بسم الله الرحمن الرحيم
الحمد لله رب العالمين الرحمن الرحيم مالك يوم الدين
اهدنا الصراط المستقيم صراط الذين أنعمت عليهم غير المغضوب عليهم ولا الضالين

دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکزی

دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد "M.Sc"

گرایش: مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی

عنوان:

ارزیابی رفتار الاستیک خاکهای رسی با استفاده از یک قانون رفتاری الاستوپلاستیک اصلاح شده

استاد راهنما:

دکتر عیسی شوش‌پاشا

استاد مشاور:

دکتر لطف‌الله پورفرج

پژوهشگر:

کامبیز قبادی

پاییز ۱۳۹۳

تشکر و قدردانی

به نام خداوندی که هرچه هست در سیطره‌ی وجود اوست و با سپاس از او که مرا یاری نمود تا این مرحله از مراحل دشوار زندگیم را با موفقیت و سربلندی در نوردم و در راه رسیدن به این مرحله بر خود لازم می‌دانم که تمامی کسانی که در راه تحصیل علم و دانش، این حقیر را یاری کرده‌اند تا بتوانم گامی به جلو برداشته و خدمتی هرچند ناچیز به کشورم بنمایم کمال سپاس و تشکر خود را ابراز دارم. در این راه اساتید بزرگوارم خصوصاً جناب آقای دکتر عیسی شوش‌پاشا با راهنمایی‌های مودبّرانه و جناب آقای دکتر لطف‌الله پورفرج با مشورت‌های دلسوزانه‌شان، شاگرد کوچک خود را با بزرگترین محبت در زمینه‌ی اتمام این پایان نامه با خلوص نیت کمک و یاری فرمودند تا تحقق اتمام پایان نامه به سهولت انجام پذیرد و از همین جا کمال تشکر خود را در مقابل زحماتشان ابراز می‌دارم.

امید است خداوند منان به همه‌ی این عزیزان پیروزی و سرافرازی عنایت فرماید و در کلیه‌ی شئون زندگی یاریگرشان باشد.

کامبیز قبادی

پاییز ۱۳۹۳

تقدیم به:

تقدیم به پدرم :

که دستان گرمش، حامی روزهای سختم بود

تقدیم به مادرم :

که لطف بی حدش را لحظه ای از چشمانم دریغ نکرد

تقدیم به برادرم:

که نه تنها برادر، بهترین رفیق بود برایم

تقدیم به خواهرم:

برای همه مهربانی ها و دلسوزی هایش

و تقدیم به همه شمایی که بهترینید

فهرست مطالب

۱.کلیات **۲**

۱-۱- مقدمه ۳

۱-۲- بیان مسئله ۳

۱-۳- اهمیت و ضرورت انجام تحقیق ۴

۱-۴- فرضیه های تحقیق ۵

۱-۵- اهداف پژوهش و اهمیت آن ۶

۱-۶- ساختار پایان نامه ۷

۲. مروری بر تحقیقات انجام شده **۹**

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- پژوهشهای انجام شده درباره رفتار ناهمسان رسها ۱۰

۲-۳- پژوهشهای انجام شده درباره تاثیر ریزبافت بر رفتار رسها ۱۱

۲-۴- پژوهشهای انجام شده درباره آزمایشهای مختلف برای بدست آوردن مدول برشی خاکهای رسی ۱۲

۲-۴-۱- روش Lings و همکاران برای تعیین پارامترهای اصلی مؤثر بر رفتار ناهمسان ارتجاعی در خاکها ۱۳

۲-۵- خلاصه ای از تاریخچه مدلهای رفتاری ارائه شده برای خاکهای چسبنده ۱۷

۲-۶-تعریف ناهمسانی ۱۹

۲-۷- انواع ناهمسانی ۲۰

۲-۸- ناهمسانی بافت خاکها ۲۱

۲-۹- بررسی رفتار مکانیکی ریزبافت رسها ۲۲

۲-۹-۱- انواع ریزبافت در رسها ۲۳

۲-۹-۲- بررسی رفتار مکانیکی ریزبافت نمونه رسی کائولین ۲۴

۲-۹-۳- اثر ریزبافت در آزمایش تحکیم بر روی رسها ۲۵

۲-۹-۴- اثر ریزبافت بر روی رفتار رسها در آزمایشهای سه محوری ۲۷

۲-۹-۵- آزمایشهای سه محوری زهکشی نشده ۲۷

۲-۹-۶- رفتارحجمی در آزمایشهای سه محوری زهکشی شده ۳۳

۲-۱۰- تسلیم رس از دید میکرومکانیکی ۳۴

۲-۱۰-۱- ریزساختار خاکهای چسبنده ۳۵

۲-۱۰-۲- ریزساختار خاکهای رسی در اثر تراکم ناهمسان ۳۶
۲-۱۰-۳- تسلیم رسها با در نظر گرفتن ریزساختار آنها ۳۶
۲-۱۰-۴- معیار تسلیم در خاکهای رسی ۳۹
۲-۱۰-۵- مقایسه تسلیم پیشبینی شده با معیار تسلیم بالا و نتایج تجربی ۴۰
۲-۱۱- چارچوب کلی رفتار مکانیکی رسها ۴۱
۲-۱۱-۱- شکل سطح تسلیم ناخالص ۴۲
۲-۱۲- ناهمسانی خاکهای رسی طبیعی ۴۲
۲-۱۲-۲- ناهمسانی رفتار ارتجاعی (کشسانی) ۴۴
۲-۱۳- اساس و بنیان رفتار الاستیک (ارتجاعی) در خاکها ۴۴
۲-۱۴- بررسی ناهمسانی جانبی رفتار رسها از دید ماکروسکوپیک ۴۷
۲-۱۴-۲- روش آزمایشگاهی المانهای خم شونده (BE) برای تعیین مدول برشی خاکها ... ۴۹
۲-۱۴-۳- نتایج آزمایشهای BE بر روی یک نمونه خاک رسی خاص ۵۲
۲-۱۵-خلاصه فصل ۵۶

۳. مدل سازی وفرمول بندی مدل رفتاری **۵۷**

۳-۱- مقدمه ۵۸
۳-۲-معادلات مدل رفتاری مورد بررسی دراین تحقیق (MCC) ۵۹
۳-۲-۱- فرمول بندی عمومی یک مدل رفتاری ۵۹
۳-۲-۲- تابع تسلیم ۶۲
۳-۲-۳- قانون جریان ۶۲
۳-۳- معرفی مدل رفتاری Modified Cam-Clay (MCC) ۶۴
۳-۴- نظریه ارتجاعی کاهش یافته برای خاکهای چسبنده ۶۶
۳-۵- نظریه بیش ارتجاعی برای خاکهای چسبنده ۶۷
۳-۵-۱- فرمول بندی عمومی نظریه های بیش ارتجاعی ۶۸
۳-۵-۲- تعمیم شاخص بارگذاری در مدل MCC ۶۹
۳-۶- نظریه بیش ارتجاعی Borja و همکاران ۷۰
۳-۷- ارزیابی رفتار ارتجاعی خاک توسط نظریه های ارتجاعی مختلف در چرخه تنش حلقه بسته ۷۲
۳-۸- اصلاح فرمول بندی مدل رفتاری MCC براساس نظریه بیش ارتجاعی ۷۵
۳-۸-۱- اصلاح مدل MCC براساس نظریه بیش ارتجاعی Borja و همکاران ۷۵
۳-۹- روش شناسی و نحوه اعتبارسنجی نتایج تحقیق ۷۷
۳-۱۰- روند مدلسازی با استفاده از نرم افزار MATLAB ۸۰

۳-۱۰-۱- کالیبراسیون پارامترهای ثابت مدل رفتاری MCC..... ۸۱

۴. آنالیز مدل و نتایج **۸۵**

۴-۱- ارزیابی کارآیی قانون رفتاری MCC با نظریه ارتجاعی کاهش یافته..... ۸۶

۴-۱-۱- ارزیابی رفتار نمونه های خاک رسی LCT در شرایط زهکشی نشده و پیش بینی رفتار آنها با استفاده از قانون رفتاری MCC..... ۸۷

۴-۱-۲- ارزیابی رفتار نمونه های خاک رسی LCT در شرایط زهکشی شده و پیش بینی رفتار آنها با استفاده از قانون رفتاری MCC..... ۹۲

۴-۲- ارزیابی تاثیر کاربرد نظریه بیش ارتجاعی بر بهبود پیش بینی نگارش مدل MCC..... ۹۶

۴-۲-۱- ارزیابی رفتار نمونه های خاک رسی در شرایط زهکشی نشده و پیش بینی رفتار آنها با استفاده از مدل توسعه یافته MCC..... ۹۶

۴-۲-۲- ارزیابی رفتار نمونه های خاک رسی LCT در شرایط زهکشی شده و پیش بینی رفتار آنها با استفاده از مدل توسعه یافته MCC..... ۱۰۱

۴-۳- مقایسه پیش بینی رفتار خاکهای رسی مختلف با استفاده از مدل اصلی MCC و مدل توسعه یافته..... ۱۰۵

۵. نتایج و پیشنهادات **۱۱۰**

۵-۱- مقدمه..... ۱۱۱

۵-۲- خلاصه و جمع بندی..... ۱۱۱

۵-۳- نتایج..... ۱۱۲

۵-۴- پیشنهادها..... ۱۱۳

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱ خواص فیزیکی نمونه های رسی بدست آمده از اعماق ۷/۵ تا ۱۵/۵ متری..... ۵۰
جدول ۳-۱ پارامترهای ثابت مورد نیاز در شبیه سازی رفتار نمونه های خاک رسی LCT باستفاده از قانون رفتاری MCC براساس نتایج تست های سه محوری و تحکیم.....۸۴
جدول ۴-۱ پارامترهای ثابت به کار رفته در کلیه شبیه سازی ها برای خاک های رسی مختلف۱۰۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱ مسیر تنش در آزمایش Lings و همکاران برای تعیین پارامترهای مستقل ناهمسانی جانبی خاکها ۱۵
شکل ۲-۲ منحنی تنش- کرنش قائم نرمال شده در σ'_h ثابت ۱۶
شکل ۲-۳ منحنی تنش- کرنش قائم نرمال شده در σ'_v ثابت ۱۶
شکل ۲-۴ انواع ریزبافت رسها (الف) فولکوله؛ (ب) پراکنده ۲۳
شکل ۲-۵ عکسهای SEM نمونه های رسی تحکیم یافته با دو ریزبافت (الف) پراکنده (ب) فولکوله ۲۵
شکل ۲-۶ رفتار تحکیمی رس کائولین برای دو ریزبافت فولکوله و پراکنده (الف) تاریخچه تحکیم- زمان در حین تحکیم همسان در فشار 276 kPa؛ (ب) رابطه تنش- نسبت تخلخل در حین آزمایش تحکیم یک بعدی ۲۶
شکل ۲-۷ رفتاراضافه فشار حفرهای نرمال شده برای آزمایش های سه محوری روی رسNC... ۲۸
شکل ۲-۸ رفتار اضافه فشار حفرهای نرمال شده برای آزمایش های زهکشی نشده روی رس HOC ۲۹
شکل ۲-۹ رفتار تنش- کرنش نرمال شده برای آزمایش های زهکشی نشده روی رس NC..... ۳۰
شکل ۲-۱۰ رفتار تنش- کرنش نرمال شده برای آزمایش های زهکشی نشده روی رسHOC .. ۳۱
شکل ۲-۱۱ مسیرهای تنش مؤثر نرمال شده برای آزمایش های زهکشی نشده در مود فشاری ۳۲
شکل ۲-۱۲ مسیرهای تنش مؤثر نرمال شده برای آزمایش های زهکشی نشده در مود توسعه جانبی ۳۳
شکل ۲-۱۳ کرنش حجمی برای آزمایش های زهکشی شده روی رس NC و HOC..... ۳۴
شکل ۲-۱۴ ریزساختار محتمل در خاکها (Nagaraj و همکاران)..... ۳۵
شکل ۲-۱۵ ریزساختار رس ها (الف) ساختار حفرهای بیضوی محتمل در شرایط ناهمسان (ب) تعادل نیروهای تماسی داخلی با تنش (ج) تعادل نیروهای تماسی (د) نقاط تماس و صفحه تماس با دایره مرجع ۳۷
شکل ۲-۱۶ مقایسه مقادیر تجربی و تحلیلی تسلیم برای رسهای مختلف..... ۴۰
شکل ۲-۱۷ داده های آزمایش مسیر تنش برای رس بازسازی شده (Pickles)..... ۴۳

شکل ۲-۱۸ تسلیم رس های بازسازی شده، CSL: خط حالت بحرانی؛ NCL: خط تحکیم نرمال؛ URL: خط باربرداری- بارگذاری مجدد..... ۴۶
شکل ۲-۱۹ تغییر سختی خاک ها با کرنش..... ۴۸
شکل ۲-۲۰ (a) شرایط متداول تنش در آزمایش خاک؛ (b) دو مسیر مختلف انتشار موج برشی در جهات قائم و (c) دو مسیر مختلف انتشار موج برشی در جهات افقی (.WPD: جهت انتشار و .PMD: جهت حرکت ذره)..... ۵۱
شکل ۲-۲۱ مسیرهای تنش انحرافی (q) و مدول های برشی (G^{e}_{vh}) در مقابل تنش مؤثر میانگین (p') در تحکیم همسان و برش زهکشی نشده..... ۵۳
شکل ۲-۲۲ مسیرهای تنش انحرافی (q) و مدول های برشی (G^{e}_{vh}) در مقابل تنش مؤثر میانگین (p') در تحکیم ناهمسان ($K_0=0.6$)..... ۵۳
شکل ۲-۲۳ مسیرهای تنش انحرافی (q) و مدول های برشی (G^{e}_{vh}) در مقابل تنش مؤثر میانگین (p') در تحکیم ناهمسان ($K_0=0.3$)..... ۵۴
شکل ۲-۲۴ خلاصه نتایج $G^{e}_{vh}/f(e)$ در مقابل p' بدست آمده از آزمایش های سه محوری و ادئومتر..... ۵۴
شکل ۲-۲۵ تاثیر ناهمسانی ساختاری رس روی مدول های برشی ارتجاعی..... ۵۵
شکل ۳-۱ تابع تسلیم در مدل MCC..... ۶۵
شکل ۳-۲ مسیر تنش حلقه بسته مورد بررسی در فضای تنش های سه محوری..... ۷۲
شکل ۳-۳ پیش بینی منحنی های تنش- کرنش کشسان برای مسیرتنش حلقه بسته توسط مدل کشسانی کاهش یافته؛(a) فضای ε_v-p؛(b) فضای ε_q-p؛(c) فضای ε_v-q؛(d) فضای ε_q-q..... ۷۳
شکل ۳-۴ پیش بینی منحنی های تنش- کرنش ارتجاعی برای مسیر تنش حلقه بسته توسط مدل بیش کشسانی Borja و همکاران؛ (a) فضای ε_v-p؛ (b) فضای ε_q-p؛ (c) فضای ε_v-q؛ (d) فضای ε_q-q..... ۷۴
شکل ۳-۵ تعیین پارامترهای ثابت C_r و C_c..... ۸۲
شکل ۳-۶ تعیین پارامترهای ثابت M_c و M_e..... ۸۳
شکل ۳-۷ روش تعیین نسبت پواسون (ν)..... ۸۳
شکل ۴-۱ مقایسه رفتار شبیه سازی شده توسط مدل MCC با رفتار اندازه گیری شده آزمایشگاهی نمونه های رس LCT در تحکیم K_0 در مودهای فشاری و توسعه جانبی بارگذاری سه محوری زهکشی نشده..... ۹۰

شکل ۴-۲ مقایسه رفتار شبیه سازی شده توسط مدل MCC با رفتار اندازه گیری شده آزمایشگاهی نمونه های رس LCT در تحکیم همسان در مودهای فشاری و کششی بارگذاری سه محوری زهکشی نشده..... ۹۱
شکل ۴-۳ مقایسه رفتار پیش بینی شده توسط مدل MCC با رفتار اندازه گیری شده نمونه های رس LCT در تحکیم K_0 در مود فشاری بارگذاری سه محوری زهکشی شده ۹۴
شکل ۴-۴ مقایسه رفتار شبیه سازی شده توسط مدل MCC با رفتار اندازه گیری شده آزمایشگاهی نمونه های رس LCT در تحکیم همسان در مود فشاری بارگذاری سه محوری زهکشی شده..... ۹۵
شکل ۴-۵ مقایسه رفتار پیش بینی شده توسط نگارش توسعه یافته مدل MCC براساس نظریه بیش ارتجاعی Borja با رفتار اندازه گیری شده نمونه های رسی LCT در تحکیم K_0 در مودهای فشاری و توسعه جانبی بارگذاری سه محوری زهکشی نشده..... ۹۹
شکل ۴-۶ مقایسه رفتار پیش بینی شده توسط نگارش توسعه یافته مدل MCC براساس نظریه بیش ارتجاعی Borja با رفتار اندازه گیری شده نمونه های رس LCT در تحکیم همسان در مودهای فشاری و توسعه جانبی بارگذاری سه محوری زهکشی نشده..... ۱۰۰
شکل ۴-۷ مقایسه رفتار پیش بینی شده توسط نگارش توسعه یافته مدل MCC براساس نظریه بیش کشسانی Borja با رفتار واقعی نمونه های رس LCT در تحکیم K_0 در مود فشاری بارگذاری سه محوری زهکشی شده..... ۱۰۳
شکل ۴-۸ مقایسه رفتار پیش بینی شده توسط نگارش توسعه یافته مدل MCC براساس نظریه بیش کشسانی Borja با رفتار واقعی نمونه های رس LCT در تحکیم همسان در مود فشاری بارگذاری سه محوری زهکشی شده ۱۰۴
شکل ۴-۹ مقایسه رفتار پیش بینی شده توسط نگارش اصلی مدل MCC و نگارش توسعه یافته براساس نظریه بیش ارتجاعی Borja با رفتار واقعی نمونه های رسی LC در تحکیم K_0 در مودهای فشاری و توسعه جانبی بارگذاری سه محوری زهکشی نشده ۱۰۷
شکل ۴-۱۰ مقایسه رفتار پیش بینی شده توسط نگارش اصلی مدل MCC و نگارش توسعه یافته براساس نظریه بیش ارتجاعی Borja با رفتار اندازه گیری شده نمونه های رس LC در تحکیم همسان در مود فشاری بارگذاری سه محوری زهکشی نشده ۱۰۸
شکل ۴-۱۱ مقایسه رفتار پیش بینی شده توسط نگارش اصلی مدل MCC و نگارش توسعه یافته براساس نظریه بیش ارتجاعی Borja با رفتار اندازه گیری شده نمونه های رس KC تحت تحکیم همسان در مودهای فشاری و کششی بارگذاری سه محوری زهکشی نشده..... ۱۰۹

چکیده

تاکنون مدلهای رفتاری زیادی برای پیش‌بینی رفتار واقعی خاکها شناسایی شده و روز به روز بر گستردگی آنها افزوده می‌شود. اما اکثر مدلهای موجود قادر نیستند رفتار دقیق خاکها (ماسه‌ای و یا رسی) را در مقادیر نسبت بیش تحکیمی زیاد، با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نمایند. دلیل این امر را می‌توان در اثر لحاظ نکردن رفتار ناهمسان خاکها در این مدلها جستجو کرد. علاوه بر این برای سادگی در محاسبات و فرمولبندی ساده، در تمام مدلهای موجود، از نظریه‌های ارتجاعی یا الاستیک کاهیده یا کاهش یافته (Hypo-elasticity) برای شبیه‌سازی رفتار خاکها استفاده شده است. حال بنظر می‌رسد که می‌توان با استفاده از مدلهای رفتاری بیش ارتجاعی که از قوانین ترمودینامیکی نیز پیروی می‌نمایند، برای تخمین قسمت ارتجاعی رفتار تاحدود زیادی به نتایج بهتری دست یافت. در این تحقیق، این موضوع بر روی یکی از مدلهای معروف پیش‌بینی رفتار خاکهای رسی یعنی مدل رفتاری Modified Cam-Clay که به اختصار MCC نامیده می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. قابل ذکر است که این مدل کاربرد گسترده‌ای در پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش خاکها داشته و در اکثر نرم-افزارهای تجاری موجود در مسائل ظرفیت باربری پی‌ها و مسائلی از این دست مورد استفاده قرار می‌گیرد. از اینرو بنظر می‌رسد که با بررسی این موضوع در پیش‌بینی رفتار خاکهای چسبنده و اصلاحات صورت گرفته در مدل توسعه یافته، در مقایسه با نتایج آزمایشهای سه محوری (داده های آزمایشگاهی) بتوان به نتایج مفیدی دست یافت که از جمله آنها می‌توان به کاهش تنش‌های پیش‌بینی شده توسط مدل مرجع اشاره نمود.

کلیدواژه‌ها: ناهمسانی، رفتار الاستیک، خاک رس، قانون رفتاری، نظریه الاستوپلاستیک.

فصل اول

کلیات

۱-۱-مقدمه

علم مکانیک خاک متفاوت از مکانیک سیالات و مکانیک اجسام صلب است؛ چرا که خاک محیطی است ناهمگن[1]، ناهمسان[2] با رفتار غیرخطی[3] و متشکل از سیالات (معمولاً هوا و آب) و ذرات گوناگون (معمولاً رس، ماسه یا شن) که رفتار آن برخلاف رفتار متداول سایر مصالح است. به عبارت دیگر، خاک پیچیده‌ترین و بغرنج‌ترین رفتار ممکن در بین مصالح را دارا می‌باشد؛ از اینرو شناخت کامل خاک و پیچیدگی‌های رفتاری آن مخصوصاً وقتی که تحت تأثیر تنش‌های مختلف قرار می‌گیرد و رفتاری ناهمسان از خود نشان می‌دهد، از مهمترین مسائل در علم مکانیک خاک محسوب می‌شود.

۱-۲-بیان مسئله

در بسیاری از پروژه‌های عمرانی، پی ساختمانها بر روی خاکهای رسی ساخته می‌شود. با توجه به اهمیت کاربرد مدلهای رفتاری در پیش بینی رفتار خاکها، یافتن نقاط ضعف مدلهای موجود و ارائه راهکارهای مناسب برای بهبود و همچنین توسعه مدلهای رفتاری نوین در پیش‌بینی رفتار، همواره از مسائل پر اهمیت مکانیک خاک بوده است. در میان مدلهای رفتاری موجود برای پیش‌بینی رفتار خاکهای چسبنده، مدل رفتاری(Modified Cam-Clay) MCC که نخستین نگارش توسعه یافته از مدل رفتاری Cam-Clay می‌باشد، به دلیل ارائه پیش‌بینی‌های نسبتاً قابل قبول در مقابل سادگی غیرقابل رقابت فرمولبندی، مقبولیت گسترده‌ای را کسب نموده است[۱]. این مدل رفتاری که در چهارچوب نظریه ارتجاعی- خمیری پیشنهاد شده است، به طور گسترده در بسیاری از نرم‌افزارهای تحلیلی تجاری و به منظور طراحی سازه‌های خاکی بنا شده روی خاکهای رسی، بکار رفته است. با این وجود، این مدل رفتاری در سطوح کرنشهای کوچک، مقاومت برشی رسهای با نسبت بیش تحکیم یافتگی زیاد را دست بالا برآورد می‌کند و رفتار پیش بینی شده توسط آن برای نمونه‌های خاک با تحکیم غیرهمسان تفاوت قابل ملاحظه‌ای با رفتار واقعی دارد[۲].

[1] Non-homogeneous

[2] Anisotropic

[3] Non-linear

زمانی که وضعیت تنش درون تابع تسلیم قرار داشته باشد، رفتار خاک ارتجاعی خواهد بود. به طور کلی نظریه های مختلفی شامل نظریه‌های ارتجاعی کاهیده (Hypo-elasticity) و نظریه‌های بیش ارتجاعی (Hyper-elasticity) برای توصیف رفتار ارتجاعی خاکها پیشنهاد شده‌اند. در نظریه ارتجاعی کاهیده برخلاف نظریه بیش ارتجاعی هیچ تضمینی برای رعایت قانون پایستگی انرژی فراهم نمی-گردد[۳].

با این وجود، با توجه به سادگی و نیاز به پارامترهای کمتر، در اکثر مدلهای رفتاری موجود برای پیش‌بینی رفتار خاکهای چسبنده، بخش ارتجاعی رفتار توسط یک نظریه ارتجاعی کاهیده (Hypo-elasticity) شبیه‌سازی می‌شود. لذا کاربرد مدلهای ارتجاعی کاهیده و عدم پایستاری انرژی مربوط به آنها می‌تواند موجب بروز نتایج غیرمحافظه کارانه و طراحی غیرایمن سازه های خاکی گردد.

از اینرو یافتن راه حلی برای برای کاربرد نظریه‌های بیش ارتجاعی به جای نظریه ارتجاعی کاهیده در مدلهای رفتاری موجود می‌تواند تاثیر بسزایی در افزایش دقت مدلها داشته باشد. لازم به ذکر است که به عنوان یک حسن جالب توجه، کاربرد نظریه بیش ارتجاعی برای خاکهای چسبنده می تواند پدید آمدن ناهمسانی را پیش بینی نماید[٤]. علاوه بر این در عمل، شواهد تجربی متعددی نیز مؤید ناهمسانی رفتار ارتجاعی خاکهای چسبنده می‌باشد.

۱-۳-اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

با گسترش صنعت ساختمان و تقاضای طراحی و ساخت سازه‌ها بر روی خاک‌ها، نیاز به دقت نظر در طراحی پی‌ها، روز به روز در حال افزایش است. در چنین شرایطی ساختمان و سازه بایستی در ارتباط مستقیم با خاکی باشد که بر روی آن قرار می‌گیرد و بار کلیه‌ی اجزای این سازه‌ها توسط سازه‌های خاکی مختلف (شالوده‌ها) به خاک منتقل گردد. بنابراین شناخت دقیق رفتار خاک، یکی از جنبه‌های دارای اهمیت در مسائل طراحی پی‌ها، پایداری شیروانی‌ها و ... به شمار می‌رود.

با توجه به کمی و کاستی‌های موجود برای بیان دقیق رفتار خاک در علم مکانیک خاک قدیمی، شاخه‌ی جدیدی از مکانیک تحت عنوان مکانیک خاک حالت بحرانی[1] (CSSM) پا به عرصه گذاشت و امروزه به طور گسترده برای پیش‌بینی رفتار واقعی خاک‌ها در طراحی‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد[۵]. مفهوم حالت بحرانی به این معنی است که در آن، به ازای تنش‌های ثابت و نرخ کرنش‌های حجمی صفر، تغییر شکل‌های برشی به صورت مستمر ادامه می‌یابند، تا زمانی که هم نسبت تنش و هم نسبت تخلخل نمونه به مقدار بحرانی آن برسد. مکانیک خاک حالت بحرانی، با

[1] Critical State Soil Mechanics

ارائه‌ی پایه‌ای نظری و با بهره‌گیری از دیگر مفاهیم عمومی تئوری‌های رفتاری مانند نظریه‌ی ارتجاعی – خمیری[1]، برای به وجود آوردن مدل‌های رفتاری در توصیف رفتار تنش- کرنش خاک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. براساس ارزیابی‌های انجام گرفته روی مدل‌های خمیری مبتنی بر CSSM، در حالت کلی این مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار تنش- کرنش خاک‌های رسی عادی تحکیم یافته موفق بوده-اند؛ اما در توصیف خصوصیات رفتاری خاک‌های بیش تحکیم یافته کاملاً موفق نبوده‌اند. البته این نارسایی در پیش‌بینی رفتار بیشتر به کاستی نظریه‌های کلاسیک سخت‌شوندگی همسان[2] ارتباط داشت. به مرور زمان برای رفع این نقیصه و شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار رس‌ها، قوانین رفتاری جدیدی همچون مدل MCC ارائه شد .اگرچه با معرفی این قانون رفتاری، نقایص قوانین و مدل‌های قبلی تا حدودی مرتفع شد، اما کماکان، تخمین بیش از حد مقاومت برشی پیش‌بینی شده‌ی رس‌ها توسط این قانون رفتاری نیز در مقایسه با رفتار واقعی می‌تواند منجربه طراحی غیرایمن سازه‌های خاکی گردد[٦].از اینرو نگارش توسعه یافته‌ای که در این تحقیق معرفی می‌گردد، با هدف رفع ایرادات گفته شده مدل‌های قبلی پیشنهاد شده است.

۱-۴-فرضیه های تحقیق

به طور کلی فرضیات بکار رفته در این تحقیق برای دستیابی به نتایج مورد انتظار را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- ✓ با کاربرد نظریه الاستوپلاستیک جدید به جای نظریه الاستیک قدیمی در قانون رفتاری MCC می‌توان رفتار تنش- کرنش خاک را بهتر تخمین زد.
- ✓ با استفاده از نظریه الاستوپلاستیک جدید، اثر ناهمسانی در رفتار واقعی خاکهای رسی لحاظ می‌گردد.
- ✓ هرچند که با کاربرد نظریه‌های الاستوپلاستیک جدید، روابط کمی پیچیده می‌گردد، اما می-توان به نتایج دقیق‌تری در پیش‌بینی رفتار خاکهای رسی دست یافت.

۱-۵-اهداف پژوهش و اهمیت آن

برخلاف خاکهای دانه‌ای، دامنه رفتار ارتجاعی (تابع تسلیم) در خاکهای چسبنده بزرگ می‌باشد. تا زمانی که وضعیت تنش درون تابع تسلیم قرار داشته باشد، رفتار خاک ارتجاعی خواهد بود.

[1] Elastoplastic Theory

[2] Isotropic Hardening

نظریه‌های مختلفی برای توصیف رفتار ارتجاعی خاکها پیشنهاد شده‌اند که از یک دیدگاه کلی، در دو دسته عمده قرار می‌گیرند:

- مدل‌های ارتجاعی کاهش یافته[1]
- مدل‌های بیش ارتجاعی[2].

در نظریه‌ی ارتجاعی کاهش یافته، نرخ تغییرات تنش به صورت تابعی از مولفه‌های کنونی میدان تنش و نمو کرنش بیان می‌شوند. به عبارت دیگر، در این نظریه سختی‌های مماسی ارتجاعی به وضعیت کنونی میدان تنش و راستای بارگذاری وابسته می‌باشند. در مدل‌های ارتجاعی کاهیده هیچ تضمینی برای رعایت قانون پایستگی انرژی فراهم نمی‌گردد و در این نظریه‌ها معمولاً با از دست رفتن و یا پدید آمدن بی‌دلیل انرژی رو به رو خواهیم بود[۷]. در مقابل، در مدل‌های بیش ارتجاعی روابط میان مولفه‌های میدان تنش و کرنش با مشتق‌گیری مستقیم از توابع انرژی بدست می‌آیند و در نتیجه با کاربرد این روش، پایستگی انرژی در کلیه مسیرهای تنش تضمین می‌گردد[۸]. در این پژوهش سعی شده است تا پس از پیش‌بینی رفتار واقعی خاکهای رسی مختلف براساس نتایج و داده-های آزمایشگاهی با استفاده از مدل رفتاری MCC، به بیان نقاط ضعف و قوت این مدل پرداخته و سپس راهکاری برای اصلاح این مدل جهت ارائه نتایج بهتر پیشنهاد گردد.

همانطور که قبلاً نیز گفته شد، کاربرد نظریه بیش‌ارتجاعی برای خاک‌های چسبنده می‌تواند پدید آمدن ناهمسانی تحمیلی ناشی از اعمال تنش برشی را پیش‌بینی نماید. به دلیل ناهمسانی تحمیلی، نمو هر یک از کرنش‌های ارتجاعی برشی و حجمی به هر دو مؤلفه نرخ تنش‌های برشی و همه‌جانبه وابسته شده و گونه‌ای همبستگی یا جفت‌شدگی[3] برشی- حجمی در رفتار خاک ایجاد می‌گردد[۹]. علاوه بر این در عمل، شواهد تجربی متعددی نیز مؤید ناهمسانی رفتار ارتجاعی خاک‌های چسبنده می‌باشد.

با توجه به سادگی و نیاز به پارامترهای کمتر، در اکثر مدل‌های رفتاری موجود برای پیش‌بینی رفتار خاکهای چسبنده، بخش کشسانی یا ارتجاعی رفتار توسط یک نظریه‌ی ارتجاعی کاهیده شبیه-سازی می‌شود. اما همانگونه که پیش از این نیز اشاره شد، در این مدل‌ها قانون پایستگی انرژی رعایت نشده و قوانین ترمودینامیکی نقض می‌گردد.بعلاوه کاربرد مدل‌های ارتجاعی کاهش یافته یا کاهیده و عدم پایستاری انرژی مربوط به آن‌ها در قالب تحلیل‌های عددی می‌تواند موجب نتایج

[1] Hypoelasticity
[2] Hyperelasticity
[3] Coupling

غیرمحافظه کارانه و طراحی غیرایمن سازه‌های خاکی گردد[۱۰].از اینرو، به منظور تخمین دقیق‌تر پیش‌بینی‌های ارائه شده توسط مدل‌های رفتاری مختلف، بررسی اثر ناهمسانی ارتجاعی و ارزیابی تاثیر کاربرد نظریه‌های بیش ارتجاعی بر روی رفتار خاک‌های چسبنده ضروی به نظر می‌رسد.

به طور کلی در انجام این پایان‌نامه اهداف زیر دنبال شده است:

- ❖ شبیه‌سازی رفتار خاکهای رسی با استفاده از قانون رفتاری MCC و مقایسه آن با نتایج و داده‌های واقعی آزمایشگاهی با مطالعه.
- ❖ بیان نقاط ضعف استفاده از نظریه الاستیک کاهیده برای پیش‌بینی رفتار خاک در قانون رفتاری MCC.
- ❖ کاربرد نظریه الاستیک افزوده در مدل رفتاری مورد بحث و لحاظ نمودن اثر ناهمسانی در شبیه‌سازی‌ها مطابق با رفتار واقعی خاک.
- ❖ اصلاح قانون رفتاری MCC برای پیش‌بینی دقیق رفتار خاکهای رسی با تغییر بخش الاستیک و مقایسه آن با داده های آزمایشگاهی موجود در نمونه‌های خاک رسی Lower Corner Till (LCT)

۱-۶-ساختار پایان نامه

با توجه به اهمیت بررسی رفتار رس‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف، در این تحقیق، ابتدا یکی از مدل‌های رفتاری ارائه شده برای پیش‌بینی رفتار اینگونه از خاکها به طور کامل معرفی شده، فرمولبندی مورد بررسی قرار گرفته و نقاط ضعف و قوت آن مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. سپس با هدف بررسی اثر ناهمسانی در رفتار خاک‌های چسبنده، با انتخاب این مدل پیشرفته به عنوان مدل پایه و برای بررسی تاثیر به کارگیری نظریه بیش ارتجاعی در کارآیی این مدل، به گونه‌ای به اصلاح این مدل رفتاری پرداخته شده است که بتواند رفتار خاکهای رسی را با دقت بیشتری در مقابل داده‌ها و نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی نماید.

از اینرو همان‌گونه که در بخش‌های قبل گفته شد، فصل **اول** این پایان‌نامه شامل مطالعه‌ی پیش-زمینه، اهداف و ضرورت انجام این تحقیق است.

در فصل **دوم**، ابتدا تحقیقات انجام شده در زمینه رفتار ناهمسان خاک‌های رسی و همچنین مدلهای رفتاری موجود برای پیش‌بینی رفتار تنش – کرنش خاکهای رسی مورد بررسی قرار گرفته

است. سپس به بیان تعریف ناهمسانی و اثر این ناهمسانی بر روی رفتارخاک های چسبنده پرداخته شده است.

در **فصل سوم**، ابتدا ضمن معرفی کامل مدل رفتاری MCC، به ارزیابی و فرمولبندی این مدل و همچنین بیان نقاط ضعف و قوت آن پرداخته شده است. در ادامه با بررسی فرمولبندی نظریه‌های بیش ارتجاعی، یکی از جدیدترین این نظریه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و به اصلاح فرمولاسیون مدل اصلی MCC پرداخته شده است. درنهایت در پایان این فصل نحوه مدلسازی و اعتبارسنجی و همچنین شیوه مدلسازی در نرم افزار توضح داده شده است.

در **فصل چهارم** این پایان‌نامه، برای مقایسه مدل رفتاری MCC اولیه و توسعه یافته براساس نظریه بیش ارتجاعی، در شبیه‌سازی رفتار رس‌ها، به آنالیز مدلها و تحلیل نتایج پرداخته شده است. به همین منظور، از داده‌های حاصل از آزمایشهای سه محوری بر روی نمونه‌های عادی تحکیم یافته و بیش تحکیم یافته و همچنین نمونه‌های با تحکیم همسان و ناهمسان در مودهای فشاری و گسترش جانبی (کششی) استفاده شده است. بر این اساس کاستی‌ها و نقاط ضعف مدل اولیه و همچنین نتایج بدست آمده از مدل توسعه یافته ارائه گردیده است.

در فصل **پنجم** نیز به جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات لازم برای روند آتی این پایان‌نامه پرداخته شده است.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات
انجام شده