بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای حامد افخمی عقدا پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **مدل‌سازی عددی اثرات لرزه‌ای توپوگرافی با استفاده از روش المان محدود طیفی** در تاریخ ۱۳۹۰/۱۰/۶ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی زلزله پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر ناصر خاجی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر شریف شاه بیك	استادیار	
استاد ناظر	دکتر مسعود سلطانی محمدی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر بابك امیدوار	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر مسعود سلطانی محمدی	دانشیار	

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده در رشته مهندسی عمران- مهندسی زلزله است که در سال ۱۳۹۰ در دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر ناصر خاجی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب حامد افخمی عقدا دانشجوی رشته مهندسی عمران مهندسی زلزله مقطع کارشناسی ارشد

تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: حامد افخمی عقدا

تاریخ و امضا: ۹۰/۱۱/۱۵

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸٤/٤/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی

حامد افخمی عقدا

امضاء

۹۰/۱۱/۱۵

دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران– مهندسی زلزله

مدل‌سازی عددی اثرات لرزه‌ای توپوگرافی با استفاده از روش المان محدود طیفی

حامد افخمی عقدا

استاد راهنما:

دکتر ناصر خاجی

زمستان ۱۳۹۰

تقدیم به

ایثار پدر و گذشت مادر

تقدیم به

نگاه دوست

و تقدیم به

او که هرچه داریم از اوست

تشکر و قدردانی

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر ناصر خاجی که با سعه صدر و صبوری مرا راهنمایی نموده و با ارائه نظرات سازنده و رهنمودهای بی‌دریغشان در پیشبرد این پایان نامه سعی تمام مبذول داشتند، کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم .

چکیده

کاربرد روش‌های عددی برای حل معادلات حاکم بر انتشار امواج به منظور مدل‌سازی پاسخ لرزه‌ای زمین همراه با در نظر گرفتن اثرات توپوگرافی، لایه‌های خاک و ... در دو دهه اخیر مورد توجه لرزه‌شناس‌ها قرار داشته است. روش المان محدود طیفی[۱] روش ارتقایافته و ترکیبی از انعطاف‌پذیری هندسی روش المان محدود[۲] و سرعت همگرایی زیاد و دقت بالای روش طیفی[۳] است. حل معادله‌ی موج در این روش بر اساس حل به حالت ضعیف معادلات حاکم استوار است و به همین دلیل شرایط مرزی سطوح آزاد و تماس بین اجزای مختلف محیط انتشار موج به راحتی قابل اعمال می‌باشد. در این روش از چندجمله‌ای‌های چبیشف[۴] و لاگرانژ[۵] و روش انتگرال‌گیری گوس-لوباتو-لژاندر[۶] استفاده می‌شود. در این کوشش به منظور بررسی تاثیر شرایط ساختگاه بر امواج لرزه‌ای یک مدل ساده‌ی دو بعدی کرنش صفحه‌ای از یک دره با شکل منظم نیم‌دایره که درون یک نیم فضای الاستیک قرار گرفته است با بهره‌گیری از تحریک موجک ریکر[۷] و استفاده از روش المان طیفی، ایجاد گردید. نتایج و پاسخ‌های به دست آمده به صورت نمودارهای بی‌بعد بزرگنمایی ساختگاه ارائه شد و با نتایج به دست آمده از پژوهش‌های پیشینیان مقایسه گردید.

کلید واژه: انتشار امواج لرزه‌ای، روش المان محدود طیفی، اثرات ساختگاه، توپوگرافی، بزرگنمایی

---

[1] Spectral element method
[2] Finite element method
[3] Spectral method
[4] Chebychev polynomials
[5] Legendre polynomial
[6] Gauss-Lobatto-Legendre (GLL)
[7] Ricker wavelet

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... د
فهرست شکل‌ها ..... ه

فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۱
۱-۲- هدف ۶
۱-۳- ساختار پایان‌نامه ۶

فصل ۲- تئوری انتشار امواج ۸
۲-۱- مقدمه ۸
۲-۲- تنش ۸
۲-۳- کرنش ۱۰
۲-۴- معادله حرکت ۱۳
۲-۵- معادله حرکت امواج لرزه‌ای ۱۴
۲-۶- انواع امواج لرزه‌ای ۱۶
۲-۶-۱- امواج درونی ۱۶
۲-۶-۲- امواج سطحی ۲۱

فصل ۳- روش المان طیفی ۲۸
۳-۱- مقدمه ۲۸
۳-۲- معادلات حرکت ۳۰
۳-۲-۱- فرمولاسیون قوی معادلات حرکت ۳۱
۳-۲-۲- فرمولاسیون ضعیف معادلات حرکت ۳۲
۳-۲-۲-۱- تعریف مش ۳۴
۳-۲-۲-۲- المان‌های مرزی ۳۴
۳-۲-۲-۳- المان‌های حجمی ۳۷
۳-۲-۲-۴- تعریف شکل ضعیف معادلات حرکت بر روی مش ۳۹
۳-۲-۲-۵- بیان توابع بر روی المان‌ها ۴۱
۳-۲-۲-۶- بیان ماتریسی شکل ضعیف معادلات حرکت ۴۱
۳-۲-۲-۷- انتگرالگیری (عددی) بر روی المان‌ها ۴۳
۳-۲-۳- سیستم کلی و پیشروی زمانی ۴۶
۳-۳- دقت روش ۵۰
۳-۳-۱- انتخاب درجهٔ چندجمله‌ای ۵۰

۳-۳-۲- طرح مش ۵۱
۳-۴- شرط مرزی جذب کنندهٔ امواج ۵۱
۳-۴-۱- مرز جاذب لایسمر [۶۰] ۵۳
۳-۴-۱-۱- انتشار موج یک بعدی ۵۳
۳-۴-۱-۲- انتشار موج دو بعدی ۵۵
فصل ۴- صحت سنجی روش المان طیفی ۵۷
۴-۱- میله مستطیلی تحت دو بارگذاری مختلف ۵۷
۴-۲- محیط نیمه‌بی‌نهایت الاستیک تحت تأثیر موجگ ریکر ۶۲
فصل ۵- بررسی تاثیر توپوگرافی دره بر بزرگنمایی امواج زمین‌لرزه ۶۵
۵-۱- مقدمه ۶۵
۵-۲- تاریخچه‌ی برآورد رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دو بعدی به روش‌های عددی ۶۵
۵-۲-۱- بور (۱۹۷۲) ۶۵
۵-۲-۲- بوچون (۱۹۷۳) ۶۵
۵-۲-۳- سانچزسسما و روزنبلوث (۱۹۷۹) ۶۶
۵-۲-۴- شاه و وانگ (۱۹۸۲) ۶۶
۵-۲-۵- سانچز سسما و همکاران (۱۹۸۴، ۱۹۸۳، ۱۹۸۲، ۱۹۸۰) ۶۶
۵-۲-۶- ووگت و همکاران (۱۹۸۸) ۶۷
۵-۲-۷- ژائو و همکاران (۱۹۹۲) ۶۷
۵-۲-۸- سانچز سسما و کومپیلو (۱۹۹۱،۱۹۹۳) ۶۷
۵-۲-۹- ژائو و والیاپان (۱۹۹۳، ۱۹۸۸) ۶۸
۵-۲-۱۰- پدرسون و همکاران (۱۹۹۴) ۶۹
۵-۲-۱۱- سانچز سسما و لوزان (۱۹۹۵) ۶۹
۵-۲-۱۲- تاکناکا و همکاران (۱۹۹۶) ۷۰
۵-۲-۱۳- فورومورا و تاکناکا (۱۹۹۶) ۷۰
۵-۲-۱۴- لوزان و همکاران (۱۹۹۷) ۷۰
۵-۲-۱۵- اشفورد و همکاران (۱۹۹۷) ۷۰
۵-۲-۱۶- بوخوالاس و پاپادیمیتریو (۲۰۰۴) ۷۱
۵-۲-۱۷- کمالیان و همکاران (۲۰۰۷، ۲۰۰۶، ۲۰۰۵، ۲۰۰۳) ۷۱
۵-۳- مدلسازی دره‌ی نیم دایروی در فضای نیمه‌بی‌نهایت: ۷۲
۵-۳-۱- بهره‌گیری از موجک در مدلسازی لرزه‌ای: ۷۲
۵-۳-۲- ساخت مدل عددی: ۷۳
۵-۳-۳- ساخت شکل هندسی مدل: ۷۴
۵-۳-۴- نتایج آنالیز دینامیکی با موجک ریکر: ۷۶
فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۷۸
۶-۱- نتیجه گیری ۷۸

۶-۲- پیشنهادات برای ادامه‌ی مطالعه.....۷۸
ضمیمه أ -اثبات قطری بودن ماتریس جرم در روش المان محدود طیفی لژاندر:.....۷۹
ضمیمه ب -حل معادلهٔ تعادل کل سیستم:.....۸۱
فهرست مراجع ۸۳

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱: نقاط انتگرالگیری گاوس-لوباتو-لژاندر و وزنهای متناظر با آنها..... ۴۵
جدول ۵-۱: پارامترهای گوناگون مورد نیاز برای ساخت تابع موجک ورودی ریکر..... ۷۴
جدول ۵-۲: پارامترهای الاستیک در نظر گرفته شده برای مصالح مدل عددی دره مورد مطالعه..... ۷۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: نیروی سطحیF روی هر المان سطح dS [۱۷].....۹
شکل ۲-۲: مؤلفه‌های تنش روی سه وجه یک چهار وجهی [۱۷].....۱۰
شکل ۲-۳ (شکل راست) کرنش عمودی، تغییر فواصل (شکل چپ)کرنش برشی، تغییر زوایا [۱۸].....۱۱
شکل ۲-۴: مؤلفه‌های تنش به وجود آورنده نیرو در امتداد x_2 [۱۷].....۱۳
شکل ۲-۵: جابجائی ناشی از موج که در یک محیط ایزوتروپ همگن منتشر میشوند[۱۷].....۱۶
شکل ۲-۶: لرزه نگاشتهای ثبت شده در ایستگاه هاروارد بفاصله ° ۱۱۰ از یک زلزله عمیق در ۲۳ اوت ۱۹۹۵[۱۷].....۱۹
شکل ۲-۷: چگونگی انکسار، انعکاس و یا تبدیل احتمالی امواج منتشره P، SV و SHهنگام برخورد به سطح انفصال دو محیط جامد [۱۷].....۲۰
شکل ۲-۸: شماتیک انتشار امواج سطحی در یک صفحه قائم که چشمه و گیرنده را در بر دارد. [۱۷].....۲۲
شکل ۲-۹: حرکت ذرات در امواج رایلی منتجه از ترکیب ارتعاشات P و SV در صفحه قائم [۲۱].....۲۴
شکل ۲-۱۰: وجود یک لایه کم سرعت روی لایه با سرعت بیشتر(نیم فضا) شرط به تله افتادن انرژی امواج SH و ایجاد امواج لاو در سطح انفصال دو لایه [۲۱].....۲۵
شکل ۲-۱۱: موج لاو - حرکت ذرات افقی و عمود بر جهت انتشار موج- کاهش دامنه با افزایش عمق به صورت نمایی [۲۱].....۲۶
شکل ۲-۱۲: سه مؤلفه‌ی جنبش زمین رکورد شده توسط لرزه‌نگار ایستگاه برکلی در زلزله هفتم می ۱۹۷۲ در نیوایرلند[۲۲].....۲۷
شکل ۳-۱: مدل سه بعدی قسمتی از زمین برای تحلیل.....۳۰
شکل ۳-۲: تقسیم بندی مدل به n_e المان غیرهمپوش Ω_e.....۳۴
شکل ۳-۳: تعریف هندسهٔ المان‌های سطحی چهار ضلعی با (الف)۴، (ب)۹، (ج)۱۶ و (د)۳۶ نقطهٔ کنترل ۳۵
شکل ۳-۴: نگاشت از المان دو بعدی سطحی به مربع مرجع.....۳۵
شکل ۳-۵: تعریف هندسهٔ المان‌های حجمی شش وجهی با (الف)۸ و (ب)۲۷ نقطهٔ کنترل.....۳۷
شکل ۳-۶: نگاشت از المان سه بعدی حجمی به مکعب مرجع.....۳۸
شکل ۳-۷: چندجمله ای لاگرانژ درجهٔ ۸ برای نقاط گاوس-لوباتو-لژاندر.....۳۹
شکل ۳-۸: چندجمله ای لاگرانژ درجهٔ ۸ برای نقاط با فواصل مساوی.....۴۰
شکل ۳-۹: اشتراک نقاط شبکه بین المان‌ها.....۴۶
شکل ۳-۱۰: کمترین فاصلهٔ بین گره‌ها برای المان‌های مرجع یک بعدی با مرتبه‌های ۱ تا ۲۰.....۴۸
شکل ۳-۱۱: مدلسازی عملی انتشار امواج در محیط نامحدود.....۵۲

شکل ۳-۱۲: الف) میله منشوری نیمه‌بی‌نهایت ب)تعادل المان کوچک پ) مدل میله کوتاه شده با میراگر ویسکوز [۶۱] ۵۳
شکل ۳-۱۳: میراگرهای ویسکوز متمرکز شده [۶۱] ۵۶
شکل ۴-۱: الف)هندسه و شرایط مرزی و بارگذاری، ب)بار هویساید، پ)بار مثلثی ۵۷
شکل ۴-۲: مش بندی میله مستطیلی ۵۸
شکل ۴-۳: جابجایی افقی نقطه A در بارگذاری هویساید، (الف)برای المان طیفی ۲۵ گرهی، (ب)برای المان طیفی ۴۹ گرهی ۵۹
شکل ۴-۴: تنش افقی نقطه B در بارگذاری هویساید، (الف)برای المان طیفی ۲۵ گرهی، (ب)برای المان طیفی ۴۹ گرهی ۶۰
شکل ۴-۵: جابجایی افقی نقطه A در بارگذاری مثلثی، (الف)برای المان طیفی ۲۵ گرهی، (ب)برای المان طیفی ۴۹ گرهی ۶۱
شکل ۴-۶: تنش افقی نقطه B در بارگذاری مثلثی، (الف)برای المان طیفی ۲۵ گرهی، (ب)برای المان طیفی ۴۹ گرهی ۶۲
شکل ۴-۷: نیم‌فضای الاستیک بی‌نهایت ۶۳
شکل ۴-۸: موجک ریکر (تابع بارگذاری) ۶۳
شکل ۴-۹: مش‌بندی مثال با ۴۰۰ المان مربعی ۶۴
شکل ۴-۱۰: جابجایی افقی نقطه‌ی A در اثر اعمال P(t) در نقطه‌ی O ۶۴
شکل ۵-۱: منحنی‌های بزرگنمایی عوارض توپوگرافی به ازاء طول موج مهاجم ۵ برابر عارضه [۶۴] ۶۶
شکل ۵-۲: نتایج بدست آمده برای تپه مثلثی با نسبت شکل SR=1.0 در برخورد با موج SV با زاویه تابش ۳۰ درجه [۷۴] ۶۷
شکل ۵-۳: نتایج بدست آمده برای دره نیم بیضی با نسبت شکل SR=3.0 در برخورد با موج SV با زاویه تابش ۳۰ درجه[۷۴ و ۷۵] ۶۸
شکل ۵-۴: منحنی‌های بزرگنمایی دره‌ها به ازاء ارتفاع و اشکال مختلف در برخورد با امواج مهاجم P و SV [۷۷] ۶۹
شکل ۵-۵: هندسه شیب و منحنی بزرگنمایی تاج به ازاء زوایای مختلف شیب در برابر امواج مهاجم SH [۸۵] ۷۱
شکل ۵-۶: الف) تاریخچه‌ی زمانی جابجایی ب) محتوای فرکانسی با پارامترهای t_0 و f_p ۷۲
شکل ۵-۷: تاریخچه‌ی زمانی موجک ریکر بدست آمده از فرکانس بدون بعد $\Omega = 0.5$ ۷۴
شکل ۵-۸: مش‌بندی مدل دوبعدی با المان‌های چهارضلعی ۷۶
شکل ۵-۹: منحنی تغییرات بزرگنمایی جابجایی افقی در اثر موج SV با زاویه‌ی تابش ۹۰ درجه ۷۷
شکل ۵-۱۰: منحنی تغییرات بزرگنمایی جابجایی قائم در اثر موج SV با زاویه‌ی تابش ۹۰ درجه ۷۷

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

امواج زلزله با دور شدن از کانون و نیز تحت اثر توپوگرافی‌های متفاوت و لایه‌بندی‌های زیرسطحی دستخوش تغییر و تحولاتی می‌شوند که عوامل مربوط به فاصله نقاط نسبت به کانون زلزله تحت عنوان تاثیر مسیر[۱] و عوامل مربوط به توپوگرافی‌های سطحی و لایه‌بندی‌های زیرسطحی تحت عنوان تاثیر ساختگاه[۲] شناخته می‌شوند. پاسخ لرزه‌ای یک ساختگاه به شدت تحت تاثیر ویژگی‌های آن ساختگاه قرار دارد. بسیار مشاهده شده است که اثرات زلزله از نظر خرابی‌ها، بسته به منطقه‌ای که سازه‌ها در آن احداث شده‌اند متفاوت بوده است.

به عنوان مثال طی زمین‌لرزه ۱۷ ژانویه ۱۹۹۴ نورثریج[۳] (M_W=۶/۷) شتاب ۱/۷۸g در امتداد شرقی-غربی ایستگاه شتاب‌نگاری تارزانا[۴] کالیفرنیا که در ۶ کیلومتری جنوب رومرکز زلزله واقع شده است، به دست آمد. شتاب نگار مربوطه بر روی تپه‌ای با ۱۵متر ارتفاع، ۵۰۰ متر درازا و ۱۳۰ متر پهنا واقع شده بود[۱] . یا لرزه نگار سد پایکوما[۵] شتاب‌های افقی ماکزیمم حدود ۱/۲۵g را در هر دو جهت عمود بر هم در زلزله‌ی ۱۹۷۱ سان فرناندو[۶] (M_L=۶/۴) را ثبت نموده است[۲, ۳]. مقادیر ثبت شده بطور قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از حد انتظار برای زلزله‌ای با این بزرگی بوده است.

بطور کلی تا به امروز، مطالعات جهت ارزیابی اثرات ناشی از زلزله بر روی ناهمواری‌های سطحی زمین، در چهار شاخه پیگیری شده است :

- روش‌های تحلیلی
- روش‌های تجربی
- روش‌های مبتنی بر مدلسازی عددی
- روش‌های مبتنی بر مدلسازی فیزیکی

بر خلاف بررسی‌های مربوط به اثرات لایه بندی‌های زیر سطحی که در اغلب حالات با دقت مناسبی توسط تحلیل‌های یک بعدی مدل می‌شوند، اثرات توپوگرافی سطحی ذاتاً تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی را اقتضا می‌نمایند. علیرغم مشخص شدن اهمیت اثرات توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای و نیز با نزدیک‌تر شدن مدلها به واقعیت با در نظر گرفتن مدل‌ها بصورت چند بعدی، هنوز شناخت جامعی از رفتار لرزه‌ای این عوارض در دست نمی باشد. همانطور که اشاره شد در طول تاریخچه بررسی اثرات توپوگرافی، از

[1] Path effect
[2] Site effect
[3] Northridge
[4] Tarzana
[5] Pacoima
[6] San Fernando

روش‌های گوناگونی استفاده شده است که ایجاد همگرایی بین آنها و رسیدن به نتیجه‌ای مشترک را دشوار می‌سازد. در کنار مطالعات صورت گرفته به روش‌های فوق، برخی آیین نامه‌های طراحی لرزه‌ای نیز قواعدی را برای در نظر گرفتن این اثرات بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین ارائه نموده‌اند. با این وجود، با توجه به اهمیت زیاد اثرات توپوگرافی، لزوم وجود آیین نامه‌ها و استانداردهای فراگیر که به صورت جامع به ارائه راه حل‌هایی جهت پیش بینی و تخمین مقدار و چگونگی تأثیر ناهمواریهای سطحی زمین بپردازند بیش از پیش احساس می‌گردد.

به لحاظ هندسی، بررسی‌های عددی و تحلیلی انجام شده در ابتدای راه با مدل‌هایی که از پیچیدگی کمی برخوردار بودند و هندسه‌ای ساده داشتند آغاز شد و به مرور با دستیابی به نتایج این بررسی‌ها، مدلها پیچیده‌تر و به واقعیت نزدیکتر شدند. در میان اشکال هندسی موجود به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای تپه‌ها و دره‌ها به عنوان دو دسته از فراوان‌ترین ناهمواری‌های سطحی طبیعی، در مدلسازی‌ها به اشکال نیم دایروی و نیم سینوسی به این دلیل که به هندسه این دسته از عوارض در واقعیت نزدیکتر بوده توجه بیشتری شده است.

حل تحلیلی مسأله پراکنش امواج لرزه‌ای توسط عوارض توپوگرافی مسأله پیچیده‌ای است و مطالعاتی که در این زمینه به انجام رسیده است همگی به عوارض توپوگرافی بسیار ساده و امواج مهاجم SH مربوط هستند (تریفوناک ۱۹۷۲[۴]، وانگ و تریفوناک ۱۹۷۴[۵, ۶]، سانچز سسما ۱۹۸۵[۷]). تنها سانچز سسما (۱۹۹۰)[۸] امواج درون صفحه SV را نیز برای برخی حالات خاص یک گوه مد نظر قرار داده است.

سانچزسسما (۱۹۸۵)[۷] روابط ساده‌ای را برای میزان بزرگنمایی امواج مهاجم SH که در اثر توپوگرافی ایجاد شده است، به روش حل دقیق در رأس نامنظمی‌های گوه‌ای شکل بدست آورد. بزرگنمایی در رأس گوه مستقل از فرکانس موج مهاجم و برابر $2/\nu$ بدست آورده شده است که در آن $\nu\pi$ زاویه رأس گوه می‌باشد. بنابراین هرگاه نقاط رأس دو گوه مجاور به اندازه کافی از یکدیگر دور باشند، نسبت بزرگنمایی در قله نسبت به نقطه قعر برابر ν_B/ν_T خواهد بود. بطور مثال برای زوایای معمول $\varphi_B = 180^\circ$ و $\varphi_T = 60^\circ$ بزرگنمایی برابر ۳ بدست می‌آید. سانچز سسما (۱۹۹۰)[۸] مسأله‌ای مشابه با تحقیق پیشین خود را برای حالت موج مهاجم SH و SV در برخی از ضرایب پواسون محیط حل کرد. در حالت موج مهاجم SV برای گوه با زاویه رأس ۹۰ درجه دامنه حرکت برابر صفر و برای گوه با زاویه رأس ۱۲۰ درجه دو برابر دامنه حرکت در سطح یک محیط نیم بی‌نهایت است. لازم به ذکر است نتایج بدست آمده از مطالعات تحلیلی برای تعیین جابجایی‌های نقاط روی گوه مادامی معتبرند که پدیده تداخل رخ ندهد که این موضوع تابعی از ابعاد گوه و مشخصات الاستیک محیط می‌باشد.

اگرچه بررسی رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی به روش تجربی در مقایسه با سایر روش‌ها هزینه‌های بیشتری را می‌طلبد اما در مقابل واقع بینانه ترین نتایج را در بر خواهد داشت. این مزیت بزرگ سبب علاقه محققین برای استفاده از این روش در برآورد رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی گردیده است. روش‌های تجربی علیرغم این مزیت، دارای محدودیت‌هایی است که تفسیر داده‌ها و حوزه کاربرد نتایج را

به شرایط خاص هر مطالعه محدود می‌نماید. در عمل یک مطالعه تجربی مبتنی بر برداشت داده‌ها و تفسیر آنهاست. در زیر به برخی عوامل که می‌توانند برای مطالعه رفتار لرزه‌ای به روش تجربی ایجاد محدودیت نمایند اشاره شده است :

- نوع داده‌های برداشت شده
- دستگاههای استفاده شده در ثبت و پردازش داده‌ها
- شرایط خاص محلی
- روش تفسیر نتایج

با توجه به این موارد بطور کلی، نتایج بدست آمده برای یک مطالعه تجربی نشان‌دهنده شرایط خاص محل مورد مطالعه بوده و زمانی می‌توان از آنها برای تعمیم به سایر شرایط استفاده نمود که با اندازه‌گیری‌های متعدد اثر تمامی عوامل موجود در نتایج لحاظ شده باشد

روش‌های عددی تحلیل لرزه‌ای ساختگاه‌های چندبعدی به سه گروه عمده تقسیم می‌شوند: روش‌های حجمی مانند روش اجزاء محدود، روش‌های مرزی مانند روش اجزای مرزی و روش‌های مرکب که از ترکیب روش‌های حجمی و مرزی پدید می‌آید. بدیهی است که فرمول‌بندی هر یک از این‌ها در فضای زمان، به فرمول‌بندی آن در فضای تبدیل یافته رجحان دارد. چه نه تنها امکان آن فراهم خواهد شد تا تاریخچه زمانی پاسخ‌ها به شکل طبیعی و مستقیم برآورد شوند، بلکه زمینه‌ای پدید خواهد آمد تا بتوان مسائل غیرخطی را نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.

از جملهٔ روش‌های عددی که در حل مسألهٔ انتشار موج از آنها استفاده شده است می‌توان به روشهای زیر اشاره کرد:

۱. روش تفاضل محدود[۱]
۲. روش (شبه) طیفی[۲]
۳. روش المان محدود[۳]
۴. روش المان محدود طیفی[۴]
۵. روش المان مرزی(یا روش انتگرال مرزی)[۵]

و همچنین روشهایی که ترکیبی از روشهای مختلف می‌باشند.

[1] Finite difference method
[2] (Pseudo) Spectral method
[3] Finite element method
[4] Spectral finite element method
[5] Boundary element method(or boundary integral method)

قابلیت‌های روش‌های عددی مختلف در نحوهٔ حل مسألهٔ انتشار موج و نتایج قابل ارائه توسط آنها از چند نظر می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد:

- توانایی روش در مدلسازی هندسی محیط انتشار موج
- توانایی روش در مدلسازی و بیان جنبه‌ها و پدیده‌های مختلف در مسألهٔ انتشار موج
- مقدار پراکندگی عددی[1]
- حجم محاسبات مورد نیاز برای رسیدن به جواب با دقت مورد نظر
- حافظهٔ مورد نیاز برای ذخیرهٔ داده‌های مورد استفاده
- قابلیت روش برای انجام محاسبات مربوط به آن توسط پردازش موازی

روشی که تاکنون بیش از همه در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته است روش تفاضل محدود است. از مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. سادگی در عملیات[۹, ۱۰]

معایب این روش نیز عبارتند از:

۱. وجود پراکندگی عددی[۹, ۱۰]
۲. وجود مشکلات در هنگام اعمال شرایط مرزی بخصوص در سطح آزاد[۹, ۱۱] و حضور ناهمواریهای سطحی و ناهمسانگردی و ناهمگنی مصالح[۱۲, ۱۳]
۳. نیاز به تعداد زیادی نقاط گرهی برای دستیابی به دقت مورد انتظار[۱۱]
٤. وجود مشکلات در مدلسازی هندسه‌های پیچیده با شبکهٔ درشت[۱۱, ۱۳]
۵. کمی دقت در شبیه سازی انتشار موج رایلی و امواج سطحی[۱۱, ۱۲] به دلیل وجود پراکندگی عددی[۱۴]
٦. مشکل بودن ایجاد توازن بین پراکندگی عددی و هزینه محاسباتی[۱۱]
۷. محدودیت در گام‌های زمانی برای منظور نمودن ملاحظات پایداری[۱۰]

روش دیگری که از سال‌ها پیش به عنوان یک روش مقبول مورد استفاده قرار گرفته است روش شبه طیفی (کلی یا عمومی) است. برخی از مزایای این روش عبارتست از:

۱. پراکندگی عددی کم[۹]
۲. کاربرد موفقیت آمیز برای مسائل موج الاستیک دو بعدی شامل امواج طولی و برشی[۱۰]
۳. دستیابی به دقت مورد انتظار با استفاده از نقاط گرهی کمتر به ازای طول موج[۱۱]

موارد زیر را نیز می‌توان به عنوان عیب معرفی نمود:

۱. ظهور ناپایداری‌هایی در هنگام اعمال شرایط مرزی و ایجاد مشکلاتی در روش انتگرالگیری زمانی[۹]
۲. ظهور نوسان‌های عددی در حضور ناهمگنی‌ها یا مرزهای تیز درون مدل[۹]

[1] Numerical dispersion

۳. محدود به مدل‌های با تغییرات هموار[۱۲]
۴. مشکل بودن اعمال شرایط مرزی سطح آزاد[۱۱, ۱۲]
۵. مشکل بودن بیان امواج سطحی[۱۲]
۶. توانایی اندک در مدلسازی هندسه‌های پیچیده[۱۱, ۱۳]

امروزه روش المان محدود جای خود را در علوم مختلف باز کرده است. در مسألهٔ انتشار موج نیز تاکنون از این روش استفاده شده است. این روش نیز قابلیت‌ها و نقاط ضعفی دارد. از قابلیتهای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. انعطاف پذیری در مدلسازی[۹]

موارد زیر را نیز می‌توان به عنوان نقاط ضعف این روش معرفی نمود:

۱. درگیری با دستگاههای معادلات خطی بزرگ، مخصوصاً در سه بعد و بار محاسباتی زیاد[۹, ۱۲]
۲. وجود پراکندگی عددی در المان‌های محدود خطی و درجهٔ دوم (مرتبهٔ پایین)[۱۰, ۱۱, ۱۵, ۱۶]
۳. پیچیده بودن اجرا بر روی کامپیوترهای موازی با حافظهٔ تقسیم شده[۱۲]
۴. وقوع امواج (مودهای) موهومی در المان‌های محدود مرتبهٔ بالا[۱۱]
۵. محدودیت در گامهای زمانی برای منظور نمودن ملاحظات پایداری[۱۰]

از مزایای روش انتگرال مرزی(یا روش المان مرزی) نیز می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. شیوه‌ای زیبا برای منظور نمودن تغییرات توپوگرافی[۱۲]
۲. جستجوی حل یک قلمرو با یک بعد کمتر از قلمرو فیزیکی[۱۱]
۳. ارضا شدن شرایط تشعشع از ابتدا[۱۱]

البته این روش نقاط ضعفی نیز دارد که برخی از آنها عبارتند از:

۱. قلمرو همگن و قانون ساختاری خطی برای مصالح (مگر اینکه یک روش در قلمرو زمان اتخاذ گردد) [۱۱]
۲. دستگاه معادلات خطی نامتقارن و در برخی موارد بدخیم[1] [۱۱]
۳. هزینهٔ عددی زیاد در سه بعد[۱۲]
۴. محدود به تعداد متناهی از نواحی همگن[۱۲]

علاوه بر روش‌های فوق، روش المان طیفی نیز به تازگی جای خود را در علم انتشار امواج لرزه ای باز کرده است. این روش بر پایه تقریب چند جمله‌ای تکه‌ای مرتبهٔ بالا در فرمولاسیون ضعیف معادله‌ی موج[۹] قرار گرفته است. همچنین برای مش بندی هندسه‌ی مسأله در دو بعد، از مثلث و چهار ضلعی، و

[1] Ill-conditioned

در سه بعد، از هرم(چهار وجهی با اضلاع مثلثی) و شش وجهی استفاده می‌گردد[۹]، که در نتیجهٔ آن می‌توان به راحتی هر هندسه ای را مش‌بندی نمود. از مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. پراکندگی عددی بسیار محدود[۹, ۱۱, ۱۳]
۲. منظور نمودن شرایط سطح آزاد بطور طبیعی در بطن فرمولاسیون ضعیف[۹, ۱۱, ۱۲]
۳. اگر بر پایه چندجمله‌ایهای لژاندر باشد، ماتریس جرم در هنگام تولید قطری است که منجر به کاهشی مؤثر در هزینهٔ محاسباتی می‌شود و امکان درگیر شدن با سازه‌های بزرگ در سه بعد را می‌دهد[۹].
۴. مدلهای پیچیده شامل ناهمسانگردی‌ها، هم مرزی‌های سیال و جامد[۹, ۱۱, ۱۲] یا میرایی می‌توانند به شکل طبیعی با روشهای المان طیفی کلاسیک مدل شوند[۹].
۵. کارا بودن اجرا بر روی کامپیوترهای موازی[۹, ۱۱, ۱۲]
۶. امکان کاهش پراکندگی عددی و رسیدن به حل‌های با دقت بالا با استفاده از المان‌های طیفی مرتبهٔ بالای چبیشف[۱۰]
۷. دقت در بیان انتشار امواج سطحی[۱۲]
۸. ترکیبی از انعطاف‌پذیری هندسی یک روش مرتبهٔ پایین تر المان محدود با سرعت همگرایی نمایی مرتبط با روشهای طیفی[۱۱, ۱۳]
۹. تعریف مرزهای مصنوعی با اعمال شرایط جذب کنندگی [۱۱]
۱۰. نیاز به تعداد کمتری نقاط گرهی به ازای طول موج حداقل و حفظ دقت بالا حتی برای مسافتهای انتشار بسیار بلند در روش المان طیفی چبیشف[۱۱]

همانطور که می‌بینیم روش المان طیفی (بیشتر بر پایه چندجمله‌ایهای لژاندر و گاهی چبیشف) از مزایای بسیار مهمی در مدلسازی انتشار امواج لرزه ای برخوردار است که این امر می‌تواند راه را برای استفاده گسترده تر از آن در علم انتشار امواج لرزه ای بگشاید. اما با این وجود، این روش ضعفهایی نیز دارد. به عنوان مثال تا کنون دیده نشده است که مسأله ای غیر خطی را با استفاده از آن حل نمایند.

۱-۲- هدف

در این تحقیق هدف اصلی معرفی روش المان محدود طیفی به عنوان یک روش پرکاربرد در مسائل لرزه‌شناسی و انتشار امواج و ارائه‌ی برنامه‌ی کامپیوتری جامعی برای استفاده از این روش می‌باشد. با توجه به اهمیت بالای بررسی رفتار لرزه‌ای نامنظمی‌های توپوگرافی، تغییرات بزرگنمایی پاسخ لرزه‌ای بر روی یک دره‌ی نیم‌دایروی با استفاده از روش المان محدود طیفی مورد بررسی قرار گرفت.

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

فصل اول، مقدمه می‌باشد که در آن به بیان کلی مسأله پرداخته می‌شود و اشاره ای نیز به انواع روش‌های حل می‌گردد. فصل دوم به بیان تئوری انتشار امواج اختصاص یافته است. آنچه در فصل سوم