

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده : عمران

گروه : مکانیک خاک و پی

بررسی نشست خاک‌های فروریزی برای حالت نشت فرآورده‌های نفتی

صابر نوکنده

استاد راهنما :

دکتر سید مهدی حسینی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۹۴

دانشگاه شاهرود

دانشکده : عمران

گروه : خاک و پی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای صابر نوکنده به شماره دانشجویی: ۹۲۱۴۷۴۴

تحت عنوان: بررسی نشست خاک‌های فروریزی برای حالت نشت فرآورده‌های نفتی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم بہ:

خدائی کہ آفرید

جہان را، انسان را، عقل را، علم را،

معرفت را، عشق را

و بہ کسانی کہ عشقان را در وجودم دمید...

حمد و سپاس یکتای بی‌همتا را که لطفش بر ما عیان است، ادای شکرش را بیچ زبان و دریای
فضلش را بیچ کرا ن نیست و اگر در این وادی، مستقیم، همه محبت اوست. الهی ای مهربانتر از ما، از تومی خواهیم همه
کسانی را که حتی ذره ای در انجام این امر مریاری نموده اند، در سایه لطف و محبت بی‌کرانت، سلامت، شادکام و موفق
دار.

کمال شکر را از استاد عزیزم دکتر سید مهدی حسینی دارم بابت راهنمایی های بی‌دینشان

همچنین از دکتر جبرئیل نوکنده و مهندس کلاتیری که با لطف و کمک های خود کام بزرگی در انجام این اثر

برداشتند

در آخر از زحماتی که پدر و مادرم در تمام مراحل زندگیم کشیدند و به بیچ شکل قادیبه جبران این زحمات

نیستم جز بوسه بردستان پر مهرشان

صابر نوکنده

تعهد نامه

اینجانب صابر نوکنده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک خاک و پی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه : **بررسی نشست خاک‌های فروریزی برای حالت نشست فرآورده‌های نفتی تحت راهنمایی دکتر سید مهدی حسینی** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « **Shahrood University** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

آلودگی نفتی^۱ در طبیعت مشکلات زیست محیطی برای آب، خاک و هوا به وجود می‌آورد. آلوده شدن خاک و نشت فرآورده‌های نفتی موجب بروز مشکلاتی برای انسان و موجودات زنده می‌شود. برای رفع آلودگی خاک روش‌های گوناگونی ارائه شده است، اما در مواردی هم امکان پاکسازی این آلودگی‌ها وجود ندارد. به طور کلی از دیدگاه ژئوتکنیکی تغییر پارامترهای مهندسی خاک ناشی از آلودگی نفتی برای انواع پروژه‌های عمرانی از جمله راهسازی، پی سازه‌های مختلف، گودبرداری، پایداری شیب‌ها و سدسازی حائز اهمیت است. به همین منظور محققان با تحقیق بر روی انواع مختلف خاک‌ها سعی در تعیین رفتار خاک‌های مختلف در شرایط آلودگی به انواع آلاینده داشته‌اند. از این جهت که بر روی رفتار خاک‌های فروریزشی^۲ در اثر نشت فرآورده‌های نفتی مطالعه‌ای انجام نشده بود، در این تحقیق به بررسی میزان فروریزش خاک‌های رمبنده^۳ در اثر نشت فرآورده‌های نفتی پرداخته شده است.

نمونه‌گیری‌ها از خاک فروریزشی به صورت دست‌نخورده از منطقه کلان استان گلستان انجام شده است. آزمایش‌ها به وسیله دستگاه تحکیم معمولی و دستگاه تحکیم با قابلیت کنترل مکش که در دانشگاه شاهرود ساخته شد، بررسی شدند. نمونه‌ها یا بدون آلودگی به صورت کامل با آب اشباع شدند یا به صورت جزئی با ۰.۲٪، ۰.۴٪، ۰.۶٪، ۰.۸٪، ۱.۰٪ آلوده شدند و با آب اشباع شدند یا در شرایط اشباع کامل با نفت چراغ و گازوئیل قرار گرفتند. همچنین میزان جذب آب و نشست در بار ثابت ۲۰۰ کیلوپاسکال در مکش‌های متغیر برای نمونه آلوده و نمونه‌ی بدون آلودگی بررسی و مقایسه صورت گرفت. نتایج نشان داد که دست‌خوردگی باعث کاهش فروریزش می‌شود و افزایش درصدی آلاینده باعث ایجاد روند ثابت افزایشی یا کاهشی نمی‌شود؛ اما میزان فروریزش نمونه‌ها در اشباع‌سازی کامل توسط مواد آلاینده نسبت به حالت اشباع با آب ناچیز می‌باشد. در آزمایش تحکیم با بار ثابت و مکش متغیر میزان پتانسیل فروریزش در مکش‌های مختلف برای نمونه با ۰.۶٪ آلودگی نسبت به نمونه آلوده‌ی

1 Oil contamination

2 Collapsible soils

3 loess

اشباع شده با آب مقدار ناچیزی کاهش فروریزش داشته است و میزان جذب آب نیز برای نمونه آلوده کمتر از میزان جذب آب برای نمونه بدون آلودگی بوده است.

کلمات کلیدی: آلودگی نفتی، خاک‌های رمبنده، فروریزش، تحکیم اشباع و غیراشباع

فهرست مطالب

۱-۱	مقدمه	۱
۲-۱	اهداف تحقیق	۳
۳-۱	فصل بندی پایان نامه	۴
۲-۲	فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته	۵
۱-۲	مقدمه	۶
۲-۲	آلودگی در خاک‌ها	۶
۳-۲	خاک‌های فروریزی	۲۱
۱-۳-۲	عوامل مؤثر بر میزان فروریزش خاک	۲۷
۲-۳-۲	روش‌های شناسایی خاک‌های فروریزی	۳۰
۳-۳-۲	بررسی رفتار فروریزی خاک با تغییرات مکش ساختاری	۳۲
۴-۲	مشخصات خاک لس	۳۵
۵-۲	مفهوم مکش در خاک و روش‌های اندازه‌گیری آن:	۳۶
۶-۲	تعیین منحنی مشخصه آب-خاک	۳۸
۱-۶-۲	ویژگی‌های منحنی مشخصه آب-خاک	۳۸
۳-۳	فصل سوم: نحوه انجام آزمایش‌ها و نتایج شناسایی خاک	۴۱
۱-۳	مقدمه	۴۲

- ۲-۳ نمونه‌گیری دست نخورده در محل و آزمایشگاه ۴۲
- ۱-۲-۳ انتخاب محل نمونه‌گیری ۴۲
- ۲-۲-۳ نحوه نمونه‌گیری در محل ۴۵
- ۳-۲-۳ نحوه نمونه‌گیری دست نخورده آزمایشگاهی از نمونه صحرایی ۴۶
- ۴-۲-۳ نحوه نمونه‌گیری بازسازی شده آزمایشگاهی ۴۷
- ۳-۳ آزمایش‌های اولیه برای شناسایی خاک ۴۸
- ۱-۳-۳ چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک (Gs): ۴۸
- ۲-۳-۳ آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری ۴۸
- ۳-۳-۳ آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی و تعیین وزن مخصوص خشک خاک ۵۰
- ۴-۳-۳ حد خمیری و حد روانی ۵۱
- ۴-۳ آلاینده‌های مورد استفاده ۵۱
- ۵-۳ آزمایش‌های تحکیم یگانه و دوگانه ۵۲
- ۶-۳ آزمایش فروریزش ۵۴
- ۱-۶-۳ روش انجام آزمایش ۵۴
- ۲-۶-۳ برنامه آزمایش‌های فروریزش ۵۴
- ۷-۳ آزمایش فروریزش با قابلیت کنترل مکش ساختاری ۵۵
- ۱-۷-۳ روش انجام آزمایش ۵۵
- ۲-۷-۳ دستگاه تحکیم با قابلیت کنترل مکش: ۵۶
- ۱-۲-۷-۳ اشباع سازی دیسک سرامیکی ۶۰

۶۱.....	روش‌های موجود برای تعیین منحنی مشخصه آب- خاک	۸-۳
۶۳.....	روش فیلتر کاغذی	۱-۸-۳
۶۵.....	نتیجه‌گیری	۹-۳
۶۷.....	فصل چهارم: نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها	-۴
۶۸.....	مقدمه	۱-۴
۶۸.....	نتایج حاصل از آزمایش فروریزش اشباع	۲-۴
۶۸.....	خاک اشباع شده با آب	۱-۲-۴
۷۱.....	خاک اشباع شده با آلاینده‌ها	۲-۲-۴
۷۵.....	خاک آلوده اشباع شده با آب	۳-۲-۴
۸۰.....	تعیین منحنی مشخصه آب- خاک با استفاده از کاغذ صافی	۳-۴
۸۸.....	تاثیر مکش بر رفتار خاک آلوده و بدون آلودگی	۴-۴
۹۱.....	پتانسیل فروریزش در آزمایش‌های ادومتر با قابلیت کنترل مکش	۵-۴
۹۳.....	فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات	-۵
۹۴.....	مقدمه	۱-۵
۹۴.....	نتایج کلی	۲-۵
۹۵.....	پیشنهادات	۳-۵
۹۷.....	منابع	

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ تاثیر نفت خام بر درصد رطوبت اپتیمم و وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌ها (Khamehchiyan, 2007) ۸
- شکل ۲-۲ تاثیر نفت خام بر پارامترهای مقاومت برشی خاک‌ها (Khamehchiyan, 2007) ۸
- شکل ۳-۲ عکس SEM از تاثیر آلودگی در ساختار خاک ریزدانه (Rahman, 2007) ۹
- شکل ۴-۲ مدل شماتیک ذرات خاک در مواجهه با نفت خام (Rahman, 2007) ۹
- شکل ۵-۲ مدل شماتیک تاثیر افزودن آب به خاک آلوده شده با نفت خام (Rahman, 2007) ۱۰
- شکل ۶-۲ نمودار موهر کولمب خاک آلوده و بدون آلودگی (Rahman, 2007) ۱۱
- شکل ۷-۲ مقایسه نرخ فشار تورم خاک آلوده و بدون آلودگی ۱۲
- شکل ۸-۲ تاثیر نفت خام بر روی حدود اتربرگ و شاخص خمیری خاک ریزدانه (Kermani and Ebadi, 2012) ۱۳
- شکل ۹-۲ تاثیر آب و آلاینده بر چسبندگی خاک ریزدانه (Kermani and Ebadi, 2012) ۱۴
- شکل ۱۰-۲ تاثیر آب و آلاینده بر زاویه اصطکاک داخلی خاک ریزدانه (Kermani and Ebadi, 2012) ۱۴
- شکل ۱۱-۲ عکس SEM تاثیر آب و گازوئیل بر خاک کائولینیت (a) خاک بدون آلودگی (b) خاک با ۱۲٪ آب (c) خاک با ۱۲٪ گازوئیل (d) خاک با ۱۲٪ آب و ۱۲٪ گازوئیل (Khosravi et al, 2013) ۱۵
- شکل ۱۲-۲ حدود اتربرگ و شاخص خمیری کائولینیت با درصدهای مختلف نفت خام (Khosravi et al, 2013) ۱۶
- شکل ۱۳-۲ تاثیر گازوئیل بر مشخصات تحکیم خاک کائولینیت (Khosravi et al, 2013) ۱۷
- شکل ۱۴-۲ تنش برشی-تغییر مکان جانبی برای خاک غیراشباع آلوده به نفت خام (الف) صفر درصد، (ب) ۲٪، (ج) ۶٪ (Mohammadi and Yasrobi, 2010) ۱۹
- شکل ۱۵-۲ نحوه قرار گرفتن و زاویه قطره آب بر روی سطح خاک آلوده به روغن (Lourenco et al,) ۱۵

- ۲۱ (2012)
- شکل ۲-۱۶ انواع مختلف نیروهای بین دانه ای در ساختارهای فروریزی (Elkady, 2002) ۲۴
- شکل ۲-۱۷ فرایند فروریزش خاک ماسه‌ای با پیوندهای رسی در اثر افزایش رطوبت (Rogers, 1995) ۲۴
- شکل ۲-۱۸ عکس‌های میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی‌های متفاوت الف) بزرگنمایی ۱۰ برابر ب) ۱۰۰ برابر ج) ۱۰۰۰ برابر د) ۱۰۰۰ برابر (Mohammad Hosseini, 2014) ۲۶
- شکل ۲-۱۹ اثر تغییرات درصد رس بر میزان فروریزش (Assallay et al., 1998) ۲۸
- شکل ۲-۲۰ رابطه پتانسیل فروریزش با تراکم نسبی (Ng et al., 1998) ۲۸
- شکل ۲-۲۱ اثر اعمال سیکل‌های ترشدگی بر میزان فروریزش (Chiu et al., 1998) ۳۰
- شکل ۲-۲۲ نسبت فروریزش نسبی به فروریزش کل خاک با تغییرات مکش ماتریسی (Houstoun et al., 2001) ۳۳
- شکل ۲-۲۳ سطوح حالت برای نمونه‌های غیراشباع با الف) ساختار پایدار ب) ساختار ناپایدار (Fredlund, 1996) ۳۴
- شکل ۲-۲۴ نحوه تشکیل خاک‌های لسی ۳۵
- شکل ۲-۲۵ نمودار آزاد پوسته قابل انقباض ۳۷
- شکل ۲-۲۶ نمودار مشخصه آب خاک ۳۹
- شکل ۳-۱ مناطق مورد بررسی قرار گرفته جهت نمونه‌گیری الف) منطقه هزار پیچ ب) منطقه بالاجاده ج) منطقه کلالة محل انتخاب شده جهت نمونه‌گیری ۴۳
- شکل ۳-۲ پدیده فروریزش در خاک منطقه مورد مطالعه ۴۴
- شکل ۳-۳ دیواره پایدار خاک لس و حالت دندان‌دندانه در دیواره ۴۴
- شکل ۳-۴ مراحل نمونه‌گیری از خاک منطقه الف) انتخاب محل نمونه‌گیری ب) لایه خاک نباتی و خاک لس ج) نحوه نمونه برداری د) آماده‌سازی نمونه ۴۶

- شکل ۳-۵ نحوه برداشت نمونه آزمایشگاهی ۴۷
- شکل ۳-۶ نمودار دانه‌بندی از آزمایش الک تر و هیدرومتری ۴۹
- شکل ۳-۷ آزمایش تحکیم یگانه در خاک‌های فروریزی ۵۳
- شکل ۳-۸ آزمایش تحکیم دوگانه در خاک‌های فروریزی ۵۳
- شکل ۳-۹ دیسک سرامیکی و نحوه قرار گرفتن آن درون پایه کف دستگاه ۵۷
- شکل ۳-۱۰ دستگاه تحکیم با قابلیت کنترل مکش ۵۹
- شکل ۳-۱۱ (الف) قسمت‌های مختلف محفظه ادمتر با قابلیت کنترل مکش (ب) شماتیک محفظه ادمتر با قابلیت کنترل مکش ۶۰
- شکل ۳-۱۲ استفاده از روش انتقال محوری (a) شرایط اتمسفری (b) انتقال محورها ۶۳
- شکل ۳-۱۳ نمونه خاک جهت آزمایش فیلتر کاغذی ۶۴
- شکل ۴-۱ نمودار مقایسه فروریزش خاک دست نخورده و بازسازی شده بدون آلودگی اشباع شده با آب ۷۱
- شکل ۴-۲ نمونه‌های اشباع شده با آب، گازوئیل و نفت چراغ در انتهای آزمایش (الف) گازوئیل، (ب) نفت چراغ، (ج) آب ۷۴
- شکل ۴-۳ مقایسه تاثیر اشباع سازی خاک دست نخورده و بازسازی شده با آب و آلاینده‌های نفتی بر روی پتانسیل فروریزش ۷۵
- شکل ۴-۴ نمودار مقایسه فروریزش خاک بازسازی شده با درصد وزنی‌های مختلف نفت چراغ ۷۹
- شکل ۴-۵ تغییرات معیار فروریزش نمونه‌های آلوده شده با درصد‌های مختلف گازوئیل و نفت چراغ ۸۰
- شکل ۴-۶ نمودار نگهداشت آب بر حسب مدل‌های نوع اول برای خاک بدون آلودگی ۸۲
- شکل ۴-۷ نمودار نگهداشت آب بر حسب مدل‌های نوع دوم برای خاک بدون آلودگی ۸۳
- شکل ۴-۸ نمودار نگهداشت آب بر حسب مدل‌های نوع اول برای خاک آلوده به گازوئیل ۶٪ ۸۴
- شکل ۴-۹ نمودار نگهداشت آب بر حسب مدل‌های نوع دوم برای خاک آلوده به گازوئیل ۶٪ ۸۵

شکل ۴-۱۰ نمودار نگهداشت آب بر حسب مدل‌های نوع اول برای خاک آلوده به نفت چراغ ۶٪.....۸۶

شکل ۴-۱۱ نمودار نگهداشت آب بر حسب مدل‌های نوع دوم برای خاک آلوده به نفت چراغ ۶٪..... ۸۷

شکل ۴-۱۲ تفاوت نمودارهای مشخصه آب-خاک نمونه‌های بدون آلودگی و با آلودگی ۶٪ نفت چراغ

و گازوئیل ۸۸

شکل ۴-۱۳ تغییرات نسبت تخلخل نسبت به زمان برای نمونه آلوده و بدون آلودگی ۹۰

شکل ۴-۱۴ میزان جذب آب نمونه‌های آلوده و بدون آلودگی ۹۰

فهرست جدول

- جدول ۱-۲ معیارهای تشخیص خاصیت فروریزی در خاک‌ها با استفاده از پارامترهای وزنی حجمی (Elkady, 2002) ۳۱
- جدول ۲-۲ معیارهای تشخیص خاصیت فروریزی در خاک‌ها با استفاده از نتایج آزمایش ادمتر (Alkandari, 2000) ۳۲
- جدول ۱-۳ نتایج آزمایش چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک ۴۹
- جدول ۲-۳ وزن مخصوص خشک خاک ۵۰
- جدول ۳-۳ تعیین درصد رطوبت خاک ۵۱
- جدول ۴-۳ نتایج حدود اتربرگ ۵۱
- جدول ۵-۳ خصوصیات فیزیکی آلاینده‌ها ۵۲
- جدول ۱-۴ تعیین میزان فروریزش نمونه‌های دست نخورده ۶۹
- جدول ۲-۴ تاثیر دست خوردگی بر روی میزان فروریزش خاک بدون آلودگی ۷۰
- جدول ۳-۴ نمونه‌های دست نخورده و بازسازی شده‌ی اشباع با نفت چراغ ۷۲
- جدول ۴-۴ نمونه‌های دست نخورده و بازسازی شده‌ی اشباع با گازوئیل ۷۳
- جدول ۵-۴ تاثیر افزودن درصدی گازوئیل به خاک بازسازی شده ۷۶
- جدول ۶-۴ نمودار مقایسه فروریزش خاک بازسازی شده با درصد وزنی‌های مختلف گازوئیل ۷۷
- جدول ۷-۴ تاثیر افزودن درصدی نفت چراغ به خاک بازسازی شده ۷۸
- جدول ۸-۴ پارامترهای استخراج شده برای رسم نمودار مشخصه آب خاک برای خاک بدون آلودگی ۸۲
- جدول ۹-۴ پارامترهای استخراج شده برای رسم نمودار مشخصه آب خاک برای خاک بدون آلودگی ۸۳
- جدول ۱۰-۴ پارامترهای استخراج شده رسم نمودار مشخصه آب خاک آلوده به گازوئیل

۸۴٪۶

جدول ۱۱-۴ پارامترهای استخراج شده رسم نمودار مشخصه آب خاک برای خاک آلوده به گازوئیل

۸۵٪۶

جدول ۱۲-۴ پارامترهای استخراج شده رسم نمودار مشخصه آب خاک برای خاک آلوده به نفت چراغ

۸۶٪۶

جدول ۱۳-۴ پارامترهای استخراج شده رسم نمودار مشخصه آب خاک برای خاک آلوده به نفت چراغ

۸۷٪۶

جدول ۱۴-۴ پتانسیل فروریزش خاک در مکش‌های مختلف ۹۲

۱- فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

خاک در حالت معمول از سه فاز آب، هوا و دانه‌های جامد خاک تشکیل شده است. اما در مواردی هم وجود دارد که خاک وارد حالت چند فازی شده و از آب، خاک، هوا و آلاینده نفتی تشکیل شده باشد. شرایطی که حالت چند فازی خاک با نشت مواد نفتی اتفاق می‌افتد با نام آلودگی نفتی خاک شناخته می‌شود. نشت مواد نفتی به دلایل مختلف باعث آلودگی خاک به انواع فرآورده‌های نفتی می‌شود، از جمله این موارد می‌توان به نشت از خطوط لوله‌های انتقال آسیب دیده، تصادف تانکرها، تخلیه از تأسیسات داخل دریا و خشکی و نشت طبیعی اشاره کرد (Tajik, 2004). نشت نفت در کویت در طول جنگ خلیج، والدز آلاسکا در اثر تصادف تانکرها و نشت از خطوط انتقال در عربستان سعودی را می‌توان از جمله آلودگی‌های شدید برشمرد (محمدی اکبرآبادی و همکاران، ۱۳۸۹).

محققان در زمینه آلودگی نفتی بررسی‌های گسترده‌ای انجام داده‌اند. به طور کلی تحقیقات انجام شده را می‌توان از نظر نوع خاک مورد استفاده در تحقیق به دو گروه تقسیم نمود:

۱. تحقیق‌های انجام شده بر روی خاک‌های ریزدانه‌ی چسبنده به شرح ذیل است:

(Shin and (Vijay K.Puri, 2000)، (Aiban, 1998)، (AlSanad, 1995)، (Evgin and Das, 1992)
(Khomehchiyan et al, 2007)، (Das, 2001)

۲. تحقیق‌های انجام شده بر روی خاک‌های دانه‌ای به شرح ذیل است:

(Ratnaweera and Meegoda, 1994)، (Mitchell and Moor, 1974)، (Rao and Sridharan, 1979)
(Khosravi, 2013)، (Khomehchiyan et al, 2007)، (Rehman, 2007)

در تحقیقات صورت پذیرفته رفتار خاک‌های فروریزی از جنبه‌های مختلف مقاومت برشی، نفوذپذیری، تراکم‌پذیری، فشردگی، ظرفیت باربری، روانگرایی و دیگر پارامترهای خاک مورد بررسی قرار گرفته است.

خاک‌های فروریزی آن دسته از خاک‌های مسئله‌داری¹ هستند که در درصد رطوبت‌های پایین، پایدار می‌باشند و به واسطه وجود پیوندهای بین دانه‌ای و مکش ساختاری، مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند. اما با افزایش درصد رطوبت و بارگذاری تغییر شکل‌های زیاد، نشست سریع و کاهش زیاد نسبت تخلخل در آن‌ها مشاهده می‌گردد. این خاک‌ها در هنگام اشباع شدن به طور ناگهانی کاهش حجم می‌دهند که این مسأله می‌تواند عامل ایجاد بسیاری از خطرات سازه‌ای باشد.

پراکندگی این نوع خاک در مناطق وسیعی از جهان (سطحی معادل 10% توده‌های قاره‌ای) تحت پوشش این خاک‌ها قرار دارد. این مناطق شامل نهشته‌های پیوسته‌ای از شمال چین تا جنوب شرقی اروپا و مناطق پراکنده‌ای از امریکای شمالی و جنوبی و نیوزیلند است (Jefferson et al, 2008).

۲-۱ اهداف تحقیق

با توجه به مشکلاتی که خاک‌های رمبنده برای سازه‌ها ایجاد می‌کنند و پراکندگی این نوع خاک در بخش‌های مرکزی و شرقی کشور، بررسی میزان فروریزش آن‌ها اهمیت پیدا می‌کند. در تحقیقات انجام گرفته بر روی خاک‌های آلوده، پتانسیل فروریزش و مشخصاً رفتار خاک‌های فروریزی در معرض آلودگی آلاینده‌های نفتی تحقیقی انجام نشده است. در این تحقیق در نظر است که میزان فروریزش خاک‌های رمبنده آلوده به نفت چراغ و گازوئیل ارزیابی گردد. آزمایش‌های فروریزش بر روی نمونه‌ها در شرایط مختلف آلودگی انجام شد. همچنین قابل ذکر است که برای تعیین رفتار آلاینده‌ها در مکش‌های مختلف دستگاه تحکیم غیراشباع ساخته و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت.

1 Problematic soils

۳-۱ فصل بندی پایان نامه

در فصل دوم به مطالعات مختلف صورت گرفته بر روی رفتار خاک‌های آلوده به مواد نفتی مختلف، تاریخچه خاک‌های فروریزی، تحقیقات انجام شده در مورد فروریزش، مطالعه روش‌ها و معیارهای شناسایی این نوع خاک‌ها و عوامل تاثیر گذار در فروریزش پرداخته شده است.

در فصل سوم آزمایش‌های اولیه جهت شناسایی عمومی خاک از جمله وزن مخصوص ظاهری، چگالی دانه‌های جامد خاک، درصد رطوبت طبیعی، دانه بندی به روش تر و هیدرومتری، حدود اتربرگ توضیح داده و نتایج آزمایش‌ها مشخص شد. علاوه بر آزمایش‌های اولیه، تحکیم فروریزش با مواد مختلف، تحکیم غیر اشباع و آزمایش کاغذ فیلتر نیز در این فصل آمده است. همچنین موقعیت جغرافیایی محل نمونه گیری و نحوه نمونه‌گیری دست‌نخورده در محل به تفصیل بیان شده است. به طور کلی، در این فصل به محاسبه و استخراج نتایج آزمایش‌های اولیه انجام شده می‌پردازیم.

در فصل چهارم نتایج آزمایش‌ها به همراه تجزیه و تحلیل بر روی این نتایج بیان می‌شود. سپس تأثیر عوامل گوناگون از جمله درصدهای مختلف آلاینده، مایع منفذی سیال، شرایط نمونه‌ها از نظر دست-خوردگی و تاثیر مکش بر خاک آلوده مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. همچنین به ترسیم نمودارها و بحث در مورد آن‌ها و مقایسه می‌پردازیم.

در نهایت در فصل پنجم، جمع‌بندی نتایج تحقیق و پیشنهادات برای تحقیق‌های آینده، ارائه شده است.

۲- فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته

۱-۲ مقدمه

خاک‌ها بسته به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رفتار متفاوتی دارند و مطالعات ژئوتکنیکی برای بررسی رفتار خاک‌ها در پروژه‌های عمرانی انجام می‌شود. در حالت کلی زمانی که سازه‌هایی همچون مخازن نفت، لوله‌های خطوط انتقال و تمام سازه‌هایی که به نوعی امکان آلوده شدن خاک‌های اطراف آن‌ها وجود دارد، مطالعات ژئوتکنیک برای در نظر گرفتن اثر نشت آلاینده‌های نفتی بر روی رفتار خاک انجام می‌شود. این درحالی است که خاک‌ها در زمان آلودگی مشخصات خاک بدون آلودگی را ندارند. از این جهت محققان بر آن شدند رفتار خاک را در اثر آلودگی و تاثیر آن بر پارامترهای مختلف خاک را مطالعه نمایند.

در این تحقیق در نظر است پتانسیل فروریزش خاک فروریزی در حالت اشباع و غیر اشباع مورد مطالعه قرار گیرد. ابتدا تحقیق‌های انجام شده مرتبط با خاک‌های آلوده و اثر آلودگی بر پارامترهای مختلف آن بررسی شده و سپس به پدیده فروریزش خاک‌ها اشاره شده و در مورد ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های فروریزی بحث می‌شود. در ادامه روش‌ها و معیارهای دانشمندان مختلف جهت شناسایی خاک‌های فروریزی توضیح داده شده است. پس از آن به معرفی خاک لس و مشخصات مهندسی این خاک در نقاط مختلف دنیا پرداخته خواهد شد.

۲-۲ آلودگی در خاک‌ها

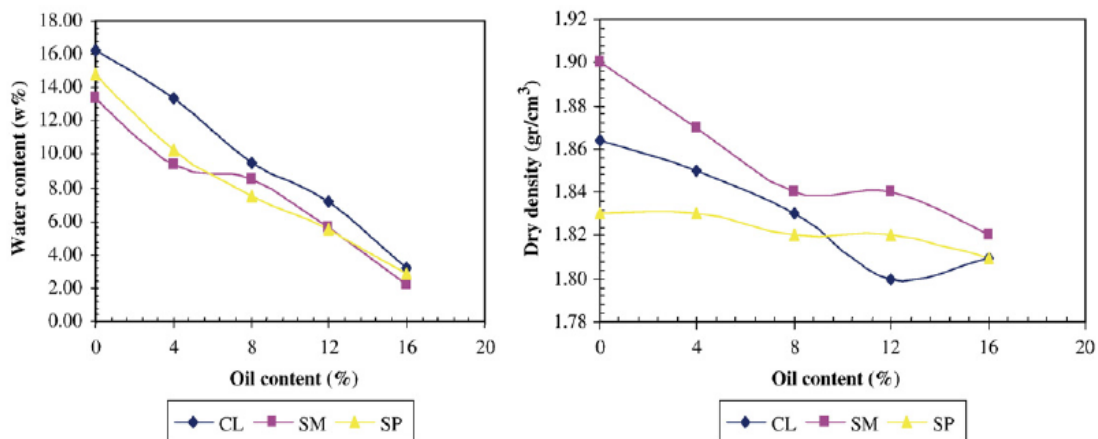
به طور کلی محققان در آزمایش‌ها از آلاینده‌های مختلف مانند: نفت خام، اتانول، گلیسرول، گازوئیل، روغن موتور و دیگر مشتقات فرآورده‌های نفتی استفاده کرده‌اند. دلیل استفاده از آلاینده‌های مختلف نیز به تفاوت در لزجت، ثابت دی‌الکتریک و دیگر خصوصیات مواد نفتی برمی‌گردد. عامل مهمی که خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک رسی وابسته به آن است خصوصیات آب لایه دوگانه خاک-

های رسی است. تغییر در خصوصیات آب لایه دوگانه سبب تغییر در ساختار خاک رسی شده، که متعاقباً باعث تغییر در رفتار مهندسی خاک میشود. به طوری که تغییر خصوصیات آب لایه دوگانه سبب ایجاد طیف وسیعی از دامنه کاربرد خاک‌های رسی در پروژه‌های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی می‌شود. تبادل یونی م ستلزم برهم کنش های الکترواستاتیک بین یک یون با بار مخالف موجود در سطح ذره باردار با بار مخالف که ذره باردار را احاطه کرده است، می‌باشد. ظرفیت خاک برای تبادل کاتیونها یکی از تفاوت‌های اساسی ذرات خاک با ترکیبات دیگری است که به عنوان محیط رشد ریشه مورد استفاده قرار میگیرد. خصوصیات کلویدهای رس نظیر پراکندگی و فولکوله شدن تحت تأثیر توزیع کاتیون ها در اطراف رسها میباشند. در آزمایش‌ها بر روی خاک‌ها به بررسی مشخصات و ویژگی‌های مختلف پرداخته شده است تا تاثیر آلودگی بر روی خاک‌ها تعیین شود. بیشتر تحقیق‌ها بر دانه‌ای و ریزدانه‌ی چسبنده بودن و طبیعی یا مصنوعی بودن خاک تاکید داشته است و تحقیق بر روی خاک‌های مساله‌دار مورد توجه نبوده است. در تحقیق‌های انجام شده‌ی قبل خاک‌های آلوده از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. برای بررسی تاثیر آلاینده‌ها به مواردی از تحقیق‌های انجام شده توسط محققان اشاره خواهد شد.

(Khamsehchiyan, 2007) طبق آزمایش روی سه دسته خاک CL، SM و SP آلوده به نفت خام که با درصد وزنی خشک خاک ۲٪ تا ۱۶٪ از مواد آلاینده به نمونه‌ها اضافه شده بود به این نتیجه رسید که حدود اتربرگ (حدروانی^۱ و حدخمیری^۲) در خاک CL با افزایش درصد وزنی نفت کاهش می‌یابند. دلیل این مساله را نیز خاصیت غیرقطبی آلاینده و ساختار و پیوندهای رس دانست. آزمایش تراکم انجام شده بر هر سه نوع خاک نیز کاهش وزن مخصوص خشک خاک حداکثر و درصد رطوبت اپتیمم را نشان داد که در شکل ۱-۲ این نتایج نشان داده شده است.

1 Liquid Limit

2 Plastic Limit



شکل ۱-۲ تاثیر نفت خام بر درصد رطوبت اپتیمم و وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌ها

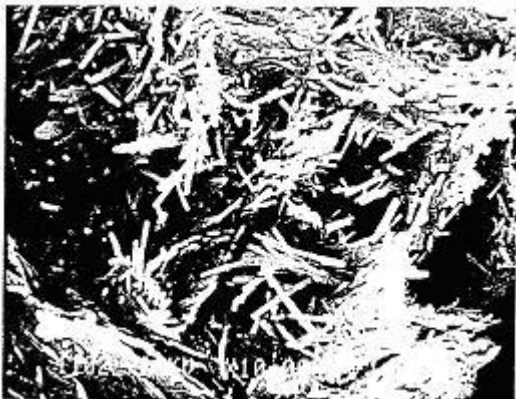
(Khomehchiyan, 2007)

آزمایش برش مستقیم بر روی خاک‌های مختلف به این نتیجه رسید که با افزایش درصد نفت خام زاویه اصطکاک داخلی خاک CL افزایش داشته و برای خاک‌های SP و SM کاهش نشان داده است. عامل چسبندگی در خاک CL به شکل قابل توجهی کاهش داشت ولی چسبندگی در خاک‌های SP و SM مقدار تغییرات کمی داشته‌اند. به طور کلی نیز می‌توان گفت مقاومت برشی خاک‌ها طبق نتایج کاهش پیدا کرده است. آزمایش‌ها در شرایط خشک انجام شد و دلیل ایجاد چنین شرایطی برای جلوگیری از خروج نفت خام از نمونه‌ها عنوان شد. شکل ۲-۲ نتایج مربوط به چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها آمده است. برای تعیین تاثیر آلودگی بر روی نفوذپذیری خاک از آزمایش هد ثابت استفاده شده است و نتایج کاهش نفوذپذیری را نشان داد.

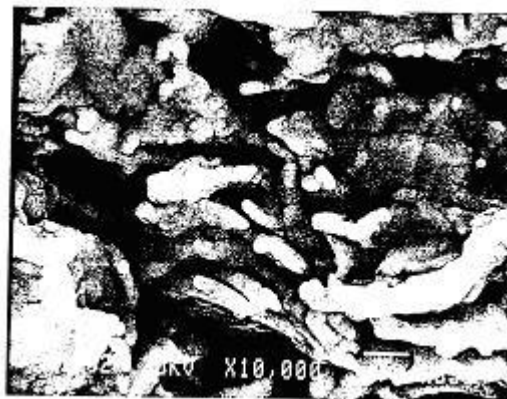
شکل ۲-۲ تاثیر نفت خام بر پارامترهای مقاومت برشی خاک‌ها (Khomehchiyan, 2007)

(Rahman, 2007) بر روی خاک ریزدانه‌ی متورم شونده آزمایش‌های خود را انجام داد. به طور کلی بررسی‌ها برای خاک آلوده به نفت خام نشان داد که خاک رس بیشتر رفتار خاک دانه‌ای به خود می‌گیرد. عکس‌های SEM گرفته شده از خاک رس بدون آلودگی و خاک رس آلوده در شکل ۲-۳ نشان داده شده

است. همین طور که در شکل مشخص است خاک آلوده نسبت به خاک بدون آلودگی ساختار بهم چسبیده و از ذرات در اندازه‌های ماسه ریز و سیلت ساخته شده‌اند.



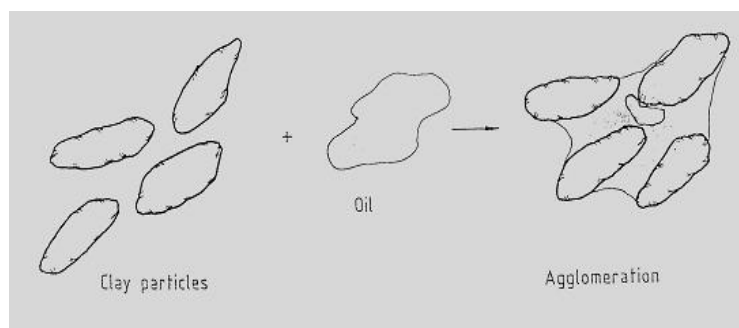
(ب) خاک بدون آلودگی



(الف) خاک آلوده شده

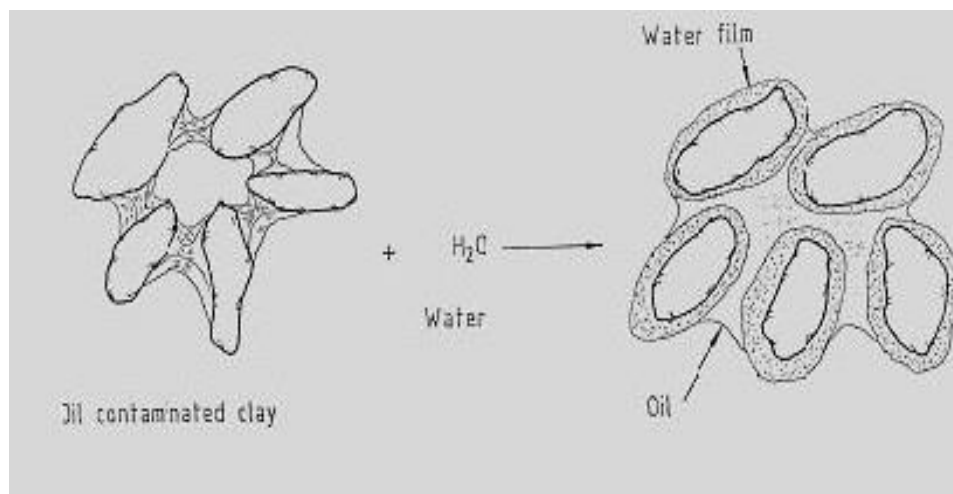
شکل ۲-۳ عکس SEM از تاثیر آلودگی در ساختار خاک ریزدانه (Rahman, 2007)

در شکل ۲-۴ رحمان به طور شماتیک تغییر حالت خاک بعد از آلودگی را نشان می‌دهد که با افزایش نفت خام ذرات خاک بهم چسبیده و ساختار درشت‌تری به خود گرفته‌اند. با افزودن آب به خاک آلوده به دلیل احاطه ذرات جامد خاک توسط نفت، ذرات بهم چسبیده توسط آب از هم فاصله می‌گیرند. دلیل این امر به ثابت دی الکتریک بالاتر آب نسبت به آلاینده برمی‌گردد که مجدداً خاک را به ساختار پراکنده تبدیل می‌کند. حالت شماتیک این رفتار در شکل ۲-۵ آمده است.



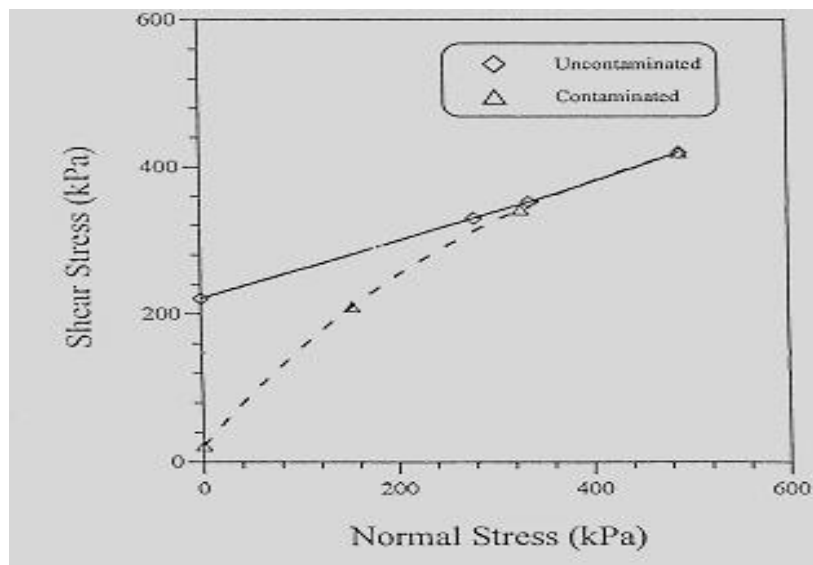
شکل ۲-۴ مدل شماتیک ذرات خاک در مواجهه با نفت خام (Rahman, 2007)

PH خاک آلوده نیز نسبت به خاک بدون آلودگی اندکی کاهش دارد که به اسیدی بودن مواد نفتی مربوط می‌شود. آزمایش حدوداتربرگ برای خاک آلوده افزایش حد روانی، حدخمیری و شاخص خمیری را نشان می‌دهد. یکی از دلایل این رفتار احتمالا به چسبنده بودن نفت خام برمی‌گردد. نتایج تست تراکم کاهش درصد رطوبت اپتیمم و افزایش وزن مخصوص خشک خاک را نشان می‌دهد و علت آن هم به روغنکاری ذرات نسبت داده شده است.



شکل ۲-۵ مدل شماتیک تاثیر افزودن آب به خاک آلوده شده با نفت خام (Rahman, 2007)

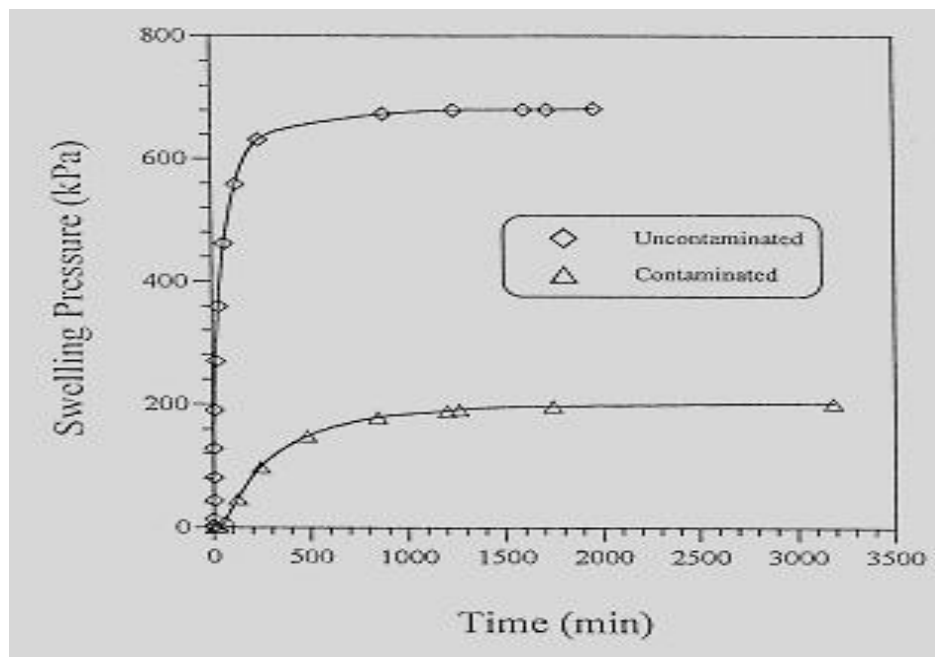
آزمایش‌های مقاومت برشی انجام شده توسط رحمان برای بررسی تاثیر آلودگی بر مقاومت برشی خاک که از آزمایش سه محوری زهکشی نشده تحکیم نیافته استفاده شده است و در شکل ۲-۶ نتایج آزمایش‌ها مشخص است در فشار همه جانبه پایین مقاومت خاک آلوده بسیار کمتر از حالت بدون آلودگی است. ولی در فشار همه جانبه‌ی بالا این دو مقدار به هم نزدیک می‌شوند. علت کمتر بودن مقاومت در فشار همه جانبه‌ی پایین به دلیل بهم چسبیدن ذرات رس و از کار افتادن چسبندگی خاک عنوان شده است که با افزایش فشار همه جانبه ذرات از هم جدا شده و مقاومت افزایش می‌یابد و خود را به خاک بدون آلودگی می‌رساند.



شکل ۲-۶ نمودار موهر کولمب خاک آلوده و بدون آلودگی (Rahman, 2007)

رحمان و همکاران برای بررسی میزان تورم با اعمال سربار ۷ کیلوپاسکال نمونه را اشباع کردند و اجازه تورم به نمونه دادند. نتایج نشان داد که خاک آلوده با خاک بدون آلودگی تفاوت چندانی در میزان تورم ندارد در ادامه آزمایش تحکیم را انجام دادند و ضریب فشردگی C_c برای خاک آلوده بیشتر از خاک بدون آلودگی بدست آمد. در آزمایشی دیگر با اعمال بار به نمونه جلوی تغییر حجم و تورم نمونه را گرفته شد. این آزمایش میزان بار اعمالی برای جلوگیری از تورم نمونه بدون آلودگی را سه برابر بار اعمالی برای نمونه آلوده به نفت خام نشان داد. این نتایج در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.

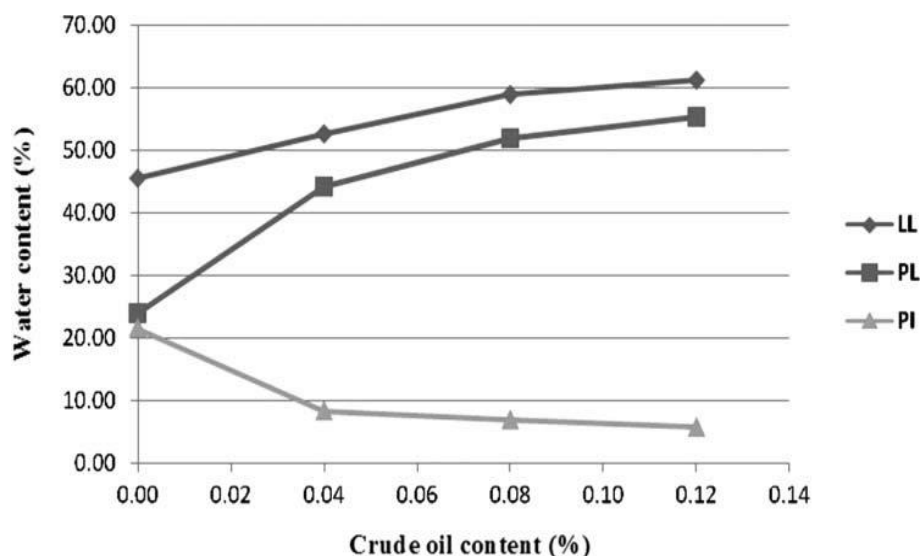
(Vipulanandan, 2011) خاک رس با حد روانی پایین را با روغن موتور مورد آزمایش قرار داد. مقایسه‌ها کاهش حد روانی و حد خمیری خاک آلوده با افزایش میزان آلودگی را نشان داد. اثر آلودگی بر تراکم کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت اپتیمم را به دنبال داشت. با انجام آزمایش Chilled-Mirror Hygrometer Method و کاغذ صافی مکش کل خاک را بررسی کردند. طبق نتایج بدست آمده با افزایش آلودگی به روغن موتور مکش کل کاهش پیدا کرده است.



شکل ۲-۷ مقایسه نرخ فشار تورم خاک آلوده و بدون آلودگی (Rahman, 2007)

(Kermani and Ebadi, 2012) از خاک رس با حد روانی پایین به عنوان خاک مورد آزمایش و نفت خام جهت ایجاد آلودگی استفاده نمودند. تاثیر آلودگی بر حدود اتربرگ افزایش حد خمیری و حد روانی را نشان داد که به طور کلی موجب کاهش شاخص خمیری خاک شدند و نتایج گزارش شده در قالب شکل ۲-۸ آمده است. دلیل ارائه شده نیز مرتبط با آب لایه آزاد و آب لایه دوگانه‌ای است که اطراف ذرات رس را احاطه کرده‌اند. طبق نظر آن‌ها از آنجایی که آلاینده اطراف نمونه را احاطه کرده و اجازه رسیدن آب به ذرات را نمی‌دهد باعث می‌شود خاک آب بیشتری جذب کند تا به حد خمیری برسد، و بیشتر آبی که نمی‌تواند در لایه دوگانه جذب شود به لایه آب آزاد می‌پیوندد. از این رو تغییر آن‌چنانی در حدروانی رخ نمی‌دهد و خاک رفتار سیلتی به خود می‌گیرد. با آزمایش تراکم مشخص شد که آلودگی خاک باعث افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر و کاهش درصد رطوبت اپتیمم خواهد شد. تفات دیگر خاک بدون آلودگی با خاک آلوده آزمایش شده توسط کرمانی و عبادی در آزمایش تراکم به شکل کلی

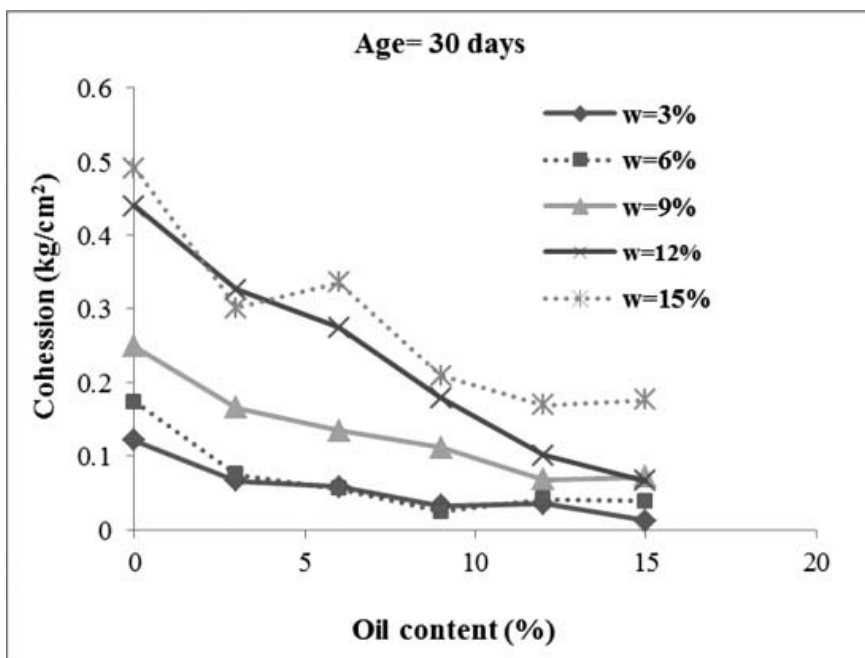
نمودارهای آن‌ها برمی‌گردد. نمودار خاک آلوده نمودار حالت زنگوله مانند خود را از دست می‌دهد که روغنکاری بین ذرات خاک توسط نفت خام علت این تغییر می‌باشد. دلیل تراکم بهتر خاک، کاهش پلاستیسیته خاک و تغییر رفتار خاک رس به شکل خاک دانه‌ای مربوط می‌شود.



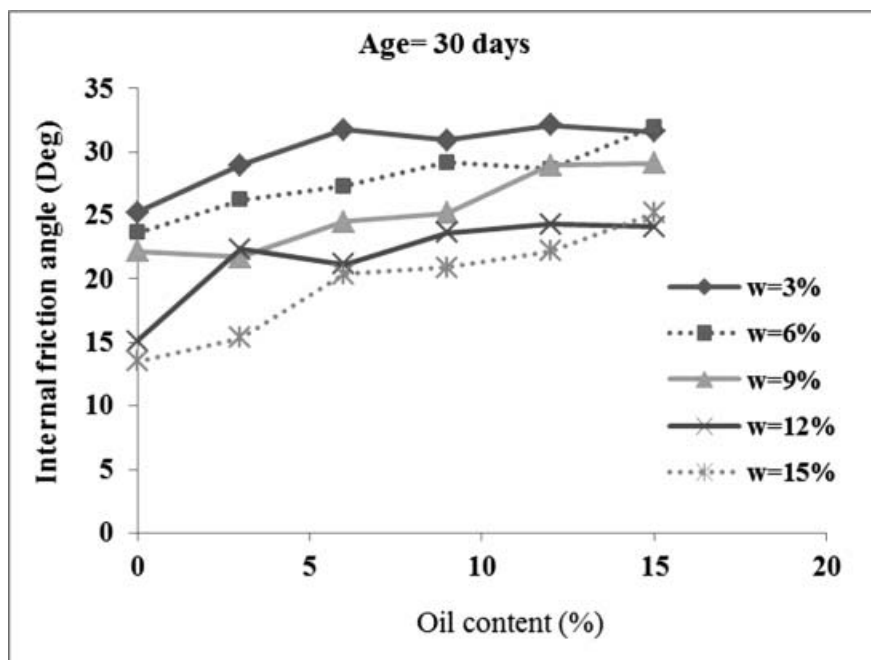
شکل ۲-۸ تاثیر نفت خام بر روی حدود اتربرگ و شاخص خمیری خاک ریزدانه (Kermani and Ebadi, 2012)

کرمانی و عبادی با استفاده از نتایج آزمایش برش مستقیم مشخص نمودند که چسبندگی خاک با افزایش درصد آلاینده کاهش می‌یابد و علت این کاهش به احاطه ذرات خاک توسط مواد نفتی و کاهش سطح مخصوص خاک برمی‌گردد البته با افزایش درصد رطوبت خاک مورد آزمایش میزان چسبندگی افزایش می‌یابد که به دلیل جذب بیشتر آب توسط خاک رس مربوط می‌شود. شکل ۲-۹ تغییرات مرتبط با چسبندگی خاک را نشان داده است. نتایج آزمایش بر روی پارامتر زاویه اصطکاک داخلی در شکل ۲-۱۰ نشان داده است که با افزایش درصد مواد آلاینده زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش می‌یابد و افزایش درصد رطوبت خاک باعث کاهش زاویه اصطکاک خاک شده است طبق آزمایش‌های انجام شده توسط دیگر محققان (Moor and Mitchell, 1974) و (Rao and Sridharan, 1979) به این نتیجه رسیدند که با

کاهش ثابت دی الکتریک مایع منفذی، مقاومت خاک رس افزایش می یابد.



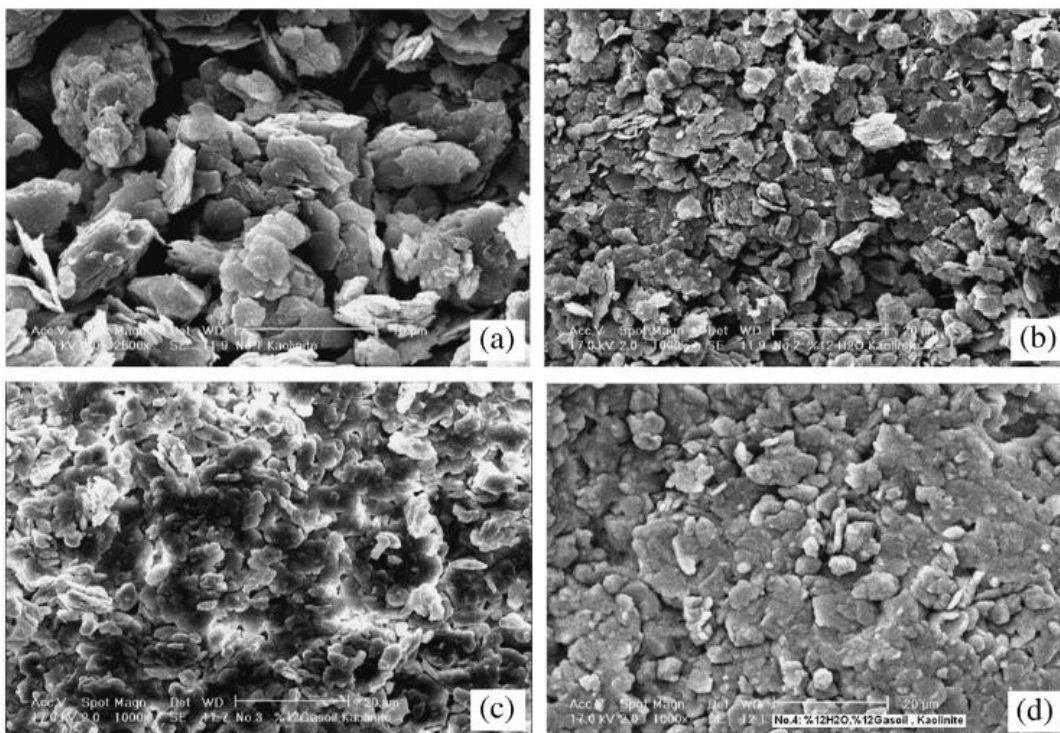
شکل ۹-۲ تاثیر آب و آلاینده بر چسبندگی خاک ریزدانه (Kermani and Ebadi, 2012)



شکل ۱۰-۲ تاثیر آب و آلاینده بر زاویه اصطکاک داخلی خاک ریزدانه (Kermani and Ebadi, 2012)

دسته دیگر آزمایش‌های کرمانی و عبادی در مورد ضریب فشردگی و تحکیم خاک آلوده بوده است. نتایج بدست آمده افزایش فشردگی را برای افزایش درصد آلاینده نشان داده است که با افزایش درصد رطوبت میزان فشردگی در میزان آلودگی برابر افزایش می‌یابد.

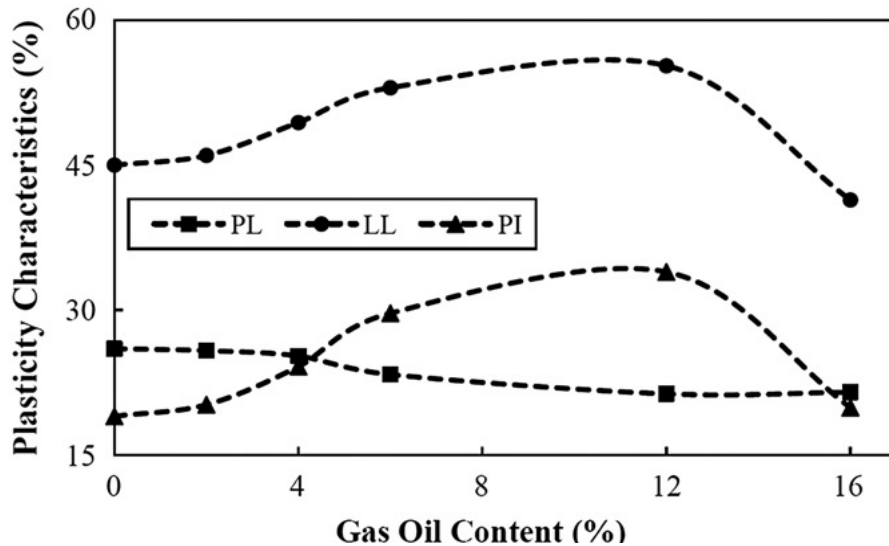
(Khosravi et al, 2013) از خاک رس مصنوعی کائولینیت برای آزمایش‌های خود استفاده کرده است و برای ایجاد آلودگی از ۲٪ تا ۱۶٪ وزن خشک خاک به آن گازوئیل اضافه کرده است. شکل ۲-۱۱ تاثیر مواد آلاینده را در شرایط مختلف برای خاک بررسی کرده است و نشان داده شده که با افزودن آب به کائولینیت خاک از حالت پراکنده اندکی فاصله گرفته و رفتار فلوکوله به خود می‌گیرد در حالت بعدی با افزودن گازوئیل ذرات خاک بیشتر به هم چسبیده و حالت پراکنده را از دست می‌دهد این روند در خاک با ترکیب آلاینده و آب به خاک کاملاً فولکوله می‌شود.



شکل ۲-۱۱ عکس SEM تاثیر آب و گازوئیل بر خاک کائولینیت (a) خاک بدون آلودگی (b) خاک با ۱۲٪

آب (c) خاک با ۱۲٪ گازوئیل (d) خاک با ۱۲٪ آب و ۱۲٪ گازوئیل (Khosravi et al, 2013)

طبق نتایج آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ انجام شده توسط خسروی و همکاران، خاک آلوده مشخص شد تا ۱۲٪ آلودگی حد روانی افزایش می‌یابد و به تبع آن شاخص خمیری نیز افزایش نشان می‌دهد اما حد خمیری کاهش می‌یابد که این روند در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است.

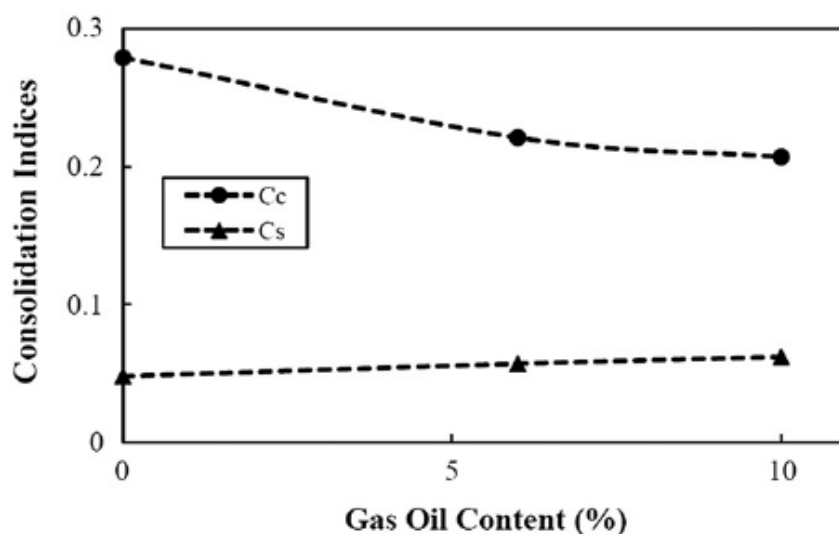


شکل ۲-۱۲ حدود اتربرگ و شاخص خمیری کائولینیت با درصد‌های مختلف نفت خام (Khosravi et al, 2013)

خسروی با آزمایش بر روی پارامتر فشردگی خاک آلوده به این نتیجه رسید که با افزایش درصد آلودگی ضریب فشردگی خاک C_c کاهش داشته و ضریب تورم خاک C_s افزایش خواهد یافت. در آزمایش برش مستقیم انجام شده بر روی کائولینیت با افزایش درصد آلاینده چسبندگی افزایش نشان داده است و زاویه اصطکاک داخلی نیز کاهش یافته است که به طور کلی در مقاومت برشی تفاوت چندانی ایجاد نشده است.

(محمدی اکبرآبادی و همکاران, ۱۳۸۹) با آزمایش برش مستقیم تحکیم یافته زهکشی شده بر روی ماسه رس دار آلوده به نفت خام مانند دیگر محققان، نتایج با افزایش مقاومت و چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک داخلی همراه بود؛ دلایل عنوان شده توسط محمدی اکبرآبادی و همکاران برای بالا رفتن

چسبندگی، لزجت بالای نفت خام نسبت به آب است که به تنهایی جدا از ذرات خاک بخشی از نیروی برشی را تحمل می‌کند. همچنین عامل کاهش زاویه اصطکاک داخلی، روغنکاری ذرات توسط نفت خام عنوان شده است.

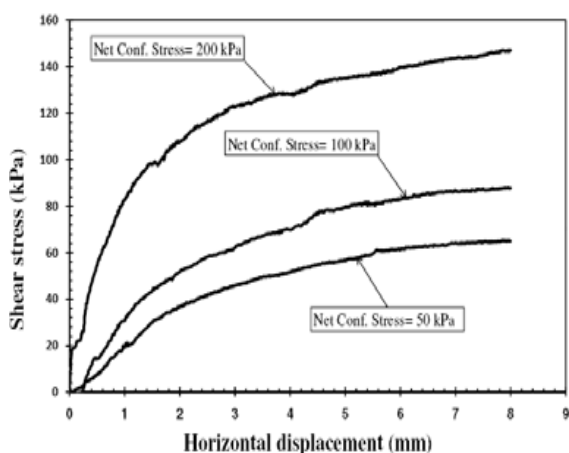


شکل ۲-۱۳ تاثیر گازوئیل بر مشخصات تحکیم خاک کائولینیت (Khosravi et al, 2013)

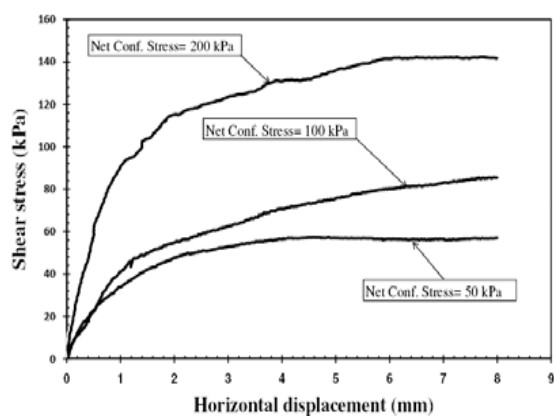
(Das and Shin, 2001) بر روی ماسه غیراشباع آزمایش انجام دادند و از سه نوع آلاینده‌ی نفت چراغ، نفت خام و گازوئیل استفاده کردند و با آزمایش برش مستقیم و نمونه آزمایشگاهی به بررسی ظرفیت باربری پرداختند. نتایج نشان داد که زاویه اصطکاک داخلی و ظرفیت باربری کاهش می‌یابد.

(Mohammadi and Yasrobi, 2010) در پژوهش دیگری بر روی خاک مخلوط شده از ۶۰٪ ماسه و ۴۰٪ کائولینیت با آلودگی نفت خام آزمایش برش مستقیم اشباع و غیراشباع انجام شد، در تست‌های اشباع افزایش درصد نفت منجر به افزایش مقاومت برشی و چسبندگی شده اما کاهش اندکی در زاویه اصطکاک بوجود می‌آید. تست‌های غیراشباع در شرایط مکش متغیر انجام شد و با بررسی نمودار تنش برشی به تغییر مکان جانبی مشخص شد با افزایش درصد آلودگی نفتی نمونه تمایل به تحمل تنش برشی

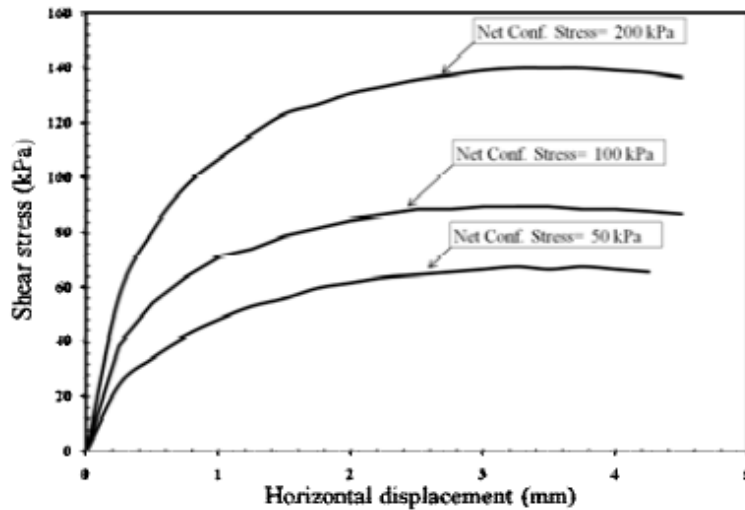
بیشتری در شرایط برابر دارد. همچنین با بررسی نمودار مکش ماتریسی به جابجایی جانبی معلوم شد نمونه‌های آلوده تمایل کمتری به افزایش مکش ماتریسی نسبت به نمونه‌های بدون آلودگی در برش دارند. همان طور که در شکل ۲-۱۴ آمده است برای بررسی مقاومت برشی از رابطه ۲-۱ که معیار گسترش یافته موهرکلمب است و توسط (Fredlund, 1978) ارائه شد استفاده شده است. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در خاک‌های آلوده غیراشباع مانند حالت اشباع کاهش یافت. در حالت مکش صفر که خاک اشباع است دانه‌های خاک آلوده با نفت روغنکاری شده بودند و زاویه داخلی کمی کاهش پیدا کرد. چسبندگی نیز مانند حالت اشباع افزایش یافت. همچنین با افزایش چسبندگی، ϕ^b اندکی افزایش یافت. در خاک آلوده دلیل کاهش زاویه اصطکاک را می‌توان به خاطر ویسکوزیته سیال، ثابت دی‌الکتریک و روغنکاری این مواد دانست.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۲-۱۴ تنش برشی-تغییر مکان جانبی برای خاک غیراشباع آلوده به نفت خام (الف) صفر درصد،

(ب) ۲٪، (ج) ۶٪ (Mohammadi and Yasrobi, 2010)

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad ۱-۲$$

$(\sigma_n - u_a)$: تنش نرمال خالص

$(u_a - u_w)$: مکش ماتریس

c' : چسبندگی در مکش و تنش نرمال خالص صفر

ϕ' : زاویه اصطکاک داخلی در تنش نرمال خالص متغیر

ϕ^b : زاویه اصطکاک داخلی با توجه به مکش

یکی از آزمایش‌های انجام گرفته منحنی نگهداشت آب-خاک آلوده به مواد نفتی می‌باشد که توسط (Burckhard et al, 2000) انجام شد. هدف پژوهش بررسی تغییرات احتمالی در خاک آلوده به نفت بوده است. در این پژوهش از ماسه اتاوا با آلاینده روغن موتور و با مکش‌های بین صفر تا 1bar تغییرات اعمال

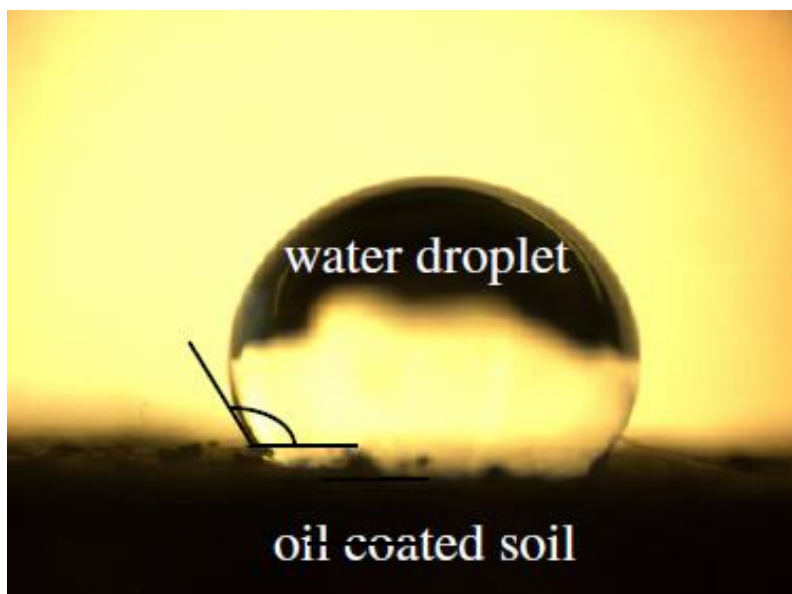
شد. نتایج نشان داد در مکش‌های پایین خاک بدون آلودگی ظرفیت نگهداشت آب بالاتری نسبت به خاک آلوده دارد. اما در مکش‌های بالاتر ظرفیت نگهداشت خاک آلوده بیشتر می‌باشد. همچنین مشخص شد مقادیر کم آلودگی نفتی باعث جلوگیری از نفوذ آب می‌شود.

مکش خاک به کشش سطحی در سطح ارتباط آب و هوا، شعاع پرده قابل انقباض، زاویه ارتباط مایع با سطح ذرات خاک بستگی دارد. در ژئوتکنیک سطح ذرات خیس شدنی و زاویه ارتباط بین خاک و آب 0° در نظر گرفته می‌شود، اما خاک آلوده به روغن زاویه ارتباط بیشتری دارد. در خاک‌های آلوده به روغن بررسی رفتار هیدرولیکی و مکانیکی مهم است. خصوصیت ترشوندگی در سطح ذرات، بستگی به حالت شیمیایی سطح ذرات، ماده جذب شده، برجستگی سطح ذرات، شیمی آب دارد (McHale et al, 2007).

ترشدگی کم به علت آلودگی خاک به مواد نفتی که دافع آب^۱ هستند، حالتی را بوجود می‌آورد که نفوذ کاهش می‌یابد و به همین دلیل تغییر در جریان آب، نگهداشت آب و تبخیر ایجاد می‌کند.

(Lourenco et al, 2012) با دو روش نفوذ قطره آب^۲ و ملاریته یک قطره اتانول^۳ میزان ترشوندگی را بررسی کرد و نتایج کاهش ترشوندگی را با کم شدن درصد رطوبت نشان داد. شکل ۲-۱۵ نیز سطح یک ذره خاک آلوده به روغن را نشان می‌دهد که زاویه قطره آب بر روی شکل مشخص شده است. همین طور که مشخص است روغن اطراف ذره خاک اجازه جذب آب توسط ذره خاک را نمی‌دهد.

1 Water repellent soil
2 Water Drop Penetration Time
3 Molarity of an Ethanol Droplet



شکل ۲-۱۵ نحوه قرار گرفتن و زاویه قطره آب بر روی سطح خاک آلوده به روغن (Lourenco et al, 2012)

۳-۲ خاک های فروریزی

خاک‌های دارای خاصیت فروریزش طوری رسوبگذاری شده‌اند که دارای ساختاری باز و سست با دانسیته نسبتاً کم می‌باشند. این رسوبات در رطوبت کم، مقاومت زیادی از خود نشان می‌دهند، اما زمانیکه در معرض اشباع شدن قرار گیرند، کاهش شدیدی در تخلخل آنها رخ داده که این کاهش می‌تواند حتی در تنش‌های اندک، تنها معادل با فشارهای خاک سربار نیز، اتفاق افتد. اکثر خاک‌های فروریزی که به طور طبیعی وجود دارند از نوع ماسه و لای بادرقتی یا لس هستند. مشخصات این خاک‌ها به هنگام رسوب-گذاری، تخلخل زیاد و دانسیته کم است (حائری و همکاران، ۱۳۹۱).

همان طور که ذکر گردید خاک‌های فروریزی در شرایط عادی پایداری ساختاری خود را در هنگام اعمال بار حفظ می‌کنند. اما به ازای مقدار مشخصی از تنش از آن پس مقاومت ساختاری خاک در اثر

اعمال بار از بین رفته و خاک تغییر شکل زیادی را تجربه می‌کند.

طبق نظریه رزنیکی مصالح خاکی غیراشباعی که وزن مخصوص خشک آن‌ها کمتر از KN/m^3 ۱۶ می‌باشد، قابلیت فروریزش دارند (Reznic, 1993). البته فروریزش لزوماً در مورد خاک‌ها با وزن مخصوص کم اتفاق نمی‌افتد بلکه شرایط رسوبگذاری در هنگام تشکیل خاک می‌بایست ساختاری باز بین ذرات آن ایجاد کرده باشد. این خاک‌ها در شرایط عادی ساختار خود را هنگام اعمال بار حفظ می‌کنند اما یک نقطه بحرانی در مقدار تنش کل وارده بر آن‌ها وجود دارد که از آن نقطه به بعد، با افزایش درصد رطوبت و یا به عبارتی افزایش درجه اشباع، مقاومت ساختاری خاک در اثر اعمال بار به یکباره از بین رفته و خاک تغییر شکل زیادی را تجربه می‌کند. این مسأله ناپیوستگی با تحکیم اولیه یا ثانویه در خاک اشتباه گردد.

چهار شرط اساسی که برای فروریزش خاک وجود دارد عبارتند از (Barden et al. 1969):

- ۱- ساختار خاک به صورت باز، نسبتاً ناپایدار و غیراشباع باشد.
- ۲- وجود تنش کل زیاد به گونه‌ای که قادر به تغییر ساختار خاک باشد.
- ۳- وجود عامل مکشی یا سیمانی در خاک که در شرایط غیر اشباع آن سبب پایداری ساختار گردد.
- ۴- اضافه شدن آب به خاک که سبب از بین رفتن یا کاهش عامل مکشی یا سیمانی آن شده به گونه‌ای که کاهش حجم توده خاک را تحت تنش ثابت نشان دهد.

(Futai and Admeida 2002) همچنین مشخصات کلی خاک‌های فروریزی به طور خلاصه به

صورت زیر است:

- ۱- نسبت تخلخل بالا (بیش از ۱۳ درصد)

۲- درجه اشباع پایین (کمتر از ۰.۶)

۳- مقدار لای و ماسه ریز بالا (>۳۰٪)

۴- از بین رفتن پیوند بین ذرات در اثر اشباع شدن

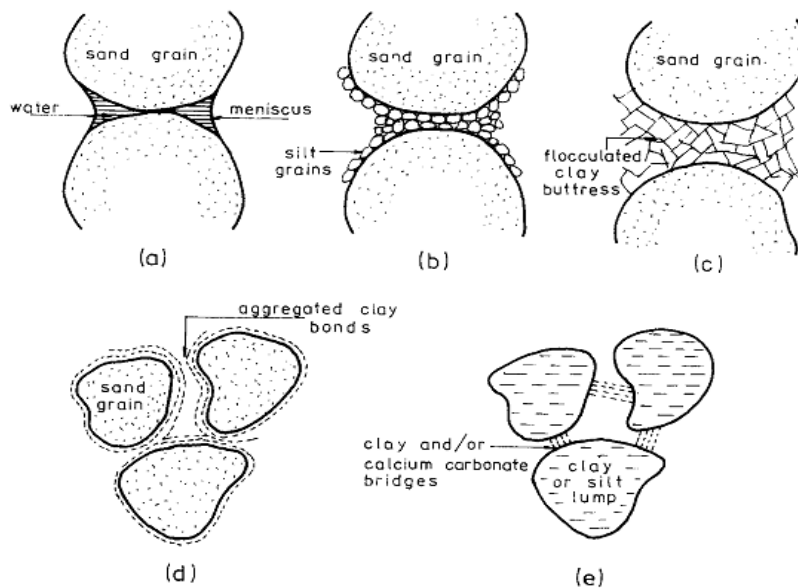
(Barden et al, 1969) طبق نظریه باردن، گاون و کولینز خاک های فروریزی به دوصورت در

طبیعت یافت می شوند:

۱- خاک های ماسه ای و لای دار که توسط پیوندهای رسی به یکدیگر چسبیده اند و ساختمان متخلخلی را به وجود آورده اند. در صورتی که خاک اشباع گردد دانه های ماسه در اثر خمیری شدن رس بر روی یکدیگر می لغزند و خاک کاهش حجم پیدا خواهد نمود.

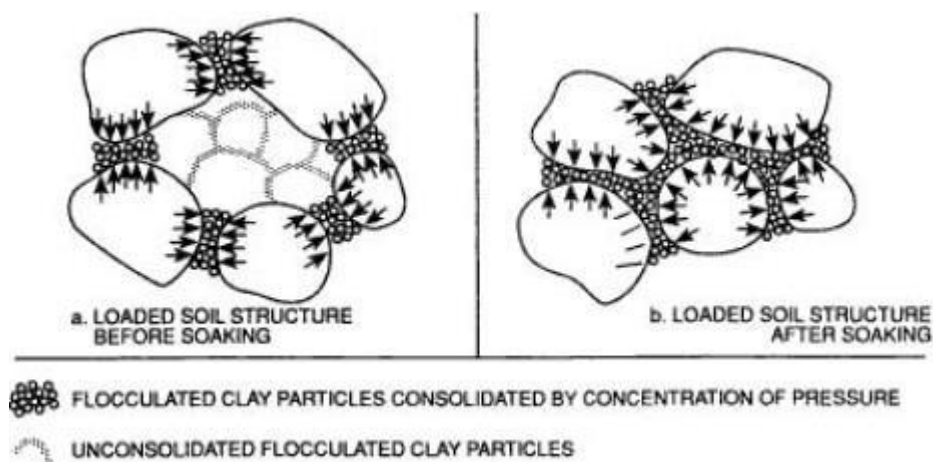
۲- خاک های نیمه اشباعی که در حالت طبیعی دارای فشار منفی بوده و در اثر نیروی مکش به یکدیگر چسبیده اند و خاک در حالت طبیعی به صورت موقت پایدار می باشد اما در اثر افزایش رطوبت نیروی مکشی کاهش یافته و پیوند بین دانه های خاک از بین رفته و اسکلت خاک فروپاشیده و خاک دچار کاهش حجم می شود.

در اثر مرطوب شدن، پیوند بین ذرات خاک از بین می رود، خاک مقاومت خود را از دست داده و در تنش ثابت موجود دچار فروریزش ساختاری می شود. شکل ۲-۱۶ انواع مختلف نیروهای بین دانه ای در خاک فروریزی را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۲-۱۶ مشاهده می شود، نیروی نگهدارنده ذرات از یک پیوند بین دانه ای (پیوند رسی و یا سیلتی) و یا از مکش ساختاری ناشی از کشش سطحی در خاک های غیراشباع به وجود می آید.



شکل ۲-۱۶ انواع مختلف نیروهای بین دانه ای در ساختارهای فروریزی (Elkady, 2002)

شکل ۲-۱۷ فرایند فروریزش و تغییر ساختار در خاک ماسه‌ای که بین ذرات آن پیوند رسی وجود دارد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اثر جذب رطوبت، فروریزش صورت گرفته و حجم خاک کاهش پیدا کرده و ذرات آن در موقعیت جدیدی قرار می‌گیرند.



شکل ۲-۱۷ فرایند فروریزش خاک ماسه‌ای با پیوندهای رسی در اثر افزایش رطوبت (Rogers, 1995)

لاریونو در سال ۱۹۶۵ ساختار خاک‌های فروریزی را مورد مطالعه قرار داد. او نتیجه‌گیری کرد که خاک‌های فروریزی اساساً از ذرات حجیم (سیلت و ماسه و شن ریز) تشکیل شده‌اند که در میان توده‌های

ذرات ریز پراکنده، با یا بدون تماس با هم به صورت مستغرق می باشند. همچنین سه نوع سیستم حفره‌ای توسط لاریونو تشخیص داده شد (Larionov, 1965) :

• حفره‌های فرا میکروسکوپی^۱ بین ذرات ریز

اندازه این حفرات در محدوده‌ی 3×10^{-6} تا 2×10^{-3} میلی‌متر می‌باشد و ۲.۵ تا ۱۰ درصد حجم تمام حفرات را تشکیل می‌دهد و همواره از آب به شدت جذب سطحی شده پر می‌باشد. با این مشخصات می‌توان نتیجه گرفت که این نوع حفرات نقش بسیار کوچکی در تغییر شکل خاک ایفا می‌کنند.

• حفرات بین ذره‌ای^۲

اندازه این حفرات بین 2×10^{-5} تا 5×10^{-1} میلی‌متر می‌باشد و ۱۳ تا ۳۶ درصد حجم کل حفرات را تشکیل می‌دهد. این نوع از حفرات نقش اصلی را در فروریزش خاک دارند.

• حفرات ماکروسکوپی^۳

این حفرات از کانال‌های کوچکی تشکیل شده‌اند که دیواره‌های آن معمولاً کلسیتی است. وجود این حفرات سبب افزایش نفوذپذیری خاک می‌شود. در شکل ۲-۱۸ که کلوخه‌ای از خاک مورد استفاده در تحقیق پیش استفاده شده است، به راحتی با چشم غیرمسلح هم می‌توان این حفرات را در خاک دید.

1 Ultramicroscopic voids

2 Interparticle voids

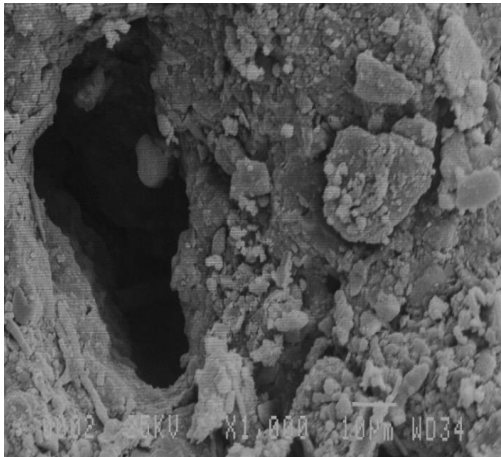
3 Macropores



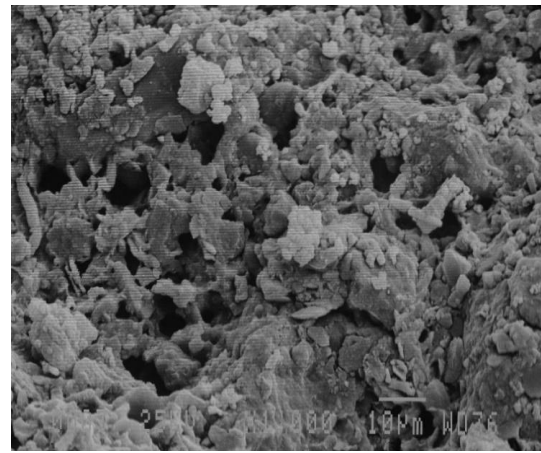
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲-۱۸ عکس‌های میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی‌های متفاوت (الف) بزرگنمایی ۱۰ برابر

(ب) ۱۰۰ برابر (ج) ۱۰۰۰ برابر (د) ۱۰۰۰ برابر (Mohammad Hosseini, 2014)

به طور کلی روند فروریزش در خاک‌های فروریزی مانند خاک لس به سه فاز تقسیم می‌شود

: (Klukanova and Sajgalik, 1994)

فاز اول شامل تخریب ساختار میکروسکوپی اولیه در اثر افزایش رطوبت یا تنش خارجی می‌باشد. در

این فاز توده‌های متراکم از هم باز شده، غشاها، اتصالات و پل‌های رسی شکسته و قسمت بیشتری از

کربنات‌ها حل می‌شوند که باعث حرکت اکسیدهای آهن و منگنز می‌شوند.

در فاز دوم ساختار ریز خاک از هم پاشیده و می‌شکند. ذرات رس توسط آب در خاک جابجا شده،

حجم کربنات‌ها کاهش می‌یابد و بقیه المان‌ها فشرده می‌شوند. در این فاز حجم کل لس کاهش می‌یابد. فاز سوم شامل تشکیل ریز ساختارهای جدید بعد از کامل شدن نشست می‌شود. در این فاز ذرات رس جمع شده و در بعضی نواحی بافت چسبنده تشکیل می‌دهند. همچنین اندازه حفره‌ها تغییر کرده و به طور کلی تخلخل کاهش می‌یابد.

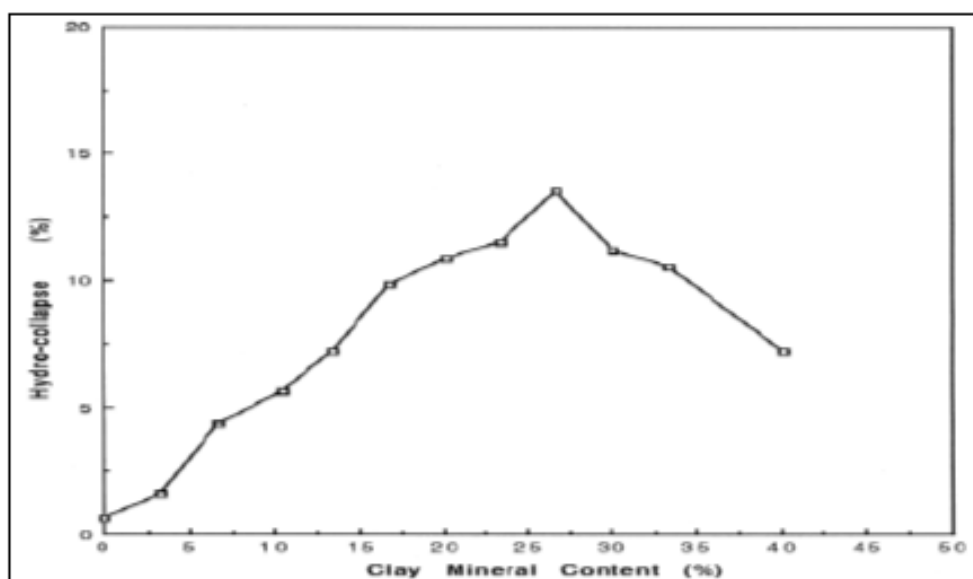
مکانیزم شکست در خاک‌های فروریزی با استفاده از اصول تنش مؤثر در خاک‌های غیراشباع نیز بررسی شده است. تعریف‌های متفاوتی برای معادله تنش مؤثر برای خاک‌های غیراشباع وجود دارد. در خاک‌های غیر اشباع دو پارامتر مجزا از تنش مؤثر وجود دارد که عبارتند از $\sigma - u_a$ و $u_a - u_w$ این دو پارامتر نشان دهنده تنش‌های بین دانه‌ای به وجود آمده توسط مکانیزم‌های مختلف است. پارامتر $\sigma - u_a$ سبب ایجاد تنش بین دانه‌ها و ایجاد ناپایداری در محل اتصال ذرات شده، در حالی که مکش $u_a - u_w$ یک عامل پایداری در محل تماس بین ذرات می‌باشد که در اثر مرطوب شدن و افزایش درجه اشباع به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (El-Ehwany, 1989).

۱-۳-۲ عوامل مؤثر بر میزان فروریزش خاک

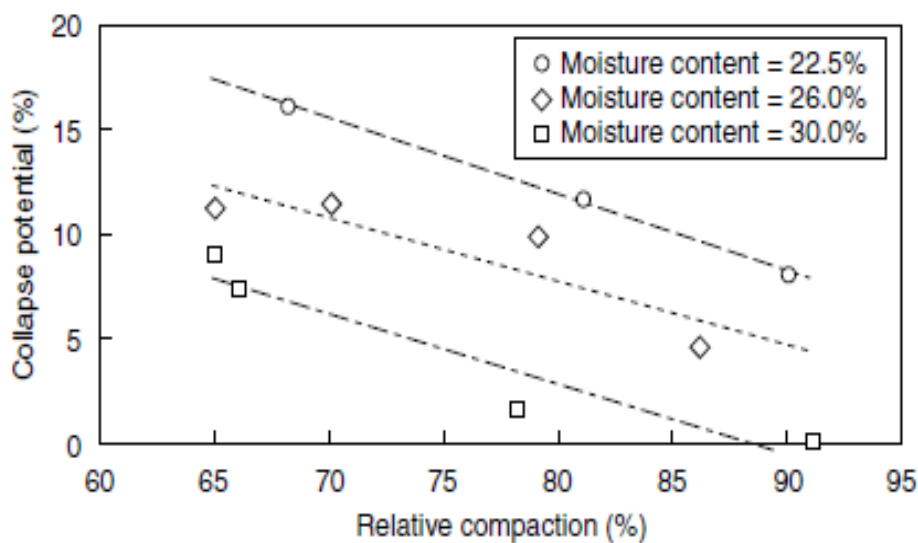
عوامل متعددی بر میزان فروریزش خاک‌ها تأثیر دارند که از جمله این عوامل می‌توان به رطوبت اولیه، نوع خاک، تراکم، تأثیر تنش موجود در هنگام اشباع کردن خاک، اثرات باندهای سیمانی، اثر سیکل‌های تردگی و تأثیر دست‌خوردگی نمونه اشاره کرد (Haeri et al, 2012)

رطوبت اولیه به طور کلی در خاک‌های فروریزی امر تاثیرگذاری است، طبق نظر (Basma, 1992) هرچه رطوبت اولیه بیشتر باشد میزان فروریزش کاهش می‌یابد. همچنین میزان رس موجود در خاک‌های فروریزی متفاوت است. همان طور که در شکل ۲-۱۹ مشخص است (Assally et al, 1998) در آزمایش‌های خود با افزایش رس تا ۲۵٪ افزایش فروریزش را مشاهده کرد. مورد قابل بررسی دیگر اثر تراکم نسبی می‌باشد. (Ng et al, 1998) با توجه به شکل ۲-۲۰ و آزمایش بر روی خاک ماسه لای‌دار

نشان دادند که برای درصد رطوبت اولیه مشخص میزان فروریزش با افزایش وزن مخصوص خشک، کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در یک چگالی خشک مشخص با افزایش رطوبت اولیه خاک، میزان پتانسیل فروریزش کاهش می‌یابد.



شکل ۱۹-۲ اثر تغییرات درصد رس بر میزان فروریزش (Assallay et al., 1998)

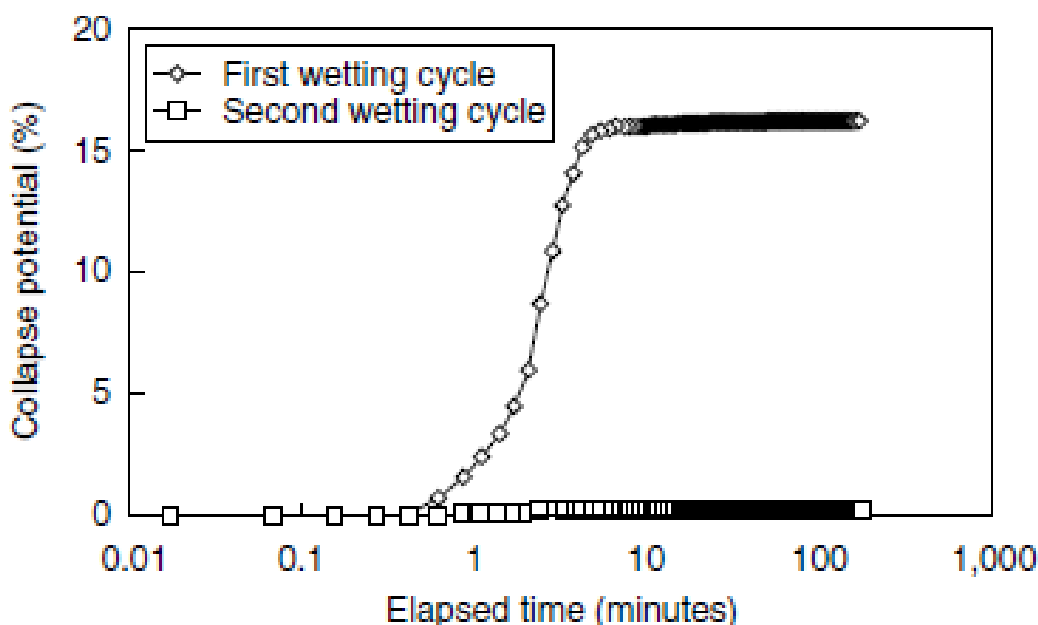


شکل ۲۰-۲ رابطه پتانسیل فروریزش با تراکم نسبی (Ng et al., 1998)

وضعیت تنش در خاک نیز از عوامل تاثیرگذار بر میزان فروریزش است به طوری که خاک‌های ماسه‌ای با افزایش میزان تنش، فروریزش بیشتری خواهند داشت ولی در خاک‌های رسی در فشارهای میانی بین ۲۰۰ الی ۴۰۰ کیلو پاسکال فروریزش بیشتر از سایر فشارها خواهد بود (Adnan and Basma, 1992). همچنین طی تحقیقات دیگری که بر روی خاک‌های فروریزی لس گرگان انجام شد. گزارش شد که میزان فروریزش در طی آزمایش‌ها در مسیر ترشوندگی وابسته به میزان جذب آب نمونه و میزان تنش خالص اعمالی دارد. در تنش خالص بیشتر، فروریزش به مقدار قابل توجهی بیشتر می‌باشد و نمونه با جذب مقادیر اندک آب، از همان ابتدای پروسه ترشوندگی، فروریزش قابل ملاحظه‌ای می‌کند (حائری و قاضی زاده، ۱۳۹۲).

عامل تشکیل ساختار باز بین دانه‌ای در خاک‌های فروریزی، وجود یک پیوند سست میان ذره‌ای است که در صورت جذب رطوبت سست می‌شود و با اعمال تنش سربار، ساختار خاک به طور ناگهانی فرو می‌ریزد. خاک‌های فروریزی معمولاً میزان قابل توجهی پیوند سیمانی بین ذرات خود دارند. این پیوندها معمولاً یا به صورت پیوند سیمانی شکننده و کریستالی و یا پیوند سیمانی ناشی از فشار حفره‌ای منفی بالا (مکش) خود را نشان می‌دهند که هر چه میزان لای یا رس بیشتر باشد پیوندهای سیمانی ناشی از مکش بیشتر می‌شود. (El-Ehwany, 1989)

با انجام یک سری آزمایش روی نمونه‌هایی از ماسه لای‌دار، برای یک میزان تنش ثابت، اثر سیکل-های ترشدگی را بر میزان کرنش ناشی از فروریزش بررسی شده است و مشخص گردید که میزان کرنش ناشی از فروریزش در سیکل‌های بعدی ترشدگی بسیار کمتر از سیکل اول است و در سیکل دوم تنها ۳٪ مقدار ایجاد شده در سیکل اول می‌باشد. شکل ۲-۲۱ نتایج آزمایش‌ها را در سیکل اول و سیکل دوم ترشدگی نشان می‌دهد (Chiu et al, 1998).



شکل ۲-۲۱ اثر اعمال سیکل‌های ترشدگی بر میزان فروریزش (Chiu et al., 1998)

۲-۳-۲ روش‌های شناسایی خاک‌های فروریزشی

روش‌های مختلفی در متون فنی به منظور شناسایی وجود پتانسیل فروریزش در خاک‌ها پیشنهاد شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی اشاره کرد. البته از نظر (Houston et al, 1988) مزیت آزمایش‌های صحرایی نسبت به روش‌های آزمایشگاهی در این است که نمونه‌های آزمایشگاهی دچار دست‌خوردگی می‌شوند و میزان فروریزش کمتر از مقدار واقعی نشان داده می‌شود.

آزمایش‌های نفوذ استاندارد^۱، پرسیومتری^۲ و صفحه باربر^۳ توسط محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفت. باید به این نکته هم توجه داشت که در تست‌های صحرایی پیچیدگی‌های فراوانی وجود دارد و تأثیر بسیاری از پارامترها همچون میزان ترشوندگی و حالت تنش در آن مشخص نشده است. به همین

1 SPT

2 Pressuremeter

3 Plate bearing test

دلیل استفاده از تست‌های آزمایشگاهی قوت می‌گیرد.

جدول ۱-۲ معیارهای تشخیص خاصیت فروریزی در خاکها با استفاده از پارامترهای وزنی حجمی

(Elkady,2002)

توضیحات	پارامترهای رابطه	معیار فروریزش	محقق
اگر δ_s از ۰.۲٪ بیشتر باشد امکان فروریزش وجود دارد	Δe : کاهش نسبت تخلخل هنگام اشباع شدن e_L : نسبت تخلخل قبل از اشباع شدن	$\delta_s = \frac{\Delta e}{e_L + 1} \%$	Abelev (1948)
$K_0 < 0$ درجه فروریزش شدید $K_0 > 0.5$ خاک غیرفروریزی $K_0 > 1.0$ خاک متورم شونده	ω_0 : درصد رطوبت حالت طبیعی خاک LL : حد روانی خاک	$k_0 = (\omega_0 - LL) / PI$	Priklnski (1952)
$\gamma_{dry} < 1.28$ خاک فروریزی $\gamma_{dry} > 1.44$ خاک غیرفروریزی	γ_{dry} : وزن مخصوص خشک خاک	—	Clevenger (1958)
$K_1 > 0.85$ خاک فروریزی	S_0 : درجه اشباع حالت طبیعی خاک	$K_1 = (\omega_0 / s_0) - (LL / PI)$	Feda (1964)
$n_0 > 40\%$ خاک فروریزی	n_0 : تخلخل طبیعی خاک	—	Feda (1966)

در خصوص روش‌های آزمایشگاهی، این معیارها به دو دسته معیارهای کیفی مبتنی بر خصوصیات

وزنی حجمی به نقل از (Elkady, 2002) و معیارهای کمی مبتنی بر انجام آزمایش‌های ادومتر تقسیم می‌-

گردند (Alkandari, 2000) در جدول ۱-۲ می‌توان جمع‌بندی روش‌های دسته اول و در جدول ۲-۲

روش‌های مبتنی بر دسته دوم را مشاهده کرد. در ادامه فصل سوم نحوه انجام تست‌های ادومتر بیشتر

توضیح داده خواهد شد.

جدول ۲-۲ معیارهای تشخیص خاصیت فروریزی در خاک‌ها با استفاده از نتایج آزمایش ادمتر (Alkandari, 2000)

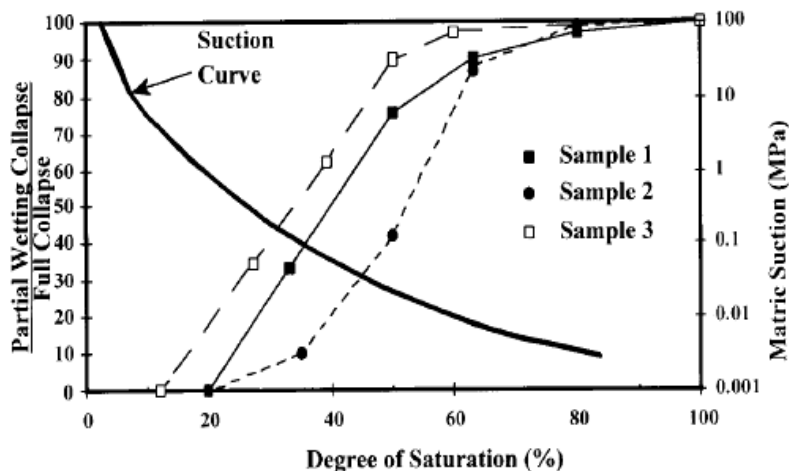
محقق	معیار فروریزش	پارامترهای رابطه	توضیحات
Sultan (1969)	$C_p = \Delta H / H_0$	H_0 : ارتفاع اولیه نمونه	$C_p > 6\%$ درجه فروریزش شدید
Jennings and Knight (1975)	$C_p = \Delta H / H_0$	ΔH : اختلاف بین ارتفاع اولیه نمونه (ماقبل اشباع- سازی) و ارتفاع نهایی نمونه (بعد از اشباع‌سازی) در آزمایش ادمتر	$0 < C_p < 1\%$ غیر فروریزی $1 < C_p < 5\%$ درجه فروریزش کم $5 < C_p < 10\%$ درجه فروریزش متوسط $10 < C_p < 20\%$ درجه فروریزش شدید $C_p > 20\%$ درجه فروریزش بسیار شدید
Sabbagh (1982)	$C_p = \Delta H / H_0$	—	$0 < C_p < 2\%$ غیر فروریزی $2 < C_p < 5\%$ درجه فروریزش متوسط $C_p > 5\%$ درجه فروریزش شدید

۲-۳-۳ بررسی رفتار فروریزی خاک با تغییرات مکش ساختاری

خاک در معرض تعداد بیشماری منبع رطوبت‌زا قرار می‌گیرد و این منابع منجر به افزایش درصد رطوبت آن می‌شود. برخی از منابع مصنوعی که منجر به افزایش رطوبت می‌گردد شامل: آبیاری زمین‌ها و محصولات کشاورزی، نشت از کانال‌ها و خطوط لوله، استخرهای شنا و تانکرهای ذخیره‌ی آب، سیستم‌های تصفیه‌ی آب و تغییر در شرایط زهکشی سطحی آب باران می‌باشد. رطوبت‌های ایجاد شده‌ی جزئی معمولاً تنها محدود به چند متر اول خاک است؛ در حالی که نشت‌های طولانی باعث افزایش رطوبت در عمق‌های بالا می‌شود که در شرایط خاص منجر به وقوع نشست‌های زیادی می‌گردد. در طبیعت نیز خاک فروریزی ممکن است به طور نسبی در معرض آب قرار گیرد و کامل اشباع نشود. در واقع خاک در این حالت مرطوب شده و در اثر افزایش رطوبت دچار فروریزش نسبی می‌شود. پس از این فروریزش نسبی،

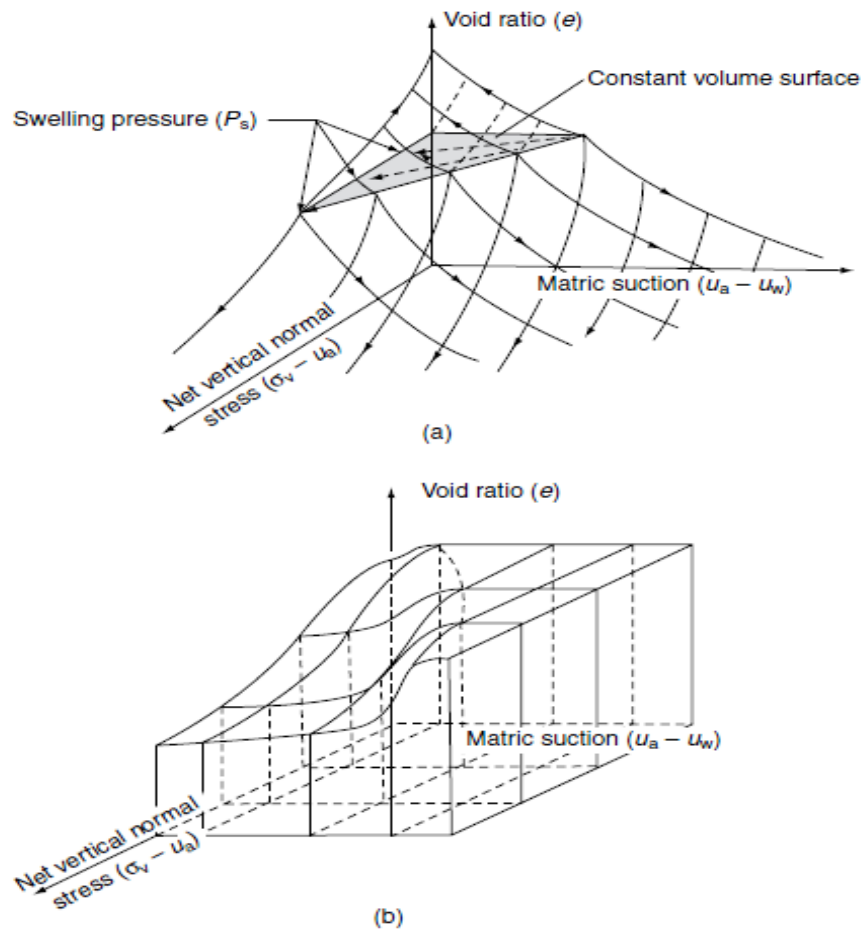
خاک هنوز در وضعیت غیراشباع قرار دارد. در واقع با تغییر رطوبت خاک میزان مکش ماتریسی در آن تغییر می‌کند. وقتی خاک مرطوب می‌شود مکش ماتریسی کاهش می‌یابد ولی مانند رسیدن به وضعیت اشباع، مکش ماتریسی به صفر نمی‌رسد. بنابراین برای بررسی رفتار خاک‌های فروریزشی باید تغییرات مکش ماتریسی در حین مرطوب‌سازی بررسی شود.

در طبیعت خاک‌های غیراشباع زمانی به طور کامل اشباع می‌شوند که سطح آب زیرزمینی بالا بیاید. هنگامی که چنین شرایطی پیش بینی می‌شود جهت پیش بینی میزان فروریزش باید از آزمایش-هایی که خاک در آن به طور کامل اشباع می‌شود، استفاده کرد. در مقابل، زمانی که آب از بالا وارد خاک می‌شود و شرایط طوری است که خاک در آب غوطه‌ور نمی‌شود، خاک فروریزشی به طور نسبی مرطوب شده و خاک نیز به طور نسبی فروریزش می‌کند. در شکل ۲-۲۲ اثرات مرطوب‌سازی نسبی بر کرنش واقعی فروریزش در خاک سیلتی نشان داده شده است. جهت پیش بینی واقعی و دقیق میزان فروریزش باید تخمین خوبی از میزان رطوبتی که به خاک می‌رسد در دست باشد، که این قسمت مشکل‌ترین بخش در پیش بینی میزان فروریزش نسبی در خاک می‌باشد.



شکل ۲-۲۲ نسبت فروریزش نسبی به فروریزش کل خاک با تغییرات مکش ماتریسی (Houstoun et al.,)

(2001)



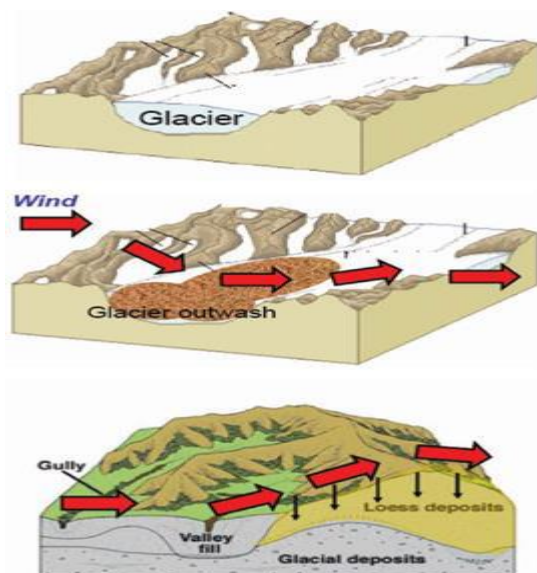
شکل ۲-۲۳ سطوح حالت برای نمونه‌های غیراشباع با الف) ساختار پایدار ب) ساختار ناپایدار (Fredlund, 1996)

شکل ۲-۲۳ گراف سه بعدی را از خاک‌های غیراشباع با ساختار پایدار و ناپایدار در فضای سه بعدی نسبت تخلخل- مکش ماتریسی - تنش خالص قائم نمایش می‌دهد. با توجه به این گراف‌ها، در خاک با ساختار پایدار، هنگامی که تحت بار قائم ثابت مکش ماتریسی با افزایش رطوبت کاهش پیدا می‌کند، تخلخل خاک افزایش می‌یابد. در عین حال در خاک غیراشباع با ساختار ناپایدار (فروریزی) با کاهش مکش ماتریسی در اثر افزودن آب، نسبت تخلخل با نرخ بالایی کاهش پیدا می‌کند (Fredlund, 1996).

۴-۲ مشخصات خاک لس

خاک لس که دارای پتانسیل فروریزش بالایی نیز هست از نهشته‌های بادرفتی تشکیل شده و عموماً رنگ زرد نخودی دارد. در درصد رطوبت‌های پایین شیب ترانشه‌های لسی گاه تا ۹۰ درجه پایدار می‌ماند ولی به محض افزایش رطوبت این مقدار به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد (Feda, 1988). لس شناخته شده‌ترین نوع خاک فروریزشی می‌باشد که حدوداً ۱۰٪ از کل سطح خشکی کره زمین را پوشانده است (El-Howayek et al. 2011).

همان طور که ذکر گردید لس‌ها خاک‌های با منبع بادرفتی هستند. مطابق با شکل ۲-۲۴ مراحل بوجود آمدن خاک لسی توضیح داده شده است. حرکت یخچال‌های طبیعی موجب حمل موادی از جمله خاک‌های درشت دانه و ریزدانه می‌شود. بر اثر گذشت زمان باد موجب فرسایش و نهشته‌گذاری می‌شود و در این مرحله ذرات خاک در جهت وزش باد جابجا می‌گردند که مقدار جابجایی وابسته به سرعت باد و اندازه‌ی ذرات و غیره دارد. پس از این مرحله توده‌های لسی به روی هم انباشته می‌شوند.



شکل ۲-۲۴ نحوه تشکیل خاک‌های لسی (محمد حسینی ۱۳۹۳)

خاک لس در مناطق مختلف دنیا پراکنده شده است، در کشور ما نیز خاک لس در مناطقی در استان گلستان، استان سیستان و بلوچستان، یزد، استان کرمان و به خصوص شهر کرمان، ورامین، منطقه سرخس و دشت مشهد، ساوه و دشت ورامین گزارش شده است (علیزاده رفیعی، ۱۳۹۳).

۵-۲ مفهوم مکش در خاک و روش های اندازه گیری آن:

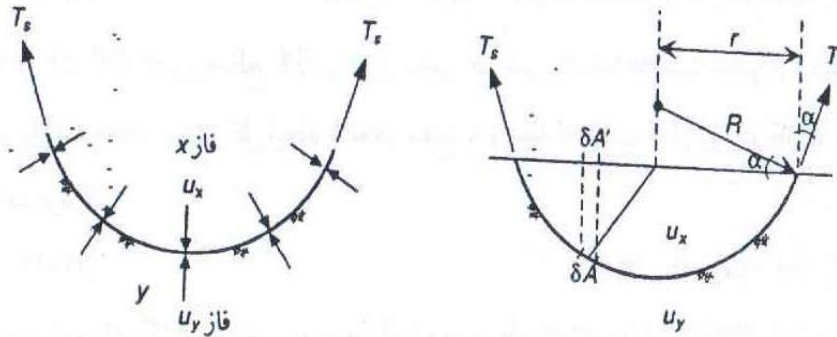
مکش در خاک های غیراشباع را می توان به پتانسیل خاک برای جذب آب نسبت داد که پارامتر اصلی کنترل کننده رژیم جریان و فاکتور اصلی در بررسی رفتار مکانیکی این خاک ها می باشد.

یک توده خاک غیراشباع را به عنوان محیط سه فازی متشکل از سه فاز مختلف آب، هوا و دانه های جامد خاک می شناسیم. البته سطوح تماس بین آب و هوا (پوسته قابل انقباض^۱) نیز بر روی مشخصات مکانیکی محیط های غیراشباع تأثیر می گذارد و در نتیجه می توان آن را به عنوان یک فاز مستقل در نظر گرفت (Fredlund and Morgenstern, 1977). از جمله ویژگی های پوسته قابل انقباض، تحمل نیروهای کششی وارد به خاک است که اصطلاحاً کشش سطحی نام دارد. تحت بارهای وارده، دو فاز آب و هوا جریان یافته و دو فاز اسکلت خاک و پوسته قابل انقباض (سطح تماس بین آب و هوا) به تعادل می رسند.

برای آن که پوسته قابل انقباض در حال تعادل باشد، نیروی کشش سطحی در تمامی سطح تداخل آب و هوا به وجود می آید که آن را با Ts نشان می دهند. این نیرو بر سطح تماس (پوسته قابل انقباض) مماس می باشد. کشش سطحی باعث می شود تا پوسته قابل انقباض همچون یک غشای الاستیک رفتار نماید. در صورتی که یک غشای الاستیک دو بعدی در دو وجه خود تحت اثر فشارهای مختلفی قرار گرفته باشد، برای آنکه در وضعیت تعادل قرار بگیرد بایستی سطح آن نیز به سمت فشار بیشتر باشد. این عمل موجب به وجود آمدن نیروهای کششی در غشا خواهد شد. شکل ۲-۲۵ نمودار آزاد پوسته قابل انقباض را

1 Contractile skin

نشان می‌دهد (Mitchel, 1976).



شکل ۲-۲۵ نمودار آزاد پوسته قابل انقباض (Mitchel, 1976)

معمولاً پارامترهای مکانیکی و رفتاری خاک‌های غیراشباع بر اساس مکش ساختاری تعیین می‌شود. در مکانیک خاک‌های غیراشباع به اختلاف فشار هوا و فشار آب اصطلاحاً مکش بافتی یا مکش ساختاری گفته و آن را با حرف اختصاری s نشان می‌دهند که طبق رابطه زیر با کشش

$$S = (u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R} \quad \text{سطحی در ارتباط است.}$$

۱-۳

در رابطه بالا u_a فشار هوای موجود در بالای انحنای، u_w فشار آب در زیر انحنای، T_s کشش سطحی، R شعاع انحنای پوسته قابل انقباض است.

مکش ساختاری حاصل دو پدیده فیزیکی موئینگی و جذب سطحی می‌باشد. پدیده موئینگی به طور مستقیم مرتبط با کشش سطحی آب می‌باشد در یک لوله موئینه، نیروی موئینگی (متناظر با مقدار مکش) با انحنای تقعر آب متناسب است و کاهش شعاع لوله باعث افزایش انحنای و همچنین افزایش ارتفاع سطح آب در لوله موئینه می‌گردد.

۶-۲ تعیین منحنی مشخصه آب-خاک

منحنی مشخصه آب خاک از جمله مفاهیم اساسی در مکانیک خاک‌های غیر اشباع می‌باشد. این منحنی رابطه بین درصد رطوبت آب و میزان مکش ماتریسی در خاک را مشخص می‌کند، Haerial et al, (2012). مقدار رطوبت خاک با پارامترهای گوناگونی مانند درجه اشباع S_r ، درصد رطوبت وزنی w و یا درصد رطوبت حجمی θ قابل بیان است که پارامترهای فوق به صورت رابطه ۱-۴ با

$$\theta = \frac{S_r \cdot e}{1+e} = \frac{G_s \cdot \omega}{1+e}$$

هم مرتبط می‌باشند:

۱-۴

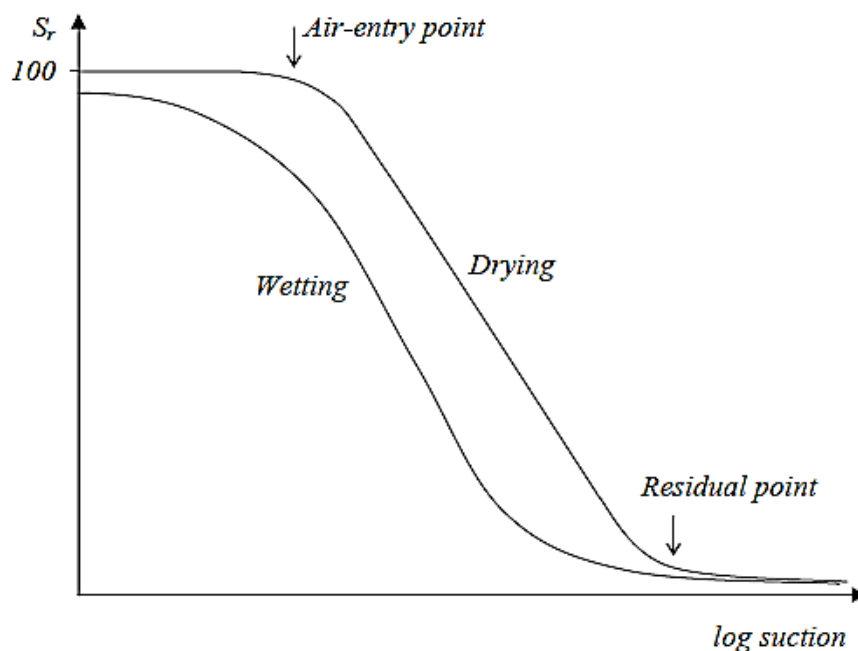
درصد رطوبت حجمی آب در واقع نماینده حجم آبی است که درون حفره‌های خاک قرار دارد. در علم خاک درصد رطوبت حجمی آب برابر با نسبت حجم آب به حجم کل خاک می‌باشد (Leong and Rahardjo, 1997) با توجه به آنکه منحنی مشخصه آب خاک به عنوان مبنایی جهت به دست آوردن پارامترهای خاک غیراشباع، استفاده می‌شود، بدست آوردن مشخصات دقیق منحنی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد (Thudi, 2006).

۱-۶-۲ ویژگی‌های منحنی مشخصه آب-خاک

منحنی مشخصه آب خاک نموداری است که محور عمودی آن، درصد حجمی آب در خاک و محور افقی آن، میزان مکش ساختاری در خاک است که با مقیاس لگاریتمی رسم می‌شود.

شکل ۲-۲۶ نمونه‌ای از منحنی مشخصه آب خاک را نشان می‌دهد. در مکش ماتریسی صفر، درجه اشباع خاک برابر صد درصد می‌باشد (Fredlund and Xing, 1994). همان‌طور که از شکل مشاهده می

شود نمودار شامل دو منحنی خشک شدگی^۱ و منحنی ترشدگی^۲ بوده که به علت عدم توزیع یکنواخت اندازه حفرات در خاک پدیده هیستریزیس در سیکل خشک و تر شدگی اتفاق افتاده و طی فرایندهای خشک شدگی و ترشدگی در هر مکش ماتریسی معین میزان حجم آب و درجه اشباع متفاوت می-باشد (Fredlund and Rahardjo, 1993).



شکل ۲-۲۶ نمودار مشخصه آب خاک (Fredlund et al, 1996).

نسبت تغییرات مکش ماتریسی به تغییرات حجم آب در واقع پتانسیل نگهداشت آب است. مکشی که در آن هوا وارد بزرگترین حفره خاک می شود نقطه ورود هوا^۳ نام دارد و قبل از آن نمونه هنوز اشباع می باشد. بعد از این مرحله با افزایش مکش ساختاری، به تدریج درجه اشباع خاک کاهش یافته و خاک خشک می شود و در نهایت منحنی به نقطه پسماند^۴ می رسد و سطح منحنی افقی می شود که به حجم آب

-
- 1 drying
 - 2 wetting
 - 3 Air entry value
 - 4 Residual water content

در ابتدای این مرحله حجم آب پسماند می‌گویند. بعد از نقطه پسماند درجه اشباع با افزایش مکش ماتریسی به کندی کاهش می‌یابد (Fredlund et al., 1994).

جمع‌بندی مطالعات گذشته محققان مختلف نشان می‌دهد پتانسیل فروریزش خاک رمبنده در شرایط مختلف آلاینده‌گی مورد بررسی قرار نگرفته، لذا در این تحقیق به بررسی فروریزش خاک‌های رمبنده در اثر نشت فرآورده‌های نفتی پرداخته می‌شود.

۳- فصل سوم

نحوه انجام آزمایش‌ها و نتایج شناسایی خاک

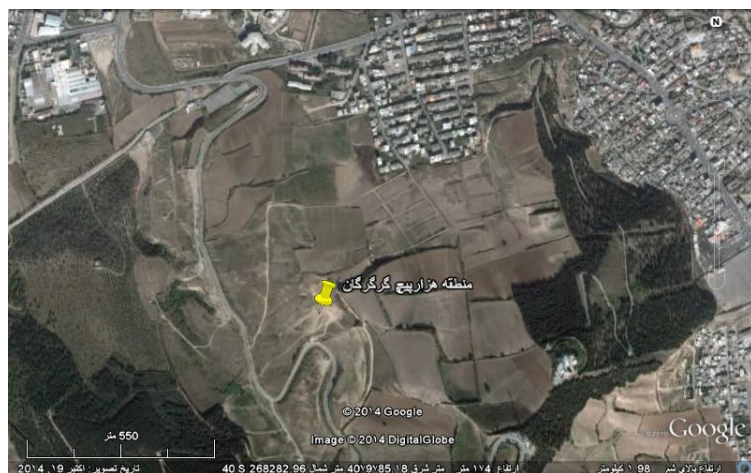
۱-۳ مقدمه

در این فصل به ترتیب ابتدا مکان و نحوه نمونه‌گیری شرح داده می‌شود. سپس آزمایش‌های اولیه برای شناسایی خاک مورد نظر توضیح داده شده و نتایج آزمایش آمده است. خاک مورد آزمایش و آلاینده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند و مشخصات کلی آن‌ها ارائه می‌شود. آزمایش فروریزش اشباع و غیراشباع برای خاک آلوده و بدون آلودگی که در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است شرح داده می‌شود. همچنین برای بررسی رفتار خاک در حالت غیراشباع از دستگاه ادمتر با کنترل مکش‌های متغیر استفاده شد. به همین منظور مراحل و جزئیات دستگاه ادمتر با قابلیت کنترل مکش که در دانشگاه ساخته شده است شرح داده می‌شود. همچنین آزمایش کاغذ صافی برای بدست آوردن منحنی مشخصه آب-خاک در شرایط مختلف انجام گرفت که توضیحات لازم در همین فصل ارائه می‌شود.

۲-۳ نمونه‌گیری دست‌نخورده در محل و آزمایشگاه

۱-۲-۳ انتخاب محل نمونه‌گیری

برای انتخاب محل نمونه‌گیری سه محل مختلف در استان گلستان انتخاب شد. ابتدا تپه هزارپیچ واقع در محدوده میدان بسیج شهر گرگان و منطقه بعدی روستای بالاجاده در شهرستان کردکوی بوده است ولی منطقه انتخاب شده روستای تمقره قوزی در شهرستان کلاله است. در شکل ۱-۳ موقعیت مکانی مناطق مختلف آورده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱-۳ مناطق مورد بررسی قرار گرفته جهت نمونه گیری (الف) منطقه هزار پیچ (ب) منطقه بالاجاده (ج) منطقه کلالة محل انتخاب شده جهت نمونه گیری

دلایل انتخاب منطقه کلاله:

- بکر بودن و کمترین میزان عوامل انسانی در خاک منطقه
 - عمق زیاد لایه خاک لس و اطمینان از وجود خاک مورد نظر
- پدیده فروریزش در خاک منطقه به وضوح قابل تشخیص بود که یکی از موارد فروریزش در منطقه بدون وجود هرگونه سربار در اثر وزن خود خاک و افزایش رطوبت در شکل ۲-۳ آمده است. در شکل ۳-۳ هم می‌توان حالت دندان‌دندانه و رنگ نخودی دیواره خاک لس را دید.



شکل ۲-۳ پدیده فروریزش در خاک منطقه مورد مطالعه



شکل ۳-۳ دیواره پایدار خاک لس و حالت دندان‌دندانه در دیواره

۲-۲-۳ نحوه نمونه‌گیری در محل

پس از انتخاب مکان مناسب جهت نمونه‌گیری خاک به عمق ۱ متر حفر شد تا لایه خاک نباتی و تمام دست‌خوردگی‌های احتمالی و ریشه گیاهان حذف شود. در عمق ۱ متری نمونه‌گیری دست‌نخورده در جعبه‌های ۳۰×۳۰×۳۰ انجام گرفت به شکلی که فقط یک وجه جعبه باز بود. جعبه از وجه باز بر روی سطح خاک قرار گرفت و اطراف جعبه به آرامی خالی شد. با این کار جعبه در خاک نفوذ نموده و بعد از پرشدن کامل جعبه توسط خاک وجه پایین جعبه برش زده شد. بعد از اتمام نمونه‌گیری، برای جلوگیری از کاهش رطوبت نمونه‌ها سطح آن‌ها با دولایه پارچه نظیف پوشانده شده و مخلوط موم و پارافین مذاب روی آن‌ها را به طور کامل می‌گیرد. در شکل ۳-۴ نحوه نمونه‌گیری به صورت مرحله به مرحله نشان داده شده است.



(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳-۴ مراحل نمونه‌گیری از خاک منطقه (الف) انتخاب محل نمونه‌گیری (ب) لایه خاک نباتی و خاک

لس (ج) نحوه نمونه برداری (د) آماده‌سازی نمونه

۳-۲-۳ نحوه نمونه‌گیری دست‌نخورده آزمایشگاهی از نمونه

صحرایبی

پس از برداشت نمونه دست‌نخورده در صحرا و انتقال آن به آزمایشگاه جهت انجام آزمایش‌ها نیاز به نمونه‌گیری دست‌نخورده با ابعاد مورد نظر می‌باشد به همین منظور مانند روش نمونه‌گیری صحرایبی با خالی کردن دور قالب نمونه‌گیری آرام آرام قالب را در خاک نفوذ نموده تا خاک به طور کامل وارد رینگ شود. توجه به این نکته ضروری است که به دلیل رطوبت پایین، خاک ترد و شکننده است و هنگام نمونه‌گیری امکان خرد شدن، شکستن خاک و تغییر در ساختار خاک وجود دارد به همین خاطر در هنگام برداشت نمونه باید دقت کافی انجام شود. شکل ۳-۵ نحوه نمونه‌گیری در آزمایشگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵ نحوه برداشت نمونه آزمایشگاهی

۳-۲-۴ نحوه نمونه‌گیری بازسازی شده آزمایشگاهی

برای ایجاد خاک با آلودگی به صورت درصد وزنی نیاز به بازسازی خاک همراه با مواد آلاینده است. همچنین برای بررسی اثر دست خوردگی نیز نمونه‌های بازسازی شده خاک مورد استفاده قرار گرفت. از طرفی بر اساس نتایج آزمایش الک مشخص شد بخش اصلی خاک ریزدانه است به همین دلیل برای حذف خاک‌های کلوخه شده ابتدا خاک دست خورده خرد شد و از الک نمره ۱۰ عبور داده شد. سپس خاک مورد نظر در اون به طور کامل خشک شد و برای بازسازی نمونه مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که نسبت تخلخل و وزن مخصوص خاک محاسبه شده بود برای بدست آوردن همان نسبت تخلخل ابتدا خاک خشک مورد نیاز برای کوبیدن در قالب بر اساس حجم قالب مشخص شد. با این روش اندکی تغییر در خلل و فرج و ساختار قرارگیری دانه‌ها در کنار هم ایجاد می‌شود اما مشخصاً به طور کامل خاصیت فروریزی خاک از بین نمی‌رود. خاک توزین شده در ۳ لایه در قالب ساخت نمونه متراکم و نمونه با دانسیته و رطوبت مدنظر تهیه شده است.

۳-۳ آزمایش‌های اولیه برای شناسایی خاک

۱-۳-۳ چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک (Gs):

این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D 854 و برای بدست آوردن چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک می‌باشد صورت گرفته است.

برای محاسبه چگالی دانه‌های جامد خاک، از رابطه ۱-۳ استفاده می‌شود.

$$G_s = K * \frac{M_s}{M_s + M_{PW} - M_{PWS}} \quad 1-3$$

M_s : جرم ذرات خاک

M_{PW} : جرم ذرات خاک و آب

$M_s + M_{PW} - M_{PWS}$: جرم ذرات خاک و آب و پیکنومتر

K : ضریب تصحیح دمای آب

این آزمایش بر روی سه نمونه خاک صورت پذیرفت و در نهایت میانگین آن‌ها به عنوان چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است، با توجه به این که دمای آب برابر ۲۴/۵ اندازه گیری شده است، ضریب K را ۰/۹۹۸۹۷ در نظر می‌گیریم. جدول ۱-۳ نتایج آزمایش چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک را نشان می‌دهد.

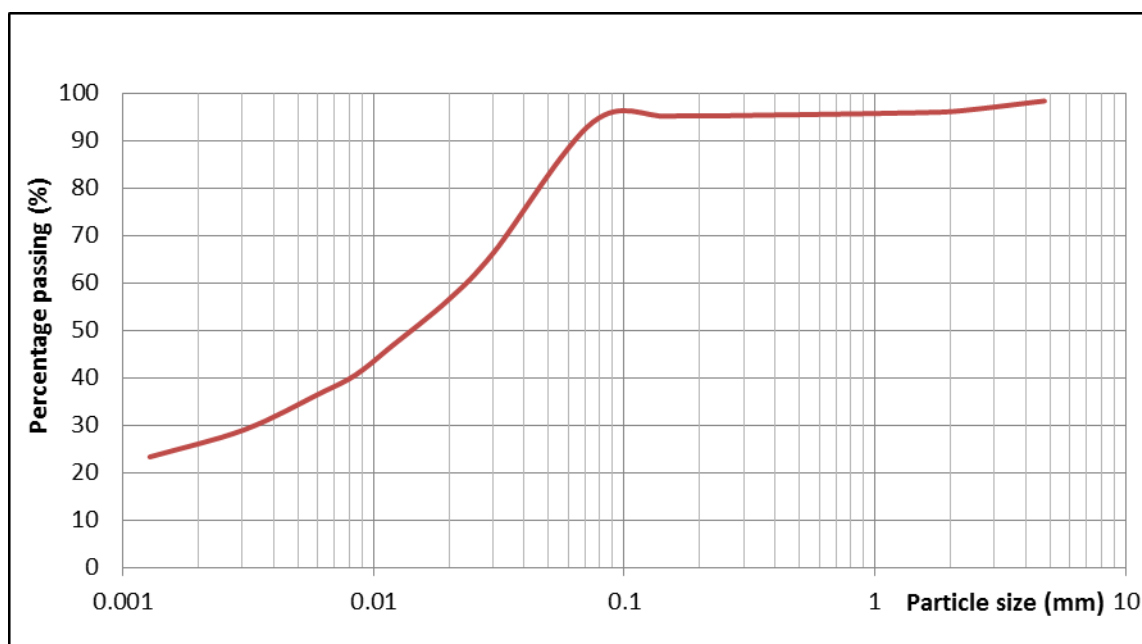
۲-۳-۳ آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری

آزمایش دانه‌بندی به صورت تر برای دانه‌های بزرگتر 0.075mm و آزمایش هیدرومتری بر طبق استاندارد ASTM D 422-63 بر روی خاک انجام شده و پس از آن منحنی دانه بندی برای این آزمایش

رسم می‌شود. روند کار بدین ترتیب است که ابتدا مقدار مشخصی از خاک از الک شماره 200 عبور داده تا درصد ریزدانه خاک به دست آید. مشاهده شد که به طور متوسط ۹۴٪ از خاک از الک نمره ۲۰۰ عبور می‌کنند. بنابراین جهت انجام آزمایش دانه بندی می‌بایست از روش هیدرومتري استفاده شود. شکل ۳-۶ نمودار حاصل از انجام آزمایش‌های دانه بندی خاک را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۳ نتایج آزمایش چگالی نسبی دانه‌های جامد خاک

Gs	شماره آزمایش
۲/۶۵۷	۱
۲/۶۸۹	۲
۲/۶۵۹	۳
۲/۶۶۸	میانگین



شکل ۳-۶ نمودار دانه‌بندی از آزمایش الک تر و هیدرومتري

۳-۳-۳ آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی و تعیین وزن

مخصوص خشک خاک

برای محاسبه وزن مخصوص خشک خاک از روش موم‌گیری استفاده گردید. در این آزمایش ۵ عدد کلوخه خاک با رطوبت طبیعی با پارافین ذوب شده به طور کامل پوشانده می‌شود و با استفاده از حجم آب جابجا شده و وزن مخصوص پارافین که مشخص است وزن مخصوص خشک خاک محاسبه می‌شود. در جدول ۲-۳ خلاصه نتایج و میانگین داده‌ها آمده است.

برای محاسبه درصد رطوبت طبیعی خاک سه عدد کلوخه خاک نمونه دست نخورده برداشته و طبق آیین نامه 98 – ASTM D 2216 آزمایش بر روی این نمونه‌ها انجام شده و نتایج آزمایش در جدول ۳-۳ آمده است.

جدول ۲-۳ وزن مخصوص خشک خاک

وزن مخصوص خشک خاک (gr/cm^3)	وزن مخصوص طبیعی (gr/cm^3)
۱/۴۲	۱/۴۵
۱/۳۵	۱/۳۸
۱/۳۷	۱/۴۰
۱/۴۵	۱/۴۸
۱/۵۰	۱/۵۳
میانگین=۱/۴۲	میانگین=۱/۴۵

جدول ۳-۳ تعیین درصد رطوبت خاک

شماره آزمایش	ω%
۱	۵/۴۱
۲	۵/۴۷
۳	۵/۸۴
میانگین	۵/۵۷

۴-۳-۳ حد خمیری و حد روانی

آزمایش حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D4318 انجام شد. برای حد روانی از آزمایش جام کاساگرانده و آزمایش حد خمیری از روش فیتیله استفاده شد. نتایج آزمایش در جدول ۴-۳ آمده است.

جدول ۴-۳ نتایج حدود اتربرگ

حد روانی	حد خمیری	دامنه خمیری
٪۲۹	٪۲۱	٪۸

۴-۳ آلاینده‌های مورد استفاده

برای آزمایش‌های انجام شده از نفت چراغ و گازوئیل استفاده شده است. هر دو آلاینده از جایگاه پخش فرآورده‌های نفتی شاهرود تهیه شد که خصوصیات فیزیکی آن‌ها در جدول ۵-۳ آورده شده است.

جدول ۳-۵ خصوصیات فیزیکی آلاینده‌ها

خصوصیات	واحد	گازوئیل	نفت چراغ
چگالی نسبی در دمای ۱۵/۶°C	KN/m ³	۸/۴	۸/۰۴
دمای اشتعال	°C	۵۶	۳۸-۴۳
دمای خود اشتعالی	°C	۲۵۷	۲۲۰
دمای جوش	°C	۱۵۰-۳۹۰	۱۵۰-۲۷۵

۳-۵ آزمایش های تحکیم یگانه و دوگانه

در آزمایش تحکیم یگانه، یک نمونه خاک با درصد رطوبت طبیعی تحت اثر اعمال بار قرار می‌گیرد و در یک مرحله مشخص از بارگذاری در مقدار بار ثابت، نمونه اشباع شده و تغییر شکل ایجاد شده در اثر ترشدگی در مقدار بار ثابت، پتانسیل فروریزش خاک تعریف می‌گردد. رابطه ۳-۲ پتانسیل فروریزش خاک را با استفاده از آزمایش تحکیم یگانه نشان می‌دهد.

$$i_e = \frac{\Delta e_c}{1 + e_i} \quad ۳-۲$$

در رابطه بالا Δe_c تغییر در نسبت تخلخل در اثر افزایش رطوبت، e_i نسبت تخلخل خاک قبل از

اشباع کردن

(Jennings and Knight 1975) روش تحکیم دوگانه را ارائه نمودند که دو نمونه خاک در نظر

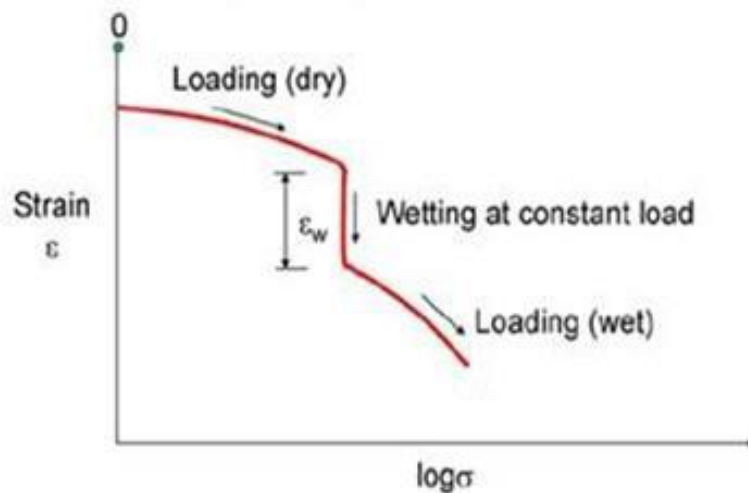
گرفته می‌شود. یکی در حالت اشباع و دیگری در رطوبت طبیعی بارگذاری می‌گردد. پس از رسم منحنی‌ها

بر روی یک دستگاه مختصات مشترک، پتانسیل فروریزش مطابق رابطه ۳-۳ تعریف می‌گردد.

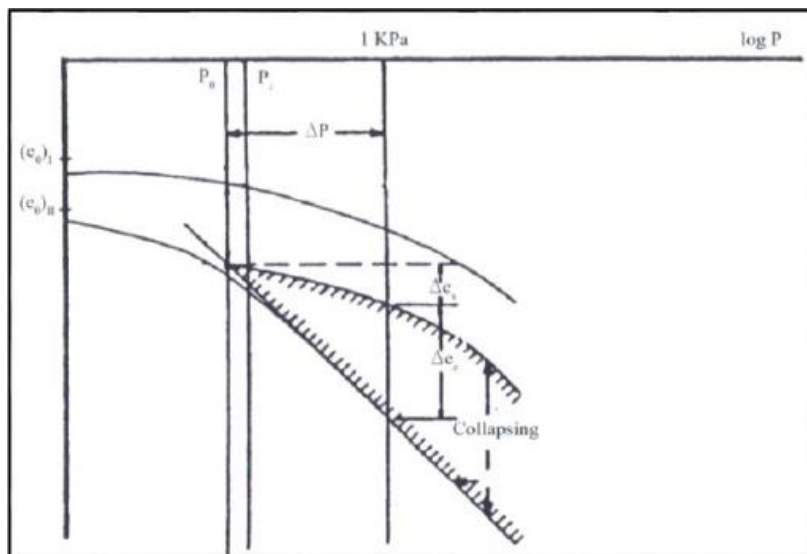
$$i_m = \frac{\Delta e_c}{1 + e_i}$$

۳-۳

شکل ۷-۳ و ۸-۳ نمودارهای حاصل از آزمایش‌های تحکیم یگانه و دوگانه را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۳ آزمایش تحکیم یگانه در خاک‌های فروریزی (محمد حسینی ۱۳۹۳)



شکل ۸-۳ آزمایش تحکیم دوگانه در خاک‌های فروریزی (محمد حسینی ۱۳۹۳)

۶-۳ آزمایش فروریزش

۱-۶-۳ روش انجام آزمایش

پتانسیل فروریزش در آزمایش‌های این تحقیق طبق استاندارد آیین نامه ASTM D5333 انجام شد. روند آزمایش مشابه آزمایش تحکیم یگانه است. این آزمایش هم می‌تواند بر روی نمونه‌های دست‌نخورده و هم بروی نمونه‌های بازسازی شده انجام شود. در این آزمایش نمونه داخل دستگاه تحکیم قرار می‌گیرد. پس از قرار دادن نمونه در دستگاه و بستن تجهیزات اندازه‌گیری نشست، تنش نشیمنگاهی معادل ۵ کیلوپاسکال به نمونه اعمال می‌شود. پس از اعمال تنش نشیمنگاهی، تنش‌های معادل با ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ کیلوپاسکال به آن اعمال و تغییر شکل نمونه اندازه‌گیری می‌گردد. نمونه، یک ساعت پس از اعمال بارگذاری ۲۰۰ کیلوپاسکال غرقاب می‌شود و بارگذاری تا ۲۴ ساعت ادامه پیدا می‌کند. لازم به ذکر است، در صورت اعمال سیال از قسمت پایین به نمونه، امکان محبوس شدن هوا در نمونه از بین می‌رود. بر اساس این آزمایش شاخص فروریزش^۱ که نشان دهنده میزان فروریزش نمونه بر حسب درصد در تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد، از رابطه ۳-۴ بدست می‌آید.

$$I_e = \frac{d_f - d_i}{h_0} \times 100 \quad ۴-۳$$

در رابطه بالا d_f قرائت گیج در تنش مورد نظر پس از مرطوب شدن، d_i قرائت گیج در تنش مورد نظر پیش از مرطوب شدن، h_0 ارتفاع اولیه نمونه می‌باشد.

۲-۶-۳ برنامه آزمایش‌های فروریزش

برنامه‌ریزی انجام آزمایش‌ها به شرح ذیل صورت پذیرفت:

۱. انجام آزمایش فروریزش اشباع بر روی نمونه‌های دست‌نخورده برای ارزیابی فروریزشی بودن

1 Collapse Index

خاک و تعیین شاخص فروریزش آن

۲. انجام آزمایش فروریزش برای نمونه بازسازی شده با رطوبت و دانسیته خاک دست نخورده به

منظور ارزیابی اثر بازسازی بر روی میزان فروریزش

۳. انجام آزمایش‌های فروریزش بر روی نمونه‌های بازسازی شده با درصدهای مختلف آلاینده

۴. انجام آزمایش فروریزش در اثر اشباع شدن کامل با آلاینده‌های نفتی به منظور مقایسه آن با

نمونه‌های بدون آلودگی و آلوده‌ی اشباع شده با آب

۷-۳ آزمایش فروریزش با قابلیت کنترل مکش ساختاری

۱-۷-۳ روش انجام آزمایش

این آزمایش‌ها بر اساس روش ارائه شده توسط (Fredlund and Rahardjo 1996) انجام شدند. در واقع این آزمایش‌ها با کنترل فشار هوا و فشار آب یا به عبارتی مکش ساختاری، رفتار تغییر حجمی و تغییرات رطوبتی خاک را بررسی می‌کنند.

در این تحقیق آزمایش‌های غیراشباع در حالت بار اعمالی ثابت-مکش متغیر انجام شد. دلیل انتخاب این حالت، بررسی سیال منفذی در حالات و شرایط مختلف می‌باشد. در آزمایش‌هایی که خاک به صورت درصد وزنی آلوده شده بود سیال منفذی حالت چند فازی پیدا کرده است. بررسی تاثیر افزودن آب و گازوئیل به طور همزمان در خاک توسط کنترل مکش امکان‌پذیر است. از این رو خاک با ۶٪ آلاینده گازوئیل در مکش‌های نزدیک به اشباع با خاک بدون آلودگی مقایسه شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

روند آزمایش به این شکل است که ابتدا دیسک سرامیکی را اشباع می‌کنیم. سپس نمونه در دستگاه قرار داده می‌شود و مکش ۱۵۰ کیلوپاسکال اعمال می‌شود. علت انتخاب مکش ۱۵۰ کیلوپاسکال

عدد عبوری هوای^۱ دیسک سرامیکی مورد استفاده است که با آزمایش بر روی دیسک سرامیکی مقدار عدد عبوری هوا ۲۰۰ کیلوپاسکال تعیین شد. پس از به تعادل رسیدن نمونه در مکش ۱۵۰ کیلوپاسکال بار قائم خالص ۲۰۰ کیلوپاسکال اعمال می‌شود سپس تا به تعادل رسیدن نمونه تغییرات جذب آب و تغییر در گنج تغییرمکان را ثبت می‌کنیم. بعد از تعادل در این مکش مقدار مکش را به ۱۰۰ کیلوپاسکال می‌رسانیم. همین مراحل را برای مکش ۵۰ کیلوپاسکال نیز انجام می‌دهیم. این آزمایش برای یک نمونه خاک بدون آلودگی بازسازی شده و یک نمونه خاک با ۶٪ آلودگی انجام شد.

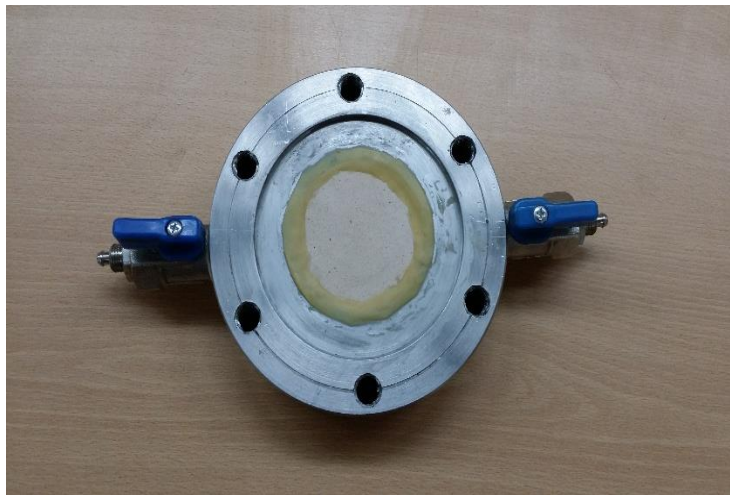
۳-۷-۲ دستگاه تحکیم با قابلیت کنترل مکش:

برای انجام آزمایش در درصد رطوبت‌های پایین‌تر از اشباع، دستگاه تحکیم با قابلیت کنترل مکش ساخته شد. دستگاه ساخته شده دارای اجزایی شامل پایه کف، دیسک سرامیکی، حلقه‌های نمونه‌گیر، مخروط فلزی، درپوش، اهرم اعمال فشار، عقربه نشان دهنده تغییر مکان، تنظیم کننده فشار هوا، مبدل فشار هوا به آب و دستگاه کنترل تغییر حجم آب می‌باشد که در ادامه در مورد هر کدام توضیح داده می‌شود.

- پایه کف محفظه: شامل محل قرارگیری دیسک سرامیکی و همچنین محفظه‌ای برای عبور آب از زیر نمونه می‌باشد. در دو طرف پایه کف، شیرهای ورودی و خروجی آب می‌باشد.
- دیسک سرامیکی: دیسک سرامیکی متخلخل دارای حفره‌های هم اندازه بوده و مانند یک غشا بین دو فاز هوا و آب قرار گرفته و عمده‌تاً از مصالح سرامیکی از جنس کائولینیت ساخته می‌شود. از خصوصیات مهم این دیسک آن است که آب از آن عبور می‌کند اما اجازه عبور هوا را نمی‌دهد (تا زمانی که فشار هوا از عدد عبوری هوای دیسک بیشتر نگردد) اختلاف بین فشار هوای بالای دیسک سرامیکی و آبی که در زیر دیسک قرار دارد را اصطلاحاً مکش ساختاری گفته و به

1 Air Entry

مقدار ماکزیمم مکش ساختاری که متناظر با آن دیسک سرامیکی اجازه عبور هوا را نخواهد داد اصطلاحاً عدد عبوری هوای دیسک می گویند. عدد عبوری هوا برای دیسک‌های استفاده شده در آزمایش، برابر ۲۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. هرچه عدد عبوری هوا برای دیسک سرامیکی بالاتر باشد می‌توان در بازه بزرگتری از مکش‌ها آزمایش انجام داد.



شکل ۳-۹ دیسک سرامیکی و نحوه قرار گرفتن آن درون پایه کف دستگاه

- حلقه‌های نمونه‌گیر: حلقه نمونه‌گیر با ارتفاع ۲۰ و قطر ۵۰ میلی‌متر می‌باشد.
- مخروط ناقص فلزی: برای توزیع فشار هوا بر روی نمونه از مخروط ناقصی استفاده می‌شود که بر روی نمونه قرار می‌گیرد.
- محفظه فلزی استوانه‌ای شکل: این محفظه برای قرار گرفتن درپوش فلزی روی آن و همچنین برای نگه‌داشتن فشار هوای داخل محفظه، بر روی پایه کف قرار می‌گیرد.
- درپوش فلزی: این درپوش جهت نگه‌داشتن هوای داخل محفظه، بر روی محفظه استوانه‌ای شکل قرار می‌گیرد. درپوش به وسیله شش عدد پیچ به پایه کف محکم وصل می‌شود. شیر ورودی هوا

بر روی درپوش قرار می‌گیرد. همچنین سوراخی در درپوش ایجاد شده که اهرم اعمال فشار قائم از درون آن می‌گذرد.

- اهرم اعمال فشار قائم: این اهرم از داخل سوراخ تعبیه شده روی درپوش فلزی عبور کرده و روی مخروط فلزی می‌نشیند.

- عقربه نشان دهنده تغییر مکان: این عقربه نشان دهنده در تماس با اهرم اعمال فشار بر روی دستگاه نصب می‌شود و تغییرات ارتفاع نمونه در طول آزمایش را نشان می‌دهد.

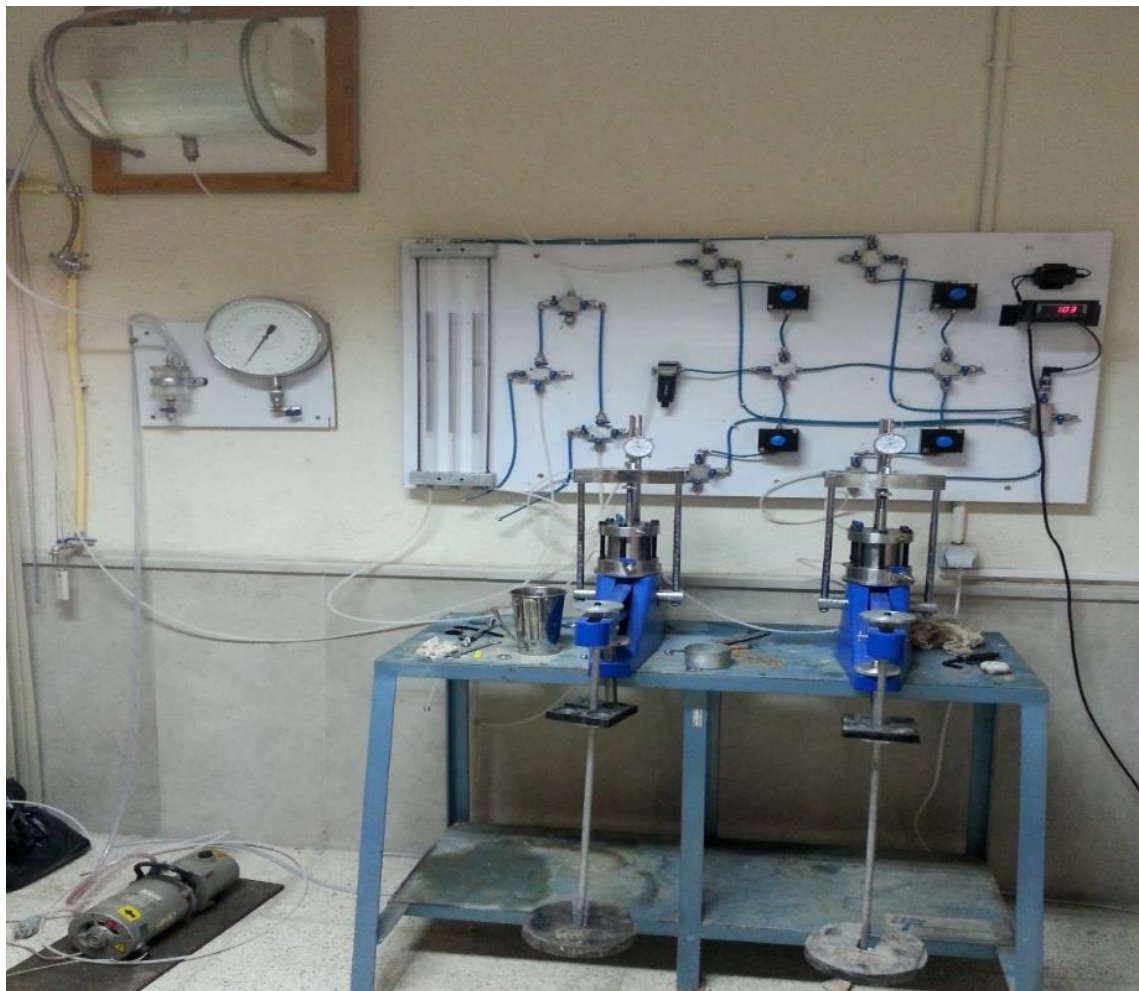
- تنظیم کننده فشار هوا: از تنظیم کننده فشار هوا برای تنظیم و کنترل فشار هوای لازم بر روی نمونه استفاده می‌شود. بعضی از این تنظیم کننده‌ها قابلیت رطوبت‌گیری از هوا را دارند. در ابتدای ورودی هوا به سیستم نیز یک رطوبت‌گیر برای گرفتن رطوبت از هوای وارده از کمپرسور هوا به سیستم، قرار گرفته‌است.

- دستگاه کنترل تغییر حجم آب : از این دستگاه برای اندازه‌گیری تغییرات حجم آب وارد شده یا خارج شده از نمونه استفاده می‌شود.

عملکرد دستگاه به این نحو است که نمونه در یک رینگ کاملاً عایق قرار می‌گیرد. رینگ طوری طراحی شده است که هوا از بالای استوانه و آب از پایین با فشارهای قابل تنظیم وارد می‌شوند. به این شکل می‌توان مکش‌های مورد نظر را به نمونه اعمال کرد. تامین فشارهای مورد نیاز سیستم توسط یک دستگاه پمپ فشار هوا ایجاد می‌شود و با رگلاتورهای تعبیه شده در بورد دستگاه برای ایجاد مکش تنظیم می‌شود.

پس از تهیه اجزای مختلف دستگاه، نصب و کالیبره سازی انجام شده که به تفکیک توضیحات لازم برای آن‌ها ارائه شده است. در شکل ۳-۱۰ اجزای مختلف دستگاه بعد از نصب در آزمایشگاه نشان داده

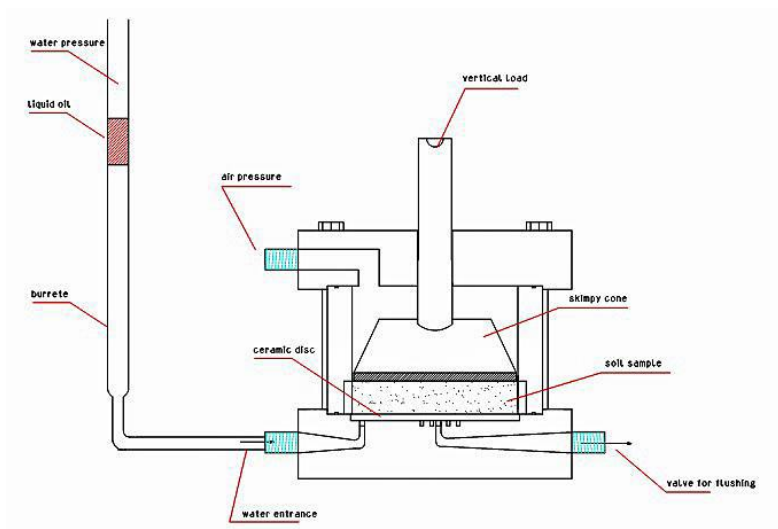
شده است. در شکل ۱۱-۳ نیز اجزای مختلف محفظه و شکل شماتیک محفظه نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۳ دستگاه تحکیم با قابلیت کنترل مکش



(الف)



(ب)

شکل ۱۱-۳ (الف) قسمت‌های مختلف محفظه ادومتر با قابلیت کنترل مکش (ب) شماتیک محفظه ادومتر

با قابلیت کنترل مکش

۱-۲-۷-۳ اشباع سازی دیسک سرامیکی

در طول آزمایش باید همواره دیسک سرامیکی اشباع باشد. اشباع نبودن دیسک حتی برای یک

لحظه به منزله شکست آزمایش و نتایج نادرست می‌باشد. برای اشباع کردن دیسک، راه‌های متفاوتی وجود دارد. در این پژوهش ابتدا محفظه استوانه‌ای را تا حدود نصف حجم خود اشباع کرده ایم و دیسک به مدت ۲۴ ساعت تحت فشارهای آب و هوای برابر بوده است به طوریکه فشار آب از پایین سرامیک و فشار هوا از بالای سرامیک اعمال شده است. بعد از گذشت ۲۴ ساعت از اعمال فشار برابر، فشار هوای بالای سرامیک را افزایش می‌دهیم و نرخ تغییرات آب خروجی از پایین سرامیک را اندازه‌گیری می‌کنیم. ثابت ماندن نرخ تغییرات آب خروجی از سرامیک، نشان‌دهنده‌ی اشباع بودن کامل سرامیک می‌باشد. لازم به ذکر است که در طول اشباع‌سازی، چندین بار شست و شوی با فشار از زیر دیسک انجام می‌دهیم تا هوای حل شده در آب و همچنین هوای محبوس شده از زیر سرامیک خارج شود.

۸-۳ روش‌های موجود برای تعیین منحنی مشخصه آب-

خاک

با داشتن منحنی نگهداشت آب-خاک تا حد زیادی می‌توان نفوذپذیری و رفتار خاک در برابر عبور سیال و همچنین میزان پخش آلودگی در آن را در صورتی که توده خاک در معرض آلودگی قرار داشته باشد تعیین کرد. این منحنی همچنین رفتار خاک غیراشباع در بارگذاری‌های مختلف و فرآیندهای ترشدگی و خشک‌شدگی که می‌تواند منجر به فروریزش توده خاک گردد را پیش‌بینی می‌کند.

روش‌های متعددی نیز برای اندازه‌گیری مکش بافتی خاک و تعیین منحنی مشخصه آب-خاک وجود دارد. این منحنی ممکن است به صورت مستقیم یا غیر مستقیم در آزمایشگاه تعیین شود. در روش مستقیم فشار آب حفره‌ای با اعمال فشار هوای مشخص، اندازه‌گیری شده و لذا مکش $(u_a - u_w)$

در درصد رطوبت مورد نظر تعیین می‌گردد. از میان روش‌های مستقیم، فشار صفحه‌ای (pressure plate) و تانسومتر (tensiometer) و فشار غشایی (pressure membrane) از جمله مهم‌ترین و معمول‌ترین این روش‌ها می‌باشند. در روش غیر مستقیم با بررسی شاخص‌های نشان‌دهنده میزان رطوبت خاک و یا خواص فیزیکی که نسبت به تغییرات میزان رطوبت حساس هستند، نسبت به اندازه‌گیری درصد رطوبت خاک در مکش متناظر اقدام می‌شود. از میان روش‌های مورد استفاده در این بخش می‌توان به روش فیلتر کاغذی (filter paper) و سنسورهای اتلاف حرارتی (heat dissipation sensor) نام برد.

مکش ساختاری خاک را می‌توان به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری نمود. روش‌های غیرمستقیم معمولاً بر مبنای اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی حرارتی یک حسگر در تماس با توده خاک می‌باشد و روش‌های مستقیم عموماً شامل استفاده از تانسومتر می‌باشد.

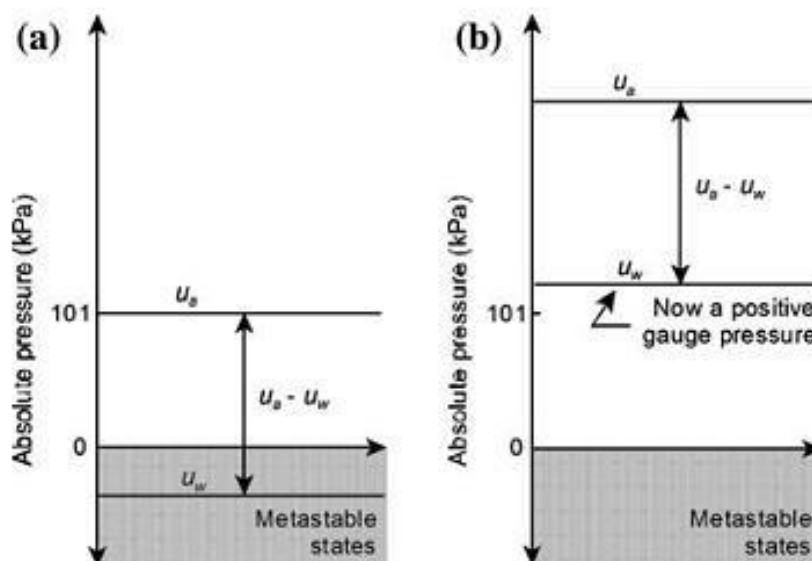
در روش‌های مستقیم با استفاده از یک دیسک سرامیکی^۱ که اجازه عبور هوا را از درون خود نمی‌دهد، مکش ماتریسی اندازه‌گیری می‌شود. این دیسک سرامیکی دارای حفرات هم اندازه بوده و همچون یک غشا بین دو فاز هوا و آب قرار می‌گیرد و عمدتاً از مصالح سرامیکی از جنس کائولینیت ساخته می‌شود (Jotisankasa, 2005).

در خاک‌های غیراشباع فشار آب منفی است و اندازه‌گیری مستقیم آن می‌تواند منجر به پدیده کاویتاسیون در سیستم اندازه‌گیری شود. برای رفع این مسأله به شرط ثابت ماندن میزان مکش و درصد رطوبت، مقدار فشار هوا و فشار آب را به یک میزان افزایش می‌دهند تا فشار آب مثبت شود. این روش که در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است و به روش انتقال محوری معروف است برای اولین بار توسط اسکافیلد^۲ در سال ۱۹۳۵ و هیلف^۱ در سال ۱۹۶۵ ارائه و توسعه یافت و اولین بار کاربرد آن توسط بیشاپ^۲

1 Ceramik Disk

2 Schofield

در سال ۱۹۶۱ گزارش شد.



شکل ۳-۱۲ استفاده از روش انتقال محوری (a) شرایط اتمسفری (b) انتقال محورها

۳-۸-۱ روش فیلتر کاغذی^۳

از روش فیلتر کاغذی به عنوان یک روش تعیین منحنی نگهداشت آب-خاک استفاده شد. از مزایای این روش سهولت انجام و کم هزینه بودن آن است. از طرفی طبق نظر بعضی محققان به دلیل در نظر نگرفتن تاثیر تنش خالص اعمالی بر شکل منحنی نتایج این تست دقت بالایی ندارد. اما به طور کلی برای بررسی اولیه رفتار خاک می‌تواند مورد استفاده قرارگیرد. روش فیلتر کاغذی دارای حساسیت بالایی می‌باشد.

برای این آزمایش از فیلتر کاغذی Whatman 42 که در آیین نامه نمودار کالیبراسیون آن آمده است استفاده شد و آزمایش طبق آیین نامه ASTM D5298 انجام شده است.

1 Hilf
2 Bishop
3 Filter Paper Test

آزمایش فیلتر کاغذی به صورت تماسی و غیر تماسی انجام می‌شود. در روش تماسی فقط مکش بافتی و در روش غیرتماسی مکش کل خاک که شامل مکش ماتریسی و مکش اسمزی محاسبه می‌شود. روش تماسی به این صورت می‌باشد که یک عدد فیلتر کاغذی بین دو فیلتر کاغذی دیگر قرار گرفته و در داخل خاک قرار می‌گیرد. اما در روش غیر تماسی فیلتر کاغذی هیچ تماسی با نمونه خاک ندارد و با یک وسیله از سطح خاک جدا می‌شود. در این آزمایش نمونه با درصد رطوبت‌های مختلف ساخته می‌شود و در یک محفظه در بسته ۱۵۰ تا ۲۵۰ سانتی‌متر مکعبی قرار می‌گیرد. باید توجه داشت که در طول مدت آزمایش محفظه داخلی هیچ ارتباطی با هوای خارج نباید داشته باشد. مدت زمان آزمایش بین ۷ تا روز تا ۱۴ روز است و این مدت زمان جهت به تعادل رسیدن نمونه خاک با محفظه ظرف و فیلتر کاغذی در نظر گرفته شده است. به همین دلیل در آزمایش‌های انجام شده مدت زمان ۱۰ روز برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد. در شکل ۳-۱۳ یک نمونه آزمایش فیلتر کاغذی نشان داده شده است.

سه آزمایش فیلتر کاغذی در این پژوهش انجام گرفت که یک مورد آن بر روی خاک بازسازی شده بدون آلودگی و یک مورد بر روی خاک بازسازی شده با ۶٪ آلودگی نفت چراغ و دیگری با ۶٪ آلودگی گازوئیل همراه بود.



شکل ۳-۱۳ نمونه خاک جهت آزمایش فیلتر کاغذی

۹-۳ نتیجه گیری

در این فصل، روش انجام آزمایش‌های شاخص و مشخصات اولیه خاک ارائه شد. همچنین مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده، روند انجام آزمایش‌ها و متغیرهای مورد بررسی معرفی شد. در فصل آینده، نتایج آزمایش‌های ارائه شده و به تفسیر و تحلیل آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۴- فصل چهارم

نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آنها

۱-۴ مقدمه

فصل‌های گذشته به مرور تحقیق‌های انجام شده توسط محققان، توضیح نحوه انجام آزمایش‌ها و روند انجام آزمایش‌ها پرداخته شد. در این فصل نتایج آزمایش‌های مختلف جهت بررسی تاثیر آلودگی در حالت‌های مختلف بر روی رفتار خاک بررسی می‌شود و نتایج بدست آمده مورد تحلیل قرار می‌گیرد. از جمله آزمایش‌های انجام شده می‌توان به آزمایش فروریزش اشباع در شرایط مختلف، آزمایش فیلتر کاغذی و آزمایش‌های غیراشباع اشاره کرد.

۲-۴ نتایج حاصل از آزمایش فروریزش اشباع

۱-۲-۴ خاک اشباع شده با آب

برنامه‌ریزی روند آزمایش‌ها به این شکل در نظر گرفته شده است که ابتدا جهت اثبات فروریزی بودن خاک و تعیین پتانسیل فروریزش خاک مورد آزمایش، نمونه‌های دست نخورده‌ی بدون آلودگی توسط آب اشباع می‌شوند. نتایج آزمایش‌ها بر روی خاک دست نخورده در جدول ۱-۴ آمده است و با توجه به نتایج پتانسیل فروریزش بین ۱۶.۰۱ تا ۱۹.۵۸ متغیر بوده است که میانگین نتایج آزمایش‌ها مقدار ۱۷.۷۸ بدست آمده است. تفاوت موجود بین نتایج بدست آمده به تفاوت در ساختار خاک نمونه‌ها و امکان دست خوردگی‌های احتمالی در مرحله نمونه‌گیری ارتباط دارد. البته با توجه به نتایج بدست آمده در تمامی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D5333 خاک جز دسته خاک‌های شدیداً فروریزی قرار گرفت و تفاوت‌های موجود تاثیر چندانی در پتانسیل فروریزش ایجاد نکرد.

جدول ۴-۱ تعیین میزان فروریزش نمونه‌های دست نخورده

شماره نمونه	شرایط نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خشک خاک (g/cm^3)	معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
۱	دست نخورده	۱/۰۵	۰/۳۷	۳/۷۲	۱۸/۸۷	۱/۳	۱۹/۵۸	شدید
۲	دست نخورده	۰/۸۹	۰/۳۳	۳/۷۹	۱۸/۷۴	۱/۴۱	۱۷/۹۴	شدید
۳	دست نخورده	۰/۷۷	۰/۲۱	۲/۵۵	۱۶/۹۲	۱/۵۱	۱۹/۳۳	شدید
۴	دست نخورده	۰/۷۴	۰/۲۶	۳/۱۴	۱۶/۲۹	۱/۵۳	۱۶/۰۴	شدید
۵	دست نخورده	۰/۷۸	۰/۲۹	۲/۸۷	۱۶/۹۸	۱/۵۰	۱۶/۰۱	شدید

به دلیل اینکه پایین بودن رطوبت و شکننده بودن توده خاک مورد آزمایش، برداشت نمونه‌های دست نخورده را سخت می‌نمود و افزودن آلاینده در خاک با درصدهای ثابت مشخص به صورت کاملاً یکنواخت در کل نمونه امکان‌پذیر نبود. جهت تسهیل در بررسی پارامترهای مختلف موثر در پتانسیل فروریزش پس از اثبات پتانسیل فروریزش خاک محل، سایر آزمایش‌های تحقیق بر روی خاک بازسازی شده صورت پذیرفت. لذا ابتدا به منظور بررسی اثر بازسازی و دست خوردگی، آزمایش فروریزش برای تعیین پتانسیل فروریزش بر روی ۵ نمونه خاک بازسازی شده انجام شد و تمامی نمونه‌های بازسازی شده با دانسیته ثابت در رطوبت طبیعی تهیه شده است. خلاصه نتایج آزمایش دست خوردگی خاک در جدول ۴-۲ آمده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در آزمایش خاک با دست خوردگی پتانسیل فروریزش از ۹.۰۸ تا ۱۲.۹۵ تغییر کرده است که میانگین آزمایش‌ها ۱۰.۹۱ بدست آمده است. نتایج آزمایش خاک‌های دست خورده نیز تفاوت در پتانسیل فروریزش نمونه‌ها را نشان می‌دهد اما تفاوت‌ها قابل

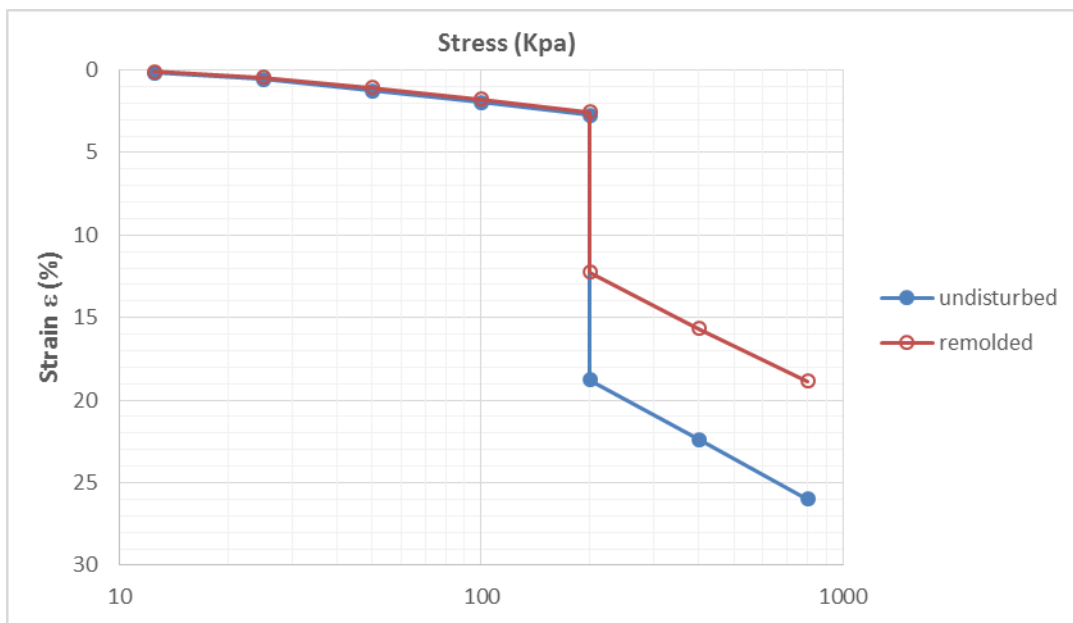
توجه نمی‌باشد.

جدول ۲-۴ تاثیر دست خوردگی بر روی میزان فروریزش خاک بدون آلودگی

شماره نمونه	شرایط نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خشک خاک (g/cm^3)	معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
۱	بازسازی شده	۰/۹۲	۰/۵	۵/۵	۱۹/۰۸	۱/۴۲	۱۲/۸۹	شدید
۲	بازسازی شده	۰/۸۹	۰/۵۲	۵/۵	۱۸/۴۹	۱/۴۲	۹/۰۸	متوسط
۳	بازسازی شده	۰/۸۹	۰/۵۱	۵/۵	۱۷/۶۵	۱/۴۲	۹/۷۱	متوسط
۴	بازسازی شده	۰/۸۸	۰/۴۶	۵/۵	۱۹/۰۸	۱/۴۲	۱۲/۹۵	شدید
۵	بازسازی شده	۰/۸۹	۰/۵۰	۵/۵	۱۸/۶۴	۱/۴۲	۹/۹۳	متوسط

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که پتانسیل فروریزش خاک مورد نظر بر اثر دست خوردگی کاهش می‌یابد. علت کاهش پتانسیل فروریزش خاک بازسازی شده تغییر ساختار و نحوه قرارگیری ذرات خاک در کنار هم می‌باشد. خاک رَمبنده دارای حفرات میکروسکوپی و ماکروسکوپی است که در فصل دوم به طور کامل بحث شده است. دست خوردگی حفرات بزرگتر را بهم می‌ریزد ولی حفرات ریزتر همچنان وجود دارد. همین مساله موجب کاهش میزان فروریزش می‌شود که در نتایج ارائه شده نیز مشهود است.

در شکل ۴-۱ نمودار فروریزش برای آزمایش بر روی نمونه دست نخورده با آزمایش بر روی نمونه بازسازی شده که با آب اشباع شده بودند جهت مقایسه بهتر رفتار تغییرشکل و فروریزش دو نمونه نشان داده شده است.



شکل ۴-۱ نمودار مقایسه فروریزش خاک دست نخورده و بازسازی شده بدون آلودگی اشباع شده با آب

۲-۲-۴ خاک اشباع شده با آلاینده‌ها

برای بررسی رفتار فروریزشی خاک در مواردی که نشت مواد نفتی باعث اشباع و تغییر رطوبت خاک می‌شود، نمونه‌های دست نخورده و بازسازی شده که در شرایط رطوبت طبیعی خود قرار داشتند با نفت چراغ و گازوئیل اشباع شدند. در این آزمایش‌ها برای اطمینان بیشتر هر آزمایش در دو تکرار متوالی انجام شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نفت چراغ در جدول ۴-۳ آمده است. برای بررسی دقیق‌تر سعی شد تا نمونه‌های دست نخورده دانسیته و نسبت تخلخل برابر با نمونه بازسازی شده داشته باشند. با توجه به نتایج، نمونه‌های دست خورده درجه فروریزش ۰.۶۶ و نمونه‌های دست نخورده درجه فروریزش ۰.۴۳ دارند. همین طور که مشخص است درجه فروریزش خاک دست نخورده کمتر از خاک بازسازی شده بدست آمده است اما اختلاف بین نتایج قابل توجه نبوده و در حد خطای آزمایش در نظر گرفته می‌شود. واضح است که هردو خاک تقریباً پتانسیل فروریزش خود را در حضور نفت به طور کامل از دست داده‌اند.

جدول ۳-۴ نمونه‌های دست نخورده و بازسازی شده‌ی اشباع با نفت چراغ

درجه فروریزش	میانگین معیار فروریزش (%)	دانسیتة خشک خاک (g/cm^3)	رطوبت نهایی (%)	رطوبت اولیه (%)	نسبت تخلخل نهایی	نسبت تخلخل اولیه	نمونه	شرایط نمونه	ماده آلاینده
کم	۰/۴۳	۱/۴۲	۲۳/۶۸	۵/۵	۰/۸۲	۰/۹	۱	دست	نفت
		۱/۴۲	۲۲/۹۷	۵/۵	۰/۸۵	۰/۹	۲	نخورده	
کم	۰/۶۶	۱/۴۲	۲۱/۱۰	۵/۵	۰/۷۶	۰/۹	۱	بازسازی	چراغ
		۱/۴۲	۲۲/۶۸	۵/۵	۰/۷۸	۰/۹	۲	شده	

آزمایش بر روی گازوئیل که در جدول ۴-۴ آمده است نشان داد درجه فروریزش برای خاک بازسازی شده ۰.۷۴ و خاک دست نخورده ۰.۵۷ است. با توجه به نتایج رفتار گازوئیل مانند رفتار نفت سفید تکرار شده و مقدار بدست آمده برای خاک بازسازی شده بیشتر از نمونه دست نخورده بدست آمده است اما نتایج بسیار نزدیک بهم می‌باشد و تفاوت موجود ناچیز است. درجه فروریزش برای هردو نمونه کمتر از ۱ و خاک پتانسیل فروریزش خود را از دست داده است. آزمایش‌های گزارش شده برای نفت چراغ و گازوئیل هردو در فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال انجام شده‌اند و برای مشخص شدن رفتار خاک در سربار بالاتر نیاز به انجام آزمایش در فشارهای بالاتر است تا بتوان در مورد رفتار خاک نظر داد.

علت کاهش پتانسیل فروریزش خاک در هردو حالت بازسازی شده و دست نخورده تفاوت رفتار خاک فروریزی در مقابل مواد آلاینده نسبت به آب به عنوان سیال منفذی است. با توجه به توضیحات ارائه شده در فصول قبل در مورد خاک رمبنده و پتانسیل فروریزش آن‌ها می‌دانیم آب به دلیل خاصیت

قطبی خود باعث شکسته شدن عامل پیوند دهنده بین ذرات خاک می‌شود. در حالی که مواد نفتی ماهیت غیرقطبی دارند و علاوه بر این که باعث شکسته شدن پیوند بین ذرات نمی‌شوند، باعث مستحکم‌تر شدن پیوندها می‌شوند و حفرات در تنش ۲۰۰ کیلوپاسکال به همان شکل قبل باقی می‌مانند. عامل دیگر که توسط محققان مورد توجه بوده است ثابت دی الکتریک مایع منفذی است. همین طور که در فصل دوم عنوان شد با کاهش ثابت دی الکتریک مایع منفذی مقاومت افزایش پیدا می‌کند. به همین شکل مشخص شد با کاهش ثابت دی الکتریک مایع منفذی پتانسیل فروریزش نیز کاهش می‌یابد.

جدول ۴-۴ نمونه‌های دست نخورده و بازسازی شده‌ی اشباع با گازوئیل

درجه فروریزش	میانگین معیار فروریزش (%)	دانسیته خشک خاک (g/cm^3)	رطوبت نهایی (%)	رطوبت اولیه (%)	نسبت تخلخل نهایی	نسبت تخلخل اولیه	نمونه	شرایط نمونه	ماده آلاینده
کم	۰/۵۷	۱/۴۲	۲۶/۵۸	۵/۵	۰/۷۵	۰/۹	۱	دست	گازوئیل
		۱/۴۲	۲۴/۸	۵/۵	۰/۷۱	۰/۹	۲	نخورده	
کم	۰/۷۴	۱/۴۲	۲۸/۰۴	۵/۵	۰/۷۲	۰/۹	۱	بازسازی	
		۱/۴۲	۲۹/۹۲	۵/۵	۰/۸	۰/۹	۲	ی شده	

در شکل ۲-۴ نمونه‌های دست نخورده اشباع شده با آب، نفت چراغ و گازوئیل نشان داده شده است. همین طور که در شکل مشخص است خاک‌های آلوده علاوه بر تغییر حجم ناچیزی که نشان دادند، حفرات خاک بدون تغییر در انتهای آزمایش برای نمونه‌های آلوده به گازوئیل و نفت چراغ باقی مانده

است. در حالی که نمونه اشباع شده با آب تغییر حجم چشم‌گیری داشته و خاک به درون حفرات خود فروریزش کرده و بخش زیادی از حفرات خاک از بین رفته است.



(ب)



(الف)



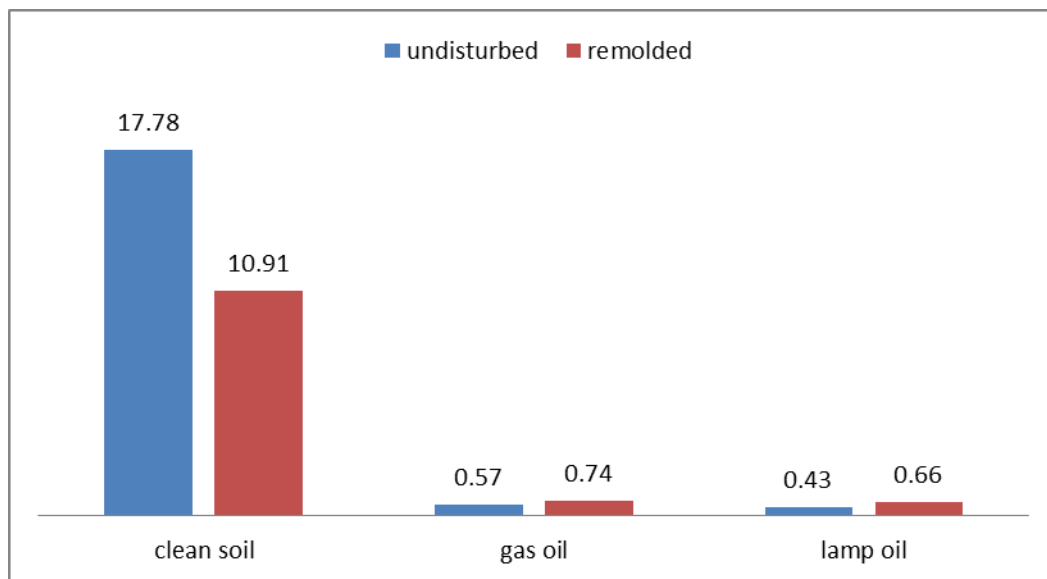
(ج)

شکل ۲-۴ نمونه‌های اشباع شده با آب، گازوئیل و نفت چراغ در انتهای آزمایش (الف) گازوئیل، (ب) نفت

چراغ، (ج) آب

برای مقایسه بهتر درجه فروریزش نمونه‌ها در شکل ۳-۴ نمونه‌های اشباع شده با آب و اشباع شده با آلاینده‌ها در کنار هم آورده شده‌اند تا بررسی بهتری در مورد تفاوت رفتار خاک در شرایط مختلف

آلاینده‌گی انجام شود. با توجه به این نتایج در مواردی که خاک با مواد آلاینده به طور کامل اشباع شود پتانسیل فروریزش به مقدار ناچیزی کاهش پیدا می‌کند و می‌توان از فروریزش خاک چشم پوشی کرد. تفاوت بین خاک اشباع شده با آب هم در دو حالت بازسازی شده و دست نخورده به خوبی در شکل نشان داده شده است.



شکل ۳-۴ مقایسه تاثیر اشباع سازی خاک دست نخورده و بازسازی شده با آب و آلاینده‌های نفتی بر روی پتانسیل فروریزش

۳-۲-۴ خاک آلوده اشباع شده با آب

نمونه‌ها در این آزمایش‌ها از ۲٪ تا ۱۰٪ بر اساس درصد وزنی با نفت چراغ و گازوئیل آلوده شده و با آب اشباع شدند. برای بررسی رسیدن به نتایج دقیق‌تر هر کدام از آزمایش‌ها در دو تکرار انجام و نتایج بدست آمده میانگین گرفته شده است. نتایج بدست آمده در جدول ۴-۵ آزمایش بر روی گازوئیل را نشان می‌دهد که با افزایش درصد آلودگی تا ۶٪ تغییرات زیادی در رفتار خاک نداشته است اما با افزایش میزان

آلودگی در نمونه‌ها میزان آلودگی افزایش یافته است.

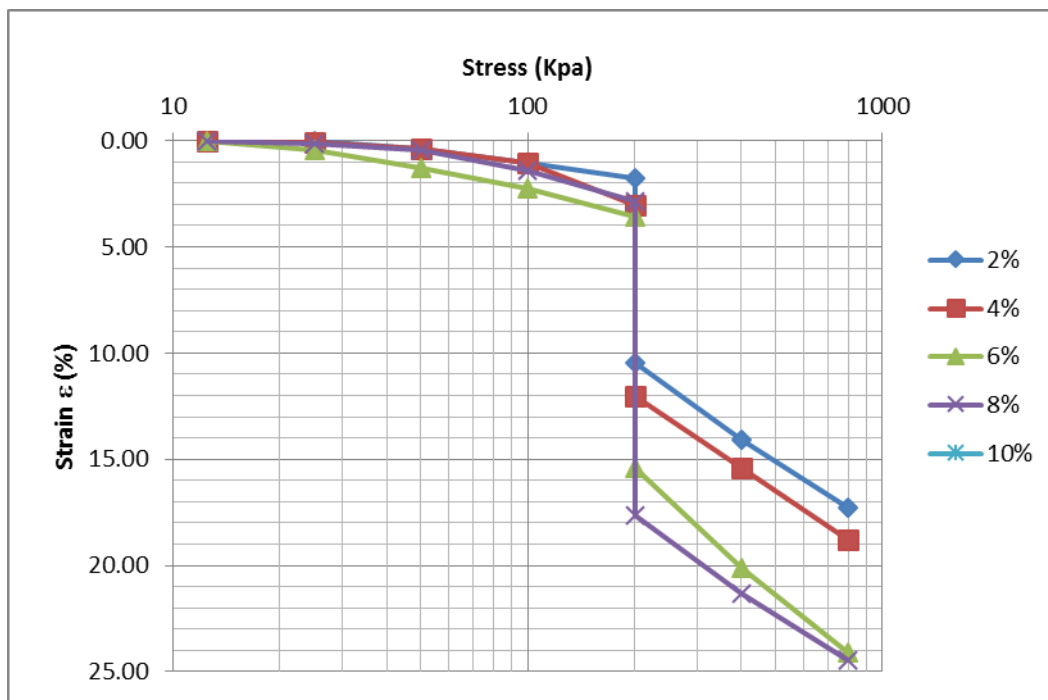
جدول ۴-۵ تاثیر افزودن درصدی گازوئیل به خاک بازسازی شده

درجه فروریزش	میانگین معیار فروریزش (%)	دانسیته خشک خاک (g/cm^3)	رطوبت نهایی (%)	رطوبت اولیه (%)	نسبت تخلخل نهایی	نسبت تخلخل اولیه	نمونه	درصد آلودگی	ماده آلاینده
کم	۰/۷۴	۱/۴۲	۲۸/۰۴	۵/۵	۰/۷۲	۰/۹	۱	اشباع	گازوئیل
		۱/۴۲	۲۹/۹۲	۵/۵	۰/۸	۰/۹	۲	کامل	
شدید	۱۰/۰۸	۱/۴۲	۱۷/۸۲	۵/۵	۰/۵۶	۰/۹	۱	۲	
		۱/۴۲	۱۷/۱۲	۵/۵	۰/۵۹	۰/۹	۲		
متوسط	۸/۶۸	۱/۴۲	۱۹/۶۱	۵/۵	۰/۵۹	۰/۹	۱	۴	
		۱/۴۲	۱۸/۹۶	۵/۵	۰/۶۱	۰/۹	۲		
متوسط	۸/۹۹	۱/۴۲	۲۰/۵۶	۵/۵	۰/۵۶	۰/۹	۱	۶	
		۱/۴۲	۲۰/۷۳	۵/۵	۰/۵۳	۰/۹	۲		
شدید	۱۱/۸۳	۱/۴۲	۱۷/۹۲	۵/۵	۰/۴۶	۰/۹	۱	۸	
		۱/۴۲	۱۸/۶۵	۵/۵	۰/۴۸	۰/۹	۲		
شدید	۱۴/۷۷	۱/۴۲	۱۷/۸۴	۵/۵	۰/۴۵	۰/۹	۱	۱۰	
		۱/۴۲	۱۷/۳۶	۵/۵	۰/۴۹	۰/۹	۲		

در شکل ۴-۴ نمودار رفتار فروریزی نمونه‌ها با درصدهای مختلف آلودگی به گازوئیل نشان داده

شده است که نمونه‌ها در ۲۰۰ کیلوپاسکال اشباع شده‌اند. طبق نمودارهای ترسیمی تا قبل از اشباع سازی نمونه‌ها تغییر حجم مشابهی داشتند. در مرحله بعد از اشباع نیز نمودار نمونه‌های تا ۶٪ آلودگی بسیار نزدیک به هم و نمونه‌های با ۸٪ و ۱۰٪ آلودگی به طور محسوسی میزان تغییر حجم بیشتری داشتند.

جدول ۴-۶ نمودار مقایسه فروریزش خاک بازسازی شده با درصد وزنی‌های مختلف گازوئیل



جدول ۴-۶ نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط نفت چراغ را با نمونه بدون آلودگی نشان داده است. مشخص است خاک آلوده به نفت چراغ رفتاری مشابه با خاک آلوده شده با گازوئیل را دنبال می‌کند و تا ۶٪ آلودگی میزان کاهش حجم تغییر بسیار کمی داشته است و در میزان آلودگی ۸٪ و ۱۰٪ روند افزایشی مشاهده شده است.

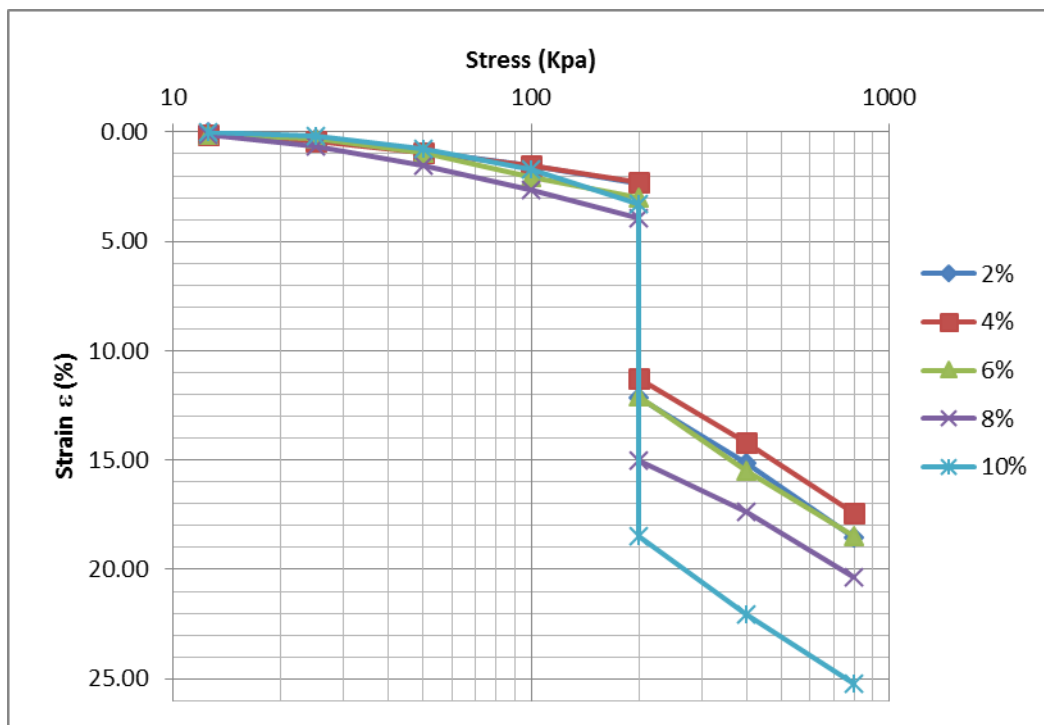
جدول ۴-۷ تاثیر افزودن درصدی نفت چراغ به خاک بازسازی شده

ماده آلاینده	درصد آلودگی	نمونه	نسبت تخلخل اولیه	نسبت تخلخل نهایی	رطوبت اولیه (%)	رطوبت نهایی (%)	دانسیته خشک خاک (g/cm^3)	میانگین معیار فروریزش (%)	درجه فروریزش
نفت چراغ	اشباع کامل	۱	۰/۹	۰/۷۶	۵/۵	۲۱/۱۰	۱/۴۲	۰/۶۶	کم
		۲	۰/۹	۰/۷۸	۵/۵	۲۲/۶۸	۱/۴۲		
	۲	۱	۰/۹	۰/۵۶	۵/۵	۱۷/۶۷	۱/۴۲	۹/۷۹	متوسط
		۲	۰/۹	۰/۵۵	۵/۵	۱۷/۹۳	۱/۴۲		
	۴	۱	۰/۹	۰/۵۹	۵/۵	۱۶/۸۵	۱/۴۲	۸/۹۹	متوسط
		۲	۰/۹	۰/۵۷	۵/۵	۱۶/۲۶	۱/۴۲		
	۶	۱	۰/۹	۰/۵۶	۵/۵	۱۸/۱۱	۱/۴۲	۹/۰۵	متوسط
		۲	۰/۹	۰/۶۱	۵/۵	۱۸/۹۶	۱/۴۲		
	۸	۱	۰/۹	۰/۵۳	۵/۵	۱۷/۷۱	۱/۴۲	۱۱/۰۹	شدید
		۲	۰/۹	۰/۵۶	۵/۵	۱۸/۲۳	۱/۴۲		
	۱۰	۱	۰/۹	۰/۴۴	۵/۵	۲۰/۶۳	۱/۴۲	۱۵/۱۷	شدید
		۲	۰/۹	۰/۴۹	۵/۵	۲۱/۴۱	۱/۴۲		

برای مشخص شدن رفتار تغییرحجم خاک آلوده به نفت چراغ نمودار فروریزش مربوط نمونه‌های

آلوده همراه با نمونه‌های بدون آلودگی بازسازی شده در شکل ۴-۵ آورده شده است. نتایج برای نفت چراغ

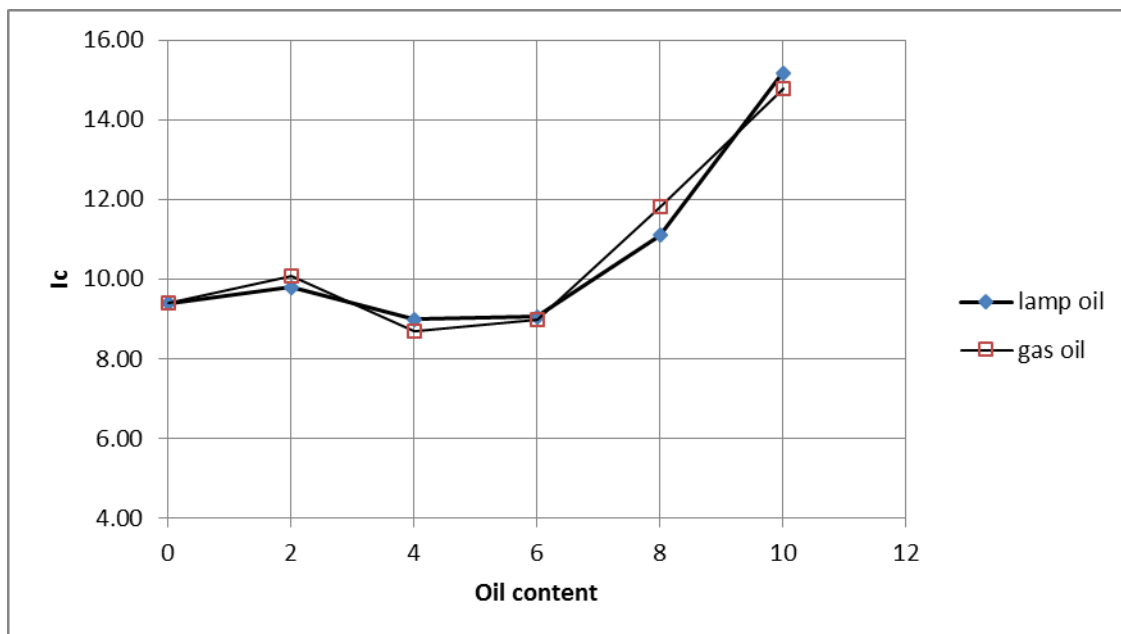
مشابه نمونه‌های آلوده به گازوئیل نشان داده شده است.



شکل ۴-۴ نمودار مقایسه فروریزش خاک بازسازی شده با درصد وزنی‌های مختلف نفت چراغ

برای مقایسه نتایج بدست آمده از دو آلاینده مورد استفاده در تحقیق شکل ۴-۶ ارائه شده است که معیار فروریزش نمونه‌های آلوده را با افزایش میزان آلودگی مختلف با خاک بدون آلودگی نشان می‌دهد. بر اساس شکل مشخص است که رفتار خاک در برابر هر دو آلاینده بسیار نزدیک به هم است و روند نسبتاً ثابت میزان فروریزش تا ۶٪ در شکل نشان داده شده است. نکته قابل ذکر دیگر افزایش معیار فروریزش در نمونه‌های با ۸٪ و ۱۰٪ آلودگی است که افزایش معیار آلودگی را به خوبی نشان می‌دهد.

به عنوان جمع بندی نتایج این بخش می‌توان گفت که خاک در برابر هر دو آلاینده که ثابت دی-الکتریک مختلفی دارند، معیار فروریزش تفاوت چندانی نداشته است. اما از آنجایی که تفاوت در لزجت آلاینده‌ها باعث تغییر در رفتار خاک می‌شود از نفت چراغ و گازوئیل که لزجت نزدیک به هم داشتند استفاده شد تا متغیرهای کمتری در تحقیق تاثیرگذار باشند.



شکل ۴-۵ تغییرات معیار فروریزش نمونه‌های آلوده شده با درصد‌های مختلف گازوئیل و نفت چراغ

از این جهت که بررسی رفتار خاک در حالت چند فازی که سیال منفذی از دو مایع مختلف هستند، نیازمند بررسی در حالت غیراشباع می‌باشد تا اثرات هر دو سیال در کنار هم به صورت دقیق‌تر مشاهده شود. به همین دلیل آزمایش غیراشباع برای مشخص کردن میزان جذب آب نمونه و تاثیر آلاینده‌ها در میزان جذب آب و بررسی رفتار فروریزش خاک آلوده در حالت نزدیک به اشباع به بررسی نتایج آزمایش غیراشباع پرداخته خواهد شد.

۳-۴ تعیین منحنی مشخصه آب-خاک با استفاده از کاغذ

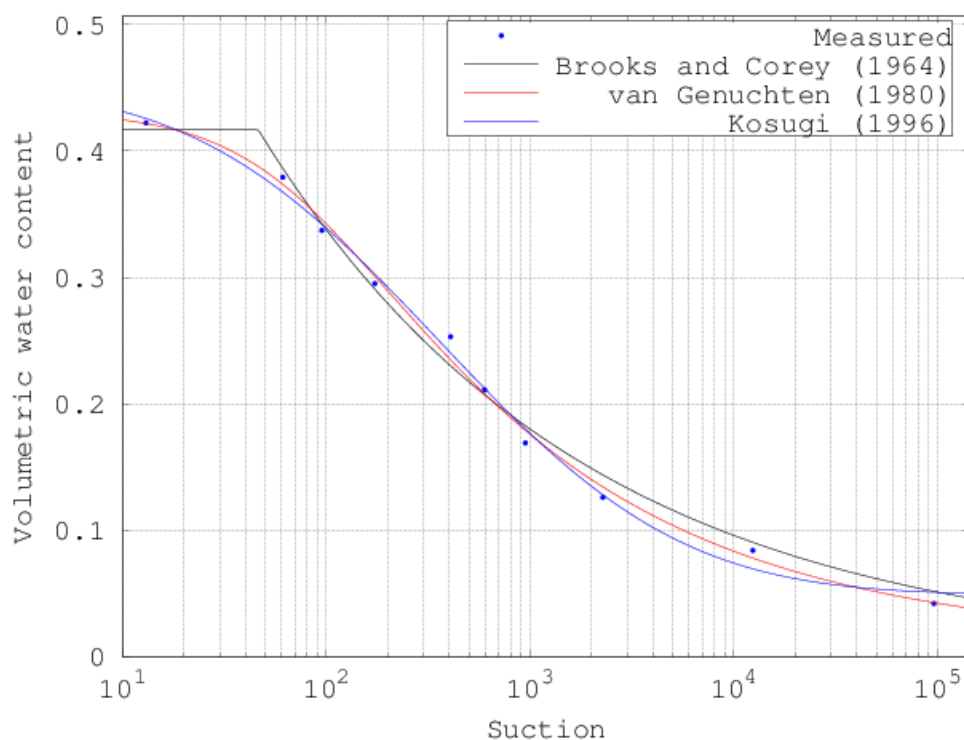
صافی

با توجه به نقاط به دست آمده از آزمایش‌های کاغذ صافی همچنین روابط و مدل‌هایی که برای ترسیم نمودار مشخصه آب خاک پیشنهاد شده است از ۵ مدل مختلف استفاده شد و نتایج آن به دست آمد. مدل‌هایی که به منظور رسم نمودار SWRC در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند در دو بخش

دسته بندی شده اند. مدل‌های بخش اول نظیر روش‌های van Genuchten، Brooks and Corey، Kosugi، توابع ریاضی توزیع پیوسته احتمال هستند و سعی در رسم نمودار مشخصه آب خاک با در نظر گرفتن یک مقدار حداکثر در تابع چگالی احتمال دارند. در مدل‌های بخش دوم نظیر روش‌های Seki، Durner روابط ریاضی به نحوی است که دو مقدار حداکثر محلی را در توزیع تابع چگالی احتمال در نظر می‌گیرند که این امر موجب می‌شود شکل نمودار رسم شده با نتایج واقعی خصوصا در مقادیر مکش‌های پایین و نزدیک به اشباع و توسط این مدل‌ها تطبیق بهتری با داده‌های استخراج شده از نتایج کاغذ صافی دارند.

همان طور که در نمودارهای رسم شده توسط مدل‌های بخش اول مشاهده می‌شود با وجود این که در مقادیر مکش بالا و محتوای آب حجمی کم عملکرد مناسبی دارند اما در مقادیر مکش نزدیک به صفر و شرایط نزدیک به اشباع نتوانسته اند نشان دهنده شرایط واقعی باشند و تخمین مدل‌های بخش اول از مقادیر مکش در درجه اشباع نزدیک به یک با نتایج حاصل از کاغذ صافی اختلاف دارد. این اختلاف در نمودارهای رسم شده توسط مدل‌های بخش دوم برطرف شده است و مدل‌های بخش دوم توانسته‌اند تقریب مناسب‌تری داشته باشند. این مورد به خوبی در نمودارهای مربوط به خاک بدون آلودگی و آلوده قابل تشخیص است. در ادامه شکل‌ها و جداول مربوط به پارامترهای مورد نیاز جداول آورده شده است که با توجه به روابط موجود برای هر روش تغییر مکش نمونه‌ها تعیین شده است.

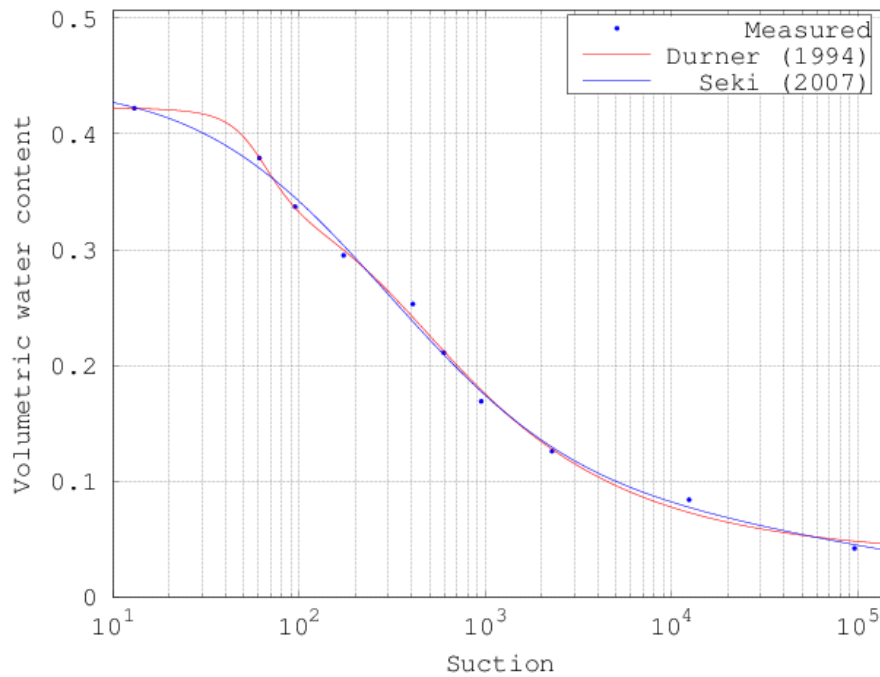
تعیین منحنی مشخصه آب-خاک از این جهت برای ما اهمیت دارد که برای انجام آزمایش تحکیم غیراشباع تعیین رفتار خاک در مکش‌های مختلف و مشخص کردن منحنی مکش-درجه اشباع مورد نیاز است و روند انجام آزمایش را مشخص می‌کند. آزمایش کاغذ صافی به دلیل خطاهای موجود در آزمایش و معادلات متفاوت برای بدست آوردن روابط بین پارامترها جواب‌های دقیقی ارائه نمی‌دهد و فقط برای تعیین رفتار کلی مکش خاک مناسب می‌باشد.



شکل ۴-۶ نمودار نگهداشت آب بر حسب مدل‌های نوع اول برای خاک بدون آلودگی

جدول ۴-۸ پارامترهای استخراج شده برای رسم نمودار مشخصه آب خاک برای خاک بدون آلودگی

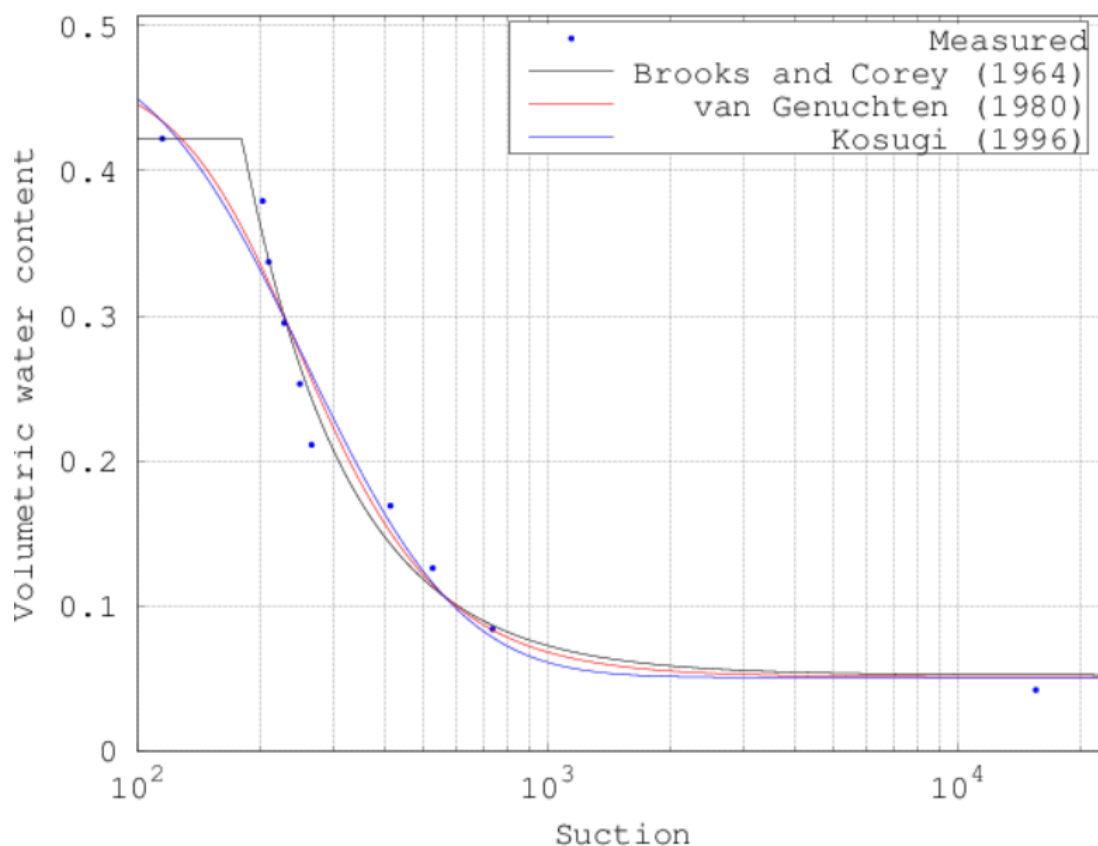
Model	Equation	Parameters	R ²
Brooks and Corey	$S_e = \begin{cases} \left(\frac{h}{h_b}\right)^{-\lambda} & (h > h_b) \\ 1 & (h \leq h_b) \end{cases}$	$\theta_h = 0.41657$ $\theta_r = 2.3055e-07$ $h_b = 46.300$ $\lambda = 0.27329$	0.99110
van Genuchten	$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m$ $(m = 1 - 1/n)$	$\theta_s = 0.43125$ $\theta_r = 0.010214$ $\alpha = 0.013256$ $n = 1.3580$	0.99533
Kosugi	$S_e = Q \left[\frac{\ln(h/h_m)}{\sigma} \right]$	$\theta_s = 0.45106$ $\theta_r = 0.049$ $h_m = 356.03$ $\sigma = 2.17$	0.99448



شکل ۴-۷ نمودار نگهداشت آب بر حسب مدل‌های نوع دوم برای خاک بدون آلودگی

جدول ۴-۹ پارامترهای استخراج شده برای رسم نمودار مشخصه آب خاک برای خاک بدون آلودگی

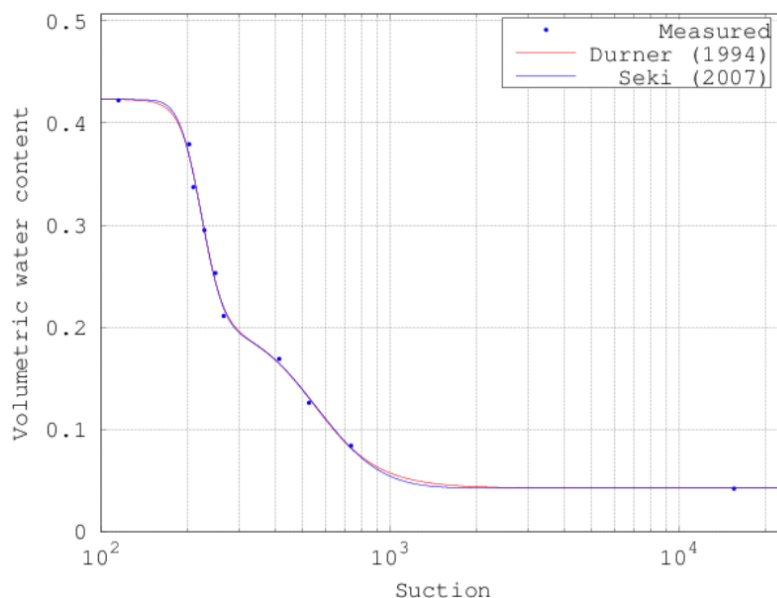
Model	Equation	Parameters	R ²
Durner	$S_e = w_1 \left[\frac{1}{1 + (\alpha_1 h)^{n_1}} \right]^{m_1} + (1 - w_1) \left[\frac{1}{1 + (\alpha_2 h)^{n_2}} \right]^{m_2}$ $(m_i = 1 - \frac{1}{n_i})$	$\theta_s = 0.42307$ $\theta_r = 0.036079$ $W_1 = 0.20818$ $\alpha_1 = 0.016082$ $n_1 = 4.8272$ $\alpha_2 = 0.0039962$ $n_2 = 1.5422$	0.99721
Seki	$S_e = w_1 Q \left[\frac{\ln(h/h_{m1})}{\sigma_1} \right] + (1 - w_1) Q \left[\frac{\ln(h/h_{m2})}{\sigma_2} \right]$	$\theta_s = 0.44659$ $\theta_r = 0.07046$ $W_1 = 0.61337$ $h_{m1} = 280.70$ $\sigma_1 = 1.6780$ $h_{m2} = 5655.7$ $\sigma_2 = 4.4369$	0.99608



شکل ۴-۸ نمودار نگهداشت آب بر حسب مدل‌های نوع اول برای خاک آلوده به گازوئیل ۶٪

جدول ۴-۱۰ پارامترهای استخراج شده رسم نمودار مشخصه آب خاک برای خاک آلوده به گازوئیل ۶٪

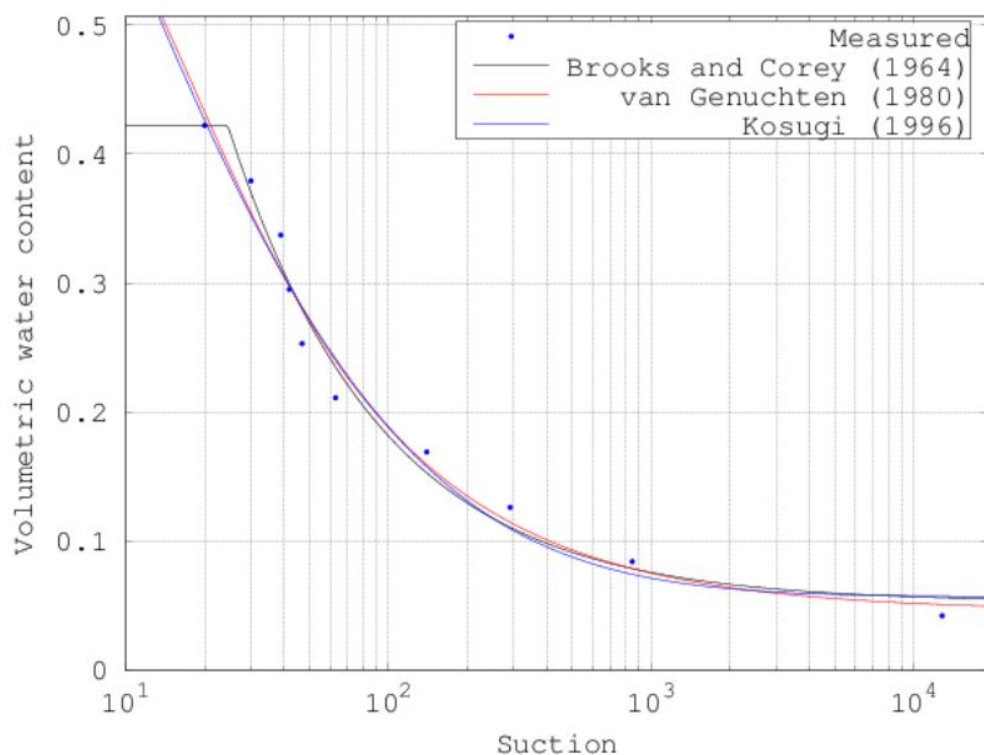
Model	Equation	Parameters	R ²
Brooks and Corey	$S_e = \begin{cases} \left(\frac{h}{h_b}\right)^{-\lambda} & (h > h_b) \\ 1 & (h \leq h_b) \end{cases}$	$\theta_h = 0.41657$ $\theta_r = 0.02305$ $h_b = 46.300$ $\lambda = 0.27329$	0.98141
van Genuchten	$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m$ $(m = 1 - \frac{1}{n})$	$\theta_s = 0.43125$ $\theta_r = 0.010214$ $\alpha = 0.013256$ $n = 1.3580$	0.96195
Kosugi	$S_e = Q \left[\frac{\ln(h/h_m)}{\sigma} \right]$	$\theta_s = 0.45106$ $\theta_r = 0.049$ $h_m = 356.03$ $\sigma = 2.17$	0.95700



شکل ۹-۴ نمودار نگهداشت آب بر حسب مدل‌های نوع دوم برای خاک آلوده به گازوئیل ۶٪

جدول ۱۱-۴ پارامترهای استخراج شده رسم نمودار مشخصه آب خاک برای خاک آلوده به گازوئیل ۶٪

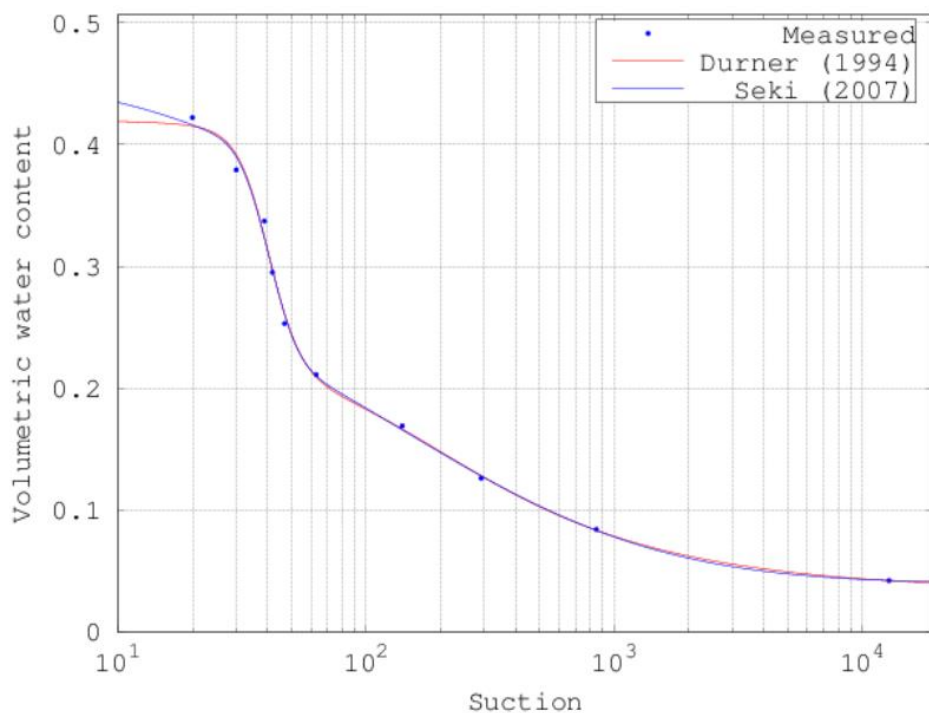
Model	Equation	Parameters	R ²
Durner	$S_e = w_1 \left[\frac{1}{1 + (\alpha_1 h)^{n_1}} \right]^{m_1} + (1 - w_1) \left[\frac{1}{1 + (\alpha_2 h)^{n_2}} \right]^{m_2}$ $(m_i = 1 - \frac{1}{n_i})$	$\theta_s = 0.42307$ $\theta_r = 0.042558$ $W_1 = 0.59102$ $\alpha_1 = 0.0045243$ $n_1 = 11.868$ $\alpha_2 = 0.0019397$ $n_2 = 4.4878$	0.99670
Seki	$S_e = w_1 Q \left[\frac{\ln(h/h_{m1})}{\sigma_1} \right] + (1 - w_1) Q \left[\frac{\ln(h/h_{m2})}{\sigma_2} \right]$	$\theta_s = 0.42275$ $\theta_r = 0.042485$ $W_1 = 0.58100$ $h_{m1} = 222.62$ $\sigma_1 = 0.13923$ $h_{m2} = 555.44$ $\sigma_2 = 0.40664$	0.99689



شکل ۴-۱۰ نمودار نگهداشت آب بر حسب مدل‌های نوع اول برای خاک آلوده به نفت چراغ ۶٪

جدول ۴-۱۲ پارامترهای استخراج شده رسم نمودار مشخصه آب خاک برای خاک آلوده به نفت چراغ ۶٪

Model	Equation	Parameters	R ²
Brooks and Corey	$S_e = \begin{cases} \left(\frac{h}{h_b}\right)^{-\lambda} & (h > h_b) \\ 1 & (h \leq h_b) \end{cases}$	$\theta_h = 0.42201$ $\theta_r = 0.052709$ $h_b = 24.524$ $\lambda = 0.74919$	0.98199
van Genuchten	$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m$ $(m = 1 - 1/n)$	$\theta_s = 0.72075$ $\theta_r = 0.045691$ $\alpha = 0.094235$ $n = 1.6888$	0.97712
Kosugi	$S_e = Q \left[\frac{\ln(h/h_m)}{\sigma} \right]$	$\theta_s = 1.3174$ $\theta_r = 0.056841$ $h_m = 5.8414$ $\sigma = 2.2594$	0.97318

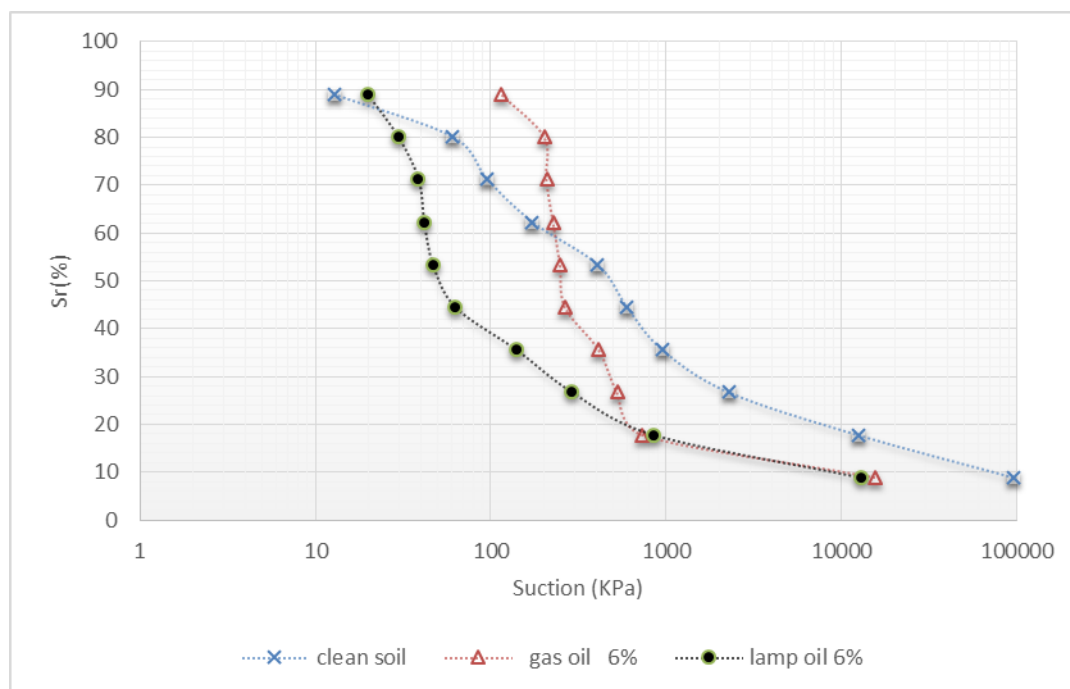


شکل ۴-۱۱ نمودار نگهداشت آب بر حسب مدل‌های نوع دوم برای خاک آلوده به نفت چراغ ۶٪

جدول ۴-۱۳ پارامترهای استخراج شده رسم نمودار مشخصه آب خاک برای خاک آلوده به نفت چراغ ۶٪

Model	Equation	Parameters	R ²
Durner	$S_e = w_1 \left[\frac{1}{1 + (\alpha_1 h)^{n_1}} \right]^{m_1} + (1 - w_1) \left[\frac{1}{1 + (\alpha_2 h)^{n_2}} \right]^{m_2}$ $(m_i = 1 - \frac{1}{n_i})$	$\theta_s = 0.41998$ $\theta_r = 0.033643$ $W_1 = 0.52002$ $\alpha_1 = 0.025295$ $n_1 = 7.1575$ $\alpha_2 = 0.0084329$ $n_2 = 1.6614$	0.99683
Seki	$S_e = w_1 Q \left[\frac{\ln(h/h_{m1})}{\sigma_1} \right] + (1 - w_1) Q \left[\frac{\ln(h/h_{m2})}{\sigma_2} \right]$	$\theta_s = 0.45699$ $\theta_r = 0.039867$ $W_1 = 0.38705$ $h_{m1} = 40.699$ $\sigma_1 = 0.20871$ $h_{m2} = 135.06$ $\sigma_2 = 1.9222$	0.99709

شکل ۴-۱۲ نتایج آزمایش‌ها بر روی سه نمونه خاک در حالت بدون آلودگی و ۶٪ آلودگی با گازوئیل و نفت چراغ را در کنار هم نشان می‌دهد. مشخص است که در درصد رطوبت‌های برابر، مکش برای خاک با آلودگی مقدار کمتری نسبت به خاک بدون آلودگی دارد. با توجه به شکل آلودگی توسط گازوئیل بر روی مکش تاثیر بیشتری داشته است و عامل مکش را به شکل محسوسی برای خاک کاهش داده است و با افزودن آلاینده به سرعت موجب کاهش مکش شده و نمونه به حالت اشباع خود رسیده است. برای نفت چراغ تغییرات مکش نسبت به حالت آلودگی با گازوئیل با شیب کمتری رخ داده است.



شکل ۴-۱۲ تفاوت نمودارهای مشخصه آب-خاک نمونه‌های بدون آلودگی و با آلودگی ۶٪ نفت چراغ و

گازوئیل

۴-۴ تاثیر مکش بر رفتار خاک آلوده و بدون آلودگی

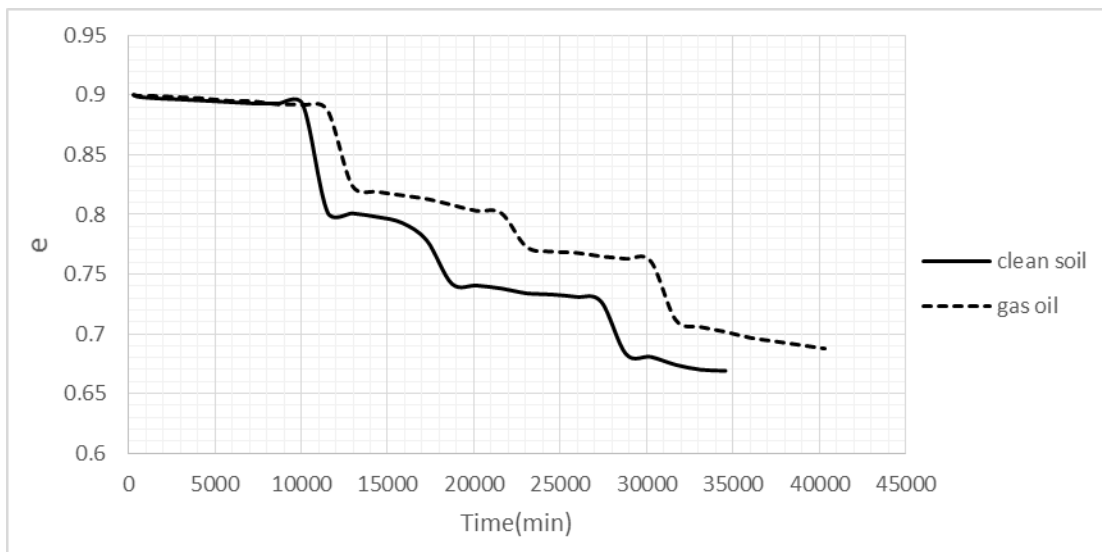
در این بخش به بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های با مکش کنترل شده می‌پردازیم. نمونه‌های

انتخاب شده شامل یک نمونه خاک بدون آلودگی و یک نمونه خاک با ۰.۶٪ آلودگی به گازوئیل بود. در این آزمایش‌ها مکش‌های ۱۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ کیلوپاسکال بر روی نمونه‌ها اعمال شد. با این آزمایش رفتار فروریزی و جذب آب نمونه‌ها تعیین شد. روند آزمایش به این شکل بود که بعد از اعمال مکش ۱۵۰ کیلوپاسکال تا زمان رسیدن به تعادل به نمونه‌ها زمان داده شد. بعد از اینکه میزان جذب آب برای نمونه‌ها به کمتر از ۰/۱cc در ۲۴ ساعت رسید بارگذاری انجام شد و بار ۲۰۰ کیلوپاسکال اعمال شد و تا انتهای آزمایش بر روی نمونه باقی ماند.

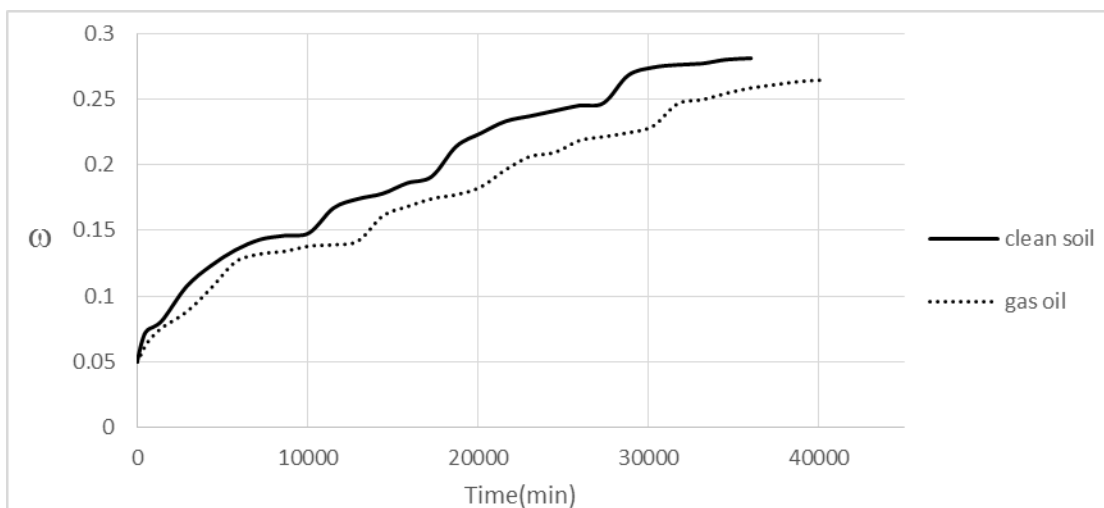
شکل ۴-۱۳ نمودار که تغییرات تخلخل نسبت به زمان را نشان می‌دهد مشخص است بعد از به تعادل رسیدن برای هر دو نمونه در مکش ۱۵۰ کیلوپاسکال و اعمال بار، نسبت تخلخل به طور مشخصی برای نمونه‌ها کاهش یافته است. برای مکش‌های ۱۰۰ و ۵۰ کیلوپاسکال نیز شرایط مشابهی وجود دارد. از جمله تفاوت‌های قابل ذکر در نمونه بدون آلودگی و نمونه آلوده به گازوئیل در مدت زمان رسیدن به تعادل و نسبت تخلخل نهایی نمونه‌ها می‌توان اشاره کرد. برای نمونه بدون آلودگی آزمایش ۲۵ روز و نمونه آلوده ۲۸ روز زمان لازم بود تا آزمایش به اتمام برسد. این افزایش مدت زمان برای نمونه آلوده به دلیل وجود مواد نفتی می‌باشد که مانع جذب آب توسط ذرات خاک می‌شد. تغییرات نسبت تخلخل نیز برای نمونه بدون آلودگی کمتر از نمونه آلوده نشان داده شده است.

مقدار جذب آب برای دو نمونه در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. همین طور که از نمودار مشخص است در ابتدای هر دو منحنی با اعمال مکش به دلیل پایین و نزدیک اشباع بودن مکش، نمونه‌ها شروع به جذب آب می‌کنند تا به تعادل برسند. در ادامه با اعمال بار نمونه مجدداً شروع به جذب آب می‌کند روند جذب آب در مکش‌های بعدی نیز تکرار می‌شود. نکته قابل ذکر در این نمودار کمتر بودن جذب آب توسط نمونه آلوده می‌باشد. علت کمتر بودن میزان فروریزش نمونه بدون آلودگی با وجود میزان جذب

بیشتر به روغنکاری ذرات توسط گازوئیل مربوط می‌باشد. از سویی در آزمایش‌های اشباع نشان داده شد با افزایش میزان آلودگی تا ۱۰٪ میزان فروریزش افزایش می‌یابد. علت افزایش فروریزش را برای درصد‌های بالاتر آلودگی می‌توان روغنکاری بین دانه‌ها عنوان کرد که خود موجب افزایش میزان فروریزش می‌شود.



شکل ۱۳-۴ تغییرات نسبت تخلخل نسبت به زمان برای نمونه آلوده و بدون آلودگی



شکل ۱۴-۴ میزان جذب آب نمونه‌های آلوده و بدون آلودگی

۵-۴ پتانسیل فروریزش در آزمایش‌های ادمتر با قابلیت

کنترل مکش

پس از بررسی جذب آب و تغییرات تخلخل خاک به بررسی فروریزش خاک در مکش‌های نزدیک به اشباع پرداخته شده است. برای همین منظور در آزمایش‌های ادمتر با کنترل مکش ساختاری، پتانسیل فروریزش بر اساس روش ادمتر مضاعف به دست می‌آید، که برابر با اختلاف بین منحنی تحکیم برای مکش ساختاری مشخص و با نمونه اشباع شده (مکش ساختاری صفر) می‌باشد و طبق نظریه Jennings and Knight (1957) از رابطه ۲-۴ به دست می‌آید.

$$C_p(\%) = \frac{(e_2 - e_1) \times 100}{1 + e_0} \quad ۲-۴$$

e_2 : نسبت تخلخل در نمونه با مکش ساختاری مشخص در تنش مؤثر ۲۰۰ کیلوپاسکال

e_1 : نسبت تخلخل در نمونه با مکش ساختاری صفر (اشباع) در تنش مؤثر ۲۰۰ کیلوپاسکال

جدول ۴-۴ نتایج مربوط به دو آزمایش انجام شده است. در خاک بدون آلودگی مکش اولیه براساس آزمایش کاغذ صافی ۱۰۰۰۰۰ کیلوپاسکال بدست آمده است و در خاک آلوده به گازوئیل مقدار مکش اولیه ۱۰۰۰۰ کیلوپاسکال تعیین شده است. گام بعد از مکش اولیه ۱۵۰ کیلوپاسکال انتخاب شد که به دلیل نزدیکی به حالت اشباع فروریزش در هر دو نمونه اتفاق افتاده است کاهش مکش تا رسیدن به مکش صفر و اشباع کامل نمونه‌ها ادامه پیدا کرده است. پایین تر بودن پتانسیل فروریزش را در این جدول نیز مطابق نمودار تغییر نسبت تخلخل نسبت به زمان برای خاک آلوده می‌توان مشاهده کرد. از طرفی خاک بدون آلودگی قبل از مکش ۵۰ کیلوپاسکال به طور کامل فروریزش می‌کند در حالی که خاک آلوده تا مکش ۵۰ کیلوپاسکال همچنان بخشی از فروریزش را ادامه داده است.

جدول ۴-۱۴ پتانسیل فروریزش خاک در مکش‌های مختلف

suction (KPa)	Clean soil		gas oil	
	e	Cp (%)	e	Cp (%)
۱۰۰۰۰۰	—	—	۰/۹	۱۱/۰۵
۱۰۰۰۰	۰/۹	۱۲/۱	—	—
۱۵۰	۰/۷۸	۸/۹۵	۰/۸۱	۹/۴۷
۱۰۰	۰/۷۳	۶/۳۲	۰/۷۶	۷/۳۷
۵۰	۰/۶۷	۰	۰/۷۲	۴/۷۴
۰	۰/۶۷	۰	۰/۶۹	۰

۵- فصل پنجم

نتایج و پیشنهادها

۱-۵ مقدمه

در این تحقیق هدف اصلی بررسی فروریزش خاک لس در حالت نشت فرآورده‌های نفتی بوده است. از این رو خاک لس برداشته شده در شرایط مختلف آلوده شد و مورد آزمایش قرار گرفت. در ادامه به نتایج کلی بدست آمده از آزمایش‌ها پرداخته خواهد شد.

۲-۵ نتایج کلی

- با آزمایش خاک دست نخورده و دست خورده‌ی بدون آلودگی مشخص شد که با دست خوردگی میزان فروریزش کاهش محسوسی خواهد داشت که علت این امر از بین رفتن حفرات و منافذ ماکروسکوپیک خاک عنوان شده است.
- اشباع کامل نمونه‌های دست خورده و دست نخورده مشخص نمود که در سربار اعمالی ۲۰۰ کیلوپاسکال خاک تقریباً خاصیت فروریزش خود را از دست می‌دهد و کاهش حجم ناگهانی نخواهد داشت. با این نتیجه در حالتی که آب نقشی در اشباع‌سازی نمونه نداشته باشد و تنها گازوئیل یا نفت چراغ موجب اشباع کامل خاک فروریزی گردد نگرانی از امکان فروریزش خاک لس وجود ندارد. علت تغییر رفتار خاک لس به ماهیت سیال منفذی برمی‌گردد به این خاطر که مواد نفتی غیرقطبی هستند و پیوند بین ذرات را نمی‌شکنند.
- در حالتی که خاک توسط مواد آلاینده به شکل درصدی آلوده شده بود و توسط آب اشباع شدند تا ۶٪ آلودگی رفتاری مشابه با حالت بدون آلودگی داشته است و تنها اندکی کاهش یا افزایش در نتایج دیده شد که به خطا در آزمایش بر می‌گردد. اما با افزایش آلودگی تا ۸٪ و ۱۰٪ میزان فروریزش افزایش داشت. علت افزایش میزان فروریزش درصدهای بالای آلودگی به دلیل

روغنکاری ذرات برمی‌گردد.

- برای بررسی خاک در حالت غیراشباع ابتدا یک نمونه آزمایش فیلتر کاغذی بر روی خاک بدون آلودگی و یک نمونه با ۰.۶٪ آلودگی به نفت و ۰.۶٪ آلودگی با گازوئیل انجام شد تا رفتار خاک در مکش‌های مختلف بررسی کلی شود و مکش‌های مورد نظر برای آزمایش تحکیم انتخاب شوند. سپس آزمایش تحکیم در مکش‌های مختلف برای بررسی حالت چند فازی و رفتار خاک در میزان رطوبت‌های نزدیک اشباع و مشخص شدن میزان جذب آب توسط نمونه بوده است. نتایج نشان داد میزان جذب آب برای نمونه با ۰.۶٪ آلودگی کمتر از میزان جذب آب توسط نمونه بدون آلودگی بوده است. همچنین میزان فروریزش مطابق نتایج حالت اشباع در حالت غیراشباع نیز اندکی کاهش داشته است.

۳-۵ پیشنهادها

- با دستگاه ادئومتر با قابلیت کنترل مکش ساخته شده در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه شاهرود می‌توان در درصد آلودگی‌های مختلف و مکش‌های بالاتر به شکل کامل و جامع‌تری بر روی آلودگی‌های نفتی بررسی شود.
- استفاده از دیگر مواد نفتی موجود با لزجت متفاوت برای بررسی اثر ماده منفذی دیگر جهت مشخص نمودن تفاوت رفتار خاک رمبنده
- بررسی رفتار فروریزی خاک رمبنده آلوده در محل و به صورت بزرگ مقیاس برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

- انجام آزمایش‌های مقاومتی و بررسی تغییر رفتار مقاومتی خاک رَمبند در برابر نشت مواد

نفتی

منابع

- Adnan A. Basma A. and Tuncer E. R., (1992), "Evolution and Control of Collapsible Soils", **Journal of Geotechnical Eng, ASCE**. 118, 10, pp 1491-1504.
- Aiban A. (1998), "The effect of temperature on the engineering properties of oil-contaminated sand", **Journal of Environmental International.**, 24, pp 153-161.
- Alkandari F. A., (2000), Ph.D. thesis, "Collapse of Cemented Carbonate Sand", Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, USA.
- Alsanad H. A. Eid W. K. and Ismael N. F., (1995), "Geotechnical properties of oil contaminated Kuwaiti sand", **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE.**, 121, 5, pp 407-412.
- Assallay A. M., Jeffeson I., Rogers C. D. F. and Smalley I. J., (1998), "Fragipan formation in loess soils", development of the Bryant hydroconsolidation model. **Geoderma** 83, pp 1-16.
- ASTM D 2435-90, (1990). "Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils".
- ASTM D 422-63, "Test method for particle-size analysis of soils", 1963.
- ASTM D 4318-87, "Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity of soils", 1987.
- ASTM D 5333-03, (2003). "Standard test methods for measurement of collapse potential of soils"
- ASTM D 854-92, (1992). "Test method for specific gravity of soils".
- ASTM D5298, (2003), "Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper," ASTM, West Conshohocken, PA, U.S.A.
- Barden L., Madedor A. O. and Sides G. R. (1969), "Volume change calculations of

- unsaturated clay", **J. Soil Mech. and Found. Div, ASCE** ., 95, pp 33–51.
- Basma A. A. and Tuncer E. R., (1992), "Evaluation and control of collapsible soils" **Journal of Geotechnical Engineering**., 118, 10.
- Burckhard S. R., Pirkl D., Schaefer V. R., Kulakow P. and Leven B. (2000), "A study of soil water-holding properties as affected by TPH contamination" Conference on hazardous waste research.
- Chiu C. F., NG C.W.W. and Shen C. K., (1998), "Collapse behaviour of loosely compacted virgin and non-virgin fills in Hongkong", Proc. 2nd . Int. Conf. Unsaturated soils. 1, pp 25-30.
- Doerr S. H., Shakesby R. A., Dekker L. W. and Ritsema C. J., (2006), "Occurrence, prediction and hydrological effects of water repellency amongst major soil and land use types in a humid temperate climate", **Eur. J. Soil Sci.**, 57, pp 741–754.
- El-Ehwany M. H., (1989), Ph.D. Thesis, "Collapse Settlement Prediction: A Field and Laboratory Study"., Arizona State University, USA.
- El Howayek A., Huang P. and Santaga M. (2011), "Identifcation and behavior of collapsible soils" Joint transportation research program technical report series.
- Elkady T. Y., (2002), Ph.D. Thesis, "Static and dynamic behaviour of collapsible soils"., Arizona State University, USA.
- Evgin E. and Das B. M. (1992), "Mechanical Behavior of oil contaminated sand" **Environmental Geotechnology**, Usmen & Acar (eds).
- Feda J. (1988), "Collapse of loess upon wetting" **Engineering Geology**., 25, pp 263-269 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam Printed in the Netherlands.
- Fredlund D. G. and Morgenstern N. (1978), "Constitutive relations for volume change in unsaturated soils" **Canadian Geotechnical Journal**., 13 pp 261-276.
- Fredlund D. G. and Rahardjo H. (1993), "**Soil mechanics for unsaturated soils**". John

Wiley & Sons, Inc. New York.

Futai M. M. and Admeida M. (2002), "Collapsible soil: a Theoretical and Experimental Study", **EJGE Paper 0218**.

Haeri S. M. and Garakani A. A. (2012), "The variation of total volume change, Water volume change, yielding net confining stress and shear strength of undisturbed unsaturated loess under isotropic compression" Springer, **Unsaturated Soil: research and applications.**, PP. 293-300.

Houston S., Houston W. and Spadola, D. (1988), "Prediction of field collapse of soils due to wetting" **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE.**, 1, pp 40-58.

Houston S. L. (1995) "Foundations and pavements on unsaturated soils. Part 1: Collapsible soils". Proc. 1st Int. Conf. Unsaturated Soils UNSAT'95, 3, pp 1421-1439, Balkema, Paris.

Jefferson I., Rogers C., Evstatiev D. and Rogers C. D. F. (2005), "Treatment of Metastable Loess Soils: Lessons from Eastern Europe" **Ground Improvement Case histories. Oxford, Elsevier.**, pp 723-762.

Kermani M. and Ebadi T. (2012), "The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils" **Soil Sediment Contam.**, 21, pp 655-671.

Khamehchiyan M., Charkhabi A. H. and Tajik M. (2007), "Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils Method" **J. of Engineering Geology.**, pp 220-229

Khosravi E., Ghasemzadeh H., Sabour M. and Yazdani H. (2013), "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite" **J. enggeo .**, 8, 4, pp 11-16.

Klukanova A. and Sajgalik J. (1994), "Changes in loess fabric caused by collapse" **Quaternary International**, 24, pp 35-39.

Lourenço D.N., Wakefield F., Bryant R. and Doerr H. and Morley P. (2012). Wettability

- Assessment of an Oil Coated Soil, pp 415-421, "**Unsaturated Soils: Research and Applications**", Springer.
- McHale G., Newton M. I., Shirtcliffe N. J. and Pyatt F.B. (2007), "Implications of ideas on superhydrophobicity for water repellent soil" *Hydrol Process.*, 21, pp 2229–2238.
- Meegoda A. and Ratnaweera P. (1994), "Compressibility of contaminated fine grained soils" *Geotech test J.*, 17, pp 101-113.
- Mohammad Hosseini A., (2014), M.Sc thesis, "Stabilization and improvement of collapsible soils, using Electrokinetics & Nanomaterials and assessment its strength parameters by unsaturated oedometer"., Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran.
- Mohammadi M., Yasrobi S. S. and Mirzaii A. (2010), "Evaluation of the Mechanical Characteristics of Unsaturated Multiphase Crude Oil Polluted Clayey Sand" ICGESM, Tehran, Iran.
- Moor C. A. and Mitchell J. K. (1974), "Electromagnetic forces and soil strength" ***Geotechnique.***, 24, 4, pp 627-640
- Ng C. W. W., Chiu C. F. and Shen C. K. (1998), "Effects of Wetting History on the Volumetric Deformation of Unsaturated Loose Fills", *Proc. 13th South East Asian Geotech. Conf.*, Taipei, Taiwan, 141-146.
- Rahman H. U., Abduljauwad S. N. and Akram T. (2007), "Geotechnical behavior of oil-contaminated fine grained soils" ***EJGE.***, 12, A, pp 1-12.
- Reznic Y. M. (1993), "Plate Load Test on Collapsible Soils", ***J. Geotech Eng. ASCE.***, 119, 3, pp 608-615.
- Rogers, C. D. F. (1995), "Types and Distribution of Collapsible Soils: In Genesis and Properties of Collapsible Soils", pp 1-17, E. Derbyshire et al. (Eds), Kluwer academic publishers.
- Shin E. C. and Das B. M. (2001), "Bearing capacity of unsaturated oil contaminated sand"

Sridharan A. and Rao V. G. (1979), "Shearing strength behavior of saturated clays and the role of the effective stress concept" **Geotechnique.**, 2, pp 177-193.

Tajik M., (2004), M.Sc. thesis, "Assessment of geoenvironmental effect of petroleum pollution on coastal sediments of Bushehr province-Iran", Tarbiat Modares University.

Vijay K. and Puri. (2000), "Geotechnical aspects of oil-contaminated sands" **Soil and Sediment Contamination.**, 9, 4, pp 359-374

Vipulanandan C. and Mohammad A. S. (2011), "Behavior of oil contaminated CL soil" THC, Houston.

حائری، س، م، اکبری گرکانی، روح پرور ح. (۱۳۹۱)، "بررسی بهسازی بستر کانال‌های انتقال آب قرار گرفته بر روی خاک‌های فروریزی با افزایش آهک با انجام آزمایش ادومتر و مدلسازی عددی (مطالعه موردی خاک لس گرگان)" سومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی. کرج، ایران.

خسروی، صبور م، قاسم‌زاده ح و کاهی ف. (۱۳۸۸)، "مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر گازوییل بر پارامترهای مقاومت برشی کائولینیت" دومین سمپوزیم بین‌المللی مهندسی محیط زیست خوش نشین لنگرودی م، یشربی ش و محمدی اکبرآبادی م. (۱۳۸۹)، "بررسی تأثیر آلودگی نفت خام بر پارامترهای مقاومتی خاک رسی"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد.

صدقیانی م، ح، جیریائی شراهی م. (۱۳۸۳)، "بررسی آزمایشگاهی تأثیر آلودگی به نفت خام بر پارامترهای مقاومت، نشست و تراکم پذیری ماسه"، اولین کنگره ملی عمران، تهران.

قاضی زاده، ش، حائری، س. (۱۳۹۲)، "بررسی رفتار هیدرومکانیکی و برشی خاک‌های فروریزی با استفاده از دستگاه سه محوری با قابلیت اعمال و کنترل مکش ساختاری مطالعه موردی: لس گرگان"،

پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ایران.

محمدی اکبرآبادی م، یثربی ش و خوش نشین لنگرودی م، (۱۳۸۹)، "بررسی تاثیر آلودگی نفت خام بر برخی از ویژگیهای ژئوتکنیکی خاک ماسه ای"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد.

Abstract

Oil contamination would cause environmental problems like air, water and soil pollution. Oil leakage and soil contamination make troubles for humans and other organisms. For remediation and reclamation of soil there are so many ways, but sometimes remediation isn't possible or not necessary. Changing in geotechnical parameters of contaminated soil is important issue for foundations, excavations and slopes. So researchers start testing on different types of soil to assess soils behavior with oil contaminations. Since there isn't any study on contaminated collapsible soil, in this study we want to test the collapse potential of these soils.

At first for testing these soils 10 boxes of undisturbed samples have been taken from Kalale. Then undisturbed and remolded samples were caught from field samples. It's worth mentioning that remolded samples had the same void ratio as undisturbed samples. In order to assess the behavior of these soils, saturated and unsaturated test were done that unsaturated apparatus were assembled in Shahrood University. Samples were in different conditions of saturation. Saturated tests were carried out on clean soil with water as pore fluid and pure soil with gas-oil or lamp-oil as pore fluid third type of samples contaminated with gas-oil or lamp-oil with weight content and saturated with water. Content of contamination were 2%, 4%, 6%, 8%, 10% of dry weight of soil. Unsaturated Oedometer tests under constant vertical stress and varying matric suction were performed on a pure soil and a soil with 6% gas oil.

The result showed that with disturbing loess soils collapse potential decreases even though the samples remolded in the same void ratio of undisturbed sample. Saturating the samples with gas oil and lamp oil disappear collapse potential and made it to a very slight value. Samples that contaminated with different gas oil and lamp oil contents haven't a specific decrease or increase of collapse potential with increase of oil content. Unsaturated tests for pure and gas oil contaminated soil showed that sample with contamination adsorb less water than pure soil and pure soil had a little more volume change with decreasing the suction.

Keywords: oil contamination, loess, collapse, saturated and unsaturated oedometer



University of Shahrood
Faculty of Civil Engineering

Settlement assessment of collapsible soils for leakage of petroleum

Saber Nokande

Supervisor(s):
Dr. S.M. Hosseini

January 2016