

بررسی آزمایشگاهی تغییرات رفتار مقاومتی و ریزساختاری خاک رس آلوده به نفت (مطالعه‌ی موردی: منطقه‌ی مسجدسلیمان)

فرشته سلطانی افارانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

نوید خیاط* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۱ (دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۸۱-۷۳، (پاداشت نثی)

مطالعه‌ی رفتار مکانیکی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی با توجه به نفت خیز بودن کشور ایران، اهمیت بالایی دارد. در پژوهش حاضر، فرایند تثبیت از طریق افزودن آهک به خاک رسی (CH) آلوده به نفت واقع در استان خوزستان بررسی شده است. در این راستا، ۱۴۴ نمونه‌ی استوانه‌ی خاک آلوده به مقادیر ۰،۴ و ۱،۰ درصد نفت و تثبیت شده با آهک به میزان‌های ۰،۳ و ۰،۶ و ۰،۹ درصد وزنی ساخته شده و در سن‌های عمل‌آوری ۰،۱، ۱، ۲۸ و ۲۸ روز، تحت آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری و آنالیز ریزساختاری قرار گرفته‌اند. پژوهش حاضر نشان می‌دهد که با افزودن آهک به میزان ۰،۶٪، مقاومت تک‌محوری بیشترین افزایش (۴۱۶/۶٪) را داشته است. همچنین با افزایش سن عمل‌آوری، با صورت پذیرفتن واکنش‌های پوزولاتیک و تبادل کاتیونی میان کانی‌های خاک رسی با آهک، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها نرخ افزایشی داشته است.

واژگان کلیدی: تک‌محوری، ریزساختار، مقاومت خاک رس آلوده به نفت، تثبیت، آهک.

fereshteh.soltani2021@gmail.com
khayat@iauhvaz.ac.ir

۱. مقدمه

بدین ترتیب با توجه به مروری بر مطالعات پیشین، وجود آلاینده‌های نفتی در خاک باعث تضعیف خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها شده است. لذا برای کاهش خطرهای احتمالی، راهکارهایی از قبیل تثبیت برای بهبود خصوصیات خاک‌ها ارائه شده است. تثبیت خاک روشی است که با هدف بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها جهت پیش‌بینی و بهبود ساختار خاک‌های گوناگون برای پروژه‌های مهندسی معرفی شده است.^[۱۳-۱۱] از راه‌های موجود، استفاده از افزودنی‌ها در تثبیت خاک برای بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی و همچنین افزایش مقاومت تک‌محوری و یا بهبود مقاومت در برابر نیروهای محیطی است. زیتی^۷ و همکاران (۲۰۲۲)،^[۱۴] و پام^۸ و همکاران (۲۰۲۲)،^[۱۵] در پژوهش‌های خود به بررسی تأثیر افزودنی در مقاومت تک‌محوری پرداخته‌اند.^[۱۷،۱۶]

برخی از افزودنی‌های مذکور، عبارت‌اند از: آهک، گچ، خاکستر چوب، خاکستر بادی، خاکستر پوسته‌ی برنج، قیر و سیمان و ...، که کاهش تورم، کاهش نفوذپذیری، افزایش کارایی، مقاومت و آثار سودمند دیگری را در خاک موجب می‌شوند.^[۱۸-۲۲] یکی از روش‌های رایج و کم‌هزینه جهت بهبود روابط خصوصیات خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، عمل تثبیت آن توسط آهک است. اضافه کردن آهک به خاک باعث به وجود آمدن واکنش‌هایی می‌شود که این واکنش‌ها در کوتاه‌مدت و بلندمدت باعث بهبود ویژگی‌هایی، از قبیل: کاهش حد روانی، شاخص خمیری، کاهش بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک، کاهش تورم، افزایش رطوبت بهینه، افزایش تراکم خاک،

از دیدگاه جهانی پس از آب و هوا، خاک سومین جزء اصلی محیط زیست برای بشر تلقی می‌شود. خاک‌ها بستر اصلی رشد گیاهان هستند و همچنین پایگاه جامعه‌ی انسانی را نیز تشکیل می‌دهند. از طرفی، برخلاف آلودگی آب و هوا، که به سادگی قابل تعیین است، آلودگی خاک‌ها به مواد شیمیایی و سمی به آسانی قابل اندازه‌گیری و مشاهده نیست.^[۱] برخی از انواع آلودگی‌ها عبارت‌اند از: آلودگی خاک با هیدروکربن‌های نفتی، که خود شامل آلودگی به: نفت، بنزین، گازوئیل و انواع سوخت‌های فسیلی و ... هستند،^[۲] که موجب تغییر در پارامترهای مقاومتی و رفتار مهندسی خاک‌ها می‌شوند.^[۳]

پرتلینا^۱ و همکاران (۲۰۲۱)،^[۴] در پژوهش خود دریافته‌اند که افزایش میزان آلودگی خاک‌ها به مواد نفتی، موجب کاهش بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک (MDD)^۲ و کاهش رطوبت بهینه‌ی (OMC)^۳ خاک رسی شده است. اوجوری^۴ و همکاران (۲۰۱۸)،^[۵] نیز طبق مشاهده‌های خود در پژوهشی بیان کردند که رفتار ژئوتکنیکی خاک، از قبیل: مقاومت تک‌محوری (UCS)،^۵ چسبندگی^۶ و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک آلوده به نفت در مقایسه با خاک‌های بدون آلودگی کمتر بوده است.^[۱۰-۶]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۸/۴/۱۴۰۱، اصلاحیه ۲۷/۶/۱۴۰۱، پذیرش ۱۶/۷/۱۴۰۱.

DOI:10.24200/J30.2022.60763.3123

و افزایش مقاومت تک‌محوری خاک می‌شود. روشنگر و همکاران (۲۰۲۲)، [۲۳] به بررسی اثر تثبیت آهک پرداختند و نشان دادند که افزودن آهک می‌تواند باعث بهبود رفتار خاک رسی شود. [۲۴-۲۹]

آهک‌هایی که معمولاً برای پایدار کردن خاک‌های ریزدانه استفاده می‌شوند، عبارت‌اند از: آهک زنده (زودگیر)، آهک دولومیتی، آهک آبی، آهک نیمه‌آبی و آهک هیدراته. [۹] در این میان، آهک هیدراته از ترکیب آهک زنده با آب ساخته شده است و ساختار شیمیایی آن با جذب هیدروژن از اکسیدکلسیم به هیدروکسیدکلسیم تبدیل می‌شود. آهک هیدراته با نام‌هایی نظیر: آهک مرده، آهک آب‌دیده، آهک شکفته و هیدروکسیدکلسیم نیز شناخته می‌شود. همچنین آهک یکی از افزودنی‌هایی است که با توجه به توانایی ایجاد واکنش‌های پوزولانی و همچنین تبادل کاتیونی بین ذرات و تشکیل ژل آلومینیم سیلیکات باعث منسجم شدن ذرات ناپایدار و پراکنده‌ی موجود در سطح خاک ریزدانه می‌شود و از طرفی با توجه قیمت به نسبت ارزان و فراوانی آن می‌تواند با صرف هزینه‌ی کم موجب بهبود خصوصیات خاک شود. [۳۰،۳۱]

امروزه در میان آلاینده‌های موجود در خاک، آلودگی خاک به آلاینده‌های نفتی، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های بشر است. با توجه به تولید انبوه و روزافزون هیدروکربن‌های نفتی و وجود چاه‌ها و پالایشگاه‌های متعدد در نواحی مختلف استان خوزستان، از جمله منطقه‌ی مسجد سلیمان، مسئله‌ی جلوگیری از آسیب رساندن و نشت آلودگی‌های نفتی به زیرساخت‌ها، اهمیت خاصی دارد. به دنبال این آلودگی‌ها در پیرامون تأسیسات و چاه‌های نفتی در زمان بهره‌برداری از مناطق ذکر شده، نیاز به خاک‌برداری و تعویض خاک منطقه احساس می‌شود. این مسئله از طرفی موجب آسیب رساندن به محیط زیست می‌شود و صرفه‌ی اقتصادی نیز ندارد. بنابراین انتخاب روش مناسب برای تثبیت خاک‌های آلوده به نفت جهت استفاده از آن‌ها مستلزم بررسی بیشتر است.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون تعدادی پژوهش بر روی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی و تثبیت آن‌ها با استفاده از آهک صورت پذیرفته است؛ اما در پژوهش حاضر به بررسی تغییرات رفتار مقاومتی و آنالیز ریزساختاری (SEM)، (XRD) خاک‌های آلوده‌ی رسی با حالت خمیری بالا در منطقه‌ی مسجد سلیمان، که مخازن و تأسیسات نفتی متعددی دارد، از طریق افزودن آهک در درصد‌های مختلف به‌عنوان ماده‌ی تثبیت‌کننده در سن‌های عمل‌آوری مختلف پرداخته شده است. همچنین در پژوهش حاضر تلاش بر این بوده است که با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام شده، درصد بهینه‌ی آهک برای تثبیت خاک‌های آلوده به نفت پیش‌بینی شود.

۲. مصالح مصرفی

۲.۱. خاک رس

خاک استفاده شده در پژوهش حاضر، خاک تهیه شده از معادن نزدیک چاه‌های نفت شهرستان مسجد سلیمان^{۱۰} از توابع استان خوزستان بوده است، که پس از خشک کردن در گرم‌خانه از الک نمره‌ی ۸ عبور داده شده است. بر اساس آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ، شاخص خمیری خاک (PI)،^{۱۱} عدد ۲۶/۵ به دست آمده است، که در نهایت خاک مذکور به‌عنوان خاک رس با حالت خمیری بالا و با نام CH مطابق با سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (USCS)^{۱۲} طبقه‌بندی شده است. همچنین پس از انجام آزمایش چگالی ویژه مطابق با

جدول ۱. آنالیز آهک مصرفی.

| ترکیب شیمیایی | میزان (%) |
|--------------------------------|-----------|
| CaO | ۷۲٫۰۴ |
| Cl | ۰٫۲۰۳ |
| SiO _۲ | ۰٫۹۵۴ |
| MgO | ۰٫۶۴۱ |
| SrO | ۰٫۳۰۵ |
| Al _۲ O _۳ | ۰٫۳۰۱ |
| Fe _۲ O _۳ | ۰٫۲۴ |
| Na _۲ O | ۰٫۱۳۴ |
| K _۲ O | ۰٫۱۱۰ |
| P _۲ O _۵ | ۰٫۰۳۵ |
| Total | ۹۹٫۹۷ |
| CaOH _۲ | ۹۲٫۱ |

استاندارد ۱۰ - ASTM D ۸۵۴، [۳۱] شاخص توده‌ی ویژه (Gs) برابر با ۲٫۵۹ شده است.

۲.۲. آهک

آهک استفاده شده در پژوهش حاضر از نوعی آهک هیدراته (متشکل از ترکیب آهک زنده با آب)، [۳۲،۳۳] که از کارخانه‌ی برادران اخوان واقع در استان قم تهیه و آنالیز ترکیب‌های شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. آهک مصرفی، ساختاری بلوری بی‌رنگ داشته و ظاهر آن به شکل پودری و به رنگ سفید بوده است، که به منظور اختلاط بهتر و ایجاد واکنش با خاک رس از الک نمره‌ی ۶۰ عبور داده شده و به میزان‌های ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی با خاک مخلوط شده است. [۳۳]

۲.۳. نفت

به منظور تعیین درصد‌های نفت مصرفی پژوهش حاضر، چند نمونه خاک از سایت‌های مختلف آلوده به نفت تهیه و به وسیله دستگاه سوکسوله^{۱۳} آزمایش شده‌اند، که با توجه به غلظت مشاهده شده در نتایج، مقادیر ۰، ۴، ۷ و ۱۰ درصد حجمی میزان آلودگی به نفت در پژوهش حاضر انتخاب شده‌اند. [۳۴،۳۵] نفت خام سنگین تهیه و مرحله‌ی اول پالایش بر روی آن انجام شده است، به طوری که CO_۲، گوگرد و آب نمک از آن گرفته شده و پس از انتقال به آزمایشگاه، به‌طور مصنوعی و اختلاط با دست، با خاک مخلوط شده است.

۳. آزمایش‌ها

۳.۱. آزمایش‌های شناسایی فیزیکی خاک

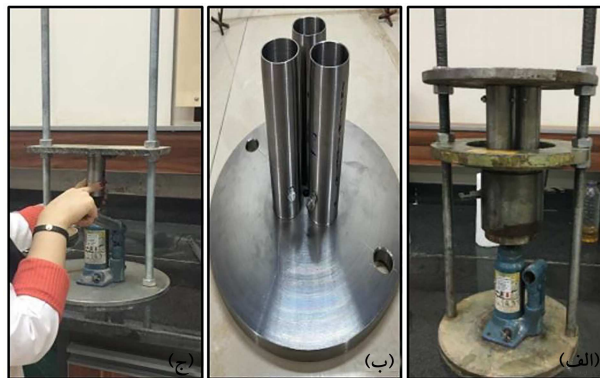
ابتدا خصوصیات مکانیکی و مقاومتی نمونه‌ی خاک خالص و سپس خاک تثبیت شده با مقادیر مختلف آهک و نفت آزمایش شده‌اند. به منظور تعیین نوع خاک از نظر دانه‌بندی، آزمایش دانه‌بندی با الک مطابق با استاندارد ۶۳ - ASTM D ۴۲۲، [۳۶] (شکل ۱) و تعیین حدود اتربرگ مطابق با استاندارد ۴۳۱۸ - ASTM [۳۷] (جدول ۲) و وزن مخصوص خشک بی‌بینه و رطوبت بهینه‌ی هر مخلوط نیز با آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ۱۵۵۷ - ASTM، [۳۸] صورت پذیرفته‌اند.

جدول ۲. نتیجه‌ی آزمایش حدود اتربرگ.

| نوع خاک | سیستم دسته‌بندی یونیفاید | حد روانی | حد خمیری | شاخص خمیری |
|---------|--------------------------|----------|----------|------------|
| Clay | CH | ۵۴٫۳ | ۲۷٫۸ | ۲۶٫۵ |



شکل ۲. الف) اختلاط خاک با نفت، ب) اختلاط خاک آلوده با رطوبت بهینه.

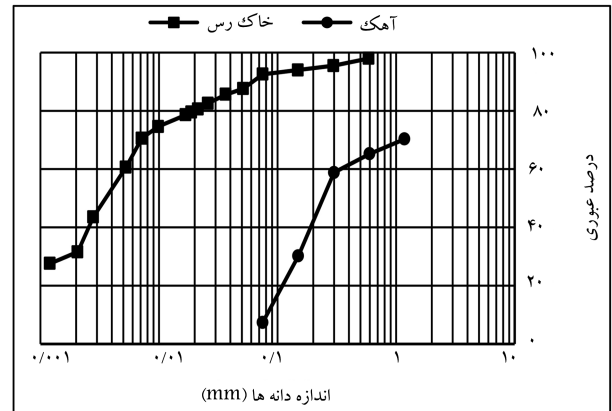


شکل ۳. الف) قرارگیری قالب تراکم بر روی جک هیدرولیکی؛ ب) استوانه‌ی نمونه‌گیر ۳ تایی؛ ج) خارج کردن نمونه از قالب.

و سپس ترکیب حاصل با میزان‌های ۰، ۴، ۷ و ۱۰ درصد نفت مخلوط شده و درون ۲ کیسه‌ی ناپلونی قرار گرفته و برای مدت ۱ هفته در محیط آزمایشگاه (دمای ۲۵ درجه) نگهداری شده‌اند. سپس به هر نمونه، مقادیر رطوبت بهینه‌ی (آب مقطر) تعیین شده از آزمایش تراکم، اضافه و با کمک دست ۲۰ دقیقه ورز داده شد تا مخلوط همگن و یکدستی حاصل شود و کلوخه‌های ریز در خاک باقی نماند و مخلوط حالت خمیری به خود بگیرد؛^[۲۴] سپس مخلوط حاصل درون ۲ لایه‌ی کیسه‌ی ناپلونی قرار گرفته^[۲۵] و برای مدت ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه نگهداری شده‌اند، تا رطوبت به‌طور کاملاً یکدستی به همه‌ی نقاط خاک منتقل شود. این کار به دلیل زمان‌بر بودن فرایند جذب رطوبت توسط ذرات رس و نفوذپذیری پایین آنها صورت گرفته است (شکل ۲).

پس از گذشت ۲۴ ساعت، مخلوط خاک ترکیب شده، از کیسه‌های ناپلونی خارج و جهت متراکم شدن در داخل قالب تراکم طی ۳ مرحله و هر لایه ۲۵ ضربه به کمک چکش استاندارد کوبیده شده است. سپس بر روی جک هیدرولیکی قرار گرفته است (شکل ۳ الف) و با کمک دستگاه نمونه‌گیر ۳ تایی (شکل ۳ ب)، که متشکل از استوانه‌های آهنی به ارتفاع ۷۶ و قطر ۳۸ میلی‌متر است، نمونه‌گیری انجام شده است (شکل ۳ ج) و ابعاد آن‌ها با کولیس به‌درستی اندازه‌گیری و به خوبی با چند لایه پوشش سلفونی بسته شده‌اند.

در پژوهش حاضر، ۴۸ عدد مخلوط با مقادیر مختلف آهک و نفت تهیه شده



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک و آهک.

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های شیمیایی خاک.

| EC (dS/m) | pH (%) | CL (%) | SO _۴ (%) |
|-----------|--------|--------|---------------------|
| ۱٫۵ | ۷٫۰۶ | ۰٫۰۱ | ۰٫۰۳ |

۲.۳. آزمایش‌های شیمیایی خاک

هدف از انجام آزمایش‌های انجام شده، مشخص کردن پارامترهایی از قبیل، اسیدیته (pH) مطابق با استاندارد ASTM D ۴۹۷۲^[۲۹]، کلر (CL) مطابق با استاندارد ASTM D ۱۴۱۱^[۲۰]، هدایت الکتریکی (Ec) و سولفات (So_۴) خاک مطابق با استاندارد BS ۱۳۷۷^[۲۱] بوده است، که با استفاده از دستگاه‌های pH متر، هدایت‌سنج^{۱۴} و سانتیفریوژ^{۱۵} خاک اندازه‌گیری شده‌اند (جدول ۳).

۳.۳. آزمایش‌های ریزساختاری

همچنین به‌منظور تشخیص ساختار شیمیایی و نوع کانی‌های رسی تشکیل‌دهنده‌ی خاک، آزمایش‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با^{۱۶} با بزرگ‌نمایی (۵ Kx) با هدف بررسی آنالیز مورفولوژی نانو ساختارها و ترکیبات شیمیایی خاک بر روی نمونه‌های مکعبی صورت پذیرفته و آنالیز طیف‌سنج پراش اشعه‌ی ایکس (XRD)^{۱۷} مطابق با استاندارد BS EN ۱۳۹۲۵ - ۲^[۲۱] با هدف بررسی ساختار بلوری مواد بر روی خاک عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ انجام شده است. همچنین آنالیز اخیر جهت مشاهده‌ی ساختار و شناسایی فازهای ذرات عبوری از الک شماره‌ی ۲۰۰ به‌کار می‌رود و نقطه‌ی اوج^{۱۸} عناصر تشکیل‌دهنده را مشخص می‌سازد.

۴.۳. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM D ۲۱۶۶^[۲۳] صورت پذیرفته است. به منظور انجام آزمایش تک‌محوری خاک بر روی ۱۴۴ نمونه‌ی موردنظر، ابتدا برای آماده‌سازی خاک موردنظر، خاک عبوری از الک شماره‌ی ۸ را ابتدا با آهک به‌صورت پودری و به میزان‌های ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد مخلوط کرده

دلیل تغییرات به وجود آمده را می‌توان این‌گونه بیان کرد که تبدیل آهک زنده به آهک شکفته همراه با تغییر وزن مخصوص آن انجام می‌شود؛ به گونه‌ای که پس از شکفته شدن، حجم آن افزایش و وزن مخصوص آن به حدود ۲٫۱ تا ۲٫۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب کاهش یافته است. افزایش حجم آهک زنده در اثر جذب آب از یک طرف، میزان ذرات در واحد حجم را کاهش داده و از طرف دیگر، وزن مخصوص خود آهک نیز کمتر شده و باعث کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی (MDD) نمونه‌ها شده است.

از طرفی، با افزایش میزان آهک به دلیل این‌که ذرات آن بسیار ریز بوده و

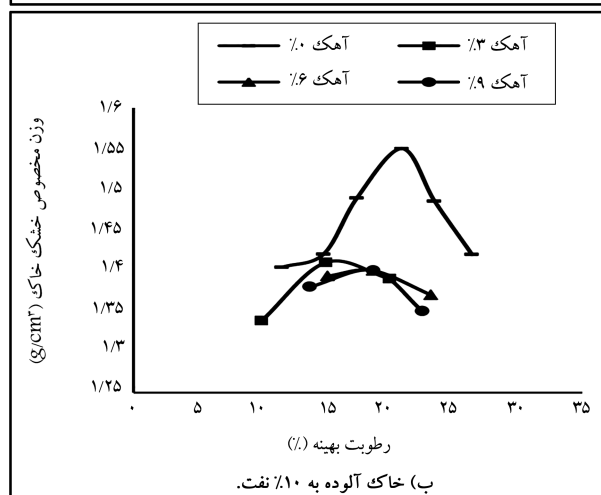
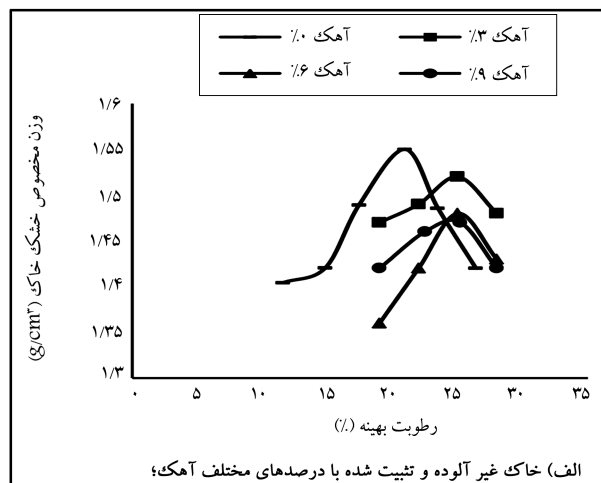
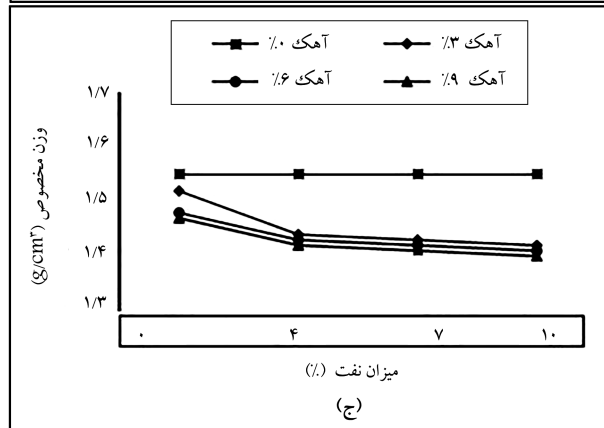
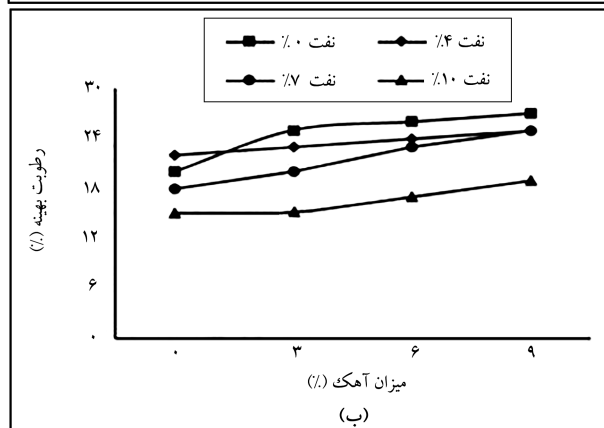
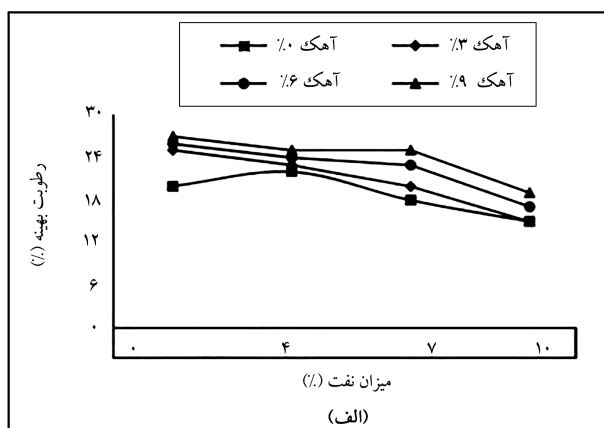
و با توجه به لزوم ۳ بار تکرارپذیری آزمایش، ۱۴۴ نمونه‌ی استوانه‌ی در سن‌های عمل‌آوری ۱۹، ۱۴ و ۲۸ روز، [۲۶] با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه تحت آزمایش تک‌محوری قرار گرفته‌اند. از طرفی، سرعت کرنش دستگاه به گونه‌ی تنظیم شده است که زمان رسیدن به گسیختگی نمونه (مشاهده‌ی ترک بر سطح نمونه) از حدود ۱۵ دقیقه بیشتر نشود و بارگذاری تا ۱۵٪ میزان کرنش ادامه یابد و تنش‌های ۲۰ اعمال شده روی نمونه قرائت شوند.

۴. نتیجه‌گیری و بحث

۱.۴. نتایج و نمودارهای به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد

آزمایش‌های تراکم استاندارد مطابق با استاندارد بر روی خاک‌های غیرآلوده و آلوده به نفت همراه با درصد‌های مختلف آهک انجام شده است، که نتایج آن‌ها در شکل (۴ الف و ب) مشاهده می‌شود.

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد، با افزایش میزان آلودگی نفتی به میزان ۱۰٪ به خاک، مقادیر رطوبت بهینه (OMC) کاهش یافته‌اند (شکل ۵ الف). همچنین با سوابق مشابه، ناصحی و همکاران (۲۰۱۵) دریافتند که افزایش میزان آلودگی نفتی در خاک‌های ریزدانه‌ی رسی موجب کاهش در مقادیر رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه شده است (شکل ۵ ب). [۲۷، ۲۸]



شکل ۵. الف) نمودار تغییرات رطوبت بهینه‌ی نمونه‌های آلوده به نفت؛ ب) نمودار تغییرات رطوبت بهینه‌ی نمونه‌های تثبیت شده با آهک؛ ج) نمودار تغییرات وزن مخصوص نمونه‌های آلوده به نفت.

شکل ۴. نتایج آزمایش تراکم استاندارد.

مقاومت، با افزایش میزان آلودگی به میزان ۶۰٫۶ درصدی مشاهده شده است. همچنین مقاومت تک محوری نمونه‌ی آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت شده با آهک ۹٪ برابر با ۳٫۲۸ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بوده است؛ در حالی که مقاومت تک محوری نمونه‌ی آلوده به ۴٪ نفت و تثبیت شده با همان میزان آهک، برابر با ۳٫۸۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بوده است (شکل ۸)، که روند کاهش مقاومت به میزان ۱۶٫۱۵٪ بوده است.^[۲۹،۱۵]

همچنین افزایش قابل توجهی در مقادیر مقاومت تک محوری نمونه‌ها با بالا رفتن سن عمل آوری نمونه‌ها مشاهده شده است (شکل ۹). به طور مثال، مقاومت تک محوری نمونه‌های آلوده به ۱۰٪ نفت و تثبیت شده با آهک ۹٪ در سن‌های عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب برابر با ۹٫۳۹ و ۱۵٫۸۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بوده است. همچنین روند افزایش برای نمونه‌های آلوده به نفت ۴ و ۷ درصد مشاهده شده است (شکل ۱۰). بدین ترتیب افزایش ۶۸٫۷ درصدی در مقاومت نمونه‌ها رخ داده است، که حاکی از آن است که شرایط واکنش خاک و آهک در دمای اتاق فراهم بوده است.^[۲۹،۱۵]

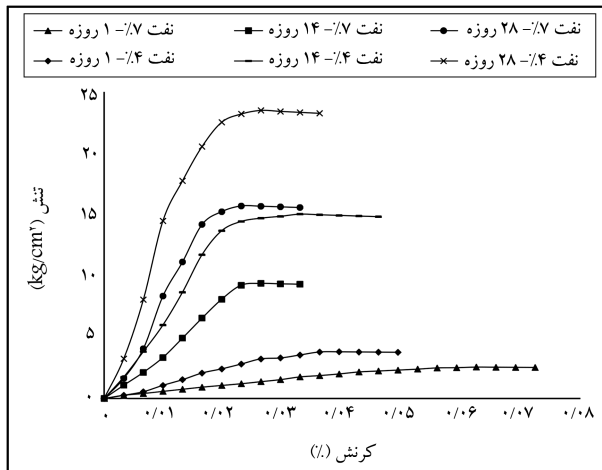
با توجه به بررسی نتایج ارائه شده‌ی بیشینه‌ی مقاومت به دست آمده در پژوهش حاضر، مقاومت نمونه‌های آلوده به نفت ۷٪ بوده است، که با مقایسه‌ی

توانسته‌اند به خوبی خلل و فرج بین دانه‌های خاک را پر کنند، سبب افزایش میزان رطوبت بهینه‌ی خاک شده است (شکل ۵ ج) با توجه به پژوهش مشابه، عبدی و همکاران (۲۰۱۶) نیز بیان کرده‌اند که با افزودن آهک به میزان خاک، مقادیر رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک بیشینه کاهش یافته‌اند.^[۲۶،۲۰]

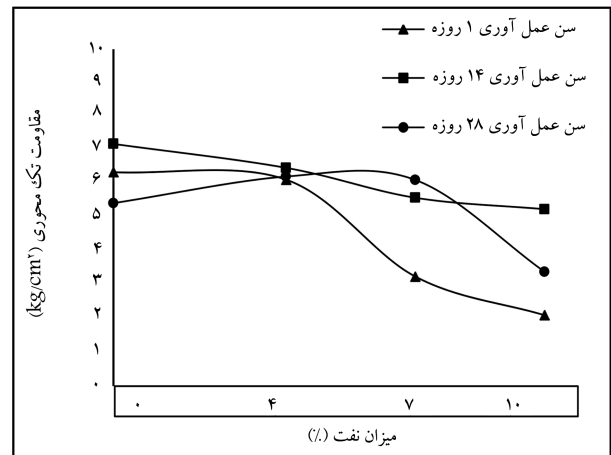
۲.۴. نتایج آزمایش مقاومت تک محوری نمونه‌ها

با بررسی نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌های مقاومت تک محوری و مقایسه‌ی منحنی‌های تنش - کرنش حاصل از آزمایش مقاومت تک محوری می‌توان دریافت که به طور کلی آلودگی خاک به نفت باعث کاهش قابل توجهی در مقدار مقاومت نهایی نمونه‌ها در سن‌های عمل آوری مختلف شده است (شکل ۶)؛ به طوری که مقاومت نمونه‌هایی که آلودگی نفتی ۱۰٪ داشته‌اند، نسبت به مقاومت نمونه‌هایی که آلودگی ۰، ۴ و ۷ درصد نفتی داشته‌اند، کمتر بوده است.

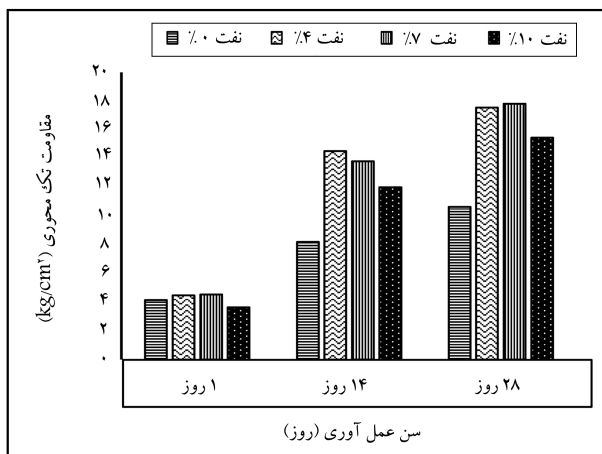
مقاومت نمونه‌های بدون آلودگی نفتی و آهک در سن عمل آوری ۱ روزه برابر با ۳٫۳۹ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بوده است و این در حالی است که مقاومت نمونه‌های آلوده به نفت ۱۰٪ در همان شرایط یکسان برابر با ۲٫۱۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بوده است (شکل ۷). با توجه به بررسی نتایج به دست آمده، این روند کاهشی



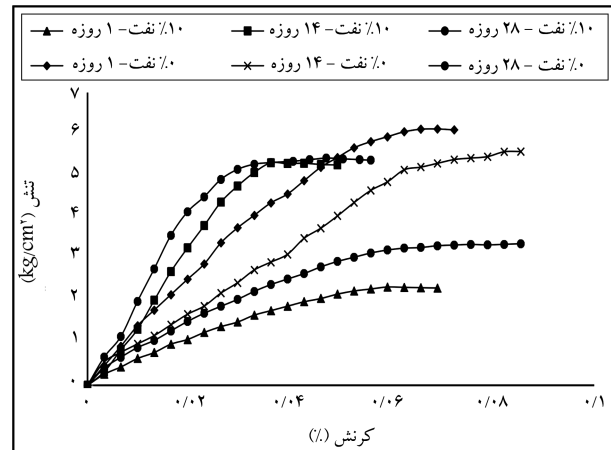
شکل ۸. نمودار تنش - کرنش نمونه‌های تثبیت شده با آهک ۹٪ و آلوده به ۴ و ۷ درصد نفت.



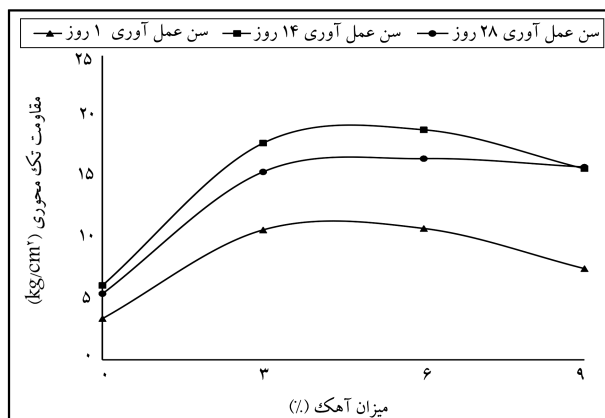
شکل ۶. نمودار تأثیر آلودگی نفتی در مقاومت تک محوری نمونه‌ها در سن‌های عمل آوری مختلف.



شکل ۹. نمودار مقایسه‌ی سن عمل آوری با مقاومت تک محوری نمونه‌های خاک تثبیت شده با آهک ۹٪.



شکل ۷. نمودار تنش - کرنش نمونه خاک آلوده به ۰ و ۱۰ درصد نفت در سن‌های عمل آوری مختلف.



شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ی میزان آهک و مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها.

شده است؛ و به این ترتیب باعث کاهش میزان آلودگی خاک به مواد نفتی شده است. [۲۶۳]

۳.۴. نتایج آنالیز ریزساختار

با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری، بیشترین مقاومت به دست آمده مربوط به نمونه‌ی خاک آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت شده با آهک ۶٪ بوده است به همین دلیل، به منظور مقایسه‌ی نتایج، آزمایش‌های آنالیز ریزساختار بر روی نمونه‌ی خاک آلوده و نمونه‌ی خاک آلوده‌ی تثبیت شده با آهک در سن‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴ و ۲۸ روز صورت پذیرفته‌اند.

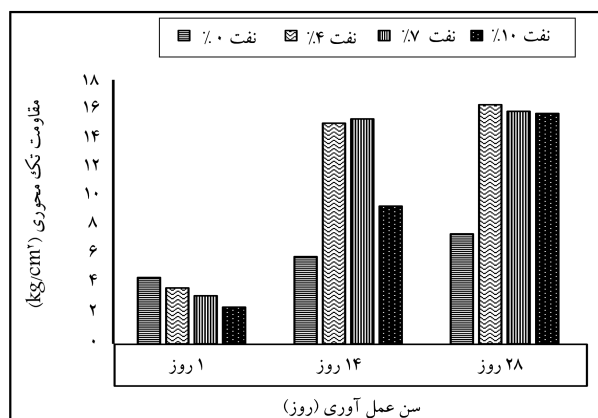
۱.۳.۴. نتایج طیف‌سنج پراش اشعه‌ی ایکس (XRD)

با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیز XRD، نمونه‌ی خاک آلوده به ۷٪ نفت با سن عمل‌آوری ۲۸ روز نشان می‌دهد که کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده‌ی خاک، کلسیت $CaCO_3$ ، کوارتز SiO_2 ، سیپولیت 25 و $(Mg, Fe)_2Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$ کوردیوریت 26 $(Mg_2Al_2Si_2O_{18})$ و اورتیت 27 $(CaAl_2Si_2O_8)$ هستند. با توجه به طیف مذکور، بالاترین پیک در مقایسه با سایر کانی‌ها مربوط به کوردیوریت است (شکل ۱۳ الف) و نتایج آنالیز XRD نمونه‌ی خاک آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت شده با آهک ۶٪ با سن عمل‌آوری ۲۸ روز نشان می‌دهد که کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده‌ی خاک، کلسیت $(CaCO_3)$ ، کوارتز (SiO_2) ، سیپولیت $(Mg, Fe)_2Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$ و پلی‌گورسکیت $(MgAlSi_2O_7(OH) \cdot 4H_2O)$ هستند، که بالاترین پیک در مقایسه با سایر کانی‌ها مربوط به کلسیت است (شکل ۱۳ ب).

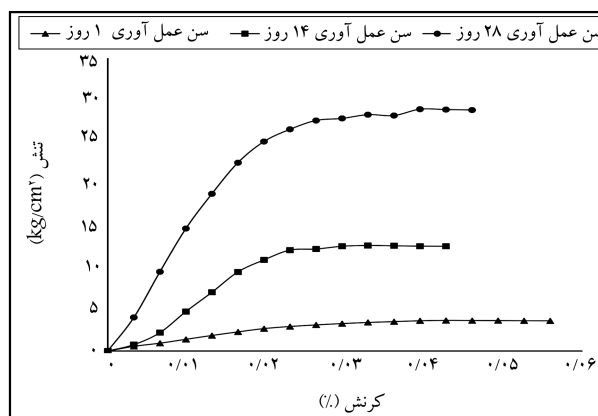
با مقایسه‌ی نتایج، ساختار کانی‌های موجود در هر دو ترکیب خاک آلوده‌ی تثبیت نشده و تثبیت شده با آهک، نسبتاً مشابه بوده‌اند. تفاوت اصلی در ترکیب‌های کانی‌های تشکیل‌دهنده به هنگام افزودن آهک رخ داده است، زیرا این امر موجب شروع واکنش‌های پوزولانیک و تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده است، که به دنبال آن افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌های آلوده و تثبیت شده با آهک است. [۷]

۲.۳.۴. نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی (FE – SEM)

مطابق با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی خاک رس آلوده به نفت ۷٪ دارای ساختار ورقه‌یی و ناپوسته است و حفره‌های خالی و متخلخل بین ذرات خاک مشاهده می‌شود، که همین امر نیز موجب کاهش مقاومت نمونه‌ها شده است (شکل ۱۴ الف). با مقایسه‌ی تصاویر نمونه‌های تثبیت شده با آهک ۶٪ می‌توان



شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ی سن عمل‌آوری با مقاومت تک‌محوری نمونه‌های خاک تثبیت شده با آهک ۹٪.



شکل ۱۱. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت شده با آهک ۶٪.

سن‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴ و ۲۸ روز مقادیر مقاومت تک‌محوری برابر با ۳٫۶۶، ۱۲٫۶۲ و ۱۸٫۹۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده‌اند (شکل ۱۱)، که حاکی از افزایش ۴۱۶٫۶ درصدی مقاومت در سن عمل‌آوری ۲۸ روز بوده است. با بررسی‌های بیشتر و با مقایسه‌ی میزان آهک افزوده شده مشخص شده است که نمونه‌های تثبیت شده با آهک ۶٪ در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده با آهک ۳ و ۹ درصد، مقاومت تک‌محوری بیشتری داشته‌اند. از طرفی، با افزودن آهک تا ۹٪ وزنی به نمونه‌های رسی آلوده به ۷٪ نفت، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها کاهش ۳۷۸٫۹ درصدی در سن عمل‌آوری ۲۸ روز داشته‌اند (شکل ۱۲). [۲۸، ۲۰۳]

به بیان دیگر، دلیل این نتایج را می‌توان به این صورت بیان کرد که با پیشرفت واکنش تبادل یونی، ذرات تشکیل‌دهنده‌ی خاک مجتمع و با تغییر بافت خاک به بافت دانه‌یی، موجب اصلاح مقاومت خاک شده است. در سن‌های عمل‌آوری بیشتر، با پیشرفت واکنش‌های یونی، pH افزایش یافته و باعث حل شدن سیلیکا و آلومینای خاک و شروع واکنش‌های پوزولانی شده است. این واکنش بین آب، آهک و مواد سیلیس و آلومین دار خاک صورت گرفته و باعث تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته 21 و آلومینات کلسیم هیدراته 22 شده است. این ترکیبات با منسجم و سیمانی کردن ذرات تشکیل‌دهنده‌ی خاک، باعث افزایش مقاومت خاک شده‌اند. همچنین اضافه کردن آهک موجب افزایش غلظت یون‌های فلزی در خاک شده است، که به نوبه‌ی خود موجب تشکیل ترکیب‌های هیدروکربنی پایدار با فلز

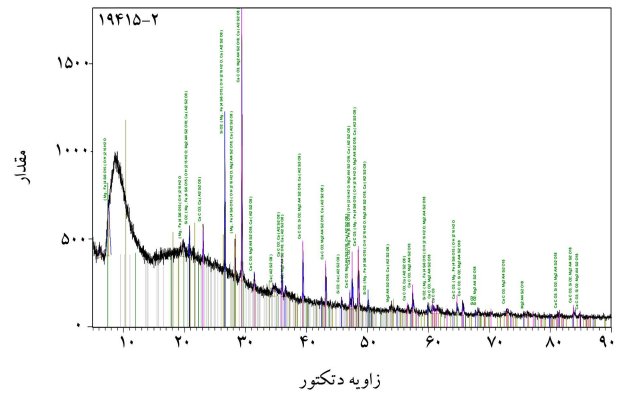
منسجم‌تری مشاهده می‌شوند (شکل‌های ۱۴ ب، ج و د). [۶] همچنین با مقایسه‌ی نتایج نمونه‌های تثبیت شده با آهک در سن‌های عمل‌آوری ۱ و ۲۸ روز (شکل‌های ۱۴ ب و د)، مشاهده می‌شود که با سپری شدن سن عمل‌آوری واکنش‌های پوزولانیک در خاک به بیشترین حد خود رسیده و همچنین خاصیت سیمانی شدن ذرات آهک به‌عنوان ماده‌ی تثبیت‌کننده در خاک بیشتر شده است؛ که همین امر نیز موجب افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تثبیت شده در سن عمل‌آوری ۲۸ روز شده است. [۲۹، ۲۲، ۲]

۵. نتیجه‌گیری

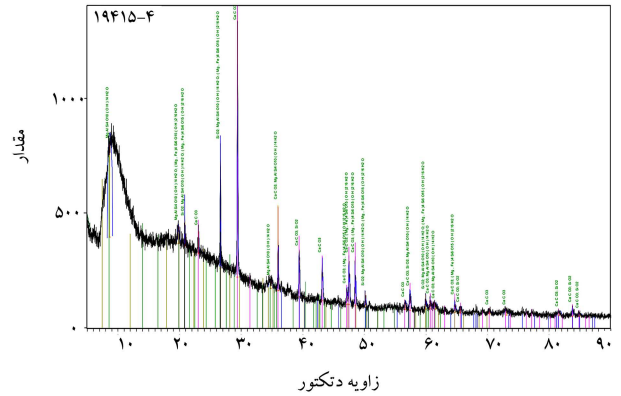
در پژوهش حاضر، به بررسی آزمایشگاهی تغییرات رفتار مقاومتی و ریزساختاری خاک رس آلوده به نفت در منطقه‌ی خوزستان پرداخته شده است. به این منظور، ابتدا اختلاط خاک با آهک به میزان‌های ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی و آلودگی نفتی به میزان‌های ۰، ۴، ۷ و ۱۰ درصد جهت میکس ۴۸ عدد نمونه‌ی خاک به منظور ساخت ۱۴۴ نمونه‌ی استوانه‌یی به‌دلیل ۳ بار تکرارپذیری آزمایش صورت پذیرفته است، که با سپری شدن سن‌های عمل‌آوری ۱، ۱۴ و ۲۸ روز، تحت آزمایش مقاومت تک‌محوری قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان اظهار داشت که:

- نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد نمونه‌ها نشان می‌دهند که با افزایش میزان آلودگی نفتی در خاک، کاهش ۴۴/۴ درصدی میزان رطوبت بهینه در خاک ایجاد شده است؛
- نتایج آزمایش‌های تراکم استاندارد نشان می‌دهند که با افزایش میزان آهک در خاک، به دلیل ریز بودن ذرات آهک و توانایی پر کردن خلل و فرج بین ذرات خاک، وزن مخصوص آهک افزایش یافته و موجب افزایش میزان رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک پیشینه شده است؛
- مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در سن عمل‌آوری ۲۸ روز نسبت به سن‌های عمل‌آوری ۱ و ۱۴ روز، افزایش ۶۷/۸ درصدی داشته است؛ که حاکی از عملکرد و واکنش مناسب کانی‌های خاک رسی با آهک در طی زمان بوده است؛
- با افزودن آهک تا میزان ۶٪ وزنی به نمونه‌های خاک آلوده به ۷٪ نفت، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها ۴۱۶/۶٪ افزایش یافته‌اند، که پیشینه‌ی مقاومت تک‌محوری به دست آمده در پژوهش حاضر است. از طرفی، با افزودن آهک تا میزان ۹٪ وزنی، مقاومت نمونه‌های خاک آلوده به نفت، کاهش ۳۷/۷ درصدی داشته‌اند. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن آهک تا میزان ۹٪ وزنی به نمونه‌ها، نه فقط موجب افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها نشده است، بلکه کاهش مقاومت تک‌محوری در نمونه‌ها نیز رخ داده است؛
- نتایج آنالیز ریزساختاری نشان می‌دهند که خاک رس آلوده به نفت ۷٪، دارای ساختار ورقه‌یی و ناپیوسته بوده و حفره‌های خالی و متخلخل بین ذرات خاک مشاهده شده‌اند. این در حالی است که در نمونه‌های آلوده و تثبیت‌شده با آهک ۶٪، کاهش تخلخل و حفره‌های خالی در نمونه رؤیت شده است، که این نیز خود دلیلی بر توانایی آهک بر توان تبادل کاتیونی با ذرات خاک و همچنین دادن واکنش‌های پوزولانیک در طی زمان است، که موجب افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها شده است.

۱٫۵ سانت^۰ سانت

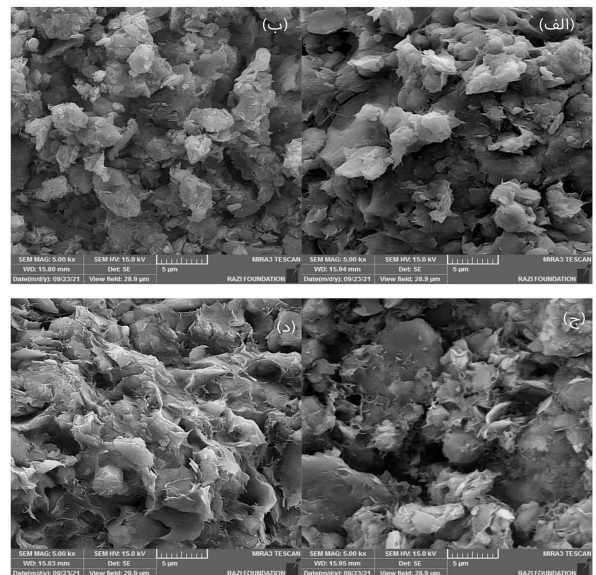


الف) نمونه‌ی خاک آلوده به ۷٪ نفت با سن عمل‌آوری ۲۸ روز؛



ب) نمونه‌ی خاک آلوده به ۷٪ نفت و تثبیت شده با آهک ۶٪ با سن عمل‌آوری ۲۸ روز.

شکل ۱۳. نتایج طیف‌سنجی اشعه‌ی ایکس.



الف) در سن عمل‌آوری ۲۰ روز و همچنین خاک آلوده به ۷٪ نفت تثبیت شده با ۶٪ آهک در سن‌های عمل‌آوری؛

ب) ۱ روز؛ ج) ۱۴ روز؛ د) ۲۸ روز.

شکل ۱۴. تصویرهای میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های خاک آلوده به ۷٪ نفت.

دریافت که افزودن آهک ۶٪ به دلیل توانایی بر تبادل کاتیونی با ذرات خاک، منجر به کاهش ساختار فولکولوی خاک شده و ذرات دارای پیوستگی و ساختار

پانوشتها

1. portelina
2. maximom dry density
3. optimom moisture content
4. Ojuri
5. unconfined compressive strength
6. cohesion
7. Zeety
8. Pham
9. Hydrate Lime
10. Masjedsoleyman
11. plastisity index
12. unified soil classification system
13. soshlet extractor
14. Ec meter
15. centerfuge
16. SEM
17. XRD
18. peak
19. curing day
20. stress
21. CSH
22. CAH
23. calcite
24. quartz
25. sepiolite
26. cordierite
27. Anorthite

منابع (References)

1. Ostovar, M., Ghiassi, R., Mehdizadeh, M. and et al. "Effects of crude oil on geotechnical specification of sandy soils", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **30**(1), pp. 58-73 (2020).
2. Sobhani Nezhad, R., Nasehi, A., Uromeihy, A. and et al. "Utilization of nanosilica and hydrated lime to improve the unconfined compressive strength (UCS) of gas oil contaminated clay", *Geotech. Geol. Eng.-Springer Nature Switzerland*, **39**, pp. 2633-2651 (2021).
3. Mohammadi, M. and Moharamzade Sarey, K. "Evaluation of lime efficiency on improvement of contaminated soils with petroleum products in Tabriz refinery", *Journal of Civil Modarres*, **52** (in Persian) (2015).
4. Portelinha, F., Correia, N., Mendes, I. and et al. "Geotechnical properties and microstructure of a diesel contaminated lateritic soil treated with lime", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **30**(7), pp. 838-861 (2021).
5. Ojuri, O. and Oluwatuy, O. "Compacted sawdust ash-lime stabilised soil-based hydraulic barriers for waste containmen", College of Science and Engineering, Landmark University, Omu-Aran, Nigeria (2018).
6. Shahidi, M., Farokhi, F. and Asefi, F. "Laboratory study of the effect of adding nanoparticles-clay on improving the strength properties of diesel-contaminated clay sand soil", *Civil Journal of Amirkabir*, **51**(6), (In Persian) (2018).
7. Nasehi, A., Uromeihy, A., Nikudel, M. and et al. "Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils", *Geotech. Geol. Eng.-Springer International Publishing*, **34**, pp. 333-345 (2015).
8. Talebzadeh, I. and Hajiani Boushehrian, A. "Laboratory modeling of oil contamination propagation effect on subgrade reaction modulus of fine grained sand", *Shairf Journal of Civil Engineering, Article in Press* (In Persian) (2019).
9. Zomorodian, S.M.A. and Rahimi Haghighi, V.R. "Assessment of geotechnical characteristic of bentonite clay contaminated by gasoline", *Shairf Journal of Civil Engineering*, **2**(33), pp. 77-82 (In Persian) (2018).
10. Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. and et al. "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolin-ite", *Engineering Geology*, **166**, pp. 11-16 (2013).
11. Nasiri, H., Khayat, N. and Mirzababaei, M. "Simple yet quick stabilization of clay using a waste by-product", *Transportation Geotechnics*, **28**, 100531 (2021).
12. Bakhshizade, A., Khayat, N. and Horpibulsuk, S. "Surface stabilization of clay using sodium alginate", *Case Studies in Construction Materials*, **16**, e01006 (2022).
13. Lin, D.F., Lin, K.L., Hung, M.J. and et al. "Sludge ash/ hydrated lime on the geotechnical properties of soft soil", *Journal of Hazardous Materials*, **145**(1), pp. 58-64 (2007).
14. Zeety, M., Abdullah, Y., Al-Adhami, M. and et al. "Compressive strength of stabilised granitic residual soil using mixture of pineapple fibre-hydrated lime", *Sustainability*, **14**(7), 3826 (2022).
15. Pham, V., Erwin, O., Dominic E. and et al. "Effects of binder types and other significant variables on the unconfined compressive strength of chemical-stabilized clayey soil using gene-expression programming", *Neural Computing and Applications*, **34**, pp. 9103-9121 (2022).
16. Tastan, E.O., Edil, T.B., Benson, C.H. and et al. "Stabilization of organic soils with fly ash", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **137**(9), pp. 819-833 (2011).
17. Saride, S., Puppala, A.J. and Chikyala, S.R. "Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays", *Applied Clay Science*, **85**, pp. 39-45 (2013).
18. Daryae, M. and Kashefpour, S.M. "Investigation of the effect of adding soft sand and lime on strength properties of clay soils", *Journal of Water and Soil*, **25**(2), pp. 230-239 (In Persian) (2011).
19. Oluremi, J.R. and Adedokun, S.I. "Valorization of spent engine oil contaminated lateritic soil with high calcium waste wood ash", *Journal of Eng. Research*, **7**(1) (March, 2019).
20. Muntohar, A. and Hantoro, G. "Influence of the rice husk ash and lime on engineering properties of clayey sub-grade", Civil Engineer, Soil Mechanics Laboratory Department of Civil Engineering, Muhammadiyah University of Yogyakarta, Indonesia (2000).
21. Maubec, N., Deneele, D. and Ouvrard, G. "Influence of the clay type on the strength evolution of lime treated material", *Applied Clay Science*, **137**, pp. 107-114 (2016).

22. Di Sante, M., Fratolocchi, E., Mazzieri, F. and et al. "Time of reactions in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour", *Applied Clay Science*, **99**, pp. 100-109 (2014).
23. Roshangar, K., Alami, M. and Hoshyar, Y. "Laboratory study of the effect of lime on the process of self-healing and divergence of clay soils", *Civil Journal of Amirkabir*, **62**(6) pp. 1360-1370 (In Persian) (2020).
24. Sakr, M.A., Shahin, M.A. and Metwally, Y.M. "Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content", *Geotechnical and Geological Engineering*, **27**(5), pp. 105-113 (2009).
25. Sajadian, M. and Barkhordari, K. "Investigating the effect of the type of lime and mixing to the improvement of swelling soils", *Shairf Journal of Civil Engineering*, **4**(2), pp. 141-146 (In Persian) (2017).
26. Abdi. M.R., Mirzaeifar. B.H., Rafeinia. C.M. and et al. "Lime stabilized clay reinforced with geogrids", *Journal of Experimental Research in Civil Engineering*, **3**(1), pp. 63-72 (In Persian) (2016).
27. Oluwatuyi, O., Ojuri, O. and Khoshghalb, A. "Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **12**(1), pp. 160-167 (2019).
28. Kumar Jha, A. and Sivapullaiah, P. "Mechanism of improvement in the strength and volume change behavior of lime stabilized soil", *Engineering Geology*, **198**, pp. 53-64 (2015).
29. Mardan, S., Gitipour, S. and Abdoli, M. "Purification of contaminated soil with petroleum compounds using solidification method and stabilization (case study: industrial town, salafchegan)", *Journal of Ecology*, **43**(2), pp. 233-250 (In Persian) (2017).
30. Mazaher, A. and Nourzad, A. "Investigation of the effect of adding nanoclay and lime on mechanical properties and self-healing of fine-grained soils", *Journal of Ecology*, **14**(2), (In Persian) (2020).
31. ASTM D854, "Standard test method for specific gravity of soils", American Society of Testing Materials (2010).
32. Oluwapelumi, O. and Oluwatuyi, O. "Strength characteristics of lead and hydrocarbon contaminated lateritic soils stabilized with lime-rice husk ash", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **19**(Z2), pp. 10027-10042 (2014).
33. Baldovino, A., Moreira, E., Teixeira, W. and et al. "Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in curitiba, Brazil", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **10**(1), pp. 188-194 (2017).
34. Kermani, M. and Ebadi, T. "The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **21**(5), pp. 655-671 (2012).
35. Akinwumi, I., Maiyaki, U., Adubi, S. and et al. "Effects of waste engine oil contamination on the plasticity, strength and permeability of lateritic clay", *International Journal of Scientific & Technology Reseach*, **3**(9), pp. 331-335 (2014).
36. ASTM D422-63. "Standard test method for particle-size analysis of soils", American Society of Testing Materials (2002).
37. ASTM D4318. "Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils", American Society of Testing Materials (2006).
38. ASTM D698. "Standard test method for laboratory compaction characteristic", American Society of Testing Materials (2000).
39. ASTM D4972. "Standard test metod for pH of soils", American Society of Testing Materials (2001).
40. ASTM D1411, "Standard test methods for water-soluble chlorides present as admixtures in graded aggregate road mixes", American Society of Testing Materials (2004).
41. BS 1377. "Methods of test for soils for civil engineering purposes, part 3, chemical and electro-chemical tests", Determination of the Sulphate Content of Soil and Ground water Reagents (1990).
42. BS EN 13925-2. "Non-destructive testin. X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials procedures", (2002).
43. ASTM D2166. "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils", American Society of Testing Materials (2000).
44. Ghare, S., Yazdani, K. and Besharat, V. "Laboratory study of the effect of clay and silica nanoparticles on the behavior of silty-clay soils", *Civil Journal of Amirkabir*, **53**(11), pp. 4723-4742 (In Persian) (2022).
45. Liu. C. and Evett, J.B., *Soil Properties: Testing, Measurement and Evaluation*, Prentice-Hall Inc, (1984).
46. Oluwatuyi, O., Ojuri, O. and Khoshghalb, A. "Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **12**(1), pp. 160-167 (2019).
47. Khamsehchian, M., Charkhabi, A.H. and Tajik, M. "Effect of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils", *Engineering Geology*, **89**(3-4), pp. 220-229 (2007).