بسم الله الرحمن الرحیم

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

خانم زهره خلیلی پایان نامه ٦ واحدی خود را **با عنوان مدلسازی عددی رفتار خاك ماسه ای در آزمایش سه محوری** در تاریخ ۱۳۸۹/۲/۱۵ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - خاک وپی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر سید شهاب الدین یثربی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر محمد نوروز علیایی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر علی اکبر گلشنی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر خداپرست	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر علی اکبر گلشنی	استادیار	

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 ۱۳۸۴/۴/۲۵ 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

امضاء

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 **مهندسی عمران-خاک و پی** است که در سال **۱۳۸۹** در دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای **دکتر شهاب الدین یثربی،** مشاوره سرکار خانم/جناب آقای **دکتر محمد نوروز علیایی** 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 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 **زهره خلیلی** دانشجوی رشته **مهندسی عمران- خاک و پی** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضا:

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران

گرایش مکانیک خاک و مهندسی پی

مدلسازی عددی رفتار خاک ماسه‌ای در آزمایش سه‌محوری

نگارنده : زهره خلیلی

استاد راهنما : دکتر شهاب‌الدین یثربی

استاد مشاور : دکتر محمد نوروزعلیایی

بهار ۱۳۸۹

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

که مهرشان را کرانه ای نیست

تشکر و قدردانی

سپاس خدایی را که انسان را آفرید و به او آنچه را که نمی‌دانست آموخت.

اکنون که این تحقیق به سرانجام رسیده است بر خود واجب می‌دانم که از زحمات فراوان و راهنمایی‌های ارزشمند استاد مهربان و عزیزم، جناب آقای دکتر شهاب الدین یثربی کمال تشکر را داشته باشم.

همچنین از استاد بزرگوارم آقای دکتر محمد نوروزعلیایی که در این تحقیق مشاورم بودند، تشکر می‌نمایم.

برخود لازم می‌دانم از زحمات سایر اساتید گرانقدر گروه مکانیک خاک و مهندسی پی آقایان دکتر کمک پناه، دکتر یزدانی و دکتر گلشنی که در طول دوره تحصیلات کارشناسی ارشد از محضر ایشان بهره‌های فراوان برده‌ام، تشکر نمایم.

در خاتمه از آقایان مهندس نعیمی‌فر، مهندس جوادی و تمامی دوستانی که در انجام این تحقیق مرا یاری کردند، کمال تشکر را داشته و برایشان آرزوی توفیق و سربلندی دارم.

چکیده

امروزه مدلسازی عددی رفتار خاکها به عنوان روشی جهت کاهش هزینه آزمون‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمایش سه‌محوری یکی از متداولترین آزمایشات مکانیک خاک برای بدست آوردن پارامترهای مقاومتی خاک می‌باشد. با توجه به کاربرد زیاد نتایج حاصل از آزمایش سه‌محوری، نیاز به مدلسازی عددی این آزمایش برای سهولت در پیش‌بینی رفتار خاک احساس می‌شود. در این پایان‌نامه به پیش‌بینی رفتار خاکهای ماسه‌ای مخلوط با خاک ریزدانه تحت آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته- زهکشی‌نشده (CU) پرداخته شده است. خاک مورد مطالعه شامل ترکیبی از خاک ماسه‌ای فیروزکوه با درصدهای مختلف رس می‌باشد. منحنی تنش-کرنش خاک ماسه ای در این آزمایشات با استفاده از یک مدل اجزا محدود شبیه‌سازی شده است. مدلسازی انجام شده بصورت تقارن محوری انجام شده است. از فرضیه‌های موجود در این تحقیق، وجود شرایط مرزی ایده‌آل (صفحات بدون اصطکاک) می‌باشد که منجر به ایجاد شرایط تنش همگن در نمونه خاک و در نتیجه تفسیر راحت‌تر رفتار خاک می‌شود. با توجه به این نکته که برخی از پارامترهای مدل رفتاری از آزمایش متداول سه‌محوری بدست نمی‌آید، پارامترهای اولیه بر اساس مراجع علمی موجود تخمین زده شده و در نهایت پارامترهای مناسب به روش سعی و خطا و با در نظر گرفتن نتایج آزمایشگاهی موجود بدست آمده است. در واقع پارامترهای مورد نیاز جهت مدلسازی رفتار خاک مورد مطالعه از روش تحلیل برگشتی بدست آمده است. بر اساس نتایج شبیه سازی، نمودارهای تنش انحرافی- کرنش محوری (q-ε)، مسیر تنش (q-p') و فشار آب حفره‌ای-کرنش محوری (u-ε) برای خاک مذکور پیش-بینی شده‌اند که همخوانی لازم را با نتایج آزمایشگاهی دارا می‌باشند.

کلید واژه: آزمایش سه‌محوری تحکیم‌یافته- زهکشی‌نشده، مدلسازی عددی، خاک ماسه‌ای مخلوط با ریزدانه، تحلیل برگشتی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... د

فهرست جدول‌ها ..... و

فهرست شکل‌ها ..... ز

فصل ۱-کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- هدف تحقیق ۳

۱-۳- فصول پایان‌نامه ٤

فصل ۲- مروری بر مطالعات گذشته و شناخت مدلهای رفتاری مرسوم ۵

۲-۱- مقدمه‌ای بر مشخصات رفتاری مصالح ماسه‌ای ٦

۲-۱-۱- تغییر حجم در خاکهای دانه‌ای ۸

۲-۱-۲- مفهوم نسبت تخلخل بحرانی ۸

۲-۲- مقدمه‌ای بر مدلهای رفتاری مرسوم ۹

۲-۲-۱- مدلهای رفتاری الاستیک ۱۰

۲-۲-۱-۱- مدل الاستیک کوشی ۱۲

۲-۲-۱-۲- مدل الاستیک گرین ۱۲

۲-۲-۱-۳- مدلهای شبه‌خطی ۱۲

۲-۲-۱-٤- مدل هذلولی ۱۲

۲-۲-۲- مدلهای رفتاری پلاستیک ۱٤

۲-۲-۲-۱- معیار ترسکا ۱٤

۲-۲-۲-۲- معیار فون-میسز ۱٤

۲-۲-۲-۳- معیار دراکر-پراگر ۱۵

۲-۲-۲-٤- معیار موهر-کولمب ۱۵

۲-۲-۲-۵- مدل خاک با رفتار سخت‌شونده ۲۱

۲-۲-۲-٦- مدل خاک با رفتار نرم‌شونده ۲۸
۲-۲-۲-۷- مدلهای دانشگاه کمبریج ۳۱
۲-۳- مروری بر مطالعات پیشین ٤۲
۲-۳-۱- مدلسازی رفتار تنش-کرنش خاک ماسه‌ای توسط شبکه عصبی مصنوعی ٤۳
۲-۳-۲- مدلسازی منحنی تنش-کرنش آزمایش سه‌محوری زهکشی شده در ماسه‌ها ٤٤
۲-۳-۳- شبیه‌سازی آزمایش سه‌محوری فشاری خاک با استفاده از برنامه اجزا محدود Abaqus ٤٥
۲-۳-٤- مدلسازی عددی رفتار غیر همگن خاکهای بافتی تحت آزمایش سه محوری ٥۱
۲-٤- اثر بافت ریزدانه بر رفتار برشی خاکهای ماسه سیلتی ٥٤
۲-٥- بررسی اثرات شرایط آزمایشگاهی بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاکهای ماسه‌ای ٥٤
۲-٦- پارامترهای موثر بر توزیع تنش-کرنش در نمونه خاک ٥٦
۲-۷- تحلیل توزیع تنش- کرنش در نمونه خاک ٥۸
۲-۷-۱- تحلیل تئوری توزیع تنش در نمونه خاک با استفاده از روش عددی ٥۸
۲-۷-۲- تحلیل تجربی توزیع تنش نمونه خاک در آزمایش سه‌محوری ٥۹
۲-۸- خطاهای محتمل در آزمایش سه‌محوری ٦۱
۲-۸-۱- اثر کلاهکهای فوقانی و تحتانی ٦۱
۲-۸-۲- اثر نفوذ غشاء لاستیکی ٦۲
فصل ۳- شناخت آزمایش سه‌محوری و معرفی مصالح مورد مطالعه ٦٤
۳-۱- مقدمه‌ای بر آزمایش سه‌محوری ٦٥
۳-۲- مسیر تنش در روشهای مختلف آزمایش سه‌محوری ٦۷
۳-۳- معرفی مصالح مورد مطالعه ٦۹
۳-۳-۱- معرفی ماسه سیلیسی شماره ۱٦۱ فیروزکوه ۷۰
۳-۳-۲- معرفی خاک ریزدانه مورد استفاده ۷۰
فصل ٤- مدلسازی عددی آزمایش سه‌محوری ۷۳
٤-۱- مقدمه ۷٤
٤-۲- مدلسازی آزمایش سه‌محوری به وسیلهٔ نرم افزار Abaqus ۷٥

٤-٢-١- معرفی نرم‌افزار ٧٥
٤-٢-١-١- مدل پلاستیسیته حالت بحرانی ٧٦
٤-٢-٢- ارزیابی عملکرد صحیح با نرم‌افزار ٧٩
٤-٢-٣- شرح مدل ٨٣
٤-٣- مدلسازی آزمایش سه‌محوری به وسیلهٔ نرم افزار Plaxis ١٠٢
٤-٣-١- معرفی نرم‌افزار ١٠٢
٤-٣-٢- ارزیابی عملکرد صحیح با نرم‌افزار ١٠٣
٤-٣-٣- شرح مدل ١٠٦
فصل ٥- جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ١٠٩
٥-١- مقدمه ١١٠
٥-٢- نتیجه‌گیری ١١٠
٥-٣- ارائه پیشنهادات ١١٤
فصل ٦- فهرست مراجع ١١٥

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
تنش	σ
نرخ تنش	σ'
کرنش	ε
نرخ کرنش	ε'
تابع تسلیم	F
ضریب پوآسون	ν
مدول یانگ	E
مدول حجمی	K
مدول برشی	G
ماتریس رفتاری	D
تنش تسلیم	σ_y
ثابت دوم تنش انحرافی	J_{2D}
زاویه اصطکاک	φ
چسبندگی	c
زاویه اتساع	ψ
تابع پتانسیل	g
مدول باربرداری	E_{ur}
حجم مخصوص	v
خط حالت بحرانی	CSL
شیب خط حالت بحرانی	M

خط فشردگی همسان	ICL
شاخص فشار	Cc
شاخص تورم	Cs
شاخص خمیری	PI
حد خمیری	PL
حد روانی	LL
گرانش مخصوص	Gs

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱ : پارامترهای پیشنهادی مدل رفتاری کم-کلی برای گروهی از خاکها ٤٠

جدول ۲-۲ : پارامترهای مدل رفتاری کم-کلی برای دو نوع خاک مورد مطالعه در شبیه‌سازی ٤٦

جدول ۲-۳ : پارامترهای پیشنهادی مدل رفتاری ارائه شده برای خاکهای بافتی ۵۳

جدول ۳-۱ : مشخصات فیزیکی ماسه سیلیسی فیروزکوه ۷۰

جدول ۳-۲ : مشخصات فیزیکی رس با پلاستیسیته پائین ۷۱

جدول ۳-۳ : مشخصات فیزیکی رس با پلاستیسیته بالا ۷۱

جدول ٤-۱ : پارامترهای مدل کم-کلی در مدل مرجع ۸۱

جدول ٤-۲ : پارامترهای مدل خاک نرم‌شونده برای خاک رس هانی ۱۰۳

جدول ٤-۳ : مراحل بارگذاری در مدلسازی آزمایش سه‌محوری ۱۰۵

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ : رفتار ماسه‌ها الف) دیاگرام حالت ب) ارتباط تنش-کرنش، فشارآب حفره‌ای ۷

شکل ۲-۲ : نمایش شماتیک دو تعریف از حالت بحرانی در آزمایش زهکشی‌شده ۹

شکل ۲-۳ : شمای کلی از رفتار تنش-کرنش در مصالح ۱۱

شکل ۲-٤ : مدل خطی قطعه‌ای ۱۳

شکل ۲-۵ : تعیین پارامترهای مدل هذلولی ۱۳

شکل ۲-٦ : معیارهای تسلیم ترسکا و فون‌میسز ۱۵

شکل ۲-۷ : شکل سه‌بعدی مدلهای ترسکا، فون‌میسز و موهر-کولمب ۱٦

شکل ۲-۸ : ایدهٔ اصلی در مدل کشسان خطی- خمیری کامل ۱۸

شکل ۲-۹ : سطح تسلیم موهر کولمب در فضای تنشهای اصلی ۱۹

شکل ۲-۱۰ : تعیین E_0 و E_{50} از آزمایش سه‌محوری زهکشی شده ۲۰

شکل ۲-۱۱ : دایره‌های تنش ، تماس با پوش کولمب ۲۱

شکل ۲-۱۲ : رابطهٔ هیپربولیکی تنش کرنش در بارگذاری آزمایش سه‌محوری زهکشی شده ۲٤

شکل ۲-۱۳ : مکان هندسی تسلیم برای مقادیر مختلف پارامتر سخت شدگی ۲۵

شکل ۲-۱٤ : تعیین E_{oed}^{ref} از آزمایش ادئومتر ۲٦

شکل ۲-۱۵ : سطح تسلیم مدل خاک سخت‌شونده در صفحهٔ $p\text{-}\tilde{q}$ ۲۸

شکل ۲-۱٦ : سطوح تسلیم تعریف شده در مدل خاک سخت‌شونده در صفحهٔ تنشهای اصلی ۲۸

شکل ۲-۱۷ : نمایش رابطه لگاریتمی بین کرنش حجمی و تنش میانگین ۲۹

شکل ۲-۱۸ : سطح تسلیم مدل رفتاری خاک نرم‌شونده در صفحهٔ. $p\text{-}\tilde{q}$ ۳۰

شکل ۲-۱۹ : سطوح تسلیم مدل رفتاری خاک نرم‌شونده در فضای تنش اصلی ۳۰

شکل ۲-۲۰ : مدل دانشگاه کمبریج، یک نوع از مدلهای کلاهکی سخت‌شونده با کرنش ۳۱

شکل ۲-۲۱ : شکل سطح تسلیم مدل Cam-Clay اصلاح شده ۳۳
شکل ۲-۲۲ : خط فشردگی همسانگرد و خط باربرداری در صفحه 'v:Lnp ۳۳
شکل ۲-۲۳ : نمایش خطوط ICL و CSL ۳٤
شکل ۲-۲٤ : سطح تسلیمCam-Clay اصلاح شده،خط حالت بحرانی و مسیر تنش زهکشی‌شده ...۳۹
شکل ۲-۲۵ : رفتار سخت شونده با کرنش براساس چهارچوب مکانیک خاک حالت بحرانی ٤۱
شکل ۲-۲٦ : رفتار نرم شونده با کرنش براساس چهارچوب مکانیک خاک حالت بحرانی ٤۱
شکل ۲-۲۷ : مدلسازی آزمایش سه‌محوری (هندسه و بارگذاری) ٤٦
شکل ۲-۲۸ : مقایسه نتایج مدلسازی و آزمایشگاهی در دو حالت زهکشی‌شده و نشده ٤۷
شکل ۲-۲۹ : نتایج مدلسازی آزمایش CD بر خاک عادی‌تحکیم‌یافته ماسه Pueblo ٤۸
شکل ۲-۳۰ : نتایج مدلسازی آزمایش CU بر خاک عادی‌تحکیم‌یافته ماسه Pueblo ٤۸
شکل ۲-۳۱ : نتایج مدلسازی آزمایش CD بر خاک بیش‌تحکیم‌یافته ماسه Pueblo ٤۹
شکل ۲-۳۲ : نتایج مدلسازی آزمایش CU بر خاک بیش‌تحکیم‌یافته ماسه Pueblo ۵۰
شکل ۲-۳۳ : مش‌بندی المان محدود در تحلیل آزمایش سه‌محوری ۵۲
شکل ۲-۳٤ : توزیع تنش موثر محوری در نمونه آزمایش زهکشی‌شده ۵۸
شکل ۲-۳۵ : منحنی تنش-کرنش آزمایش سه‌محوری فشاری زهکشی‌نشده ٦۰
شکل ۲-۳٦ : مسیرتنش آزمایش سه‌محوری فشاری زهکشی‌نشده ٦۰
شکل ۲-۳۷ : پوش موهر-کولمب آزمایش سه‌محوری فشاری زهکشی‌نشده ٦۰
شکل ۲-۳۸ : نمای شماتیک دستگاه اندازه‌گیری کرنش ٦۱
شکل ۲-۳۹ : جزئیات فیلتر کاغذی ٦۲
شکل ۳-۱ : نمایی از آزمایش سه‌محوری بصورت شماتیک و در آزمایشگاه ٦٦
شکل ۳-۲ : مسیر تنش در بارگذاریهای مختلف ٦۷
شکل ۳-۳ : نمایش صفحه رندولیک ٦۸
شکل ۳-٤ : دیاگرام رندولیک برای حالات مختلف بارگذاری ٦۹
شکل ۳-۵ : منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده ۷۱
شکل ۳-٦ : عکس میکروسکوپی انعکاسی از ماسه فیروزکوه (MF:40X-4X,1.45) ۷۲

شکل ٤-١ : سطح تسلیم کم-کلی در صفحه $p\text{-}\tilde{q}$ ۷۸
شکل ٤-٢ : سطوح کم-کلی در صفحه تنش انحرافی ۷۸
شکل ٤-٣ : نمودار رفتار خاک در فضای (e-LnP) ۷۹
شکل ٤-٤ : نمونه المان محدود متقارن ۸۰
شکل ٤-٥ : منحنی تنش-کرنش حاصل از مدلسازی در مدل کنترل صحت‌سنجی ۸۲
شکل ٤-٦ : منحنی تنش-کرنش حاصل از مدلسازی در مرجع ۸۲
شکل ٤-٧ : منحنی فشار آب حفره‌ای-کرنش حاصل از مدلسازی در مدل کنترل صحت‌سنجی ۸۳
شکل ٤-٨ : منحنی فشار آب حفره‌ای-کرنش حاصل از مدلسازی در مرجع ۸۳
شکل ٤-٩ : نمایی از مدل کاربردی، شرایط مرزی و مش‌بندی مدل ۸۵
شکل ٤-١٠ : نتایج مربوط به ترکیبات 1.5-400-H در درصدهای مختلف رس ۸۷
شکل ٤-١١ : نتایج مربوط به ترکیبات 1.5–100–H در درصدهای مختلف رس ۸۸
شکل ٤-١٢ : نتایج مربوط به ترکیبات 1.5-400-L در درصدهای مختلف رس ۹۰
شکل ٤-١٣ : نتایج مربوط به ترکیبات 1.5-100-L در درصدهای مختلف رس ۹۱
شکل ٤-١٤ : نتایج مربوط به ترکیبات 1.45-400-H در درصدهای مختلف رس ۹۳
شکل ٤-١٥ : نتایج مربوط به ترکیبات 1.45-100-H در درصدهای مختلف رس ۹٤
شکل ٤-١٦ : نتایج مربوط به ترکیبات 1.45-400-L در درصدهای مختلف رس ۹٦
شکل ٤-١٧ : نتایج مربوط به ترکیبات 1.45-100-L در درصدهای مختلف رس ۹۷
شکل ٤-١٨ : روند تغییرات پارامتر M با درصد رس ۹۹
شکل ٤-١٩ : برازش خط تغییرات پارامتر M با درصد رس ۹۹
شکل ٤-٢٠ : روند تغییرات پارامتر λ با تغییر خواص خاک ۱۰۰
شکل ٤-٢١ : روند تغییرات پارامتر β با تغییر خواص خاک ۱۰۱
شکل ٤-٢٢ : روند تغییرات پارامتر κ با تغییر خواص خاک ۱۰۲
شکل ٤-٢٣ : نمایی از مدل آزمایش سه‌محوری ۱۰٤
شکل ٤-٢٤ : نتایج تنش انحرافی در برابر کرنش محوری ۱۰۵
شکل ٤-٢٥ : نمودار مسیر تنش ۱۰٦

شکل ٤-٢٦ : نمایی از مدل کاربردی، شرایط مرزی و مش‌بندی مدل ١٠٧
شکل ٤-٢٧ : کانتورهای کرنش برشی ایجاد شده در نمونه مدلسازی شده ١٠٧
شکل ٤-٢٨: منحنی تنش-کرنش حاصل از نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی ١٠٨
شکل ٤-٢٩: منحنی مسیر تنش حاصل از نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی ١٠٨
شکل ٥-١: منحنی‌های تنش-کرنش آزمایش سه‌محوری آزمایشگاهی و مدلسازی شده ١١٠

۱

کلیات

۱–۱– مقدمه

مدل کردن پدیده‌های طبیعی بر اساس یک سری اصول انجام می‌شود که این اصول رفتار ماده را توصیف می‌کنند. در بعضی مواقع دستیابی به یک مدل دقیق غیرممکن است. این نکته بخصوص در مورد خاکها بعنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح در مهندسی عمران صادق می‌باشد. علیرغم پیشرفت شایانی که در تکنیک مدل کردن رفتار خاک حاصل شده است، هنوز هم مشکلاتی در مدلسازی رفتار خاک وجود دارد. یکی از بزرگترین مشکلات، اختلاف در اطلاعات ژئوتنیکی حتی در خاکهای یکنواخت می‌باشد که در نهایت باعث پراکندگی در نتایج می‌شود.

از زمانیکه شناسایی خاک جهت پیدا کردن پارامترهای مقاومتی آن مطرح شد، همواره مسئله ناشناخته بودن خاک و نحوهٔ عملکرد ذرات خاک درحین اعمال فشارهای داخلی و خارجی مورد توجه بوده است. به نظر می‌رسد که جهت پیش‌بینی رفتار خاک، قدمای این رشته در ابتدا سعی کردند یک سری تعاریف و قراردادها را برای دستیابی به زبانی مشترک جهت شناخت و تحقیق بیان کنند. با پیشرفت علم خاک در اثر پیشرفت تکنولوژی و ساخت دستگاهها و ابزار دقیق جهت اندازه‌گیری دقیق این پارامترها، صحت و سقم این تعاریف مورد بررسی و حتی در بعضی موارد مورد اصلاح قرار گرفت یا تعاریف جدیدی به آنها اضافه گردید. لیکن همواره در تفسیر نتایج بدست آمده از آزمایشات، محققین دچار اشکالاتی می‌شدند که با توجه به قراردادهای موجود جوابهای بدست آمده قابل توجیه نبود و این مسأله باعث سردرگمی می‌گردید. بدین منظور گروهی از محققین تصمیم گرفتند مسائل خاکی را بصورت میکروسکوپی مورد مطالعه قرار دهند و چون این کار بسیار سخت و پیچیده‌ای بود، رویکرد کلی به سمت مدلسازی‌های عددی بود که برمبنای تئوری‌های شناخته شده صورت می‌گرفت.

از جمله آزمایشات پیچیده از نظر نحوهٔ انجام و ناشناخته از نظر مسائلی که درون نمونه رخ می‌دهد، آزمایش سه‌محوری خاک می‌باشد. همواره مسائلی از قبیل نوع خاک و شرایط آزمایش تاثیر نامعلومی برروی نحوهٔ گسیختگی خاک مورد مطالعه داشته‌اند. مثلاً برای نمونه‌های سست، بیان شده است که چون نمودار تنش-کرنش دارای نقطه ماکزیمم نیست و رفتار نمونه بصورت سخت‌شونده ادامه می‌یابد، تنش مربوط به یک کرنش خاص باید بعنوان تنش گسیختگی تلقی گردد که بر اساس توصیه‌های مختلف این کرنش بین ۱۰ تا ۲۰ درصد متفاوت است[۱] . حتی اندازه‌گیری خود کرنش در آزمایشات سه‌محوری بصورت کلی انجام می‌گیرد و فرض می‌شود که توزیع کرنش درطول نمونه بصورت یکنواخت صورت می-گیرد. این فرض نیز بصورت عملی کنترل نشده یا بعبارتی روشی برای انجام این کار توصیه نشده است.