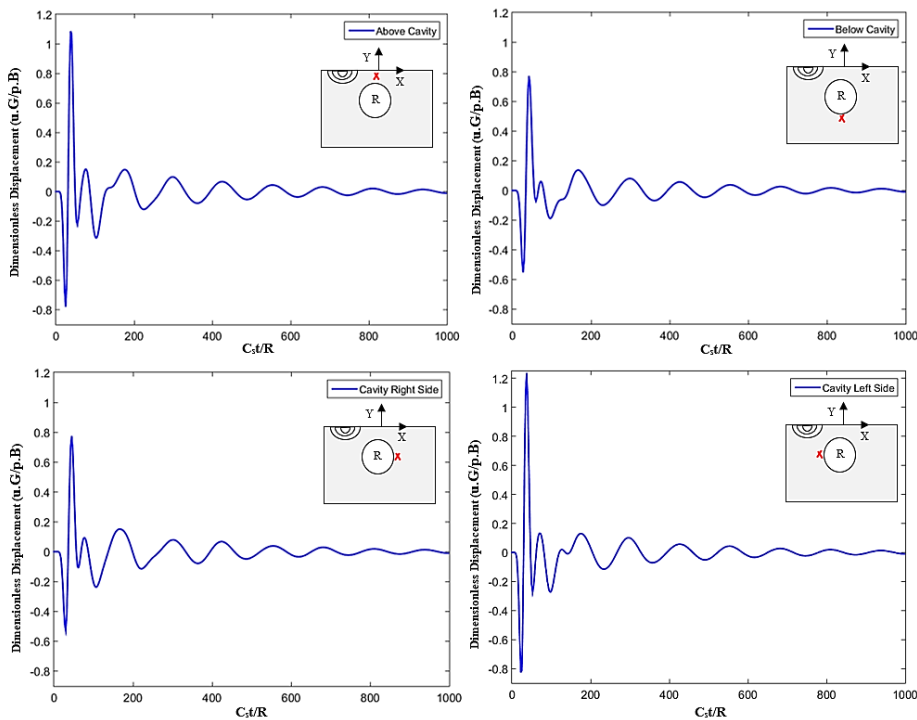
شکل ۳- تابع موجک ریکر به عنوان موج انتشار یافته سطحی. در این شکل A_{max} مبین دامنه بیشینه موج و t_0 پارامتر شیفت زمانی می باشد.



شکل ۴- دامنه تغییر مکان برون صفحه بی بعد سطح زمین برای نقاط A و B به ترتیب در فواصل مثبت و منفی 10° برابر شعاع حفره از مرکز ناحیه پالس فشاری (لازم به ذکر است در این شکل پاسخ نقطه A در حالت عدم حضور حفره نیز نشان داده شده است).

در سطح باقی می ماند در حالیکه در نواحی دورتر میرا شدن پاسخ سریع تر به وقوع پیوسته است. این مورد می تواند به دلیل انعکاس و اثر پراکنش ناشی از حضور حفره باشد بطوریکه امواج فی ما بین حفره و سطح زمین محصور می شوند و برهم نهی بخشی از آن موجب افزایش مقطعی دامنه پاسخ و ازدیاد انرژی آن خواهد شد. اما در ناحیه دورتر شرایط متفاوت است بطوریکه در این نواحی پاسخ حاصل عمدتاً با پاسخ حالت بدون حفره یکسان هستند.

استخراج مستقیم پاسخ های دینامیکی در حوزه زمان است. در شکل (۴) تغییر مکان بی بعد دو نقطه در فاصله مفروض $10R$ (50° متر) در طرفین مرکز محل اعمال ضربه سطحی ارائه شده است. آنچه مسلم است در شرایط عدم حضور حفره پاسخ این دو نقطه یکسان می باشد، در صورتیکه حضور حفره موجب می شود تا پاسخ نقطه نزدیک متفاوت از پاسخ ناحیه دور از حفره باشد. بنابراین چنانچه در شکل (۴) مشاهده می شود، نوسان حاصل در پاسخ در نواحی نزدیک حفره تا مدت زمان بیشتر



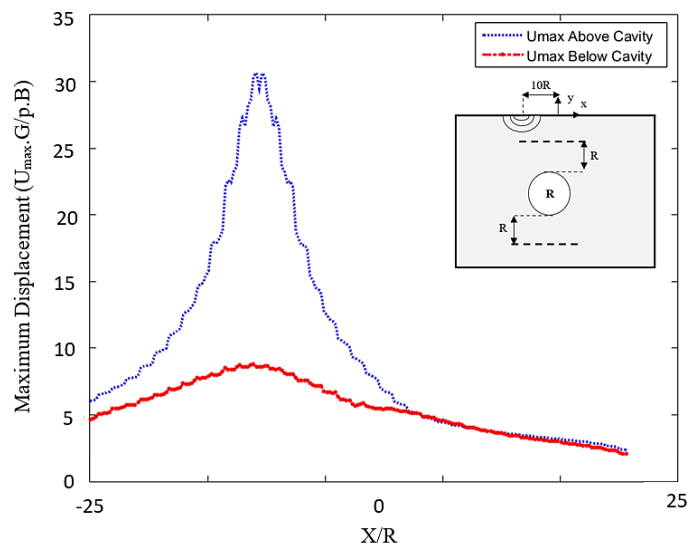
شکل ۵- تغییر مکان بی بعد نقاط پیرامون حفره دایره‌ای الف) تاج حفره ب) کف حفره پ) دیواره راست حفره ت) دیواره چپ حفره

۵-۳- نمودار حرارتی

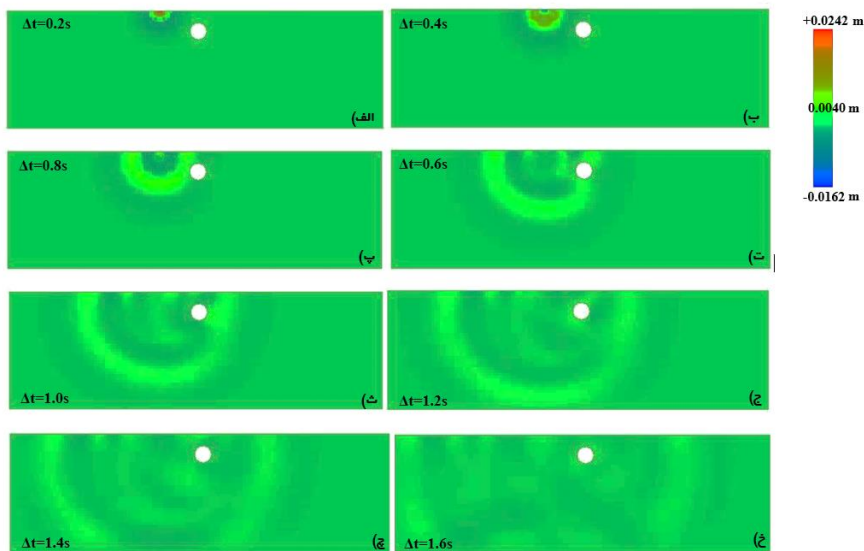
یکی از ویژگی‌های مهم روش اجزای مرزی تقابل‌دوگانه آن است که برای کلیه نقاط داخل محیط مورد تحلیل، تغییر مکان دینامیکی در گام‌های زمانی مختلف قابل حصول است و نمودارهای هم‌تراز ترسیم می‌شود. بر این اساس در شکل (۷) نمودار حرارتی (اسنپ‌شات) توسعه و پراکنش پالس فشاری بر حسب زمان ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با انتشار موج ضربه و برخورد آن به حفره زیرسطحی امواج انعکاس یافته از سطح حفره به سمت سطح زمین بازگشته و پس از انجام تداخل و برهم نهی امواج، یک الگوی اندرکنشی پیچیده در ناحیه نزدیک جبهه انتشار شکل می‌گیرد. این در صورتی است که در ناحیه پشت جبهه انتشار، یک ناحیه به اصطلاح سایه شکل گرفته که

در شکل (۵) تغییر مکان چهار سمت پیرامون حفره دایره در نواحی تاج، کف، راست و چپ حفره بر حسب زمان ترسیم شده است. همانطور که در شکل نیز دیده می‌شود، تغییر مکان بیشینه نقاط تاج حفره نسبت به کف ۱.۵ برابر بیشتر است.

به صورت مشابه در شکل (۶) دامنه تغییر مکان بی بعد نقاط واقع بر روی یک خط مستقیم افقی در فاصله R (پنج متر) بالا و پایین حفره نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود، تغییر مکان در نزدیکی ناحیه پالس بیشینه است و با فاصله گرفتن از آن کاهش می‌یابد. همچنین دامنه تغییر مکان با فاصله گرفتن از سطح زمین کاهش می‌یابد و این کاهش با ضریب شش برابر رخ داده است.



شکل ۶- دامنه بی‌بعد تغییر مکان برای نقاط واقع بر امتداد مستقیم افقی در فاصله R بالا و پایین حفره



شکل ۷- نمودار حرارتی پالس فشاری سطحی در حضور حفره دایره‌ای زیرسطحی

پاسخ‌ها در آن کمینه هستند. به عبارت دیگر حفره همانند یک جاذب موج عمل کرده و مانع از نفوذ موج به ناحیه مورد نظر شده است. همچنین در نمودار اسنپ شات (۷-ت) مؤلفه‌های انعکاس از سطح حفره نیز بخوبی مشخص است که قابلیت روش تقابل دوگانه در مدل‌سازی این قسم مسائل بخوبی مشاهده می‌شود.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به تحلیل انتشار موج ناشی از یک پالس فشاری سطحی در حضور یک حفره دایره‌ای زیرسطحی پرداخته شد. در این راستا از روش اجزای مرزی تقابل دوگانه استفاده شد که فرآیند مش‌بندی را بر روی مرز مدل و در صورت نیاز در اندک نقاط درونی نهادینه ساخت. ضمن توسعه فرمولبندی برای مسأله مزبور و ارائه فرم گسسته‌شده آن، یک الگوریتم گام به گام محاسباتی به کمک زبان متلب توسعه داده شد. در ادامه سپس دقت نتایج حاصل با تحلیل برخی مسائل کلاسیک در مقایسه با پاسخ‌های تحلیلی در دسترس صحت‌سنجی شد. نتایج اعتبارسنجی از تدقیق و قابلیت روش تقابل دوگانه در تحلیل مسائل انتشار موج حاصل از سطح حکایت داشت. در گام بعد با مدل‌سازی انتشار موج ضربه‌ای مؤثر در سطح زمین در حضور حفره زیرسطحی تلاش شد تا پاسخ در نقاط مختلف ارائه و مقایسه شود. در نهایت نیز قابلیت‌های بارز روش تقابل دوگانه با فرض تعداد بیشمار نقاط درونی و حصول اسنپ شات انتشار موج در نقاط مختلف مبرم شد. نتایج حاصل از این پژوهش و مطالعه پارامتریک انجام شده به صورت زیر قابل جمع‌بندی است:

واژه‌نامه

۱- روش تقابل دوگانه یک روش مرزی کارا در مدل‌سازی مسائل دینامیکی شناخته شد و به دلیل بکارگیری حل‌های اساسی استاتیکی مستقل از زمان در حل مسائل دینامیکی، فرمولبندی و روند مدل‌سازی ساده‌تری را نسبت به سایر روش‌ها ارائه نمود. با این حال استفاده از نقاط درونی جهت افزایش دقت محاسبات در این روش اجتناب ناپذیر شد که تا حدودی از رویکرد مرزی محض فاصله گرفت.

۲- چنانچه مشاهده شد در استفاده از روش تقابل دوگانه تنها مستلزم به گسسته‌سازی مرزهای محیط مسأله شامل مرز محیط خاک و مرز حفره شد. نقاط درونی در مدل‌سازی تقابل دوگانه تنها در محدوده اطراف حفره و ناحیه مجاور پالس فشاری انتخاب شد.

۳- با علم بر تداخل و برهم‌نهی امواج فی‌مابین حفره و سطح زمین، عدم همگرایی زود هنگام در پاسخ سطح برای نقطه نزدیک حفره حاصل شد. این در صورتی بود که برای نقطه دور از حفره نوسان پاسخ مشابه محیط خاک بی‌حفره بود و تسریع در همگرایی مشاهده شد.

۴- از نتایج پیرامون حفره مشخص شد که تغییر مکان تاج با شدت بیشتر و در حدود ۱.۵ برابر پاسخ کف عارضه حاصل شد. همچنین در نزدیک‌ترین نقطه به محل اعمال پالس (دیواره چپ حفره) حداکثر ضریب بزرگنمایی^۵ در حدود ۱.۷ به چشم خورد.

۵- چنانچه از نتایج نقاط هم‌عمق در بالا و پایین حفره مشاهده شد تغییر مکان در نزدیکی پالس فشاری با پیک ناگهانی مواجه شد که این مقدار با ضریب افزایش شش برابر در مقایسه با نقاط پیرامون در بالای حفره رویت شد.

- 1- Direct Boundary Element Method (DBEM)
- 2- Dual Reciprocity Boundary Element Method (DR-BEM)
- 3- Wave Propagation
- 4- Scalar Wave
- 5- Amplification Factor
- 6- Surface Explosion

- 7- Closed Form Solution
- 8- Boundary Methods
- 9- Volumetric Methods
- 10- Finite Element Method
- 11- Finite Difference Method
- 12- Ansys Software
- 13- Displacement Fundamental solution

14- Traction Fundamental solution
15- Approximate Function
16- Internal Points

17- Houbolt Method
18- Newmark Beta Method

۷-مراجع

1. Kramer, S., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, London, 1996.
2. Charles, E., Anderson, Jr., Behner, T., and Carl, E. W., "Mine Blast Loading Experiments", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, pp. 697-706, 2011.
3. An, J., Tuan, C. Y., ASCE, F., Cheeseman, B. A., and Gazonas, G. A., "Simulation of Soil Behavior under Blast loading", *International Journal of Geotechnics*, Vol. 10, pp. 323-334, 2011.
4. Feldgun, V. R., Kochetkov, A. V., Karinski, Y. S., and Yankelevsky, D. Z., "Blast Response of a Lined Cavity in a Porous Saturated Soil", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 953-966, 2008.
5. Abedi, A. S., Hataf, N., and Ghahramani, A., "Analytical Solution of the Dynamic Response of Buried Pipelines Under Blast Wave", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 88, pp. 301-306, 2016.
6. Wu, Z., Rao, P., Nimbalkar, S., Chen, Q., Cui, J., and Ouyang, P., "A Semi-Analytical Solution for Shock Wave Pressure and Radius of Soil Plastic Zone Induced by Lightning Strikes", *Materials*, Vol. 15, No. 2239, pp. 2-18, 2022.
7. Huang, B., Gao, Q., Wang, J., Jiang, X., Wang, X., Jiang, B., and Wu, W., "Dynamic Analysis of Pile-Soil-Structure Interaction System Under Blasting Load", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 638, pp. 433-436, 2014.
8. Seyedan, M. J., and Seyedi Hosseininia, E., "Significance of Soil Compaction on Blast Resistant Behavior of Underground Structures: A Parametric Study", *Civil Engineering Infrastructures Journal*, Vol. 48, No. 2, pp. 359-372, 2015.
9. Malekshahi, M., and Akhayeissy, A. H., "Experimental Study of Masonry Structure under Impact Loading and Comparing it with Numerical Modeling Results via Finite Element Model Updating", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, Vol. 8, pp. 90-105, 2020.
10. Mandal, J., and Goel, M. D., "Effect of Geo-Material on Dynamic Response of Tunnel Subjected to Surface Explosion", *Geotechnics*, Vol. 2, pp. 635-648, 2022.
11. Banerjee, P. K., and Butterfield, R., *Boundary Element Method in Geomechanics*, Wiley, London, 1977.
12. Brebbia, C. A., and Dominguez, J., *Boundary Elements an Introductory Course*, Computational Mechanics Publications, ISBN: 1562520873, 1992
13. Dominguez J., *Boundary Element in Dynamics. Computational Mechanics Publications*. ISBN: 1562521829, 1993.
14. Auersch, L., and Schmid, G., "A simple Boundary Element Formulation and Its Application to Wavefield Excited Soil-Structure Interaction", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19, pp. 931-947, 1990.
15. Chen, H., Zhou, J., Fan, H., Jin, F., Xu, Y., Qiu, Y., Wang, P., and Xie, W., "Dynamic Responses of Buried Arch Structure Subjected to Subsurface Localized Impulsive Loading: Experimental Study", *International Journal of Impact Engineering*, pp. 1-57, 2013.
16. Abtahi, F., Hosseini, M., and Shah Hosseini, A., "Effect of Blast Loading on Stability of Ghareh Changool Ramp in Zehabad Lead and Zinc Mine", *Journal of Engineering Geology*, Vol. 13, No. 3, pp. 339-364, 2019.
17. Panji, M., and Ansari, B., "Modeling Pressure Pipe Embedded in Two-Layer Soil by a Half-Plane BEM", *Computers and Geotechnics*, Vol. 81, pp. 360-367, 2017a.
18. Panji, M., and Ansari, B., "Transient SH-Wave Scattering by the Lined Tunnels Embedded in an Elastic Half-Plane", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 84, pp. 220-230, 2017b.
19. Love, A. E. H., *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*, Dover, New York, 1944.
20. Nardini, D., and Brebbia, C. A., "A New Approach to Free Vibration Analysis using Boundary Elements", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 7, pp. 157-162, 1983.
21. Partridge, P. W., and Brebbia, C. A., Computer Implementation of the BEM Dual Reciprocity Method for the Solution of General Field Equations", *Communications in Applied numerical methods*, Vol. 6, pp. 83-92, 1990.
22. Wrobel, L. C., and Brebbia, C. A., "The dual Reciprocity Boundary Element Formulation for Nonlinear Diffusion Problems", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 65, pp. 147-164, 1987.
23. Partridge, P. W., Brebbia, C. A., and Wrobel, L. C., *The Dual Reciprocity Boundary Element Method. Computational Mechanics Publications*, ISBN: 0945824823, 1992.
24. Nardini, D., and Brebbia, C. A., *Boundary Integral Formulation of Mass Matrixes for Dynamic Analysis, In Topics in Boundary Research*. Springer-Verlag, Berlin and New York, 1985.
25. Nardini, D., and Brebbia, C. A., Transient Boundary Element Electrodynamics Using Dual Reciprocity

- Method and Model Superposition, *Boundary Elements VIII*, Vol.1, Springer-Verlag, Berlin and New York, 1986.
26. Johnson, D. E., "A Proof of the Stability of the Houblot Method", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 4, No. 8, pp. 1450-1451, 1996.
27. Newmark, N. M., "A Method of Computation for Structural Dynamics", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 85, No. 3, pp. 67-94, 1959.
28. Loeffler, C. F., and Mansur, W. J., Dual Reciprocity Boundary Element Formulation for Potential Problems in Infinite Domains, in *Boundary Elements X*, Computational Mechanics Publications, Vol 2, Berlin and New York, 1988
29. Andrej, T., "Wave Propagation In Homogeneous Elastic Half-Space Using The Dual Reciprocity Boundary Element Method", *Ph.D Thesis*, Faculty of Civil Engineering of the Ruhr University Bochum, 2005.
30. Yan, F, Feng, X. and Zhou, H., "A Dual Reciprocity Hybrid Radial Boundary Node Method Based on Radial Point Interpolation Method", *Comput Mech*, Vol. 45, pp. 541-552, 2010.
31. Yu, B., Cao, G., Huo, W., Zhou, H., and Atroshchenko, E., "Isogeometric Dual Reciprocity Boundary Element Method for Solving Transient Heat Conduction Problems with Heat Sources", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol, 385, No. 113197, pp. 1-20, 2021.
32. Dominguez, J., and Meise, T., "On the Use of the BEM for Wave Propagation in Infinite Domains", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 8, No. 3, pp. 132-138, 1991.
33. Galvis, A. F., Prada, D. M., Moura, L. S., Zavaglia, C., Foster, J. M., Sollero, P., and Wrobel, L. C., "BESLE: Boundary Element Software for 3D Linear Elasticity", *Computer Physics Communications*, Vol. 265, p. 108009, 2021.
34. Yu, J., Lei, Z., Yao, Q., Zhou, F., and Pan, X., "A Bounded Randomly Variable Shape Multi-Quadric Interpolation Method in Dual Reciprocity Boundary Element Method", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 134, pp. 377-387, 2022.