



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد عمران

گرایش خاک و پی

بررسی روش‌های مختلف تثبیت خاک برای خاک‌های آلوده به گازوئیل

نگارش:

محمدرضا طبائیان

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم‌زاده



چکیده

آلودگی خاک‌ها و منابع آب زیرزمینی با آلاینده‌های نفتی، علاوه بر مشکلاتی که برای محیط زیست ایجاد می‌کنند، سبب تغییر مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌ها نیز می‌شوند. روش‌های مختلفی برای پاک‌سازی و اصلاح این آلاینده‌ها ابداع شده است. یکی از این روش‌ها، روش تثبیت خاک است که علاوه بر داشتن توانایی در حذف و به دام اندازی آلاینده‌ها، بر روی مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌ها نیز تأثیر مثبت دارد.

با توجه به این‌که تاکنون به بررسی تأثیر این روش بر روی مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های نفتی به‌طور دقیق پرداخته نشده است، در این پایان‌نامه سعی شده که تأثیر تثبیت‌کننده‌های مختلف بر روی مشخصات مقاومتی خاک‌های ریزدانه رسی آلوده به گازوئیل بررسی شود. با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم، تأثیر مواد افزودنی نظیر آهک، سیمان، خاکستر پسته‌ی برنج و متراکم‌کننده‌ی رینولدز^۱ بر روی مقاومت تک‌محوری و پارامترهای مقاومت برشی این خاک‌ها بررسی شده است. خاک ریزدانه کائولینیت با درصدهای مختلف آلاینده مخلوط شده و به مدت ۲۴ ساعت به‌منظور جذب آلاینده نگهداری شد. سپس خاک آلوده با درصدهای مختلف از مواد تثبیت‌کننده و آب ترکیب شده و قبل از انجام آزمایش به مدت ۷ روز عمل‌آوری شد.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش آلاینده تا ۱۰ درصد، مقاومت تک‌محوره، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک خاک تثبیت‌شده با آهک و خاکستر پسته‌ی برنج کاهش، مقاومت تک‌محوره و چسبندگی خاک تثبیت‌شده با سیمان افزایش و زاویه اصطکاک آن کاهش می‌یابد. افزایش آلاینده تا ۲۰ درصد در تمامی حالات باعث کاهش مقاومت تک‌محوره، چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک خاک‌های تثبیت‌شده شد.

کلمات کلیدی: آلودگی خاک، تثبیت خاک، آهک، سیمان، خاکستر پسته‌ی برنج، متراکم‌کننده‌ی رینولدز

¹ Reynolds Road Packer

فهرست مطالب

فصل اول: پیشگفتار.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- ضرورت انجام پژوهش.....	۶
۳-۱- هدف از انجام پژوهش.....	۷
۴-۱- ساختار پایان نامه.....	۸
فصل دوم: مبانی تئوری و مروری بر تحقیقات پیشین.....	۹
۱-۲- مقدمه.....	۱۰
۲-۲- خاک.....	۱۰
۱-۲-۲- کانی های رسی.....	۱۱
۲-۲-۲- ظرفیت تبادل کاتیونی.....	۱۵
۳-۲-۲- لایه ی دوگانه.....	۱۵
۴-۲-۲- سطح مخصوص خاک.....	۱۶
۳-۲- آلاینده های خاک.....	۱۷
۱-۳-۲- آلاینده های غیر آلی (معدنی) خاک.....	۱۷
۲-۳-۲- آلاینده های آلی خاک.....	۱۸
۳-۳-۲- نفت خام.....	۱۹
۴-۳-۲- گازوئیل.....	۲۱
۴-۲- مکانیسم آلودگی.....	۲۳
۵-۲- آهک.....	۲۴
۱-۵-۲- واکنش های شیمیایی آسیب رسان.....	۲۹
۶-۲- سیمان.....	۳۰
۷-۲- خاکستر پسته ی برنج (RHA).....	۳۵
۸-۲- متراکم کننده ی خاک رینولدز (RRP-235 Special).....	۳۹

۴۵	۹-۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین.....
۴۵	۱-۹-۲- مطالعات انجام‌شده بر روی مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده.....
۵۴	۲-۹-۲- مطالعات انجام‌شده بر روی مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های تثبیت‌شده.....
۵۴	۱-۲-۹-۲- آهک و سیمان.....
۶۱	۲-۲-۹-۲- RHA.....
۶۶	۳-۲-۹-۲- RRP.....
۶۷	۳-۹-۲- مطالعات انجام‌شده بر روی مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده تثبیت‌شده.....
۶۸	۱۰-۲- جمع‌بندی.....
۷۰	فصل سوم: روش تحقیق.....
۷۱	۱-۳- مقدمه.....
۷۱	۲-۳- خاک مورد استفاده.....
۷۱	۳-۳- آلاینده‌ی مورد استفاده.....
۷۲	۴-۳- تثبیت‌کننده‌های استفاده شده.....
۷۳	۵-۳- نحوه آلوده کردن خاک‌ها.....
۷۳	۶-۳- نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه‌های غیر آلوده و آلوده.....
۷۴	۷-۳- نحوه‌ی آماده‌سازی نمونه‌های تثبیت‌شده.....
۷۶	۸-۳- مشخصات خاک مورد استفاده.....
۷۷	۹-۳- دستورالعمل انجام آزمایش‌ها.....
۷۷	۱-۹-۳- آزمایش تراکم.....
۸۰	۲-۹-۳- آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (تک‌محوری).....
۸۱	۳-۹-۳- آزمایش برش مستقیم.....
۸۴	فصل چهارم: نتایج تحقیق و بررسی آن‌ها.....
۸۵	۱-۴- مقدمه.....
۸۵	۲-۴- مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح و مواد استفاده شده.....

۸۵.....	۴-۲-۱- خاک
۸۶.....	۴-۲-۲- افزودنی‌های تثبیت‌کننده
۸۷.....	۴-۳- آزمایش تراکم
۸۸.....	۴-۴- آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (تک‌محوری)
۸۹.....	۴-۴-۱- تأثیر افزایش آلاینده بر نتایج آزمایش‌های تک‌محوری
۹۰.....	۴-۴-۲- تأثیر افزایش آهک بر نتایج آزمایش‌های تک‌محوری خاک‌ها
۹۵.....	۴-۴-۳- تأثیر افزایش سیمان بر نتایج آزمایش‌های تک‌محوری خاک‌ها
۹۸.....	۴-۴-۴- تأثیر افزایش RHA بر نتایج آزمایش‌های تک‌محوری خاک‌ها
۱۰۱.....	۴-۴-۵- تأثیر افزایش RRP بر نتایج آزمایش‌های تک‌محوری خاک‌ها
۱۰۲.....	۴-۵- آزمایش برش مستقیم
۱۰۲.....	۴-۵-۱- تأثیر افزایش گازوئیل بر نتایج آزمایش‌های برش مستقیم
۱۰۴.....	۴-۵-۲- تأثیر افزایش آهک بر نتایج آزمایش‌های برش مستقیم
۱۰۶.....	۴-۵-۳- تأثیر افزایش سیمان بر نتایج آزمایش‌های برش مستقیم
۱۰۹.....	۴-۵-۴- تأثیر افزایش RHA بر نتایج آزمایش‌های برش مستقیم
۱۱۱.....	۴-۵-۵- تأثیر افزایش RRP بر نتایج آزمایش‌های برش مستقیم
۱۱۲.....	۴-۶- جمع‌بندی
۱۱۴.....	فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات
۱۱۵.....	۵-۱- مقدمه
۱۱۵.....	۵-۲- نتایج
۱۱۷.....	۵-۳- پیشنهادات
۱۱۹.....	مراجع:

فهرست جداول

جدول ۱-۲- مقادیر عناصر شیمیایی موجود در نفت	۱۹
جدول ۲-۲- مقادیر هیدروکربن‌های موجود در نفت خام	۲۰
جدول ۳-۲- مقادیر سیمان پیشنهادی در تثبیت خاک‌ها	۳۲
جدول ۴-۲- ترکیب شیمیایی موردی خاکستر پوسته برنج به‌دست‌آمده در کشورهای مختلف	۳۷
جدول ۵-۲- مقادیر پیشنهاد شده RRP	۴۴
جدول ۶-۲- تأثیر مواد تثبیت‌کننده بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری و مشخصات تراکم خاک	۶۷
جدول ۱-۳- آزمایش‌های شناسایی مشخصات فیزیکی خاک	۷۶
جدول ۲-۳- برنامه آزمایش‌های تراکم انجام شده	۷۹
جدول ۳-۳- برنامه آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده انجام شده	۸۱
جدول ۴-۳- برنامه آزمایش‌های برش مستقیم انجام شده	۸۳
جدول ۱-۴- مشخصات فیزیکی خاک	۸۵
جدول ۲-۴- آنالیز شیمیایی خاک	۸۵
جدول ۳-۴- آنالیز شیمیایی آهک مصرفی	۸۶
جدول ۴-۴- آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی	۸۶
جدول ۵-۴- آنالیز شیمیایی RHA مصرفی	۸۶
جدول ۶-۴- حداکثر وزن مخصوص خشک به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تراکم روی خاک تثبیت‌شده با RRP	۸۸
جدول ۷-۴- تأثیر RRP بر روی مقاومت فشاری محصور نشده خاک‌های غیر آلوده و آلوده	۱۰۱
جدول ۸-۴- تأثیر RRP بر روی چسبندگی خاک‌های غیر آلوده و آلوده	۱۱۱
جدول ۹-۴- تأثیر RRP بر روی زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های غیر آلوده و آلوده	۱۱۲

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- نتایج میزان حضور آلاینده‌ها در خاک و آب‌های زیرزمینی ۲۷ کشور اروپایی ۲
- شکل ۲-۱- تهران-شهرری-روستای درسون آباد-زمین‌های کشاورزی غرق در نفت ۴
- شکل ۳-۱- نتایج آزمایش‌های oil مخازن ذخیره‌ی فاضلاب خشک و تر ورودی به چاله‌های سوزان با ۳ تکرار زمانی ۵
- شکل ۱-۲- نسبت حجمی اجزای خاک ۱۰
- شکل ۲-۲- ساختار چهاروجهی ۱۲
- شکل ۳-۲- ساختار هشت‌وجهی ۱۳
- شکل ۴-۲- ساختار پایه و لایه‌های کائولینیت ۱۳
- شکل ۵-۲- ساختار مونت موریلونیت ۱۴
- شکل ۶-۲- ساختار ایلیت ۱۵
- شکل ۷-۲- لایه‌ی دوگانه ۱۶
- شکل ۸-۲- تبادل کاتیونی ۲۶
- شکل ۹-۲- توده‌ای شدن و مجتمع شدن خاک تثبیت شده ۲۶
- شکل ۱۰-۲- تغییرات مقاومت فشاری محصور نشده با افزایش آهک ۲۹
- شکل ۱۱-۲- هیدراتاسیون سیمان ۳۱
- شکل ۱۲-۲- ترکیبات چسبنده ایجاد شده در تثبیت خاک با سیمان ۳۲
- شکل ۱۴-۲- تغییرات واکنشپذیری با آهک برحسب نرخ افزایش دما ۳۸
- شکل ۱۵-۲- تصویر SEM گرفته شده از خاکستر حاصل از احتراق پوسته معمولی ۳۹
- شکل ۱۶-۲- انواع آب‌های موجود در خاک‌های ریزدانه ۴۲
- شکل ۱۷-۲- تبادل یونی در سطح کلئیدها با افزودن RRP ۴۳
- شکل ۱۸-۲- تأثیر RRP بر روی حرکت کاپیلاری خاک‌ها ۴۴
- شکل ۱۹-۲- تأثیر مقدار نفت بر روی پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های خاک ۴۵
- شکل ۲۰-۲- تأثیر مقدار نفت بر روی مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه CL ۴۶
- شکل ۲۱-۲- تأثیر آلودگی بر روی چسبندگی زهکشی نشده ۴۷
- شکل ۲۲-۲- تأثیر آلاینده بر روی چسبندگی خاک ریزدانه ۴۸
- شکل ۲۳-۲- تأثیر آلاینده بر روی زاویه‌ی اصطکاک خاک ریزدانه ۴۹
- شکل ۲۴-۲- تغییرات شاخص فشار و تورم خاک آلوده با مدت زمان آلودگی ۴۹

- شکل ۲-۲۵- تغییرات ضریب تحکیم با مدت زمان آلودگی ۵۰
- شکل ۲-۲۶- مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده با مدت زمان آلودگی ۵۰
- شکل ۲-۲۷- تأثیر افزایش گازوئیل بر روی چسبندگی کائولینیت ۵۰
- شکل ۲-۲۸- تأثیر افزایش گازوئیل بر روی زاویه اصطکاک کائولینیت ۵۱
- شکل ۲-۲۹- تأثیر افزایش گازوئیل بر مقاومت برشی زهکشی نشده گازوئیل ۵۱
- شکل ۲-۳۰- تأثیر گازوئیل بر روی چسبندگی خاک ۵۲
- شکل ۲-۳۱- تأثیر گازوئیل بر روی زاویه اصطکاک خاک ۵۲
- شکل ۲-۳۲- تأثیر آلودگی بر روی مقاومت فشاری محصور نشده ۵۳
- شکل ۲-۳۳- تأثیر آلاینده بر روی CBR خاک ریزدانه ۵۳
- شکل ۲-۳۴- تغییرات حدود اتربرگ خاک‌های ریزدانه با افزایش آهک ۵۵
- شکل ۲-۳۵- تأثیر ۴ درصد آهک و سیمان بر روی مقاومت برشی خاک رسی ۵۵
- شکل ۲-۳۶- تأثیر آهک و سیمان بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاک‌های رسی و سیلتی ۵۶
- شکل ۲-۳۷- تأثیر آهک و پوزولان بر روی مشخصات تراکم خاک ۵۷
- شکل ۲-۳۸- تأثیر آهک و پوزولان بر روی چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک ۵۷
- شکل ۲-۳۹- تأثیر آهک و عمل‌آوری بر روی پارامترهای مقاومت برشی خاک ریزدانه ۵۸
- شکل ۲-۴۰- تأثیر زمان عمل‌آوری و رطوبت بر روی مقاومت برشی خاک تثبیت‌شده با آهک ۵۸
- شکل ۲-۴۱- تأثیر آهک بر روی CBR و تورم خاک رسی ۵۹
- شکل ۲-۴۲- تأثیر آهک و سیمان بر روی مقاومت فشاری محصور نشده خاک رسی ۵۹
- شکل ۲-۴۳- تأثیر آهک و سیمان بر روی CBR خاک متورم شونده ۶۰
- شکل ۲-۴۴- تأثیر آهک و سیمان بر روی چسبندگی خاک متورم شونده ۶۰
- شکل ۲-۴۵- تأثیر رطوبت و زمان عمل‌آوری بر روی مقاومت فشاری محصورشده خاک تثبیت‌شده با سیمان ۶۱
- شکل ۲-۴۶- تأثیر سیمان و RHA بر روی حداکثر وزن مخصوص خشک خاک ۶۱
- شکل ۲-۴۷- تأثیر سیمان و RHA بر روی مقاومت فشاری محصور نشده خاک ۶۲
- شکل ۲-۴۸- تأثیر RHA بر روی مقاومت فشاری محصور نشده خاک ۶۲
- شکل ۲-۴۹- تأثیر RHA بر روی CBR خاک ۶۳
- شکل ۲-۵۰- تأثیر RHA و آهک بر روی چسبندگی خاک ۶۳
- شکل ۲-۵۱- تأثیر RHA و آهک بر روی زاویه اصطکاک خاک ۶۴

- شکل ۵۲-۲- تأثیر خاکستری بادی و RHA بر روی مقاومت فشاری تک‌محوری خاک ۶۵
- شکل ۵۳-۲- تأثیر RHA بر روی چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک ۶۶
- شکل ۵۴-۲- تأثیر مواد تثبیت‌کننده بر روی چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک آلوده ۶۸
- شکل ۱-۳- خاکستر پوسته‌ی برنج..... ۷۲
- شکل ۲-۳- RRP..... ۷۳
- شکل ۳-۳- خاک آلوده شده ۷۴
- شکل ۴-۳- عمل‌آوری نمونه‌ها در داخل آون..... ۷۶
- شکل ۵-۳- نمونه‌ی شکسته شده آزمایش تک‌محوری ۸۱
- شکل ۶-۳- نمونه‌های برش مستقیم آماده شده جهت عمل‌آوری..... ۸۲
- شکل ۷-۳- نمونه آماده شده جهت شروع آزمایش برش مستقیم..... ۸۳
- شکل ۱-۴- منحنی دانه‌بندی کائولینیت..... ۸۶
- شکل ۲-۴- منحنی‌های تراکم خاک غیر آلوده و آلوده به ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی خشک خاک گازوئیل..... ۸۷
- شکل ۳-۴- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های آلوده..... ۸۹
- شکل ۴-۴- اثر آلاینده گازوئیل بر روی مقاومت فشاری محصور نشده..... ۹۰
- شکل ۵-۴- اثر رطوبت بر روی مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های غیر آلوده تثبیت‌شده با آهک ۹۱
- شکل ۶-۴- اثر رطوبت بر روی مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های آلوده به ۵٪ گازوئیل تثبیت‌شده با آهک ۹۱
- شکل ۷-۴- اثر رطوبت بر روی مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های آلوده به ۱۰٪ گازوئیل تثبیت‌شده با آهک ۹۱
- شکل ۸-۴- اثر رطوبت بر روی مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های آلوده به ۲۰٪ گازوئیل تثبیت‌شده با آهک ۹۲
- شکل ۹-۴- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های غیر آلوده دارای ۱۰٪ رطوبت..... ۹۲
- شکل ۱۰-۴- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های آلوده به ۵٪ گازوئیل و دارای ۱۰٪ رطوبت ۹۳
- شکل ۱۱-۴- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های آلوده به ۱۰٪ گازوئیل و دارای ۱۰٪ رطوبت ۹۳
- شکل ۱۲-۴- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های آلوده به ۲۰٪ گازوئیل و دارای ۱۰٪ رطوبت ۹۳
- شکل ۱۳-۴- تأثیر آلاینده و آب بر روی مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک ۹۴
- شکل ۱۴-۴- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های غیر آلوده دارای ۱۰٪ رطوبت ۹۶

- شکل ۴-۱۵- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های آلوده به ۵٪ گازوئیل و دارای ۱۰٪ رطوبت ۹۶
- شکل ۴-۱۶- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های آلوده به ۱۰٪ گازوئیل و دارای ۱۰٪ رطوبت ۹۶
- شکل ۴-۱۷- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های آلوده به ۲۰٪ گازوئیل و دارای ۱۰٪ رطوبت ۹۷
- شکل ۴-۱۸- تأثیر آلاینده و آب بر روی مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان ۹۷
- شکل ۴-۱۹- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های غیر آلوده دارای ۱۰٪ رطوبت ۹۹
- شکل ۴-۲۰- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های آلوده به ۵٪ گازوئیل و دارای ۱۰٪ رطوبت ۹۹
- شکل ۴-۲۱- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های آلوده به ۱۰٪ گازوئیل و دارای ۱۰٪ رطوبت ۹۹
- شکل ۴-۲۲- نمودار مقاومت فشاری محصور نشده در مقابل کرنش محوری برای نمونه‌های آلوده به ۲۰٪ گازوئیل و دارای ۱۰٪ رطوبت ۱۰۰
- شکل ۴-۲۳- تأثیر آلاینده بر روی نمونه‌های تثبیت‌شده با RHA ۱۰۰
- شکل ۴-۲۴- تأثیر میزان آلاینده بر روی مقاومت برشی در تنش‌های نرمال مختلف ۱۰۲
- شکل ۴-۲۵- تأثیر آلاینده بر روی چسبندگی خاک کائولینیت ۱۰۳
- شکل ۴-۲۶- تأثیر آلاینده بر روی زاویه‌ی اصطکاک خاک کائولینیت ۱۰۴
- شکل ۴-۲۷- تأثیر آلاینده بر روی مقاومت برشی خاک تثبیت‌شده با ۱٪ آهک ۱۰۴
- شکل ۴-۲۸- تأثیر آلاینده بر روی مقاومت برشی خاک تثبیت‌شده با ۳٪ آهک ۱۰۵
- شکل ۴-۲۹- تأثیر آلاینده بر روی مقاومت برشی خاک تثبیت‌شده با ۵٪ آهک ۱۰۵
- شکل ۴-۳۰- تأثیر آلاینده بر روی چسبندگی خاک تثبیت‌شده با آهک ۱۰۶
- شکل ۴-۳۱- تأثیر آلاینده بر روی زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک تثبیت‌شده با آهک ۱۰۶
- شکل ۴-۳۲- تأثیر آلاینده بر روی مقاومت برشی خاک تثبیت‌شده با ۱٪ سیمان ۱۰۷
- شکل ۴-۳۳- تأثیر آلاینده بر روی مقاومت برشی خاک تثبیت‌شده با ۳٪ سیمان ۱۰۷
- شکل ۴-۳۴- تأثیر آلاینده بر روی مقاومت برشی خاک تثبیت‌شده با ۵٪ سیمان ۱۰۷
- شکل ۴-۳۵- تأثیر آلاینده بر روی چسبندگی خاک تثبیت‌شده با سیمان ۱۰۸
- شکل ۴-۳۶- تأثیر آلاینده بر روی زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک تثبیت‌شده با سیمان ۱۰۹

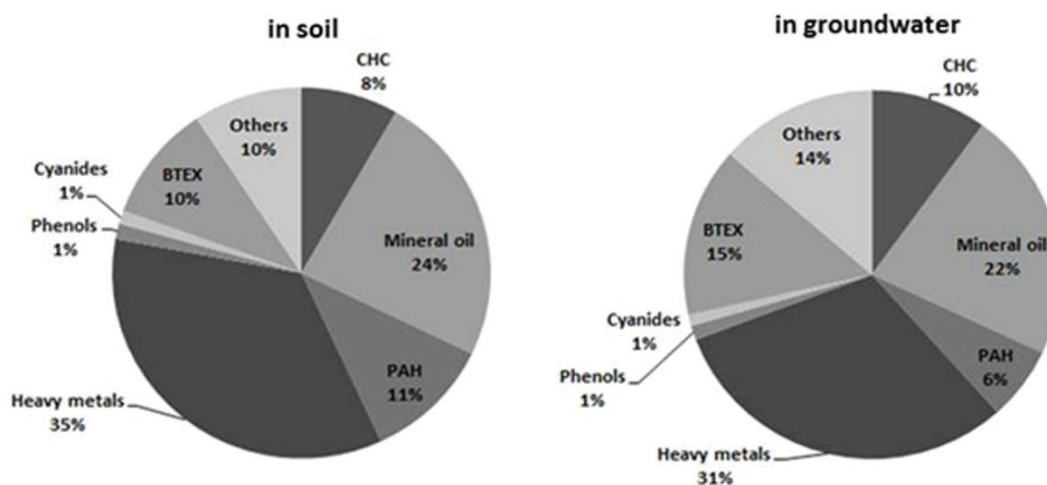
- شکل ۴-۳۷- تأثیر آلاینده بر روی مقاومت برشی خاک تثبیت شده با ۱٪ RHA ۱۱۰
- شکل ۴-۳۸- تأثیر آلاینده بر روی مقاومت برشی خاک تثبیت شده با ۳٪ RHA ۱۱۰
- شکل ۴-۳۹- تأثیر آلاینده بر روی مقاومت برشی خاک تثبیت شده با ۵٪ RHA ۱۱۰
- شکل ۴-۴۰- تأثیر آلاینده بر روی چسبندگی خاک تثبیت شده با RHA ۱۱۱
- شکل ۴-۴۱- تأثیر آلاینده بر روی زاویه اصطکاک داخلی خاک تثبیت شده با RHA ۱۱۱

فصل اول:

پیشگفتار

آلودگی در بحث خاک یک معنی دوگانه به خود می‌گیرد. به پتانسیل ایجاد زیان به سلامت انسان‌ها و دیگر موجودات زنده و همچنین به هر انباشتگی مواد که به‌صورت معمول در خاک و آب نیستند، آلودگی گفته می‌شود. آلودگی ممکن است به‌صورت جامد، مایع یا گاز باشد و می‌تواند فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی باشد. برای اینکه خاکی آلوده تلقی شود، باید حضور ماده شیمیایی در خاک بررسی شود و اینکه آیا به میزانی هست که به ما زیان وارد کند یا خیر [۱].

آلودگی‌های خاک به‌صورت عمده به ۲ دسته آلاینده‌های آلی و غیر آلی تقسیم می‌شوند. آلاینده‌های آلی متشکل از هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای ($PAHs^2$)، هیدروکربن‌های نفتی ($PHCs^3$)، بنزن، تولوئن، اتیلن، زایلن و ... بوده و آلاینده‌های غیر آلی شامل فلزات سنگین مانند سرب (Pb)، مس (Cu)، کادمیوم (Cd) و ... می‌باشند [۲]. شکل ۱-۱ نسبت مقادیر آلاینده‌های موجود در خاک و آب‌های زیرزمینی برخی از کشورهای اروپایی را نشان می‌دهد. فلزات سنگین، روغن‌های آلی، هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای (PAH)، ترکیبات $BTEX^4$ ، هیدروکربن‌های کلردار^۵ (CHC)، فنول‌ها و سیانیدها به‌ترتیب بیشترین آلاینده‌های موجود در خاک می‌باشند.



شکل ۱-۱- نتایج میزان حضور آلاینده‌ها در خاک و آب‌های زیرزمینی ۲۷ کشور اروپایی [۳]

² polycyclic aromatic hydrocarbons

³ petroleum hydrocarbons

⁴ benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes

⁵ Chlorinated hydrocarbons

آلودگی خاک و منابع آب زیرزمینی با آلودگی‌های مختلف از جمله هیدروکربن‌ها و حلال‌های شیمیایی، آثار منفی زیست‌محیطی متنوعی به دنبال دارد. نفت خام ترکیب ناهمگن هیدروکربن‌ها که در زیر سطح زمین از باقیمانده مواد آلی تحت فشار بالا تشکیل شده است، می‌باشد. همچنین می‌تواند به چندین فرآورده پالایش شود. سوخت آن باعث افزایش دی‌اکسید کربن اتمسفر شده و همچنین ناخالصی‌های موجود باعث سوخت ناقص و تولید اکسید نیتروژن، هیدروکربن‌های آروماتیک پلی‌سایکلیک و باران اسیدی از دی‌اکسید سولفور می‌شود [۴].

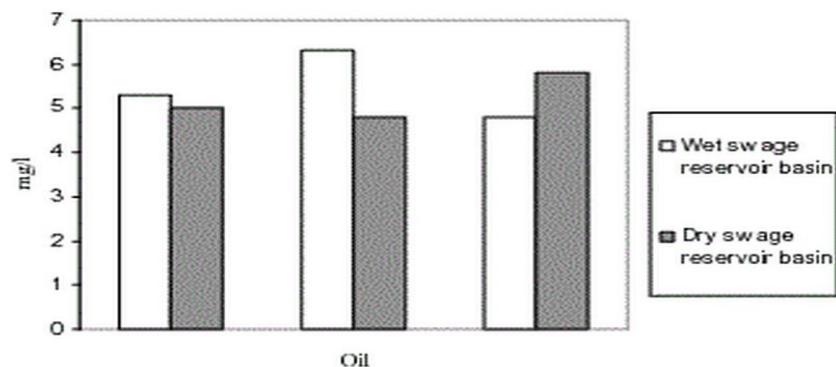
آلودگی محیط زیرزمینی با هیدروکربن‌های نفتی در اطراف پالایشگاه‌ها، جایگاه‌های سوخت‌گیری، مخازن نفت و فرآورده‌های نفتی و محل عبور لوله‌های تأسیسات انتقال سوخت، از حساسیت ویژه‌ای برخوردار است، چراکه معمولاً از شروع آلودگی تا تشخیص آن مدت زمان طولانی می‌گذرد و در صورت بروز، اصلاح آن به زمان و هزینه‌های اقتصادی چشمگیر نیاز دارد [۵]. مطابق اخبار منتشر شده در سایت‌های خبری، از حوادث نفتی می‌توان به واژگونی مکرر تانکرهای حامل مواد نفتی یا به شکستگی و نشت خطوط گازوئیل در رودخانه زال استان لرستان در دی‌ماه سال ۹۳ اشاره کرد که باعث آلودگی منطقه و خاک‌های اطراف شده است. هرکدام از خطوط انتقال نفت و فرآورده‌های نفتی موجود در محدوده جغرافیایی استان لرستان دارای عمر نزدیک به ۵۰، ۲۵، ۲۰ و ۱۷ سال هستند، به‌طوری‌که مطابق برخی از آمارها تنها خط انتقال نفت سرکان مالکوه در طول سال‌های گذشته شاهد بیش از ۱۲ حادثه بوده که هرکدام از این حوادث تبعات و خسارات زیان‌باری به دنبال داشته است. آخرین گزارش منتشر شده از سوی شرکت ملی نفت ایران نشان می‌دهد که روزانه بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ بشکه آلودگی‌های نفتی از روستاها و آب‌های زیرزمینی اطراف پالایشگاه تهران جمع‌آوری می‌شود.



شکل ۱-۲- تهران-شهری-روستای درسون آباد-زمین‌های کشاورزی غرق در نفت

جهت بررسی دقیق‌تر وجود آلودگی در خاک‌ها می‌توان به پژوهش انجام شده توسط گیتی پور و همکاران (۱۳۸۳)، اشاره کرد که آلودگی خاک با ترکیبات نفتی در منطقه‌ی عظیم‌آباد (جنوب پالایشگاه تهران) را بررسی کردند. خاک این منطقه از سال‌ها قبل در اثر نشت احتمالی ترکیبات نفتی از مخازن زیرزمینی یا لوله‌های انتقال فرسوده و نیز زوائد ناشی از پالایش نفت خام آلوده گردیده که نمونه بارز آن در آب نه‌رهای جاری در منطقه و خاک‌های اطراف آن مشهود است. آن‌ها جهت بررسی آلودگی از آزمایش‌های مکانیک خاک و آزمایش‌های اندازه‌گیری آلاینده‌ها با شاخص BTEX بر روی نمونه‌ها استفاده کرده و همچنین غلظت قابل نشت نمونه‌ها را توسط آزمایش خصوصیات نشت و سمیت اندازه‌گیری کردند. مقایسه مقادیر موجود آلودگی با مقادیر مجاز آلاینده‌ها حاکی از آلوده بودن خاک منطقه به ترکیبات نفتی بود. همچنین نتایج آزمایش نشت حاکی از نشت آلاینده‌ها در برخی از نمونه‌ها بوده که نشان‌دهنده‌ی امکان نشت آلودگی از برخی خاک‌های آلوده منطقه به آب‌های زیرزمینی است [۶].

همچنین در پژوهش انجام شده توسط ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۰)، در اراضی محدوده‌ی پالایشگاه گاز سرخون بندرعباس، با حفر گمانه مقدار کل آلاینده هیدروکربنی و کل آلاینده نفتی اندازه‌گیری شد. با بررسی منبع مولد آلودگی، مطابق نتایج آزمایش‌ها مطابق شکل ۱-۳، نشت احتمالی تدریجی و تجمع در خاک اطراف پالایشگاه از دو مخزن ذخیره‌ی فاضلاب ورودی به چاله‌های سوزان، موجد اصلی آلودگی هیدروکربنی خاک اطراف پالایشگاه اعلام شد [۵].



شکل ۱-۳- نتایج آزمایش‌های oil مخازن ذخیره‌ی فاضلاب خشک و تر ورودی به چاله‌های سوزان با ۳ تکرار زمانی [۵]

روش‌های گوناگونی جهت اصلاح و پاک‌سازی خاک‌های آلوده به کار گرفته شده است. از این روش‌ها می‌توان به روش‌های محصورسازی، روش‌های فیزیکی شامل روش‌های شست‌وشوی و مرتب‌سازی، روش استخراج بخار از خاک و روش اصلاح الکتریکی، روش‌های بیولوژیکی شامل روش‌های مزرعه خاکی^۶، پشته‌های زیستی^۷، رآکتورهای زیستی^۸ و گیاه‌پالایی، روش‌های شیمیایی شامل روش‌های احیا و اکسیداسیون، کلرزدایی، هیدرولیز و تنظیم pH، روش تثبیت آلاینده‌ها در خاک و روش‌های حرارتی شامل روش‌های دفع حرارتی، سوزاندن و شیشه‌گون سازی اشاره کرد [۷].

روش تثبیت با جامدسازی مواد آلوده و تبدیل آلاینده‌ها به شکلی با تحرک کمتر یا با اتصال آن‌ها به یک ماتریس غیرقابل حل باعث حرکت کمتر آلاینده می‌شود که به کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی، تبخیر آلاینده‌ها و درنهایت کاهش آلودگی هوای ناشی از آن و اثرات تدریجی باقی ماندن چنین ترکیباتی بر سلامت و زندگی انسان‌ها نتیجه می‌شود. این روش همچنین با تبخیر ترکیبات فرار هنگام واکنش گرماده ماده تثبیت‌کننده می‌تواند باعث کاهش آلودگی شود. علاوه بر این، وجود اکسیژن در خاک به همراه گرمای هیدراتاسیون می‌تواند باعث تخریب ترکیبات هیدروکربنی شود. فایده دیگر آن بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک اصلاح شده در مقایسه با خاک آلوده اصلی است [۸].

بحث مقاومتی روش تثبیت خاک به کلیه عملیاتی گفته می‌شود که برای بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک برای قابل استفاده کردن آن در یک کاربرد معین انجام می‌شود. این مهم به روش‌های گوناگون مانند تثبیت مکانیکی، بیولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی و الکتریکی انجام می‌شود.

^۶ Landfarming

^۷ biopiles

^۸ bioreactors

یکی از روش‌های رایج برای تثبیت خاک استفاده از مواد افزودنی در خاک است. انواع گوناگونی از مواد افزودنی برای تثبیت خاک به کار می‌رود که انتخاب نوع آن به عوامل مختلفی مانند جنس خاک، شرایط جوی، هدف از تثبیت، مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی بستگی دارد. این افزودنی‌ها به دو گروه افزودنی‌های متعارف مانند آهک، سیمان و قیر و گروه‌های غیرمتعارف مانند سیلیکات‌ها، افزودنی‌های معدنی، نمک‌ها، اسیدها، آنزیم‌ها، پلیمرها و صمغ‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند [۹ و ۱۰]. از نظر اثرگذاری بر خاک تثبیت‌کننده‌های متعارف و نامتعارف به دو دسته تقسیم می‌شوند که یک گروه از آن‌ها با کانی‌های خاک واکنش شیمیایی نشان داده و باعث تغییر در ساختار آن‌ها می‌گردند و گروه دیگر بدون واکنش با ذرات خاک باعث چسبیدن آن‌ها به یکدیگر می‌شوند. مواد افزودنی مورد استفاده باعث افزایش مقاومت، تغییر در خصوصیات تراکم و حساسیت به رطوبت می‌شوند [۱۰].

۲-۱- ضرورت انجام پژوهش

با توجه به آلاینده‌های موجود در خاک، همواره نگرانی‌هایی برای آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، رشد گیاهان در سایت‌های آلوده و خطرات زیست‌محیطی و سلامتی انسان‌ها موجود است. از طرف دیگر، تغییرات مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌ها توسط آلاینده‌ها می‌بایست توسط مهندسين ژئوتکنیک در نظر گرفته شود. تغییرات در ظرفیت باربری خاک‌ها، نشست پی‌ها، مقاومت برشی، تراکم‌پذیری و پلاستیسیته از مواردی هستند که باید در پروژه‌ها لحاظ شوند [۱۱].

روش تثبیت خاک با متداول‌ترین مواد افزودنی مانند آهک و سیمان تأثیر مثبت روی رفتار خاک دارند. این مواد باعث کاهش چشمگیر پتانسیل تورم، شاخص خمیری (PI)، افزایش مدول الاستیسیته، دوام و مقاومت برشی خاک‌ها می‌شوند [۱۲ و ۱۳]. در یک سایت آلوده، جهت رسیدن به پارامترهای ژئوتکنیکی موردنظر در اجرای پروژه، یکی از راه‌های پیش رو استفاده از روش تثبیت در خاک آلوده با اطمینان از عدم مشکل‌ساز بودن عواقب زیست‌محیطی ناشی از باقی ماندن خاک آلوده در محیط است. تحقیقات گسترده‌ای بر روی استفاده از روش تثبیت آلاینده‌ها در خاک جهت کاهش تحرک آلاینده‌ها و اصلاح خاک در گذشته انجام گرفته است اما موضوع تأثیر روش تثبیت خاک بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده و امکان استفاده از این مواد افزودنی در این‌گونه خاک‌ها هنوز چندان مورد بررسی قرار نگرفته است.

اغلب تحقیقات انجام شده قبلی بر روی تثبیت خاک‌های ریزدانه بوده است و خاک‌های دانه‌ای به دلیل مشکلات کمتری که ایجاد می‌کنند کمتر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. به دلیل فعال بودن خاک ریزدانه رسی از لحاظ الکتروشیمیایی و بالا بودن سطح ویژه‌ی آن، واکنش‌های شیمیایی مختلفی بین دانه‌های خاک، آلاینده و ماده تثبیت‌کننده ایجاد می‌شود و از این جهت از اهمیت بیشتری برای بررسی برخوردار است. همچنین با توجه به اینکه پالایشگاه تهران از مهم‌ترین منابع آلودگی نفتی خاک در تهران است و اینکه خاک اطراف پالایشگاه تهران بیشتر از نوع رسی است، در صورت نیاز به توسعه تأسیسات، مطالعه بر روی این نوع خاک از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرف دیگر، در مقایسه دو نوع خاک رسی متفاوت با کانی‌هایی با انواع مختلف، شاهد تفاوت‌های اساسی در نتایج هستیم. بنابراین در این پژوهش سعی شده که از یک نوع کانی رسی کائولینیت جهت انجام تمامی آزمایش‌ها استفاده شود.

آلاینده مورد استفاده در این پژوهش گازوئیل است. عرضه‌ی تنها بنزین و گازوئیل در جایگاه‌های سوخت و همچنین تولید بالای گازوئیل در کشور (متوسط ۲۴ میلیون لیتر در روز)، گویای احتمال بالای آلوده شدن خاک توسط این فرآورده‌ی نفتی است. همچنین با توجه به اینکه تحقیقات پیشین بر روی تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌ها با این آلاینده انجام گرفته است، استفاده از گازوئیل در این پژوهش جهت مقایسه قابل اهمیت می‌باشد.

۱-۳- هدف از انجام پژوهش

جهت بررسی میزان بازدهی روش تثبیت خاک در هر دو خاک آلوده و غیر آلوده و در نتیجه مشخص شدن تأثیر آلودگی بر روی این روش، آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده و برش مستقیم برای مشخص شدن تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک بر روی موارد زیر انجام شد:

۱. خاک کائولینیت غیر آلوده
۲. خاک کائولینیت آلوده به گازوئیل در ۳ درصد مختلف
۳. خاک کائولینیت غیر آلوده تثبیت‌شده با ۴ ماده متفاوت
۴. خاک کائولینیت آلوده به گازوئیل در ۳ درصد مختلف تثبیت‌شده با ۴ ماده متفاوت

جهت نیل به این اهداف در این پژوهش از مواد تثبیت کننده آهک، سیمان، خاکستر پوسته‌ی برنج (⁹RHA) و همچنین از ماده تثبیت کننده‌ی جدیدتر پایه اسیدی 235 special RRP¹⁰ جهت بهبود مشخصات مکانیکی خاک آلوده استفاده شده است. با توجه به متفاوت بودن نحوه‌ی عملکرد هریک از این مواد تثبیت کننده، بررسی و مقایسه‌ی نتایج آن‌ها می‌تواند دید بهتری از واکنش‌های احتمالی در خاک آلوده و در نتیجه تحلیل بهتر نتایج به ما بدهد.

۱-۴- ساختار پایان نامه

جهت طبقه‌بندی مطالب، این پایان نامه در ۵ فصل تنظیم و ارائه شده است. در فصل اول که پیش روست، وجود آلاینده‌های نفتی در خاک‌ها با چند نمونه از پژوهش‌های انجام شده در این مورد بررسی شده است. همچنین به مشکلات ناشی از این آلاینده‌ها و ضرورت انجام و اهداف پژوهش نیز پرداخته شده است.

در فصل دوم، به شرح مختصری از کلیات و تعاریف درباره‌ی خاک و کانی‌های آن، آلاینده‌های خاک و خطرات آن، مکانیسم آلودگی و مواد تثبیت کننده‌ی استفاده شده در این پایان نامه پرداخته شده است. همچنین در انتها به بررسی آخرین پژوهش‌های انجام شده درباره‌ی تأثیر آلاینده و این مواد تثبیت کننده بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌ها پرداخته شده است.

در فصل سوم، به شرح مفصلی از روش‌های ساخت نمونه‌ها و شیوه‌ی انجام آزمایش‌های انجام شده در نیل به اهداف تحقیق پرداخته شده است.

فصل چهارم، شامل نتایج آزمایش‌های انجام شده و مقایسه و تحلیل آن‌ها است.

در فصل پنجم به نتیجه‌گیری کلی و آرایه پیشنهادهایی جهت توسعه و بررسی دقیق‌تر پژوهش حاضر، پرداخته شده است.

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

⁹ Rice Husk Ash

¹⁰ Reynolds road packer

فصل دوم:

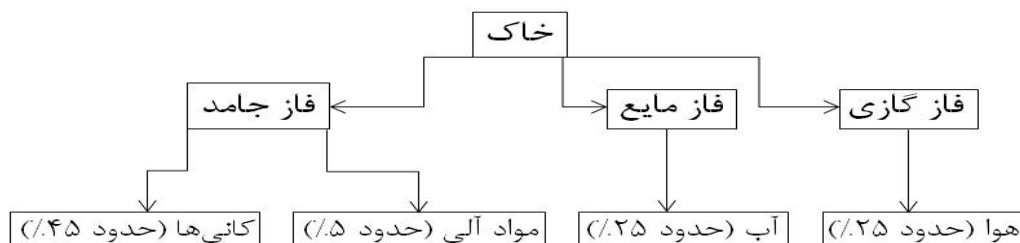
مبانی تئوری و مروری بر تحقیقات پیشین

۲-۱- مقدمه

به منظور شناسایی و درک موضوع جهت تفسیر بهتر نتایج، در این فصل سعی شده است شرح مختصری از ساختار خاک، آلاینده‌های خاک و مواد تثبیت‌کننده‌ی استفاده شده در این پژوهش شامل آهک، سیمان، RHA و RRP 235 special ارائه گردد. همچنین سعی شده است خلاصه‌ای از پژوهش‌های اخیر انجام گرفته بر روی تأثیر هر کدام از این مواد بر روی پارامترهای خاک آورده شود.

۲-۲- خاک

خاک‌ها از هوازگی سنگ‌ها به وجود آمده‌اند و توسط عوامل مختلفی مانند آب، باد، فعالیت‌های انسانی و غیره به مکان‌های متفاوت منتقل شده‌اند. هوازگی یک پروسه‌ی فیزیکی، شیمیایی یا بیولوژیکی است. هوازگی فیزیکی با حضور شکستگی‌ها و ترک‌ها ایجاد می‌شود. این شکستگی‌ها از حوادث تکتونیکی، فرسایش یا تغییر در فشار سیال ایجاد می‌شوند. هوازگی شیمیایی، باعث تغییر کانی‌ها به ترکیبات جدیدتر به وسیله‌ی عوامل شیمیایی مانند اسیدها در باران و آب می‌شود. پروسه‌های درگیر در هوازگی شیمیایی معمولاً واکنش کانی‌ها با آب، اکسیژن و اسیدهای آلی می‌باشند. جذب آب^{۱۱}، انحلال (تجزیه‌ی کانی‌ها به یون‌ها)، اکسیداسیون (ترکیب اکسیژن با یک کانی جهت تشکیل اکسیدها و هیدروکسیدها)، شست‌وشو (مهاجرت یون‌های تشکیل شده از مراحل قبل) و تبادل کاتیونی (جذب کاتیون‌های مثبت محلول به سطح منفی رس‌ها) مثال‌هایی از هوازگی شیمیایی هستند. هوازگی می‌تواند توسط گیاهان و حیوانات نیز انجام شود [۱۴و۲]. شکل ۱-۲ نسبت حجمی تقریبی اجزای خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲ نسبت حجمی اجزای خاک [۲]

¹¹ Hydration

به دلیل غالب بودن اکسیژن و سیلیکون به ترتیب به مقادیر ۴۶/۶٪ و ۲۷/۷٪ در پوسته‌ی زمین، سیلیکات‌ها بیشترین کانی موجود در پوسته‌ی زمین می‌باشند. ساختار پایه‌ی کانی‌های سیلیکات چهاروجهی SiO_2 است. انرژی اتصال Si-O نیمی از انرژی یون اکسیژن است، بدین معنی که اکسیژن می‌تواند بعداً به یون سیلیکون دیگری متصل گردد. همچنین باوجود چهار ظرفیت منفی SiO_4 می‌تواند به یک یون فلزی مانند Mg، Fe و ... متصل گردیده و متعادل شود. با اتصال یک چهاروجهی با ۳ تا از یون‌های اکسیژن آن ساختار ورقه‌ای فیلیکوسیلیکات ایجاد می‌شود. ساختارهای ورقه‌ای در میکاها و کانی‌های ورقه‌ای مانند کلریت، تالک و کانی‌های رسی پیدا می‌شوند. اگر هر چهار اکسیژن به چهاروجهی‌های اطراف متصل باشند، یک ساختار سه‌بعدی به وجود می‌آید. کانی کوارتز (SiO_2)، مثالی از این ساختار است. فلدسپار نیز که با جایگزینی Si^{4+} با Al^{3+} به وجود می‌آید، از این دسته است. مهم‌ترین کانی‌های غیر سیلیکونی نیز شامل کلسیت (CaCO_3) و دولومیت ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) هستند که اجزای اصلی رسوبات آهکی می‌باشند. کوارتز (جزء ضروری در گرانیته‌ها، اکثر ماسه‌ها و ماسه‌سنگ‌ها، گنیس، کوارتزیت، برخی از شیست‌ها و دیگر سنگ‌های متامورفیک) و مسکوویت^{۱۲} (که در گرانیته‌ها و دیگر سنگ‌های اسیدی و رسوبی وجود دارند) کانی‌های بسیار پایداری هستند. در مقابل کانی‌های فلدسپار در مقابل هوازدگی حساس‌اند و تغییر در آن‌ها باعث تشکیل کانی‌های رسی می‌شود. به‌عنوان مثال فلدسپار پتاسیم^{۱۳} که با هیدرولیز (یون‌های هیدروژن در آب نفوذی جایگزین کاتیون‌های کانی می‌شود) تبدیل به کائولینیت $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$ با حذف پتاسیم K^+ و سیلیکا SiO_2 در محلول می‌شود [۱۴].

۲-۱-۲- کانی‌های رسی

خاک‌ها ترکیبی از ذرات با اندازه‌های مختلف می‌باشند و مهندسين از واژه‌هایی نظیر سنگ، شن، ماسه، لای و رس جهت مشخص کردن محدوده‌های مشخصی از اندازه‌ی دانه‌ها استفاده می‌کنند. واژه‌ی رس برای مشخص کردن ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرومتر استفاده می‌شود. البته برای قرار گرفتن یک خاک در دسته‌ی رس‌ها می‌بایست خاک از خود رفتار خمیری نیز نشان دهد و تنها اندازه‌ی ذرات

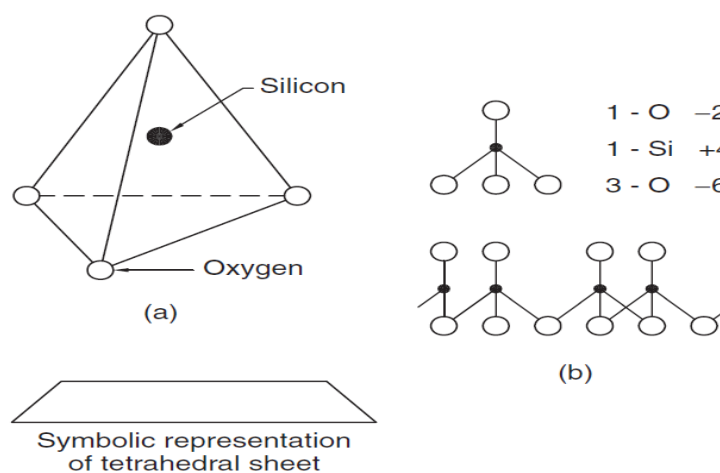
¹² Muscovite

¹³ Orthoclase

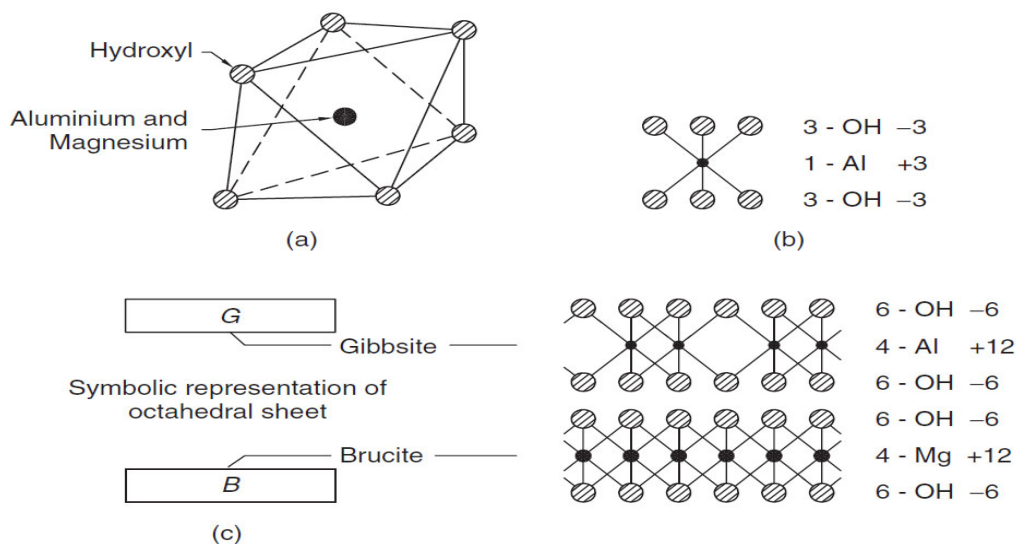
ملاک نیست. در سیستم طبقه‌بندی متحد خاک‌ها نیز بر این موضوع تأکید می‌شود. یادآوری می‌شود که خاک‌های رسی اغلب از هوازدگی شیمیایی سنگ‌ها که پیش‌تر به آن اشاره شده به وجود می‌آیند [۱۴و۱۵].

از مهم‌ترین مشکلات خاک‌های رسی می‌توان به مشکل تورم و انقباض خاک‌های رسی و تغییر خواص آن‌ها در حضور رطوبت اشاره کرد. تغییرات حجمی رس‌ها در حضور رطوبت می‌تواند چشمگیر باشد. در خشکی، رس‌ها معمولاً مقاوم‌اند، ولی با افزایش رطوبت، پلاستیسیته رس‌ها افزایش یافته و مقاومت آن‌ها کاهش می‌یابد.

کانی‌های رسی آلومینو سیلیکات‌های آبدار به‌علاوه‌ی دیگر یون‌های فلزی می‌باشند. آن‌ها از صفحه‌های دوبعدی تشکیل شده که بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. این صفحات ۲ نوع می‌باشند؛ صفحات ۴ وجهی که با اشتراک اکسیژن به یکدیگر متصل شده‌اند و صفحات ۸ وجهی که با اشتراک هیدروکسیل‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند. انواع مختلفی از رس‌ها بسته به چگونگی قرارگیری این صفحات و کاتیون‌های حاضر در صفحات وجود دارند [۱۴].

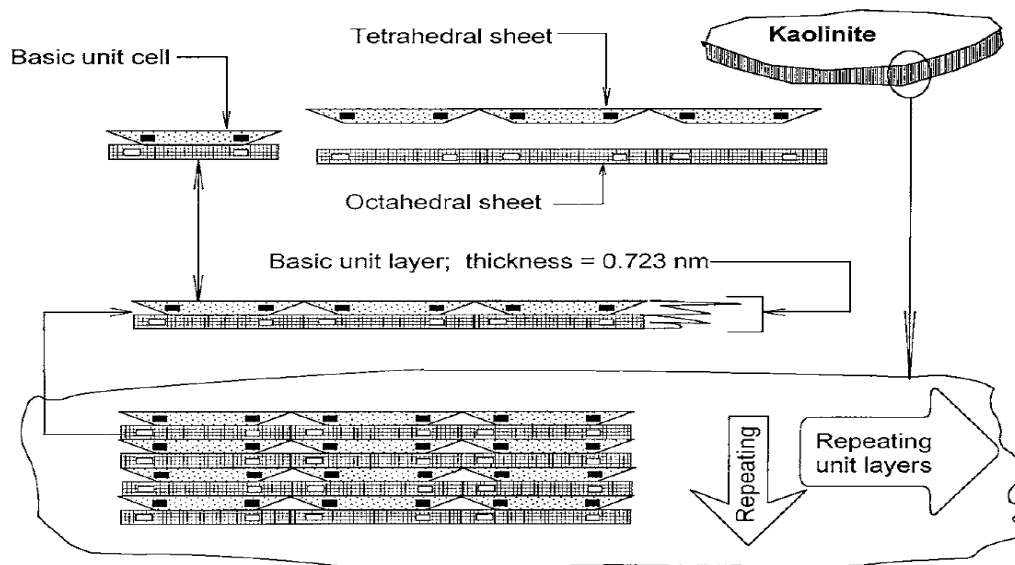


شکل ۲-۲- ساختار چهاروجهی [۱۴]



شکل ۲-۳- ساختار هشت وجهی [۱۴]

کائولینیت از یک صفحه‌ی چهاروجهی سیلیکا و یک صفحه‌ی هشت وجهی گیبسیت تشکیل شده است (شکل ۲-۴). لایه‌ی پایه ضخامتی به اندازه‌ی 0.723 نانومتر دارد و اتصال هیدروژنی بین لایه‌ها از قدرت کافی جهت جلوگیری از هیدراته شدن کافی است. بنابراین تورمی بین لایه‌ها وجود ندارد و لایه‌ها می‌توانند جهت تشکیل بلوره‌های بزرگ‌تر توده شوند. هر بلوره کائولینیت از 70 تا 100 لایه تشکیل شده است [۱۴ و ۱۶].



شکل ۲-۴- ساختار پایه و لایه‌های کائولینیت [۲]