

مروری بر ادبیات فنی تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تحت امواج مهاجم SH

مهدی پنجی، دانشجوی دکتری، گروه خاک و پی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
محسن کمالیان، دانشیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
جعفر عسگری مارنانی، استادیار دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
محمد کاظم جعفری، استاد پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

چکیده

حائز اهمیت باشد. در این راستا و جهت دستیابی به موارد مذکور محققان و پژوهشگران به سمت مدل‌سازیهای دوبعدی و سه‌بعدی سوق یافتند.

به طور کلی مدل‌سازی و تحلیل لرزه‌ای دوبعدی و سه‌بعدی عوارض توپوگرافی در سه دسته روش: ۱- روشهای تحلیلی، ۲- روشهای نیمه تحلیلی و ۳- روشهای عددی، صورت می‌گیرد. در روشهای تحلیلی عموماً با در نظر گرفتن معادله حاکم بر سیستم و شرایط مرزی و پیوستگی که به طور خاص برای یک نوع مدل از عارضه مطرح شده و با استفاده از روشهایی چون بسط همخوان تابع موج^۱، توابع مختلط، بسط توابع بسل و هنکل^۲ و ...، به یکسری پاسخهای ریاضیات بر حسب حد مجموع دست می‌یابند. علیرغم دقت بالای نتایج در روشهای تحلیلی، به لحاظ محدودیت این روشها در مدل‌سازی انواع مختلف عارضه به شکل دلخواه، عرصه برای ظهور هر چه بیشتر روشهای نیمه تحلیلی و عددی مهیا می‌شود. در روشهای نیمه تحلیلی بخش اولیه از مسأله به صورت تحلیلی و بخش دوم آن به صورت عددی قابل حل است. از جمله روشهای نام‌آشنای نیمه تحلیلی می‌توان به روشهای عدد موج اکی-لارنر، روش ماتریس T و روش بوشون-کمپیلو اشاره داشت. در روشهای مذکور پاسخ مسأله به صورت مجموعه‌ای از موج ورودی و معادلات انتگرال کوپل که از اقناع شرایط پیوستگی در وجه میانی لایه‌های زمین به وجود آمده، به دست می‌آید.

روشهای عددی که از گستردگی بیشتر نسبت به دیگر روشها برخوردار است امکان طبقه‌بندی به سه دسته ۱- روشهای حجمی از قبیل روش اجزای محدود و روش اختلاف محدود، ۲- روشهای مرزی همچون روش اجزای

روشهای مختلف تحلیلی، نیمه تحلیلی و عددی برای بررسی لرزه‌ای عوارض توپوگرافی و تعیین پاسخ سطح زمین در ادبیات فنی موجود است. در این مقاله به ارائه اهم تحقیقات انجام گرفته در نیم قرن اخیر (۱۹۶۰-۲۰۱۱) پیرامون موضوع مذکور پرداخته شده است. مطالعات اشاره شده در متن بر اساس نوع روش به کار رفته، سال ارائه و مدل استفاده شده در حوزه‌های تبدیل یافته و زمان طبقه‌بندی شده است. با توجه به اینکه در میان روشهای عددی، اکثر تحقیقات انجام گرفته متعلق به روش اجزای مرزی است؛ لذا ابتدا ضمن معرفی و ارائه فرمول‌بندی و معادلات انتگرالی حاکم در این روش، مطالعات مربوطه بر حسب نوع حل اساسی استفاده شده اعم از حل اساسی محیط کامل و حل اساسی نیم صفحه نیز دسته‌بندی شده است. لازم به ذکر است، در کلیه تحقیقات اشاره شده، موج خارج از صفحه SH به عنوان مطالعه موردی محققان در نظر گرفته شده است.

کلیدواژه‌ها: عوارض توپوگرافی، امواج SH ، روشهای تحلیلی، نیمه تحلیلی، روشهای عددی، اجزای مرزی

۱- مقدمه

عوامل مختلفی بر روی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین مؤثر است که از آن جمله می‌توان به مشخصات منبع موج، اثرات مسیر حرکت موج و شرایط محلی ساختگاه اشاره داشت. زلزله‌های اخیر و حوادث ناشی از آن نشان داده است که در میان عوامل مذکور، شرایط محلی ساختگاه بیشترین تأثیر را دارد. بنابراین برای یک طرح بهینه و قابل قبول و به دور از هر گونه تقریب ناشی از مدل‌سازیهای یک بعدی، شناخت و شبیه‌سازی هر چه دقیقتر اثرات ساختگاهی می‌تواند بسیار

دایره‌ای، مانوژیان و لی [۱۷] بر روی یک ناهمگنی دایره‌ای^۵ به وسیله روش باقیمانده‌های وزن دار^۶ و وانگ و وانگ [۱۸] در تحلیل یک ناهمگنی دایره‌ای با مرزهای ناپیوسته با استفاده از بسط تابع موج، اشاره داشت.

۲-۳- سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱

با توجه به رشد نرم‌افزاری و امکان انجام ساده‌تر فرآیندهای ریاضیات و تحلیلی، دهه اخیر را شاید بتوان به عنوان بهترین محدوده زمانی برای ظهور بیشتر این قبیل تحقیقات از لحاظ کمی و کیفی دانست به طوری که عوارض سطحی و زیر سطحی پیچیده‌تر و مرکب نیز در این دهه به چشم می‌خورد. از جمله این مطالعات می‌توان از کااو و همکاران [۱۹] برای تحلیل یک تپه استوانه‌ای به کمک روش توابع مختلط، لیانگ و همکاران [۲۰] در بررسی یک حفره دایره‌ای مستقر در زیر یک تپه نیم‌دایره‌ای به وسیله روش توابع مجازی و بسط سری بسط-فوریه، کایو و لیو [۲۱] استفاده از روش توابع مختلط برای یک تپه مثلثی متساوی‌الساقین، لی و همکاران [۲۲] بر روی یک تپه نیم دایره‌ای به کمک روش باقیمانده‌های وزن دار، تی‌سور و چانگ [۲۳-۲۴] و اوایل کرر و همکاران [۲۵] به ترتیب برای یک آبرفت نیم دایره‌ای نیمه‌پر و دره مثلثی با استفاده از روش تطابق ناحیه‌ای و ناهمگنی دایره‌ای چندگانه به وسیله بسط تابع موج، تی‌سور و چانگ [۲۶] و ژئو و کی [۲۷] به ترتیب برای یک دره نیم دایره‌ای بریده شده به کمک روش تطابق ناحیه‌ای و ناهمگنی دایره‌ای با مرزهای ناپیوسته به وسیله روش توابع مختلط، تی‌سور و همکاران [۲۸] و لیو و همکاران [۲۹] به ترتیب با بهره‌گیری از روش تطابق ناحیه‌ای برای یک دره مثلثی عمیق و استفاده از بسط توابع بسط فوریه برای تحلیل مرکب تپه نیم‌دایره‌ای و مثلثی و هان و همکاران [۳۰] استفاده از روش توابع مختلط برای تحلیل مرکب تپه مثلثی و دره نیم دایره‌ای نام برد.

لازم به ذکر است کلیه مطالعات مذکور از تحلیل دوبعدی عوارض توپوگرافی و در فضای فرکانس نتیجه شده است. با توجه به پیچیدگی فرآیندهای تحلیلی در حوزه زمان، اکثر تحقیقات محدود به حوزه فرکانس می‌باشد و از

مرزی و ۳- روشهای تلفیقی است. در این مقاله، ضمن اشاره به اهم تحقیقات انجام شده بر اساس روشهای فوق، به تشریح روش اجزای مرزی با جزئیات بیشتر پرداخته می‌شود.

۲- روشهای تحلیلی

شاید آسانو [۱] را بتوان پیشگام در بررسی تحلیلی اثرات توپوگرافی تحت امواج هارمونیک SH دانست. این محقق با استفاده از روش رایلی (۱۹۰۷) و با در نظر گرفتن سطح زمین به صورت یک موج سینوسی به تعیین پاسخ آن پرداخت. ایوبکار [۲-۳] در سال ۱۹۶۲ همان مدل آسانو را با استفاده از روش اغتشاش امواج بررسی نمود. ساتو [۴] پاسخ سطح یک عارضه لبه‌ای با زاویه منفرجه را در حوزه فرکانس و زمان برای امواج با طول موجهای کوچک به کمک روش رایلی نشان داد.

۲-۱- سالهای ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰

در دهه هفتاد مطالعات تحلیلی با جهش قابل‌توجهی مواجه شد. تریفوناک [۵-۶] با استفاده از حل سری بسط اقدام به تعیین پاسخهای دقیق به ترتیب برای یک آبرفت و دره نیم استوانه‌ای نمود. وانگ و تریفوناک [۷-۸] به کمک حل سری بسط برای یک دره و آبرفت نیم بیضی به ارائه یک حل بسته پرداختند. سابینا و ویلیس [۹] با استفاده از بسط همخوان تابع موج برای انواع تپه و دره و یامادا و ساتو [۱۰] به کمک روش وینر-هاپف^۳ و تئوری سیستم ذرات برای یک لایه با تغییرات پله‌ای، پاسخهای تحلیلی در حوزه فرکانس ارائه دادند.

۲-۲- سالهای ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰

از جمله تحقیقات تحلیلی انجام گرفته در سالهای ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ می‌توان به کارهای سانچز-سسما [۱۱-۱۲] بر روی عارضه‌های لبه‌ای با استفاده از حل مک دونالد^۴، لیو و هان [۱۳] به کمک توابع مختلط برای انواع دره، تدروسکا و لی [۱۴] استفاده از بسط سری بسط و فوریه برای آبرفت دایره‌ای، یوان و من [۱۵] و یوان و لیاو [۱۶] بهره‌گیری از حل سری موج به ترتیب برای تپه نیم استوانه‌ای و آبرفت نیم

مؤلفه‌های پاسخ و موج مهاجم ورودی ارتباط برقرار ساخت [۴۵]. از جمله مطالعات مبتنی بر این روش که کارایی و قابلیت آن را برای تحلیل انواع عوارض توپوگرافی تحت امواج هارمونیک SH نشان می‌دهد، می‌توان به سی‌او و همکاران [۴۶]، چن [۴۷-۴۹] و چن و همکاران [۵۰-۵۱] اشاره نمود.

۳-۳-۳ روش بوشون-کمپیلو [۵۲] (BC)

بوشون [۵۲] و بوشون و کمپیلو [۳۵] بر اساس طرحی که توسط بوشون و اکی [۵۳] مبتنی بر روش عدد موج گسسته^۸ ارائه داده شده بود، به توسعه و پیشنهاد روشی پرداختند که امروزه به روش بوشون-کمپیلو (BC) موسوم است. در روش مذکور برای اقلان شرایط مرزی از توابع گرین لمب [۵۴] و جهت ارزیابی آن از روش عدد موج گسسته بهره گرفته می‌شود. در مطالعات کمپیلو [۵۵] برای یک خاک لایه‌ای نامنظم، اکسیل راد و فرگوسن [۵۶] در مقایسه دو روش AK و BC، بوشون و کوتانت [۵۷]، بوشون و همکاران [۵۸] و کرابولوت و فرگوسن [۵۹] در ترکیب روش BC با روش اجزای مرزی و ارایه روش اجزای مرزی-عدد موج گسسته (DWBE)، به خوبی از روش بوشون-کمپیلو استفاده شده است. در مطالعه بوشون [۶۰] یک تاریخچه جامعی در خصوص روش عدد موج گسسته و کاربردهای آن یافت می‌شود. همچنین، اخیراً در مطالعات فو و بوشون [۶۱] و ژو و چن [۳۷] نیز به ترتیب برای محیط‌های ناهمگن و عوارض سطحی از روش بوشون-کمپیلو بهره گرفته شده است.

۴- روشهای عددی

پیشرفت علم رایانه و استفاده از آن در تحلیل سیستم‌های سازه‌ای موجب شده که امروزه روشهای عددی بیش از پیش برای محققان و پژوهشگران جلوه نماید. تحلیل مسایل پیچیده و دشوار انتشار امواج نیز از این موضوع مستثنی نیست. به طور کلی روشهای عددی به کار گرفته شده در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی قابل تقسیم به روشهای حجمی، مرزی و تلفیقی است.

اندک مطالعات در حوزه زمان شاید بتوان تنها به نتایج واتانابه [۳۱-۳۲] برای بررسی پراکنش امواج SH تحت یک ناهمگنی و یک سیلندر توخالی اشاره داشت.

۳- روشهای نیمه تحلیلی

مطالعات ادبیات فنی نشان می‌دهد که روشهای نیمه تحلیلی در سه دسته، روش اکی-لارنر [۳۳]، روش ماتریس T یا میدان صفر^۷ [۳۴] و روش بوشون-کمپیلو [۳۵] طبقه بندی می‌شود. هر چند با توجه به اینکه در دو روش آخر از معادلات انتگرال و توابع گرین بهره گرفته می‌شود که به نظر برخی از مؤلفان می‌بایست آنها را در زمره روشهای مرزی طبقه‌بندی نمود [۳۶] ولیکن با توجه به اینکه عمده محاسبات به صورت تحلیلی انجام می‌پذیرد، می‌توان از آنها به عنوان روشهای نیمه تحلیلی یاد کرد [۳۷].

۳-۱- روش اکی-لارنر [۳۳] (AL)

اکی و لارنر [۳۳] پیشگام در ارائه روشی بودند که بعدها تحت همین عنوان مشهور شد. پاسخ ارائه شده توسط این محققان به صورت مجموعه‌ای از موج ورودی هارمونیک، معادلات انتگرال کوپل و بر حسب عدد موج فرض شده که برای یک محیط لایه‌ای به کار گرفته شد. بوشون [۳۸]، بارد و بوشون [۳۹]، بارد [۴۰]، بارد و بوشون [۴۱]، بارد و اریل [۴۲]، جلی و همکاران [۴۳] و بن ساین و اکی [۴۴]، با توسعه فرمول بندی و گسترش روش اکی-لارنر به حوزه زمان توانستند به خوبی به تحلیل لرزه‌ای انواع عارضه سطحی و زیر سطحی همگن و ناهمگن با دامنه‌های تناوبی بپردازند.

۳-۲- روش ماتریس T یا میدان صفر [۳۴]

این روش که شاید به نوعی قابل طبقه‌بندی در زمره روشهای مرزی نیز باشد، توسط وادان و همکاران [۳۴] معرفی شد. بر اساس این روش پاسخ مسأله و تابع گرین مربوطه بر حسب یکسری جملات پایه از قبیل توابع کروی بسط داده شده و با استفاده از نمایش انتگرالی و ماتریس انتقال یا ماتریس T که از انتگرال‌گیری مرزی توابع مذکور به دست می‌آید، می‌توان بین ضرایب مجهول متناظر با

۴-۱- روشهای حجمی

تک لایه^{۱۱} و پتانسیل دو لایه^{۱۲} معرفی می‌شود [۷۱]. لازم به ذکر است با توجه به اینکه از جمله اهداف اصلی نویسندگان، معرفی روش اجزای مرزی و کاربرد آن در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تحت امواج *SH* می‌باشد، لذا در ابتدا به عناصر کلیدی این روش یعنی حل‌های اساسی^{۱۳} و معادلات انتگرال اشاره شده و سپس به ادبیات فنی مربوطه پرداخته می‌شود.

در تحلیل دینامیکی محیط‌های پیوسته نامحدود، روشهای حجمی مختلفی وجود دارد؛ ولیکن از آن جمله روشها که غالباً در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش اجزای محدود (*FEM*) و روش اختلاف محدود (*FDM*) است.

با توجه به اینکه برای تحلیل محیط مربوطه مبتنی بر روشهای مذکور، علاوه بر گسسته‌سازی دامنه مسأله لازم است یکسری قیود اضافی از قبیل مرزهای جاذب انرژی برای اقناع شرط تشعشع امواج در بیکران نیز تعریف شود. بنابراین این قسم امور موجب شده که نسبت به دیگر روشهای عددی کمتر مورد توجه قرار گیرند. در مطالعات اسمیت [۶۲]، دی [۶۳] و بی‌لک و همکاران [۶۴] از روش اجزای محدود و در تحقیقات بور و همکاران [۶۵]، بور [۶۶]- [۶۷]، ماکزو [۶۸]، هیل و همکاران [۶۹] و ماکزو و بارد [۷۰] از روش اختلاف محدود برای تحلیل عوارض توپوگرافی بهره گرفته شده است.

۴-۲-۱- حل‌های اساسی

پاسخی از معادله حاکم که بر اساس استقرار یک بار نقطه‌ای در یک فضا با مرزهای نامحدود شکل می‌گیرد، حل اساسی نام دارد. در تعیین این حلها که عموماً به حل‌های اساسی محیط کامل موسوم هستند هیچ‌گونه شرایط مرزی از مسأله در نظر گرفته نمی‌شود. به طور مثال، انتشار امواج *SH* در یک ناحیه توسط معادله اسکالر موج مطابق زیر بیان می‌شود [۷۲]:

$$\mu \left(\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (1)$$

به طوری که μ مدول برشی، c سرعت انتشار موج، ∇^2 عملگر لاپلاسین و u جابه‌جایی خارج از صفحه می‌باشد. حل اساسی جابه‌جایی معادله فوق در حوزه فرکانس و زمان به ترتیب مطابق با معادلات زیر به دست می‌آید:

$$u^*(\xi, x, \omega) = \frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \quad (2)$$

$$u^*(x, t; \xi, \tau) = \frac{c}{2\pi} \frac{H[c(t-\tau) - r]}{\sqrt{c^2(t-\tau)^2 - r^2}} \quad (3)$$

که u^* حل اساسی جابه‌جایی، ξ مختصات منبع موج، x مختصات گیرنده موج، $k = \omega/c$ عدد موج، ω فرکانس زاویه‌ای، r فاصله بین منبع و گیرنده موج، $H_0^{(1)}()$ تابع هنکل نوع اول از درجه صفر و $H()$ تابع هویساید^{۱۴} می‌باشد. چنانچه در تعیین این حلها شرایط مرزی حاکم در مسأله نیز در نظر گرفته شود توابع گرین یا حل‌های اساسی ویژه تعیین خواهد شد که علیرغم پیچیدگی در فرمول‌بندی آنها، مشتمل بر مزایایی چون کاهش مرزهای المان‌بندی شده، اجتناب از اقناع تقریبی شرایط مرزی و کاهش زمان

۴-۲- روشهای مرزی

نواقص و دشواریهای غالب در روشهای حجمی موجب شد تا عرصه برای ظهور روشهای مرزی مهیا شود. سهولت در مدلسازی، دقت مطلوب، کاهش حجم محاسبات و اقناع شرط تشعشع امواج در بیکران توسط این روشها، محققان را بر آن داشت تا برای تحلیل مسائل ژئوتکنیک لرزه‌ای از این روشها بهره بگیرند. روشهای مرزی با قدمتی در حدود نیم قرن، با عناوینی چون روش مرزی (*BM*)، معادلات انتگرال مرزی (*BIE*)، روش انتگرال مرزی (*BIM*) و اخیراً روش اجزای مرزی (*BEM*) شناخته شده است.

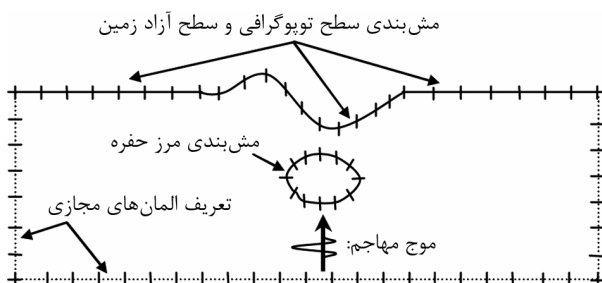
به طور کلی فرمول‌بندی روش اجزای مرزی به دو صورت مستقیم^{۱۵} (*DBEM*) و غیرمستقیم^{۱۶} (*IBEM*) انجام می‌پذیرد. در فرمول‌بندی مستقیم که امروزه مرسوم‌تر است پاسخ هر نقطه از محیط مورد بررسی به طور صریح بر حسب جابه‌جاییها و نیروهای سطحی نقاط مرزی مطرح شده، ولیکن در حالت غیرمستقیم، معادلات بر حسب یک نوع از مؤلفه پاسخ بیان شده که عموماً تحت عناوین پتانسیل

لرزه‌ای عوارض توپوگرافی در عوض گسسته‌سازی محیط مسأله در یک شکل بسته تنها کافی است بخشی از عارضه که نسبت به سطح زمین تغییرات ارتفاع داشته و یا با قیودی مرتبط است گسسته‌سازی شود. این عمل موجب کاهش چشمگیر در زمان محاسبات و حجم داده‌ها خواهد شد. جهت تفهیم موضوع، در ادامه به برخی از مدل‌های تهیه شده برای عوارض توپوگرافی سطحی و زیر سطحی به کمک روش اجزای مرزی فرموله شده در یک محیط کامل و نیم‌صفحه پرداخته می‌شود.

۴-۲-۳-۱- براساس فرمول بندی محیط کامل

برای تهیه مدل اجزای مرزی عوارض توپوگرافی مبتنی بر حل‌های اساسی محیط کامل، علاوه بر اینکه لازم است مرز هندسی کلیه عوارض و ناهمسانی‌ها، چه سطحی و چه زیر-سطحی، مشخص‌بندی شوند، می‌بایست جهت استخراج پاسخهای قابل قبول از ناحیه مورد علاقه (سطح روی عارضه یا بخشی از سطح زمین که پاسخ آن مد نظر است) سطح زمین تا فاصله خیلی دور از آن (تقریباً ۲۰ تا ۲۵ برابر نیم عرض توپوگرافی از طرفین) نیز المان‌بندی شده و نهایتاً محیط مورد نظر با یکسری المان‌های مجازی یا حصار^{۱۵} [۷۸] بسته شود.

در شکل (۱)، برخی از عوارض توپوگرافی به همراه نواحی گسسته‌شده مشاهده می‌شود. چنانچه ملاحظه می‌شود تهیه چنین مدل‌هایی ملزم به تعریف گره‌های مرزی فراوان است که این موضوع در تحلیل‌های دینامیکی به ویژه در حوزه زمان، مستلزم صرف زمان محاسبات زیادی است.



شکل (۱-الف): مرزهای مش‌بندی شده برای مسائل چند مرزی به کمک روش اجزای مرزی بر اساس فرمول بندی محیط کامل.

محاسبات می‌شوند. با توجه به این که در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی، محیط مورد نظر نیم صفحه است و شرایط تنش آزاد بر روی سطح زمین ($\partial u / \partial n = 0$) بردار نرمال عمود بر سطح زمین)، به عنوان شرایط مرزی موجود در مسأله مطرح شده بنابراین پاسخهای به دست آمده بر این اساس، به توابع گرین نیم صفحه یا حل‌های اساسی نیم-صفحه موسوم هستند.

۴-۲-۲- معادلات انتگرال

از اعمال انتگرال باقیمانده‌های وزن دار بر معادله حاکم و حذف جملات انتگرالی حاکم بر دامنه به کمک حل مرزی آن، معادلات انتگرال مرزی مستقیم در حوزه فرکانس و زمان به ترتیب مطابق زیر به دست می‌آید [۷۳]:

$$c(\xi) u(\xi, \omega) = \int_s [u^*(\xi, x, \omega) t(x, \omega) - q^*(\xi, x, \omega) u(x, \omega)] ds(x) \quad (4)$$

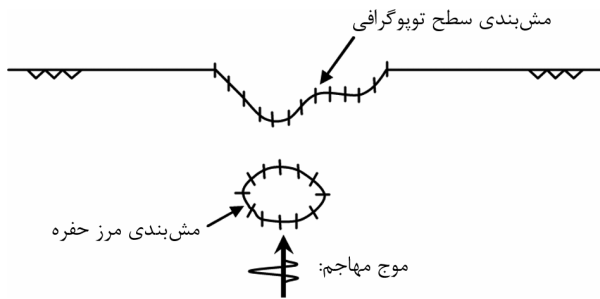
$$c(\xi) u(\xi, t) = \int_s \int_0^t [u^*(x, t; \xi, \tau) t(x, t) - q^*(x, t; \xi, \tau) u(x, t)] dt ds(x) \quad (5)$$

به طوری که $c(\xi)$ ضریب شکست مرزی، s سطح مرزی مسأله، u و t به ترتیب جابه‌جایی و شارهای سطحی عمود بر مرز و $q^* = \partial u^* / \partial n$ حل اساسی شار می‌باشد. از حل عددی معادلات فوق کلیه جابه‌جاییها و شارهای سطحی به دست می‌آید. در حل معادله انتگرال در حوزه زمان بر خلاف حوزه فرکانس، لازم است اثر انتگرال زمان بر حل‌های اساسی بررسی شده که منجر به تشکیل هسته‌های دینامیکی معادله حاکم می‌شود. کل و همکاران [۷۴]، منصور و بریا [۷۵-۷۶]، بلاچکو و چانگ [۷۷] و اسرائیل و بنرجی [۷۸] از جمله محققانی بودند که به بررسی اثر انتگرال زمان بر حل‌های اساسی معادله اسکالر موج و تعیین هسته‌های دینامیکی آن پرداختند.

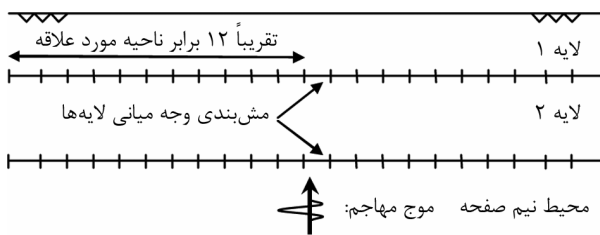
۴-۲-۳- مدلسازی به وسیله اجزای مرزی

چنانچه در معادلات انتگرال (۴) یا (۵) به جای استفاده از حل‌های اساسی محیط کامل (معادلات ۲ یا ۳)، از حل‌های اساسی نیم صفحه بهره گرفته شود؛ آن‌گاه برای تحلیل

در استفاده از حلهای اساسی نیم‌صفحه، عددی سازی و تهیه کدهای رایانه‌ای اجزای مرزی نسبت به محیط کامل اندکی پیچیده‌تر است، ولیکن مش‌بندی بر روی سطح آزاد زمین و استلزام به تعریف المان‌های مجازی و بسته شدن محیط به طور کامل از بین می‌رود. در شکل (۳)، نواحی مش‌بندی شده برخی از انواع مدل‌های تهیه شده عوارض توپوگرافی بر اساس فرمول‌بندی اجزای مرزی در نیم صفحه مشاهده می‌شود. چنانچه در شکل (۳-الف) نشان داده شده است تنها مرز دره یا حفره و یا در صورت مدلسازی محیطهای لایه‌ای (شکل ۳-ب)، وجوه میانی لایه‌ها مستلزم گسسته‌سازی است. محیط مسأله در این حالت کاملاً باز و شرایط مرزی بر روی سطح زمین به طور دقیق اقلان شده است.

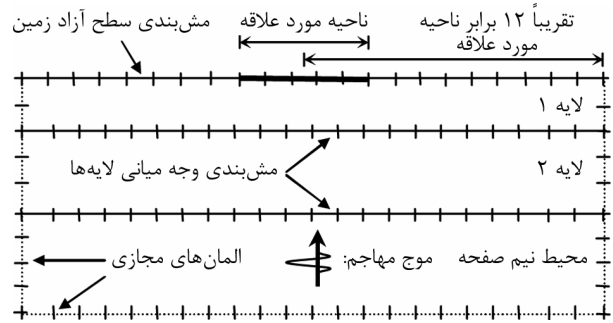


شکل (۳-الف): مرزهای مش‌بندی شده برای مسائل چند مرزی به کمک روش اجزای مرزی بر اساس فرمول‌بندی نیم‌صفحه.



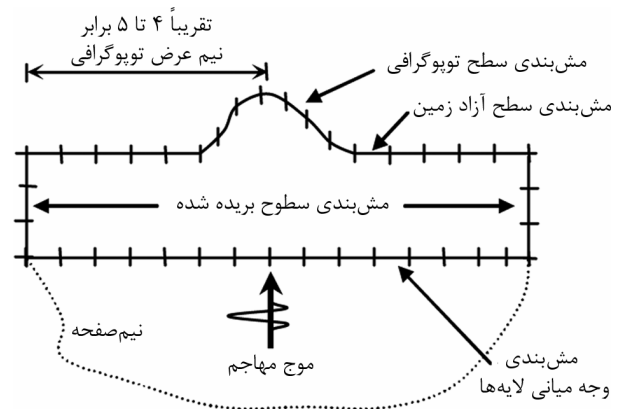
شکل (۳-ب): مرزهای مش‌بندی شده برای محیطهای لایه‌ای به کمک روش اجزای مرزی بر اساس فرمول‌بندی نیم‌صفحه.

از جمله عدم کاراییهای استفاده از فرمول‌بندی اجزای مرزی در نیم صفحه، تحلیل مستقیم و مدلسازی عوارض توپوگرافی مشتمل بر سطوح مرزی بالاتر از سطح آزاد زمین (ساختارهای تپه‌ای) می‌باشد. برای تهیه مدل اجزای مرزی این قسم عوارض توپوگرافی مبتنی بر فرمول‌بندی نیم صفحه،



شکل (۱-ب): مرزهای مش‌بندی شده برای محیطهای لایه‌ای به کمک روش اجزای مرزی بر اساس فرمول‌بندی محیط کامل.

هر چند برخی از محققان [۷۹] برای حالت خاصی از عوارض توپوگرافی (محیطهای لایه‌ای) با تغییر و اصلاح فرمول‌بندی اجزای مرزی محیط کامل، توانستند نواحی گسسته‌سازی شده را محدودتر کنند ولیکن، مطابق شکل (۲)، همچنان مش‌بندی بر روی سطح آزاد زمین وجود دارد و نواحی جدیدی تحت عنوان سطوح بریده شده^{۱۶} که مشتمل بر یکسری پاسخهای تک بعدی است، هنوز مستلزم المان‌بندی می‌باشند.



شکل (۲): مرزهای مش‌بندی شده برای محیطهای لایه‌ای به کمک روش اجزای مرزی اصلاح شده [۷۹] بر اساس فرمول‌بندی محیط کامل.

۲-۳-۲-۴- بر اساس فرمول‌بندی نیم صفحه

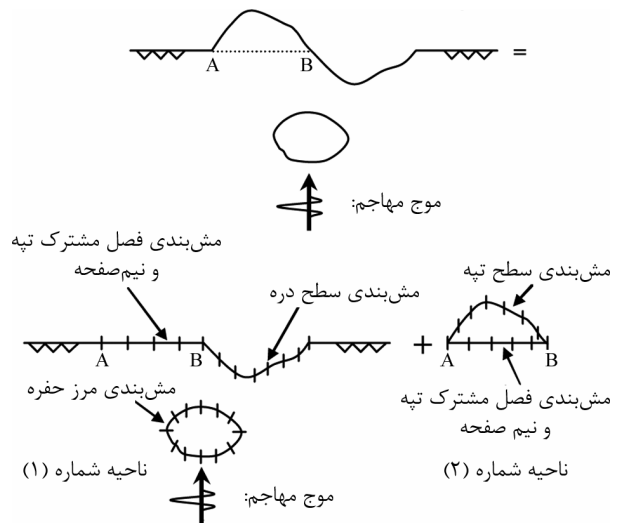
از سوی دیگر، محققان و پژوهشگران برای مدلسازی فضاهای نیمه نامحدود می‌توانند به جای استفاده از فرمول‌بندی و حلهای اساسی اجزای مرزی در یک محیط کامل، از فرمول‌بندی حاکم در یک نیم صفحه بهره بگیرند. اگر چه

در حوزه زمان و فرکانس نشان دادند. از جمله محققانی که به مطالعه لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تحت امواج SH به کمک روشهای مرزی در حوزه فرکانس مبتنی بر حل‌های اساسی محیط کامل پرداختند می‌توان به انگلند و همکاران [۸۲] تحت عنوان روش مرزی (BM) در بررسی انواع عوارض دره‌ای شکل و همچنین سیلز [۸۳]، نیوا و هیروز [۸۴] و دو و همکاران [۸۵] با نام روش معادلات انتگرال مرزی (BIEM) به ترتیب در تحلیل پارامتریک دره و تپه نیم دایره‌ای، تپه گاوسی شکل^{۱۷} و دره آبرفتی نیم دایره‌ای، اشاره داشت.

کرابولوت و فرگوسن [۸۶] و دراوینسکی و ویلسون [۸۷] به ترتیب برای یک محیط لایه‌ای و یک آبرفت نیم بیضی ناهمسان و دراوینسکی [۸۸] برای یک آبرفت همسان با وجه میانی چین‌دار، توانستند از روش اجزای مرزی غیرمستقیم (IBEM) بهره بگیرند. در استفاده از روش اجزای مرزی مستقیم (DBEM) می‌توان به مطالعات پاپاجورجیو و کیم [۸۹] و فیشن و احمد [۹۰] به ترتیب برای مدلسازی هندسه یک دره واقعی و یک دره آبرفتی نیم بیضی و همزفیلد [۹۱] در بهبود فرمول‌بندی اجزای مرزی برای مدلسازی محیطهای لایه‌ای اشاره داشت. توسط کی‌موتو و هیروز [۹۲] توابع گرین یک محیط دو لایه برای بررسی پراکنش امواج خارج از صفحه SH ارائه داده شد. اسلامی و همکاران [۹۳] برای دره‌های دوگانه نیم‌دایره‌ای و یو و دراوینسکی [۹۴] برای ناهمگنی با فصل مشترک چین‌دار مستقر در نیم صفحه توانستند به خوبی از روش اجزای مرزی مستقیم استفاده نمایند. اخیراً نیز دراوینسکی و یو [۹۵-۹۶] با توسعه فرمول‌بندی اجزای مرزی مستقیم، اثر ناهمگنی‌های چندگانه مستقر در یک نیم صفحه را تحت هجوم امواج هارمونیک SH مورد بررسی و تحلیل قرار دادند.

علیرغم مطالعات گسترده انجام شده در حوزه فرکانس، در حوزه زمان تنها می‌توان از کارهای تاکمیا و فوجی‌وارا [۹۷] و فنگ و همکاران [۹۸] نام برد. این محققان با استفاده از اجزای مرزی مستقیم، به ترتیب هندسه‌های مختلف دره آبرفتی و ناهمگنی مشتمل بر فصل مشترک اصطکاکی^{۱۸} را در اثر امواج مهاجم خارج از صفحه مطالعه نمودند.

می‌بایست مطابق شکل (۴) با تفکیک محیط فیزیکی به دو بخش، مسأله در یک رفتار ناهمگن تحلیل شود به طوری که بخش اول شامل کلیه مرزهای هندسی زیر سطح آزاد زمین به اضافه وجه میانی تپه با نیم صفحه (امتداد AB) است و بخش دوم، مرز هندسی تپه به همراه فصل مشترک تپه و نیم صفحه را در یک محیط بسته در بر می‌گیرد. پس از برقراری معادلات انتگرال (۴) یا (۵) برای هر یک از این محیطها و سرهم‌سازی آنها، ساختارهای تپه‌ای نیز به کمک فرمول‌بندی نیم صفحه قابل حل می‌باشند.



شکل (۴): مرزهای مش‌بندی شده و نحوه مدلسازی ساختارهای تپه‌ای به کمک روش اجزای مرزی بر اساس فرمول‌بندی نیم‌صفحه.

چنانچه بتوان برای تحلیل محیطهای لایه‌ای، شکل (۳-ب) علاوه بر بهره‌گیری از فرمول‌بندی اجزای مرزی در نیم صفحه، از روش پیشنهاد شده در مرجع [۷۹] نیز کمک گرفت، ضمن دوری از گسسته‌سازی سطح آزاد زمین، می‌توان مطابق شکل (۲)، مش‌بندی فصل مشترک لایه‌ها را در حدود یک سوم کاهش داد که در این صورت می‌توان محیطهای چند لایه را به کمک روش اجزای مرزی به ویژه در حوزه زمان به طرز ساده‌تر مدلسازی و تحلیل نمود.

۴-۲-۴- استفاده از حل‌های اساسی محیط کامل

فریدمن و شاو [۸۰] و بناف و گلد اسمیت [۸۱] اولین کسانی بودند که فرمول‌بندی روشهای مرزی را برای تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی و بررسی پراکنش امواج به ترتیب

۴-۲-۵- استفاده از حل‌های اساسی نیم صفحه

وانگ و جنینگ [۹۹] جزو نخستین افرادی بودند که توانستند به کمک روش انتگرال مرزی و استفاده از حل‌های اساسی نیم صفحه به تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تحت امواج هارمونیک SH پردازند. سانچز-سسما و همکاران [۱۰۰] و معین وزیری و تریفوناک [۱۰۱-۱۰۲] به کمک یک روش مرزی فرموله شده بر حسب حل‌های اساسی نیم-صفحه، انواع عوارض توپوگرافی دره‌ای و تپه‌ای شکل را بررسی نمودند. براوو و همکاران [۱۰۳] و اشراقی و دراوینسکی [۱۰۴] با توسعه روش‌های مرزی برای محیط‌های ناهمگن لایه‌ای، توانستند پاسخ سطح زمین را در حضور این قبیل عارضه‌ها نیز تحلیل نمایند. در مطالعات کلمنتس و لارسون [۱۰۵-۱۰۶] از روش‌های مرزی تحت عنوان معادلات انتگرال مرزی یاد شده و برای تحلیل لرزه‌ای دره‌های آبرفتی به کار گرفته شده است. همچنین محققانی چون سانچز-سسما و اسکواول و سانچز-سسما و روزن‌بولو [۱۰۷-۱۰۸] به ترتیب برای محیط‌های آبرفتی و توپوگرافی-های دره‌ای به شکل دلخواه، دراوینسکی [۱۰۹-۱۱۰] در بررسی عمق نفوذ آبرفت و محیط‌های لایه‌ای مدفون، اُهتسو و یوسوجی [۱۱۱] پیرامون تحلیل لرزه‌ای اندرکنش عوارض دره‌ای با حفرات زیرزمینی، بنیتس و همکاران [۱۱۲] جهت ارزیابی یک محیط نیم صفحه مشتمل بر حفرات زیرزمینی چندگانه، ون و دراوینسکی [۱۱۳] و دینگ و دراوینسکی [۱۱۴] نیز به ترتیب در تحلیل پارامتریک یک آبرفت نیم دایره‌ای و محیط‌های چند لایه با وجوه میانی چین‌دار به خوبی از روش اجزای مرزی غیرمستقیم در حوزه فرکانس مبتنی بر حل‌های اساسی نیم صفحه کمک گرفتند. چیو و هوآنگ [۱۱۵] و رینوز و همکاران [۱۱۶] به مدلسازی یک ساختگاه دره‌ای شکل واقعی و بررسی اثرات آن به کمک روش اجزای مرزی مستقیم در حوزه فرکانس پردازند. در مطالعات نواک و هال [۱۱۷] یک نوع فرمول‌بندی اجزای مرزی نیم صفحه برای تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی به دور از مشکلات انتگرال‌های سینگولار ارائه شده است. اخیراً نیز آسیلیو و همکاران [۱۱۸] با استفاده از فرمول‌بندی اجزای مرزی مستقیم در حوزه فرکانس و با به کارگیری

حل‌های اساسی نیم صفحه، به بررسی انواع محیط‌های آبرفتی به شکل دلخواه پرداختند. لازم به ذکر است مطالعات رایس و سد [۱۱۹]، هاپری [۱۲۰] و بلاچکو و چانگ [۷۷] شاید از اندک تحقیقات انجام گرفته در حوزه زمان توسط حل‌های اساسی نیم صفحه می‌باشند که در آنها به ترتیب بررسی اثرات حفرات دایره‌ای شکل زیرزمینی، دره و آبرفت نیم‌دایره‌ای مدنظر قرار گرفته است.

۵- روش‌های تلفیقی

محققان با ترکیب روش‌های عددی و تحلیلی مختلف، از مزایای هر روش در جایگاه خود بهره گرفته‌اند. دتا و شاه [۱۲۱] و شاه و همکاران [۱۲۲] در سال ۱۹۸۲ با ترکیب روش اجزای محدود و یک روش تحلیلی (FE/AE) ، چوآن و چونگ‌بین [۱۲۳] با ترکیب روش اجزای محدود و اجزای نامحدود (FE/IE) ، بی‌لک و همکاران [۱۲۴] و لیو و همکاران [۱۲۵] با تلفیق روش اجزای مرزی و روش اجزای محدود (FE/BE) و فاه و همکاران [۱۲۶] و لوزان و همکاران [۱۲۷] با ترکیب روش اختلاف محدود و روش مجموع مودال^{۱۹}، توانسته‌اند به تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی پردازند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به ارایه ادبیات فنی و پیشینه مطالعات انجام گرفته پیرامون تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی تحت امواج مهاجم SH به وسیله روش‌های تحلیلی، نیمه‌تحلیلی و عددی، طی سالهای ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۱ پرداخته شد. نتایج مطالعه حاضر بر اساس نوع روش و سال ارائه تحقیق طبقه‌بندی شده است. چنانچه ملاحظه گردید در میان روش‌های مختلف، روش اجزای مرزی به سبب برخورداری از مزایای انحصاری همواره طی سالیان متوالی مورد توجه محققان و پژوهشگران بوده؛ ولیکن با توجه به توسعه اندک آن به حوزه زمان، اکثر مطالعات محدود به فضاهای تبدیل یافته می‌باشد. در این راستا مؤلفان به دنبال تعیین حل‌های اساسی نیم‌صفحه در حوزه زمان و به کارگیری آن در روش اجزای مرزی برای تحلیل عوارض توپوگرافی می‌باشند.

13. Liu, D. and Han, F. (1991). Scattering of plane SH-wave by cylindrical canyon of arbitrary shape, *Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, **10**(5), 249-255.
14. Todorovska, M.I. and Lee, W.V. (1991). Surface motion of shallow circular alluvial valleys for incident plane SH waves-analytical solution, *Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, **10**(4), 192-200.
15. Yuan, X. and Men, F.-L. (1992). Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical hill, *Earthqu. Eng. Struct. Dyn.*, **21**, 1091-1098.
16. Yuan, X. and Liao, Z.-P. (1995). Scattering of plane SH waves by a cylindrical alluvial valley of circular-arc cross-section, *Earthqu. Eng. Struct. Dyn.*, **24**, 1303-1313.
17. Manoogian, M.E. and Lee, V.W. (1996). Diffraction of SH-waves by subsurface inclusions of arbitrary shape, *Journal of Engng Mech.*, **122**, 123-129.
18. Wang, Y.-S. and Wang, D. (1996). Scattering of elastic waves by a rigid cylindrical inclusion partially debonded from its surrounding matrix-I. SH Case, *Int. J. Solids Structures*, **33**(19), 2789-2815.
19. Cao, X.-R., Song, T.-S., and Liu, D.-K. (2001). Scattering of plane SH-wave by a cylindrical hill of arbitrary shape, *Appl. Math. Mech.*, **22**(9), 1082- 1089.
20. Liang, J.-W., Luo, H., and Lee, V.W. (2004). Scattering of plane SH waves by a circular-arc hill with a circular tunnel, *Acta Seismologica Sinica*, **17**(5), 549-563.
21. Qiu, F. and Liu, D. (2005). Antiplane response of isosceles triangular hill to incident SH waves, *Earthq. Eng. Eng. Vibr.*, **4**(1), 37-46.
22. Lee, V.W., Luo, H., and Liang, J. (2006). Antiplane (SH) waves diffraction by a semi-circular cylindrical hill revisited: an improved analytic wave series solution, *J. Engng. Mec.*, **132**(10), 1106-1114.
23. Tsaur, D.-H. and Chang, K.-H. (2008). SH-waves scattering from a partially filled semi-
1. Asano, S. (1960). Reflection and refraction of elastic waves at a corrugated boundary surface, Part I, The Case of Incidence of SH Wave, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **38**, 177-197.
2. Abubakar, I. (1962a). Reflection and refraction of plane SH waves at irregular interfaces, I, *J. Phys. Earth.*, **10**, 1-14.
3. Abubakar, I. (1962b). Reflection and refraction of plane SH waves at irregular interfaces, II, *J. Phys. Earth.*, **10**, 15-20.
4. Sato, R. (1963). Diffraction of SH-Waves at an Obtuse-Angled Corner, *J. Phys. Earth.*, **11**(1), 1-17.
5. Trifunac, M.D. (1971). Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **61**(6), 1755-1770.
6. Trifunac, M.D. (1973). Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon, *Earthqu. Eng. Struct. Dyn.*, **1**, 267-281.
7. Wong, H.L. and Trifunac, M.D. (1974). Scattering of plane SH waves by a semi-elliptical canyon, *Earthqu. Eng. Struct. Dyn.*, **3**, 157-169.
8. Wong, H.L. and Trifunac, M.D. (1974). Surface motion of a semi-elliptical alluvial valley for incident plane SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **64**(5), 1389-1408.
9. Sabina, F.J. and Willis, J.R. (1975). Scattering of SH waves by a rough half-space of arbitrary slope, *Geophys., J. R. astr. Soc.*, **42**, 685-703.
10. Yamada, T. and Sato, R. (1976). SH wave propagation in a medium having step-shaped discontinuity, *J. Phys. Earth*, **24**, 105-130.
11. Sanchez-Sesma, F.J. (1985). Diffraction of elastic SH waves by wedges, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**(5), 1435-1446.
12. Sanchez-Sesma, F.J. (1990). Elementary solutions for response of wedge-shaped medium to incident SH and SV waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**(3), 737-742.

- of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves, *Journal of Geophysical Research*, **75**(5), 933-954.
34. Varadan, V.K., Varadan, V.V., and Pao Y.-H. (1978). Multiple scattering of elastic waves by cylinders of arbitrary cross section, I, SH waves, *J. Acoust. Soc. Am.*, **63**, 1310-1319.
 35. Campillo, M. and Bouchon, M. (1985). Synthetic SH seismograms in a laterally varying medium by the discrete wavenumber method, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **83**, 307-317.
 36. Beskos, D.E. (1997). Boundary element methods in dynamic analysis: part II (1986-1996), *Appl. Mech. Rev.*, **50**(3), 149-197.
 37. Zhou, H. and Chen, X. (2006). A new approach to simulate scattering of SH waves by an irregular topography, *Geophys. J. Int.*, **164**, 449-459.
 38. Bouchon, M. (1973). Effect of topography on surface motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **63**(3), 615-632.
 39. Bard, P.-Y. and Bouchon, M. (1980). The seismic response of sediment-filled valleys, part 1, the case of incident SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **70**(4), 1263-1286.
 40. Bard, P.-Y. (1982). Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **71**, 731-760.
 41. Bard, P.-Y. and Bouchon, M. (1985). The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**(20), 519-541.
 42. Bard, P.-Y. and Gariel, J.-C. (1986). The seismic response of two-dimensional sedimentary deposits with large vertical velocity gradients, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **76**(2), 343-346.
 43. Geli, L., Bard, P.-Y., and Jullien, B. (1988). The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **78**(1), 42-63.
 - circular alluvial valley, *Geophys. J. Int.*, **173**, 157-167.
 24. Tsaur, D.-H. and Chang, K.-H. (2008). An analytical approach for the scattering of SH waves by a symmetrical v-shaped canyon: shallow case, *Geophys. J. Int.*, **174**, 255-264.
 25. Avila-Carrera, R., Sanchez-Sesma, F.J., and Aviles, J. (2008). Transient response and multiple scattering of elastic waves by a linear array of regularly distributed cylindrical obstacles: anti-plane S-wave analytical solution, *Geophysics International*, **47**(2), 115-126.
 26. Tsaur, D.-H. and Chang, K.-H. (2009). Scattering of SH waves by truncated semicircular canyon, *J. Engng. Mech.*, **135**(8), 862-870.
 27. Zhao, J.X. and Qi, H. (2009). Scattering of plane SH-wave from a partially debonded shallow cylindrical elastic inclusion, *Journal of Mechanics*, **25**(4), 411-419.
 28. Tsaur, D.-H., Chang, K.-H., and Hsu, M.-S. (2010). An analytical approach for the scattering of SH waves by a symmetrical V-shaped canyon: deep case, *Geophys. J. Int.*, **183**, 1501-1511.
 29. Liu, G., Chen, H., Liu, D., and Khoo, B.C. (2010). Surface motion of a half-space with triangular and semicircular hills under incident SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **100**(3), 1306-1319.
 30. Han, F., Wang, G.-Z., and Kang, C.-Y. (2011). Scattering of SH-waves on triangular hill joined by semi-cylindrical canyon, *Appl. Math. Mech.*, **32**(3), 309-326.
 31. Watanabe, K. (1982). Scattering of SH-wave by a cylindrical discontinuity in an inhomogeneous elastic medium, *Bulletin of the JSME*, **25**(205), 1055-1060.
 32. Watanabe, K. (1983). Transient response of an inhomogeneous elastic hollow cylinder to an impulsive line SH-source, *Bulletin of the JSME*, **26**(211), 30-34.
 33. Aki, K. and Larner, K.L. (1970). Surface motion

54. Lamb, H. (1904). On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A203, 1-42.
55. Campillo, M. (1987). Modeling of SH-wave propagation in an irregularly layered medium-application to seismic profiles near a dome, *Geophysical Prospecting*, **35**, 236-249.
56. Axilrod, H.D. and Ferguson, J.F. (1990). SH-wave scattering from a sinusoidal grating: an evaluation of four discrete wavenumber methods, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**(3), 643-655.
57. Bouchon, M. and Coutant, O. (1994). Calculation of synthetic seismograms in laterally varying medium by the boundary element-discrete wavenumber method, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**(6), 1869-1881.
58. Bouchon, M., Schultz, C.A. and Toksöz, M.N. (1995). A fast implementation of boundary integral equation method to calculate the propagation of seismic waves in laterally varying layered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**(6), 1679-1687.
59. Karabulut, K. and Ferguson, J.F. (1996). SH wave propagation by discrete wavenumber boundary integral modeling in transversely isotropic medium, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**(2), 524-529.
60. Bouchon, M. (2003). A review of the discrete wavenumber method, *Pageoph*, **160**, 445-465.
61. Fu, L.-Y. and Bouchon, M. (2004). Discrete wavenumber solutions to numerical wave propagation in piecewise heterogeneous media-i. theory of two-dimensional SH case, *Geophys. J. Int.*, **157**, 481-498.
62. Smith, W.D. (1975). The Application of finite element analysis to body wave propagation problems, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **42**, 747-768.
63. Day, S.M. (1977). Finite element analysis of seismic scattering problems, Ph.D. Thesis, University of California, San Diego.
44. Ben-Zion, Y. and Aki, K. (1990). Seismic radiation from an SH line source in a laterally heterogeneous planar fault zone, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**(4), 971-994.
45. Beskos, D.E. (1987). Boundary element methods in dynamic analysis, *Appl. Mech. Rev.*, **40**(1), 1-23.
46. Tsao, S.J., Varadan, V.V., and Varadan, V.K. (1983). T-matrix approach to scattering of elastic (SH-) waves by an inclined surface void, *J. Appl. Mech., ASME*, **50**, 143-148.
47. Chen, X. (1990). Seismogram synthesis for multi-layered media with irregular interfaces by global generalized refraction/transmission matrices method, I, Theory of Two-Dimensional SH Case, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**(6), 1696-1724.
48. Chen, X. (1995). Seismogram synthesis for multi-layered media with irregular interfaces by global generalized refraction/transmission matrices method, II, applications for 2D SH case, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**(4), 1094-1106.
49. Chen, X. (1999). Love waves in multilayered media with irregular interfaces: I, modal solutions and excitation formulation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**(6), 1519-1534.
50. Chen, J.T., Chen, P.Y., and Chen C.T. (2008). Surface motion of multiple alluvial valleys for incident plane SH-waves by using a semi-analytical approach, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **28**, 58-72.
51. Chen, J.T., Lee, J.W., Wu, C.F., and Chen, I.L. (2011). SH-wave diffraction by a semi-circular hill revisited: a null-field boundary integral equation method using degenerate kernels, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **31**, 729-736.
52. Bouchon, M. (1985). A simple, complete numerical solution to the problem of diffraction of SH waves by an irregular surface, *J. Acoust. Soc. Am.*, **77**, 1-5.
53. Bouchon, M. and Aki, K. (1977). Discrete wavenumber representation of seismic source wave fields, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **67**, 259-277.

- Numerical implementation of the boundary element method for two-dimensional transient scalar wave propagation problems, *Appl. Math. Modeling*, **6**, 299-306.
76. Mansur, W.J. and Brebbia, C.A. (1982b). Formulation of the boundary element method for transient problems governed by the scalar wave equation, *Appl. Math. Modeling*, **6**, 307-311.
77. Belytschko, T. and Chang, H.S. (1988). Simplified direct time integration boundary element method, *J. Eng. Mech., ASCE*, **114**(1), 117-134.
78. Israil, A.S.M. and Banerjee, P.K. (1990). Advanced development of time-domain beam for two-dimensional scalar wave propagation, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, **29**, 1003-1020.
79. Hadley, P.K., Askar, A., and Cakmak, A.S. (1989). Scattering of waves by inclusions in a nonhomogeneous elastic half space solved by boundary element methods, Technical Report NCEER-89-0027.
80. Friedman, M.B. and Shaw, R. (1962). Diffraction of pulses by cylindrical obstacles of arbitrary cross section, *Trans, ASME, E, J. Appl. Mech.*, **29**, 40-46.
81. Banaugh, R.P. and Goldsmith, W. (1963). Diffraction of steady state waves by surfaces of arbitrary shape, *J. Appl. Mech., ASME*, 589-597.
82. England, R., Sabina, F.J., and Herrera, I. (1980). Scattering of SH waves by surface cavities of arbitrary shape using boundary methods, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **21**, 148-157.
83. Sills, L.B. (1978). Scattering of horizontally-polarized shear waves by surface irregularities, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **54**, 319-348.
84. Niwa, Y. and Hirose, S. (1985). Scattering of antiplane waves by inhomogeneous alluvial valleys, *Proc. of JSCE Struc. Eng./Earthq. Eng.*, **2**(2), 189-198.
85. Du, X.-L., Xiong, J.-G., and Guan, H.-M. (1993). Boundary integration equation method
64. Bielak, J., Xu, J., and Ghattas, O. (1999). Earthquake ground motion and structural response in alluvial valleys, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **125**(5), 413-423.
65. Boor, D.M., Larner, K.L., and Aki, K. (1971). Comparison of two independent methods for the solution of wave-scattering problems: response of a sedimentary basin to vertically incident SH waves, *J. Geoph. Res.*, **76**(2), 558-569.
66. Boor, D.M. (1972). A note on the effect of simple topography on seismic SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **62**(1), 275-284.
67. Boor, D.M. (1973). The effect of simple topography on seismic waves: implications for the accelerations recorded at Pacoima dam, San fernando Valley, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **63**(5), 1603-1609.
68. Moczo, P. (1989). Finite-difference technique for SH-waves in 2-D media using irregular grids-application to the seismic response problem, *Geophys. J. Int.*, **99**, 321-329.
69. Hill, J., Benz, H., Murphy, M. and Schuster, G. (1990). Propagation and resonance of SH waves in the salt lake Valley, Utah, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**(1), 23-42.
70. Moczo, P. and Bard, P.-Y. (1993). Wave diffraction amplification and differential motion near strong lateral discontinuities, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**(1), 85-106.
71. Brebbia, C.A. and Dominguez, J. (1989). Boundary elements, an introductory course, computational mechanics publications, Southampton, Boston.
72. Eringen, A.C. and Suhubi, E.S. (1975). Elastodynamics, **2**, Linear Theory, Academic Press.
73. Dominguez, J. (1993). Boundary elements in dynamics, Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston.
74. Cole, D.M., Kosloff, D.D., and Minster, J.B. (1978). A numerical boundary integral method for elastodynamics, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **68**, 1331-1357.
75. Mansur, W.J. and Brebbia, C.A. (1982a).

96. Dravinski, M. and Yu, M.C. (2011). Scattering of plane harmonic SH waves by multiple inclusions, *Geophys. J. Int.*, **186**, 1331-1346.
97. Takemia, H. and Fujiwara, A. (1994). SH-wave scattering and propagation analysis at irregular sites by time domain BEM, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 1443-1455.
98. Feng, Y.-D., Wang, Y.-S., and Zhang, Z.-M. (2003). Transient scattering of SH waves from an inclusion with a unilateral frictional interface- a 2D time domain boundary element analysis, *Commun. Numer. Meth. Engng.*, **19**, 25-36.
99. Wong, H.L. and Jennings, P.C. (1975). Effects of canyon topography on strong ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **65**(5), 1239-1257.
100. Sanchez-Sesma, F.J., Herrera, I., and Aviles, J. (1982). A boundary method for elastic wave diffraction: application to scattering of SH waves by surface irregularities, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**(2), 473-490.
101. Moeen-Vaziri, N. and Trifunac, M.D. (1985). Scattering of plane SH-waves by cylindrical canals of arbitrary shape, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **4**(1), 18-23.
102. Moeen-Vaziri, N. and Trifunac, M.D. (1988). Scattering and diffraction of plane SH-waves by two-dimensional inhomogeneities: part I, *Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, **7**(4), 179-188.
103. Bravo, M.A., Sanchez-Sesma, F.J., and Chavez-Garcia, F.J. (1988). Ground motion on Starfield alluvial deposits for incident SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **78**(2), 436-450.
104. Eshraghi, H. and Dravinski, M. (1989). Transient scattering of elastic waves by dipping layers of arbitrary shape, part 1: antiplane strain model, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **18**, 397-415.
105. Clements, D.L. and Larsson, A. (1991). Ground motion on alluvial valleys under incident plane SH waves, *J. Austral. Math. Soc.*, Ser. B **33**, 240-253.
- to scattering of plane SH-waves, *Acta Seismologica Sinica*, **6**(3), 609-618.
86. Karabulut, K. and Ferguson, J.F. (2001). An analysis of the indirect boundary element method for seismic modeling, *Geophys. J. Int.*, **147**, 68-76.
87. Dravinski, M. and Wilson, M.S. (2001) Scattering of elastic waves by a general anisotropic basin, part 1: a 2D model, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **30**, 675-689.
88. Dravinski, M. (2007). Scattering of waves by a sedimentary basin with a corrugated interface, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **97**(1B), 256-264.
89. Papageorgiou, A.S. and Kim, J. (1991). Study of the propagation and amplification of seismic waves in Caracas valley with reference to the 29 July 1967 Earthquake: SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**(6), 2214-2233.
90. Fishman, K.L. and Ahmad, S. (1995). Seismic response for alluvial valleys subjected to SH, P and SV waves, *Soil Dyn. and Earthq. Eng.*, **14**, 249-258.
91. Heymsfield, E. (1997). Infinite domain correction for anti-plane shear waves in a two-dimensional boundary element analysis, *Int. J. Num. Meth. Engng.*, **40**, 953-964.
92. Kimoto, K. and Hirose, S. (2004). A Green's function boundary element method for SH-wave scattering in an elastic layer, *AIP Conf. Proc.*, **700**(1), 118-125.
93. Eslami H.A., Anvar, S.H., Jahanandish, M., and Ghahramani, A. (2009). Effect of canyons and their interaction on ground response to vertically traveling SH waves, *JSEE*, **11**(2), 71-81.
94. Yu, M.C. and Dravinski, M. (2009). Scattering of a plane harmonic SH wave by a completely embedded corrugated scatterer, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **78**, 196-214.
95. Dravinski, M. and Yu, M.C. (2010). Peak surface motion due to scattering of a plane harmonic SH wave by a randomly corrugated scatterer, *J. Seismol.*, **14**, 653-664.

- boundary element method for the scattering of SH waves, *Soil Dyn. Earth. Eng.*, **12**, 457-468.
117. Nowak, S.P. and Hall, F. (1993). Direct boundary element method for dynamics in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**(5), 1373-1390.
118. Ausilio, E., Conte, E., and Dente, G. (2008). Seismic response of alluvial valleys to SH waves, *AIP Conf. Proc.*, **1020**, 199-206.
119. Rice, J.M. and Sudd, M.H. (1984). Propagation and scattering of SH-waves in semi-infinite domains using a time-dependent boundary element method, *J. Appl. Mech. ASME*, **51**, 641-645.
120. Hirai, H. (1988). Analysis of transient response of SH wave scattering in a half-space by the boundary element method, *Engineering Analysis*, **5**(4), 189-194.
121. Datta, S.K. and Shah, A.H. (1982). Scattering of SH waves by embedded cavities, *Wave Motion*, **4**, 265-283.
122. Shah, A.H., Wong, K.C., and Datta, S.K. (1982). Diffraction of plane SH waves in a half-space, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **10**, 519-528.
123. Chuhan, Z. and Chongbin, Z. (1988). Effects of canyon topography and geological conditions on strong ground motion, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, **16**, 81-97.
124. Bielak, J., MacCamy, R.C., MacGhee, D.S., and Barry, A. (1991). Unified symmetric BEM-FEM for site effects on ground motion- SH waves, *J. Eng. Mech., ASCE*, **117**(10), 2265-2285.
125. Liu, S.-W., Sung, J.-C., and Chang, C.-S. (1997). Transient scattering of SH waves by surface-breaking and sub-surface cracks, *Int. J. Solids Structures*, **34**(30), 4019-4035.
126. Fäh, D., Suhadolc, P., Mueller, St., and Panza, G.F. (1994). A hybrid method for the estimation of ground motion in sedimentary basins: quantitative modeling for Mexico City, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**(2), 383-399.
106. Clements, D.L. and Larsson, A. (1994). A note on surface motion of inhomogeneous alluvial valleys due to incident plane SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**(1), 192-201.
107. Sanchez-Sesma F.J. and Esquivel, J.A. (1979). Ground motion on alluvial valleys under incident plane SH waves, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **69**(4), 1107-1120.
108. Sanchez-Sesma, F.J. and Rosenblueth, E. (1979). Ground motion at canyons of arbitrary shape under incident SH waves, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **7**, 441-450.
109. Dravinski, M. (1982). Influence of interface depth upon strong ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**(2), 597-614.
110. Dravinski, M. (1983). Scattering of plane harmonic SH wave by dipping layers of arbitrary shape, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**(5), 1303-1319.
111. Ohtsu, M. and Uesugi, S. (1985). Analysis of SH wave scattering in a half space and its applications to seismic responses of geological structures, *Engineering Analysis*, **2**(4), 198-204.
112. Benites, R., Aki, K., and Yomogida, K. (1992). Multiple scattering of SH waves in 2-D media with many cavities, *Pageoph*, **138**(3), 353-390.
113. Wen, K.-L. and Dravinski, M. (1995). Effects of the 2D semi-circular basin on ground motions under the Incident body wave, *TAO*, **6**(4), 511-525.
114. Ding, G. and Dravinski, M. (1996). Scattering of SH waves in multilayered media with irregular interfaces, *Earthq. Eng. Str. Dyn.*, **25**, 1391-1404.
115. Chiu, H.-C. and Huang, H.-C. (1992). Effects of the canyon topography on ground motions at the Feitsui dam site, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**(4), 1646-1660.
116. Reinoso, E., Wrobel, L.C., and Power, H. (1993). Preliminary results of the modeling of the Mexico City valley with a two-dimensional

- ۷- *Null-Field Method*
- ۸- *Discrete Wave-Number*
- ۹- *Direct Boundary Element Method*
- ۱۰- *Indirect Boundary Element Method*
- ۱۱- *Single Layer Potential*
- ۱۲- *Double Layer Potential*
- ۱۳- *Fundamental Solutions*
- ۱۴- *Heaviside Function*
- ۱۵- *Enclosing or Virtual Elements*
- ۱۶- *Truncated Surfaces*
- ۱۷- *Gaussian Shaped Hill*
- ۱۸- *Frictional Interface*
- ۱۹- *Modal Summation Method*

127. Luzon, F., Aoi, S., Fäh, D., and Sanchez-Sesma, F.J. (1995). Simulation of the seismic response of a 2D sedimentary basin: a comparison between the indirect boundary element method and a hybrid technique, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **85**(5), 1501-1506.

۸- پانوش

- ۱- *Matched Asymptotic Expansion of Wave Function*
- ۲- *Expansion of Bessel and Hankel Functions*
- ۳- *Wiener-Hopf Technique*
- ۴- *Macdonald's Solution*
- ۵- *Circular Inclusion*
- ۶- *Weighted Residual Method*