دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

رساله دکتری رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی زلزله

عنوان رساله:

یک روش المان مرزی- محدود مقیاس‌شده دارای ماتریس‌های ضرایب قطری برای حل مسایل الاستودینامیک

نام دانشجو:

محمدایمان خداکرمی

استاد راهنما:

دکتر ناصر خاجی

بهمن‌ماه 1390

بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای محمدایمان خداکرمی رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان **یك روش المان مرزی- محدود مقیاس شده دارای ماتریسهای ضرایب قطری برای حل مسائل الاستودینامیك** در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۸ ارائه کردند.

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

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر ناصر خاجی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر محمد تقی احمدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر علی کمك پناه	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر شریف شاه بیك	استادیار	
استاد ناظر	دکتر اسدا... نورزاد	استادیار	
استاد ناظر	دکتر محسن کمالیان	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر شریف شاه بیك	استادیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه رساله مورد تأییداست
امضای استاد راهنما:
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

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

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری 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 هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

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

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

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

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب **محمدایمان خداکرمی** دانشجوی رشته **مهندسی عمران- مهندسی زلزله** ورودی سال تحصیلی **۸۸-۱۳۸۷** مقطع **دکتری تخصصی** دانشکده **مهندسی عمران و محیطزیست** متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: .....

تاریخ: .....

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/ رساله دکتری نگارنده در رشته است که در سال

در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار

خانم/جناب آقای دکتر ، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر

و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر 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 را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت 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 شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **محمدایمان خداکرمی** دانشجوی رشته **مهندسی عمران- مهندسی زلزله** مقطع **دکتری** تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: **محمدایمان خداکرمی**

تاریخ و امضا: ۱۳۹۰/۱۱/۸

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

رساله دکتری رشته مهندسی عمران گرایش مهندسی زلزله

عنوان رساله:

یک روش المان مرزی- محدود مقیاس‌شده دارای ماتریس‌های ضرایب قطری برای حل مسایل الاستودینامیک

نام دانشجو:

محمدایمان خداکرمی

استاد راهنما:

دکتر ناصر خاجی

استاد مشاور:

دکتر محمدتقی احمدی

بهمن‌ماه 1390

تقدیم به پدرم، مادرم و همسرم

به پاس تمام زحمات، فداکاری‌ها، مهربانی‌ها و همراهی‌هایشان

تشکر و قدردانی

سپاس خداوند یگانه را که به من توانایی داد تا مراحل گوناگون پژوهش در راستای رساله حاضر و نگارش متن آن را به پایان برسانم. در این مرحله، بر خود لازم می دانم کمال تقدیر و تشکر خود را نثار کسانی کنم که در این مسیر پر فراز و نشیب، لحظه‌ای از راهنمایی، پشتیبانی، همراهی و تشویق من دریغ نکردند.

از استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر ناصر خاجی، که در تمام مدتی که تحت نظارت ایشان مشغول به کار بودم سرشار از آموختن توامان علم، اخلاق و معنویت بود، نهایت تشکر را دارم. ایشان علاوه بر همراهی تمام عیار خود در این مدت، الگویی بی نظیر از یک پژوهشگر و یک استاد فداکار در ذهن من حک نمودند. در پرتو روحیه پر از امید ایشان بود که تمام دلسردی‌ها رنگ می‌باخت و در سایه وجود خستگی ناپذیر ایشان، پرسش‌های گاه و بی‌گاهم پاسخ می‌یافت. از جناب آقای دکتر محمدتقی احمدی، استاد مشاور بزرگوارم، که قدم به قدم در تمامی مراحل این پژوهش مرا همراهی کردند، کمال قدردانی را دارم. آموختن نحوه انجام یک کار تحقیقاتی مؤثر در کنار لذت بردن از کار گروهی بدون شناخت این دو عزیز امکان پذیر نبود و بی‌شک این آموخته‌ها در زندگی نیز بسیار کارآمد خواهد بود.

در این جا بر خود لازم می دانم که از مساعدت‌های جناب آقای پروفسور مونئو هوری (Prof. Muneo Hori) استاد مرکز تحقیقات زلزله دانشگاه توکیو (ERI) که در طول مدت فرصت مطالعاتی، زمینه مناسبی را برای استفاده از امکانات آن مرکز فراهم آوردند و در تمام این مدت همواره از راهنمایی‌های ایشان بهره‌مند بودم نیز کمال قدردانی را نمایم.

از خانواده عزیزم که از دوران کودکی، شور دانستن و لذت کشف و جستجو را در من بیدار کردند، استقامت در تلاش را به من آموختند و در تمام دوران تحصیلم با فراهم‌کردن آرامش فکری و آسایش روحی، بسیاری دشواری‌ها را بر من آسان نمودند، با تمام وجود قدردانم.

از همسر دلسوز و بزرگوارم که در طی مدت تحصیل در مقطع دکتری علاوه بر تشویق و همراهی من، همواره درصدد مهیا نمودن محیطی سرشار از آرامش و به دور از هیاهو بودند که صد البته بدون همراهی ایشان، گذر از پیچ و خم‌های این مسیر، بسیار دشوار می‌شد، کمال سپاسگزاری را دارم.

در پایان لازم می دانم از تمام دوستانی که به هر طریق در به سرانجام رسیده این رساله و تدوین آن، همکاری نموده‌اند، قدردانی نمایم.

چکیده

موضوع رساله دکتری حاضر، ارائه یک روش نیمه‌تحلیلی نوین است که توانایی مدل‌سازی مسایل مختلف مکانیک محیط‌های پیوسته را دارا بوده و با حداقل هزینه محاسباتی، پاسخ‌های دارای دقت مناسب را ارائه - دهد. این روش که در نهایت به منظور حل مسایل انتشار امواج در مباحث مهندسی زلزله مورد بهره‌برداری قرار خواهد گرفت، علاوه بر حل مسایل الاستودینامیک، توانایی حل مسایل ساده‌تر مانند مسایل پتانسیل و مسایل الاستواستاتیک را نیز دارد. این روش پیشنهادی، دارای ماتریس ضرایب قطری و معادلات دیفرانسیل حاکم غیردرگیر بوده و مسایل را در فضایی که یک بعد کمتر از بعد فضای اصلی مسئله می‌باشد، حل می‌کند.

در روش حاضر برای تقریب هندسه مسئله، از المان‌های مرتبه بالای غیرایزوپارامتریک جدیدی استفاده می‌شود که در این المان‌ها، چندجمله‌ای‌های چبیشف نقش توابع نگاشت را بر عهده دارند، همچنین توابع شکل خاصی به منظور مدل‌سازی مجهولات مسئله ارائه شده‌اند که دارای دو ویژگی اصلی می‌باشد: از یک‌سو مانند تمام توابع شکل استاندارد مورد استفاده در روش‌های عددی متداول، دارای خاصیت دلتای کرونیکر در نقاط گرهی بوده و از سوی دیگر، مشتق نخست آن‌ها نسبت به مختصات محلی مرزی در نقاط گرهی برابر با صفر می‌باشد. شیوه پیشنهادی به منظور تولید فرم انتگرالی معادلات حاکم و نیز روش انتگرال‌گیری عددی کلنشا-کورتیس بر روی المان‌های مذکور، منجر به ایجاد ماتریس‌های ضرایب قطری می‌گردد.

در این رساله، ابزار مورد نیاز به منظور استخراج روابط مورد نیاز برای حل مسایل پتانسیل، الاستواستاتیک و الاستودینامیک دو و سه‌بعدی ارائه شده است. همچنین در هر بخش، با حل تعدادی مسئله شاخص، به صحت‌سنجی دقت روش پیشنهادی پرداخته شده است. در پایان نیز تعدادی از مسایل بزرگ مقیاس و متنوع مطرح در مباحث مهندسی زلزله مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقایسه نتایج به‌دست آمده از

روش پیشنهادی و سایر روش‌های عددی و تحلیلی، حاکی از دقت نسبتا مناسب این روش برای حل مسایل مطرح‌شده می‌باشد.

کلمات کلیدی: مسایل الاستودینامیک، روش نیمه تحلیلی، المان غیر ایزوپارامتریک، ماتریس ضرایب قطری

فهرست مطالب

فصل 1 نگاهی بر روش‌های عددی مورد استفاده در حل مسایل الاستودینامیک 11

1,1. روش تفاضل‌های محدود 16

2,1. روش المان‌های محدود 17

3,1. روش المان‌های مرزی 18

4,1. روش‌های بدون المان 18

5,1. روش المان‌های شبه طیفی 19

6,1. روش المان‌های طیفی 20

7,1. روش المان مرزی- محدود مقیاس‌شده 21

8,1. جایگاه تحقیق 21

فصل 2 ابزارهای روش پیشنهادی 23

1,2. مدل‌سازی هندسه 24

1,1,2. مدل‌سازی هندسه مسایل دو بعدی در روش پیشنهادی 26

2,1,2. مدل‌سازی هندسه مسایل سه بعدی در روش پیشنهادی 30

2,2. مدل‌سازی فیزیک مسئله 41

1,2,2. مدل‌سازی فیزیک مسئله در مسایل دو بعدی 42

2,2,2. مدل‌سازی فیزیک مسئله در مسایل سه بعدی 46

3,2. روش انتگرال گیری عددی مورد استفاده در روش پیشنهادی 50

1,3,2. روش انتگرال گیری یک بعدی کلنشا- کورتیس برای مسایل دو بعدی 51

2,3,2. روش انتگرال گیری دو بعدی کلنشا- کورتیس برای مسایل سه بعدی 52

4,2. روش کلی حل معادلات حاکم در روش حاضر 53

فصل 3 مسایل پتانسیل 55

1,3. مسایل پتانسیل دو بعدی 57

1,1,3. کلیاتی در مورد تئوری پتانسیل دو بعدی 57

2,1,3. معادله حاکم بر مسایل پتانسیل 59

3,1,3. ماتریس ضرایب در مسایل پتانسیل دو بعدی 62
4,1,3. حل معادله حاکم بر مسایل پتانسیل دو بعدی 63
5,1,3. چند مثال برای صحت‌سنجی حل مسایل پتانسیل دو بعدی 65
2,3. مسایل پتانسیل سه بعدی 73
1,2,3. معادله حاکم بر مسایل پتانیسل سه بعدی 73
2,2,3. ماتریس ضرایب در مسایل پتانسیل سه بعدی 77
3,2,3. حل معادله حاکم بر مسایل پتانسیل سه بعدی 79
4,2,3. چند مثال برای صحت‌سنجی حل مسایل پتانسیل سه بعدی 80
فصل 4 مسایل الاستواستاتیک 86
1,4. مسایل الاستواستاتیک دو بعدی 88
1,1,4. معادله حاکم بر مسایل الاستواستاتیک دو بعدی 88
2,1,4. ماتریس ضرایب در معادله حاکم مسایل الاستواستاتیک دو بعدی 92
3,1,4. حل معادله حاکم بر مسایل الاستواستاتیک دو بعدی 93
4,1,4. چند مثال برای صحت‌سنجی حل مسایل الاستواستاتیک دو بعدی 94
2,4. مسایل الاستواستاتیک سه بعدی 108
1,2,4. ماتریس ضرایب در معادله حاکم مسایل الاستواستاتیک سه بعدی 112
2,2,4. حل معادله حاکم بر مسایل الاستواستاتیک سه بعدی 114
3,2,4. چند مثال برای صحت‌سنجی حل مسایل الاستواستاتیک سه بعدی 115
فصل 5 مسایل الاستودینامیک 129
1,5. مسایل الاستودینامیک دو بعدی 131
1,1,5. معادله حاکم بر مسایل الاستودینامیک دو بعدی 131
2,1,5. ماتریس ضرایب در مسایل الاستودینامیک دو بعدی 135
3,1,5. حل معادله حاکم بر مسایل الاستودینامیک دو بعدی 136
4,1,5. چند مثال برای صحت‌سنجی حل مسایل الاستودینامیک دو بعدی 139
2,5. مسایل الاستودینامیک سه بعدی 151
1,2,5. ماتریس ضرایب در معادله حاکم مسایل الاستودینامیک سه بعدی 155

2,2,5. حل معادله حاکم بر مسایل الاستودینامیک سه بعدی 157
3,2,5. چند مثال برای صحت‌سنجی حل مسایل الاستودینامیک سه بعدی 159
فصل 6 مسایل لرزه‌شناسی 171
1,6. نیروی حجمی دینامیکی معادل ناشی از وقوع یک نابجایی دینامیکی 177
2,6. فضاهای نیم‌نامحدود دارای سطح آزاد مسطح 178
1,2,6. مسئله لمب 178
2,2,6. مسئله گاروین 185
3,2,6. نیم‌فضای دو لایه‌ای سه بعدی 189
3,6. فضاهای نیم‌نامحدود دارای عوارض توپوگرافی 195
1,3,6. دره نیم‌دایروی در نیم‌فضای دو بعدی 195
2,3,6. تپه نیم‌سینوسی در نیم‌فضای دو بعدی 199
3,3,6. دره بیضوی در فضای سه بعدی 203
فصل 7 جمع‌بندی و پیشنهاد برای تحقیقات آتی 209
مراجع مورد استفاده 214

فهرست شکل‌ها

شکل 2-1: نحوه مدل‌سازی مسایل دو بعدی شماتیک؛ (الف) هندسه مسئله در مختصات کلی، (ب) هندسه مسئله دو بعدی در مختصات محلی 24

شکل 2-2: توابع نگاشت یک المان پنج گرهی بر اساس چندجمله‌ای‌های چبیشف 28

شکل 2-3: نحوه مدل‌سازی مسایل سه بعدی شماتیک؛ (الف) هندسه مسئله در مختصات کلی و محلی و شرایط مرزی، (ب) معرفی مختصات کلی نقاط $(\bar{x},\bar{y},\bar{z})$ با توجه به محل LCO و موقعیت محورهای محلی (ξ,η,ζ) و صفحه های S^{ξ}، S^{η} و S^{ζ}، (پ)مش‌بندی مرزهای مسئله. 31

شکل 2-4: انتقال المان‌ها از مختصات کلی $(\bar{x},\bar{y},\bar{z})$ به مختصات محلی (ξ,η,ζ) در مسایل سه بعدی برای یک المان نه گرهی 32

شکل 2-5: توابع نگاشت یک المان 16 گرهی؛ (الف) موقعیت گره‌ها در المان، (ب) موقعیت گره‌ها و چندجمله‌ای‌های درون یابی در امتداد محورهای η و ζ، (پ)، (ت)، (ث) و (ج) به ترتیب توابع نگاشت مرتبط با گره های واقع در نقاط (1, 0,5-)، (1-,1-)، (0,5،1) و (0,5،0,5). 35

شکل 2-6: تعریف بردار نرمال عمود بر سطح در نقطه P؛ (الف) یک المان بر روی مرزی یک مسئله سه بعدی با سطوح کناری S^{ξ} ، S^{η} و S^{ζ} و نقطه P واقع در درون حوزه مسئله، (ب) بردار عمود در نقطه P در امتداد محور ξ ؛ $\vec{n}^{\xi}$ ، (پ) بردار عمود در نقطه P در امتداد محور ζ ؛ $\vec{n}^{\zeta}$ ، (ت) بردار عمود در نقطه P در امتداد محور η ؛ $\vec{n}^{\eta}$ 40

شکل 2-7: توابع شکل یک المان پنج گرهی تولید شده با استفاده از چندجمله‌ای‌های مرتبه 9 45

شکل 2-8: توابع شکل یک المان 16 گرهی؛ (الف) موقعیت گره‌ها و چندجمله‌ای‌های درون یابی در امتداد محورهای η و ζ، (ب)، (پ)، (ت)و (ث) به ترتیب توابع شکل مرتبط با گره‌های واقع در نقاط (1-,1-)، (0,5،1)، (0,5-,0,5-) و (1,-0,5). 47

شکل 3-1: حوزه دو بعدی Ω با شرایط مرزی نیومن و دیریکله 57

شکل 3-2: مثال 1 پتانسیل دو بعدی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی در مختصات کلی، (ب) محل LCO و مش‌بندی مرزهای فضای مسئله، (پ) المان سه گرهی مورد استفاده برای المان‌بندی مرزهای مسئله. 65

شکل 3-3: تغییرات تابع پتانسیل در امتداد محور Y در X=۲،5 $(\xi = Y/10)$ در مثال 1 پتانسیل دو بعدی 66

شکل 3-4: مثال 2 پتانسیل دو بعدی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی در مختصات کلی، (ب) محل LCO در $X = Y \approx -1.41$ و مش‌بندی مرزهای فضای مسئله، (پ) المان سه گرهی مورد استفاده برای المان‌بندی مرزهای مسئله. 67

شکل 3-5: تغییرات تابع پتانسیل در امتداد محور $\theta = \pi/4$ در مثال 2 پتانسیل دو بعدی 68

شکل 3-6: مثال 3 پتانسیل دو بعدی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی در مختصات کلی، (ب) یک ششم فضای مسئله، محل LCO در $X = 2, Y = 0$ و مش بندی مرزهای فضای مسئله، (پ) المان سه گرهی مورد استفاده برای المان بندی مرزهای مسئله..... 69

شکل 3-7: تغییرات تایع پتانسیل در امتداد محور افقی در مثال 3 پتانسیل دو بعدی 70

شکل 3-8: مثال 4 پتانسیل دو بعدی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی در مختصات کلی، (ب) محل LCO در $X = -2, Y = 0$ و مش‌بندی مرزهای فضای مسئله. 71

شکل 3-9: کنتور تغییرات تابع پتانسیل حاصل از حل مثال 4 پتانسیل دو بعدی؛ (الف) روش حاضر و المان‌بندی مرزهای مسئله با چهار المان، (ب) روش حاضر و المان بندی مرزهای مسئله با دوازده المان، (پ) پاسخ تحلیلی..... 72

شکل 3-10: مثال 1 پتانسیل سه بعدی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی، (ب) محل LCO و مش بندی در مختصات محلی 81

شکل 3-11: تغییرات تابع پتانسیل در امتداد محور X در صفحه YZ واقع بر Y=۰،75 و Z=۰،5 در مثال 1 پتانسیل سه بعدی..... 82

شکل 3-12: مثال 2 پتانسیل سه بعدی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی، (ب) محل LCO در 1/24 فضای مسئله و نحوه مش‌بندی مرزهای فضای مسئله 83

شکل 3-13: تغییرات تابع پتانسیل در امتداد محور X در مثال 2 پتانسیل سه بعدی..... 84

شکل 4-1: مدلسازی مسئله دوبعدی الاستواستاتیک و انتخاب محل (LCO)؛ (الف) در مختصات کلی، (ب) در مختصات محلی..... 88

شکل 4-2: مثال 1 الاستواستاتیک دو بعدی؛ (الف) هندسه و بارگذاری و (ب) مشبندی مرزهای مسئله در روش پیشنهادی..... 94

شکل 4-3: تغییرات تغییرمکان در امتداد محور X در محل Y= 0 در مثال 1 الاستواستاتیک دو بعدی. 95

شکل 4-4: مثال 2 الاستواستاتیک دو بعدی؛ (الف) هندسه بارگذاری و (ب) مش بندی و محل مرکز مختصات محلی.... 96

شکل 4-5: تغییرات تنش افقی در امتداد محور Y و در محل X=3 مرتبط با گره شماره 1 در مثال 2 الاستواستاتیک دو بعدی..... 97

شکل 4-6: تغییرات مولفه قائم تغییرمکان در امتداد محور X در Y=۰،5 برای مثال 2 الاستواستاتیک دو بعدی. 98

شکل 4-7: مثال 3 الاستواستاتیک دو بعدی؛ (الف) هندسه و بارگذاری و (ب) مش‌بندی مرزهای مسئله..... 99

شکل 4-8: تغییرات مولفه قائم تغییرمکان در X= 48 در امتداد محور Y برای مثال 2 الاستواستاتیک دو بعدی..... 100

شکل 4-9: مثال 4 الاستواستاتیک دو بعدی؛ (الف) هندسه و بارگذاری و (ب) مش‌بندی مرزهای مسئله..... 101

شکل 4-10: تغییرات تنش افقی نسبت به محور Y در X=0 برای مثال شماره 4 الاستواستاتیک دو بعدی 101

شکل 4-11: چگونگی توزیع تنش درون فضای مثال 4 الاستواستاتیک دو بعدی، محاسبه شده با استفاده از روش پیشنهادی (الف) کانتور تنش افقی و (ب) کانتور تنش قائم. 102

شکل 4-12: مثال 5 الاستواستاتیک دو بعدی؛ (الف) هندسه و بارگذاری و (ب) مش‌بندی مرزهای مسئله. 104

شکل 4-13: تغییرات مدول الاستیسیته نسبت محور افقی در مثال 5 الاستواستاتیک دو بعدی. 104

شکل 4-14: تغییرات مولفه های تغییرمکان در امتداد محور X در Y=0 برای مثال شماره 5 الاستواستاتیک دو بعدی (الف) مولفه افقی، (ب) مولفه قائم. 105

شکل 4-15: تغییرات مولفه های تغییرمکان درون فضای مثال 5 الاستواستاتیک دو بعدی، محاسبه شده با استفاده از روش پیشنهادی (الف) کانتور مولفه افقی و (ب) کانتور مولفه قائم. 106

شکل 4-16: مدل‌سازی مسئله سه بعدی الاستواستاتیک و انتخاب محل (LCO)؛ (الف) در مختصات کلی، (ب) در محتصات محلی. 107

شکل 4-17: مثال 1 الاستواستاتیک سه بعدی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی برای یک تیر کنسول سه بعدی، (ب) محل LCO و چگونگی مش‌بندی فضای مسئله در مختصات محلی با استفاده از هفت المان 9 گرهی و تعداد 43 گره، (پ) المان-های مورد استفاده در مش‌بندی مرزهای مسئله 116

شکل 4-18: مولفه تغییرمکان در راستای محور Y ونسبت به محور Z بر روی صفحه XY واقع بر X=0 و Y=0 در مثال 1 الاستواستاتیک سه بعدی 117

شکل 4-19: مولفه‌های تنش در مقاطع مختلف تیر مثال 1 الاستواستاتیک سه بعدی؛ (الف) مولفه تنش برشی (τ_{XZ}) در امتداد محور X واقع بر صفحه XY با Z=۲،5 و Y=۰،2، (ب) مولفه تنش برشی (τ_{YZ}) در امتداد محور Y واقع بر صفحه ZY با Z=۲،5 و X=0، (پ) مولفه تنش نرمال (σ_{ZZ}) در امتداد محور Y واقع بر صفحه XY با Z=۲،5 118

شکل 4-20: کنتورهای تنش در صفحه XY واقع بر Z=۲،5 در تیر مثال 1 الاستواستاتیک سه بعدی؛ (الف) مولفه تنش برشی $\tau_{yz}(X,Y)$، (ب) مولفه تنش برشی $\tau_{xz}(X,Y)$، (پ) مولفه تنش نرمال $\sigma_{zz}(X,Y)$ 120

شکل 4-21: مثال 2 الاستواستاتیک سه بعدی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی، (ب) محل LCO و چگونگی مش بندی فضای مسئله در مختصات محلی با استفاده از 16 المان نه گرهی و تعداد 45 گره، (پ) المان‌های مورد استفاده در مش-بندی مرزهای مسئله 121

شکل 4-22: مولفه تغییرمکان در راستای محور Z ونسبت به محور Z بر روی صفحه XY در مثال 2 الاستواستاتیک سه بعدی (الف) واقع بر X=۰،1 و Y=۰،1،براساس نتایج تحلیلی و روش موجود؛ (ب) واقع بر X=0 و Y=0، بر اساس نتایج روش موجود. 122

شکل 4-23: مولفه‌های تنش نرمال در مثال 2 الاستواستاتیک سه بعدی؛ (الف) در امتداد محور Z در صفحه واقع بر X=1 و Y=1، (ب) در امتداد محور Z در صفحه واقع بر Z=-1، (پ) در امتداد محور Z در صفحه واقع بر Z=-3. 124

شکل 4-24: کنتور تغییرات تنش قائم در صفحه XZ در Y=0 در مثال 2 الاستواستاتیک سه بعدی 125

شکل 4-25: مثال 3 الاستواستاتیک سه بعدی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی مسئله، (ب) هندسه و شرایط مرزی مورد استفاده برای یک‌چهارم فضای مسئله، (پ) محل LCO و چگونگی مش‌بندی فضای مسئله در مختصات محلی؛ مش‌بندی دیواره سوراخ با استفاده از 12 المان نه گرهی و تعداد 62 گره 126

شکل 4-26: مولفه تنش نرمال در امتداد محور Z در صفحه XZ و در امتداد محور X (یا در صفحه YZ و در امتداد محور Y) در مثال 3 الاستواستاتیک سه بعدی 127

شکل 4-27: کنتور مولفه تنش در امتداد محور Z در صفحه XY واقع بر Z=0 در مثال 3 الاستواستاتیک سه بعدی 128

شکل 5-1: فضای دو بعدی (Ω) با مرزهای دارای شرایط دیریکله (Γ_u) و شرایط نیومن (Γ_t) در مسایل الاستودینامیک 130

شکل 5-2: مثال 1 الاستودینامیک دو بعدی؛ (الف) هندسه و بارگذاری ، (ب) مش‌بندی و محل LCO 140

شکل 5-3: تاریخچه تغییرمکان افقی در گره C در مثال 1 الاستودینامیک دوبعدی 140

شکل 5-4: تاریخچه تغییرمکان افقی در گره B در مثال 1 الاستودینامیک دوبعدی 142

شکل 5-5: تاریخچه تنش افقی در گره A در مثال 1 الاستودینامیک دوبعدی 142

شکل 5-6: تاریخچه تنش افقی در گره B در مثال 1 الاستودینامیک دوبعدی 143

شکل 5-7: مثال 2 الاستودینامیک دو بعدی؛ (الف) هندسه و بارگذاری، (ب) تاریخچه بارگذاری 144

شکل 5-8: تاریخچه تغییرمکان قایم در نقطه B مثال 2 الاستودینامیک دو بعدی 145

شکل 5-9: تاریخچه تنش در نقطه A مثال 2 الاستودینامیک دو بعدی 145

شکل 5-10: مثال 3 الاستودینامیک؛ (الف) هندسه و بارگذاری، (ب) مش‌بندی و محل LCO، (پ) تاریخچه بارگذاری. 146

شکل 5-11: تاریخچه تغییرمکان افقی در نقطه A مثال 2 الاستودینامیک دو بعدی 147

شکل 5-12: تاریخچه تغییرمکان افقی در نقطه B مثال 2 الاستودینامیک دو بعدی 147

شکل 5-13: : مثال 4 الاستودینامیک دو بعدی، (الف) هندسه و باگذاری، (ب) تاریخچه بارگذاری ، (پ) مش‌بندی و محل LCO 149

شکل 5-14: تاریخچه تغییرات مولفه افقی تغییرمکان برای گره شماره 9 در مثال 4 الاستودینامیک دو بعدی 150

شکل 5-15: تاریخچه تغییرات تنش برشی در گره شماره 2 مثال 4 الاستودینامیک دو بعدی 150

شکل 5-16: مثال 1 الاستودینامیک سه بعدی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی برای یک میله کنسول سه بعدی، (ب) تاریخچه بارگذاری، (پ) محل LCO و چگونگی مش‌بندی فضای مسئله در مختصات محلی با استفاده از هفت المان 9 گرهی و تعداد 43 گره، (ت) المان‌های مورد استفاده در مش‌بندی مرزهای مسئله 160

شکل 5-17: تاریخچه تغییرمکان در امتداد محور X در نقطه (3 ,-0,5 ,0,5) برای مثال 1 الاستودینامیک سه بعدی .. 161

شکل 5-18: تاریخچه تنش در امتداد محور X در نقطه (0 ,-0,5 ,0,5) برای مثال 1 الاستودینامیک سه بعدی 162

شکل 5-19: مثال 2 الاستودینامیک سه بعدی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی برای یک ستون کنسول، (ب) تاریخچه بارگذاری، (پ) محل LCO و چگونگی مش‌بندی فضای مسئله در مختصات محلی با استفاده از یازده المان 9 گرهی، (ت) المان‌های مورد استفاده در مشبندی مرزهای مسئله 163

شکل 5-20: ناریخچه تغییرمکان در امتداد محور Y در نقطه (5،0،5،0،5) در مثال 2 الاستودینامیک سه بعدی 164

شکل 5-21: تاریخچه مولفه تنش در امتداد محور Y در نقطه (0،0،5،0،5) در مثال 2 الاستودینامیک سه بعدی 165

شکل 5-22: مثال 3 الاستودینامیک سه بعدی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی، (ب) محل LCO و چگونگی مدل‌سازی فضای مورد استفاده در مختصات محلی، (پ) مش‌بندی فضای سطح آزاد مسئله در مختصات محلی با استفاده از 66 المان 9 گرهی و تعداد 265 گره، (ت) المان‌های مورد استفاده در مش‌بندی مرزهای مسئله 166

شکل 5-23: تاریخچه تغییرمکان در دریافت‌کننده شماره 1 (R_1) واقع در مختصات (0، ۰،20) بر روی سطح آزاد مثال 3 الاستودینامیک سه بعدی 168

شکل 5-24: تاریخچه تغییرمکان در دریافت‌کننده شماره 2 (R_2) واقع در مختصات (0، ۰،35) بر روی سطح آزاد مثال 3 الاستودینامیک سه بعدی 168

شکل 5-25: هندسه و بارگذاری مثال 4 الاستودینامیک سه بعدی 169

شکل 5-26: تاریخچه تغییرمکان در نقطه ای به مختصات (0، ۰،25) بر روی سطح آزاد مثال 4 الاستودینامیک سه بعدی 170

شکل 6-1: انواع گسل‌ها 172

شکل 6-2: امواج حجمی زلزله [(133)] 173

شکل 6-3: امواج سطحی [(133)] 174

شکل 6-4: مثال 1 لرزه‌شناسی؛ (الف) هندسه و شرایط مرزی،(ب) مدل‌سازی سطح آزاد و مرزهای بینهایت در دستگاه مخصات محلی نسبت به موقعیت نقاط در دستگاه مختصات کلی و محل LCO ،(پ) مش‌بندی سطح آزاد مسئله در مختصات محلی با استفاده از 50 المان سه گرهی و تعداد 202 درجه آزادی، (ت) المان‌های مورد استفاده در مش‌بندی مرزهای مسئه 180

شکل 6-5: مولفه‌های تغییرمکان درنقطه A در مثال 1 لرزه‌شناسی؛ (الف) مولفه قائم تغییرمکان، (ب) مولفه افقی تغییرمکان 181

شکل 6-6: مولفه‌های تغییرمکان درنقطه B در مثال 1 لرزه‌شناسی؛ (الف) مولفه قائم تغییرمکان، (ب) مولفه افقی تغییرمکان 182

شکل 6-7: مولفه‌های تغییرمکان درنقطه C در مثال 1 لرزه‌شناسی؛ (الف) مولفه قائم تغییرمکان، (ب) مولفه افقی تغییرمکان 183

شکل 6-8: هندسه، شرایط مرزی، خصوصیات مکانیکی مصالح و مختصات منبع ارتعاش در مثال 2 لرزه‌شناسی..... 185

شکل 6-9: مولفه‌های تغییرمکان درنقطه D در مثال 2 لرزه‌شناسی؛ (الف) مولفه قائم تغییرمکان، (ب) مولفه افقی تغییرمکان 186

شکل 6-10: مولفه‌های تغییرمکان درنقطه E در مثال 2 لرزه‌شناسی؛ (الف) مولفه قائم تغییرمکان، (ب) مولفه افقی تغییرمکان 187

شکل 6-11: مولفه‌های تغییرمکان درنقطه F در مثال 2 لرزه‌شناسی؛ (الف) مولفه قائم تغییرمکان، (ب) مولفه افقی تغییرمکان 188

شکل 6-12: مثال 3 لرزه‌شناسی؛ (الف) مولفه قائم تغییرمکان، (ب) مولفه افقی تغییرمکان 190

شکل 6-13: المان‌بندی مرزهای فضای مثال 3 لرزه‌شناسی با استفاده از المان‌های 9 گرهی دو بعدی (دقت نمایید که در شکل پایین فقط المان‌ها نمایش داده شده‌اند) 192

شکل 6-14: مولفه‌های تغییرمکان در امتداد محور Z در مثال 3 لرزه-شناسی؛ (الف) در نقطه A، (ب) در نقطه B 193

شکل 6-15: مثال 4 لرزه‌شناسی؛ (الف) هندسه فضا و بارگذاری، (ب) هندسه مسئله در مختصات محلی، محل LCO و مش‌بندی سطح آزاد نیم‌فضا با استفاده از ده المان سه گرهی یک بعدی و تعداد 21 نقطه گرهی 196

شکل 6-16: دامنه تغییرمکان در نقاط مختلف واقع بر سطح آزاد در مثال 4 لرزه‌شناسی برای موج ورودی با سرعت زاویه ای 78،54 رادیان بر ثانیه (25،۰= β) 197

شکل 6-17: دامنه تغییرمکان در نقاط مختلف واقع بر سطح آزاد در مثال 4 لرزه‌شناسی برای موج ورودی با سرعت زاویه ای 235،62 رادیان بر ثانیه (75،۰= β) 198

شکل 6-18: دامنه تغییرمکان در نقاط مختلف واقع بر سطح آزاد در مثال 4 لرزه شناسی برای موج ورودی با سرعت زاویه ای 392،7 رادیان بر ثانیه (25،۱= β) 198

شکل 6-19: مثال 5 لرزه‌شناسی؛ (الف) هندسه فضا و بارگذاری، (ب) محل LCO و مدل‌سازی سطح آزاد و مرزهای بینهایت در دستگاه مختصات محلی نسبت به موقعیت نقاط در دستگاه مختصات کلی، (پ) مش‌بندی سطح آزاد نیم‌فضا با استفاده از 24 و 40 المان سه گرهی یک بعدی به ترتیب برای 2،۰= γ و 4،۰=γ 201

شکل 6-20: دامنه تغییرمکان در نقاط مختلف واقع بر سطح آزاد در مثال 5 لرزه‌شناسی برای نسبت ارتفاع به قاعده 2،۰ (h/2L= ۰،2) 202

شکل 6-21: دامنه تغییرمکان در نقاط مختلف واقع بر سطح آزاد در مثال 5 لرزه‌شناسی برای نسبت ارتفاع به قاعده 4،۰ (h/2L= ۰،4) 202

شکل 6-22: مثال 6 لرزه‌شناسی؛ (الف) هندسه فضا و بارگذاری، (ب) مدل‌سازی هندسه مسئله در مختصات محلی و محل LCO 204

شکل 6-23: مش‌بندی سطح آزاد در مثال 6 لرزه‌شناسی با استفاده از المان‌های نه گرهی دوبعدی 205

شکل 6-24: دامنه مولفه تغییرمکان در امتداد محور Y نقاط واقع بر سطح آزاد بر روی محور X برای موج ورودی با زاویه $\Theta=0$ 205

شکل 6-25 : دامنه مولفه تغییرمکان در امتداد محور Y نقاط واقع بر سطح آزاد بر روی محور Y برای موج ورودی با زاویه $\Theta=0$ 206

شکل 6-26: دامنه مولفه تغییرمکان در امتداد محور Z نقاط واقع بر سطح آزاد بر روی محور Y برای موج ورودی با زاویه $\Theta=0$ 206

شکل 6-27: دامنه مولفه تغییرمکان در امتداد محور Y نقاط واقع بر سطح آزاد بر روی محور X برای موج ورودی با زاویه $\Theta=60$ 207

شکل 6-28: دامنه مولفه تغییرمکان در امتداد محور Y نقاط واقع بر سطح آزاد بر روی محور Y برای موج ورودی با زاویه $\Theta=60$ 207

شکل 6-29: دامنه مولفه تغییرمکان در امتداد محور X نقاط واقع بر سطح آزاد بر روی محور Y برای موج ورودی با زاویه $\Theta=60$ 208

شکل 6-30: دامنه مولفه تغییرمکان در امتداد محور Z نقاط واقع بر سطح آزاد بر روی محور Y برای موج ورودی با زاویه $\Theta=60$ 208