



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

رساله برای دریافت درجه دکتری در رشته

مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی

مدل سازی هیدرومکانیک درزه در یک محیط گسسته اشباع با استفاده از روش منیفلد

اساتید راهنما

دکتر حسن قاسم زاده

دکتر سیامک بودا قپور

نگارش

محمد علی رمضان پور

شهریور ۱۳۹۳



إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ وَاخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ لَآيَاتٍ
لِّأُولَى الْأَلْبَابِ (۱۹۰) الَّذِينَ يَذْكُرُونَ اللَّهَ قِيَامًا وَقُعُودًا وَعَلَىٰ
جُنُوبِهِمْ وَيَتَفَكَّرُونَ فِي خَلْقِ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضِ رَبَّنَا مَا خَلَقْتَ هَذَا
بَاطِلًا سُبْحَانَكَ فَقِنَا عَذَابَ النَّارِ (۱۹۱) رَبَّنَا إِنَّكَ مَن تَدْخِلِ النَّارَ

فَقَدْ أَخْزَيْتَهُ وَمَا لِلظَّالِمِينَ مِنْ أَنْصَارٍ (۱۹۲) آل عمران
مسلم در آفرینش آسمانها و زمین و اختلاف سب و روز برای مردمان شایسته‌ی است (۱۹۰) همانان که خدا را ایستاده و نشسته و به پهلو آرمیده یاد

می‌کنند و در آفرینش آسمانها و زمین می‌اندیشند. پروردگارا اینها را ببین که می‌فرستد تو، ما را از عذاب آتش در امان بدار (۱۹۱) پروردگارا

هر که را تو در آتش در آوری یقیناً سواش کرده‌ای و برای ستمکاران یاورانی نیست (۱۹۲) آل عمران

- وظیفه هر انسان دانایی توجه قلبی به خدا و تفکر در آفرینش آسمان ها و زمین است.
- خلقت بر اساس حق است و هر کس به باطل روی آورد به عذابی چون آتش گرفتار می شود.
- ظلم خود آتش است و کسی که ظلم کرده به آتش وارد شده و خوار و ذلیل میگردد. در مقابل آتش ظلم هیچ یار و یاورى وجود ندارد، مگر اینکه دست از ظلم برداشته شود.



تاسیس ۱۳۰۷
دانشگاه منتقن خواجه نصیر الدین طوسی

تائید هیات داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان مدل سازی هیدرومکانیک درزه در یک محیط گسسته اشباع با استفاده از روش منیفلد توسط آقای محمد علی رمضان پور صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه دکتری در مهندسی عمران گرایش خاک و پی مورد تائید قرار می دهند.

امضاء	حسن قاسم زاده	آقای دکتر	۱- استاد راهنما
امضاء	سیامک بوداقپور	آقای دکتر	۲- استاد راهنما
امضاء	علی پاک	آقای دکتر	۳- ممتحن خارجی
امضاء	سهیل محمدی	آقای دکتر	۴- ممتحن خارجی
امضاء	امیر الدین صدر نژاد	آقای دکتر	۵- ممتحن داخلی
امضاء	محمود قضاوی	آقای دکتر	۶- ممتحن داخلی
امضاء	سعید رضا صباغ یزدی	آقای دکتر	۷- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه

دانشکده عمران

تاریخ: ۹۳/۶/۳۱

اظهارنامه دانشجو

اینجانب محمد علی رمضان پور دانشجوی دکتری رشته عمران گرایش ژئوتکنیک دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان: **مدل‌سازی هیدرومکانیک درزه در یک محیط گسسته اشباع با استفاده از روش منیفلد** با راهنمایی اساتید محترم جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده و سیامک بوداق‌پور توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است. و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء

تاریخ

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد. ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.
 - ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
- همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی باشد.

تقدیم به آنکس که مراراه نمود،

باینز کواری از بدیهایم در گذشت و یاریم نمود

و از فضل و بخشش خود مرا سیراب کرد،

همو که امید بسیار به او دارم.

بانشکر از استاد عزیزم

آقای دکتر حسن قاسم زاده

که هدایت مراد انجام این رساله بر عهده گرفتند.

وبانشکر از

آقای دکتر سیامک بودا قیور

که از کمک های ایشان بهره مند شدم

تقدیم به مادر عزیزم

که بسیار صبوری نمود

و پدر مهربانم که بسیار یاریم کرد.

تقدیم به خواهران و برادران بزرگوارم

تقدیم به مردم عزیز و سختی کشیده ایران زمین

امید است که در سایه الهی مشکلات هرچه زودتر پایان پذیرد

خلاصه

وجود درزه در یک محیط گسسته تاثیر زیادی روی تغییر مقاومت مکانیکی و گذردهی هیدرولیکی سیستم دارد. مدل سازی هیدرومکانیک درزه نیاز به در نظر گرفتن تبادل جریان بین قسمت های پیوسته و درزه، جریان طولی و عرضی درون درزه و ارضاء قیود تماس مکانیکی روی سطوح درزه را دارد. برای مدل سازی تبادل جریان بین محیط پیوسته و گسستگی ها به یک حل هیدرومکانیک در قسمت پیوسته و پیوند آن به محیط گسسته نیاز می باشد.

در این رساله از روش عددی منیفلد جهت مدل سازی هیدرومکانیک محیط پیوسته و المان ضخامت صفر برای شبیه سازی درزه ها استفاده شده است که تمام نیازمندی های فوق را برآورده می کند. برای این منظور مسئله وابستگی خطی مجهولات در شبیه سازی درجات بالا، روش باقی مانده وزن دار و روش نیومارک در روش منیفلد درجات بالا، روش ضرایب لاگرانژ جهت مدل سازی تماس و شرایط مرزی مورد استدلال قرار گرفته است.

برای تحلیل هیدرومکانیک محیط گسسته نیز سه شبکه ریاضیاتی و فیزیکی و شبکه درزه در نظر گرفته شده است. همچنین مسئله تماس دینامیکی و خطاهایی مانند حرکت انفجاری مورد بررسی قرار گرفته است و روشی جهت جلوگیری از ارتعاش مرزهای اجسام بعد از ایجاد تماس ارائه شده است که سبب حذف حرکات انفجاری می شود. روش عددی منیفلد درجات بالا ارائه شده در مسائل مکانیکی محیط پیوسته و گسسته بکار گرفته شده است که نشان می دهد دقت و کارایی آن در شبیه سازی محیط پیوسته و مدل سازی تماس مکانیکی اجسام متحرک در محیط گسسته مناسب است. همچنین با استفاده از شبیه سازی درجات بالا از تعداد المان ها و در نتیجه از هزینه محاسباتی به مقدار زیادی کاسته شده است.

روش عددی منیفلد درجات بالای هیدرومکانیک در مسائل تحکیم، تورم و بارگذاری دینامیکی مورد آزمایش قرار گرفته است که نتایج بسیار خوبی ارائه کرده است. برای نشان دادن قابلیت روش ارائه شده در تحلیل درزه درون یک محیط گسسته، یک سیستم بلوکی بصورت مکانیکی، هیدرولیکی و هیدرومکانیکی مورد تحلیل قرار گرفته است و تاثیر خواص محیط از جمله گذردهی طولی و عرضی درزه و گذردهی بلوک ها بررسی شده است.

فهرست مطالب

فصل اول

۳۳	کلیات	(۱)
۳۳	مقدمه	(۱-۱)
۳۵	طرح مسئله	(۲-۱)
۳۶	سوالات اساسی تحقیق	(۳-۱)
۳۶	نوآوریهای تحقیق	(۴-۱)
۳۸	فرضیات تحقیق	(۵-۱)
۳۸	فرضیات حل مکانیکی	(۱-۵-۱)
۳۸	فرضیات حل هیدرولیکی	(۲-۵-۱)
۳۸	روش تحقیق	(۶-۱)
۳۹	ساختار تحقیق	(۷-۱)

فصل دوم

۴۱	مروری بر ادبیات موضوع	(۲)
۴۱	مدل سازی هیدرومکانیک محیط گسسته اشباع	(۱-۲)
۴۶	روش عددی منیفلد	(۲-۲)
۴۹	مسئله وابستگی خطی مجهولات	(۳-۲)

فصل سوم

۵۵	معادلات میدانی محیط گسسته	(۳)
۵۶	محیط پیوسته خشک	(۱-۳)
۵۶	معادلات حاکم بر محیط پیوسته اشباع	(۲-۳)
۵۶	معادله بقای ممنتیم خطی فاز جامد و سیال	(۱-۲-۳)
۵۷	معادله بقای جرم هیدرومکانیک	(۲-۲-۳)
۵۷	معادلات ساختاری	(۳-۲-۳)
۶۴	جمعبندی معادلات	(۴-۲-۳)
۶۵	ناپیوستگی ها	(۳-۳)
۶۵	رفتار مکانیکی ناپیوستگی ها	(۱-۳-۳)

رفتار هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها	۶۷	۲-۳-۳
------------------------------------	----	-------

فصل چهارم

حل عددی معادلات حاکم	۷۱	(۴)
----------------------------	----	-----

روابط مکانیکی روش عددی منیفلد درجات بالا	۷۱	(۱-۴)
مفاهیم پایه	۷۱	(۱-۱-۴)
شبیهسازی درجات بالا	۷۶	(۲-۱-۴)
مکانیک تماس	۸۰	(۳-۱-۴)
ارضاء معادله بقای ممنتوم خطی	۸۵	(۴-۱-۴)
گسسته سازی در زمان	۸۸	(۵-۱-۴)
اصلاح سرعت و شتاب	۹۰	(۶-۱-۴)
بررسی مسئله وابستگی خطی و برطرف کردن آن	۹۴	(۲-۴)
حذف مسئله وابستگی خطی از یک المان منیفلد	۹۸	(۱-۲-۴)
حذف مسئله وابستگی خطی از یک شبکه پیوسته	۱۰۷	(۲-۲-۴)
حذف مسئله وابستگی خطی از یک شبکه گسسته	۱۱۰	(۳-۲-۴)
مدلسازی هیدرومکانیک درزه در محیط گسسته اشباع	۱۱۰	(۳-۴)
توسعه شبکه بندی ریاضیاتی و فیزیکی	۱۱۰	(۱-۳-۴)
گسسته سازی معادلات هیدرومکانیک محیط پیوسته	۱۱۳	(۲-۳-۴)
رفتار هیدرومکانیک درزه	۱۱۹	(۳-۳-۴)
نحوه حل معادلات هیدرومکانیک محیط گسسته	۱۲۴	(۴-۳-۴)
حذف مسئله وابستگی خطی از تحلیل هیدرومکانیک	۱۲۵	(۵-۳-۴)
برنامه نویسی رایانه‌ای و الگوریتم برنامه	۱۲۵	(۶-۳-۴)

فصل پنجم

صحت سنجی و ارائه نتایج	۱۲۹	(۵)
------------------------------	-----	-----

مسایل مکانیکی محیط پیوسته	۱۳۰	(۱-۵)
مقایسه درجات مختلف روش عددی منیفلد درجات بالا	۱۳۰	(۱-۱-۵)
تاثیر شرایط بارگذاری و تکیهگاهی مختلف	۱۳۵	(۲-۱-۵)
حذف مسئله وابستگی خطی از ماتریس جرم	۱۴۱	(۳-۱-۵)
اندرکنش ماتریس جرم و سختی	۱۴۳	(۴-۱-۵)
اثر بارگذاری متحرک	۱۴۵	(۵-۱-۵)

تیر با مقطع متغیر و تحت بارگذاری ترکیبی.....	۱۴۸	(۶-۱-۵)
مسایل مکانیکی محیط گسسته.....	۱۵۱	(۲-۵)
تماس خط به خط و نقطه به خط.....	۱۵۱	(۱-۲-۵)
اندرکنش تماسی چند جسم.....	۱۵۴	(۲-۲-۵)
تماس دینامیکی با یک درجه آزادی- جرم متحرک.....	۱۵۸	(۳-۲-۵)
تماس دینامیکی با سه درجه آزادی- لغزش بلوک.....	۱۶۱	(۴-۲-۵)
مسایل مربوط به تصحیح سرعت و شتاب.....	۱۶۲	(۳-۵)
اصلاح سرعت و شتاب در فضای یک بعدی.....	۱۶۳	(۱-۳-۵)
لغزش بلوک روی سطح شیبدار.....	۱۶۷	(۲-۳-۵)
مسایل هیدرومکانیکی محیط پیوسته.....	۱۶۹	(۴-۵)
تحلیل شبه استاتیکی محیط متخلخل اشباع.....	۱۷۰	(۱-۴-۵)
تحکیم ستون خاک ترزاقی.....	۱۷۹	(۲-۴-۵)
تحلیل دینامیکی محیط متخلخل.....	۱۸۴	(۳-۴-۵)
عبور جریان از بین دو صفحه نفوذ ناپذیر.....	۱۹۰	(۴-۴-۵)
تحلیل دینامیکی پی الاستیک بر روی محیط متخلخل اشباع.....	۱۹۳	(۵-۴-۵)
مسایل هیدرومکانیک محیط گسسته.....	۱۹۷	(۵-۵)
بررسی جریان عرضی درزه.....	۱۹۷	(۱-۵-۵)
بررسی جریان طولی درزه.....	۲۰۵	(۲-۵-۵)
درزه قائم بین دو بلوک متخلخل.....	۲۰۸	(۳-۵-۵)
تحلیل سیستم بلوکی.....	۲۱۴	(۴-۵-۵)
فصل ششم		
جمع بندی و پیشنهادات.....	۲۲۷	(۶)

فهرست شکل‌ها

شکل (۱-۳)	(الف) تماس نقطه به خط و (ب) تماس خط به خط	۶۵
شکل (۲-۳)	(الف) تماس نقطه به منحنی و (ب) تماس منحنی به منحنی	۶۶
شکل (۳-۳)	نیروی تماس (الف) تماس نقطه به خط و (ب) تماس خط به خط	۶۶
شکل (۴-۳)	سیستم بلوکی و شبکه جریان	۶۷
شکل (۵-۳)	(الف) مسیر جریان کاملاً باز، (ب) تا حدی باز و (ج) کاملاً بسته	۶۸
شکل (۶-۳)	مدلسازی جریان در درزه	۶۹
شکل (۷-۳)	افت فشار در مقطع A-A'	۷۰
شکل (۱-۴)	تعریف پوشش ریاضیاتی، فیزیکی و المان منیفلد	۷۲
شکل (۲-۴)	تعریف پوشش ریاضیاتی و فیزیکی و المان منیفلد برای یک شبکه مثلثی منظم	۷۴
شکل (۳-۴)	شرکت سه پوشش ریاضیاتی در ساخت یک المان منیفلد	۷۴
شکل (۴-۴)	مدلسازی مرزهای خارجی و ناپیوستگیهای داخلی و تشکیل المان منیفلد - شبکه مثلثی	۷۶
شکل (۵-۴)	تعریف تابع خطی افراز روی یک پوشش شش وجهی	۷۷
شکل (۶-۴)	(الف) تماس نقطه به خط و (ب) تماس خط به خط	۸۱
شکل (۷-۴)	سطوح تغییر شکلیافته (الف) تماس نقطه به خط و (ب) تماس خط به خط	۸۱
شکل (۸-۴)	نیروهای تماسی برای (الف) تماس نقطه به خط و (ب) تماس خط به خط	۸۳
شکل (۹-۴)	یک تماس خط به خط دارای پنج زیر دامنه	۸۴
شکل (۱۰-۴)	تبدیل تماس منحنی به منحنی به قطعات کوچکتر خطی	۸۴
شکل (۱۱-۴)	خط مماس برای یک تماس نقطه به منحنی	۸۵
شکل (۱۲-۴)	شرایط مرزی مسئله	۸۶
شکل (۱۳-۴)	مدلسازی برخورد دو میله در حالت یک بعدی	۹۰
شکل (۱۴-۴)	سقوط آزاد میله و برخورد با زمین	۹۱
شکل (۱۵-۴)	مدلسازی برخورد دو میله	۹۱
شکل (۱۶-۴)	برخوردهای دوم و سوم میله ها	۹۲
شکل (۱۷-۴)	برخورد دو میله با اختلاف سرعت اولیه ۱۵ متر بر ثانیه	۹۳
شکل (۱۸-۴)	تحلیل یک میله با چهار حالت مختلف (الف) استاتیکی تحت بار متمرکز	۹۵

شکل (۴-۱۹)	هندسه میله، پوششهای ریاضیاتی (MCs)، فیزیکی (PCs) و المان منیفلد (ME)..... ۹۵
شکل (۴-۲۰)	هندسه جسم و نحوه تشکیل المان منیفلد ۹۸
شکل (۴-۲۱)	وصل کردن مراکز پوششهای ریاضیاتی برای تشکیل مثلث المان منیفلد ۱۰۵
شکل (۴-۲۲)	هندسه جسم و نحوه تشکیل المان منیفلد ۱۰۶
شکل (۴-۲۳)	شبکه ریاضیاتی و فیزیکی برای اختصاص دادن تابع STDLA به اولین المان منیفلد ۱۰۸
شکل (۴-۲۴)	انتخاب اولین المان در شبکههای ریاضیاتی مختلف ۱۰۹
شکل (۴-۲۵)	حذف مسئله وابستگی خطی از یک شبکه فیزیکی گسسته ۱۱۰
شکل (۴-۲۶)	سیستم بلوکی و شبکه ریاضیاتی (فیزیکی و هیدرولیکی) ۱۱۱
شکل (۴-۲۷)	سیستم بلوکی ۱۱۲
شکل (۴-۲۸)	پوششهای فیزیکی مکانیکی و هیدرولیکی بلوکها ۱۱۲
شکل (۴-۲۹)	المان منیفلد مکانیکی و هیدرولیکی در بلوکها ۱۱۲
شکل (۴-۳۰)	بدست آوردن خط وسط درزها و تعریف المان هیدرولیکی ۱۱۳
شکل (۴-۳۱)	شرایط مرزی مسئله در حالت هیدرومکانیک ۱۱۴
شکل (۴-۳۲)	المان هیدرومکانیک درزه ۱۱۹
شکل (۴-۳۳)	الگوریتم برنامه رایانه‌ای (ادامه در صفحه بعد) ۱۲۶
شکل (۵-۱)	هندسه، بارگذاری و شرایط مرزی تیر ۱۳۰
شکل (۵-۲)	پوششهای ریاضیاتی و فیزیکی و المان منیفلد برای حل عددی ۱۳۱
شکل (۵-۳)	مقایسه نتایج تحلیلی تیر با روش عددی منیفلد با درجات مختلف ۱۳۲
شکل (۵-۴)	شبکههای مختلف جهت تحلیل روش منیفلد رایج ۱۳۳
شکل (۵-۵)	نتایج روش عددی منیفلد رایج (درجه اول) با شبکههای مختلف ۱۳۴
شکل (۵-۶)	هندسه، بارگذاری و شرایط مرزی مسئله در سه حالت مختلف ۱۳۵
شکل (۵-۷)	پوششهای ریاضیاتی و فیزیکی و المان منیفلد برای حل عددی ۱۳۶
شکل (۵-۸)	مقایسه نتایج عددی درجات اول و سوم با نتایج تحلیلی در تغییر شکل صفحه فلزی ۱۳۷
شکل (۵-۹)	مقایسه نتایج سه حالت (a, b و c) از مثال صفحه فلزی، منیفلد درجه اول و سوم ۱۳۷
شکل (۵-۱۰)	پوششهای ریاضیاتی و فیزیکی و المان منیفلد برای حل عددی ۱۳۸