





دانشگاه صنعت آب و برق
دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)
دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد عمران - مکانیک خاک و پی

بررسی خواص مکانیکی خاک‌های آلوده به نفت خام

اساتید راهنما:

دکتر علی نورزاد

دکتر حسن قاسم زاده

تحقیق و تدوین :

مهران کنگانی

بهمن ماه ۱۳۹۰

چکیده

به هنگام آلودگی، ماهیت رفتار خاک با رفتار طبیعی آن، تفاوت خواهد کرد. این تغییر رفتار در خاک‌های مختلف، متفاوت بوده و بنابر طبیعت مسئله مورد بررسی، نتایج، مسیر تغییرات مختلفی را تجربه خواهند کرد. از سوی دیگر، به جهت استفاده از سایت‌های آلوده در راستای توسعه‌ی فیزیکی پالایشگاه‌ها، میادین نفتی و ... گزینه‌های طراحی سازه‌ها در سایت آلوده یا پاکسازی خاک آلوده و طراحی معمول و کلاسیک، وجود دارد. با در نظر گرفتن این موضوع که تمیز کردن خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌ها یک مسئله‌ی پیچیده است و علاوه بر هزینه‌ی بالا، محدودیتهای بسیار زیادی برای ساماندهی خاک‌های آلوده شده دارد، گزینه‌ی بسط روابط برای طراحی سازه‌ها در سایت‌های آلوده به عنوان یک گزینه‌ی طراحی، مطرح است. از سوی دیگر، مسئله‌ی صرفه‌ی اقتصادی می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای انگیزه یافتن محققان جهت استفاده از این خاک‌ها در کاربری‌های مختلف باشد. بر همین اساس، برای دستیابی به یک درک مناسب از الگوی رفتاری خاک‌های آلوده، تحقیقات مختلفی از قبیل آزمایش‌های سه محوری، برش مستقیم، نفوذپذیری و تحکیم برای روشن شدن تاثیر انواع آلاینده بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های مختلف از سوی محققان انجام گردیده است و نتایج کم و بیش مشابه و یا متفاوتی ارائه شده است. به منظور بسط روابط و دستیابی به درک و شناخت کافی از رفتار خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌ها، ضروری است که تمامی فاکتورهای دخیل در این موضوع را به صورت دقیق در نظر گرفت تا بتوان ضمن توسعه‌ی روابط، دقت کافی برای پیش‌بینی رفتار این خاک‌ها را نیز حاصل کرد.

در این پایان‌نامه، آزمایش‌های برش مستقیم و سه محوری تحکیم نیافته‌ی زهکشی نشده (UU) به منظور تعیین خواص مقاومتی نمونه‌های مورد بررسی آلوده در حالت غیر اشباع و اشباع، حدود اتربرگ برای مشخص کردن تغییر رفتار خمیری نمونه و آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، برای بررسی تغییر میکروسکوپی در بافت و ساختار نمونه‌های آلوده به نفت خام بر روی مخلوط ۵۰ درصدی کائولینیت و بنتونیت به عنوان خاک مورد استفاده در این پژوهش انجام پذیرفته است. کلیه‌ی آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های شامل ترکیب وزنی ۵۰ درصدی کائولینیت و بنتونیت آلوده با درصد‌های آلودگی مختلف و عمر نگهداری یک هفته در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتیگراد، انجام پذیرفته است.

نتایج آزمایش برش مستقیم نشان می‌دهد که با افزایش میزان آلودگی نمونه‌ها به نفت خام، چسبندگی نمونه‌ها افزایش و زاویه‌ی اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد و در نتیجه، مقاومت برشی خاک ریزدانه‌ی مورد بررسی افزایش یافته است. بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش سه محوری UU، بیانگر کاهش میزان حداکثر تنش انحرافی و نیروی قابل تحمل توسط نمونه‌ها در یک کرنش متناظر یکسان با افزایش میزان آلودگی است. چسبندگی زهکشی نشده‌ی نمونه‌ها نیز با افزایش در میزان آلودگی، کاهش می‌یابد. حدود خمیری و روانی خاک با افزایش میزان آلودگی افزایش می‌یابند و تغییرات شاخص خمیری نیز افزایشی است. تغییرات در بافت و ساختار خاک نیز با افزایش میزان آلودگی از ساختار پراکنده و واگرا در حالت بدون آلودگی، به یک ساختار توده‌ای و مجتمع با افزایش در میزان آلودگی نزدیک می‌شود.

کلمات کلیدی: آزمایش‌های آزمایشگاهی، آلودگی خاک، نفت خام، کائولینیت، بنتونیت، چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، مقاومت برشی، حدود اتربرگ

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱ پیشگفتار	۲
۲-۱ ضرورت انجام تحقیق	۳
۳-۱ هدف از تحقیق	۵
۴-۱ متدولوژی (روش شناسی) تحقیق	۵
۵-۱ ساختار پایان نامه	۵
فصل دوم: تئوری موضوع و مروری بر مطالعات و پژوهش‌های پیشین	۷
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ خاک	۸
۱-۲-۲ ساختار خاک	۸
۲-۲-۲ طبقه بندی خاک	۹
۳-۲ خواص فیزیکی خاک	۱۰
۱-۳-۲ بافت و ساختار خاک‌ها	۱۱
۴-۲ کانی‌های رسی و انواع آن‌ها	۱۲
۱-۴-۲ منشا پیدایش	۱۲
۲-۴-۲ ترکیب و خواص شیمیایی رس‌ها	۱۲
۵-۲ آلاینده‌های خاک	۱۷
۱-۵-۲ هیدروکربن‌ها	۱۷
۶-۲ اندرکنش آلاینده و خاک	۲۱
۷-۲ تغییر در خصوصیات و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده	۲۲
۱-۷-۲ ظرفیت باربری	۲۳
۸-۲ مروری بر سابقه پژوهش	۲۶
۱-۸-۲ پارامترهای مقاومت برشی	۲۷
۲-۸-۲ آزمایش برش مستقیم	۲۷
۳-۸-۲ آزمایش سه محوری	۳۹

۳۳	۲-۸-۴ حدود اتربرگ
۳۵	۲-۸-۵ تراکم پذیری
۳۷	۲-۸-۶ نفوذپذیری
۳۹	۲-۸-۷ پارامترهای تحکیم
۳۹	۲-۸-۸ آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده
۴۰	۲-۸-۹ آزمایش CBR

فصل سوم: متدولوژی و نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها.....۴۲

۴۳	۳-۱ مقدمه
۴۳	۳-۲ خاک مورد مطالعه
۴۳	۳-۳ آلاینده‌ی مورد استفاده
۴۳	۳-۴ آماده کردن وسایل آزمایشگاهی
۴۴	۳-۵ تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه
۴۴	۱-۳-۵ آزمایش تعیین Gs
۴۵	۳-۵-۲ تعیین درصد رطوبت خاک
۴۷	۳-۵-۳ تعیین میزان مواد آلی خاک
۴۸	۳-۵-۴ دانه‌بندی خاک
۵۰	۵-۳-۵ تعیین pH
۵۱	۳-۶ طبقه‌بندی خاک
۵۱	۳-۷ تهیه‌ی نمونه‌های آلوده به نفت خام
۵۲	۳-۸ چگونگی انجام آزمایش‌ها
۵۲	۳-۸-۱ تعیین حدود اتربرگ خاک
۵۵	۳-۸-۲ آزمایش تراکم
۵۶	۳-۸-۳ آزمایش برش مستقیم
۶۰	۴-۸-۳ آزمایش سه محوری
۶۴	۵-۸-۳ میکروسکوپ الکترونی پیمایشی (SEM)
۶۶	۳-۹ جمع بندی

فصل چهارم: نتایج و بحث.....۶۷

۶۸	۴-۱ مقدمه
۶۸	۴-۲ خلاصه‌ی آزمایش‌های انجام شده
۶۸	۴-۳ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

۶۹	 ۱-۳-۴ آزمایش هیدرومتری
۶۹	 ۴-۳-۲ برخی خواص فیزیکی خاک مورد بررسی
۷۲	 ۳-۳-۴ تراکم
۷۲	 ۴-۳-۴ چگالی ویژه ی دانه های خاک G_s
۷۳	 ۵-۳-۴ خواص شیمیایی خاک مورد بررسی
۷۴	 ۴-۴ تکرارپذیری آزمایش ها
۷۵	 ۵-۴ تاثیر آلودگی به نفت خام بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مورد بررسی
۷۵	 ۱-۵-۴ بافت خاک
۷۷	 ۲-۵-۴ حدود اتربرگ
۸۰	 ۳-۵-۴ آزمایش های برش مستقیم
۹۲	 ۴-۵-۴ آزمایش های سه محوری تحکیم نیافته ی زهکشی نشده (UU)
۹۸	 ۶-۴ جمع بندی
۱۰۰	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۱	 ۱-۵ مقدمه
۱۰۱	 ۲-۵ نتیجه گیری
۱۰۳	 ۳-۵ پیشنهادها
۱۰۵	 ۴-۵ منابع و مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ نشت نفت خام از مخازن نگهداری ۳
- شکل ۲-۱ آلودگی خط ساحلی بر اثر بروز آلودگی نفتی در دریا ۳
- شکل ۱-۲ حالات اجتماع ذرات در کانیه‌های رس ۱۳
- شکل ۲-۲ واحدهای اصلی کانی‌های رسی ۱۴
- شکل ۳-۲ ورقه‌ی چهار وجهی (سیلیکا) ۱۴
- شکل ۴-۲ ورقه‌ی هشت وجهی (گیبسیت) ۱۴
- شکل ۵-۲ ساختار لایه‌ی کائولینیت ۱۵
- شکل ۶-۲ ساختار لایه‌ی مونت موریلونیت ۱۶
- شکل ۷-۲ ساختار لایه‌ی ایلیت ۱۷
- شکل ۸-۲ فرم‌های مختلف فیزیکی آلاینده‌های آلی در خاک ۲۲
- شکل ۹-۲ پوش گسیختگی موهر کولمب بسط داده شده برای خاک‌های غیر اشباع ۲۴
- شکل ۱۰-۲ مقادیر پیشنهادی پارامتر λ برای خاک‌های مختلف ۲۵
- شکل ۱۱-۲ مثال‌هایی از رفتار غیر خطی در رابطه‌ی بین مقاومت برشی و ماتریس مکش ۲۶
- شکل ۱۲-۲ تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی در نمونه‌های آلوده SM، CL و SP ۲۹
- شکل ۱۳-۲ تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی در نمونه‌های آلوده SM، CL و SP ۲۹
- شکل ۱۴-۲ نمودار تنش برشی در مقابل جابجایی افقی برای نمونه‌های آلوده تمیز و آلوده اشباع در مرحله‌ی برش ۳۰
- شکل ۱۵-۲ نمودار تنش برشی در مقابل جابجایی افقی برای نمونه‌های آلوده تمیز و آلوده غیر اشباع در مرحله‌ی برش ۳۱
- شکل ۱۶-۲ شمایی شماتیک از جدایی پیوند ذرات جامد خاک-نفت با آب ۳۱
- شکل ۱۷-۲ تغییرات تنش انحرافی در مقابل کرنش محوری برای آزمایش‌های سه محوری CD ۳۲
- شکل ۱۸-۲ تغییرات فشارهای آب منفذی در مقابل کرنش محوری برای آزمایش‌های سه محوری CD ۳۲
- شکل ۱۹-۲ تغییرات مقاومت برشی سه خاک ریزدانه با ویسکوزیته سیال منفذی ۳۳
- شکل ۲۰-۲ نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ روی خاک‌های گرانیتی و رسوبی با منشاء سنگ دگرگون ۳۴
- شکل ۲۱-۲ تغییرات حدود اتربرگ با درصد آلاینده گازوئیل و بنزین ۳۵
- شکل ۲۲-۲ نمودارهای آزمایش تراکم برای نمونه‌های با درصد‌های آلودگی متفاوت ۳۶
- شکل ۲۳-۲ نمودار تحکیم برای نمونه‌های ماسه تمیز و آلوده ۳۹
- شکل ۲۴-۲ تغییرات تنش برشی با ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی برای خاک‌های ریزدانه ۴۰
- شکل ۱-۳ طبقه بندی آب اطراف ذره‌ی رسی ۴۶
- شکل ۲-۳ ترازو و اون مورد استفاده ۴۷
- شکل ۳-۳ دستگاه اندازه گیری pH مورد استفاده در این پژوهش ۵۰
- شکل ۴-۳ نحوه ی نگهداری نمونه ۵۲
- شکل ۵-۳ وسایل مورد نیاز انجام آزمایش حد روانی ۵۴
- شکل ۶-۳ نحوه‌ی ایجاد شیار در جام کاساگرانده در آزمایش حد روانی ۵۴
- شکل ۷-۳ وسایل مورد نیاز در انجام آزمایش تراکم ۵۷
- شکل ۸-۳ نمایی از دستگاه‌های برش مستقیم استفاده شده در این پژوهش ۵۹
- شکل ۹-۳ نمایی از ابزارها و وسایل مورد نیاز در آزمایش برش مستقیم ۵۹
- شکل ۱۰-۳ اشکال روند آماده سازی نمونه تا قرار دادن نمونه درون سلول سه محوری برای شروع آزمایش ۶۳

- شکل ۱۱-۳ سیستم ثبت اطلاعات آزمایش سه محوری ۶۴
- شکل ۱۲-۳ مکانیسم تصویر برداری از نمونه‌ها در دستگاه میکروسکوپ الکترونی ۶۴
- شکل ۱۳-۳ نمایی شماتیک از میکروسکوپ الکترونی ۶۵
- شکل ۱۴-۳ دستگاه SEM استفاده شده در این پژوهش - مدل VeGa\\ ساخت شرکت Tescan کشور جمهوری چک ۶۶
- شکل ۱-۴ منحنی دانه بندی خاک کائولینیت و بنتونیت مورد استفاده در این پژوهش ۶۹
- شکل ۲-۴ تصویر نمونه برداری شده از بافت خاک با زوم ۲۵۰۰ برابر به وسیله SEM برای نمونه‌های بدون آلودگی ۷۰
- شکل ۳-۴ تصویر نمونه برداری شده از بافت خاک با زوم ۵۰۰۰ برابر به وسیله SEM برای نمونه‌ی بدون آلودگی ۷۱
- شکل ۴-۴ تصویر نمونه برداری شده از بافت خاک با زوم ۱۰۰۰۰ برابر به وسیله SEM برای نمونه‌ی بدون آلودگی ۷۱
- شکل ۵-۴ منحنی تراکم به دست آمده از انجام آزمایش تراکم بر روی مخلوط ۵۰ درصدی کائولینیت و بنتونیت ۷۲
- شکل ۶-۴ تصویر نمونه برداری شده از بافت خاک با زوم ۲۵۰۰ برابر به وسیله SEM ۷۵
- شکل ۷-۴ تصویر نمونه برداری شده از بافت خاک با زوم ۵۰۰۰ برابر به وسیله SEM ۷۶
- شکل ۸-۴ تصویر نمونه برداری شده از بافت خاک با زوم ۱۰۰۰۰ برابر به وسیله SEM ۷۶
- شکل ۹-۴ تغییرات حد خمیری در برابر میزان نفت خام افزوده شده به نمونه‌ها ۷۷
- شکل ۱۰-۴ تغییرات حد روانی در برابر میزان نفت خام افزوده شده به نمونه‌ها ۷۷
- شکل ۱۱-۴ تغییرات شاخص خمیری در برابر میزان نفت خام افزوده شده به نمونه‌ها ۷۸
- شکل ۱۲-۴ نمودارهای تغییرات حد خمیری، حد روانی و شاخص خمیری در برابر میزان نفت خام افزوده شده به نمونه‌ها ۷۸
- شکل ۱۳-۴ شکل واقعی میکروسکوپی از پوشش آلاینده بر روی ذرات در هنگام آلودگی ۷۹
- شکل ۱۴-۴ تغییرات تنش برشی در مقابل تغییر مکان افقی برای نمونه‌های بدون آلودگی ۸۱
- شکل ۱۵-۴ تغییرات تنش برشی در مقابل تغییر مکان افقی برای نمونه‌های با ۲ درصد آلودگی ۸۱
- شکل ۱۶-۴ تغییرات تنش برشی در مقابل تغییر مکان افقی برای نمونه‌های با ۴ درصد آلودگی ۸۲
- شکل ۱۷-۴ تغییرات تنش برشی در مقابل تغییر مکان افقی برای نمونه‌های با ۸ درصد آلودگی ۸۲
- شکل ۱۸-۴ تغییرات تنش برشی در مقابل تغییر مکان افقی برای نمونه‌های با ۱۲ درصد آلودگی ۸۳
- شکل ۱۹-۴ تغییرات تنش برشی در مقابل تغییر مکان افقی برای نمونه‌های با ۱۶ درصد آلودگی ۸۳
- شکل ۲۰-۴ تغییرات تنش برشی در مقابل تغییر مکان افقی برای نمونه‌های با ۲۰ درصد آلودگی ۸۴
- شکل ۲۱-۴ شکل کلی نمودار تغییرات تنش برشی در مقابل تغییر مکان افقی برای نمونه‌های با درصدهای آلودگی مختلف در تنش قائم ۲۰۰ کیلو پاسکال ۸۵
- شکل ۲۲-۴ شکل نمودار با زوم بالاتر در نقاط انتهایی نمودار ۸۵
- شکل ۲۳-۴ تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی در مقابل میزان نفت خام و آب افزوده شده به نمونه‌ها ۸۶
- شکل ۲۴-۴ تغییرات چسبندگی در مقابل میزان نفت خام و آب افزوده شده به نمونه‌ها ۸۶
- شکل ۲۵-۴ درصد تغییرات چسبندگی در مقابل میزان نفت خام و آب افزوده شده به نمونه‌ها ۸۷
- شکل ۲۶-۴ درصد تغییرات زاویه‌ی اصطکاک داخلی در مقابل میزان نفت خام و آب افزوده شده به نمونه‌ها ۸۷
- شکل ۲۷-۴ تغییرات تنش برشی در مقابل تغییر مکان افقی نمونه‌های آلوده به نفت خام و مرطوب با آب با ۴ درصد وزنی نمونه‌ها ۸۹
- شکل ۲۸-۴ تغییرات تنش برشی در مقابل تغییر مکان افقی نمونه‌های آلوده به نفت خام و مرطوب با آب با ۱۲ درصد وزنی نمونه‌ها ۸۹
- شکل ۲۹-۴ تغییرات تنش برشی در مقابل تغییر مکان افقی نمونه‌های آلوده به نفت خام و مرطوب با آب با ۲۰ درصد وزنی نمونه‌ها ۹۰
- شکل ۳۰-۴ تغییرات تغییر مکان قائم در مقابل میزان نفت خام افزوده شده به نمونه‌ها ۹۱

- شکل ۳۱-۴ تغییرات تنش انحرافی در برابر کرنش محوری برای تنش همه‌جانبه‌ی ۲۰۰ kPa ۹۳
- شکل ۳۲-۴ تغییرات تنش انحرافی در برابر کرنش محوری برای تنش همه‌جانبه‌ی ۴۰۰ kPa ۹۳
- شکل ۳۳-۴ تغییرات نیروی محوری در برابر کرنش محوری برای تنش همه‌جانبه‌ی ۲۰۰ kPa ۹۵
- شکل ۳۴-۴ تغییرات نیروی محوری در برابر کرنش محوری برای تنش همه‌جانبه‌ی ۴۰۰ kPa ۹۵
- شکل ۳۵-۴ دواير موهر استخراج شده برای نمونه‌های بدون آلودگی تحت تنش‌های همه‌جانبه ۲۰۰ و ۴۰۰ ۹۷
- شکل ۳۶-۴ دواير موهر استخراج شده برای نمونه‌های ۱۰ درصد آلودگی تحت تنش‌های همه‌جانبه ۲۰۰ و ۴۰۰ ۱۰۶
- شکل ۳۷-۴ دواير موهر استخراج شده برای نمونه‌های ۲۰ درصد آلودگی تحت تنش‌های همه‌جانبه ۲۰۰ و ۴۰۰ ۱۰۶
- شکل ۳۸-۴ تغییرات چسبندگی زهکشی نشده با افزایش میزان نفت خام ۱۰۷

فهرست جداول

جدول ۱-۲	کانی‌های عمومی در خاک‌ها	۹
جدول ۲-۲	حدود جدا کننده‌ی اندازه‌ی خاک	۱۰
جدول ۳-۲	کانی‌های رسی	۱۳
جدول ۴-۲	پارامترهای مقاومت برشی اندازه‌گیری شده برای انواع مختلفی از خاک‌ها	۲۵
جدول ۱-۴	جدول آزمایش‌های طراحی و انجام شده در راستای نیل به اهداف پایان نامه	۶۸
جدول ۲-۴	برخی خواص فیزیکی خاک‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها	۷۰
جدول ۳-۴	نتایج به دست آمده از انجام آزمایش تعیین چگالی ویژه برای کائولینیت	۷۳
جدول ۴-۴	نتایج به دست آمده از انجام آزمایش تعیین چگالی ویژه برای بنتونیت	۷۳
جدول ۵-۴	نتایج به دست آمده از XRF از ترکیب و میزان عناصر تشکیل دهنده‌ی کائولینیت	۷۳
جدول ۶-۴	نتایج به دست آمده از آزمون XRD برای مشخص شدن نوع و ترکیب شیمیایی کانی‌های موجود در کائولینیت	۷۴
جدول ۷-۴	نتایج به دست آمده از XRF از ترکیب و میزان عناصر تشکیل دهنده‌ی بنتونیت	۷۴
جدول ۸-۴	نتایج به دست آمده از آزمون XRD برای مشخص شدن نوع و ترکیب شیمیایی کانی‌های موجود در بنتونیت	۷۴

١ - فصل اول

مقدمه

انسان برای دست یافتن به اهداف کوتاه مدت خود به طبیعت آسیب می‌زند. در اثر فعالیت‌های بشر، نه تنها آب و هوا، بلکه خاک نیز آلوده می‌شود. آلوده شدن خاک علاوه بر آلودگی آب زیرزمینی، باعث تغییراتی در وضعیت سازه‌های واقع بر روی خاک می‌شود. هر تغییری در مشخصات مهندسی لایه‌های خاک، می‌تواند منجر به تغییر در ظرفیت باربری و نشست کلی و نسبی پی سازه‌ها و نیز پایداری شیروانی‌ها شود. در نتیجه، سازه‌ها می‌توانند دچار گسیختگی شده و یا از نظر کاربری، غیر قابل استفاده شوند.

آلاینده‌های نفتی زیادی امروزه در محیط زیست به وسیله صنایع نفتی و شیمیایی تولید می‌شود که جزء مهمترین آلاینده‌های محیط زیست محسوب می‌گردند. آلودگی به نفت خام، می‌تواند از منابع متعددی صورت گیرد. از این میان، نشت از لوله‌های انتقال آسیب دیده، تصادف تانکرها، تخلیه از تاسیسات نفتی داخل دریا، مخزن‌های نگهداری (شکل ۱-۱)، پلنت‌های حفاری و استخراج و نشت طبیعی از اهمیت بیشتری برخوردارند. برای مثال، ریزش‌های نفت (Oil Spills) در طول جنگ خلیج فارس، نشت شدید از لوله‌های انتقال نفت در عربستان سعودی و آسیب دیدن نفتکش‌ها در خلیج فارس، منجر به آلودگی خاک شده است.

هنگامی که نشت یا ریزش نفت اتفاق می‌افتد، این مایع هیدروکربنی، تحت اثر نیروی ثقل، به آب‌های زیرزمینی رسیده و خاک‌های مسیر خود را نیمه اشباع می‌کند. علیرغم رسیدن به سطح آب زیرزمینی، این مایع می‌تواند از طریق نیروی کاپیلاری به صورت افقی منتشر شده و خاک بیشتری را آلوده کند. همچنین نفتی که در نزدیکی ساحل وارد آب می‌گردد، خاک تمام خط ساحلی را آلوده می‌کند (شکل ۱-۲) (Fine et al., 1997).

ایران با توجه به دارا بودن ۸/۵۸ درصد از منابع نفتی جهان، تولیدات پتروشیمی متوسط ۱۶ میلیون تن در سال، دارا بودن مقام دوم ذخایر گازی جهان، وجود بیش از ۲۰۰۰۰ کیلومتر خط انتقال نفت و گاز، دارا بودن بیش از ۸۰۰۰ ایستگاه سوخت گیری، ۹۰۰۰ تانکر حمل نفت و فرآورده‌های نفتی، ۱۰۰۰ تانکر حمل گاز مایع، ۱۳۰ واحد پرکننده-ی مخزن گاز و ۸۵ انبار نفت، به میزان زیادی در معرض آلوده شدن خاک و آب به نفت و فرآورده‌های نفتی قرار دارد (قاسمی نقدی، ۱۳۸۴).

در صورت آلوده شدن، برای تصفیه و پالایش خاک، بایستی هزینه، زمان و انرژی زیادی صرف گردد. برای پالایش و بازیابی^۱ خاک‌های آلوده شده، روش‌های متنوعی توسط شرکت‌ها و آکادمی‌های مختلف، پیشنهاد شده است. در سایت‌های بزرگ، از روش سوزاندن، روش‌های بیولوژیکی، روش‌های جذبی، روش‌های شستشوی خاک، جدا کردن توسط خلا و جدا کردن توسط سانتریفیوژ استفاده می‌شود (Al-Awadhi et al., 1992). اما، استفاده از مواد آلوده به عنوان مصالح ساختمانی، زیرسازی راه، مواد پوشش دهنده و عایق و ... منطقی‌تر به نظر می‌رسد. چرا که خاک آلوده، علاوه بر دور شدن از منطقه‌ی بحرانی، ارزش اقتصادی نیز پیدا می‌کند. اینگونه استفاده‌ها از خاک، مستلزم ارائه‌ی یک مدرک مستند و معتبر در مورد عدم امکان ناشی شدن عواقب سوء زیست محیطی می‌باشد. این عواقب، شامل آلودگی آب‌های زیرزمینی، تبخیر و آلودگی هوای ناشی از آن و اثرات تدریجی باقی ماندن چنین آلودگی‌ای بر سلامت و زندگی انسان و می‌شود.

¹ Remediation



شکل ۱-۱ نشت نفت خام از مخازن نگهداری



شکل ۲-۱ آلودگی خط ساحلی بر اثر بروز آلودگی نفتی در دریا

وسعت آلودگی به ترکیب شیمیایی ماده‌ی آلوده‌کننده و خصوصیات خاک بستگی دارد. برای تعیین روش بهینه برای بازیابی و بررسی امکان استفاده از خاک‌های آلوده، تعیین خصوصیات و رفتار خاک پس از آلوده شدن ضروری و مورد نیاز است. همچنین هنگامی که نشت از مخزن‌های ذخیره‌سازی و یا لوله‌های انتقال نفت و یا پالایشگاه‌ها باعث آلوده شدن خاک‌های اطراف خود می‌شود، می‌باید تاثیر آلودگی خاک بر سازه‌های موجود بررسی شود تا در صورت وجود هر گونه ریسک، در راستای کاهش آن، اقدامات مورد نظر را انجام داد.

در این پژوهش، خصوصیات ژئوتکنیکی مخلوط کائولینیت و بنتونیت (که هر دوی آن‌ها از کانی‌های خالص رسی می‌باشند) آغشته به درصد‌های مختلف آلودگی به نفت خام، توسط آزمایش‌های حدود ات‌برگ، برش مستقیم، سه محوری تحکیم نیافته‌ی زهکشی نشده و عکس برداری توسط میکروسکوپ الکترونی پیمایشی (SEM)، سنجیده می‌شود.

۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

ایمنی و اقتصاد، دو رکن اساسی طراحی‌های مهندسی را تشکیل می‌دهند. با نشت و انتشار آلاینده‌های نفتی در خاک، به جهت تغییر در پارامترهای مختلف خاک‌ها احتمال می‌رود که ایمنی سازه‌ها با خطر جدی مواجه گردد

و خسارات جبران ناپذیری را به بار آورد. از سوی دیگر، قرار گرفتن غالب مناطق آلوده به نفت خام و فرآورده‌های شیمیایی پایین دستی آن، در مکان‌های همجوار تاسیسات نفتی و پالایشگاه‌ها و نیاز به توسعه‌ی فیزیکی این تاسیسات در صورت نیاز، لزوم توجه به مسئله‌ی خاک‌های آلوده را بیش از پیش روشن می‌سازد. بدون شک، بدون در اختیار داشتن پارامترهای مکانیکی خاک از قبیل چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و ... برای درک صحیح رفتار سازه بر بستر خاک‌های غیر اشباع که مکانیک رفتاری پیچیده‌ای دارند و آلوده به آلاینده هستند، نمی‌توان انتظار داشت که طراحی‌های مناسب برای سازه‌هایی که به نوعی با این خاک‌ها سر و کار دارند، به لحاظ ایمنی صورت پذیرد و به تبع آن به دلیل بیشتر فرض کردن ضریب ایمنی به علت عدم قطعیت‌های مرتبط با این مسئله، بحث اقتصاد پروژه نیز با تردید مواجه خواهد شد. چرا که مبنای تمامی محاسبات مربوط به ژئوتکنیک بر پایه‌ی پارامترهای رفتاری خاک استوار است. لذا برای دستیابی به یک طراحی دقیق و مناسب، خصوصاً برای سازه‌های با اهمیت بالا در بسترهای آلوده به مواد نفتی ضرورت دارد تا آزمایش‌هایی برای خاک‌های مختلف و آلاینده‌های نفتی صورت گیرد تا بتوان از نتایج این کار، علاوه بر کیفیت دادن به روندهای تحلیل به واسطه‌ی درک مناسب‌تر رفتار خاک، هزینه‌ها و خسارات احتمالی ناشی از خطرات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به مشتقات نفتی را تا میزان ممکن کم کرد. تعیین روند دقیق تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی مورد نیاز طراحی سازه‌های مورد نیاز بر بستر آلوده، ضمن جلوگیری از هدر رفت سرمایه و منابع مالی به لحاظ جلوگیری از برداشت خاک‌های آلوده و انتقال آن به مکان‌های دیگر که دارای مشکلات زیست محیطی خاص خود است و یا هزینه در روش‌های رفع آلودگی که علاوه بر نیاز به سرمایه‌ی هنگفت، تخصص مورد نیاز خود را می‌طلبد، شرایط را برای ارضای هر دو رکن ایمنی و اقتصاد پروژه ارضاء خواهد نمود و با یک طراحی بهینه، می‌توان گزینه‌ی ایده‌آل متعادل کننده‌ی دو عامل ایمنی و هزینه را انتخاب کرد.

به واسطه‌ی اهمیت این موضوع، پیش از این، محققان و پژوهشگران مختلفی، تمرکز فعالیت‌های خود را بر روی تعیین روند تغییر مشخصات ژئوتکنیکی و هیدرولیکی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های مختلف نشات گرفته از صنایع شیمیایی و آلاینده‌های ناشی از هیدروکربن‌ها نظیر نفت خام گذاشته‌اند. مروری بر نتایج و داده‌های حاصل از انجام این پژوهش‌ها، این نکته را به خوبی هویدا می‌کند که تفاوت‌های بارز در برخی پارامترها، خصوصاً در خاک‌های ریزدانه، در شرایط یکسان نمونه‌های خاک و آلاینده‌های مورد استفاده از یک خانواده، می‌تواند دلایل متفاوتی داشته باشد که تا حدودی از چشم پژوهشگران دور مانده است. منطق‌های انتخاب نوع خاک و نوع آلاینده‌های مورد بحث برای بررسی تاثیر آن‌ها بر روی خاک، متفاوت است. اما مسئله‌ای که از سوی اغلب محققین به صورت مشترک بر روی آن صحنه گذاشته شده است، تاثیر آشکار نوع خاک و نوع آلاینده‌ی مورد نظر در حصول تفاوت در نتایج است. در این بین، در خاک‌های رسی به دلیل تاثیر آشکار اضافه شدن آلاینده به آن به علت فعال بودن این نوع خاک از لحاظ الکتروشیمیایی، واکنش‌های شیمیایی مختلفی بین دانه‌های خاک و آلاینده‌ی مورد بحث - که بسته به ترکیبات شیمیایی آن آلاینده، این واکنش‌ها نیز متفاوت هستند و ساختار و بافت خاک را به حالت‌های نامتشابهی تغییر می‌دهند - ایجاد می‌گردد و از این جهت، از اهمیت بیشتری برای بررسی برخوردار هستند. چرا که عوامل دخیل در حصول نتایج در این نوع خاک‌ها، بسیار گسترده‌تر و بیشتر از فاکتورهایی هستند که بر روی خاک‌های درشت دانه نظیر شن و ماسه تاثیر گذار می‌باشند. از سوی دیگر، بررسی و مقایسه‌ی دو خاک آلوده شده به آلاینده‌ی نفت خام، شامل یک نوع خاک رس طبیعی که شامل کانی‌های مختلف تشکیل دهنده‌ی آن است و خاکی دیگر که شامل تنها یک کانی خالص رس نظیر کائولینیت است، تفاوت‌های اساسی در نتایج را نشان می‌دهد و این مسئله موید این مطلب است که حتی در مورد چندین خاک که به لحاظ رده بندی در یک گروه از خاک‌ها قرار می‌گیرند، باید اشل

دقت را بالاتر برد و با تغییر نگرش از دید ماکروسکوپی، به حالت بسیار جزئی تری به مسئله نگاه کرد و آن را از جهات مختلف مورد بررسی قرار داد.

۳-۱ هدف از تحقیق

انتخاب هدف تحقیق در ابتدای انتخاب موضوع پژوهش، فرآیندی است که باید بسیار با دقت و با توجه به نوع مسئله‌ی مورد بررسی تبیین گردد. انتخاب هدف پژوهش، متناسب با ضرورت مسئله، امکانات در دسترس برای رسیدن به هدف و زمان مورد نیاز برای نائل شدن و تحقق هدف پژوهش، انتخاب و هدف گذاری می گردد. لذا با توجه به محدودیت‌های فوق‌الذکر، هدف این پژوهش، بررسی پارامترهای مقاومتی و خواص خمیری مخلوط خاک ریزدانه‌ی شامل کانی‌های خالص کائولینیت و بنتونیت با درصد وزنی مشابه را در بر خواهد گرفت. برای نیل به این مقصود، ساختار اهداف در یک چارچوب که در برگیرنده چند زیر مجموعه می‌باشد، تعریف می گردد.

۴-۱ متدولوژی (روش شناسی) تحقیق

انتخاب روش مورد استفاده در انجام یک پژوهش، باید متناسب با نوع ماهیت تحقیق به لحاظ امکان‌پذیری انجام آن با انواع روش‌های انجام پژوهش‌ها نظیر روش‌های عددی، تحلیلی و یا تجربی باشد. بدون شک، پیشرفتی که امروزه در توانمندشدن روش‌های عددی و تحلیلی مشاهده می گردد، مرهون نتایج حاصل از پژوهش‌های تجربی و عملی انجام شده بر روی مسائل مختلف و استخراج داده‌هایی بوده است که در بسط و پیشرفت روش‌های تئوریک، تاثیر خود را نشان داده است. با عنایت به توضیحات فوق و توجه به نوپا بودن موضوع این پژوهش و وجود بسیاری ابهام‌ها در حیطه‌ی مسئله‌ی آلودگی خاک‌ها، این تحقیق، با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و روش تجربی برای رفع احتمالی برخی ابهام‌ها و بررسی روند تغییرات پارامترهای مورد نظر انجام خواهد شد. به صورت خلاصه، روند و روش انجام پروژه را می‌توان در چند بند زیر تعریف کرد:

- ۱- بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی مختلف خاک مورد بحث آغشته به درصد‌های مختلف آلودگی نفت خام. پارامترهای مقاومتی و رفتار تنش - کرنش نمونه‌های آلوده با استفاده از آزمایش‌های برش مستقیم و سه محوری تحکیم نیافته‌ی زهکشی نشده (UU) و بررسی میزان جذب آب نمونه‌ها تا رسیدن به مقاومت برشی صفر (حد روانی) با استفاده از آزمایش حدود اتربرگ، بررسی می گردند.
- ۲- بررسی همه جانبه‌ی علل مرتبط با تغییر در رفتار خاک در هنگام آلودگی با استفاده از مطالعات پیشین.
- ۳- تحقیق در مورد تغییر در ساختار و بافت خاک با استفاده از عکسبرداری با میکروسکوپ الکترونی پیمایشی (SEM) به جهت نیل به درک بهتر و دقیق تر از ساختار خاک پس از آلودگی و کمک به پیش بینی تغییرات در پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه‌ی دیگر.

۵-۱ ساختار پایان نامه

این پایان نامه در ۵ فصل تنظیم و ارائه شده است. در فصل نخست (کلیات) که پیش روست، مشکلات آلودگی خاک‌ها به نفت خام و لزوم بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، ارائه شده و ضرورت انجام تحقیق و اهداف تحقیق بر شمرده شده است.

در فصل دوم، تعریف مختصری از کلیات مربوط به تحقیق، نظیر تعریف خاک و برهم کنش آن با آلاینده‌ها، نفت و ترکیبات آن و نیز تاثیر آلودگی بر مشخصات ژئوتکنیکی خاک بر اساس مطالعات انجام شده توسط محققین پیشین، ارائه شده است.

در فصل سوم، به شرح مفصل روش‌ها و مواد استفاده شده، به منظور نیل به اهداف تحقیق، پرداخته شده است. فصل چهارم پایان‌نامه، مشتمل بر ارائه‌ی نتایج به دست آمده و بحث و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج پژوهش‌های گذشته می‌باشد.

فصل پنجم به بیان نتیجه گیری و به دنبال آن، ارائه‌ی پیشنهادهایی برای تکمیل و توسعه‌ی پایان‌نامه‌ی حاضر، اختصاص یافته است.

در پایان نیز، مراجع و منابع مورد استفاده به عنوان بخش پایانی، آورده شده است.

۲- فصل دوم

تئوری موضوع و مروری بر مطالعات و پژوهش‌های پیشین

۱-۲ مقدمه

بدون شک، شناسایی و درک هر پدیده، مستلزم طی فرآیند بررسی و یادگیری کلیاتی است که در برگیرنده-ی مفاهیم پایه و توضیحات کامل در تشریح آن پدیده است. در این بخش، شرح مختصری از تعاریف و کلیات مورد نیاز برای آشنایی با مسئله‌ی آلودگی خاک‌ها و عوامل مرتبط با آلودگی در حیطه‌ی مسائل مهندسی ارائه می‌گردد. برای نیل به این مقصود، در ابتدا، ساختار خاک و نقش آلاینده‌ها در تغییر خصوصیات آن پرداخته شده و در ادامه توضیحاتی در مورد هیدروکربن‌های نفتی، تشریح شده است. در انتها نیز، مروری بر مطالعات پیشین انجام شده توسط محققین مختلف، پایان بخش مطالب این فصل خواهد بود.

۲-۲ خاک

۱-۲-۲ ساختار خاک

به منظور بررسی چگونگی تغییرات خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، آشنایی، شناخت و درک رفتار و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و سازوکارهای اندرکنش بین خاک و آلاینده در هنگام آلودگی، بسیار حایز اهمیت است. در علوم مهندسی، خاک مخلوط غیر یکپارچه‌ای (سمتته نشده‌ای) از دانه‌های کانی‌ها و مواد آلی فاسد شده‌ای می‌باشد که فضای خالی بین آن‌ها توسط آب و هوا (گازها) اشغال شده است. دانه‌های کانی که تشکیل دهنده‌ی قسمت جامد خاک هستند، از هوازدگی سنگ‌ها به وجود می‌آیند (Das, 2008).

خاک از چهار جزء اصلی هوا، آب، مواد معدنی و مواد آلی تشکیل شده است. نسبت‌های این ۴ مولفه، به صورت بسیار بارزی بر رفتار مهندسی و عملکرد آن در هنگام کشاورزی به لحاظ حاصلخیزی تاثیر می‌گذارد. در یک حجم مشخص از یک نوع خاک، ۴ مولفه‌ی فوق در ۴ الگوی پیچیده با یکدیگر مخلوط می‌شوند. واضح است که بسته به نوع خاک و شرایط موجود و شرایطی که خاک در گذشته تجربه کرده است، سهم هر مولفه تغییر خواهد کرد (Brady, 1974).

ویژگی‌های خاک از نقطه نظر ساختار فضایی (نحوه‌ی قرارگیری ذرات در کنار هم) و فیزیکی آن متغیر است و به اثرات ترکیبی آب و هوا، فعالیت زیستی، مکان‌نگاری (توپوگرافی) و ترکیب معدنی سنگ منشا بستگی دارد. به استثنای خاک‌های آلی که بخش بسیار کمی از خاک‌ها را در بر می‌گیرد، قسمت عمده‌ی مواد خاک، معدنی بوده و از رسوب‌های زمین‌شناختی جامد مشتق شده است. جدول (۱-۲) فرمول شیمیایی کلی مواد معدنی (کانی) موجود در خاک را نشان می‌دهد (Paria, 2008). قسمت معدنی خاک، غالباً بر حسب توزیع اندازه‌ی ذرات آن توصیف می‌گردد. مقادیر نسبی هر یک از این مواد معدنی، خصوصیتی از خاک را تعریف می‌کند که به بافت خاک موسوم است (Winegarddner, 1995). بسیاری از خواص فیزیکی خاک، توسط اندازه، شکل و ترکیبات شیمیایی دانه‌های آن معین می‌شود. دامنه‌ی تغییرات اندازه‌ی دانه‌ها وسیع است. بر حسب اندازه‌ی دانه‌ها، خاک‌ها به صورت معمول با نام‌های شن، ماسه، لای و رس خوانده می‌شوند (Das, 2008).

کانی اولیه	فرمول شیمیایی
کوارتز	SiO_2
فلداسپار اورتو کلیس، میکرو کلازین البیت (پلاژیو کلیس)	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8 \text{ NaAlSi}_3\text{O}_8$
میکا، ماسکویت، بایوتیت	$\text{H}_2\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12} (\text{H}, \text{K})_2 (\text{Mg}, \text{Fe})_2 (\text{Al}, \text{Fe})_2 \text{Si}_3\text{O}_{12}$
فرومگناطیس‌ها، هورن بلند، اولوین، آمفی بولها	$\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{12} (\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4 (\text{Mg}, \text{Fe})_7 (\text{Si}_4\text{O}_{11})_2 (\text{OH})_2$
منیزیم، سیلیکات، سرپنتین	$\text{H}_4\text{Mg}_3\text{SiO}_2\text{O}_3$
فسفات، آپاتیت	$(\text{Ca}_3(\text{PO}_4))_3\text{Ca}(\text{F}, \text{Cl})_2$
کربنات‌ها، کلسیت، دولومیت	$\text{CaCO}_3\text{Ca Mg} (\text{CO})_3$

۲-۲-۲ طبقه بندی خاک

سیستم جامع طبقه‌بندی خاک که به آن رده بندی خاک^۲ می‌گویند، دو ویژگی اصلی دارد که باعث مفیدتر شدن آن می‌گردد. اول، اینکه این سیستم، مبتنی بر خواص خاک است که به آسانی تحقیق می‌گردد. این مسئله، مباحثه بر روی طبقه‌بندی یک نوع خاک مفروض که ممکن است در زمانی که دانشمندان، با سیستم‌های مبتنی بر پیدایش خاک یا مکانیسم‌های تشکیل خاک مواجه هستند رخ دهد را کاهش می‌دهد. ویژگی بارز دوم رده بندی خاک، نام منحصر به فردی است که به کار گرفته می‌شود که یک تعریف ضمنی از مشخصه‌های اصلی خاک‌ها در مسئله ارائه می‌دهد (Brady, 1974).

تا کنون سیستم‌های متعددی برای طبقه بندی خاک‌ها با ویژگی‌های مختلف، پیشنهاد و ارائه گردیده است. در جدول (۲-۲) حدود جدا کننده‌ی اندازه‌ی دانه‌های خاک، توسط چند سازمان مختلف ارائه شده است. در حال حاضر، حدود پیشنهادی توسط سیستم طبقه بندی متحد خاک، متداول‌ترین سیستم طبقه‌بندی خاک است. مطابق با این سیستم طبقه بندی که مورد پذیرش اداره‌ی استاندارد آمریکا (ASTM) نیز می‌باشد، ذرات بزرگتر از $4/75$ میلی‌متر را شن، $4/75$ تا $0/075$ را ماسه و کوچکتر از $0/075$ را لای و رس می‌نامند (Das, 2008).

شن، خرده سنگ همراه با دانه‌هایی از جنس کوارتز، فلداسپار و سایر کانی‌ها و ماسه، دانه‌هایی اکثراً از جنس کوارتز و فلداسپار می‌باشد. لای، ذرات ریز خاک است که از دانه‌های بسیار ریز کوارتز و ذرات پولکی شکل حاصل از متلاشی شدن کانی‌های میکادار تشکیل می‌گردد و رس نیز ذرات بسیار ریز پولکی شکل میکا، کانی‌های رس و سایر کانی‌ها می‌باشد (Das, 2008).

ذرات کوچک تر رس‌ها (<0.001 میلی‌متر) و ذرات مواد آلی با اندازه‌ی مشابه، خواص کلوئیدی دارند و تنها با کمک میکروسکوپ الکترونی دیده می‌شوند. به دلیل اندازه‌ی بسیار کوچک آن‌ها، ذرات کلوئیدی، میزان بسیار بزرگی از مساحت سطح بر واحد جرم را اشغال می‌کنند. سیستم‌های کلوئیدی، سیستم‌های دوفازی از ذرات خیلی کوچک از یک ماده هستند که در یک محیط از یک ماده‌ی متفاوت پراکنده می‌شوند. ذرات رس و خاک آلی کوچک‌تر از $0/001$ میلی‌متر (1 میکرومتر) در قطر، به طور کلی از لحاظ سائز، کلوئیدی در نظر گرفته می‌شوند. از آنجایی که سطح ذرات کلوئیدی خاک (هر دوی ذرات کلوئیدی معدنی و آلی)، دارای بارهای الکترومغناطیسی

² Soil Classification

هستند که یون‌های مثبت و منفی را جذب می‌کنند، این جزء خاک، در مرکز بیشترین فعالیت فیزیکی و شیمیایی خاک قرار دارد. به منظور پیش‌بینی اثر رس‌ها بر نوع رفتاری که از خاک بروز می‌یابد، تنها دانستن میزان کمی رس در یک خاک کافی نیست. برای اینکار نیاز است که انواع کانی‌های موجود رس در خاک نیز مشخص شود.

لازم به ذکر است که ذراتی که بر حسب اندازه در طبقه‌ی رس‌ها قرار می‌گیرند، لزوماً شامل کانی‌های رس نمی‌شوند. از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک، رس‌ها ذراتی تعریف می‌شوند که اگر با مقدار محدودی آب مخلوط گردند، خاصیت خمیری از خود نشان می‌دهند. بنابراین مناسب است که ذرات خاکی که فقط از نقطه نظر اندازه، در رده‌ی رس‌ها قرار می‌گیرند، به جای رس، ذرات با اندازه‌ی رسی نامیده می‌شوند.

کانی‌های رس، سیلیکات‌های آلومینیوم بسیار پیچیده‌ای می‌باشند که از یکی از دو واحد پایه‌ی چهاروجهی سیلیکا و هشت وجهی آلومینا تشکیل یافته‌اند. وقتی کانی‌های رسی در خاک‌های ریزدانه ظاهر شود، با مرطوب کردن، خاک، حالت خمیری به خود می‌گیرد و آن را می‌توان بدون خرد شدن شکل داد. این خاصیت چسبندگی، به علت آب جذب شده‌ای است که ذرات رس را احاطه کرده است (Das, 2008).

جدول ۲-۲ حدود جدا کننده‌ی اندازه‌ی خاک (Das, 2008)

اندازه دانه‌ها				
نام سازمان	شن	ماسه	لای	رس
انستیتو تکنولوژی ماساچوست آمریکا	< ۲	۲ تا ۰/۰۶	۰/۰۶ تا ۰/۰۰۲	< ۰/۰۰۲
سازمان کشاورزی آمریکا	< ۲	۲ تا ۰/۰۵	۰/۰۵ تا ۰/۰۰۲	< ۰/۰۰۲
انجمن ادارات راه و ترابری آمریکا	۲ تا ۷۶/۲	۲ تا ۰/۰۷۵	۰/۰۷۵ تا ۰/۰۰۲	< ۰/۰۰۲
سیستم طبقه بندی متحد	۷۶/۲ تا ۴/۷۵	۰/۰۷۵ تا ۴/۷۵	ریزدانه‌ها < ۰/۰۷۵	

در سیستم جامع طبقه بندی خاک، اختصاص یک نام متحد به یک نوع خاک بر مبنای عوامل مختلفی صورت می‌گیرد که خواص فیزیکی خاک، نظیر اندازه‌ی ذرات، مهم‌ترین آن است. البته رفتار خاک در هنگام جذب آب نیز که به هر دوی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک وابسته است، در این فرآیند، بسیار تاثیر گذار است (Brady, 1974). لذا نیاز است که گذاری اجمالی بر مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک ارائه گردد.

۳-۲ خواص فیزیکی خاک

خواص فیزیکی خاک، به صورت بسیار بارزی بر روی چگونگی عملکرد خاک تاثیر گذار است. موفقیت یا شکست پروژه‌های مهندسی و کشاورزی، اغلب به خواص فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده، بستگی دارد. دانش خواص فیزیکی خاک، ارزش عملی بسیار زیادی دارد و به درک بسیاری از جنبه‌های دیگر رفتار خاک خواهد انجامید. ساختار خاک به عنوان مهمترین خاصیت فیزیکی، طریقه‌ی قرار گرفتن و آرایش ذرات خاک در کنار یکدیگر را تشریح می‌کند. بنابراین، خواص فیزیکی خاک، طبیعت سیستم منافذ و مجراهای عبور مایع در یک نوع خاک مفروض را بیان می‌کند. ماده‌ی آلی به عنوان عامل چسبندگی بین ذرات منفرد عمل می‌کند که تشکیل clump ها یا توده شدن خاک را تحصیل می‌کند. بافت و ساختار خاک‌ها در خاک‌های ریزدانه و درشت دانه متفاوت است و البته به دلایل متعددی بستگی دارد. لذا، شایسته است که با گذری بر مشخصات و حالت‌های مختلف بافت و

ساختمان خاک‌ها در دو حالت درشت دانه و ریزدانه، به جهت درک بهتر و شناخت دقیق‌تر ساختار خاک‌ها، توضیحاتی ارائه گردد.

۲-۳-۱ بافت و ساختار خاک‌ها

۲-۳-۱-۱ خاک‌های غیر چسبنده

دو نوع ساختار مهم در خاک‌های غیر چسبنده وجود دارد: ۱- ساختار تک دانه‌ای^۳ و ۲- ساختار لانه زنبوری^۴. در ساختار تک دانه‌ای، در توده‌ی ذرات در حال تعادل، هر ذره‌ی خاک، در تماس با ذرات مجاور خود می‌باشد. شکل و دانه‌بندی ذرات خاک و وضعیت نسبی آن‌ها، در تراکم و در نتیجه رفتار آن‌ها در مقابل برش و نشست موثر است. در ساختار لانه زنبوری، ذرات ماسه و لای نسبتاً ریزدانه، با تشکیل زنجیره‌ای از ذرات، تشکیل قوس‌های کوچکی می‌دهند. خاک‌های با این شرایط، دارای نسبت تخلخل نسبتاً بزرگ هستند. رفتار خاک‌های غیر چسبنده، صرفاً با در نظر گرفتن نیروهای فیزیکی بین ذرات و ساختار آن‌ها تفسیر می‌گردد و واکنش‌های شیمیایی بین سیال منفذی و دانه‌ها، تأثیری در تغییر رفتار آن‌ها ندارد (Das, 2008).

۲-۳-۱-۲ خاک‌های چسبنده

برای فهم ساختار پایه در خاک‌های چسبنده، باید از یک سو نیروهای متقابل بین ذرات رسی و از سوی دیگر، نیروهای متقابل بین ذرات رسی و آلایندگی مورد نظر را بررسی کرد. بار منفی موجود در سطح ذرات کانی‌های رسی و لایه‌ی مضاعف احاطه کننده‌ی هر ذره (در صورت مرطوب بودن خاک)، نقش بسیار تأثیرگذاری را در هنگام آلودگی نمونه ایفا می‌کند. وقتی که دو ذره‌ی رس در هنگام آلودگی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، یک نیروی جاذبه‌ی واندروالس بین ذرات رس وجود دارد که مستقل از مشخصه‌های آلایندگی و آب است. به دلیل اینکه سیال آلایندگی مورد نظر در این پژوهش، قطبی نیست، بنابراین مکانیسمی که در تشکیل لایه مضاعف پراکنده در مورد واکنش آب با رس‌ها وجود دارد، رخ نخواهد داد. لذا انتظار تفاوت در نتایج آزمایش‌ها، به تفاوت در میزان رطوبت موجود در نمونه‌ها و شدت نیروی جاذبه بین رس‌ها از حیث توانایی تشکیل پیوند هیدروژنی و جاذبه واندروالس در سیستم رس-آب-آلایندگی برمی‌گردد.

خاک‌های رسی به دلیل نیروی سطحی ذرات، رفتاری متفاوت نسبت به خاک‌های بدون چسبندگی دارند. در حالی که ماده‌ی شیمیایی سیال منفذی، تأثیر کمی روی ماسه‌ها دارد، خواص مهندسی خاک‌های رسی، به صورت قابل ملاحظه‌ای، وابسته به خواص فیزیکی - شیمیایی سیال‌های منفذی آن‌هاست. به طور کلی، عوامل تأثیرگذار بر روی رفتار مهندسی خاک‌های رسی عبارتند از:

- مشخصه‌های ترکیبی کانی رس شامل چگالی بار منفی سطحی، سطح مخصوص و ضخامت و طول ذرات.
- مشخصه‌های ترکیبی سیال منفذی شامل ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی و ظرفیت و تمرکز الکترولیت، آرایش قرارگیری ذرات یا بافت خاک (Zhao, 1996).

³ Single grained

⁴ Honey combed

۴-۲ کانی‌های رسی و انواع آن‌ها

۱-۴-۲ منشأ پیدایش

در هنگام بارش باران، آب باران (H_2O) با گاز کربنیک (CO_2) و سایر گازهای موجود در هوا ترکیب شده و منجر به تولید اسیدهایی از قبیل اسید کربنیک (H_2CO_3) می‌گردد. این اسیدها در سنگ‌ها از طریق درزها و شکاف‌ها رسوخ نموده و به مرور زمان باعث تخریب و تجزیه‌ی آن‌ها می‌گردد (طباطبایی، ۱۳۶۴). این تخریب شیمیایی به تغییر در شکل کانی‌های سنگ مادر به دلیل عمل آب (به خصوص، اگر آن شامل خاصیت اسیدی یا قلیایی باشد)، اکسیژن و یا دی‌اکسید کربن منجر می‌شود. نتیجه‌ی این تخریب شیمیایی در سنگ‌ها، پیدایش ذرات ریز بلوری به اندازه‌ی ذرات کلوئیدی (کوچکتر از 0.002 میلی‌متر یا 2 میکرون) است که کانی‌های رسی نامیده می‌شوند (Craig, 1995). شکل (۱-۲)، نشان‌دهنده‌ی حالت‌های مختلف قرارگیری ذرات کانی‌های رسی در کنار یکدیگر است که منجر به پیدایش ساختارهای مختلف خاک‌های رسی می‌گردد. بیشتر ذرات کانی‌های رسی، دارای شکل صفحه‌ای هستند که سطح ویژه‌ی بالایی (نسبت مساحت به جرم بالا) دارند. ذرات سوزنی شکل بلند نیز می‌توانند وجود داشته باشند. اما در مقایسه با کثرت ذرات صفحه‌ای شکل، به ندرت اتفاق می‌افتد. رس‌ها بر اساس ساختمان کریستالی، به سه گروه عمده تقسیم می‌شوند که عبارتند از: کائولینیت، ایلیت و مونت موریلونیت. در جدول (۳-۲)، این گروه‌ها به همراه مهمترین کانی‌های آن‌ها آورده شده است (Murthy, 2008).

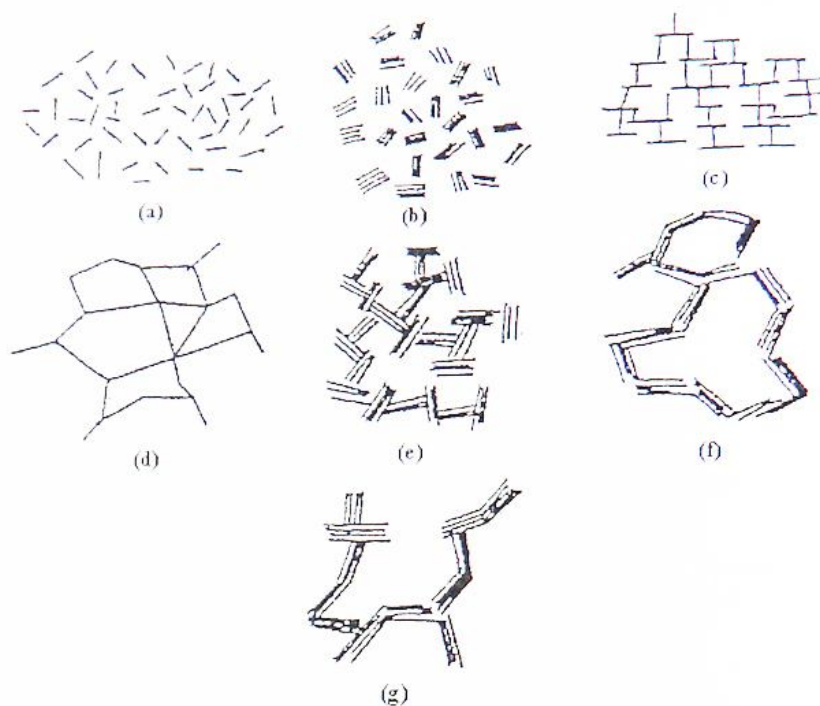
۲-۴-۲ ترکیب و خواص شیمیایی رس‌ها

واحدهای اصلی ساختاری بیشتر کانی‌های رسی، یک واحد چهار وجهی سیلیکا و هشت وجهی آلومینا هستند که در شکل (۲-۲) آورده شده‌اند. مطابق شکل (۳-۲)، ترکیب واحدهای چهار وجهی سیلیکا، تولید یک ورقه‌ی سیلیکا می‌کند. همچنین، همانگونه که در شکل (۴-۲) نشان داده شده است، ترکیب واحدهای هشت وجهی‌های آلومینیوم هیدروکسیل، تولید یک ورقه‌ی هشت وجهی می‌کند. این ورقه، ورقه‌ی گیسیت نامیده می‌شود (Das, 2008).

کانی‌های رسی از ترکیب ورقه‌های سیلیکا و گیسیت به وجود می‌آیند.

۱-۲-۴-۲ انواع کانی‌های رسی

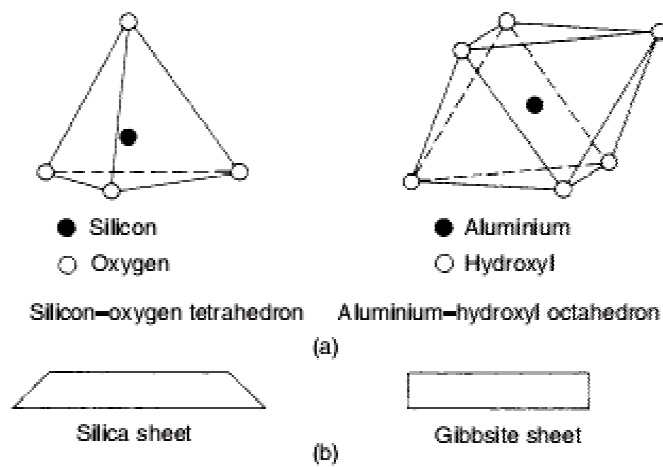
کانی‌های رس، که فرآورده‌هایی از هوازدگی شیمیایی فلداسپات‌ها، فرومنیزین‌ها و میکاها هستند، کانی‌هایی هستند که ظهور آن‌ها در خاک، باعث خواص خمیری می‌شود. به منظور آشنایی بیشتر با خواص مهم‌ترین کانی‌های رسی که قبلاً در جدول (۳-۲) به آن اشاره شده است، توضیحاتی در ادامه آورده شده است.



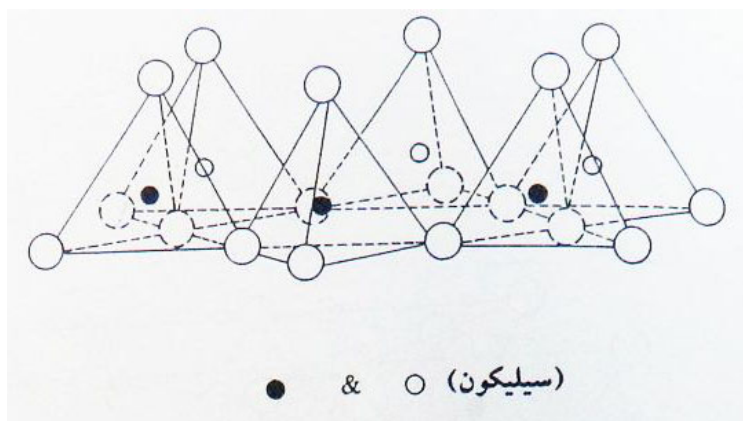
شکل ۱-۲ حالات اجتماع ذرات در کانی‌های رس؛ (a) واگرا و انعقاد نیافته؛ (b) توده‌ای اما انعقاد یافته؛ (c) لبه به ضلع انعقاد یافته اما واگرا؛ (d) لبه به لبه‌ی انعقاد یافته اما واگرا؛ (e) لبه به ضلع انعقاد یافته و توده‌ای؛ (g) لبه به ضلع و لبه به لبه‌ی انعقاد یافته و توده‌ای (Van Olphen, 1977)

جدول ۳-۲ کانی‌های رسی (Murthy, 2008)

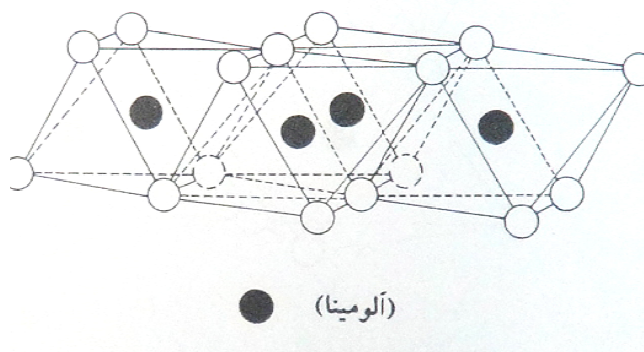
نام کانی	فرمول ساختاری
۱- گروه کائولینیت	
a- کائولینیت	$\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
b- هالوسیت	$\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_6(\text{OH})_{16}$
۲- گروه ایلیت	
ایلیت	$\text{K}_y(\text{Al}_4\text{Fe}_2.\text{Mg}_4.\text{Mg}_6)\text{Si}_{8-y}\text{Al}_y(\text{OH})_4\text{O}_{20}$
۳- گروه مونت موریلونیت	
مونت موریلونیت	$\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4n\text{H}_2\text{O}$



شکل ۲-۲ واحدهای اصلی کانی‌های رسی (Craig, 1995)



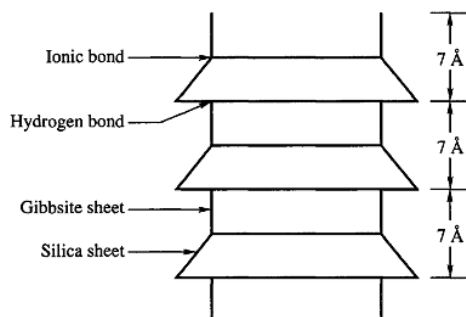
شکل ۲-۳ ورقه چهار وجهی (سیلیکا) (Das, 2008)



شکل ۲-۴ ورقه‌ی هشت وجهی (گیبسیت) (Das, 2008)

الف) کائولینیت

معمول‌ترین کانی گروه کائولین، کائولینیت است. بلوک‌های ساختاری گیسیت و صفحه‌های سیلیکا، ساختمان کائولینیت را مشخص می‌کنند. پیوندهای یونی قوی بین صفحه‌های سیلیکا و گیسیت وجود دارد و پیوند هیدروژنی، عامل اتصال بین دو لایه‌ی تشکیل دهنده‌ی ساختار کانی به یکدیگر است (شکل ۲-۵). در کانی‌های رسی، جانشینی ایزو مرفیک به میزان بسیار کمی وجود دارد (Murthy, 2008). پایدار ماندن پیوند هیدروژنی در حضور آب، کائولینیت را از حیث خصوصیات شکل پذیری، چسبندگی و تورم و انقباض، در مرتبه‌ی پایینی قرار می‌دهد. سطح مخصوص ذرات کائولینیت در حدود $15 \text{ m}^2/\text{g}$ است (Mitchel, 2005).



شکل ۲-۵ ساختار لایه‌ی کائولینیت (Craig, 1995)

ب) مونت موریلونیت

مونت موریلونیت، معمول‌ترین کانی گروه مونت موریلونیت است. آرایش ساختمانی این کانی، از دو ورقه‌ی چهار وجهی سیلیکا با یک ورقه‌ی هشت وجهی آلومین مرکزی تشکیل شده است. ضخامت یک واحد سیلیکا-گیسیت-سیلیکا در حدود ۱۰ آنگستروم است (شکل ۲-۶). آب می‌تواند بین صفحات وارد شود و باعث گردد آن‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ای منبسط گردند و بنابراین ساختار می‌تواند به واحدهای ساختاری با ضخامت ۱۰ آنگستروم شکسته شود. خاک‌هایی که دارای میزان قابل ملاحظه‌ای از کانی مونت موریلونیت هستند، شاخصه‌های انقباضی و تورمی بالایی را از خود به نمایش می‌گذارند. ابعاد جانبی ذرات مونت موریلونیت از ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ آنگستروم متغیر است و ضخامت آن نیز از ۱۰ تا ۵۰ آنگستروم تغییر می‌کند. در مونت موریلونیت، جانشینی ایزو مرفیک منیزیم و آهن با آلومینیوم وجود دارد (Murthy, 2008). پیوند ضعیف واندروالسی، عامل اتصال بین کانی‌های مونت موریلونیت است. پیوند واندرولسی به راحتی توسط مولکول‌های آب و یون‌های قطبی شکسته می‌گردد و همانطور که در بالا اشاره گردید، کانی‌های مونت موریلونیت می‌توانند از همدیگر جدا گردند. سطح مخصوص ذرات مونت موریلونیت در حدود $800 \text{ m}^2/\text{g}$ است.