دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

رساله دکتری

رشته و گرایش

مهندسی عمران- مکانیک خاک و پی

عنوان

بررسی آزمایشگاهی اثر زمان بر روی پارامترهای مقاومت برشی سطح تماس خاک- ژئوسینتتیک

استاد راهنما

دکتر محمود قضاوی

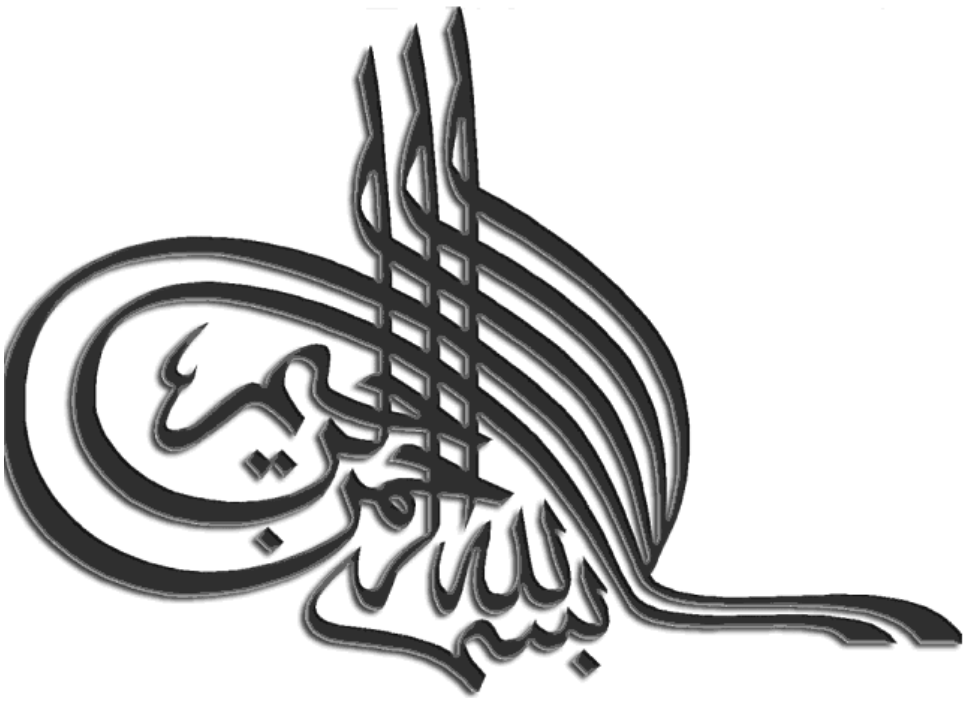
نگارش

جواد غفاری

شماره دانشجویی

۸۶۰۸۸۱۶

بهمن ۱۳۹۱


بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به:

- **پدر، مادر و خواهر** مهربان و دلسوزم که در تمام مراحل زندگی و تحصیل پشتیبانم بوده‌اند.
- **آموزگاران و اساتید** گرامی دوران تحصیلم که همواره رهنمایم بوده‌اند.

تشکر و قدردانی

سپاس، بینهایت هستی را که حکمتش جهان شمول است و رحمتش بی‌پایان.

مجموعه حاضر اگر چه حاصلی است از تکاپو و تلاش نگارنده در تحقیق و تدوین یافته‌های مورد نظر و پژوهش در کشف و ارائه نتایجی هر چند خرد از بیکرانه‌های دانش، اما بی‌شک مرهون و مدیون همدلی‌ها و حمایت‌های استادی است که دستان مرا در تکمیل این رساله به هدایت گرفت تا این مجموعه بر پایه‌های استدلال و اندیشه قوام یابد و خود مرجعی باشد در گره‌گشایی خواسته‌های آیندگان.

از این رو بر خود واجب می‌دانم از راهنمایی‌های گرانسنگ استاد فرزانه‌ام جناب آقای دکتر محمود قضاوی به عنوان استاد راهنما به جهت قرار دادن دانسته‌های ارزشمند خویش در اختیار اینجانب قدردانی نمایم و نیز لازم است از تمامی آموزگارانی که تاکنون داشته‌ام و از دانش آنان بهره برده‌ام سپاسگزاری نمایم. هرچند واژگان در بجای آوردن این وظیفه مهم ناتوانند.

در پایان امیدوارم بتوانم با تکیه بر معلومات و دانش اندوخته، برای آبادانی و پیشرفت ایران عزیزم گامی ارزنده بردارم.

چکیده

یکی از پارامترهای مهم طراحی سازه های خاکی مسلح شده تعیین اندرکنش خاک- مسلح کننده می باشد که تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله خواص مکانیکی و فیزیکی خاک و ژئوسینتتیک، نوع مکانیزم اندرکنش بین خاک- ژئوسینتتیک (برون کششی یا برش مستقیم) و غیره است. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار می تواند اثر زمان یا کهولت باشد که کمتر مورد توجه قرار گرفته است. اثر زمان بر رفتار تنش-کرنش مصالح خاکی شامل ۱) اثر کهولت در خواص تنش-کرنش ذاتی مصالح و ۲) اثر نرخ بارگذاری ناشی از خواص ویسکوزیته مصالح می باشد. بنابراین فهم صحیح هر دو اثر بالا برای بکار بردن آن‌ها در اجرا ضروری می‌باشد. لذا در این رساله سعی شده است که به تأثیر اثر زمان بر روی پارامترهای مقاومت برشی سطح تماس خاک- ژئوسینتتیک پرداخته شود. برای این هدف از دستگاه برش مستقیم با ابعاد جعبه برشی ۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. برای بررسی اثر زمان، دو حالت آزمایش ۱) اثر زمان قبل از اعمال برش (مدت زمان اعمال بار قائم) و ۲) اثر زمان حین برش (مدت زمان اعمال بار برشی) در نظر گرفته شده است. در حالت اول، نمونه‌ها طی زمان‌های مختلف صفر، ۱۵، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۷۲۰ دقیقه تحت تنش‌های قائم ۳۰ و ۴۵ و ۶۰ kPa قرار گرفته و سپس برش اعمال شده است. در آزمایش‌های مربوط به این حالت از ماسه با دانسیته خشک ۱۵۰۰ kg/m^3 (دانسیته متوسط) و دو حالت ماسه خشک و رطوبت ۷٪ و همچنین از دو نوع ژئوتکستایل بافته نشده با ضخامت‌های متفاوت استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با اضافه کردن رطوبت به ماسه زاویه اصطکاک سطح تماس کاهش می‌یابد. با افزایش زمان به مدت ۷۲۰ دقیقه افزایش ۳۵٪ در سختی و ۵/۵٪ در زاویه اصطکاک در سطح تماس ماسه- ژئوتکستایل دیده می‌شود. همچنین با گذشت زمان، مقاومت برشی افزایش و تراکم پذیری کاهش اندکی نشان می دهد.

برای بررسی حالت دوم اثر زمان ، آزمایش‌ها می‌تواند به سه صورت خزش (creep)، آسودگی تنش (relaxation) و تغییر پله ای سرعت برش بررسی شود. در مطالعه حاضر دو روش آسودگی تنش و تغییر پله ای سرعت برش تا ۱۰۰ برابر مطالعه شده است. برای بررسی آسودگی تنش، نمونه‌ها در سطح تنش‌های مختلف به مدت ۳۰ دقیقه تحت کرنش ثابت قرار گرفته و کاهش تنش اندازه گیری شده است. همچنین در حالت تغییر ناگهانی سرعت برش، سرعت برش تا آخر آزمایش ثابت نبوده بلکه به صورت ناگهانی حین برش تغییر می‌کند. محدوده تغییرات سرعت برش بین ۰/۰۵ تا ۵ میلی متر بر دقیقه بوده است. در آزمایش‌های مربوط به این حالت نیز از دو نوع ماسه خشک با دو دانسیته

مختلف کم و متوسط همچنین از دو نوع ژئوتکستایل بافته نشده با ضخامت‌های متفاوت استفاده شده است. سربار اعمال شده به نمونه‌ها برابر ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال بوده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقدار آسودگی تنش (افت تنش) با افزایش سطح تنش برشی و سرعت برش، افزایش و با افزایش دانسیته خاک، کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت برش در نمونه های ماسه ای مقاومت برشی کاهش می‌یابد.

برای بیان علت این تغییرات نیاز به دانستن نحوه تغییرشکل داخلی خاک می‌باشد که توسط ابزار دقیقی که در مرزها نصب شده است این امر امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ لذا برای بررسی تغییر شکل ذرات خاک از روش سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV) استفاده شده است. در این روش می‌توان با استفاده از عکس‌برداری متوالی از صفحه خاک و پردازش آن‌ها تغییر شکل خاک را در هر نقطه تعیین کرد. برای فراهم کردن پنجره مشاهده شفاف جهت مشاهده و اندازه گیری تغییر شکل خاک، اصلاحاتی در دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس داده شده است. بر اساس نتایج PIV نمونه های ماسه ای با کاهش سرعت برش، رفتار اتساعی نشان می‌دهند. با استفاده از این روش امکان اندازه گیری ضخامت ناحیه برشی و تأثیر عوامل مختلف بر روی آن وجود دارد که در متن رساله بدان پرداخته شده است. نتایج PIV نشان می دهد که ضخامت ناحیه برشی برای نمونه‌های با دانسیته کم بیشتر از نمونه های با دانسیته متوسط می‌باشد. این ضخامت برای نمونه‌های با دانسیته متوسط بین $8D_{50}$ و $11D_{50}$ تخمین زده می‌شود.

فهرست مطالب

فصل اول- مقدمه

۱-۱- کلیات ۱

۱-۲- تعریف صورت مسئله و علل انجام تحقیق ۴

۱-۳- روش انجام تحقیق ۶

۱-۴- قلمرو و محدودیت‌های پژوهش ۶

۱-۵- معرفی فصل‌های رساله ۷

فصل دوم- مروری بر تحقیقات اثر زمان بر خواص مکانیکی خاک و اندرکنش خاک- ژئوسینتتیک

۲-۱- اثر زمان بر خواص مکانیکی خاک ۸

۲-۱-۱- مقدمه ۸

۲-۱-۲ پیشینه علمی و مروری بر کارهای انجام شده قبلی ۹

۲-۲-۳- مکانیزمهای پیشنهادی برای اثر زمان بر خواص مکانیکی خاک ۱۷

۲-۲-۳-۱- مقدمه ۱۷

۲-۲-۳-۲- فرضیه Schmertmann ۱۸

۲-۲-۳-۳- فرضیه Mesri ۲۶

۲-۲-۳-۴- فرضیه پیوستگی یا پیوندی ۲۷

۲-۲-۳-۵- مکانیزمهای دیگر ۲۸

۲-۲-۴- خلاصه و نتیجه‌گیری ۳۰

۲-۲- ارزیابی اندرکنش خاک-ژئوسینتتیک ۳۵

۲-۲-۱- مقدمه ۳۵

۲-۲-۲- آزمایش برش مستقیم ۳۶

۲-۲-۳- پیشینه علمی و مروری بر کارهای انجام شده قبلی ۴۴

۲-۲-۴- خلاصه و نتیجه گیری ۶۰

فصل سوم- مشخصات مصالح و نحوه انجام آزمایش‌ها

۳-۱- مقدمه ۶۴

۳-۲- مصالح مورد استفاده ۶۵
۳-۲-۱- ماسه ۶۵
۳-۲-۲- ژئوسینتتیک ها ۶۶
۳-۳- روش آزمایش ۶۷
۳-۳-۱- دستگاه برش مستقیم ۶۷
۳-۳-۲- برنامه آزمایش‌ها ۶۸
۳-۳-۲-۱- آزمایشهای مربوط به بررسی اثر زمان قبل از اعمال برش (مدت زمان اعمال سربار) ۶۸
۳-۳-۲-۱-۱- روند گام به گام آزمایشهای مربوط به اثر زمان قبل از برش ۶۹
۳-۳-۲-۲- آزمایشهای مربوط به بررسی اثر زمان حین اعمال برش (مدت زمان برش) ۷۰
۳-۳-۲-۲-۱- روند گام به گام آزمایشهای مربوط به اثر زمان حین برش ۷۱

فصل چهارم- نتایج و تفسیر آزمون های آزمایشگاهی

۴-۱- مقدمه ۷۳
۴-۲- بررسی آزمایشهای مربوط به اثر زمان ۷۵
۴-۲-۱- بررسی اثر زمان قبل از اعمال برش ۷۵
۴-۲-۱-۱- نتایج آزمایشها برای حالت خشک ۷۵
۴-۲-۱-۲- نتایج آزمایشها برای حالت مرطوب ۸۰
۴-۲-۲- بررسی اثر زمان حین اعمال برش ۸۹
۴-۲-۳- آسودگی تنش (Stress relaxation) ۹۹
۴-۳- خلاصه و نتیجه گیری ۱۱۴

فصل پنجم- تشریح روش سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV) و ارائه نتایج آن

۵-۱- مقدمه ۱۱۵
۵-۲- تئوری روش سرعت سنجی ذرات (PIV) ۱۱۶
۵-۲-۱- دوربین دیجیتال ۱۱۶
۵-۲-۲- مفهوم بافت (image texture) ۱۱۷
۵-۲-۳- کانون یابی (centroiding) ۱۱۷
۵-۲-۴- سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV) ۱۱۷

۵-۲-۵- فتو گرامتری نزدیک برد (Close-range photogrammetry) ۱۲۰
۵-۲- مروری بر کارهای انجام شده قبلی ۱۲۰
۵-۳- بررسی تغییر شکل خاک با استفاده از تکنیک PIV ۱۲۴
۵-۳-۱- روند انجام آزمایش‌ها و نتایج ۱۲۵
۵-۴- خلاصه و نتیجه گیری ۱۵۸
فصل ششم- تشریح مدلسازی عددی رفتار وابسته به زمان (ویسکوزیته مصالح)
۶-۱- مقدمه ۱۶۰
۶-۲- مدل و شبیه سازی خواص ویسکوزیته ۱۶۲
۶-۲-۱- ضریب نرخ-حساسیت ۱۶۲
۶-۲-۱-۱- بیان کلی تنش ویسکوزیته ۱۶۳
۶-۳- مدل سازی برش مستقیم ۱۶۶
۶-۴- خلاصه و نتیجه گیری ۱۷۷
فصل هفتم- نتیجه گیری و پیشنهادات
۷-۱- مقدمه ۱۷۸
۷-۲- نتیجه‌گیری ۱۷۹
۷-۳- پیشنهادات ارائه شده برای کارهای بعدی ۱۸۰
مراجع ۱۸۱
ضمیمه ۱- نتایج تکرارپذیری آزمایش‌های مربوط به اثر زمان ۱۸۹
ضمیمه ۲- نتایج آزمایش‌های مربوط به اثر زمان در سطح تماس ماسه خشک- ژئوتکستایل GTN.20 ..... ۲۰۱
ضمیمه ۳- نتایج تغییرات نسبت تنش اولیه-نسبت سرعت برش ۲۰۵
ضمیمه ۴- نتایج تغییرات نسبت تنش نهایی-نسبت سرعت برش **۲۱۵**

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱: طرح صفحه مرتعش شونده (Denisov and Reltov, 1961) ۹

شکل ۲-۲: نتایج حاصل از آزمایش مرتعش شونده (Denisov and Reltov, 1961) ۹

شکل ۲-۳: نتایج آزمایش سه محوری روی ماسه Ham (Daramola, 1980) ۱۰

شکل ۲-۴: دستگاه مورد استفاده برای بررسی اثر کهولت (Baxter, 1999) ۱۱

شکل ۲-۵: منحنی تنش-کرنش در آزمایش سه محوری برای نسبت تنش‌های a) R=۱، b) R=۲، (Howie et al., 2002) ۱۴

شکل ۲-۹: مقایسه **c** بدست آمده برای چهار نوع مایع حفرهای (Schmertmann, 1976) ۱۹

شکل ۲-۱۰: مقایسه $\tan\phi$ بدست آمده برای چهار نوع مایع حفرهای (Schmertmann, 1976) ۱۹

شکل ۲-۱۱: دو نمونه یکسان در تراز تنش مختلف (Schmertmann, 1991) ۲۱

شکل ۲-۱۲: آزمایشهای فشاری مقایسهای دو نمونه یکسان در تراز تنش مختلف (Schmertmann, 1991) ۲۲

شکل ۲-۱۳: c و ϕ حاصل از آزمایش IDS (Schmertmann, 1991) ۲۲

شکل ۲-۱۴: c و ϕ به عنوان تابعی از کرنش (Schmertmann, 1991) ۲۲

شکل ۲-۱۵: منحنی تنش-کرنش برای آزمایش IDS روی نمونه واحد (Schmertmann, 1991) ۲۳

شکل ۲-۱۶: توسعه c و ϕ با کرنش در طول آزمایش IDS (Schmertmann, 1976) ۲۵

شکل ۲-۱۷: مقایسه نمونه مسن شده با نمونه مخلوط با پراکنده کننده (Schmertmann, 1976) ۲۵

شکل ۲-۱۸: مکانیزم‌های اندرکنش دیوار خاکی مسلح شده (Palmeira and Milligan, 1989(a)) ۳۶

شکل ۲-۱۹: تأثیر اصطکاک کناره‌ها در آزمایش برش مستقیم روی خاک‌های اتساعی. a) بسیج شدن اصطکاک جداره‌ها b) افزایش مقاومت برشی تخمینی ناشی از اصطکاک جداره‌ها c) تأثیر اصطکاک کناره‌ها در آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس (Palmeira, 1987) ۳۸

شکل ۲-۲۰: منحنی تنش-کرنش سطح تماس ژئوممبرین-GCL که تغییرات مربوط به نحوه قرارگیری و اتصال ژئوممبرین-GCL روی بلوک صلب را نشان می‌دهد (Fox and Kim, 2008) ۳۹

شکل ۲-۲۱: تأثیر اعوجاج ژئوتکستایل بافته نشده بر نتایج برش مستقیم (Tupa, 1994) ۴۰

شکل ۲-۲۲: نتایج مطالعات فتوالاستیک روی آزمایش برش مستقیم. (a) غیر مسلح (b) مسلح کننده قائم (c) مسلح کننده مایل (Dyer, 1985) ۴۱

شکل ۲-۲۳: تأثیر مرز بالایی صلب روی نتایج آزمایش برش مستقیم. (a) مسلح نشده (b) مسلح شده (Palmeira, 1987) ۴۲

شکل ۲-۲۴: تنش کل داخلی در آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس. (**a**) تنش قائم روی مسلح کننده (**b**) تنش قائم روی صفحه مرکزی نمونه (c) تنش قائم در کف جعبه (Palmeira and Milligan, 1989(a)) ۴۳

شکل ۲-۲۵: توزیع تنش برشی ماکزیمم در نمونه مسلح شده در آزمایش برش مستقیم-نتایج المان محدود (Sieira, 2003) ۴۴

شکل ۲-۲۶: قطعات سوار شده در جعبه برش به ابعاد ۳۰۰×۳۰۰ میلیمتر (Athanasopoulos et al., 2002) ۴۵
شکل ۲-۲۷: مکانیزم اندرکنش در ژئوگرید (Lopes, 2002) ۴۷
شکل ۲-۲۸: نمایی از دستگاه برش مستقیم/ برون‌کششی (Cazzufi et al., 1993) ۵۱
شکل ۲-۲۹: مقایسه نتایج آزمایشها: ژئوتکستایل بافته نشده (Ingold, 1984) ۵۴
شکل ۲-۳۰: مقایسه نتایج آزمایشها: ژئوتکستایل بافته شده (Ingold, 1984) ۵۵
شکل ۲-۳۱: مقایسه نتایج آزمایشها: ژئوگرید (Ingold, 1984) ۵۵
شکل ۲-۳۲: جزئیات اتصال ژئوتکستایل در دستگاه برش مستقیم اصلاح شده (Lee and Manjunath, 2000) ۵۷
شکل ۳-۱: منحنی دانه بندی مصالح استفاده شده در آزمایش‌ها ۶۶
شکل ۳-۲: نمونه ای از ژئوتکستایل بافته نشده شرکت بهساز نسج ۶۷
شکل ۳-۳: تصویر کلی از دستگاه برش مستقیم و اجزاء مختلف آن ۶۸
شکل ۳-۴: نحوه قرارگیری لایه ژئوسینتتیک داخل خاک ۶۹
شکل ۳-۵: الگوی تغییر سرعت برش نسبت به جابجایی افقی ۷۱
شکل ۴-۱: نمودار تنش برشی- جابجایی افقی برای ماسه خشک با $\rho =$ ۱۵۰۰ kg/m^3 ($\sigma_n = ۶۰\ kPa$) ۷۶
شکل ۴-۲: نمودار جابجایی قائم- جابجایی افقی برای ماسه خشک با $\rho =$ ۱۵۰۰ kg/m^3 ($\sigma_n = ۶۰\ kPa$) ۷۶
شکل ۴-۳: نمودار تنش برشی ماکزیمم- تنش قائم برای ماسه خشک با $\rho =$ ۱۵۰۰ kg/m^3 ۷۷
شکل ۴-۴: نمودار تنش برشی- جابجایی افقی برای سطح تماس ماسه خشک-ژئوتکستایل با $\rho =$ ۱۵۰۰ kg/m^3 ($\sigma_n = ۶۰\ kPa$). ۷۷
شکل ۴-۵: نمودار جابجایی قائم- جابجایی افقی برای سطح تماس ماسه خشک- ژئوتکستایل ۷۸
شکل ۴-۶: نمودار تنش برشی ماکزیمم- تنش قائم برای سطح تماس ماسه خشک- ژئوتکستایل با $\rho =$ ۱۵۰۰ kg/m^3 ۷۸
شکل ۴-۷: نمودار $\phi_t/\phi_{t=0}$ یا $\delta_t/\delta_{t=0}$ با زمان برای ماسه خشک و سطح تماس ماسه-ژئوتکستایل در حالت $\rho =$ ۱۵۰۰ kg/m^3 ۸۰
شکل ۴-۸: نمودار تنش برشی- جابجایی افقی برای ماسه مرطوب با $\rho =$ ۱۵۰۰ kg/m^3 ($\sigma_n = ۶۰\ kPa$) ۸۱
شکل ۴-۹: نمودار جابجایی قائم- جابجایی افقی برای ماسه مرطوب با $\rho =$ ۱۵۰۰ kg/m^3 ($\sigma_n = ۶۰\ kPa$) ۸۱
شکل ۴-۱۰: نمودار تنش برشی ماکزیمم- تنش قائم برای ماسه مرطوب با $\rho =$ ۱۵۰۰ kg/m^3 ۸۲
شکل ۴-۱۱: نمودار تنش برشی- جابجایی افقی برای سطح تماس ماسه مرطوب- ژئوتکستایل ۸۲
شکل ۴-۱۲: نمودار جابجایی قائم- جابجایی افقی برای سطح تماس ماسه مرطوب- ژئوتکستایل ۸۳
شکل ۴-۱۳: نمودار تنش برشی ماکزیمم- تنش قائم برای سطح تماس ماسه مرطوب- ژئوتکستایل ۸۳
شکل ۴-۱۴: نمودار $\phi_t/\phi_{t=0}$ یا $\delta_t/\delta_{t=0}$ با زمان برای ماسه مرطوب و سطح تماس ماسه-ژئوتکستایل ۸۵
در حالت $\rho =$ ۱۵۰۰ kg/m^3 ۸۵
شکل ۴-۱۵۴: نمودار نسبت سختی معادل ماسه خشک در زمان‌های مختلف به سختی معادل ماسه خشک در زمان صفر در حالت
$\rho =$ ۱۵۰۰ kg/m^3 ($\sigma_n = ۶۰\ kPa$) ۸۵

شکل ۴-۱۶: نمودار نسبت سختی معادل ماسه مرطوب در زمان‌های مختلف به سختی معادل ماسه مرطوب در زمان صفر در حالت ($\sigma_n = ۶۰\ kPa$) $\rho =$ ۱۵۰۰ kg/m^3 ..... ۸۶
شکل ۴-۱۷: الگوی تغییر سرعت برش نسبت به جابجایی افقی ۹۲
شکل ۴-۱۸ : تغییرات نسبت تنش با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۲ در حالت سست برای تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ۹۳
شکل ۴-۱۹ : تغییرات جابجایی قائم با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۲ در حالت سست برای تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ۹۳
شکل ۴-۲۰ : تغییرات نسبت تنش با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۲ در حالت متراکم برای تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ۹۴
شکل ۴-۲۱ : تغییرات جابجایی قائم با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۲ در حالت متراکم برای تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ۹۴
شکل ۴-۲۲ : تغییرات نسبت تنش با جابجایی افقی برای اندرکنش ماسه نوع ۲ -ژئوتکستایل در حالت سست برای تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ۹۵
شکل ۴-۲۳ : تغییرات جابجایی قائم با جابجایی افقی برای اندرکنش ماسه نوع ۲ -ژئوتکستایل در حالت سست برای تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ۹۵
شکل ۴-۲۴ : تغییرات نسبت تنش با جابجایی افقی برای اندرکنش ماسه نوع ۲ -ژئوتکستایل در حالت متراکم برای تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ۹۶
شکل ۴-۲۵ : تغییرات جابجایی قائم با جابجایی افقی برای اندرکنش ماسه نوع ۲ -ژئوتکستایل در حالت متراکم برای تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ۹۶
شکل ۴-۲۶ : تغییرات نسبت تنش با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۱ در حالت سست برای تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ۹۷
شکل ۴-۲۷ : تغییرات جابجایی قائم با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۱ در حالت سست برای تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ۹۷
شکل ۴-۲۸ : تغییرات نسبت تنش با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۱ در حالت متراکم برای تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ۹۸
شکل ۴-۲۹ : تغییرات جابجایی قائم با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۱ در حالت متراکم برای تنش‌های قائم ۵۰ و ۱۰۰ کیلو پاسکال ۹۸
شکل ۴-۳۰: تغییرات تنش برشی با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۲ با دانسیته سست و سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۰
شکل ۴-۳۱ : منحنی تغییرات کاهش تنش با زمان در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه نوع ۲ با دانسیته سست و سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۱
شکل ۴-۳۲ : منحنی تغییرات $\tau_{relaxation}/\tau_0$ با زمان در محور نیمه لگاریتمی و در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه نوع ۲ با دانسیته سست و سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۱
شکل ۴-۳۳: تغییرات تنش برشی با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۲ با دانسیته سست و سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۲
شکل ۴-۳۴: منحنی تغییرات کاهش تنش با زمان در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه نوع ۲ با دانسیته سست و سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۲
شکل ۴-۳۵ : منحنی تغییرات $\tau_{relaxation}/\tau_0$ با زمان در محور نیمه لگاریتمی و در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه نوع ۲ با دانسیته سست و سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۳
شکل ۴-۳۶: تغییرات تنش برشی با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۲ -ژئوتکستایل با دانسیته سست و سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۴

شکل ۴-۳۷ : منحنی تغییرات کاهش تنش با زمان در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه نوع ۲ –ژئوتکستایل با دانسیته سست و سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۴

شکل ۴-۳۸ : منحنی تغییرات $\tau_{relaxation}/\tau_0$ با زمان در محور نیمه لگاریتمی و در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه نوع ۲ –ژئوتکستایل با دانسیته سست و سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۵

شکل ۴-۳۹: تغییرات تنش برشی با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۲ -ژئوتکستایل با دانسیته سست و سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۵

شکل ۴-۴۰ : منحنی تغییرات کاهش تنش با زمان در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه نوع ۲ –ژئوتکستایل با دانسیته سست و سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۶

شکل ۴-۴۱ : منحنی تغییرات $\tau_{relaxation}/\tau_0$ با زمان در محور نیمه لگاریتمی و در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه نوع ۲ –ژئوتکستایل با دانسیته سست و سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۶

شکل ۴-۴۲: تغییرات تنش برشی با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۲ با دانسیته متوسط و سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۷

شکل ۴-۴۳ : منحنی تغییرات کاهش تنش با زمان در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه نوع ۲ با دانسیته متوسط و سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۷

شکل ۴-۴۴ : منحنی تغییرات $\tau_{relaxation}/\tau_0$ با زمان در محور نیمه لگاریتمی و در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه نوع ۲ با دانسیته متوسط و سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۸

شکل ۴-۴۵: تغییرات تنش برشی با جابجایی افقی برای ماسه نوع ۲ با دانسیته متوسط و سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۸

شکل ۴-۴۶ : منحنی تغییرات کاهش تنش با زمان در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه نوع ۲ با دانسیته متوسط و سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۹

شکل ۴-۴۷ : منحنی تغییرات $\tau_{relaxation}/\tau_0$ با زمان در محور نیمه لگاریتمی و در تراز تنش‌های مختلف برای ماسه نوع ۲ با دانسیته متوسط و سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۰۹

شکل ۴-۴۸ : تغییرات آسودگی تنش با سطح تنش برشی برای ماسه تنها در دو دانسیته سست و متوسط در سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۱۰

شکل ۴-۴۹ : تغییرات آسودگی تنش با سطح تنش برشی برای ماسه تنها در دو دانسیته سست و متوسط در سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۱۰

شکل ۴-۵۰ : تغییرات آسودگی تنش با سطح تنش برشی برای دو حالت ماسه تنها و سطح تماس ماسه -ژئوتکستایل با دانسیته سست در سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۱۱

شکل ۴-۵۱ : تغییرات آسودگی تنش با سطح تنش برشی برای دو حالت ماسه تنها و سطح تماس ماسه -ژئوتکستایل با دانسیته سست در سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۱۱

شکل ۴-۵۲ : تغییرات آسودگی تنش با سطح تنش برشی برای ماسه تنها با دانسیته سست در سرعت‌های برش ۰/۵ و ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۱۲

شکل ۴-۵۳ : تغییرات آسودگی تنش با سطح تنش برشی برای ماسه تنها با دانسیته متوسط در سرعت‌های برش ۰/۵ و ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۱۲

شکل ۴-۵۴: تغییرات آسودگی تنش با سطح تنش برشی برای سطح تماس ماسه-ژئوتکستایل با دانسیته سست در سرعت‌های برش ۰/۵ و ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۱۳

شکل ۵-۱: دامنه کرنش برای کارایی سازه‌های خاکی (White et al., 2001) ۱۱۵

شکل ۵-۲: روش پردازش تصویری (White et al., 2003) ۱۱۹

شکل ۵-۳: نحوه تشکیل صفحه برازش (White et al., 2003) ۱۱۹

شکل ۵-۴: الگوریتم پردازش تصویری (White et al., 2003) ۱۲۰

شکل ۵-۵: میدان تغییر شکل الف) قائم ب) افقی و ج) میدان کرنش برشی ماکزیمم در خاک غیر مسلح (Knappett et al., 2005).۱۲۲

شکل ۵-۶: میدان تغییر شکل الف) قائم ب) افقی و ج) میدان کرنش برشی ماکزیمم در خاک مسلح قبل از زوال (Knappett et al., 2005) ۱۲۲

شکل ۵-۷: میدان تغییر شکل الف) قائم ب) افقی و میدان کرنش ج) برشی د) حجمی خاک مسلح در حد پلاستیک (Knappett et al., 2005) ۱۲۳

شکل ۵-۸: تغییرات و اصلاحات انجام شده روی دستگاه برش مستقیم ۱۲۵

شکل ۵-۹ : کانتور جابجایی قائم بر حسب میلی‌متر برای مدت زمان‌های مختلف بارگذاری شامل a) ۱۵ دقیقه ، b) ۱ ساعت، c) ۲ ساعت، d) ۳ ساعت، e) ۶ ساعت، f) ۱۲ ساعت ۱۲۸

شکل ۵-۱۰ : کانتور جابجایی قائم بر حسب میلی‌متر برای مدت زمان‌های مختلف بارگذاری شامل a) ۱۵ دقیقه، b) ۳۰ دقیقه، c) ۱ ساعت، d) ۲ ساعت، e) ۳ ساعت، f) ۶ ساعت، g) ۱۲ ساعت ۱۳۰

شکل ۵-۱۱: محدوده بررسی تغییرشکل‌های خاک با استفاده از روش PIV ۱۳۱

شکل ۵-۱۲ : کانتور تغییر شکل افقی ماسه تنها در حالت سست و با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه در جابجایی a) ۱۰ م .م، b) ۲۰ م.م ۱۳۱

شکل ۵-۱۳ : کانتور تغییر شکل قائم ماسه تنها در حالت سست و با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه در جابجایی a) ۱۰ م .م، b) ۲۰ م.م ۱۳۲

شکل ۵-۱۴ : کانتور تغییر شکل افقی ماسه تنها در حالت دانسیته متوسط و با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه در جابجایی a) ۱۰ م .م، b) ۲۰ م.م ۱۳۳

شکل ۵-۱۵ : کانتور تغییر شکل قائم ماسه تنها در حالت دانسیته متوسط و با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه در جابجایی a) ۱۰ م .م، b) ۲۰ م.م ۱۳۴

شکل ۵-۱۶ : کانتور تغییر شکل افقی ماسه سست با سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۳۵

شکل ۵-۱۷ : کانتور تغییر شکل افقی ماسه با دانسیته متوسط و با سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۳۵

شکل ۵-۱۸ : تغییرات بردار جابجایی برای نمونه **a**) متراکم و **b**) سست (Liu et al., 2005) ۱۳۶

شکل ۵-۱۹ : کانتور تغییر شکل افقی خاک برای اندر کنش ماسه سست-ژئوتکستایل با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه در جابجایی a) ۲ م .م، b) ۵ م.م، c) ۱۰ م.م، d) ۱۵ م.م، e) ۲۰ م.م ۱۳۸

شکل ۵-۲۰ : کانتور تغییر شکل قائم خاک برای اندر کنش ماسه سست-ژئوتکستایل با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه در جابجایی a) ۲ م .م، b) ۵ م.م، c) ۱۰ م.م، d) ۱۵ م.م، e) ۲۰ م.م ۱۴۰

شکل ۵-۲۱: مقایسه نتایج PIV با LVDT برای منحنی جابجایی قائم - جابجایی افقی برای سطح تماس ماسه-ژئوتکستایل در حالت سست ۱۴۱

شکل ۵-۲۲: مقایسه نتایج PIV با LVDT برای منحنی جابجایی قائم - جابجایی افقی برای سطح تماس ماسه-ژئوتکستایل در حالت دانسیته متوسط ۱۴۱

شکل ۵-۲۳ : کانتور چرخش ذرات خاک برای اندرکنش ماسه سست-ژئوتکستایل با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه در جابجایی a) ۲ م .م، b) ۵ م.م، c) ۱۰ م.م، d) ۱۵ م.م، e) ۲۰ م.م ۱۴۳

شکل ۵-۲۴ : کانتور تغییر شکل افقی خاک برای اندر کنش ماسه سست-ژئوتکستایل با سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۴۴

شکل ۵-۲۵ : کانتور تغییر شکل قائم خاک برای اندر کنش ماسه سست-ژئوتکستایل با سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۴۴

شکل ۵-۲۶ : کانتور چرخش ذرات خاک برای اندر کنش ماسه سست-ژئوتکستایل با سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۴۵

شکل ۵-۲۷ : کانتور تغییر شکل افقی خاک برای اندرکنش ماسه متراکم-ژئوتکستایل با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۴۵

شکل ۵-۲۸ : کانتور تغییر شکل قائم خاک برای اندرکنش ماسه متراکم-ژئوتکستایل با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۴۶

شکل ۵-۲۹ : کانتور چرخش ذرات خاک برای اندرکنش ماسه متراکم-ژئوتکستایل با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۴۶

شکل ۵-۳۰ : کانتور تغییر شکل افقی خاک برای اندرکنش ماسه متراکم-ژئوتکستایل با سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۴۷

شکل ۵-۳۱ : کانتور تغییر شکل قائم خاک برای اندرکنش ماسه متراکم-ژئوتکستایل با سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۴۷

شکل ۵-۳۲ : کانتور چرخش ذرات خاک برای اندرکنش ماسه متراکم-ژئوتکستایل با سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۴۸

شکل ۵-۳۳: پروفیل تغییر شکل افقی خاک داخل جعبه برش برای اندرکنش ماسه سست –ژئوتکستایل با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۴۹

شکل ۵-۳۴: پروفیل تغییر شکل قائم خاک داخل جعبه برش برای اندرکنش ماسه سست –ژئوتکستایل با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۴۹

شکل ۵-۳۶: پروفیل تغییر شکل افقی خاک داخل جعبه برش برای اندرکنش ماسه سست –ژئوتکستایل با سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۵۰

شکل ۵-۳۷: پروفیل تغییر شکل قائم خاک داخل جعبه برش برای اندرکنش ماسه سست –ژئوتکستایل با سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۵۱

شکل ۵-۳۸ : پروفیل چرخش ذرات خاک برای اندرکنش ماسه سست –ژئوتکستایل با سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۵۱

شکل ۵-۳۹: پروفیل تغییر شکل افقی خاک داخل جعبه برش برای اندرکنش ماسه متراکم –ژئوتکستایل با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۵۲

شکل ۵-۴۰: پروفیل تغییر شکل قائم خاک داخل جعبه برش برای اندرکنش ماسه متراکم –ژئوتکستایل با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۵۳

شکل ۵-۴۱ : پروفیل چرخش ذرات خاک برای اندرکنش ماسه متراکم –ژئوتکستایل با سرعت برش ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۵۳

شکل ۵-۴۲: پروفیل تغییر شکل افقی خاک داخل جعبه برش برای اندرکنش ماسه متراکم –ژئوتکستایل با سرعت برش ۵ میلی¬متر بر دقیقه ۱۵۴

شکل ۵-۴۳ : پروفیل تغییر شکل قائم خاک داخل جعبه برش برای اندرکنش ماسه متراکم –ژئوتکستایل با سرعت برش ۵ میلی-متر بر دقیقه ۱۵۵
شکل ۵-۴۴ : پروفیل چرخش ذرات برای اندرکنش ماسه متراکم –ژئوتکستایل با سرعت برش ۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۵۵
شکل۵-۴۵ : مقایسه پروفیل تغییرشکل افقی خاک برای اندرکنش ماسه-ژئوتکستایل در دو حالت ماسه سست و متراکم ۱۵۶
شکل ۵-۴۶ : مقایسه پروفیل تغییر شکل قائم خاک برای اندرکنش ماسه متراکم-ژئوتکستایل در دو حالت سرعت برش ۵ و ۰/۵ میلیمتر بر دقیقه ۱۵۷
شکل ۶-۱: منحنی‌های تنش-کرنش برای چهار نوع ویسکوزیته مصالح (Tatsuoka et al., 2008(a)) ۱۶۰
شکل ۶-۲: چارچوب سه مؤلفه ای برای مدل ساختاری رفتار تنش-کرنش مصالح (Di Benedetto et al., 2002; Tatsuoka et al., 2002) ۱۶۱
شکل ۶-۳: مش بندی مدل برش مستقیم ۱۶۶
شکل ۶-۳: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای ماسه نوع ۲ تنها در حالت سست بدون در نظر گرفتن ویسکوزیته ۱۶۸
شکل ۶-۴: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای ماسه نوع ۲ تنها در حالت سست بدون در نظر گرفتن ویسکوزیته ۱۶۸
شکل ۶-۷: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای ماسه ۲ تنها در حالت سست و تنش قائم ۵۰ کیلو پاسکال با در نظر گرفتن ویسکوزیته ۱۷۰
شکل ۶-۱۰: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای ماسه ۲ تنها در حالت سست و تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال با در نظر گرفتن ویسکوزیته ۱۷۱
شکل ۶-۱۱: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی برای ماسه ۱ تنها در حالت سست و بدون در نظر گرفتن ویسکوزیته ۱۷۲
شکل ۶-۱۲: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی برای ماسه ۱ تنها در حالت سست و بدون در نظر گرفتن ویسکوزیته ۱۷۳
شکل ۶-۱۵: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای ماسه ۱ تنها در حالت سست و تنش قائم ۵۰ کیلو پاسکال با در نظر گرفتن ویسکوزیته ۱۷۵
شکل ۶-۱۸: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای ماسه ۱ تنها در حالت سست و تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال با در نظر گرفتن ویسکوزیته ۱۷۶

فهرست جدول ها

جدول ۲-۱: پیشینه مطالعات انجام شده در ارتباط با پدیده کهولت در ماسه‌ها ۳۲
جدول ۲-۲: مقایسه نتایج آزمایشهای برش مستقیم و برون کششی (Chenggang, 2004) ۵۰
جدول ۲-۳: ابعاد دستگاه برش مستقیم/ برونکششی (Cazzufi et al., 1993) ۵۱
جدول ۲-۴- پیشینه مطالعات انجام شده در ارتباط با اندرکنش خاک-ژئوسینتتیک ۶۱
جدول ۳-۱: مشخصات ماسه استفاده شده ۶۵
جدول ۳-۲: مشخصات ژئوتکستایلهای بکار گرفته شده ۶۶
جدول ۳-۳- خلاصه تعداد آزمایشهای انجام شده مربوط به اثر زمان قبل از برش ۷۰
جدول ۳-۴- خلاصه تعداد آزمایشهای انجام شده مربوط به بررسی اثر زمان حین برش ۷۲
جدول ۳-۵- خلاصه تعداد آزمایشهای انجام شده مربوط به بررسی پدیده آسودگی تنش ۷۲
جدول ۴-۱: مقادیر زاویه اصطکاک ماسه و ماسه- ژئوتکستایل برای زمان‌های مختلف در حالت خشک ۷۹
جدول ۴-۲: مقادیر زاویه اصطکاک ماسه و ماسه- ژئوتکستایل برای زمان‌های مختلف در حالت مرطوب ۸۴
جدول ۶-۱ پارامترهای ورودی برنامه برای ماسه نوع ۲ با دانسیته سست (بدون ویسکوزیته) ۱۶۹
جدول ۶-۲: مقادیر پارامترهای ویسکوزیته برای ماسه نوع ۲ با دانسیته سست و تنش قائم ۵۰ کیلو پاسکال ۱۷۰
جدول ۶-۳: مقادیر پارامترهای ویسکوزیته برای ماسه نوع ۲ با دانسیته سست و تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال ۱۷۱
جدول ۶-۴ پارمترهای ورودی مدل برای ماسه نوع ۱ در حالت سست و بدون در نظر گرفتن ویسکوزیته ۱۷۳
جدول ۶-۵: مقادیر پارامترهای ویسکوزیته برای ماسه نوع ۱ در حالت سست و تنش قائم ۵۰ کیلو پاسکال ۱۷۴
جدول ۶-۶: مقادیر پارامترهای ویسکوزیته برای ماسه نوع ۱ در حالت سست و تنش قائم ۱۰۰ کیلو پاسکال ۱۷۶

فصل اول

مقدمه

۱-۱- کلیات

تجربه نشان می‌دهد که خواص اجسام با گذشت زمان تغییر می‌کند. در خاک‌ها، در بعضی موارد این تغییرات با توجه به عملکردشان مفید و برخی زیان‌آور است. تغییرات وابسته به زمان در رسوبات چسبنده به صورت گسترده شناخته شده است. رس‌ها تراکم ثانویه قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان می‌دهند که منجر به افزایش در سختی و فشار پیش تحکیمی خاک می‌شود (Leonards and Altschaem, 1964). در این مورد، تغییرات وابسته به زمان اثر مفیدی روی مشخصات تغییر شکل رس دارد. مطالعات متوالی زیادی روی کهولت خاک‌های چسبنده انجام شده است که در آن‌ها افزایش وابسته به زمان در مدول الاستیسیته، اتساع و فشار پیش تحکیمی دیده می‌شود.

طی سالیان گذشته، نتایج مطالعات نشان می‌دهند که رسوبات تازه یا ماسه تمیز متراکم شده نیز افزایش قابل ملاحظه‌ای در سختی و مقاومت با زمان دارند (Mesri, 1990; Mitchell Daramola, 1980 ; and Solymar, 1984; Schmertmann, 1987). بیشتر این مشاهدات در آزمایش‌های درجا مانند آزمایش نفوذ استاندارد و مخروط دیده شده است. این پدیده به عنوان اثر کهولت شناخته شده است.

شاید یک مورد برای اثبات اثر کهولت، سد Jebba باشد که طی چندین مقاله توسط Mitchell and Solymar (1984) و Mitchell (1986) و Solymar (1984) گزارش شده است. محل سد Jebba شامل ۷۰ متر ماسه آبرفت بود که تا عمق ۴۰ متری سست بود. برای آماده کردن پی جهت جلوگیری از نشست‌های نامتوازن بزرگ و همچنین کاهش پتانسیل روانگرایی، تصمیم گرفته شد که محل مورد نظر به وسیله تراکم لرزه ای و انفجار عمیق متراکم شود. بعد از انفجار مقدار مقاومت نفوذ کمتری ثبت شد، با وجود اینکه سطح نشست کرده بود. آزمایش‌های نفوذ در طول چندین ماه بعد تکرار شد. با گذشت چند ماه در بیشتر نقاط مقاومت نوک مخروط اندازه‌گیری شده بیشتر از دو برابر حالت قبل شده بود. افزایش مشابهی نیز بعد از تراکم لرزه‌ای مشاهده شد. در همه موارد نشست سطح بعد از متراکم شدن خیلی ناچیز بوده است. وقتی این گزارش در سال ۱۹۸۶ انتشار یافت این رفتار خاک به صورت تعجب برانگیزی مورد سؤال قرار گرفت.

متأسفانه مکانیک خاک سنتی برای تفسیر رفتار توصیف شده در بالا ابزاری در دست ندارد. به هر حال همان‌طور که در مطالعات موردی دیده می‌شود، شناخت فرآیند قابل پاسخگو برای پدیده کهولت جهت طراحی صحیح و تفسیر کنترل کیفیت آزمایش‌ها بعد از تراکم درجا لازم و ضروری به نظر می‌رسد. برای

ارزیابی این موضوع بیشتر از آزمایش‌های نفوذ استاندارد و نفوذ مخروط استفاده شده است. جهت توسعه دادن روابطی بین مقاومت نفوذ مخروط و پارامترهای ژئوتکنیکی همچون دانسیته نسبی، زاویه اصطکاک و تاریخچه تنش-کرنش، تست‌های آزمایشگاهی زیادی انجام شده است. به هر حال استفاده از روابطی که برای نمونه‌های تازه آماده شده توسعه یافته است جهت پیش بینی رفتار واقعی رسوبات طبیعی خیلی اهمیت دارد. در حقیقت باید فاکتور زمان جهت در نظر گرفتن کهولت لایه‌های آزمایش شده معرفی شود (Skempton, 1986). اهمیت دیگر این موضوع در پیش بینی مقاومت سیکلی لایه‌های ماسه‌ای است. آیا مقاومت روانگرایی در طول کهولت بهبود پیدا می‌کند؟ اگر مقاومت روانگرایی ماسه با زمان بعد از ته نشست افزایش یابد، ارزیابی پتانسیل روانگرایی تست‌های آزمایشگاهی که برای نمونه‌های تازه تحکیم یافته انجام شده است، محافظه کارانه خواهد بود.

حال سؤالات مهمی که در این زمینه مطرح می‌شود این است که: ۱- چه مکانیسمی تغییرات مقاومتی و سختی با زمان را کنترل می‌کند؟ ۲- تحت چه شرایطی کهولت اتفاق می‌افتد؟ چه مقدار و با چه سرعتی؟

کهولت در مهندسی ژئوتکنیک یک موضوع مهم و بحث برانگیزی شده است. بیست و پنجمین سخنرانی ترزاقی که توسط Schmertmann در سال ۱۹۸۹ ارائه شد به این موضوع اختصاص یافت. در نسخه های منتشر شده سخنرانی، Schmertman (1991) بیان کرد که برخلاف تفکر رایج، افزایش مقاومت و سخت شدگی خاک کاملاً در اثر اصطکاک روی می‌دهد. تفکر رایج بر اساس پیشنهادی که توسط Mitchell and Solymar (1984) ارائه شده بود این بود که در آن افزایش در مقاومت نفوذ مخروطی مشاهده شده در سد Jebba را ناشی از اثر شیمیایی می‌دانست که به علت تجزیه و رسوب سیلیکا و یا دیگر مصالح به عنوان عامل چسبنده در تماس ذرات می‌باشد.

بعد از انتشار تاریخچه سد Jebba در سال ۱۹۸۴ مطالعات مختلفی در خصوص اثرات کهولت روی ماسه‌ها انجام شد. هر چند که بیشتر مطالعات شامل تحقیقات صحرایی می‌شد، مطالعات دیگری نیز در آزمایشگاه روی ماسه انجام گرفت که شامل تغییرات در مدول کرنش برشی، هدایت‌پذیری الکتریکی و مقاومت روانگرایی و ... می‌باشد. یکی از موارد قابل توجه در این مطالعات این است که علی‌رغم افزایش تعداد