بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی
گروه مهندسی عمران

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران-گرایش مکانیک خاک و مهندسی پی

عنوان:

مطالعه رفتار تنش-تغییر شکل خاک‌های ماسه‌ای لای‌دار غیراشباع با نگرش ویژه بر کاربرد مفهوم حالت بحرانی

استاد راهنما:
دکتر محمد ملکی

نگارش:
مجید شاهی کاریجانی

۲۵ بهمن ۱۳۹۰

تقدیم به مادر و پدرم

کلیه امتیازهای این پایان‌نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب این پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها، باید نام دانشگاه بوعلی سینا یا استاد راهنمای پایان‌نامه و نام دانشجو با ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت. درج آدرس‌های ذیل در کلیه مقالات خارجی و داخلی مستخرج از تمام یا بخشی از مطالب این پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها الزامی می‌باشد.

مقالات خارجی

……..……, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

مقالات داخلی

.....، گروه .....، دانشکده .....، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

تقدیر و تشکر

ابتدا پروردگار را شاکرم که همیشه در مراحل زندگی و تحصیل مورد الطاف بی‌پایان او قرار داشته و دارم. از خانواده‌ام خصوصاً پدر و مادر مهربانم کمال قدردانی را دارم که همیشه پشتیبان من بوده و امکان پیشرفت علمی من را فراهم نموده‌اند.

از استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر محمد ملکی که با کمک، نظارت و پشتیبانی‌های بی‌دریغ خود در طول تدوین پایان‌نامه، منجر به اتمام احسن آن شدند نهایت تشکر را دارم. همچنین از اساتید داور آقایان دکتر مسعود مکارچیان و دکتر علیرضا باقریه که زحمت داوری این پایان‌نامه را کشیدند، سپاس‌گذارم.

از همه دوستانی که در این دوره یار و یاور من بودند و در اجرای بهتر این پایان‌نامه مرا قادر ساختند، متشکرم.

دانشگاه بوعلی سینا

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی

عنوان:

مطالعه رفتار تنش-تغییر شکل خاک‌های ماسه‌ای لای‌دار غیراشباع با نگرش ویژه بر کاربرد مفهوم حالت بحرانی

نام نویسنده: مجید شاهی کاریجانی

نام استادراهنما: دکتر محمد ملکی

نام استاد مشاور:-

دانشکده: مهندسی	**گروه آموزشی: عمران**	
رشته تحصیلی: عمران	**گرایش تحصیلی: مکانیک خاک و مهندسی پی**	**مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد**
تاریخ تصویب: ۱۳۸۹/۰۹/۱۵	**تاریخ دفاع: ۱۳۹۰/۱۱/۲۵**	**تعداد صفحات: ۱۳۴**

چکیده:

اغلب لایه‌های نزدیک به سطح زمین که رفتار مهندسی آن‌ها حائز اهمیت است، در حالت غیراشباع قرار دارند. در نتیجه استفاده از روابط مکانیک خاک کلاسیک به‌منظور بررسی رفتار مکانیکی خاک‌ها و تحلیل سازه‌ها در مهندسی ژئوتکنیک، نتایج صحیحی در بر نخواهد داشت. مطالعات مروری در این پایان‌نامه نشان می‌دهد، که تحقیقات بسیاری در بررسی رفتار تنش-تغییرشکل خاک‌های غیراشباع صورت گرفته است، با این وجود پراکندگی این تحقیقات از یک طرف و عوامل متعدد تأثیرگذار بر رفتار این‌گونه خاک‌ها از طرف دیگر، لزوم توسعه در مطالعات تجربی را به اثبات می‌رساند. براساس این مطالعات، توجه به خاک‌های ماسه‌ای مخلوط با ریزدانه (لای و رس) از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این پایان‌نامه مجموعه‌ای از آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی شده روی نمونه‌های اشباع و غیراشباع خاک ماسه‌ای لای‌دار با هدف بررسی رفتار تنش-تغییرشکل با تأکید ویژه بر اثر مکش بافتی بر مقاومت برشی، تحت تنش‌های محصور کننده کم تا متوسط، انجام شده است. برای بررسی تأثیر تراکم، آزمایش‌ها در دو دانسیته مختلف انجام شده است. در این آزمایش‌ها به منظور اندازه‌گیری مکش بافتی خاک مورد مطالعه، از روش جابجایی محوری و برای اندازه‌گیری تغییر حجم خاک از روش سلول دو جداره استفاده شده است. از نتایج آزمایش‌ها برای بررسی رفتار تنش-کرنش، تغییر حجم و جذب آب نمونه در حین بارگذاری و تأثیر مکش بافتی بر پارامترهای مقاومت برشی در مدل مور-کولمب استفاده شد. در این پژوهش رفتار خاک مذکور از دیدگاه مکانیک خاک حالت بحرانی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین در این تحقیق برای بررسی تأثیر شرایط زهکشی بر رفتار مکانیکی خاک‌ها در شرایط غیراشباع و اشباع، نتایج حاصله، به‌ترتیب با نتایج آزمایش‌های تحکیم یافته با کنترل فشار هوای حفره‌ای (با مقدار آب ثابت) و آزمایش‌های تحکیم یافته زهکشی نشده، که در کار پژوهشی مستقلی بر روی همین خاک صورت گرفته، مقایسه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مکش بافتی نقش مهمی در رفتار برشی خاک ایفا می‌کند، به‌طوری که با افزایش مکش بافتی، مقاومت برشی خاک به‌صورتی غیرخطی افزایش می‌یابد. با این حال، تأثیر تنش همه‌جانبه خالص بیشتر از تأثیر مکش بافتی بر افزایش مقاومت خاک است. همچنین مقاومت نهایی نمونه‌های اشباع و غیراشباع در شرایط زهکشی شده به‌ترتیب بیشتر از شرایط زهکشی نشده و شرایط کنترل فشار هوای حفره‌ای به‌دست آمد. مکش بافتی بر پارامترهای مقاومت برشی در مدل مور-کولمب تأثیرگذار بوده و افزایش آن سبب افزایش چسبندگی ظاهری و کاهش غیرخطی زاویه اصطکاک متناظر با مکش بافتی می‌شود. در این تحقیق پارامترهای حالت بحرانی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان دهنده تغییرات غیرخطی این پارامترها با مکش بافتی است. همچنین شیب خط حالت بحرانی در شرایط غیراشباع به مکش بافتی اولیه و دانسیته نمونه‌ها وابسته است. در این تحقیق نشان داده شده که برای رسیدن به یک خط حالت بحرانی مستقل از مکش بافتی، می‌توان از مفهوم تنش همه‌جانبه مؤثر به‌جای تنش همه‌جانبه خالص در بیان پارامترهای حالت بحرانی بهره برد.

واژه‌های کلیدی: خاک غیراشباع، آزمایش سه‌محوری استاتیکی، ماسه مخلوط با لای و کائولینیت، تنش همه‌جانبه خالص، مکش بافتی، مدل مور-کلمب، حالت بحرانی.

فهرست مطالب

فصل۱: مقدمه ۱

۱-۱. مقدمه ۲

فصل۲: مطالعات مروری ۵

۲-۱. مقدمه ۶
۲-۲. معرفی مکانیک خاک‌های غیراشباع ۷
۲-۳. مکش در خاک ۱۱
۲-۳-۱. تعریف مکش ۱۲
۲-۳-۲. روش‌های اندازه‌گیری مکش بافتی ۱۵
۲-۴. متغیرهای حالت تنش ۱۸
۲-۴-۱. اصل تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع ۱۹
۲-۵. منحنی مشخصه آب-خاک ۲۴
۲-۶. مقاومت برشی ۲۶
۲-۶-۱. آزمایش‌های سه‌محوری بر روی خاک‌های غیراشباع ۳۰
۲-۶-۲. اندازه‌گیری تغییر حجم در آزمایش‌های سه‌محوری خاک‌های غیراشباع ۳۳
۲-۶-۳. مروری بر نتایج آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده (CD) ۳۵
۲-۷. مکانیک خاک حالت بحرانی ۴۸
۲-۷-۱. خط تحکیم عادی ۴۹
۲-۷-۲. خط حالت بحرانی ۴۹
۲-۷-۳. تأثیر مسیر تنش بر حالت بحرانی ۵۱
۲-۸. کاربرد تنش مؤثر در مکانیک خاک حالت بحرانی خاک‌های غیراشباع ۵۳
۲-۸-۱. موقعیت خط حالت بحرانی در خاک‌های غیراشباع ۵۵
۲-۹. خلاصه و جمع‌بندی ۵۷

فصل۳: مواد و روش‌ها ۵۹

۳-۱. مقدمه ۶۰
۳-۲. خصوصیات خاک‌های مورد استفاده ۶۰
۳-۲-۱. آزمایش دانه‌بندی ۶۱
۳-۲-۲. آزمایش چگالی ویژه ۶۱
۳-۲-۳. آزمایش حدود روانی و خمیری ۶۲

۳-۲-۴. آزمایش تراکم استاندارد پرکتور ۶۳
۳-۳. روش ساخت نمونه‌ها ۶۳
۳-۴. آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده (CD) برای خاک اشباع ۶۵
۳-۴-۱. اشباع کردن نمونه خاک ۶۶
۳-۴-۲. تحکیم ۶۷
۳-۴-۳. بارگذاری ۶۷
۳-۵. آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده (CD) برای خاک غیراشباع ۶۸
۳-۵-۱. مراحل آزمایش تحکیم یافته-زهکشی شده (CD) در حالت غیراشباع و دستگاه سه‌محوری مورد استفاده ۶۹
۳-۶. جمع‌بندی و خلاصه فصل ۷۳

فصل۴: نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها ۷۴

۴-۱. مقدمه ۷۵
۴-۲. خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها ۷۶
۴-۳. نتایج آزمایش‌ها در شرایط اشباع ۷۶
۴-۴. نتایج آزمایش‌ها در شرایط غیراشباع ۸۳
۴-۴-۱. بررسی مقاومت برشی نمونه‌ها ۸۶
۴-۴-۲. بررسی رفتار تغییر حجمی نمونه‌ها ۹۰
۴-۴-۳. بررسی تغییرات مکش بافتی (یا فشار آب حفرهای) در آزمایش‌های CW و جذب آب در آزمایش‌های CD ۹۳
۴-۵. بررسی پارامترهای سطح گسیختگی در مدل مور-کولمب ۱۰۶
۴-۶. بررسی موقعیت خط حالت بحرانی ۱۱۶
۴-۷. جمع‌بندی و خلاصه فصل ۱۲۱

فصل۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۲۳

۵-۱. نتیجه‌گیری ۱۲۴
۵-۲. پیشنهادها جهت تحقیقات بعدی ۱۲۷

فهرست مراجع ۱۲۸

فهرست جدول‌ها

جدول۲-۱. مقادیر φ^b و φ' برای خاک‌های مختلف (Fredlund and Rahardjo, 1993) ۲۸

جدول۲-۲. جزئیات آزمایش‌های مختلف سه‌محوری غیراشباع ۳۲

جدول۲-۳. نتایج آزمایش‌های رس دانائوری متراکم شده (data from Satija, 1978) ۳۸

جدول۲-۴. تشریح خاک‌های مورد آزمایش (Houston et al, 2009) ۴۲

جدول۲-۵. پارامترهای تنش مؤثر برای خاک‌های مورد آزمایش (Houston et al, 2009) ۴۲

جدول۳-۱. جزئیات دانه‌بندی (بیات، ۱۳۹۰) ۶۲

جدول۳-۲. مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه (بیات، ۱۳۹۰) ۶۳

جدول۴-۱. خصوصیات فیزیکی نمونه‌های مورد آزمایش ۷۶

جدول۴-۲. مقادیر حالت بحرانی برای آزمایش اشباع (CD) و (CU) گروه‌های اول و دوم ۷۹

جدول۴-۳. مقادیر اولیه متغیرها در آزمایش‌های گروه اول و دوم ۸۵

جدول۴-۴. زاویه اتساع برای آزمایش‌ای CD و CW در گروه‌های اول و دوم ۹۳

جدول۴-۵. مقادیر بحرانی مجموعه آزمایش‌های CW و CD مربوط به گروه اول ۱۰۶

جدول۴-۶. مقادیر بحرانی مجموعه آزمایش‌های CW و CD مربوط به گروه دوم ۱۰۶

جدول۴-۷. پارامترهای تنش مؤثر برای نمونه‌های گروه اول و دوم ۱۰۷

جدول۴-۸. محاسبه φ^b بر مبنای چسبندگی ظاهری ۱۱۴

جدول۴-۹. پارامترهای حالت بحرانی آزمایش‌های CD ۱۱۷

جدول۴-۱۰. پارمترهای حالت بحرانی در نمودار تنش مؤثر متوسط و تنش انحرافی ۱۲۰

فهرست شکل‌ها

شکل۲-۱. فرآیند خشک شدن خاک، (a) حالت اشباع (b) حالت غیراشباع (c) حالت خشک، (Biddle, 1998)..... ۷

شکل۲-۲. جذب آب درون خاک توسط تبخیر و ریشه گیاهان (Fredlund and Rahardjo, 1993) ۸

شکل۲-۳. نقشه شرایط آب و هوایی جهان، سطوح کاملاً خشک، خشک و نیمه خشک (from Meigs, 1953 and Dregne, 1976)..... ۹

شکل۲-۴. اثرات مخرب خاک‌های متورم شونده در فصل‌های مختلف (a) در تابستان (b) در زمستان (Wray, 1995) ۱۱

شکل۲-۵. تغییرات مکش کل برحسب رطوبت نسبی و دما (Fredlund, 1994)..... ۱۴

شکل۲-۶. شرح عملکرد یک دیسک سرامیکی متخلخل با مدل موئینگی کلوین (Charles et al., 2007)..... ۱۶

شکل۲-۷. مکانیزم روش جابجایی محوری در آزمایشگاه (Charles et al., 2007)..... ۱۷

شکل۲-۸. شمای کلی تنسیومتر و نحوه عملکرد آن‌ها (Fredlund and Rahardjo, 1993) ۱۷

شکل۲-۹. شمای کلی روش جابجایی محوری (Olson and Langfeder, 1965)..... ۱۸

شکل۲-۱۰. پارامتر تنش مؤثر و درجه اشباع برای خاک‌های مختلف (Zerhouni, 1991) ۲۱

شکل۲-۱۱. منحنی مشخصه آب-خاک و تعیین مقدار s_e (khalili et al,. 2004) ۲۲

شکل۲-۱۲. فشار آب حفره‌ای در محیط‌های اشباع و غیراشباع ۲۲

شکل۲-۱۳. نمودار مشخصه آب-خاک (Koorevar et al., 1983) ۲۵

شکل۲-۱۴. رفتار هیسترسیس خاک‌های غیراشباع (Likos and Lu, 2004) ۲۶

شکل۲-۱۵. پوش گسیختگی مور-کولمب در خاک‌های اشباع (Terzaghi, 1936) ۲۷

شکل۲-۱۶. پوش گسیختگی برای آزمایش CD (Fredlund and Rahadrjo, 1993) ۲۹

شکل۲-۱۷. مفهوم چسبندگی ظاهری (Fredlund, 1978)..... ۲۹

شکل۲-۱۸. شمای کلی سلول سه‌محوری غیراشباع (Fredlund and Rahadrjo, 1993)..... ۳۱

شکل۲-۱۹. شمای کلی سلول دو جداره (یثربی و میرزایی ۱۳۸۶) ۳۴

شکل۲-۲۰. آزمایش‌های تحکیم یافته-زهکشی شده بر روی خاک غیراشباع. (a) منحنی تنش انحرافی-کرنش، (b) رابطه جذب آب نمونه-کرنش، (c) منحنی تغییر حجم-کرنش (Blight, 1967) ۳۵

شکل۲-۲۱. آزمایش‌های تحکیم یافته-زهکشی شده غیراشباع بر روی خاک دانائوری. (a) منحنی تنش انحرافی-کرنش، (b) رابطه تغییرات حجمی-کرنش، (c) منحنی تغییر حجم-کرنش (Satija, 1978) ۳۶

شکل۲-۲۲. منحنی تنش-کرنش برای دو نمونه خاک متفاوت a و b (Ho and Fredlund, 1982) ۳۷

شکل۲-۲۳. پوش گسیختگی در صفحه مکش بافتی و تنش برشی رس دانائوری متراکم شده با دانسیته زیاد، b) تغییرات φ^b با مکش بافتی (Data from Satija, 1978) (Fredlund et al., 1987) ۳۹

شکل۲-۲۴.a) پوش گسیختگی در صفحه مکش بافتی و تنش برشی رس دانائوری متراکم شده با دانسیته زیاد، b) تغییرات φ^b با مکش بافتی (data from Satija, 1978) (Fredlund et al., 1987) ۳۹

شکل۲-۲۵. پوش گسیختگی غیرخطی در صفحه مکش بافتی-تنش برشی (Fredlund et al., 1987)..... ۴۱

شکل۲-۲۶. پوش گسیختگی در نمودار صفحه سه‌بعدی (Fredlund et al., 1987) ۴۱

شکل۲-۲۷. پوش گسیختگی غیرخطی در صفحه مکش بافتی-تنش برشی (Fredlund et al., 1987) ۴۱

شکل۲-۲۸. دوایر مور برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی مور-کولمب در مکش‌های بافتی a) صفر (شرایط اشباع)، b) مکش بافتی ۱۵۰ کیلوپاسکال، c) مکش بافتی ۳۴۵ کیلوپاسکال (Houston et al, 2009) ۴۳

شکل۲-۲۹. منحنی مشخصه آب-خاک (Houston et al, 2009) ۴۴

شکل۲-۳۰.a) منحنی مکش بافتی در مقابل φ^b برای خاک ASU east (SM)، b) منحنی مکش بافتی در مقابل φ^b برای خاک Sheely clay (CL)، c) منحنی مکش بافتی در مقابل φ^b برای خاک Price Club (CL-ML)، d) منحنی مکش بافتی در مقابل φ^b برای خاک Yuma sand (SP). (Houston et al, 2009) ۴۵

شکل۲-۳۱. رفتار تنش-کرنش مخلوط ماسه و رس در شرایط خشک و با درصدهای مختلف (Al-Shayea, 2001).. ۴۶

شکل۲-۳۲. تاثیر درجه اشباع و درصد رس بر چسبندگی (Al-Shayea, 2001) ۴۷

شکل۲-۳۳. تاثیر درجه اشباع و درصد رس بر زاویه اصطکاک داخلی (Al-Shayea, 2001) ۴۷

شکل۲-۳۴. خط حالت بحرانی و خط تحکیم عادی برای ماسه‌ها (Coop & Lee, 1993) ۵۰

شکل۲-۳۵. خط حالت بحرانی برای ماسه‌ها (Coop, 1990) ۵۱

شکل۲-۳۶. مسیرهای تنش مؤثر و خط حالت بحرانی از آزمایش‌های CU. (Charles, 2004) ۵۲

شکل۲-۳۷. مسیرهای تنش مؤثر و خط حالت بحرانی از آزمایش‌های KU. (Charles, 2004)..... ۵۲

شکل۲-۳۸. مسیرهای تنش مؤثر و خط حالت بحرانی از آزمایش‌های CQ. (Charles, 2004)..... ۵۲

شکل۲-۳۹. نتایج حاصل از آزمایش‌ها بر روی نمونه‌ها با مکش بافتی مختلف (Maatouk et al., 1995) ۵۴

شکل۲-۴۰. خط حالت بحرانی در نمودار $q - p'$ (Wheeler and Sivakumar, 1995)..... ۵۴

شکل۲-۴۱. خط حالت بحرانی در نمودار $q - p'$ (Kayadelen et al,. 2007) ۵۵

شکل۲-۴۲. بررسی حالت بحرانی در نمودار $q - p'$ ، a) خاک لای جوسینی، b) خاک لای ترویس ریویرز (khalili et al,. 2004) ۵۶

شکل۲-۴۳.a) خط حالت بحرانی در شرایط اشباع در نمودار $q - p'$ ، b) بررسی مقاومت نهایی با مکش‌های مختلف در نمودار $q : p'$ ، (khalili et al,. 2004) (data from Geiser, 1999) ۵۶

شکل۲-۴۴. خط حالت بحرانی برای کائولینیت در مکش‌های مختلف (Data from Nuth and Laloui, 2007) (Sivakumar 1993) ۵۷

شکل۳-۱. نمودار دانه‌بندی (بیات، ۱۳۹۰)..... ۶۲

شکل۳-۲. نمودار تراکم پراکتور استاندارد (بیات، ۱۳۹۰)..... ۶۳

شکل۳-۳.a) مراحل ساخت نمونه‌های اشباع و غیراشباع، b) جایگذاری نمونه اشباع، c) جایگذاری نمونه غیراشباع .. ۶۵

شکل۳-۴. شمای کلی دستگاه سه‌محوری اشباع، ۱) سلول سه‌محوری اشباع، ۲) سیستم اعمال بار (جَک)، ۳) سیستم کنترل فشار (پانل سه‌محوری اشباع)..... ۶۸

شکل۳-۵. شمای کلی دستگاه سه‌محوری غیراشباع، a) سلول سه‌محوری غیراشباع، b) سیستم کنترل فشار (پانل سه‌محوری غیراشباع) ۷۲

شکل۴-۱. نتایج آزمایش‌های اشباع CU و CD در نمونه‌های گروه اول a_1)نمودار تنش انحرافی و b_1) فشار آب حفره‌ای، (CU) (بیات، ۱۳۹۰). a_2) نمودار تنش انحرافی و b_2) درصد تغییر حجم (CD) ۷۷

شکل۴-۲. نتایج آزمایش‌های اشباع CU و CD در نمونه‌های گروه اول a_1)نمودار تنش انحرافی و b_1) فشار آب حفره‌ای، (CU) (بیات، ۱۳۹۰). a_2) نمودار تنش انحرافی و b_2) درصد تغییر حجم (CD)..... ۷۸

شکل۴-۳. نتایج آزمایش‌های اشباع CU، a_1) نمودار تنش انحرافی-تغییرشکل برای آزمایش‌های گروه‌های اول و دوم، a_2) نمودار فشار آب حفره‌ای-تغییرشکل برای آزمایش‌های گروه‌های اول و دوم ۷۸

شکل۴-۴. نتایج آزمایش‌های اشباع CD، a_1) نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری برای آزمایش‌های گروه‌های اول و دوم، a_2) نمودار درصد تغییر حجم - کرنش محوری برای آزمایش‌های گروه‌های اول و دوم ۷۹

شکل۴-۵. نتایج آزمایش (CD) برای نمونه بدون کائولینیت در شرایط گروه اول با تنش همه‌جانبه ۲۰۰ کیلوپاسکال و نسبت تخلخل ۰/۴۶، a) نمودار تنش-کرنش محوری و b) درصد تغییر حجم-کرنش محوری..... ۸۳

شکل۴-۶. نمودار ترشدگی a) مربوط به گروه اول، b) مربوط به گروه دوم ۸۴

شکل۴-۷. نتایج آزمایش‌های غیراشباع CW و CD در نمونه‌های گروه اول با مکش بافتی ۲۵ کیلوپاسکال a_1) نمودار تنش انحرافی، b_1) درصد تغییر حجم و c_1) مکش بافتی، (CU) (بیات، ۱۳۹۰). a_2) نمودار تنش انحرافی، b_2) درصد تغییر حجم و c_2) جذب آب، (CD)..... ۹۵

شکل۴-۸. نتایج آزمایش‌های غیراشباع CW و CD در نمونه‌های گروه اول با مکش بافتی ۵۰ کیلوپاسکال a_1) نمودار تنش انحرافی، b_1) درصد تغییر حجم و c_1) مکش بافتی، (CU) (بیات، ۱۳۹۰). a_2) نمودار تنش انحرافی، b_2) درصد تغییر حجم و c_2) جذب آب، (CD)..... ۹۶

شکل۴-۹. نتایج آزمایش‌های غیراشباع CW و CD در نمونه‌های گروه اول با مکش بافتی ۱۰۰ کیلوپاسکال a_1) نمودار تنش انحرافی، b_1) درصد تغییر حجم و c_1) مکش بافتی، (CU) (بیات، ۱۳۹۰). a_2) نمودار تنش انحرافی، b_2) درصد تغییر حجم و c_2) جذب آب، (CD)..... ۹۷

شکل۴-۱۰. نتایج آزمایش‌های غیراشباع CW و CD در نمونه‌های گروه اول با مکش بافتی ۱۶۲ کیلوپاسکال a_1) نمودار تنش انحرافی، b_1) درصد تغییر حجم و c_1) مکش بافتی، (CU) (بیات، ۱۳۹۰). a_2) نمودار تنش انحرافی، b_2) درصد تغییر حجم و c_2) جذب آب، (CD)..... ۹۸

شکل۴-۱۱. نتایج آزمایش‌های غیراشباع CW و CD در نمونه‌های گروه دوم با مکش بافتی ۲۵ کیلوپاسکال a_1) نمودار تنش انحرافی، b_1) درصد تغییر حجم و c_1) مکش بافتی، (CU) (بیات، ۱۳۹۰). a_2) نمودار تنش انحرافی، b_2) درصد تغییر حجم و c_2) جذب آب، (CD)..... ۹۹

شکل۴-۱۲. نتایج آزمایش‌های غیراشباع CW و CD در نمونه‌های گروه دوم با مکش بافتی ۵۰ کیلوپاسکال a_1) نمودار تنش انحرافی، b_1) درصد تغییر حجم و c_1) مکش بافتی، (CU) (بیات، ۱۳۹۰). a_2) نمودار تنش انحرافی، b_2) درصد تغییر حجم و c_2) جذب آب، (CD)..... ۱۰۰

شکل۴-۱۳. نتایج آزمایش‌های غیراشباع CW و CD در نمونه‌های گروه دوم با مکش بافتی ۱۰۰ کیلوپاسکال (a_1) نمودار تنش انحرافی، (b_1) درصد تغییر حجم و (c_1) مکش بافتی، (CU) (بیات، ۱۳۹۰). (a_2) نمودار تنش انحرافی، (b_2) درصد تغییر حجم و (c_2) جذب آب، (CD) ۱۰۱

شکل۴-۱۴. نتایج آزمایش‌های غیراشباع CW و CD در نمونه‌های گروه دوم با مکش بافتی ۱۶۲ کیلوپاسکال (a_1) نمودار تنش انحرافی، (b_1) درصد تغییر حجم و (c_1) مکش بافتی، (CU) (بیات، ۱۳۹۰). (a_2) نمودار تنش انحرافی، (b_2) درصد تغییر حجم و (c_2) جذب آب، (CD) ۱۰۲

شکل۴-۱۵. نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری، در آزمایش CW برای گروه‌های اول و دوم در تنش همه‌جانبه ۲۵ کیلوپاسکال در مکش‌های بافتی مختلف ۱۰۳

شکل۴-۱۶. نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری، در آزمایش CW برای گروه‌های اول و دوم در تنش همه‌جانبه ۵۰ کیلوپاسکال در مکش‌های بافتی مختلف ۱۰۳

شکل۴-۱۷. نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری، در آزمایش CW برای گروه‌های اول و دوم در تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال در مکش‌های بافتی مختلف ۱۰۴

شکل۴-۱۸. نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری، در آزمایش CD برای گروه‌های اول و دوم در تنش همه‌جانبه ۲۵ کیلوپاسکال در مکش‌های بافتی مختلف ۱۰۴

شکل۴-۱۹. نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری، در آزمایش CD برای گروه‌های اول و دوم در تنش همه‌جانبه ۵۰ کیلوپاسکال در مکش‌های بافتی مختلف ۱۰۵

شکل۴-۲۰. نمودار تنش انحرافی-کرنش محوری، در آزمایش CD برای گروه‌های اول و دوم در تنش همه‌جانبه ۱۰۰ کیلوپاسکال در مکش‌های بافتی مختلف ۱۰۵

شکل۴-۲۱. پوش گسیختگی در صفحه تنش خالص-تنش برشی در مکش بافتی صفر (شرایط اشباع) در گروه اول ۱۰۸

شکل۴-۲۲. پوش گسیختگی در صفحه تنش خالص-تنش برشی در مکش بافتی ۲۵ کیلوپاسکال در گروه اول ۱۰۸

شکل۴-۲۳. پوش گسیختگی در صفحه تنش خالص-تنش برشی در مکش بافتی ۵۰ کیلوپاسکال در گروه اول ۱۰۸

شکل۴-۲۴. پوش گسیختگی در صفحه تنش خالص-تنش برشی در مکش بافتی ۱۰۰ کیلوپاسکال در گروه اول ... ۱۰۹

شکل۴-۲۵. پوش گسیختگی در صفحه تنش خالص-تنش برشی در مکش بافتی ۱۶۲ کیلوپاسکال در گروه اول.... ۱۰۹

شکل۴-۲۶. پوش گسیختگی سه‌بعدی برای نمونه‌های گروه اول ۱۱۰

شکل۴-۲۷. پوش گسیختگی در صفحه تنش خالص-تنش برشی در مکش بافتی صفر (شرایط اشباع) در گروه دوم ۱۱۱

شکل۴-۲۸. پوش گسیختگی در صفحه تنش خالص-تنش برشی در مکش بافتی ۲۵ کیلوپاسکال در گروه دوم ۱۱۱

شکل۴-۲۹. پوش گسیختگی در صفحه تنش خالص-تنش برشی در مکش بافتی ۵۰ کیلوپاسکال در گروه دوم ۱۱۱

شکل۴-۳۰. پوش گسیختگی در صفحه تنش خالص-تنش برشی در مکش بافتی ۱۰۰ کیلوپاسکال در گروه دوم .. ۱۱۲

شکل۴-۳۱. پوش گسیختگی در صفحه تنش خالص-تنش برشی در مکش بافتی ۱۶۲ کیلوپاسکال در گروه دوم .. ۱۱۲

شکل۴-۳۲. پوش گسیختگی سه‌بعدی برای نمونه‌های گروه دوم ۱۱۳

شکل۴-۳۳. زاویه اصطکاک متناظر با مکش بافتی φ^b در مقابل مکش بافتی ۱۱۵

شکل۴-۳۴. پوش گسیختگی در صفحه تنش خالص-تنش برشی بافتی برای گروه اول ۱۱۵

شکل۴-۳۵. پوش گسیختگی در صفحه تنش خالص-تنش برشی برای گروه دوم ۱۱۵
شکل۴-۳۶. مسیر تنش انحرافی در آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده ۱۱۷
شکل۴-۳۷. مسیر تنش انحرافی در فضای $(q\text{-}p_{net})$ در مقادیر مکش بافتی مختلف برای آزمایش‌های گروه اول ۱۱۸
شکل۴-۳۸. مسیر تنش انحرافی در فضای $(q\text{-}p_{net})$ در مقادیر مکش بافتی مختلف برای آزمایش‌های گروه دوم..... ۱۱۹
شکل۴-۳۹. نتایج آزمایش‌های تحکیم یافته-زهکشی شده CD برای گروه اول (G1) ، a_1) در نمودار تنش خالص متوسط (p_{net}) و تنش انحرافی (q)، a_2) در نمودار تنش مؤثر متوسط (p')-تنش انحرافی (q) ۱۲۱
شکل۴-۴۰. نتایج آزمایش‌های تحکیم یافته-زهکشی شده CD برای گروه دوم (G2) ، a_1) در نمودار تنش خالص متوسط (p_{net}) و تنش انحرافی (q)، a_2) در نمودار تنش مؤثر متوسط (p')-تنش انحرافی (q) ۱۲۱

فصل۱

مقدمه

۱-۱. مقدمه

مکانیک خاک کلاسیک در سال ۱۹۳۶ توسط ترزاقی با فرض اشباع کامل بودن محیط خاک معرفی گردید و تا کنون کارهای وسیعی در این زمینه انجام شده است و امروزه نیز در بسیاری از مقاصد علمی و عملی از آن استفاده می‌شود. با توجه به این مطلب بسیار مهم که تراز آب زیرزمینی در اکثر نقاط جهان در اعماق پایین زمین واقع شده است، لذا اغلب لایه‌های نزدیک به سطح زمین، که رفتار مهندسی آن‌ها حائز اهمیت است، در حالت غیراشباع قرار دارند. در نتیجه در بررسی رفتار مکانیکی خاک‌ها در مسائل متداول ژئوتکنیکی، استفاده از روابط مکانیک خاک کلاسیک در حالت اشباع، نتایج صحیحی در بر نخواهد داشت. همچنین از زمان پیدایش مکانیک خاک کلاسیک تا کنون، نقص‌هایی در توجیه بسیاری از مشاهدات رفتاری خاک‌ها وجود داشته است. با توجه به این موارد، لزوم مطالعه رفتار خاک‌های غیراشباع روشن می‌شود و بر همین اساس مطالعات گسترده‌ای در این زمینه در سال‌های اخیر صورت گرفته است. امروزه رفتار مهندسی این‌گونه خاک‌ها به‌طور مستقل در شاخه مکانیک خاک‌های غیراشباع مطالعه می‌شود.

بخش عمده‌ای از خاک‌ها در نواحی مختلف جهان بخصوص ایران به‌صورت غیراشباع هستند. بنابراین در بسیاری از مسائل لازم است بجای کاربرد قوانین مکانیک خاک‌های اشباع از روابط و قوانین مکانیک خاک‌های غیراشباع استفاده شود. مطالعات کلی انجام شده در زمینه رفتار خاک‌های غیراشباع نشان می‌دهد که دو پارامتر اساسی تنش خالص[1] $\left(\sigma_{ij} - u_a\delta_{ij}\right)$ و مکش بافتی[2] $(u_a - u_w)$ به عنوان پارامترهای وضعیت در روابط رفتاری وارد می‌شوند. تعیین این پارامترها بستگی به عوامل زیادی از جمله نوع خاک، دانسیته، درجه اشباع، میزان مکش بافتی و غیره دارد. علاوه بر این، مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که با توجه به عوامل زیاد تأثیر گذار بر رفتار خاک در حالت غیراشباع، سوالات زیادی هنوز مطرح است که لازم است با مطالعات تجربی پاسخ داده شوند. از جمله این سوالات این است که چه تغییراتی در پارامترهای اساسی حالت بحرانی در خاک‌های غیراشباع نسبت به خاک‌های اشباع به وجود می‌آید؟ به نظر می‌رسد که چنین تغییراتی احتمالاً به نوع خاک بستگی دارد. با این فرض می‌توان گفت که مطالعات انجام گرفته تاکنون در این خصوص کفایت نمی‌کنند. بنابراین در تحقیق حاضر رفتار تنش-کرنش با توجه ویژه به مفهوم حالت بحرانی در خاک ماسه‌ای مخلوط با لای و کائولینیت غیراشباع مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در مسیر سه‌محوری تقارن محوری با دستگاه سه‌محوری غیراشباع موجود در آزمایشگاه تحقیقاتی دینامی‌ک خاک گروه عمران دانشکده مهندسی دانشگاه بوعلی سینا طراحی و اجرا می‌گردد. از نتایج این آزمایش‌ها جهت اظهار نظر در مورد این نوع خاک‌ها در مراحل قبل و بعد از خرابی می‌توان استفاده نمود. موارد این پایان‌نامه علاوه بر کلیات شامل موارد زیر است:

در فصل دوم در مورد مفاهیم پایه‌ای در خاک‌های غیراشباع مرتبط با موضوع این تحقیق بحث شده است.

[1] Net normal stress
[2] Matric suction

در فصل سوم، خواص مکانیکی و فیزیکی خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها و نوع آزمایش سه‌محوری استفاده شده در این پژوهش با معرفی مراحل مختلف آن در این فصل ارائه شده است.

نتایج آزمایش‌ها در فصل چهارم آورده شده است. در این فصل به بررسی عوامل مختلف در رفتار برشی نمونه‌های خاک در شرایط اشباع و غیراشباع پرداخته خواهد شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های تحکیم یافته-زهکشی شده (CD) در شرایط اشباع و غیراشباع که در این پژوهش انجام شده با نتایج آزمایش‌های تحکیم یافته با کنترل فشار هوای حفره‌ای (با مقدار آب ثابت) (CW) در حالت غیراشباع و آزمایش‌های تحکیم یافته-زهکشی نشده (CU) در حالت اشباع، که در کار پژوهشی مستقلی بر روی همین خاک انجام شده، مقایسه می‌شود. در ادامه به بررسی پارامترهای مقاومت برشی خاک مورد مطالعه با معیار مور-کولمب و همچنین به رفتار حالت بحرانی نمونه‌ها و بررسی نوع تاثیر عوامل مختلف در آن، پرداخته شده است.

فصل۲

مطالعات مروری

۲-۱. مقدمه

علم مکانیک خاک کلاسیک، کاربرد قوانین مکانیک و هیدرولیک در مسائل مهندسی مربوط به رفتار خاک‌ها است و توسط کارل ترزاقی در سال ۱۹۴۳ با ارائه کتاب "مکانیک خاک نظری[1]" معرفی گردید. در علم مکانیک خاک کلاسیک معمولاً خاک را در دو حالت کاملاً خشک یا کاملاً اشباع تحلیل می‌کنند، در حقیقت درجه اشباع ۰٪ (کاملاً خشک) و درجه اشباع ۱۰۰٪ (کاملاً اشباع) دو شرایط کاملا محدود و منحصر به فرد برای یک خاک، یا دو حالت خاص از شرایط غیراشباع می‌باشند. در بیشتر مسائل مهندسی، خاک به‌صورت غیراشباع است. در علم مکانیک خاک غیراشباع، علاوه بر قوانین مکانیک و هیدرولیک، فیزیک سطوح تماس[2] بین فازهای مختلف نیز در رفتار مهندسی خاک مؤثر است. در ادامه این فصل مفاهیم پایه‌ای در خاک‌های غیراشباع مرتبط با موضوع این تحقیق بحث شده است.

[1] Theoretical Soil Mechanics
[2] Interfacial physics
منظور از واژه فیزیک سطوح تماس، اصول ترمودینامیک است که برای بررسی تعادل بین فازهای مختلف گاز، مایع، جامد و نیز نحوه انتقال ماده از یک فاز به فاز دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد (فردلاند و رهاردجو، ۱۹۹۳).