

بررسی تأثیر سیمان در بهسازی خاک رسی آلوده به ماده‌ی آلی آنتراسن

محمد مهدی خلوصی* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علی رئیسی استبرق (دانشیار)

جمال عبداللهی (مربی)

دانشکده‌ی مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۶ (دوره‌ی ۲ - ۳، شماره‌ی ۱/۴، ص. ۳۸-۳۹)

آلودگی خاک به مواد آلی از جمله نگرانی‌های مهم زیست‌محیطی به شمار می‌رود که در کیفیت خاک، هوا و آب زیرزمینی مؤثر است. امکان بهسازی خاک‌های آلوده‌ی ذکر شده همواره از موضوعات مورد توجه پژوهشگران بوده است. در پژوهش حاضر، تأثیر افزودن سیمان به منظور بهسازی خاک رسی آلوده به ماده‌ی آلی آنتراسن از منظر ریزساختاری و آزمایشگاهی مطالعه شده است. بدین منظور نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به آنتراسن، خاک - سیمان و خاک آلوده‌ی بهسازی شده با مقادیر (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد) سیمان، در زمان‌های عمل‌آوری (۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه) تهیه و آزمایش مقاومت تک‌محوری بر روی آنها انجام شده است. بررسی نتایج آزمایشگاهی و همچنین تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی نشان داده است که افزودن آنتراسن به خاک، علی‌رغم ایجاد حالت لخته در خاک آلوده، مقاومت آن را نسبت به خاک طبیعی کاهش می‌دهد و افزودن سیمان به مخلوط ذکر شده، سبب افزایش مقاومت آن می‌شود که این افزایش تابعی از درصد سیمان به کار رفته و زمان عمل‌آوری است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که خاک آلوده به آنتراسن قابلیت بهسازی با سیمان را دارد.

واژگان کلیدی: مقاومت تک‌محوری خاک، میکروسکوپ الکترونی، لایه‌ی مضاعف، ساختمان لخته، ریزساختار.

۱. مقدمه

آلودگی خاک توسط انواع گوناگونی از آلاینده‌ها، واقعیت زندگی امروز و حقیقت تاریخی عصر حاضر است. نفوذ فاضلاب کنترل نشده، بی‌رویه و بعضاً غیرعمد، مدیریت و کنترل ضعیف و نادرست مواد شیمیایی، سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب ناکافی و همچنین ذخیره و نگهداری نادرست زباله‌های خطرآفرین و نشت از مخازن و تخلیه‌ی غیرقانونی زباله‌ها، از جمله منابع اصلی آلودگی خاک به شمار می‌روند. یکی از منابع اصلی آلاینده که با ورود به خاک، ویژگی‌های آن را تغییر می‌دهد، هیدروکربن‌های نفتی هستند؛ که ممکن است به صورت طبیعی در محیط زیست وجود داشته باشند و یا از طریق نشت از مخازن و تأسیسات انتقال وارد محیط خاک شوند. هیدروکربن‌های نفتی از مهم‌ترین آلاینده‌های آلی هیدروکربنی هستند که وجود آنها در خاک، نگرانی‌های بسیاری را در باره‌ی سلامت انسان و محیط زیست ایجاد کرده است.^[۱] آلودگی خاک علاوه بر تهدیدهای زیست‌محیطی، همواره از منظر ژئوتکنیکی نیز حائز اهمیت بوده است؛ چرا که خاک به عنوان بستر اصلی ساخت‌وساز و انجام پروژه‌های عمرانی، با ورود مواد آلاینده دچار تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۳۰، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۲/۲۴، پذیرش ۱۳۹۵/۱/۲۴.

mm.kholoosi@ut.ac.ir
raeesi@ut.ac.ir
jaabaik@ut.ac.ir

می‌شود.^[۲] امروزه به منظور بهبود ویژگی‌های ذکر شده‌ی خاک، اقدام به تثبیت یا بهسازی آن می‌کنند. بهسازی خاک به روش‌های گوناگونی مانند روش‌های شیمیایی، فیزیکی، مکانیکی، بیولوژیکی و الکتریکی انجام می‌شود. بهسازی خاک‌های آلوده، معمولاً با این اهداف صورت می‌پذیرد:

-- تثبیت مواد آلاینده در خاک‌های آلوده شده به منظور جلوگیری از انتقال آلاینده‌ها به لایه‌ی زیرین خاک و منابع آب زیرزمینی که با عنوان تثبیت و جامدسازی^[۳] شناخته می‌شود.^[۴]

-- بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌های آلوده، به منظور استفاده در پروژه‌های عمرانی با در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی.

یکی از رایج‌ترین مواد کاربردی به منظور بهسازی خاک، افزودن سیمان به آن است که از جمله روش‌های شیمیایی به‌شمار می‌رود. از مطالعه‌ی پژوهش‌ها چنین بر می‌آید که استفاده از سیمان تأثیر به‌سزایی در بهبود مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک آلوده به مواد آلاینده دارد و از جمله روش‌های اقتصادی در امر بهسازی خاک به حساب می‌آید.^[۵-۱۱] مثلاً، استفاده از مقادیر ۳۰٪ سیمان و ۲۰٪ بنتونیت به منظور

بهسازی و پاک‌سازی خاک حاوی فلزات سنگین و رسیدن به حد مطلوب مقاومت در سال ۲۰۰۸، انجام شده است.^[۹] همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۹،^[۱۰] با استفاده از مقادیر ۵ تا ۳۰ درصد سیمان، نمونه‌ی خاک‌های آلوده به سرب و آرسنیک، بهسازی و پاک‌سازی شده و سپس مقاومت فشاری محصور نشده‌ی نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. به منظور بررسی وضعیت بهسازی و پاک‌سازی خاک آلوده به ماده‌ی آلی کریسول (ماده‌ی شیمیایی خطرناک که در دوز بالا برای سلامت انسان و حیوانات خطرآفرین هستند) که از پالایشگاه نفت تهیه شده بودند،^[۱۱] از مقادیر ۲۰ و ۳۰ درصد سیمان و ۱۵ و ۳۰ درصد بنتونیت استفاده شده و نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده‌ی (USC) مذکور نشان داده است که برای نمونه‌های بهسازی شده‌ی ۲۸ روزه، مقاومت فشاری تا ۳۰۰۰ کیلوپاسکال برای خاک بهسازی شده با ۳۰٪ سیمان و ۱۵٪ بنتونیت افزایش می‌یابد. در بعضی موارد، پروژه‌های عمرانی باید در مناطقی اجرا شوند که خاک آن نواحی به ترکیبات نفتی آلوده است. از طرفی انتقال خاک مناسب از مناطق دیگر نیز هزینه دارد، به طوری که ممکن است موجبات عدم توجیه اقتصادی پروژه را فراهم سازد. بنابراین با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و همچنین زیست‌محیطی، باید استفاده از خاک محلی را به عنوان گزینه‌ی مقرون به صرفه در نظر گرفت. لذا لازم است خاک محلی از نظر وضعیت و امکان بهسازی مطالعه شود. تعداد زیادی از پژوهشگران با بررسی وضعیت بهسازی خاک‌های آلوده به مواد آلی بیان داشته‌اند که خاک‌های مذکور را می‌توان در پروژه‌های عمرانی نظیر: راه‌سازی، روسازی، ساخت خاکریزها و غیره به کار برد.^[۱۲،۱۳]

از طرف دیگر، کسب اطلاعات لازم در خصوص ساختمان خاک در بررسی مسائل بهسازی و نحوه‌ی واکنش خاک با مواد آلاینده، اهمیت زیادی دارد. ساختمان خاک به نحوه‌ی قرارگیری هندسی ذرات در کنار یکدیگر در یک توده‌ی خاک اطلاق می‌شود. ساختمان خاک‌های رسی از دو بخش با عنوان ریزساختار^۲ و درشت‌ساختار^۳ تشکیل شده است. معمولاً عمل متقابل کانی‌های رسی با مواد افزودنی یا آلاینده در بخش ریزساختار صورت می‌پذیرد. امروزه اطلاعات مهمی در خصوص ساختمان خاک به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی (SEM)^۴، قابل دست‌یابی است و این روش به صورت گسترده در سراسر جهان استفاده می‌شود. پژوهشگران فراوانی با استفاده از (SEM) به بررسی ساختار خاک رسی و نحوه‌ی تغییر آن به وسیله‌ی افزودنی‌ها و مواد آلاینده پرداخته‌اند.^[۱۴-۱۵]

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی نحوه‌ی تأثیر آلاینده در ساختار خاک، برای آلوده ساختن خاک از ماده‌ی آلی آنتراسن استفاده شده است. معمولاً برای بررسی اثرات PAHs، از آنتراسن به عنوان نماینده‌ی این گروه از هیدروکربن‌ها استفاده می‌شود. هیدروکربن‌های چند حلقه‌ی معطر (PAHs)^۵ در طبیعت یافت می‌شوند، همچنین در اثر سوختن ناقص نفت، گاز، ذغال‌سنگ یا زباله‌ها نیز ایجاد می‌شوند.^[۱۶] آلودگی خاک به PAHs، یکی از مسائل مخاطره‌آمیز در کشورهای تولیدکننده‌ی مشتقات نفتی به شمار می‌رود.^[۱۷] ورود آلاینده‌های مذکور سبب تغییر در مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک نظیر: تنش، ظرفیت باربری، ضریب نفوذپذیری و غیره می‌شود. بررسی پژوهش‌های موجود نشان می‌دهد که تحقیقات و مطالعات در رابطه با بهسازی خاک‌های آلوده، غالباً در ارتباط با آلاینده‌های معدنی (مانند: سرب، جیوه، آرسنیک، روی، مس و غیره) بوده و درباره‌ی مواد آلی به خصوص آلاینده‌های نفتی بسیار محدود بوده است. لذا، در پژوهش حاضر، ویژگی‌های یک خاک آلوده به ماده‌ی آلی آنتراسن مطالعه و سپس امکان بهسازی آن با افزودن درصد‌های گوناگون سیمان در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت با دیدگاه درشت‌ساختار توسط آزمایش‌های آزمایشگاهی و همچنین ریزساختار با عکس‌برداری از نمونه‌ها (توسط SEM) بررسی و سپس نتایج مقایسه و بحث شده‌اند.

۲. مواد و روش‌ها

مواد اصلی به کار رفته در پژوهش حاضر شامل: خاک، سیمان، آب و ماده‌ی آلی آنتراسن بوده است که برای ساخت نمونه‌ها از آنها استفاده شده است. در بخش کنونی، ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی مواد مذکور که برابر با استانداردهای ASTM اندازه‌گیری شده‌اند، به صورت مشروح بیان شده است.

۱.۲. خاک

بیشتر خاک‌های آلوده‌ی موجود در جهان از نوع رسی هستند که با توجه به سطح ویژه‌ی بالا و باردار بودن ذرات خاک‌های رسی، بیشترین واکنش را با مواد آلاینده از خود نشان می‌دهند.^[۸] بنابراین، خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر از نوع رسی انتخاب و ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

بر اساس حدود اتربرگ و مقادیر شن، ماسه، سیلت و رس خاک مورد استفاده که در جدول ۱ نشان داده شده است، خاک مورد مطالعه بر مبنای سیستم متحد طبقه‌بندی (USCS)^۶، رس با ویژگی‌های خمیری (حالت خمیری) پایین (CL) طبقه‌بندی شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی خاک.

مقدار	مشخصه
۲٫۷	وزن واحد حجم دانه‌های جامد (Gs)
۰	شن (درصد)
۲	ماسه (درصد)
۴۵	سیلت (درصد)
۵۳	رس (درصد)
۴۷	حد روانی (درصد)
۲۴	حد خمیری (درصد)
۲۳	شاخص خمیری (درصد)
۱۷٫۹	رطوبت بهینه
۱۷٫۷۵	وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m^2)

جدول ۲. ویژگی‌های شیمیایی خاک.

مقدار	مشخصه
۸۳	$SO_4^{2-} (meq/L)$
۴	$HCO_3^- (meq/L)$
۰٫۶	$CO_3^{2-} (meq/L)$
۶۰	$CL^- (meq/L)$
۱۰	$Mg^{2+} (meq/L)$
۲۴	$Ca^{2+} (meq/L)$
۰٫۳۳	$K^+ (meq/L)$
۱۰٫۲	$CaCO_3 (L)$
۱۰٫۷۴	$Ec (\mu mhos/cm)$
۸	pH

۲.۲. سیمان

سیمان به‌کار رفته در پژوهش حاضر از نوع پرتلند نوع ۱ با وزن واحد حجم (g/cm^3) ۳٫۱۵ است که بخشی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن که در آزمایشگاه تعیین شده است در جدول ۳ ارائه شده است.

۳.۲. آب

آب مورد استفاده در پژوهش حاضر، آب شرب با مشخصات pH، ۷٫۷۶ و میزان کلر و کلسیم - منیزیم به ترتیب ۱٫۷ و ۹٫۱ میلی اکی‌والانت بر لیتر بوده است.

۴.۲. آنتراسن

آنتراسن یک هیدروکربن چند حلقه‌ی معطر است که از قطران ذغال‌سنگ به‌دست می‌آید و در تولید رنگ، نگهداری چوب و پوشش فلزات کاربرد دارد. همچنین یکی از موادی است که در اثر احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی ایجاد می‌شود. قرارگیری در معرض آنتراسن سبب بروز مشکلاتی در سیستم گوارش، خون‌سازی، لنف‌وی و عارضه‌های پوستی در انسان و حیوانات می‌شود؛ آنتراسن توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست (EPA) به‌عنوان یکی از اولویت‌های اصلی آلودگی زیست‌محیطی معرفی شده و از مفاد لیست نگرانی‌های خیلی بزرگ (VHCL)^۸ آژانس شیمی اروپا (ECHA)^۹ است.^[۱۰-۱۲] در پژوهش حاضر، به منظور آلوده ساختن نمونه‌های خاک از آنتراسن ساخت شرکت مرک (MERCK) آلمان استفاده شده است (جدول ۴).

۵.۲. ساخت و نگهداری نمونه‌ها

نمونه‌های مورد نظر در پژوهش حاضر به منظور انجام آزمایش‌ها، شامل: خاک طبیعی، خاک - سیمان، خاک آلوده به آنتراسن و خاک آلوده بهساز شده با سیمان بوده است. برای ساخت نمونه‌های خاک آلوده، از ماده‌ی آنتراسن به میزان ۱۲۰۰ میلی‌گرم در ۱ کیلوگرم خاک (۱۲٪) استفاده شده است که با توجه به بررسی پژوهش‌ها و گزارش‌های مبنی بر مقدار موجود آنتراسن در مناطق آلوده به این ماده‌ی

جدول ۳. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سیمان مورد استفاده.

مقدار	مشخصه
۲۴٫۴	غلظت نرمال (%)
۲۱	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۴۷	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
۳۰۰۰۰	مقاومت فشاری ۷ روزه (kPa)
۴۳۰۰۰	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kPa)

جدول ۴. ویژگی‌های فیزیکی ماده‌ی آنتراسن.

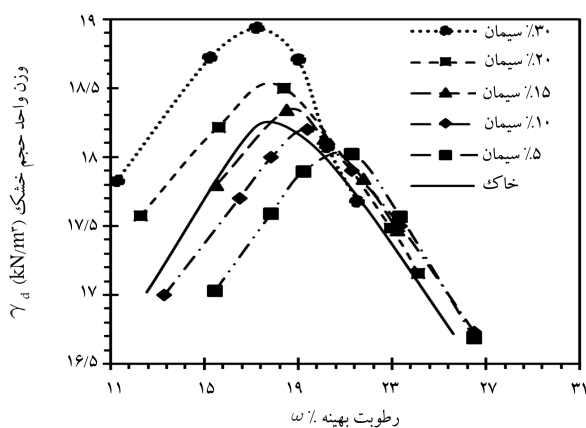
مقدار	مشخصه $Antheracene(C_{14}H_{10})$
۰٫۶۰۲	گرانروی مطلق $24^{\circ}C$ (cp)
۲٫۳۵	ثابت دی‌الکتریک
۱۷۸٫۲۳	جرم مولکولی (g/mol)
۱٫۲۵	چگالی در دمای $20^{\circ}C$ (g/cm^3)
۲۱۸	نقطه‌ی ذوب ($^{\circ}C$)
۳۴۰	نقطه‌ی جوش ($^{\circ}C$)
○○○	ساختار

۶.۲. آزمایش‌ها

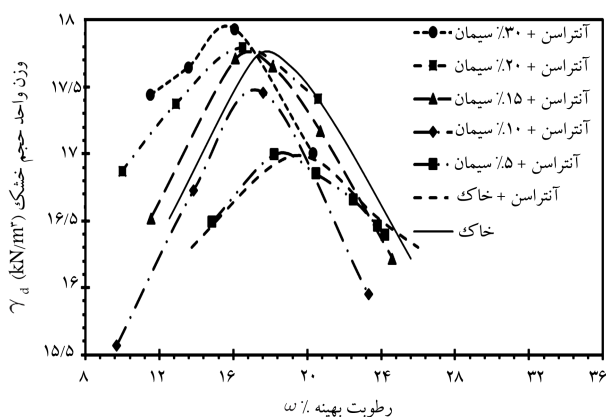
به منظور تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها، بر روی آنها آزمایش مقاومت تک‌محوری (UC) 1° ، برابر با استاندارد ASTM D ۱۶۳۳-۰۰ انجام شده است. طبق استاندارد مذکور، نمونه‌ها ۲ ساعت قبل از قرارگیری در دستگاه بارگذاری، خارج از شرایط نگهداری (محیط اشباع) قرار داده شده‌اند، سپس با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه تا گسیختگی کامل تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. به منظور کاهش خطا، هنگام انجام آزمایش‌های تراکم و مقاومت تک‌محوری، از هر نمونه ۳ تکرار ساخته شده و عدد متوسط آنها به‌عنوان نتیجه‌ی نهایی منظور شده است.

۷.۲. میکروسکوپ الکترونی روشی (SEM)

میکروسکوپ الکترونی به دسته‌ی میکروسکوپ‌ها گفته می‌شود که با استفاده از پرتویی از الکترون‌ها به بررسی اشیا در مقیاس بسیار کوچک می‌پردازند. میکروسکوپ الکترونی روشی نوعی میکروسکوپ الکترونی است که قابلیت عکس‌برداری از سطوح با بزرگ‌نمایی ۱۰ تا 5000000 برابر با قدرت تفکیکی کمتر از ۱ تا ۲۰ نانومتر



شکل ۱. نمودار تراکم خاک طبیعی و خاک - سیمان با درصد‌های گوناگون سیمان.



شکل ۲. نمودار تراکم خاک طبیعی، خاک آلوده به آنتراسن و خاک آلوده به سیمان شده با سیمان.

لخته‌ی بالاتری نسبت به خاک طبیعی قرار دارند، را ندارد و بنابراین کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه را موجب می‌شوند. [۲۵] مطابق شکل ۱، با افزایش مقدار سیمان به ۱۰٪، ذرات سیمان با خاک واکنش نشان می‌دهند و سبب چسبیدن بیشتر ذرات به یکدیگر می‌شوند و ذرات درشت‌دانه‌تری با سطح ویژه‌ی کمتر تشکیل می‌دهند که در این ساختار کاملاً لخته نسبت به حالت قبل، با ذرات ریزتری پر شده‌اند. به عبارت دیگر، با کاهش سطح ویژه به علت تشکیل ذرات درشت‌دانه‌تر و قرارگیری ذرات ریز در این فضاهای ایجاد شده، پتانسیل جذب آب کاهش می‌یابد. همچنین بیشتر بودن وزن واحد حجم ذرات سیمان به نسبت ذرات خاک و جایگزین شدن آنها به جای ذرات خاک، عاملی دیگر برای افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه است. مشابه این نتایج در پژوهش‌های دیگری نیز گزارش شده است. [۲۵، ۲۶]

افزودن ماده‌ی آلی آنتراسن به خاک طبیعی، موجب بروز تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک شده است. شکل ۲، نتایج آزمایش تراکم مربوط به خاک حاوی آنتراسن و همچنین وضعیت بهسازی آن را با سیمان نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه‌ی خاک آلوده، به ترتیب برابر ۱۹٫۵٪ و $17 (kN/m^3)$ هستند که نسبت به خاک طبیعی با رطوبت بهینه‌ی ۱۷٫۹٪ و وزن واحد حجم خشک بیشینه‌ی $17.75 (kN/m^3)$ ، به ترتیب افزایش و کاهش یافته‌اند.

به منظور بحث پیرامون نتایج تراکم شکل ۲، در ابتدا به توضیح تئوری لایه‌ی

(بسته به نوع نمونه) را دارد. [۱۳، ۱۴] در پژوهش حاضر، عکس‌برداری از نمونه‌های خاک طبیعی، خاک - سیمان، خاک آلوده به آنتراسن و نهایتاً خاک آلوده به آنتراسن بهسازی شده با سیمان انجام شده است. این کار به منظور بررسی و تحلیل ریزساختاری نمونه‌ها و مشاهده‌ی تغییر ساختمان خاک در اثر افزودن ماده‌ی آلی آنتراسن و بهسازی با سیمان انجام شده است. نمونه‌های یاد شده در شرایط رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه تهیه شده‌اند. از خاک - سیمان و خاک آلوده به آنتراسن بهسازی شده با سیمان، نمونه‌هایی با مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه اخذ شده است. آماده‌سازی نمونه‌ها مطابق با دستورالعمل (SEM) بدین صورت انجام شده است که از نمونه‌ها به وسیله‌ی یک کارد تیز قطعه‌ی بریده شده است، سپس هر قطعه با قرارگیری بر روی پایه‌ی مخصوص با دستگاه لایه‌نشانی طلا پوشش داده شده و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی رویشی از آن عکس‌برداری شده است.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. تراکم

نتایج آزمایش تراکمی برای خاک طبیعی، نشان دهنده‌ی وزن واحد حجم خشک بیشینه برابر $17.75 (kN/m^3)$ و رطوبت بهینه‌ی ۱۷٫۹٪ بوده است. شکل ۱، همچنین تغییرات وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه‌ی خاک - سیمان با درصد‌های گوناگون سیمان را نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور با افزایش مقدار سیمان، نمودار تراکمی به سمت چپ و بالا انتقال پیدا کرده است؛ یعنی با افزودن سیمان به خاک، وزن واحد حجم خشک خاک افزایش و رطوبت بهینه کاهش یافته است؛ به عبارت دیگر، در یک رطوبت ثابت با افزایش درصد سیمان، وزن واحد حجم خشک خاک افزایش یافته است. دلیل این افزایش را می‌توان بالا بودن وزن واحد حجم نسبی سیمان دانست. کاهش رطوبت بهینه به دلیل کاهش میزان دانه‌های ریز خاک است که علت آن تبادل یونی است که در توده‌ی خاک - سیمان ایجاد شده است. این تبادل یونی سبب می‌شود که سطح ویژه‌ی ذرات خاک کاهش یابد، در نتیجه ظرفیت نگهداری آب در خاک کاهش پیدا می‌کند. نتایج به دست آمده با نتایج برخی پژوهشگران برای خاک‌های رسی متفاوت، سازگاری دارد. [۲۶] با توجه به نمودار تراکمی شکل ۱ مشاهده می‌شود که درصد رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک خاک در حالتی که ۵٪ سیمان به آن اضافه شده است، به ترتیب برابر ۲۱٫۲٪ و $17.5 (kN/m^3)$ است و همان مقادیر زمانی که ۳۰٪ سیمان به خاک افزوده شده است، برابر ۱۷٫۱٪ و $18.8 (kN/m^3)$ هستند. این نتایج حاکی از آن است که تغییرات رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک خاک، ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن هستند.

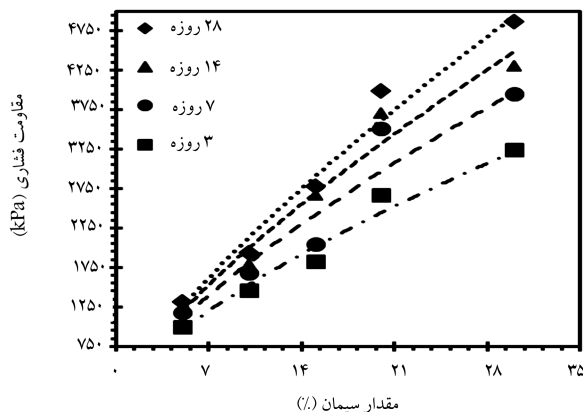
همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در مقادیر ۵ و ۱۰ درصد سیمان، وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه‌ی خاک - سیمان نسبت به خاک طبیعی به ترتیب کاهش و افزایش یافته‌اند. افزودن سیمان به خاک طبیعی به میزان ۵٪، موجب واکنش شیمیایی خاک و سیمان و تشکیل ساختمان تا حدی لخته در توده‌ی خاک - سیمان متراکم شده می‌شود. ایجاد این ساختمان به نوع کانی‌های خاک رسی، pH مایع حفره‌ی و مقدار سیمان بستگی دارد. [۲۴] در ساختاری که ذرات خاک تا حدی لخته هستند، ذرات به هم چسبیده و در بین آنها فضای خالی تشکیل می‌شود که مایع حفره‌ی می‌تواند در آنجا قرار بگیرد. بنابراین اعمال یک انرژی ثابت تراکمی (همان‌گونه که برای خاک طبیعی استفاده شده است) بر روی مخلوط خاک - سیمان با ۵٪ سیمان، قابلیت تغییر و جابه‌جایی ذرات که با درجه‌ی

۲.۳. مقاومت تک محوری

شکل ۳، نشان دهنده تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ی خاک - سیمان با مقادیر گوناگون سیمان ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد) برای زمان‌های عمل آوری متفاوت (۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز) است. شکل ۳ با استفاده از مقادیر نهایی تنش رسم شده و بیانگر آن است که مقاومت نمونه‌های خاک - سیمان، تابعی از مقدار سیمان به کار رفته و زمان عمل آوری است. به گونه‌یی که مقاومت فشاری با افزایش زمان عمل آوری و درصد سیمان افزایش یافته است؛ همچنین مقاومت فشاری با افزایش درصد سیمان مورد استفاده در پژوهش حاضر، به صورت خطی افزایش یافته است.

مطابق شکل ۳ مشاهده می‌شود که در مقادیر ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد سیمان، افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل آوری، بیشتر از ۵۰٪ مقاومت نمونه‌ها پس از ۳ روز عمل آوری است (با ۱۵٪ سیمان، مقاومت ۳ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها به ترتیب برابر ۹۵۳ و $2781.4 (kPa)$ ، با ۲۰٪ سیمان، مقاومت ۳ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها به ترتیب برابر ۲۶۸۱ و $3981.4 (kPa)$ و با ۳۰٪ سیمان، مقادیر مقاومت ۳ و ۲۸ روزه‌ی نمونه‌ها به ترتیب برابر ۳۲۳۷٫۲ و $4866 (kPa)$ هستند. برای مقادیر ۵ و ۱۰ درصد سیمان، مقاومت فشاری در ۲۸ روز، ۳۰٪ بیشتر از مقادیر مشابه در نمونه‌های ۳ روزه است. این موضوع بیان می‌کند که برای درصد‌های بالای سیمان، زمان عمل آوری بیشتری نیاز است تا نمونه، مقاومت لازم را کسب کند. مقاومت فشاری نمونه‌های خاک - سیمان به عنوان یک شاخص برای تعیین کمیته‌ی سیمان مورد نیاز در تهیه‌ی خاک - سیمان به منظور دست‌یابی به مقاومت مطلوب استفاده می‌شود. پژوهش‌های دیگر، نتایجی مشابه پژوهش حاضر را گزارش کرده‌اند.^[۸۶]

شکل ۴، منحنی‌های تنش - کرنش خاک طبیعی و خاک آلوده شده با آنتراسن را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری نهایی خاک طبیعی $393 (kPa)$ و کرنش محوری آن ۲٫۱٪ و مقاومت نهایی خاک آلوده به آنتراسن $1697.1 (kPa)$ در کرنش ۲٫۷٪ بوده است. مطابق شکل مذکور مشاهده می‌شود که افزودن آنتراسن به خاک، موجب کاهش قابل ملاحظه‌ی مقاومت نهایی نسبت به خاک در حالت طبیعی (۱۳۶٪) شده است. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشگران به روندی مشخص در مورد افزودن ماده‌ی آلی به خاک دست نیافته‌اند، که آیا افزودن ماده‌ی آلی به خاک موجب افزایش مقاومت یا کاهش آن می‌شود. عده‌یی از پژوهشگران با افزودن ماده‌ی آلی به خاک با افزایش مقاومت روبرو شده و بیان داشته‌اند که

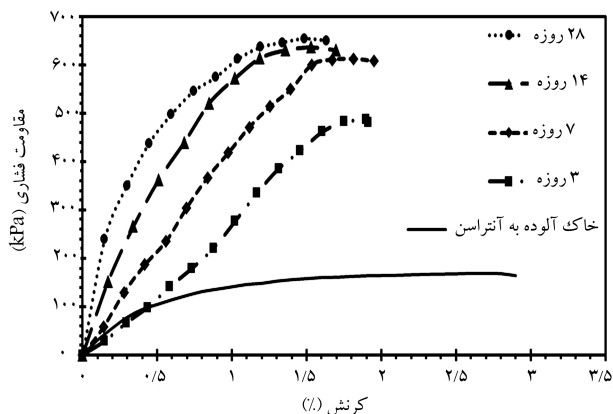


شکل ۳. نمودار تغییرات مقاومت فشاری با درصد‌های گوناگون سیمان در زمان‌های عمل آوری متفاوت.

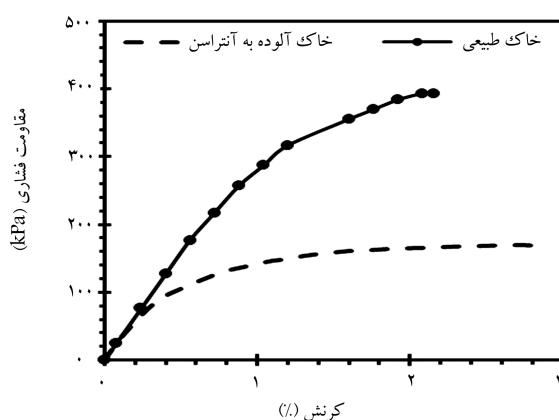
مضاعف پرداخته شده است. ذرات رس به علت بار منفی در سطح خود، توانایی جذب و تبادل یون‌هایی با بار مثبت را دارند. هنگامی که آب به ذرات رس اضافه می‌شود، بارهای مثبت و منفی ذکر شده در اطراف ذرات رس شناور می‌شوند؛ به این حالت لایه‌ی مضاعف الکتریکی (DDL)^{۱۱} گفته می‌شود. به علت وجود لایه‌ی مضاعف، نیروهای گوناگونی در اطراف ذرات رس اعمال می‌شود. این نیروها سبب می‌شوند تا ذرات رس با شکل خاصی در کنار یکدیگر قرار گیرند و ساختمان خاک رسی را تشکیل دهند. نیروها بسته به اینکه بین بارهای هم‌نام یا غیر هم‌نام اعمال شوند، می‌توانند باعث ایجاد نیروی دافعه یا جاذبه بین ذرات رس شوند. در مجموع، در صورتی که نیروهای جاذبه بر نیروهای دافعه غلبه کنند، ذرات رس به حالت نامنظم یکدیگر را جذب می‌کنند، به گونه‌یی که گوشه‌های هر ذره با بار مثبت، در تماس با سطح ذرات دیگر با بار منفی قرار می‌گیرند. ذرات خاک در این حالت، ساختمان لخته را تشکیل می‌دهند.^[۲۶]

مطالعه‌ی نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در رابطه با افزودن مواد آلی به خاک‌های رسی نشان می‌دهد که افزودن آنها به خاک، با کاهش ضخامت لایه‌ی مضاعف همراه است که علت این امر را می‌توان فشرده شدن ساختمان خاک در اثر کاهش نیروهای دافعه دانست. در نتیجه همان‌گونه که قبلاً اشاره شده است، با کاهش نیروهای دافعه‌ی مذکور، خاک ساختمان لخته پیدا می‌کند.^[۲۷، ۲۸] در ارتباط با نقش ضریب دی‌الکتریک در ضخامت لایه‌ی مضاعف تاکنون پژوهش‌های فراوانی انجام شده است که طبق نتایج آنها، ضخامت لایه‌ی مضاعف با مجذور ضریب دی‌الکتریک رابطه‌ی مستقیم دارد.^[۲۹] همان‌گونه که در جدول ۴ در مورد ویژگی‌های ماده‌ی آنتراسن اشاره شده است، از آنجایی که ماده‌ی آنتراسن، ضریب دی‌الکتریک کمتر از آب دارد، سبب کاهش ضخامت لایه‌ی مضاعف تشکیل یافته در اطراف ذرات رس می‌شود و ساختار خاک را لخته می‌کند. بنابراین نقش ماده‌ی آلی آنتراسن در نتایج تراکم را می‌توان مربوط به کاهش ضخامت لایه‌ی مضاعف و در نتیجه، ایجاد ساختمان لخته در خاک دانست. از طرف دیگر، افزودن آنتراسن به خاک موجب کاهش اصطکاک بین ذرات و در نتیجه سهولت جابه‌جایی آنها می‌شود، چون آنتراسن یک ماده‌ی آلی غیرقطبی است و جذب آن توسط ذرات باردار رس محدود است و در نتیجه، افزودن آن به خاک رسی موجب قرارگیری این ماده در فضای بین ذرات رس می‌شود و با کاهش اصطکاک بین ذرات و در نتیجه سهولت جابه‌جایی آنها، سبب کاهش وزن واحد حجم بیشینه و افزایش رطوبت بهینه می‌شود. نتایج به دست آمده با نتایج ارائه شده‌ی دیگر پژوهشگران هم‌خوانی دارد.^[۳۰، ۳۱]

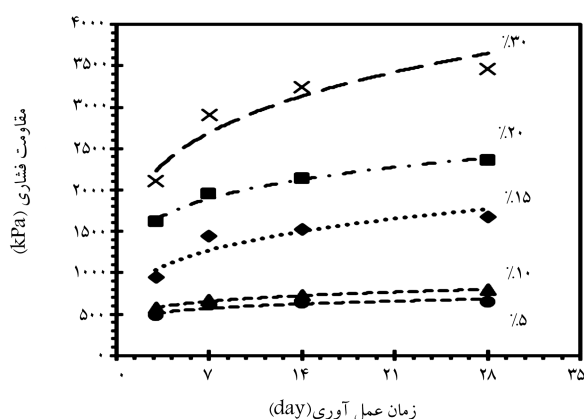
مطابق شکل ۲، افزودن سیمان به خاک حاوی آنتراسن موجب بهبود وضعیت تراکمی آن شده است؛ به گونه‌یی که وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه‌ی خاک آلوده به آنتراسن از ۱۹٫۵٪ و $17 (kN/m^2)$ به ۱۵٫۶٪ و $18 (kN/m^2)$ برای نمونه‌ی بهسازی شده با ۳۰٪ سیمان رسیده است و به‌طور کلی وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه‌ی خاک آلوده‌ی بهسازی شده با سیمان نسبت به خاک آلوده، به ترتیب افزایش و کاهش یافته‌اند. با توجه به اینکه قبل از انجام آزمایش‌ها، خاک آلوده به مدت یک هفته در کیسه‌ی پلاستیکی نگهداری شده است، وضعیت آنتراسن در آن را می‌توان در سه حالت شرح داد: ۱. بخشی از آن با خاک واکنش شیمیایی داده است، ۲. بخش دیگری سطح ذرات خاک را پوشانده است و ۳. مابقی در بین حفره‌های خاک قرار گرفته‌اند. با افزودن سیمان به خاک آلوده، بخشی از ذرات سیمان با آن بخش از خاک که با آنتراسن پوشانده نشده بودند، واکنش می‌دهد و خاک - سیمان تولید می‌کند و مابقی ذرات سیمان که وزن واحد حجم زیادی دارند، در فضای بین ذرات خاک قرار می‌گیرند و سطح ویژه را کاهش می‌دهند و سبب افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه می‌شوند.



شکل ۵. نمودار تنش - کرنش بهسازی خاک آلوده به آنتراسن با ۵٪ سیمان در زمان‌های عمل‌آوری گوناگون.



شکل ۴. نمودار تنش - کرنش خاک طبیعی و خاک آلوده به آنتراسن.



شکل ۶. نمودار تغییرات مقاومت فشاری خاک آلوده با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت در مقادیر گوناگون سیمان.

نمونه‌ی خاک - سیمان با ۱۰٪ سیمان حاوی آنتراسن در زمان عمل‌آوری ۳ روزه برابر $(kPa) 487$ است، در حالی که میزان مقاومت نمونه‌ی خاک سیمان با ۱۵ و ۲۰ درصد سیمان حاوی آنتراسن در زمان عمل‌آوری ۳ روزه به ترتیب برابر $950/7$ و $2665/6$ (kPa) هستند؛ به گونه‌ی که نمونه‌ی تهیه شده با ۲۰٪ سیمان نسبت به نمونه‌ی تهیه شده با ۱۰٪ سیمان، افزایش مقاومت 183 ٪ را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش زمان عمل‌آوری در نمونه‌های خاک - سیمان حاوی آنتراسن در درصد‌های ثابت سیمان، بر میزان مقاومت نمونه‌های تهیه شده افزوده شده است. مثلاً میزان مقاومت نمونه‌ی خاک سیمان با ۱۰٪ سیمان حاوی آنتراسن در زمان عمل‌آوری ۳ روزه برابر $(kPa) 569/6$ است، در حالی که این مقدار برای نمونه‌ی ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر 724 ، 672 و $790/1$ (kPa) بوده است. به گونه‌ی که میزان افزایش مقاومت نمونه‌ی ۲۸ روزه نسبت به نمونه‌ی ۳ روزه برابر 39 ٪ بوده است.

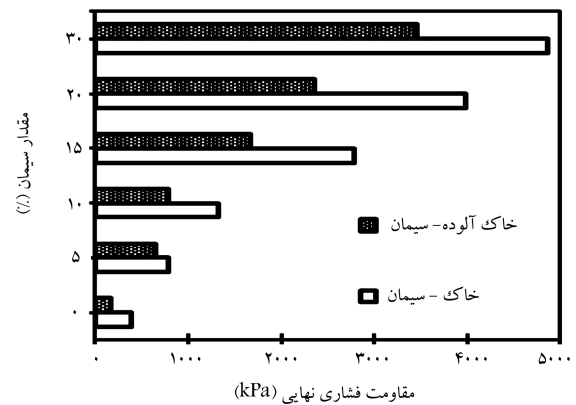
شکل ۷، نمودار میله‌ی مقاومت فشاری نهایی خاک طبیعی، خاک - سیمان، خاک آلوده به آنتراسن و خاک آلوده به آنتراسن بهسازی شده با سیمان را برای مقادیر گوناگون سیمان (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد) در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور به منظور مقایسه‌ی هر چه بهتر، مقادیر تنش نهایی تمام نمونه‌های مورد آزمایش رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، خاک زمانی که با آنتراسن آلوده می‌شود، با کاهش مقاومت روبرو می‌شود،

افزودن مواد آلی که ضریب دی‌الکتریک آنها کمتر از آب است، موجب کاهش ضخامت لایه‌ی مضاعف و افزایش درجه‌ی لخته‌سازی در خاک می‌شود و در نتیجه، مقاومت خاک آلوده افزایش می‌یابد، $[23,24]$ و نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر برخلاف نتایج کسب شده‌ی آنها بوده و برعکس در راستای نتایجی بوده است که در پژوهش‌های دیگری، $[29,30]$ گزارش شده است؛ مثلاً عده‌ی از پژوهشگران با افزودن درصد‌های گوناگون مواد آلی (استون، گلیسرول و پروپانول) به خاک چسبنده با کاهش مقاومت روبرو شده‌اند. $[33,34]$

کانی‌های تشکیل دهنده‌ی خاک‌های رسی حاوی بار الکتریکی هستند و ویژگی جذب آب به وسیله‌ی آن‌ها به میزان بار الکتریکی و سطح ویژه‌ی آن‌ها مرتبط است. خاک‌های رسی به وسیله‌ی کاتیون‌هایی مانند Na^+ ، K^+ ، Ca^{++} و Mg^{++} می‌توانند مواد آلی را جذب کنند. بخشی از مواد آلی به علت عدم وجود کانی‌های لازم، عدم قطبی بودن و نیز سطح ویژه‌ی مناسب، جذب ذرات رس نمی‌شوند و در فضای بین ذرات باقی می‌مانند و در سهولت جابه‌جایی ذرات در اثر بار وارده مؤثر هستند. $[23]$ بنابراین با توجه به نتایج مطالعات پژوهشگران در ارتباط با نقش مواد آلی در ایجاد ساختار لخته در خاک و از طرف دیگر، کاهش مقاومت خاک‌های آلوده به مواد آلی، می‌توان عامل مؤثر در کاهش مقاومت خاک آلوده به آنتراسن نسبت به خاک طبیعی را به سهولت جابه‌جایی ذرات و افزایش جابه‌جایی آنها در خاک آلوده مرتبط دانست. به عبارت دیگر، از آنجایی که آنتراسن یک ماده‌ی آلی غیرقطبی است، جذب آن توسط ذرات باردار رس محدود است و در نتیجه‌ی افزودن آن به خاک رسی، موجب قرارگیری ماده‌ی مذکور در فضای بین ذرات رس می‌شود و با کاهش اصطکاک بین ذرات و در نتیجه سهولت جابه‌جایی آنها، کاهش مقاومت را در پی خواهد داشت.

شکل ۵، منحنی تنش - کرنش را برای نمونه‌های بهسازی شده‌ی خاک آلوده به آنتراسن، با ۵٪ سیمان در زمان‌های عمل‌آوری گوناگون نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، افزودن ۵٪ سیمان به خاک آلوده، موجب افزایش مقاومت نمونه‌ها شده و این افزایش تابعی از زمان عمل‌آوری نمونه‌ها بوده است. میزان مقاومت نهایی برای نمونه‌ی ۳ روزه برابر $(kPa) 486/7$ در کرنش $1/89$ ٪ بوده است، در حالی که این مقدار در نمونه‌ی ۲۸ روزه برابر $(kPa) 654$ در کرنش $1/49$ ٪ بوده است.

در شکل ۶، تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ی بهسازی شده‌ی خاک آلوده با زمان‌های عمل‌آوری متفاوت (۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز) برای مقادیر گوناگون سیمان (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد) رسم شده است. مطابق شکل ۶، با افزودن سیمان به خاک آلوده، میزان مقاومت نهایی نمونه‌ها بیشتر شده است. مثلاً میزان مقاومت



شکل ۷. نمودار مقاومت نهایی خاک طبیعی، خاک آلوده به آنتراسن و خاک آلوده به آنتراسن بهسازی شده با سیمان برای مقادیر گوناگون سیمان (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد) در زمان عمل آوری ۲۸ روزه.

به گونه‌ایی که مقاومت نهایی خاک طبیعی که برابر $393 (kPa)$ است، در خاک آلوده به آنتراسن به $1697 (kPa)$ کاهش پیدا کرده است که این مقدار کمترین میزان مقاومت نهایی در بین نمونه‌های مورد آزمایش است. مقاومت نهایی خاک - سیمان نشان داده شده در شکل مذکور، همان‌طور که در شکل ۳ نیز اشاره شده است، با افزایش مقدار سیمان افزایش یافته و از آنجایی که این افزایش تابع مقدار سیمان به کار رفته در تهیه نمونه‌های خاک - سیمان است، بنابراین بیشترین مقاومت مربوط به نمونه‌ی خاک - سیمان با ۳۰٪ سیمان است که برابر $4866 (kPa)$ است.

مطابق شکل ۷، در مورد مقایسه‌ی مقاومت نهایی نمونه‌های خاک آلوده به آنتراسن در برابر نمونه‌های خاک - سیمان، افزایش مقدار سیمان در نمونه‌های آلوده موجب افزایش مقاومت آنها شده و این بدان معنی است که سیمان مورد استفاده در پژوهش حاضر، قابلیت بهسازی خاک آلوده به آنتراسن را داشته است. مثلاً، مقاومت فشاری نهایی برای نمونه‌های آلوده به آنتراسن بهسازی شده با سیمان در مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان در زمان عمل آوری ۲۸ روزه، به ترتیب برابر ۷۹۱ و $2354 (kPa)$ بوده است که نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت ۲۰۰ درصدی برای نمونه‌های مذکور است؛ و برای همان مقادیر سیمان، یعنی ۱۰ و ۲۰ درصد، مقاومت نمونه‌های خاک - سیمان به ترتیب برابر ۱۳۱۸ و $3981 (kPa)$ بوده است که در این حالت نیز افزایش مقاومت حاصل شده از افزودن سیمان، حدود ۲۰۰٪ است؛ که این موضوع نشان‌دهنده‌ی تأثیر خوب سیمان استفاده‌شده در پژوهش حاضر، به منظور بهسازی خاک آلوده به آنتراسن است.

عده‌یی از پژوهشگران بر این باور هستند که خاک‌های آلوده به مواد آلی، قابلیت بهسازی با سیمان را ندارند، چرا که مواد آلی متمایل به پوشاندن ذرات سیمان و خاک هستند و این عمل مانع انجام عمل هیدراسیون می‌شود.^[۳۶،۳۵] نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر (مطابق شکل ۷)، برخلاف نظر آنها بوده و در راستای نتایج پژوهشگران دیگری^[۸،۳۱] بوده است که با انجام آزمایش بر روی خاک‌های آلوده به مواد آلی نتیجه‌گیری کرده‌اند که بهسازی این خاک‌ها با سیمان ممکن است. همچنان که در بخش تراکم نیز اشاره شده است، وضعیت قرارگیری ماده‌ی آلی آنتراسن در توده‌ی خاک را در ۳ بخش می‌توان در نظر گرفت. بنابراین با اضافه شدن سیمان به خاک آلوده، واکنش ماده‌ی آلی را نیز می‌توان در ۳ بخش تفسیر کرد. بخشی از ذرات خاک به آنتراسن آغشته نشده‌اند و با آن پوشانده نمی‌شوند؛ زمانی که به منظور بهسازی خاک آلوده، سیمان به آن اضافه می‌شود، خاک آلوده با بخش

مذکور واکنش می‌دهد که حین واکنش مذکور و با انجام عمل هیدراسیون، ماده‌یی سخت تشکیل می‌شود. از طرف دیگر، مقدار محدودی از ماده‌ی آلی جذب ذرات خاک می‌شود و در تشکیل ماده‌ی سخت، که از ترکیب سیمان و ذرات خاک به وجود می‌آید، مشارکت می‌کند و سبب افزایش مقاومت می‌شود؛ اما مابقی ماده‌ی آلی در فضای بین ذرات خاک باقی می‌ماند و اطراف ذرات سیمان را احاطه و از واکنش شیمیایی سیمان با خاک جلوگیری می‌کند؛ با این تفاسیر می‌توان انتظار داشت که افزودن سیمان به خاک آلوده به آنتراسن، مقاومت آن را افزایش دهد، البته چون از مقدار ذراتی از خاک که در ترکیب خاک - سیمان می‌توانستند با سیمان واکنش دهند، کاسته شده است و همچنین مقداری از ذرات سیمان توسط ماده‌ی آلی پوشانده شده‌اند، مقاومت خاک آلوده‌ی بهسازی شده با سیمان نسبت به خاک - سیمان کمتر خواهد بود که این موضوع به خوبی در شکل ۷ مشخص است. علاوه بر موارد ذکر شده، همچنان که اشاره شده است، افزودن ماده‌ی آلی آنتراسن به خاک، سهولت و افزایش جابه‌جایی ذرات خاک آلوده را در پی خواهد داشت که این موضوع نیز به نوبه‌ی خود سبب کاهش مقاومت خاک آلوده‌ی بهسازی شده با سیمان نسبت به خاک - سیمان است.^[۵]

نکته‌ی مهمی که باید به آن توجه داشت، این است که طبق مطالعات انجام شده در خصوص آلودگی خاک به مواد آلی و قابلیت بهسازی آن به وسیله‌ی سیمان، نوع ماده‌ی آلی و میزان آلودگی خاک با آن بسیار تأثیرگذار است و حتی ممکن است سبب عدم قابلیت بهسازی با سیمان شود.^[۱] بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سیمان مورد استفاده در پژوهش حاضر، قابلیت بهسازی خاک آلوده به ماده‌ی آلی آنتراسن (به میزان ۱۲۰ میلی‌گرم در ۱ کیلوگرم خاک یا به عبارتی ۱۲٪ وزنی) را داشته است.

۳.۳. نتایج مربوط به ریزساختار خاک

به منظور بررسی و تحلیل ریزساختاری نمونه‌ها و مشاهده‌ی آرایش ذرات خاک در اثر افزودن ماده‌ی آلی آنتراسن و بهسازی خاک آلوده با سیمان، از نمونه به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی (SEM) با بزرگ‌نمایی ۶۰۰۰ برابر، عکس برداری شده است. شکل ۸، میکروگراف خاک طبیعی، خاک - سیمان، خاک آلوده با آنتراسن و مخلوط خاک آلوده‌ی اختلاط یافته با سیمان را نشان می‌دهد.

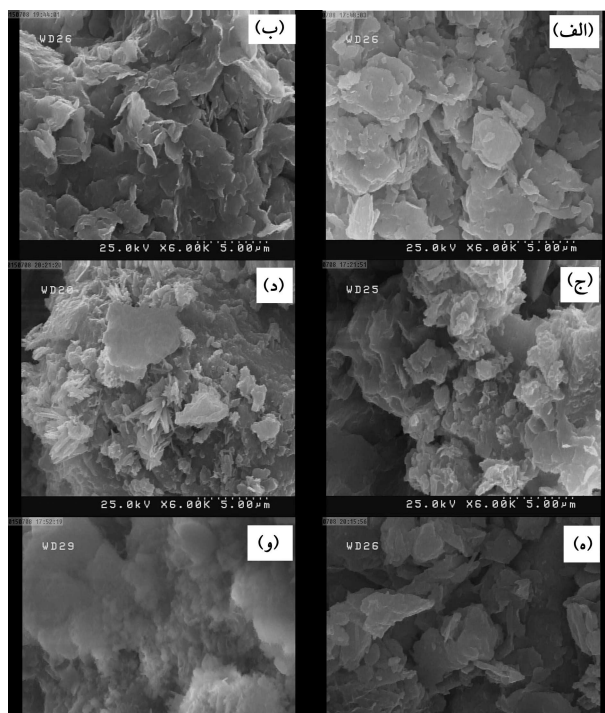
شکل ۸ الف، میکروگراف خاک طبیعی را نشان می‌دهد که مطابق آن، ساختمان خاک از نوع لخته است. شکل ۸ ب، ساختار خاک اختلاط یافته را با آنتراسن نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور، ساختار خاک آلوده به آنتراسن نیز لخته است، لیکن مقایسه‌ی آن با شکل ۸ الف، نشان‌دهنده‌ی کاهش فضای بین ذرات است. همان‌طور که در بخش مربوط به تراکم توضیح داده شده است، افزودن آنتراسن به خاک با توجه به کمتر بودن دی‌الکتریک آن نسبت به آب، سبب کاهش ضخامت لایه‌ی مضاعف تشکیل یافته در اطراف ذرات رس می‌شود و ساختار خاک را لخته می‌کند. بنابراین انتظار می‌رفت که ساختمان خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی، درجه‌ی لخته‌سازی بیشتری داشته باشد و فضای بین ذرات افزایش یافته باشد. بنابراین با توجه به شکل ۸ ب، دلیل کاهش فضای خالی خاک بنا به دلیل دیگری است. همان‌طور که در بخش نتایج مربوط به کاهش مقاومت خاک آلوده به آنتراسن نسبت به خاک طبیعی ذکر شده است، افزودن آنتراسن به خاک رسی، منجر به سهولت جابه‌جایی ذرات آن می‌شود و مطابق شکل ۸ ب نتیجه می‌شود که این افزایش جابه‌جایی به نسبت ایجاد ساختار لخته، تأثیر بسیار بیشتری دارد و نهایتاً کاهش فضای خالی خاک آلوده به آنتراسن را نسبت به خاک طبیعی موجب می‌شود. میکروگراف مخلوط خاک سیمان که حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان است،

شکل‌های ۸ و ۸، به ترتیب میکروگراف خاک آلوده به آنتراسن بهسازی شده با ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه را نشان می‌دهند. در این حالت و با افزودن سیمان به خاک آلوده، بخشی از سیمان با خاک واکنش داده و با تولید خاک - سیمان، وضعیت ذرات را به صورت ورقه‌یی در آورده است؛ مابقی ذرات سیمان هم که توسط آنتراسن پوشانده و امکان واکنش آنها با خاک کمتر شده است، در فضای بین ذرات قرار گرفته‌اند. با افزایش مقدار سیمان به ۲۰٪ (شکل ۸ و ۸)، سیمان واکنش بیشتری با ذرات خاک انجام می‌دهد و آن‌چنان که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، اطراف ذرات خاک را احاطه کرده است و تقریباً تمامی منافذ خاک آلوده نیز پوشانده شده‌اند؛ همچنین شکل ابرمانند در توده‌ی خاک آلوده‌ی بهسازی شده ایجاد شده است، که سبب ایجاد مقاومت بالایی در این ترکیب (مطابق شکل ۷) می‌شود. به هر حال نتایج پژوهش حاضر نشان داده است که بهسازی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی با افزودن سیمان امکان‌پذیر است، لیکن ارزیابی بهتر از نتایج بهسازی، با انجام آزمایش‌های صحرائی امکان‌پذیر است و در صورت حصول به نتایج مطلوب و با در نظر گرفتن شرایط زیست‌محیطی و اقتصادی می‌توان آن را به صورت یک روش کاربردی تلقی کرد.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر افزودن سیمان در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی یک خاک رسی آلوده به آنتراسن و امکان بهسازی آن، از طریق مطالعات آزمایشگاهی و ریزساختاری به کمک عکس‌برداری با (SEM) بررسی شده است. نتایج حاصل از این کار عبارت‌اند از:

- افزودن سیمان به خاک طبیعی سبب تغییر در مشخصات تراکمی خاک می‌شود، به گونه‌ی که در درصد‌های کم (۵ و ۱۰ درصد) موجب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی و در درصد‌های بالاتر (۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد) سبب افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه نسبت به نمونه‌های خاک طبیعی می‌شود.
- افزودن ماده‌ی آلی آنتراسن، با وجود ایجاد ساختار لخته در خاک آلوده، سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی می‌شود، که علت این موضوع در کاهش اصطکاک ذرات خاک و سهولت جابه‌جایی آنهاست؛ افزودن سیمان به منظور بهسازی خاک آلوده به آنتراسن، سبب افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه می‌شود و وضعیت تراکمی خاک آلوده را بهبود می‌بخشد.
- افزودن آنتراسن به خاک سبب کاهش مقاومت نسبت به نمونه‌ی خاک طبیعی می‌شود و افزودن سیمان به آن به منظور بهسازی، مقاومت خاک آلوده را افزایش می‌دهد؛ به بیان دیگر، افزایش مقاومت خاک مذکور با افزایش درصد سیمان افزایش می‌یابد.
- افزایش مقاومت خاک آلوده به آنتراسن بهسازی شده با سیمان، به علت پوشانده شدن بخشی از ذرات سیمان توسط آنتراسن و عدم واکنش آنها با ذرات خاک و همچنین کاهش اصطکاک ذرات خاک و جابه‌جایی بیشتر آنها، به نسبت خاک - سیمان کمتر است؛ ولی در کل تأثیر مثبت سیمان و قابلیت آن را در بهسازی خاک آلوده به آنتراسن نشان می‌دهد.



شکل ۸. تصویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگ‌نمایی ۶۰۰۰ برابر از نمونه‌ها.
 الف) خاک طبیعی؛ ب) خاک آلوده به آنتراسن؛
 ج) خاک - سیمان با ۱۰٪ سیمان و زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه؛
 د) خاک - سیمان با ۲۰٪ سیمان و زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه؛
 ه) خاک آلوده به آنتراسن اختلاط یافته با ۱۰٪ سیمان در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه؛
 و) خاک آلوده به آنتراسن اختلاط یافته با ۲۰٪ سیمان در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه.

برای زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه به ترتیب در شکل‌های ۸ ج و ۸ د نشان داده شده است. در این حالت نیز ساختمان خاک لخته است، لیکن در حالت ۲۰٪ سیمان، فضای بین ذرات کاهش بیشتری نسبت به حالت ۱۰٪ سیمان داشته است و همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، به‌ویژه در شکل ۸ د، سیمان به صورت میله‌یی بین ذرات خاک قرار گرفته است، که طبق مطالعات پیشین، بیشتر آنها ترکیبات هیدروسیلیکات کلسیم هستند. [۹۸]

هیدروسیلیکات کلسیم از جمله ترکیباتی است که در نتیجه‌ی واکنش‌های ناشی از هیدراسیون سیمان تشکیل می‌شود. این ترکیب با علامت اختصاری (C-S-H) نشان داده می‌شود (H : H₂O, S : SiO₂, C : CaO)، که در آن نسبت $C/S = 1.5 - 2$ برقرار است. مشخصه‌ی اصلی هیدروسیلیکات کلسیم، سطح ویژه‌ی بالا (حدود $700 - 1100 \text{ m}^2/\text{g}$) و مقاومت زیاد است. این ترکیب به صورت یک خمیر چسبنانده‌ی پیوسته و بی‌شکل، عامل اصلی در کسب مقاومت خمیر سیمان محسوب می‌شود؛ بنابراین با توجه به اینکه ترکیب هیدروسیلیکات کلسیم در حالت ۲۰٪ سیمان (شکل ۸ ج)، نسبت به حالت ۱۰٪ سیمان (شکل ۸ د) بیشتر مشاهده می‌شود و با توجه به توضیحات داده شده در خصوص ویژگی‌های این ترکیب می‌توان انتظار داشت که مقاومت در خاک - سیمان (۲۰٪ سیمان) به نسبت مقاومت در خاک - سیمان (۱۰٪ سیمان) بیشتر باشد؛ البته این نتایج قبلاً در شکل‌های ۳ و ۷ در بحث مربوط به مقاومت تک‌محوری خاک - سیمان نیز به دست آمده‌اند.

پانویسها

1. stabilization/solidification
2. micro-structure
3. macro-structure
4. scanning electron microscope (SEM)
5. polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)
6. unified soil classification system (USCS)
7. environmental protection agency (EPA)
8. very high concern list (VHCL)
9. european chemicals agency (ECHA)
10. unconfined compaction
11. diffuse double layer (DDL)

منابع (References)

1. Cuypers, C., Pancras, T., Grotenhuis, T. and Rulkens, W. "The estimation of PAH bioavailability in contaminated sediments using hydroxypropyl-B-cyclodextrin and triton x-100 extraction techniques", *Chemosphere*, **46**(8), pp. 1235-1245 (2002).
2. Tremblay, H., Duchesne, J., Locat, J. and Leroueil, S. "Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement", *Can. Geotech. J.*, **39**(3), pp. 535-546 (2002).
3. Hassan, H.F., Taha, R., Al Rawas, A., Al Shandoudi, B., Al Gheithi, K. and Al Baram, A.M. "Potential uses of petroleum-contaminated soil in highway construction", *Construction and Building Materials*, **19**(8), pp. 646-652 (2005).
4. Karamalidis, A.K. and Voudrias, E.A. "Cement-based stabilization/solidification of oil refinery sludge: Leaching behavior of alkanes and PAHs", *Journal of Hazardous Materials*, **148**(1-2), pp. 122-135 (2007).
5. Botta, D., Dotelli G., Biancardi R., Pelosato R. and Natali S. "Cement-clay pastes for stabilization/solidification of 2-chloroaniline", *Waste Manag.*, **24**(2), pp. 207-216 (2004).
6. Estabragh, A.R., Beytolahpour, I. and Javadi, A.A. "Effect of resin on the strength of soil-cement mixture", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **23**(7) (July 2011).
7. Estabragh, A.R., Namdar, P. and Javadi, A.A. "Behavior of cement-stabilized clay reinforced with nylon fiber", *Geosynthetics International*, **19**(1), pp. 85-92 (2012).
8. Estabragh, A.R., Khatibi, M. and Javadi, A.A. "Effect of cement on treatment of a clay soil contaminated with glycerol", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **28**(4) (2015).
9. Katsioti, M., Katsiotis, N., Rouni, G., Bakirtzis, D. and Loizidou, M. "The effect of bentonite/cement mortar for the stabilization/solidification of sewage sludge containing heavy metals", *Cement and Concrete Composites*, **30**(10), pp. 1013-1019 (2008).
10. Choi, W.H., Lee, S.R. and Park, J.Y. "Cement based solidification/stabilization of arsenic-contaminated mine tailings", *Waste Management*, **29**(5), pp. 1766-1771 (2009).
11. Mohebbi, M., Gitipour, S. and Madadian, E. "Solidification/stabilization of cresol-contaminated soil: Mechanical and leaching behavior", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **22**(7), pp. 783-799 (2013).
12. Tuncan, A., Tuncan, M. and Koyuncu, H. "Use of petroleum-contaminated drilling wastes as sub-base material for road construction", *Waste Management and Research*, **18**(5), pp. 489-505 (2000).
13. Cui, Z.D. and Jia, Y.J. "Analysis of electron microscope images of soil pore structure for the study of land subsidence in centrifuge model tests of high-rise building groups", *Engineering Geology*, **164**, pp. 107-116 (2013).
14. Li, J.S., Xue, Q., Wang, P. and Li, Z.Z. "Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay", *Applied Clay Science*, **105-106**, pp. 192-199 (2015).
15. Eskander, S.B., Aziz, S.A., El-Didamony, H. and Sayed, M.I. "Immobilization of low and intermediate level of organic radioactive wastes in cement matrices", *Journal of Hazardous Materials*, **190**(1), pp. 969-979 (2011).
16. Human Health Risk Assessment., *Technical Data Report Appendix D: Toxicological Reference Values* (2010).
17. Chi, F.H., Leu, M.H. and Lee, R.C. "Removal of anthracene contaminated soil using soybean oil", *Sustain. Environ. Res.*, **20**(5), pp. 275-280 (2010).
18. Oluseyi, T., Olayinka, K., Alo, B. and Smith, R. "Comparison of extraction and clean-up techniques for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in contaminated soil samples", *African Journal of Environmental Science and Technology*, **5**(7), pp. 482-493 (July 2011).
19. Delgado, L. and Romero, E.M. "Removal of anthracene from recently contaminated and aged soils", *Water Air & Soil Pollut.*, **224**, p. 1420 (2013).
20. Delgado, L., Aguilar, A.A., Luna, M.L. and Dendooven, L. "Mixing of ananthracene-contaminated soil: A simple but efficient Remediation technique", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **96**, pp. 238-241 (2013).
21. Chi, F.H., Leu, M.H., Tsao, C.W. and Shiu, G.C. "Removal of anthracene contaminated soil using microemulsified solvent and mixed surfactant", *Environ. Res.*, **21**(3), pp. 181-186 (2011).
22. Hansen, H.K., Riverol, C. and Acree, W.E. "Solubilities of anthracene, fluoranthene and pyrene in organic solvents: Comparison of calculated values using UNIFAC and modified UNIFAC (Dortmund) models with experimental data and values using the mobile order theory", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **78**(6), pp. 1168-1174 (Dec 2000).
23. Eibes, G., L'u-Chau, T., Feijoo, G., Moreira, M.T. and Lema. J.M. "Complete degradation of anthracene by Manganese Peroxidase in organic solvent mixtures", *Enzyme and Microbial Technology*, **37**(4), pp. 365-372 (2005).
24. Croft, J.B. "The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization", *Geotechnique*, **17**(2), pp. 119-135 (1967).

25. Sarkar, G., Rafiqul Islam, MD., Alamgir, M. and Rokonuzzaman, MD. "Study on the Geotechnical Properties of Cement based Composite Fine-grained Soil", *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, **01**(02), pp.42-49 (Oct 2012).
26. Das, B.M., *Advanced Soil Mechanics*, CRC Press, 634 p. (2013).
27. Goodarzi, A.R. and Salimi, M. "Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag", *Applied Clay Science*, **108**, pp. 61-69 (2015).
28. Brosky, R.T. and Pamukcu, S. "Role of DDL processes during electrolytic reduction of Cu(II) in a low oxygen environment", *Journal of Hazardous Materials*, **262**, pp. 878-882 (2015).
29. Oldham, K.B. "A Gouy-Chapman-Stern model of the double layer at a (metal)/(ionic liquid) interface", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **613**(2), pp. 131-138 (2008).
30. Singh, S., Srivastavab, R. and John, S. "Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **17**(3) , pp.290-300 (2008).
31. Moore, C. and Mitchell, J. "Electromagnetic forces and soil strength", *Geotechnique*, **24**(4), pp. 627-640 (Dec 1974).
32. Sridharan, A. and Rao, G.V. "Shear strength behaviour of saturated clays and the role of the effective stress concept", *Geotechnique*, **29**(2), pp. 177-193 (June 1979).
33. Ratnaweera, P. and Meegoda, J.N. "Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils", *Geotechnical Testing Journal*, **29**(2), pp.133-140 (2005).
34. Yong, R.N. and Mulligan, C.N., *Natural Attenuation of Contaminants in Soils*, CRC Press (2003).
35. Vipulanandan, C. "Effect of clays and cement on the solidification/stabilization of phenol-contaminated soils", *Waste Management*, **15**(5-6), pp. 399-406 (1995).
36. Pollard, S., Montgomery, D., Sollars, C. and Perry, R. "Organic compounds in the cement-based stabilisation/solidification of hazardous mixed wastes-Mechanistic and process considerations", *Journal of Hazardous Materials*, **28**(3), pp. 313-327 (1991).