



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده‌ی مهندسی عمران، گروه ژئوتکنیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی عمران

گرایش: مکانیک خاک و پی (ژئوتکنیک)

عنوان:

حل عددی تغییر شکل پذیری دینامیکی سد سنگریزه‌ای با پیش‌بینی پساوانگرایی به روش اجزای محدود

استاد راهنما:

مرحوم مغفور، جناب آقای دکتر سید امیرالدین صدرنژاد

استاد مشاور:

جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زاده

نگارش:

بهنام باقری

زمستان ۹۷

K. N. Toosi University of Technology

Civil Engineering Faculty

B.Sc. Thesis in Civil Engineering - Geotechnical Engineering

Subject:

**Numerical analysis of earth dam dynamic deformation in post liquefied conditions
by means of finite element method**

Thesis Advisor:

A. Sadrnezhad

Thesis Consultant:

H. Ghasemzadeh

By:

Behnam Bagheri

Winter 2019

بسم الله الرحمن الرحيم

بسمه تعالی

شماره: تاریخ: ۱۳۹۷/۱۱/۲۹	حق طبع و نشر و مالکیت نتایج	 تاسیس ۱۳۰۷ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
-----------------------------	-----------------------------	---

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه، متعلق به نویسنده‌ی آن و دانشگاه صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از

آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه‌ی دانشکده‌ی مهندسی عمران دانشگاه

صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، مجاز می‌باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه‌ی تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر، متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

می‌باشد و بدون اجازه‌ی کتبی دانشگاه، به شخص ثالث، قابل واگذاری نیست.

همچنین، استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه، بدون ذکر مراجع، مجاز

نمی‌باشد.

* توجه:

این فرم می‌بایست پس از تکمیل، در نسخ تکثیر شده قرار داده شود.

بسمه تعالی

شماره: تاریخ: ۱۳۹۷/۱۱/۲۹	اظهارنامه‌ی دانشجو	 تاسیس ۱۳۰۷ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
-----------------------------	--------------------	---

اینجانب، بهنام باقری چرمخوران، دانشجوی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی عمران، گرایش مکانیک خاک و پی (ژئوتکنیک)، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان حل عددی تغییر شکل‌پذیری دینامیکی سد سنگریزه‌ای با پیش‌بینی پسا روانگرایی به روش

اجزای محدود

با راهنمایی استاد محترم، جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زاده، توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصل 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، ارایه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه، چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو: بهنام باقری چرمخوران

تاریخ: ۱۳۹۷/۱۱/۲۹

۱۳۸۷-۴۲۱۷/۱۰/۲۹

به نام خدا

منشور اخلاق پژوهش

بایاری از خداوند سبحان و اعتقاد به این که عالم محضر خداست و همواره ناظر بر اعمال انسان، و به منظور پاس داشت مقام بلند دانش و پژوهش و نظریه، اهمیت جایگاه دانشگاه در اعتلای فرهنگ و تمدن بشری، مادران دانشجویان و اعضاء هیات علمی دانشگاه ها، متعهد می گردیم، اصول زیر را در انجام فعالیت های پژوهشی، مد نظر قرار داده و از آن تخطی نکنیم:

- ۱- اصل حقیقت جویی: تلاش در راستای پی جویی حقیقت و وفاداری به آن و دوری از هرگونه پنهان سازی حقیقت.
- ۲- اصل رعایت حقوق: التزام به رعایت کامل حقوق پژوهشگران و پژوهشگران (انسان، حیوان و نبات) و سایر صاحبان حق.
- ۳- اصل مالکیت مادی و معنوی: تعهد به رعایت کامل حقوق مادی و معنوی دانشگاه و کلیه بکاران پژوهش.
- ۴- اصل منافع ملی: تعهد به رعایت مصالح ملی و در نظر داشتن پیشبرد و توسعه کشور در کلیه مراحل پژوهش.
- ۵- اصل رعایت انصال و امانت: تعهد به اجتناب از هرگونه جانب داری غیر علمی و حفاظت از اموال، تجهیزات و منابع در اختیار.
- ۶- اصل رازداری: تعهد به صیانت از اسرار و اطلاعات محرمانه افراد، سازمان ها و کشور و کلیه افراد و نهادهای مرتبط با تحقیق.
- ۷- اصل احترام: تعهد به رعایت حریم و حرمت مادران انجام تحقیقات و رعایت جانب نقد و خودداری از هرگونه حرمت شکنی.
- ۸- اصل ترویج: تعهد به رواج دانش و اشاعه نتایج تحقیقات و انتقال آن به بکاران علمی و دانشجویان به غیر از مواردی که منع قانونی دارد.
- ۹- اصل برائت: التزام به برائت جویی از هرگونه رفتار غیر حرفه ای و اعلام موضع نسبت به کسانی که حوزه علم و پژوهش را به شائبه های غیر علمی می آلائند.

اینجانب، بهنام باقری چرمخوران، دانش‌آموخته‌ی مقطع کارشناسی ارشد تخصصی در رشته‌ی مهندسی عمران، گرایش مکانیک خاک و پی (ژئوتکنیک)، که در تاریخ ۱۳۹۷/ / از پایان‌نامه‌ی خود تحت عنوان «حل عددی تغییرشکل پذیری دینامیکی سد سنگریزه‌ای با پیش‌بینی پسا روانگرایی به روش اجزای محدود» با کسب نمره‌ی ---/--- (.....) دفاع نموده‌ام، بدینوسیله متعهد می‌شوم:

۱) این رساله، حاصل تحقیق و پژوهش انجام شده توسط اینجانب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران (اعم از پایان‌نامه، کتاب، مقاله و...) استفاده نموده‌ام، مطابق ضوابط و رویه‌ی موجود، نام منبع مورد استفاده و سایر مشخصات آن را در فهرست مربوطه ذکر و درج کرده‌ام.

۲) این رساله قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی (هم‌سطح، پایین‌تر یا بالاتر) در سایر دانشگاه‌ها و موسسات آموزش عالی ارائه نشده است.

۳) چنانچه بعد از فراغت از تحصیل، قصد استفاده و هرگونه بهره‌برداری، اعم از چاپ کتاب، ثبت اختراع و... از این پایان‌نامه را داشته باشم، مجوزهای مربوطه را اخذ نمایم.

نام و نام خانوادگی: بهنام باقری چرمخوران

تاریخ و امضاء:

تقدیر و تشکر

خداوند را شاکرم که بواسطه لطف و رحمت بی‌متنهای خود، توفیق گذر از آزمونی دیگر را در زندگی، جهت ادای دین به کشور عزیزم، ایران و نظام مقدس جمهوری اسلامی، نصیب نمود. در ابتدا بر خود لازم می‌دانم از رهنمودهای عالمانه، علمی و اخلاقی استاد عزیز و گرانقدر **مرحوم جناب آقای پروفیسور سید امیرالدین صدرنژاد**، که با وقف خود در مسیر علم و دانش و تلاش‌های جهادی خود، باعث اقتدار کشورمان گردید، خاضعانه تشکر نمایم. در مراحل ابتدایی انجام این رساله، ایشان با سعی صدر، حتی در ساعات غیرمعارف کاری پذیرای این حقیر بوده و حجت را بر اینجانب، جهت کار و تلاش مضاعف، جهت اعتلای مملکت عزیزمان تمام نمودند. به شاگردی ایشان افتخار می‌کنم، و از خداوند متعال، آمرزش و مقامات متعالی در پیشگاه خویش را برای ایشان خواستارم. پس از اتفاق ناگوار از دست دادن آن استاد ارجمند، استاد گرانقدر و گرانمایه، **جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زاده**، این حقیر را قرین الطاف پر مهرشان نهاده و به بنده اجازه دادند که تحت سایه‌ی علم سرشار و اطلاعات بی‌کران این استاد بزرگوار، به ادامه‌ی مطالعه و تحقیق بپردازم. بدین وسیله از زحمات ایشان قدردانی مینمایم و از ایشان به عنوان استاد راهنما و مقام مدیریت گروه گرایش ژئوتکنیک، کمال تقدیر و تشکر را دارم.

تقدیر و تشکر از **پدر و مادر** عزیز و مهربانم، که بواسطه‌ی یاری و دعای خیرشان، از **همسر گرامی**، که در تمام سختی‌های این مسیر، فداکارانه در کنارم ایستادند. پروردگار عالم را می‌ستایم و در پایان از همه‌ی کسانی که در طول این دوره، با اینجانب همکاری نموده‌اند تشکر نموده، موفقیت و سلامتی آنها را در همه امور زندگیشان، از قادر متعال، خواهانم.

پیشگاه قطب عالم امکان، حضرت مهدی صاحب الزمان (عج)

تقدیم به

روح معمار کبیر انقلاب و جانشین فرزانه و برحقش و همه‌ی **شهیدان** و مدافعان راه حق و دفاع از آرمانهای انقلاب اسلامی،
به خصوص **شهدای** مدافع حرم که آسایش و امنیت امروز ما، مدیون از سرگذشتی و ایثارشان است. آنان که تنگ بدست گرفتند تا
ما قلم بدست بگیریم و با جهاد علمی، ادامه دهنده‌ی راهشان باشیم.

و با تقدیم

به مادر و پدر مهربان و عزیزم، که وجودشان منظر لطف و کرم پروردگار و دعاها و خیرشان در زندگیم، همیشه را گلشاد و بدرقه‌ی راهم بوده
است،

به، همسر گرامی، نشانه لطف الهی در زندگی، یاور و دلسوز و خداکار که با صبر و متانت خویش، پشتیبانی محکم برایم بوده است.

فهرست مطالب

عنوان

شماره صفحه

چکیده

۱

فصل اول: کلیات

۱-۱: بیان مسأله

۳

۲-۱: اهداف و ضرورت تحقیق

۵

۳-۱: روش تحقیق و محدودیتها

۶

۴-۱: ساختار پایان نامه

۷

فصل دوم: روانگرایی و اثر ناهمسانی در خاک دانه‌ای

۱-۲: مروری بر روانگرایی در خاکها

۹

۱-۲-۱: مطالعات آزمایشگاهی روانگرایی در خاکها

۹

۲-۱-۲: الگوسازی عددی روانگرایی در خاکها

۱۱

۲-۲: ماسه‌های پسا روانگرا

۱۵

۱-۲-۲: بررسی آزمایشگاهی ماسه‌های پسا روانگرا

۱۵

۲-۲-۲: بررسی عددی ماسه‌های پسا روانگرا

۱۷

۳-۲: مروری کلی بر پیشینه‌ی اثر ناهمسانی در رفتار خاکهای دانه‌ای

۱۹

۱-۳-۲: بررسی پیشینه‌ی آزمایشگاهی اثر ناهمسانی در رفتار خاکهای دانه‌ای

۱۹

۲-۳-۲: بررسی پیشینه‌ی عددی اثر ناهمسانی در رفتار خاکهای دانه‌ای

۲۴

۲-۴: جمع بندی ۲۷

فصل سوم: الگوسازی عددی روانگرایی خاک

۳-۱: مقدمه ۲۹

۳-۲: روابط ساختاری الگوی ارزیابی شده برای توسعه ۲۹

۳-۲-۱: معادلات پایه ۳۰

۳-۲-۱-۱: مدول الاستیک ۳۱

۳-۲-۱-۲: سطح تسلیم ۳۱

۳-۲-۳: مدول پلاستیک ۳۲

۳-۲-۴: انبساط ۳۲

۳-۲-۵: اعمال رفتار حالت حدی ۳۳

۳-۲-۶: اثرات تغییرات فابریک بر روی انبساط ۳۳

۳-۲-۲: معادلات عمومی چندمحوری ۳۴

۳-۳: مقدمه ای بر الگوی چندصفحه ای ۳۷

۳-۴: الگوی چندصفحه ای ۳۸

۳-۴-۱: فرضیات ۳۹

۳-۴-۲: مفهوم عددی نظریه ی چندصفحه ای ۴۰

۳-۵: الگوی رفتاری یک صفحه ۴۶

۳-۵-۱: الگوی رفتار کشسان در صفحه ۴۷

۳-۵-۲: خط حالت بحرانی ۴۷

۴۸	۳-۵-۳: سطح تسلیم
۴۹	۳-۵-۴: نحوه‌ی تغییرات کرنش پلاستیک
۵۲	۳-۶: شرایط زهکشی نشده

فصل چهارم: صحت‌سنجی و توانایی الگو

۵۵	۴-۱: مقدمه
۵۵	۴-۲: شبیه‌سازی الگوی دافالیاس - منظری و مقایسه
۶۲	۴-۳: تعیین ثابتهای الگوی چندصفحه‌ای
۶۴	۴-۴: شبیه‌سازی الگوی چندصفحه‌ای و مقایسه
۷۱	۴-۵: بررسی اثر حذف ثابتهای مربوط به اثر فابریک
۸۲	۴-۶: بررسی ناهمسانی القایی (تحمیلی) رفتار ماسه در جهات ۱۷ گانه
۹۶	۴-۷: مقایسه‌ی خروجی‌های نرم افزار متلب و ویژوال استودیو
۹۸	۴-۸: توسعه‌ی روش در نرم‌افزار اجزای محدود opensees
۹۸	۴-۹: صحت‌سنجی عملکرد نرم افزار عددی
۱۰۳	۴-۱۰: تحلیل عددی یک مثال با برنامه‌ی توسعه داده شده
۱۰۴	۴-۱۰-۱: معرفی سد رودبار لرستان
۱۰۵	۴-۱۰-۲: ویژگی‌های طرح
۱۰۵	۴-۱۰-۳: مشخصات فنی سد رودبار
۱۰۶	۴-۱۰-۴: المان‌بندی و شرایط مرزی
۱۰۷	۴-۱۰-۵: مدل ساختاری و پارامترهای مصالح

۴-۱۰-۶: بارگذاری و تحلیل

۱۰۹

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱: نتیجه‌گیری

۱۲۰

۵-۲: پیشنهادات

۱۲۱

منابع

۱۲۳

چکیده‌ی لاتین

۱۲۹

ضمیمه‌ی ۱: اضافه کردن یک برنامه‌ی مدل رفتاری جدید به اپنسیس

۱۳۰

ضمیمه‌ی ۲: مراحل ساخت فایل کتابخانه‌ای در میکروسافت ویژوال استودیو

۱۳۲

ضمیمه‌ی ۳: برنامه‌ی نوشته شده برای آزمایش سه‌محوری زهکشی‌شده‌ی یکنوا در حالت پایه با متلب

۱۳۳

ضمیمه‌ی ۴: برنامه‌ی نوشته شده برای آزمایش سه‌محوری زهکشی‌شده‌ی یکنوا در حالت پایه با ویژوال استودیو

۱۳۶

فهرست جداول

عنوان	شماره صفحه
جدول ۱-۲: شرایط آزمایش و نتایج نشست (یو و همکاران ۲۰۱۳)	۲۴
جدول ۱-۳: معادلات در شرایط استاندارد سه محوره و چندمحوره و ثابتهای الگوی دافالیاس-منظری	۳۷
جدول ۲-۳: کسینوسهای هادی و ضرایب وزنه‌ی صفحات ۱۷ گانه	۴۳
جدول ۳-۳: راستای تنش برشی τ_{n1} در صفحات ۱۷ گانه	۴۴
جدول ۴-۳: راستای تنش برشی τ_{n2} در صفحات ۱۷ گانه	۴۵
جدول ۱-۴: مقدار ثابتهای الگوی دافالیاس-منظری	۵۶
جدول ۲-۴: مقدار ثابتها در صفحه	۶۳
جدول ۳-۴: مقایسه‌ی خروجیهای قبل از تحلیل عددی و بعد از تحلیل عددی در اپنسیس	۱۰۰
جدول ۴-۴: مشخصات مصالح مصرفی در سد رودبار لرستان	۱۰۷
جدول ۵-۴: جزئیات بارگذاری لرزه‌ای در سد رودبار لرستان	۱۰۹

فهرست نمودارها

عنوان

شماره صفحه

- شکل ۱-۲: منحنی تنش- کرنش پساروانگرا (روح الامین و همکاران ۲۰۱۷) ۱۶
- شکل ۲-۲: نتایج آزمایشات سه محوری زهکشی نشده ی وردوگو و ایشی هارا ۲۱
- شکل ۳-۲: نتایج آزمایشات سه محوری زهکشی شده ی وردوگو و ایشی هارا ۲۲
- شکل ۴-۲: آماده سازی الگو با (a) زاویه ی صفر (b) زاویه ی ۴۵ (c) زاویه ی ۹۰ (یو و همکاران ۲۰۱۳) ۲۴
- شکل ۱-۳: شکل شماتیک خطوط تسلیم، بحرانی، انبساط و مرزی در فضای p-q (دافالیاس-منظری ۲۰۰۴) ۳۰
- شکل ۲-۳: شکل شماتیک سطوح تسلیم، بحرانی، انبساط و مرزی روی صفحه π در فضای نسبت تنش (دافالیاس-منظری ۲۰۰۴) ۳۰
- شکل ۳-۳: (a) نمایش تجمع واقعی ذرات (b) نمایش دو بعدی از تجمع قطعات چند وجهی مصنوعی ۴۰
- شکل ۴-۳: موقعیت کره و ۱۷ صفحه در نیم کره ۴۱
- شکل ۵-۳: امتداد صفحات ۱۷ گانه در مرکز مکعب ۴۲
- شکل ۶-۳: شکل شماتیک سطح تسلیم، سطح انبساط، سطح حالت حدی و سطح مرزی در صفحه و نقطه (صفحه π) ۴۹
- شکل ۱-۴: مقایسه ی نتایج الگوی دافالیاس- منظری و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش استاندارد سه محوری زهکشی شده با $p_0 = 100kPa$ ۵۷
- شکل ۲-۴: مقایسه ی نتایج الگوی دافالیاس- منظری و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش استاندارد سه محوری زهکشی شده با $p_0 = 500kPa$ ۵۷
- شکل ۳-۴: مقایسه ی نتایج الگوی دافالیاس- منظری و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش استاندارد سه محوری زهکشی نشده با $e_0 = 0.735$ ۵۸
- شکل ۴-۴: مقایسه ی نتایج الگوی دافالیاس- منظری و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش

- استاندارد سه محوری زهکشی نشده با $e_0 = 0.833$ ۵۹
- شکل ۴-۵: مقایسه‌ی نتایج الگوی دافالیاس-منظری و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش ۶۰
- استاندارد سه محوری زهکشی نشده با $e_0 = 0.907$ ۶۰
- شکل ۴-۶: مقایسه‌ی نتایج (a, b) تجربی (دافالیاس و منظری ۲۰۰۴) و (c, d) الگوی دافالیاس-منظری در آزمایش ۶۱
- استاندارد سه محوری متناوب با $p_0 = 294kPa$ و $e_0 = 0.808$ ۶۱
- شکل ۴-۷: مقایسه‌ی الگوی عددی با نتایج تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش استاندارد ۶۴
- سه محوری برای مقادیر میانگین ضرایب و با $p_0 = 1000kPa$ و $e_0 = 0.833$ ۶۴
- شکل ۴-۸: مقایسه‌ی نتایج چندصفحه‌ای و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش ۶۵
- استاندارد سه محوری زهکشی شده با $p_0 = 100kPa$ و $C_{ZP} = 600$ و $Z_{maxp} = 4$ ۶۵
- شکل ۴-۹: مقایسه‌ی نتایج چندصفحه‌ای و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش ۶۶
- استاندارد سه محوری زهکشی شده با $p_0 = 500kPa$ و $C_{ZP} = 600$ و $Z_{maxp} = 4$ ۶۶
- شکل ۴-۱۰: مقایسه‌ی نتایج چندصفحه‌ای و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش ۶۷
- استاندارد سه محوری زهکشی نشده با $e_0 = 0.735$ و $C_{ZP} = 600$ و $Z_{maxp} = 4$ ۶۷
- شکل ۴-۱۱: مقایسه‌ی نتایج چندصفحه‌ای و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش ۶۸
- استاندارد سه محوری زهکشی نشده با $e_0 = 0.833$ و $C_{ZP} = 600$ و $Z_{maxp} = 4$ ۶۸
- شکل ۴-۱۲: مقایسه‌ی نتایج چندصفحه‌ای و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش ۶۹
- استاندارد سه محوری زهکشی نشده با $e_0 = 0.907$ و $C_{ZP} = 600$ و $Z_{maxp} = 4$ ۶۹
- شکل ۴-۱۳: مقایسه‌ی نتایج (a, b) تجربی (دافالیاس و منظری ۲۰۰۴) و (c, d) الگوی چندصفحه‌ای در آزمایش ۷۰
- استاندارد سه محوری متناوب با $p_0 = 294kPa$ و $e_0 = 0.808$ و $C_{ZP} = 600$ و $Z_{maxp} = 4$ ۷۰
- شکل ۴-۱۴: نتایج بارگذاری متناوب در نقطه (روش دافالیاس-منظری) بدون اثر فابریک ۷۲

- شکل ۴-۱۵: نتایج بارگذاری متناوب در نقطه (روش دافالیاس - منظری) با اثر فابریک ۷۲
- شکل ۴-۱۶: نتایج بارگذاری متناوب به روش چندصفحه ای با حذف ثابتهای فابریک ۷۳
- شکل ۴-۱۷: مقایسه‌ی نتایج چندصفحه‌ای بدون ضرایب فابریک و پایه‌ی با ضرایب فابریک برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش استاندارد سه محوری زهکشی شده با $p_0 = 500kPa$ و $e_0 = 0.81$ ۷۴
- شکل ۴-۱۸: مقایسه‌ی نتایج چندصفحه‌ای بدون ضرایب فابریک و پایه‌ی با ضرایب فابریک برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش استاندارد سه محوری زهکشی نشده با $p_0 = 3000kPa$ و $e_0 = 0.735$ ۷۴
- شکل ۴-۱۹: مقایسه‌ی نتایج چندصفحه‌ای و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش استاندارد سه محوری زهکشی شده با $p_0 = 100kPa$ و $C_{ZP} = 0$ و $Z_{maxp} = 0$ ۷۵
- شکل ۴-۲۰: مقایسه‌ی نتایج چند صفحه ای و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش استاندارد سه محوری زهکشی شده با $p_0 = 500kPa$ و $C_{ZP} = 0$ و $Z_{maxp} = 0$ ۷۶
- شکل ۴-۲۱: مقایسه‌ی نتایج چندصفحه‌ای و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش استاندارد سه محوری زهکشی نشده با $e_0 = 0.735$ و $C_{ZP} = 0$ و $Z_{maxp} = 0$ ۷۷
- شکل ۴-۲۲: مقایسه‌ی نتایج چندصفحه‌ای و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش استاندارد سه محوری زهکشی نشده با $e_0 = 0.833$ و $C_{ZP} = 0$ و $Z_{maxp} = 0$ ۷۸
- شکل ۴-۲۳: مقایسه‌ی نتایج چندصفحه‌ای و تجربی برای شرایط بارگذاری و باربرداری یکنوا در آزمایش استاندارد سه محوری زهکشی نشده با $e_0 = 0.907$ و $C_{ZP} = 0$ و $Z_{maxp} = 0$ ۷۹
- شکل ۴-۲۴: مقایسه‌ی نتایج (a, b) تجربی (دافالیاس و منظری ۲۰۰۴) و (c, d) الگوی چندصفحه‌ای در آزمایش استاندارد سه محوری متناوب با $p_0 = 294kPa$ و $e_0 = 0.808$ و $C_{ZP} = 0$ و $Z_{maxp} = 0$ ۸۰
- شکل ۴-۲۵: تنش برشی در برابر تنش نرمال روی ۱۷ صفحه، تحت شرایط بارگذاری و باربرداری زهکشی‌شده‌ی یکنوا در $e_0 = 0.917$ و $P_0 = 100kPa$ ۸۲

- شکل ۴-۲۶: کرنش عمودی در برابر تنش عمودی روی ۱۷ صفحه، تحت شرایط بارگذاری و باربرداری
 ۸۳ زهکشی شده‌ی یکنوا در $e_0 = 0.917$ و $P_0 = 100kPa$
- شکل ۴-۲۷: کرنش حجمی در برابر کرنش برشی روی ۱۷ صفحه، تحت شرایط بارگذاری و باربرداری
 ۸۴ زهکشی شده‌ی یکنوا در $e_0 = 0.917$ و $P_0 = 100kPa$
- شکل ۴-۲۸: کرنش عمودی در برابر کرنش برشی روی ۱۷ صفحه، تحت شرایط بارگذاری و باربرداری
 ۸۵ زهکشی شده‌ی یکنوا در $e_0 = 0.917$ و $P_0 = 100kPa$
- شکل ۴-۲۹: تنش عمودی در برابر تنش برشی روی ۱۷ صفحه، تحت شرایط بارگذاری و باربرداری
 ۸۶ زهکشی نشده‌ی یکنوا در $e_0 = 0.833$ و $P_0 = 1000kPa$
- شکل ۴-۳۰: کرنش عمودی در برابر تنش عمودی روی ۱۷ صفحه، تحت شرایط بارگذاری و باربرداری
 ۸۷ زهکشی نشده‌ی یکنوا در $e_0 = 0.833$ و $P_0 = 1000kPa$
- شکل ۴-۳۱: کرنش عمودی در برابر کرنش برشی روی ۱۷ صفحه، تحت شرایط بارگذاری و باربرداری
 ۸۹ زهکشی نشده‌ی یکنوا در $e_0 = 0.833$ و $P_0 = 1000kPa$
- شکل ۴-۳۲: کرنش برشی در برابر تنش برشی روی ۱۷ صفحه، تحت شرایط بارگذاری و باربرداری
 ۸۹ زهکشی نشده‌ی یکنوا در $e_0 = 0.833$ و $P_0 = 1000kPa$
- شکل ۴-۳۳: کرنش عمودی در برابر کرنش برشی روی ۱۷ صفحه، تحت شرایط بارگذاری
 ۹۰ زهکشی نشده‌ی چرخه‌ای در $e_0 = 0.808$ و $P_0 = 294kPa$
- شکل ۴-۳۴: تنش برشی در برابر تنش عمودی روی صفحات ۱۷ گانه در شرایط زهکشی شده‌ی یکنوا
 ۹۲ با $p_0 = 1000kPa$ و $e_0 = 0.907$
- شکل ۴-۳۵: تنش برشی در برابر کرنش برشی روی صفحات ۱۷ گانه در شرایط زهکشی شده‌ی یکنوا
 ۹۲ با $p_0 = 1000kPa$ و $e_0 = 0.907$
- شکل ۴-۳۶: تنش عمودی در برابر تنش برشی روی صفحات ۱۷ گانه در شرایط زهکشی نشده‌ی
 ۹۳ چرخه‌ای با $p_0 = 294kPa$ و $e_0 = 0.808$

- شکل ۴-۳۷: کرنش برشی در برابر تنش برشی روی صفحات ۱۷ گانه در شرایط زهکشی نشده‌ی چرخه‌ای با $p_0 = 294kPa$ و $e_0 = 0.808$ ۹۴
- شکل ۴-۳۸: مقایسه‌ی خروجی‌های نرم افزار متلب و ویژوال استودیو در بارگذاری یکنوا در حالت زهکشی شده، در حالت غیرچندصفحه‌ای ۹۶
- شکل ۴-۳۹: مقایسه‌ی خروجی‌های نرم افزار متلب و ویژوال استودیو در بارگذاری یکنوا در حالت زهکشی نشده، در حالت غیرچندصفحه‌ای ۹۶
- شکل ۴-۴۰: مقایسه‌ی خروجی‌های نرم افزار متلب و ویژوال استودیو در بارگذاری چرخه‌ای در حالت زهکشی نشده، در حالت غیرچندصفحه‌ای ۹۶
- شکل ۴-۴۱: مقایسه‌ی خروجی‌های نرم افزار متلب و ویژوال استودیو در بارگذاری یکنوا در حالت زهکشی شده، در حالت چندصفحه‌ای ۹۷
- شکل ۴-۴۲: مقایسه‌ی خروجی‌های نرم افزار متلب و ویژوال استودیو در بارگذاری یکنوا در حالت زهکشی نشده، در حالت چندصفحه‌ای ۹۷
- شکل ۴-۴۳: مقایسه‌ی خروجی‌های نرم افزار متلب و ویژوال استودیو در بارگذاری چرخه‌ای در حالت زهکشی نشده، در حالت چندصفحه‌ای ۹۷
- شکل ۴-۴۴: جزئیات تک المان مدلسازی شده در اپنسیس با المان stdBrick ۹۹
- شکل ۴-۴۵: مقایسه‌ی دو خروجی مربوط به بارگذاری یکنوا بین متلب و اپنسیس- مدلسازی آزمایش سه محوری یکنوا در حالت زهکشی نشده روی یک المان ۹۹
- شکل ۴-۴۶: مقایسه‌ی دو خروجی مربوط به بارگذاری تناوبی بین متلب و اپنسیس- مدلسازی آزمایش سه محوری تناوبی در حالت زهکشی نشده روی یک المان ۱۰۰
- شکل ۴-۴۷: جزئیات دو المان مدلسازی شده در اپنسیس با المان stdBrick ۱۰۱

- شکل ۴-۴۸: نتیجه‌ی مدل‌سازی آزمایش سه محوری یکنوا در حالت زهکشی نشده روی دو المان ۱۰۲
- شکل ۴-۴۹: نتیجه‌ی مدل‌سازی آزمایش سه محوری تناوبی در حالت زهکشی نشده روی دو المان ۱۰۳
- شکل ۴-۵۰: شکل شماتیک و المان بندی سد رودبار لرستان ۱۰۶
- شکل ۴-۵۱: لایه‌های بکار رفته در مدل‌سازی سد در نرم افزار اپنسیس ۱۰۷
- شکل ۴-۵۲: بار آب هیدرواستاتیک وارده به المانهای بالادست سد در مدل‌سازی در نرم افزار اپنسیس ۱۰۹
- شکل ۴-۵۳: تنش کل قائم تحت بار مرده (حداکثر: ۳۱۶۰ کیلوپاسکال) ۱۱۰
- شکل ۴-۵۴: تنش کل افقی تحت بار مرده (حداکثر: ۱۴۴۰ کیلوپاسکال) ۱۱۱
- شکل ۴-۵۵: تنش کل قائم تحت بار مرده و آب هیدرواستاتیک (حداکثر: ۳۲۷۰ کیلوپاسکال) ۱۱۱
- شکل ۴-۵۶: تنش موثر قائم تحت بار مرده و آب هیدرواستاتیک (حداکثر: ۳۱۹۰ کیلوپاسکال) ۱۱۲
- شکل ۴-۵۷: تنش کل افقی تحت بار مرده و آب هیدرواستاتیک (حداکثر: ۱۶۷۰ کیلوپاسکال) ۱۱۲
- شکل ۴-۵۸: تنش موثر افقی تحت بار مرده و آب هیدرواستاتیک (حداکثر: ۱۴۵۰ کیلوپاسکال) ۱۱۳
- شکل ۴-۵۹: فشار آب هیدرواستاتیک (حداکثر: ۱۷۴۰ کیلوپاسکال) ۱۱۳
- شکل ۴-۶۰: تغییر مکان قائم سد تحت بار مرده (حداکثر در تاج: ۱۷۹ سانتیمتر) ۱۱۴
- شکل ۴-۶۱: تغییر مکان افقی سد تحت بار مرده (حداکثر در تاج: ۲۷ سانتیمتر) ۱۱۴
- شکل ۴-۶۲: تغییر مکان قائم سد تحت بار آب هیدرواستاتیکی (حداکثر در تاج: ۱۰۰ سانتیمتر) ۱۱۵
- شکل ۴-۶۳: تغییر مکان افقی سد تحت بار آب هیدرواستاتیکی (حداکثر در تاج: ۷۰ سانتیمتر) ۱۱۵
- شکل ۴-۶۴: حداکثر تنش موثر قائم در تحلیل دینامیکی (حداکثر: ۲۲۰۰ کیلوپاسکال) ۱۱۶
- شکل ۴-۶۵: حداکثر تنش موثر افقی در تحلیل دینامیکی (حداکثر: ۱۲۰۰ کیلوپاسکال) ۱۱۶
- شکل ۴-۶۶: ضریب مدول برشی سازگار با کرنشها در تحلیل دینامیکی (حداکثر: ۵۵ کیلوپاسکال) ۱۱۷

چکیده

ارائه‌ی یک الگوی ساده و جامع جهت پیش بینی اثرات ناهمسانی کامل و شروع روانگرایی و شرایط پس از روانگرایی در خاکهای دانه‌ای از موضوعات با اهمیت در علم الگوسازی رفتاری خاکها است. وجود ناهمسانی ذاتی در تشکیل رسوبات ماسه‌ای و همچنین با پیدایش تغییر شکلهای خمیری در اثر برش در هنگام بارگذاری یا باربرداری، خود موجب پیدایش ناهمسانی و تشکیل سطوح لغزش در امتدادهای ضعیفتر خواهد شد. با توجه به اهمیت آثار ناهمسانی‌های ذاتی (اولیه) و تحمیلی پس از شروع روانگرایی و پس از تغییر در رفتار برشی ماسه، در این پژوهش، یک الگوی عددی، جهت کاربردهای مهندسی، ارائه می‌شود. در این تحقیق، از الگوی چندصفحه‌ای استفاده می‌شود که در آن، ۱۷ صفحه با جهات از پیش تعریف شده در نظر گرفته شده و خواص ماده روی آنها انتگرال‌گیری می‌شود. بر این اساس، ناهمسانی در رفتار ماده، بجای سه صفحه متعامد، بر روی ۱۷ صفحه‌ی مارّ بر نقطه، که از دقت و قدرت بیشتری برخوردار است، ارزیابی می‌شود. قدرت و دقت محاسباتی در روش محاسباتی چندصفحه‌ای، با مقایسه با نتایج تجربی، در شرایط گوناگون بارگذاری یکنوا و تناوبی، زهکشی‌شده و زهکشی‌نشده، تحقیق می‌گردد. مقایسه‌ی نتایج الگوی پیشنهادی و نتایج تجربی، صحت عملکرد این الگو و توانایی آن در دخیل نمودن ناهمسانی تحمیلی در محاسبات و رفتارهای پس از روانگرایی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: الگوی چندصفحه‌ای، ماسه، کشسان-خمیری، پسا روانگرایی، ناهمسانی تحمیلی، بارگذاری متناوب، روانگرایی، روش اجزای محدود

فصل اول:

کلیات

۱-۱: بیان مسأله

روانگرایی، یکی از مهمترین موضوعات در مهندسی ژئومکانیک است. روانگرایی خاک، خطری است که بصورت مستمر در لایه‌های خاکهای غیرچسبنده اشباع و در هنگام زمین‌لرزه مشاهده می‌گردد. تأثیرات مخرب آن بر روی سازه‌ها، توجه زیادی را در مهندسی ژئومکانیک به خود جلب کرده است. این پدیده، در اثر از بین رفتن مقاومت خاک و سختی آن در نتیجه‌ی اعمال تنش‌های یکنوا و متناوب، تغییر شکلهای بزرگی ایجاد نموده و خسارت ناشی از آن باعث گسیختگی در شالوده‌ها، واژگونی دیوارهای حائل، شناوری سازه‌های مدفون و زمین لغزش، می‌گردد. عوامل اصلی مؤثر در پتانسیل روانگرایی، تراکم نسبی (نسبت تخلخل)، تنش مؤثر همه جانبه‌ی موجود که به نوعی وابسته به نحوه‌ی پخش اندازه‌ی ذرات و بهم فشردگی آنها است، شرایط مرزی زهکشی و غیره است.

یکی دیگر از فراسنجهای مهم که می‌تواند بر روی مقاومت روانگرایی خاک تحت بارگذاری متناوب، تأثیرگذار باشد، ناهمسانی اولیه و تحمیلی در اثر تغییرشکلهای خمیری بوده است که ناشی از خاصیت بافت خاک است. اصولاً دو نوع ناهمسانی مختلف در مصالح دانه‌ای وجود دارد. اولین آن، ناهمسانی اولیه است که در طی روند رسوب گذاری مصالح زمینی، تحت تأثیر نحوه‌ی قرارگیری ذرات خاک، نسبت تخلخل و تماس بین ذرات با یکدیگر ایجاد می‌گردد. این نوع از ناهمسانی، تا وقتی که مصالح به حالت خمیری نرسیده‌اند، تغییر نمی‌کند. فرم دیگر ناهمسانی، نوع تحمیلی آن است که تحت تأثیر کرنش خمیری و تاریخچه‌ی آن در اثر بارگذاری اعمال شده می‌باشد. این نوع ناهمسانی، عاملی مهم و اثر گذار در رفتار مکانیکی خاک‌های دانه‌ای است. بر خلاف ناهمسانی اولیه، ناهمسانی تحمیلی، در هنگام تغییرشکلهای پلاستیک، در طول مراحل بارگذاری تغییر می‌نماید. مطالعات متعددی در خصوص ناهمسانی خاک انجام گرفته است. اما توسعه‌ی ناهمسانی در هنگام روانگرایی، که باعث کاهش و گسترش آن، همچنین کاهش شدید تنش مؤثر و سختی خاک می‌گردد، هنوز هم موضوعی بحث برانگیز است.

نظرات مختلفی در خصوص تأثیر ناهمسانی در هنگام روانگرایی وجود دارد. چون تغییر شکلهای پلاستیک بزرگ در این حالت بوجود می‌آید، ناهمسانی در طول روانگرایی افزایش می‌یابد و این موضوع را که تاریخچه‌ی روانگرایی پیشین روی خاک، بر روی نتایج آزمایشهای سه محوری فشاری و کششی تحت شرایط زهکشی نشده تأثیر دارد، برخی محققین ثابت نموده‌اند. به عبارتی، وقتی این آزمایشات روی خاک روانگرا انجام گرفته و خاک، رفتارهای مختلفی در شرایط بارگذاری متفاوت را از خود نشان می‌دهد، این مسأله را که مقدار زیادی ناهمسانی

در هنگام روانگرایی بوجود آمده، تأیید می‌نماید. اخیراً، محققین تلاش کرده‌اند، با در نظر گرفتن الگوهای مشخصه-ی گوناگون برخی از اثرات ناهمسانی، نظیر چرخش محورهای اصلی تنش، ناهمسانی اولیه یا ناهمسانی تحمیلی را بصورت جداگانه یا با ترکیب برخی از آنها پیش از وقوع روانگرایی یا پس از آن در نظر بگیرند. لیکن، محدودیت برخی از این الگوها جهت استفاده در شرایط مختلف وقوع روانگرایی، نظیر شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده، بارگذاری‌های یکنوا و متناوب و بطور کلی در نظر گرفتن تمامی مسائل ناهمسانی در خاکهای دانه‌ای، جامعیت آنها را با تردید روبرو می‌نماید.

یکی از روش‌های الگوسازی مواد، روشهای مبتنی بر نظریه‌ی چندصفحه‌ای است که از اهمیت و ارزش خاصی برخوردار است. چارچوب رفتاری چندصفحه‌ای به عنوان روشی قوی، در پیش‌بینی ناهمسازی رفتار ماده با ویژگی-های تفکیک رفتار بر روی صفحات متعدد در یک موضع، شناخته شده است. بر اساس الگوی چندصفحه‌ای، منحنی تنش-کرنش، به متناسب ترین شرایط با چند نظریه‌ی مختلف کشسان-خمیری یا کشسان گرانو-خمیری، تقریب و تخمین زده میشود، به گونه‌ای که قابلیت اعمال هر گونه تغییر در رفتار ماده، مانند نرم شدگی یا سخت شدگی یا آثار دیگر در بارگذاری‌های متناوب را بتوان الگوسازی کرد. ویژگیهای رفتاری الگوی مذکور، همراه با ویژگی‌های خاص حاصل از چهارچوب چند صفحه‌ای، مانند قابلیت پیش‌بینی ناهمسانی اولیه و تحمیلی ماده و همچنین امکان پیش‌بینی آثار چرخش محوری‌های اصلی تنش و کرنش در حین رفتار غیرخطی و همچنین عدم هم‌محوریت محورهای اصلی تنش و کرنش و چگونگی تمرکز کرنش‌ها در پهنه‌ی مواد، به قابلیت‌های این روش افزوده است. مضافاً، امکان افزودن تاثیر سایر عوامل پیچیده‌ی رفتاری به الگوی مورد استفاده، به توسعه‌ی الگو می‌انجامد. خصوصیت مهم دیگری که در الگوی چندصفحه‌ای می‌توان به آن اشاره کرد، امکان تحلیل و ارزیابی رفتار در جهات خاص و متنوع در مصالح است. بحث درزه در سنگ‌ها یا وضعیت صفحه‌ی خواب دانه‌ها در رسوب گذاری ماسه‌ها و آبرفت‌ها و یا مواردی مشابه این نمونه‌ها، موجب شده که در جهات خاصی، بتوان خصوصیات متفاوتی از سایر جهات در رفتار مواد مشاهده نمود. الگوی چندصفحه‌ای این امکان را می‌دهد که در این جهات خاص، رفتار مناسب و متفاوت از سایر امتدادها را، مانند آسیب و پیشرفت صدمات و خستگی و خزش، تعیین کرده و به کارگرفت.

در تحقیق حاضر، با استفاده از نظریه‌ی چند صفحه‌ای و ۱۷ صفحه‌ی تعریف شده در جهات مختلف، ضرایب وزنه و جهات آن محاسبه و در چارچوب روش انتگرال‌گیری عددی، اثرات ۱۷ صفحه، به نقطه منتقل می‌گردد. جهت الگوسازی رفتار در صفحات، از یک الگوی پیشرفته‌ی عددی اصلاح شده با کاهش ثابتهای خاک و بر

پایه‌ی تئوری حالت حدی و هیپوپلاستیسیته، که قابلیت پیش‌بینی رفتار ماسه‌ها در شرایط یکنوا زهکشی شده و نشده و بارگذاری متناوب را دارد، استفاده گردیده است. در چارچوب روش چندصفحه‌ای، معادلات حاکم بر صفحه، بصورت مختصر ارائه و ثابتهای الگو در صفحات با کالیبراسیون حاصل می‌گردد. سپس توانایی الگو در حالات گوناگون بارگذاری و فشار همه‌جانبه و نسبت تخلخل، با نتایج استاندارد سه‌محوری مقایسه و مورد صحت‌سنجی قرار می‌گیرد. شرایط تنش و کرنش‌های پس از روانگرایی، با استفاده از الگوی پیشنهادی، از دیگر مواردی است که در این پژوهش مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۲: اهداف و ضرورت تحقیق

با الگوسازی عددی، شاهد کاهش زمان و هزینه‌های انجام آنالیز سازه‌های مرتبط با خاک هستیم؛ لذا، تلاش در جهت انطباق هر چه بیشتر الگوهای رفتاری خاک با واقعیت‌های موجود در طبیعت، از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از پدیده‌های فیزیکی خاک، وقوع روانگرایی، اتفاقات و آسیب‌های پس از آن به سازه‌های مرتبط با این خاک‌ها است؛ لذا، مسائل مرتبط با این پدیده و الگوسازی آنها نیز باید مورد توجه قرار گیرد. ناهمسانی در ماسه‌های روانگرا، از جمله موضوعات چالش برانگیز است که می‌تواند رفتار پیش و پس از روانگرایی خاکها را تحت تأثیر خود قرار دهد. الگوهای موجود پیش‌بینی ناهمسانی، قبل و بعد از وقوع روانگرایی، با محدودیتهایی نظیر لحاظ نمودن تعداد محدود مولفه‌های ناهمسانی و یا پیش‌بینی ناهمسانی فقط قبل از شروع روانگرایی یا فقط پس از آن، با استفاده از تعداد ثابت‌های زیاد، مواجه می‌باشند. ضمن آنکه اثرات ناهمسانی در روانگرایی را بصورت مصنوعی و با توجه به یک سری تانسورها لحاظ نموده‌اند. بنابراین با توجه به ضعف الگوها و اینکه عموم آنها با نامتغیرهای تنش و کرنش کار می‌کنند، در این تحقیق بصورت ساختاری با استفاده از روش چند صفحه‌ای و یک الگوی مشخصه مناسب، اثرات ناهمسانی‌های گوناگون در رفتارسنجی ماسه‌ها مورد توجه قرار گیرد. نقش ناهمسانی اولیه و تحمیلی و توانایی الگو در لحاظ نمودن صحیح جابجایی‌ها، در مسائل عملی نظیر چرخش محورها (در سازه‌های دریایی تحت اثر امواج)، نقشی بی‌بدیل بوده و بررسی و الگوسازی صحیح آن با روش مذکور سبب پیش‌بینی صحیح آثار گسیختگی در سازه‌ها، صفحات برشی و نشست‌های حاصله، خواهد گردید. لذا، اهداف کلی تحقیق را می‌توان اینگونه بیان نمود:

- بررسی توانایی الگوی مورد مطالعه، که در فصول بعدی بطور کامل مورد بحث قرار خواهد گرفت (الگوی دافالیاس-منظری) در پیش‌بینی رفتار ماسه‌ها در شرایط پساروانگرایی