

بررسی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک رسی آلوده به ماده هیدروکربنی با افزودن سیمان

محمد مهدی خلوصی^{۱*}، علی رئیسی استبرق^۲، جمال عبداللهی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

۳- مربی گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

mm.kholoosi@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۴/۲۲]

تاریخ دریافت: [۹۴/۰۸/۲۴]

چکیده- در این پژوهش، رفتار یک خاک رسی آلوده به ماده هیدروکربنی آنتراسن و امکان بهسازی آن برای بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی، با افزودن سیمان، مطالعه شد. بدین منظور، نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به آنتراسن، خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان در مقادیر (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) سیمان تهیه شدند و روی آنها آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (USC) و حدود اتربرگ انجام شد. برای انجام آزمایش مقاومت، از روش تراکم استاتیکی اقدام به ساخت نمونه‌ها شد و آزمایش روی نمونه‌های حاوی سیمان در زمان عمل‌آوری (۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه) صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که افزودن آنتراسن، سبب افزایش حدود اتربرگ در خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی می‌شود. افزودن سیمان به خاک طبیعی و خاک آلوده به طور کلی حدود اتربرگ در نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد آلودگی خاک به آنتراسن، کاهش مقاومت خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی را در پی دارد. با افزودن سیمان به خاک آلوده، مقاومت آن افزایش می‌یابد؛ این افزایش مقاومت تابعی از درصد سیمان به کار رفته و زمان عمل‌آوری است. از طرف دیگر نتایج بدست آمده از مدول الاستیسیته خاک حاکی از افزایش شکندگی خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان است که با افزایش درصد سیمان به کار رفته و یا زمان عمل‌آوری، این شکندگی بیشتر می‌شود.

واژگان کلیدی: حدود اتربرگ، زمان عمل‌آوری، فلوکولاسیون، مدول الاستیسیته خاک

۱- مقدمه

تولید زباله‌های شهری روز بروز در حال افزایش است و این موضوع در کشورهای در حال توسعه همواره نگرانی‌های زیست محیطی را به همراه داشته است [1]. یکی از رایج‌ترین آلاینده‌های آلی موجود در خاک، هیدروکربن‌های معطر چندحلقه‌ای (PAHs) هستند. PAHs به علت سوخت ناقص گاز و سوخت‌های فسیلی به شکل گسترده‌ای در جو و منابع آب وجود دارند و از طریق آن وارد خاک می‌شوند [1, 2]. همچنین مطالعات نشان می‌دهد که

آلودگی را می‌توان تحت عنوان یک واحد یا ترکیب شیمیایی که قادر است در کوتاه یا دراز مدت بر زندگی انسان یا محیط زیست اثر بگذارد، بیان نمود. آلودگی خاک در اثر ورود مواد شیمیایی ناشی از فعالیت‌های صنعتی، سموم کشاورزی و دفع زباله‌ها اتفاق می‌افتد. از جمله این مواد شیمیایی می‌توان به هیدروکربن‌های نفتی و آروماتیک، حلال‌ها، آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین اشاره کرد. از طرف دیگر با گسترش شهرسازی،

1 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)

شیرابه‌ی ناشی از زباله‌های شهری و صنعتی از عوامل انتقال PAHs به محیط خاک و از آنجا به سفره‌های آب زیرزمینی است؛ پس با توجه به این شرایط، اجتناب از تماس با این مواد برای انسان امری غیرممکن بنظر می‌رسد [3,4].

آلودگی خاک علاوه بر تهدید زیست محیطی، همواره از منظر ژئوتکنیکی نیز حائز اهمیت بوده است؛ چرا که خاک به عنوان بستر اصلی ساخت و ساز و انجام پروژه‌های عمرانی، با ورود مواد آلاینده دچار تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی می‌شود. یکی از منابع اصلی آلاینده که با ورود به خاک ویژگی‌های آن را تغییر می‌دهد، هیدروکربن‌های نفتی هستند. این مواد ممکن است به صورت طبیعی در محیط زیست وجود داشته باشند و یا از طریق نشت از مخازن و تاسیسات انتقال، وارد محیط خاک شوند. پژوهشگران زیادی به مطالعه‌ی تغییر ویژگی‌های خاک‌های آلوده به مواد هیدروکربنی پرداخته‌اند [5-7]. نتایج این مطالعات نشان دهنده‌ی آن است که ویژگی‌هایی مانند نفوذپذیری، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، حدود ات‌برگ و مقاومت خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی پس از ورود مواد آلاینده، با تغییراتی همراه بوده است.

به منظور بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، اقدام به بهسازی آن می‌کنند. بهسازی خاک به روش‌های گوناگونی مانند روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی صورت می‌پذیرد. روش شیمیایی از متداول‌ترین اقدامات برای بهسازی خاک آلوده است که معمولاً با افزودن سیمان، آهک، خاکستر بادی و یا ترکیبی از این مواد انجام می‌شود. یکی از مزایای اصلی سیمان در مقایسه با سایر مواد قابل استفاده برای بهسازی، آن است که سیمان طبق دستورالعمل مشخص، و مطابق استاندارد تهیه می‌شود و در بیشتر مناطق به آسانی قابل دسترس است؛ از این رو به وسیله پژوهشگران برای امور بهسازی خاک‌های آلوده به آن توجه می‌شود [7-10].

مطالعه‌ی منابع نشان دهنده‌ی آن است که هرچند روش‌های گوناگونی برای پاکسازی خاک‌های آلوده ارائه شده، لیکن استفاده از خاک‌های آلوده در اجرای پروژه‌ها و طرح‌های عمرانی، در چند دهه‌ی اخیر مورد توجه بسیاری از متولیان امر

بوده است. در بسیاری از پروژه‌های عمرانی، خاک منطقه آلوده بوده و انتقال خاک از منابع قرضه‌ی دیگر نیز از نقطه نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. همچنین ممکن است که شرایط خاک‌های آلوده به‌گونه‌ای باشد که خطری را برای سفره‌های آب زیرزمینی ایجاد نکند و تهدیدی بر سلامت انسان نباشد، بنابراین با در نظر گرفتن الزامات زیست محیطی و اقتصادی می‌توان خاک منطقه را بهسازی کرده و عملیات ساختمانی را روی آن انجام داد. از طرف دیگر، مطالعه مراجع نشان دهنده‌ی آن است که می‌توان با بهسازی خاک آلوده، ترکیب بدست آمده را در پروژه‌های عمرانی مانند راهسازی، روسازی، پوشش کانال‌ها و غیره نیز، به کار برد [11-12].

بررسی مراجع نشان می‌دهد که با وجود اهمیت خاک‌های آلوده، تاکنون پژوهش‌چندانی در ارتباط با خاک‌های آلوده به مواد هیدروکربنی و امکان بهسازی آنها صورت نگرفته است، پس در این پژوهش، تغییر مقاومت فشاری و حدود ات‌برگ یک خاک رسی آلوده به ماده هیدروکربنی آنتراسن مطالعه شد و امکان بهسازی آن با در صدهای گوناگون سیمان در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت بررسی شد، سپس نتایج مقایسه و مورد بحث قرار گرفتند.

۲- مواد و روش‌ها

مواد اصلی به کار رفته در این پژوهش شامل خاک، سیمان، آب و ماده هیدروکربنی آنتراسن است که برای ساخت نمونه‌ها از آنها استفاده شده است. در این بخش ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی این مواد به تفصیل بیان شده است.

۲-۱- خاک

در این پژوهش، از یک خاک رس برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. چگونگی هماهنگی توزیع دانه‌بندی و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک استفاده شده که طبق استاندارد ASTM تعیین شده و به ترتیب در جدول (۱) و شکل (۱) نشان داده شده است، خاک رسی استفاده شده طبق سیستم طبقه‌بندی متحد^۱ (USTM) رس با پلاستیسیته پائین (CL) طبقه بندی

ASTM تعیین شده، در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲) ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سیمان

Properties	Amount
Normal Consistency	24.4 %
Initial Setting Time	108 (min)
Final Setting Time	180 (min)
Compressive Strength (7 days)	23 (MPa)
Compressive Strength (28 days)	34 (MPa)

Table 2. Physical and Mechanical Properties of the Cement Used

۲-۳-آنتراسن

معمولا برای بر سر سی آثار PAHs، از ماده آنترا سن با فرمول $(C_{14}H_{10})$ به عنوان نماینده این گروه از هیدروکربن‌ها استفاده می‌شود [13]. آنتراسن یک هیدروکربن چند حلقه‌ای معطر است که از قطران ذغال سنگ بدست می‌آید و در تولید رنگ، نگهداری چوب و پوشش فلزات کاربرد دارد، این ماده به وسیله EPA به عنوان یکی از اولویت‌های اصلی آلودگی زیست محیطی معرفی شده است [14, 15]. در این پژوهش، برای آلوده ساختن نمونه‌های خاک، از آنتراسن ساخت شرکت مرک (MERCK) استفاده شد. مشخصات این ماده در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول (۳) ویژگی‌های فیزیکی ماده هیدروکربنی آنتراسن

Properties	Values
Viscosity (240°C) (cp)	0.602
Dielectric Constant	2.35
Molar Mass (g/mol)	178.23
Density (20°C) (g/cm ³)	1.25
Melting Point (°C)	218
Boiling Point (°C)	340
Solubility in Water (mg/L)	0.075

Table 3. Physical Properties of the Anthracene

می‌شود. وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه خاک به ترتیب برابر ۱۷/۷۵ (kN/m^3) و ۱۷/۹ درصد است.

جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی خاک

Properties	Values
Specific Gravity (G_s)	2.7
Sand (%)	2
Silt (%)	45
Clay (%)	53
Liquid Limit LL (%)	48
Plastic Limit PL (%)	26
Plasticity Index PI (%)	22

Table 1. Physical Properties of the Soil

شکل (۱) نمودار دانه بندی خاک

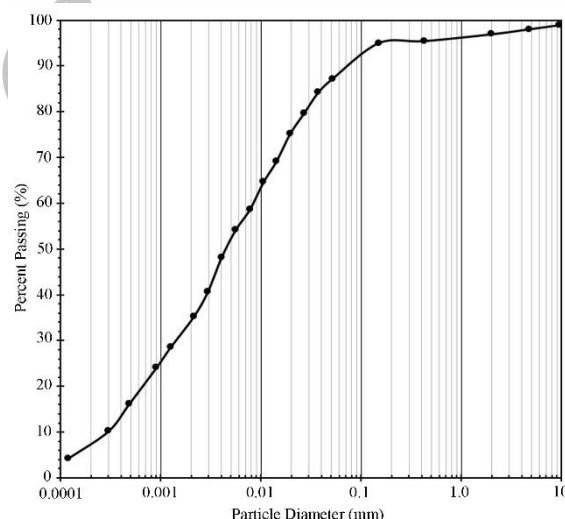


Fig 1. Grain size distribution curve

۲-۲-سیمان

مطالعه منابع نشان داد که معمول‌ترین سیمان در پروژه‌های بهسازی خاک‌های آلوده از نوع پرتلند تیپ ۱ بوده و این سیمان نسبت به انواع دیگر، قابلیت دسترسی آسان‌تری دارد [5, 7, 8]؛ پس سیمان به کار رفته در این پژوهش از نوع پرتلند نوع ۱ با وزن واحد حجم $3/15 \text{ g/cm}^3$ انتخاب شد. بخشی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این سیمان که طبق استاندارد

۴-۲- ساخت و نگهداری نمونه‌ها

نمونه‌های مورد نظر در این پژوهش به منظور انجام آزمایش‌ها، شامل خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک آلوده و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان بودند. برای ساخت نمونه‌های خاک آلوده، از ماده آنتراسن به میزان ۱۲۰۰ میلی‌گرم در ۱ کیلوگرم خاک (۱۲٪ درصد) استفاده شد. این میزان با توجه به بررسی مراجع و گزارش‌ها مبنی بر مقدار موجود آنتراسن در مناطق آلوده به این ماده آلی و در نظر گرفتن بیشین مقدار گزارش شده، انتخاب شد [15, 14, 2]. به منظور اطمینان از توزیع یکنواخت ماده‌ی آلاینده در توده‌ی خاک که در انجام آزمایش‌های بعدی به عنوان خاک آلوده استفاده می‌شود، ابتدا باید ماده‌ی آلاینده در یک حلال حل شده و سپس محلول ساخته شده به توده‌ی خاک اضافه شود. به همین منظور، از آنجایی که حلالیت آنتراسن در آب بسیار کم و ناچیز است (0.075 (mg/L) در دمای 25°C)، از استون با حلالیت نسبتاً خوب برای این منظور (10 (g/L) در دمای 25°C)، استفاده شد. استفاده از استون به عنوان حلال مناسب ماده آنتراسن، با توجه به حلالیت بالا و اینکه این حلال از نوع ترکیبات آلی فرار (VOC) دسته‌بندی شده و به سرعت از توده‌ی خاک خارج می‌شود و تاثیری بر روند آزمایش‌ها صورت گرفته بر روی نمونه‌های خاک آلوده ندارد، استفاده از این حلال برای حل کردن ماده آنتراسن، به وسیله پژوهشگر دیگر نیز پیشنهاد شده است [16, 17]. روند ساخت خاک آلوده به این صورت بود که ابتدا آنتراسن در استون حل شده و سپس این محلول به توده خاک اضافه شد. خاک آلوده به منظور خروج استون، در معرض هوا قرار داده شد و چون استون سیالی فرار است، پس به سرعت از محیط خاک تبخیر شد. خاک آلوده شده با آنتراسن به منظور انجام واکنش‌های شیمیایی بین ماده آلاینده و خاک، به مدت یک هفته در کیسه پلاستیکی و به دور از نور خورشید نگهداری شد [7, 11].

برای ساخت نمونه‌های خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان، از مقادیر (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰) درصد سیمان در زمان‌های عمل‌آوری (۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز) استفاده شد. مطابق

با استاندارد ASTM D1632-07، نمونه‌های حاوی سیمان در محیط اشباع، تحت دمای ۲۲ درجه سلسیوس نگهداری شده و با توجه به زمان‌های عمل‌آوری مورد نظر، تحت آزمایش قرار داده شدند.

با توجه به اینکه بیشترین مقدار مقاومت در یک خاک، در شرایط رطوبت بهینه (ω) و وزن واحد حجم خشک بی‌شینه ($\gamma_{d(\max)}$) اتفاق می‌افتد [5] و یکی از اهداف اصلی در مطالعات مربوط به به‌سازی خاک‌ها، بررسی وضعیت مقاومت نمونه‌ها است؛ و از طرف دیگر به منظور ایجاد شرایط معیار برای مقایسه‌ی مقاومت نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش، تمامی نمونه‌ها در شرایطی ساخته شدند که دارای وزن واحد حجم خشک بی‌شینه و رطوبت بهینه باشند. بدین منظور، ابتدا این مقادیر (وزن واحد حجم خشک بی‌شینه و رطوبت بهینه) با انجام آزمایش تراکم، برابر با استاندارد ASTM D698-12 روی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک آلوده و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان، تعیین شد. سپس با اضافه کردن آب و رساندن رطوبت اولیه این نمونه‌ها به رطوبت بهینه (حاصل از منحنی تراکمی مربوطه)، اقدام به ساخت نمونه‌ها به روش تراکم استاتیکی شد. تراکم استاتیکی به دلیل سادگی کار، وارد کردن انرژی یکسان به هر لایه و در نتیجه یکنواختی در تراکم لایه‌ها و نزدیک‌تر بودن شیوه‌ی تراکم به روش تراکم در صحرا، به تراکم دینامیکی ترجیح داده می‌شود. بدین منظور، نمونه‌ها در قالبی به طول ۱۰۰ و قطر ۵۰ میلی‌متر در سه لایه ریخته شده و هر لایه به وسیله‌ی دستگاه بارگذاری با سرعت ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه متراکم شد. به این منظور از روش سعی و خطا استفاده شده و میزان نیروی وارد به منظور تراکم هر نمونه در هنگام ساخت به گونه‌ای تعیین شد که وزن واحد حجم خشک نمونه ساخته شده پس از خارج کردن از قالب، برابر وزن واحد حجم خشک بیشینه نمودار تراکمی مربوط به آن نمونه شود؛ و همان‌گونه که گفته شد چون در هنگام ساخت نمونه‌ها، رطوبت خاک با اضافه کردن آب به شرایط رطوبت بهینه رسیده بود، پس تمامی نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش‌های بعدی، دارای وزن واحد حجم خشک بی‌شینه و رطوبت بهینه‌ی

۳- نتایج

۳-۱- تراکم

در جدول (۴) مقادیر وزن واحد حجم خشک بیشینه $(\gamma_{d(max)})$ و رطوبت بهینه (ω) نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده، خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان در مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد سیمان نشان داده شده است. همان‌گونه که در جدول (۴) دیده می‌شود، افزودن آنتراسن به خاک طبیعی سبب کاهش وزن واحد حجم بیشینه و افزایش رطوبت بهینه آن شده است. همچنین افزودن سیمان به خاک همینطور به خاک آلوده به آنتراسن، به طور کلی برای بهبود وضعیت تراکمی نمونه‌ها عمل کرده و سبب افزایش وزن واحد حجم بیشینه و کاهش رطوبت بهینه نمونه‌های حاوی سیمان شده است که این وضعیت به طور مستقیم وابسته به میزان سیمان بکار رفته است.

۳-۲- حدود اتربرگ

شکل (۲) مقادیر حد روانی، خمیری و شاخص خمیری نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده، خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان در مقادیر (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) سیمان را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، حد روانی و خمیری خاک در حالت طبیعی به ترتیب برابر ۴۸ و ۲۶ درصد است. مطابق شکل (۲)، افزودن ماده هیدروکربنی آنتراسن به خاک، سبب افزایش حد روانی و خمیری آن نسبت به خاک طبیعی شده است، به گونه‌ای که این مقادیر به ترتیب به ۵۱ و ۲۷ درصد رسیده‌اند؛ به عبارت دیگر شاخص خمیری از مقدار ۲۲ درصد برای خاک طبیعی به مقدار ۲۴ درصد برای خاک آلوده رسیده است. همچنین در شکل (۲) دیده می‌شود که با افزودن سیمان در درصدهای مختلف به خاک طبیعی، حد روانی کاهش یافته ولی حد خمیری و شاخص خمیری دارای روند مشخصی از کاهش یا افزایش نیست. افزودن سیمان به خاک آلوده به آنتراسن، برای بهسازی آن، بطور کلی سبب کاهش حدود اتربرگ شده است. همچنین با توجه به شکل (۲)، مقادیر حدود روانی و خمیری و شاخص خمیری نمونه‌های آلوده به آنتراسن هر چند به نسبت کم، بیشتر از نمونه‌های بدون آلاینده هستند.

متناظر با نمودار تراکمی مربوطه بودند. این روش ساخت نمونه، به وسیله پژوهشگران دیگر نیز استفاده شده است [5, 7].

۲-۵- آزمایش تعیین حدود اتربرگ

در این پژوهش به منظور بررسی حدود اتربرگ خاک (روش کازاگرانده) در اثر افزودن سیمان یا ماده هیدروکربنی آنتراسن، حد خمیری، روانی و شاخص خمیری نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده، خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان طبق استاندارد ASTM D4318 تعیین شدند.

۲-۶- آزمایش مقاومت فشاری

به منظور تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها، آزمایش مقاومت تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM D1633 روی آنها انجام شد. مطابق این استاندارد، نمونه‌ها ۲ ساعت قبل از قرارگیری در دستگاه بارگذاری، خارج از شرایط نگهداری قرار داده شدند، سپس با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه تا گسیختگی کامل تحت بارگذاری قرار گرفتند.

جدول (۴) وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه کلیه نمونه‌های مورد آزمایش

Specimen	Cement (%)	$(\gamma_{d(max)})$ (kN/m^3)	(ω_{opt}) (%)
Soil-Cement	0	17.75	17.9
	5	20.9	17.5
	10	19.3	17.7
	15	18.8	17.85
	20	18.0	18.0
contaminated soil-cement	0	17.0	19.7
	5	17.0	18.7
	10	17.5	17.2
	15	17.8	16.9
	20	17.8	16.5

Table 4. Compaction Parameters for Soil, Soil-Cement and Contaminated Soil-Cement

شکل (۲) نمودار حد خمیری، روانی و شاخص خمیری برای تمامی نمونه‌های مورد آزمایش

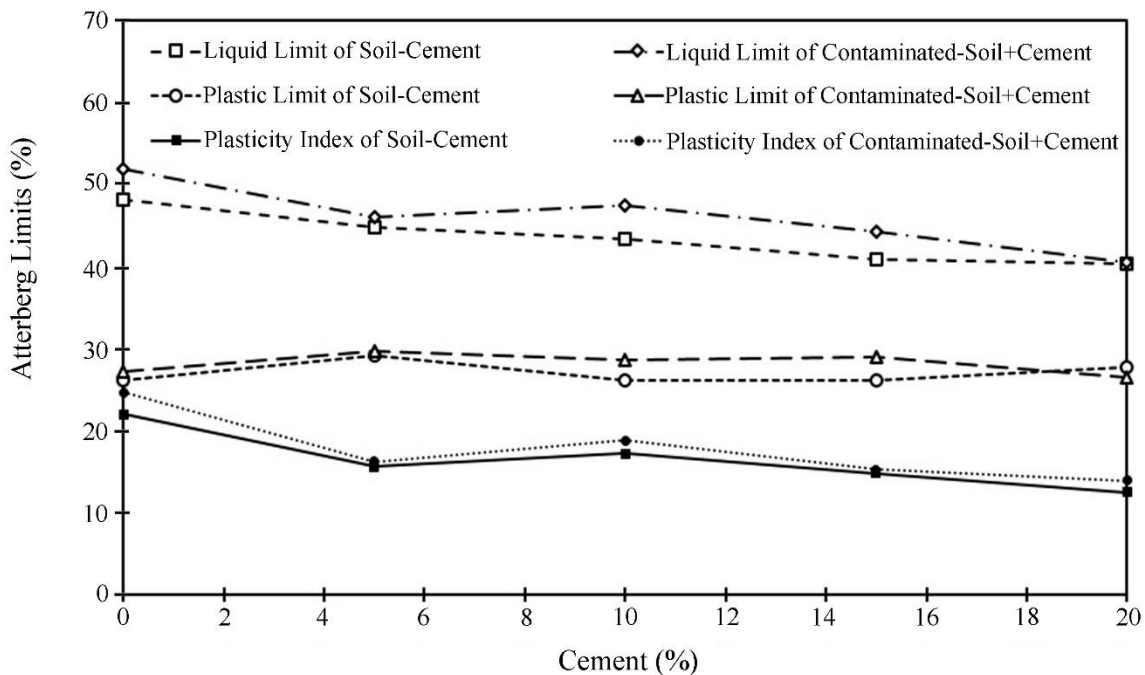


Fig. 2. Atterberg Limit curve for all specimens

درصد است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، با اضافه شدن آنتراسن به خاک، مقدار مقاومت فشاری خاک آلوده کاهش و کرنش آن افزایش یافته است؛ به گونه‌ای که مقدار مقاومت فشاری نهایی برابر $175 (kPa)$ و کرنش متناظر آن $2/7$ درصد است، به عبارت دیگر مقدار 1200 میلی‌گرم آنتراسن در 1 کیلوگرم خاک، مقاومت فشاری نهایی خاک طبیعی را به میزان 200 درصد کاهش داده و کرنش آن را به میزان 29 درصد افزایش داده است.

شکل (۴)، نمودار مقاومت فشاری نهایی برای نمونه‌های خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با درصد‌های گوناگون سیمان، در زمان عمل‌آوری (۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز) را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴)، مشاهده می‌شود که در یک زمان عمل‌آوری ثابت به عنوان نمونه ۱۴ روزه، با افزایش درصد سیمان، مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان، افزایش یافته است. از طرف دیگر با مقایسه نمودارهای شکل (۴) (الف-ب-ج-د) مشاهده می‌شود که در یک درصد مشخص سیمان (به عنوان نمونه ۲۰ درصد)، با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان،

۳-۳- مقاومت فشاری

شکل (۳) نشان دهنده نتایج تنش-کرنش برای نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده به آنتراسن است.

شکل (۳) نمودار تنش-کرنش خاک طبیعی و خاک آلوده به ماده هیدروکربنی آنتراسن

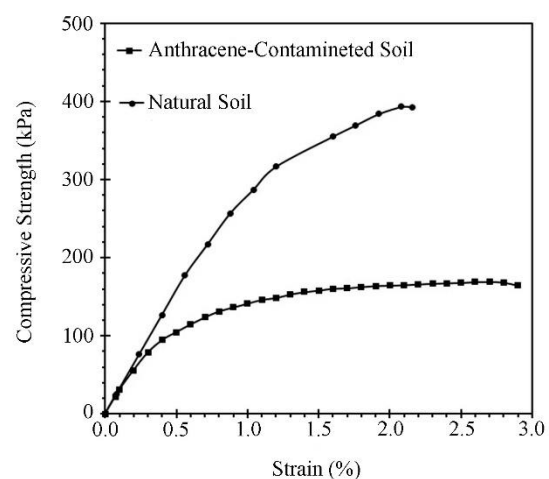


Fig. 3. Stress-Strain Curves for Natural Soil and Anthracene-Contaminated Soil

همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، مقاومت فشاری نهایی خاک طبیعی $393 (kPa)$ و کرنش محوری آن $2/1$

افزایش یافته است.

نهایی مربوط به نمونه خاک آلوده اختلاط یافته با ۰.۵٪ سیمان در زمان عمل آوری ۳ روزه است که برابر 487 (kPa) و بیشینه مقدار آن مربوط به خاک آلوده اختلاط یافته با ۰.۲۰٪ سیمان در زمان عمل آوری ۲۸ روزه است که برابر 2354 (kPa) است؛ به عبارت دیگر افزایش مقاومتی در حدود ۳۸۵ درصد در پی افزودن سیمان به میزان ۰.۲۰٪ و پس از ۲۸ روز در نمونه خاک آلوده رخ داده است. افزون بر این، در شکل (۴) مشاهده می‌شود که بطور کلی مقاومت نمونه‌های آلوده به آنتراسن نسبت به نمونه‌های بدون آلاینده، کمتر است.

مطابق شکل (۴) مشاهده می‌شود که کمینه مقدار مقاومت فشاری نهایی مربوط به نمونه خاک-سیمان با ۰.۵٪ سیمان در زمان عمل آوری ۳ روزه است که برابر 600 (kPa) و بیشینه مقدار آن مربوط به نمونه خاک-سیمان دارای ۲۰٪ سیمان در زمان عمل آوری ۲۸ روزه است که برابر 3981 (kPa) است؛ به عبارت دیگر افزایش سیمان و زمان عمل آوری، افزایش مقاومتی در حدود ۵۷۰ درصد را در نمونه خاک-سیمان در پی داشته است.

همچنین مطابق این شکل، کمینه مقدار مقاومت فشاری

شکل (۴) نمودار مقاومت فشاری نهایی برای نمونه‌های خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با مقادیر گوناگون سیمان در زمان‌های عمل آوری، (الف) ۳ روز، (ب) ۷ روز، (ج) ۱۴ روز، (د) ۲۸ روز

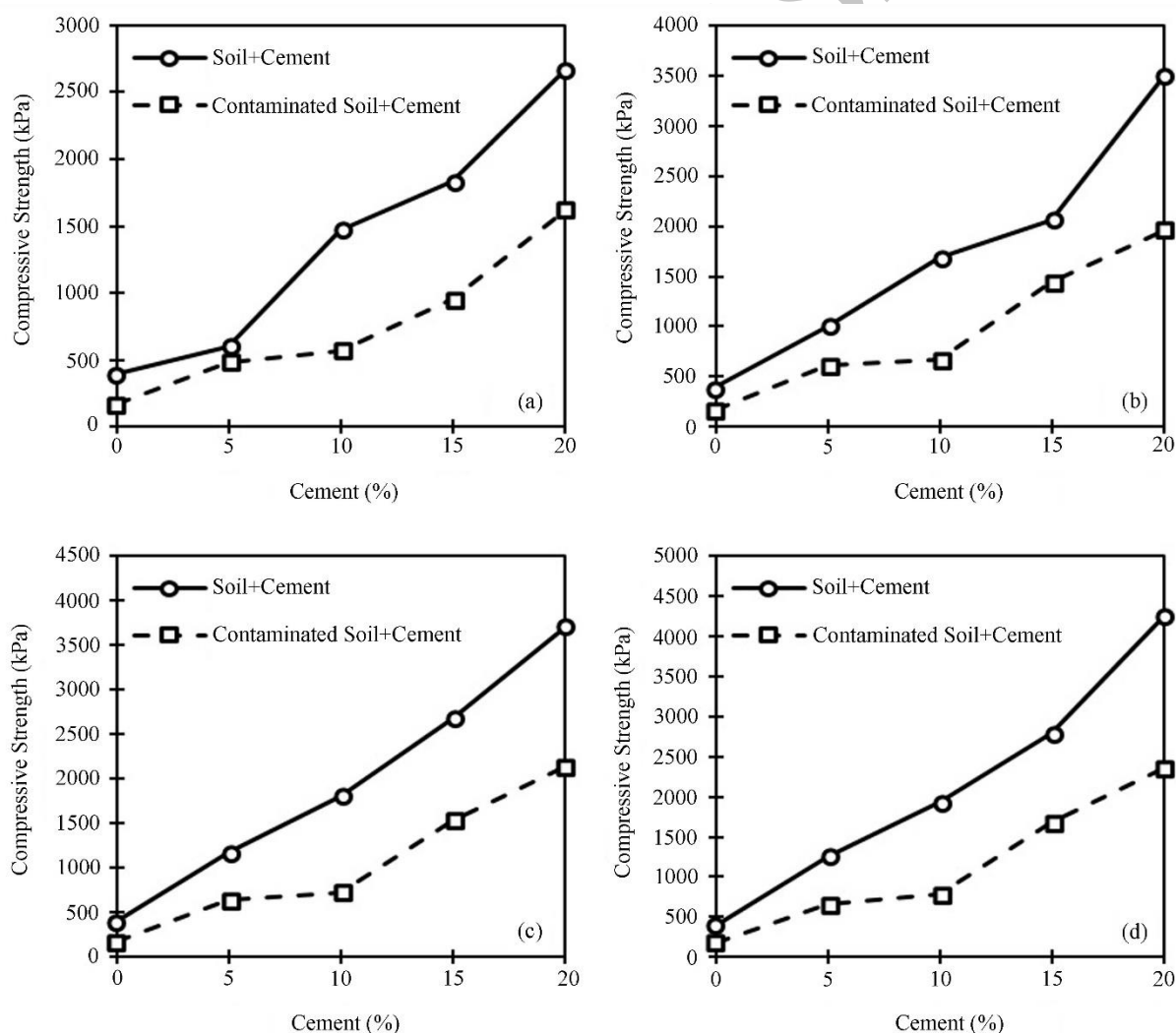


Fig 4. Variation of Compressive Strength with different Cement Content for (a)3, (b)7, (c)14, (d)28 days Curing Time

شکل (۵) نمودار تغییرات ضریب الاستیسیته برای الف) خاک-سیمان و ب) خاک آلوده اختلاط یافته با درصدهای گوناگون سیمان در زمان های عمل آوری مختلف

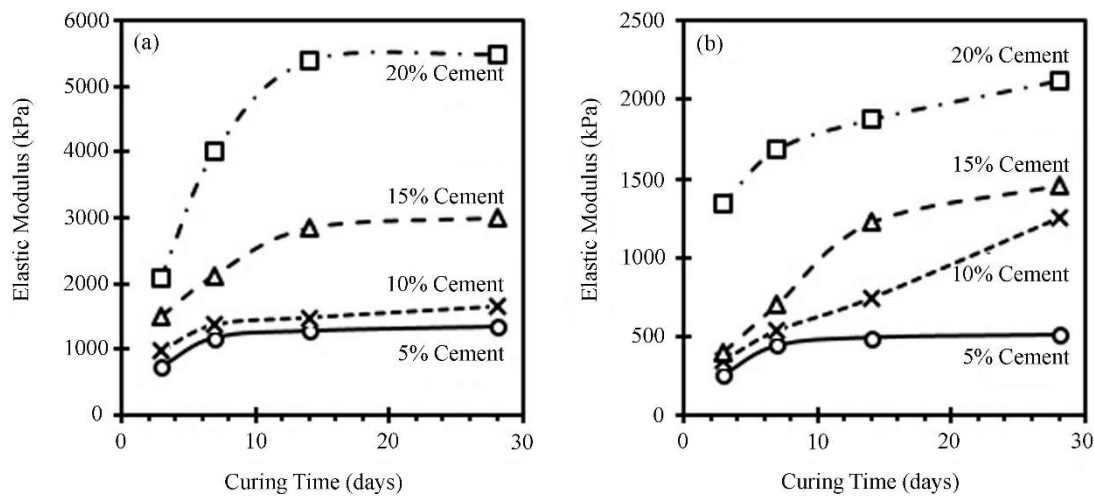


Fig. 5. Variation of Elastic Modulus with Curing Time of (a) Soil, (b) Anthracene-Contaminated Soil, combined with different Cement Content

جابه‌جایی آنها دانست؛ چون آنتراسن یک ماده آلی غیر قطبی بوده و جذب آن به وسیله ذرات باردار رس محدود است، در نتیجه افزودن آن به خاک رسی موجب قرارگیری این ماده در فضای بین ذرات رس شده و با کاهش اصطکاک بین ذرات و در نتیجه سهولت جابه‌جایی آنها، سبب کاهش وزن واحد حجم بیشینه و افزایش رطوبت بهینه می‌شود. این نتایج با نتایج ارائه شده به وسیله پژوهشگران دیگر همخوانی دارد [5, 7].

مطابق جدول (۴)، افزودن سیمان به خاک حاوی آنتراسن، موجب بهبود وضعیت تراکم آن شده است؛ به گونه‌ای که وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه خاک آلوده به آنتراسن از $17/9 (kN/m^3)$ و 19 درصد، به $17 (kN/m^3)$ و $17/5$ درصد، برای نمونه بهسازی شده با 20 درصد سیمان رسیده است. مطابق جدول (۴)، بطور کلی مشاهده می‌شود که وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه خاک آلوده بهسازی شده با سیمان نسبت به خاک آلوده، به ترتیب افزایش و کاهش یافته‌اند. با افزودن سیمان به خاک آلوده به آنتراسن، 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 دارای وزن واحد حجم زیادی هستند در فضای بین ذرات خاک قرار گرفته و سطح ویژه را

۴-۴- مدول الاستیسیته

نسبت تنش به کرنش مواد جامد در ناحیه الاستیک، ضریب الاستیسیته نامیده می‌شود. در این پژوهش برای تعیین ضریب الاستیسیته از روش وتری (E_{50})، که برابر با شیب خط واصل بین ابتدا و 50 درصد مقاومت نهایی نمونه است، استفاده شد. در شکل (۵) چگونگی تغییرات ضریب الاستیسیته برای الف) خاک-سیمان و ب) خاک آلوده به آنتراسن اختلاط یافته با سیمان با درصدهای گوناگون سیمان در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت نشان داده شده است. مطابق شکل (۵)، میزان افزایش شکنندگی در نمونه‌های خاک-سیمان و خاک آلوده به آنتراسن اختلاط یافته با سیمان، تابعی از میزان سیمان یا زمان عمل‌آوری بوده و با افزایش آنها، بیشتر می‌شود.

۴- بحث

۴-۱- تراکم

همان‌گونه که در جدول (۴) دیده می‌شود، افزودن آنتراسن به خاک طبیعی سبب کاهش وزن واحد حجم بیشینه از $17/75$ به $17 (kN/m^3)$ و افزایش رطوبت بهینه از $17/9$ به 19 درصد شده است. نقش ماده آلی آنتراسن در نتایج تراکم را می‌توان مربوط به کاهش اصطکاک بین ذرات و در نتیجه سهولت

کاهش می‌دهند و سبب افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه می‌شوند.

۴-۲- حدود اتربرگ

نتایج مربوط به تغییرات حدود اتربرگ نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک آلوده به آنتراسن و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، با افزودن ماده هیدروکربنی آنتراسن به خاک طبیعی، حد روانی و خمیری افزایش یافته، به گونه‌ای که این افزایش برای حد روانی برابر ۶/۲۵ درصد و برای حد خمیری برابر ۳/۸۵ درصد است.

از آنجایی که خاک آلوده قبل از انجام آزمایش‌ها به مدت یک هفته در کیسه پلاستیکی نگهداری شد، و وضعیت آنتراسن در آن را می‌توان در سه حالت شرح داد؛ بخشی از آن با خاک واکنش شیمیایی داده، بخشی سطح ذرات خاک را پوشانده و مابقی در بین حفرات خاک قرار گرفته‌اند. با افزودن سیمان به این خاک، 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 دارای وزن واحد حجم زیادی هستند در فضای بین ذرات خاک قرار گرفته و سطح ویژه را کاهش می‌دهند. بنابراین، چون بخشی از ذرات رس به وسیله آنتراسن پوشانده می‌شوند، به مولکول‌های آب اجازه نمی‌دهند که به لایه مضاعف برسند، پس آب بیشتری نیاز خواهد بود تا خاک به حد خمیری برسد. این ممکن است دلیل افزایش حد خمیری خاک آلوده به آنتراسن نسبت به خاک طبیعی باشد. از طرف دیگر بخشی از آب که به لایه مضاعف نرسیده، در لایه آب آزاد قرار خواهد گرفت و سبب افزایش حد روانی در خاک خواهد شد. بطور کلی، حد روانی و خمیری با توجه به اینکه چه مقدار از آب به لایه دوگانه یا آزاد برسند افزایش خواهند یافت. نتایج مشابه به وسیله پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است [7، 18]. به عنوان نمونه [18] با بررسی اثر آلودگی خاک به وسیله نفت خام در مقادیر ۴، ۸ و ۱۲ درصد آلودگی، مشاهده کردند که حدود خمیری و روانی خاک آلوده نسبت به

خاک طبیعی افزایش یافته که این افزایش تابعی از مقدار ماده‌ی آلاینده بوده است.

مطابق شکل (۲)، مشاهده می‌شود که افزودن سیمان به خاک طبیعی، سبب ایجاد روند کاهش در حد روانی خاک-سیمان گشته است، بطوری‌که حد روانی در خاک-سیمان دارای ۵ درصد سیمان به نسبت ۲۰ درصد سیمان، از ۴۴/۸ به ۴۰/۳ درصد کاهش یافته است، که نشان دهنده کاهش ۱۱ درصدی است؛ اما در رابطه با حد خمیری روند مشخصی ملاحظه نمی‌شود. بطور کلی بررسی مراجع گوناگون نشان دهنده آن است که افزودن سیمان به خاک، روند مشخصی را برای حدود اتربرگ مشخص نمی‌کند [7، 8]. نتایج شکل (۲) نیز در راستای همین مطالعات است. در مورد افزودن سیمان به خاک آلوده به آنتراسن برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن، مطابق شکل (۲) ملاحظه می‌شود که در این حالت نیز روند مشخصی در حدود اتربرگ وجود ندارد، با این حال حدود اتربرگ برای خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان به نسبت خاک-سیمان، مقدار بیشتری دارند، البته این تفاوت ناچیز بوده به گونه‌ای که بیشترین مقدار اختلاف برای حد روانی در این دو حالت برای مقدار ۱۰ درصد سیمان بوده که برابر ۴ درصد اختلاف است و برای حد خمیری برای مقدار ۱۵ درصد سیمان بوده که برابر ۲/۹ درصد اختلاف است.

بطور کلی روند تغییرات شاخص خمیری در نمونه‌های خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان، کاهش یافته است به گونه‌ای که مقدار این شاخص در نمونه‌ی خاک-سیمان از ۲۲ درصد برای خاک با صفر درصد سیمان (خاک طبیعی) به ۱۲/۵ برای حالت ۲۰ درصد سیمان رسیده است. برای نمونه‌ی خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان، مقدار شاخص خمیری از ۲۴/۶ درصد برای خاک آلوده اختلاط یافته با صفر درصد سیمان (خاک آلوده به آنتراسن) به ۱۴ برای حالت ۲۰ درصد سیمان رسیده است. مشابه این نتایج به وسیله [7] نیز گزارش شده است؛ آنها در پژوهش خود روی خاک آلوده به مقادیر ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول، روند کاهش در حدود خمیری و روانی را در خاک آلوده به

گلیسرول و همچنین خاک آلوده‌ی بهسازی شده با سیمان را مشاهده کردند.

۳-۴- مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته

مطابق شکل (۳)، مشاهده می‌شود که افزودن آنتراسن به خاک، موجب کاهش قابل ملاحظه مقاومت نهایی نسبت به خاک در حالت طبیعی شده؛ و این مقدار کاهش برابر ۱۳۶ درصد است.

همان‌گونه که در نتایج مربوط به آزمایش تراکم گفته شد، چون افزودن آنتراسن به خاک موجب کاهش اصطکاک بین ذرات سهولت جابه‌جایی آنها می‌شود، بنابراین سبب کاهش مقاومت خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی می‌شود. این نتایج، با نتایج ارائه شده به وسیله پژوهشگران دیگر همخوانی دارد [15، 19، 20]. به عنوان نمونه [۲۰] با افزودن مقادیر مختلف گلیسرول و پروپانول به خاک چسبنده، با کاهش مقاومت آن نسبت به خاک طبیعی مواجه شدند.

شکل (۴) نشان دهنده مقادیر تنش نهایی تمامی نمونه‌های مورد آزمایش در این پژوهش است. مطابق این شکل، مقادیر تنش به طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش مقدار سیمان و یا زمان عمل آوری، افزایش یافته اند و مقاومت نمونه‌های خاک-سیمان بسیار بیشتر از خاک طبیعی است. در مورد مقایسه مقاومت نهایی نمونه‌های خاک آلوده به آنتراسن در برابر نمونه‌های خاک-سیمان، همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، افزایش مقدار سیمان در نمونه‌های آلوده، موجب افزایش مقاومت آنها شده است و این بدان معنی است که سیمان استفاده شده در این پژوهش، قابلیت بهسازی خاک آلوده به آنتراسن را داشته است. به عنوان نمونه، 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 (kPa) و ۲۳۵۴ (kPa) است که نشان دهنده افزایش مقاومت ۲۰۰ درصدی برای این نمونه‌های آلوده اختلاف یافته با سیمان، نسبت به نمونه‌های آلوده است؛ و برای همان مقادیر سیمان، یعنی ۱۰ و ۲۰ درصد، مقاومت نمونه‌های

خاک-سیمان به ترتیب برابر ۱۳۱۸ (kPa) و ۳۹۸۱ (kPa) است که در این حالت نیز افزایش مقاومت حاصل شده از افزودن سیمان به خاک طبیعی، حدود ۲۰۰ درصد است؛ که این موضوع نشان دهنده تاثیر قابل توجه سیمان استفاده شده در این پژوهش، بر بهسازی خاک آلوده به آنتراسن است.

عده‌ای از پژوهشگران بر این باورند 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 واکنش کلی سیمان می‌شود [21، 22]. با توجه به شکل (۴)، مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده در این پژوهش، برخلاف نظر این عده از پژوهشگران بوده و در راستای نتایج پژوهشگران دیگری است که با انجام آزمایش روی خاک‌های آلوده به مواد آلی، نتیجه‌گیری نمودند که بهسازی این خاک‌ها با سیمان امکان‌پذیر است [7، 10، 12]. به عنوان نمونه [7] در پژوهش خود با استفاده از مقادیر ۳، ۶ و ۹ درصد سیمان، به بررسی وضعیت بهسازی خاک آلوده به گلیسرول پرداختند؛ آنها در نتایج کار خود اعلام داشتند که سیمان قابلیت بهسازی و افزایش مقاومت خاک آلوده به این ماده‌ی آلی را دارد و این افزایش مقاومت تابعی از مقدار سیمان و زمان عمل آوری است. همچنان که در بخش تغییرات حدود اثر برگ اشاره شد، وضعیت قرارگیری ماده آلی آنتراسن در توده خاک را در سه بخش می‌توان در نظر گرفت، بنابراین با اضافه شدن سیمان به خاک آلوده، واکنش ماده آلی را نیز میتوان در سه بخش تفسیر کرد. بخشی از ذرات خاک به آنتراسن آغشته نشده و با آن پوشانده نمی‌شوند؛ زمانی که به منظور بهسازی خاک آلوده، سیمان به آن اضافه می‌شود با این بخش از خاک واکنش نشان داده که حین این واکنش و با انجام عمل هیدراسیون، ماده‌ای سخت تشکیل می‌شود. از طرف دیگر، مقداری محدودی از ماده آلی جذب ذرات خاک شده و در تشکیل ماده‌ی سخت که از ترکیب سیمان و ذرات خاک به وجود می‌آید، مشارکت می‌کند و سبب افزایش مقاومت می‌شود؛ اما باقی مانده ماده آلی در فضای بین ذرات خاک باقی می‌ماند و دور ذرات سیمان را احاطه می‌کند و از واکنش شیمیایی سیمان با خاک

می شود، پس همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می شود، میزان شکنندگی نمونه‌های خاک-سیمان بسیار بیشتر از نمونه‌های خاک آلوده به آنتراسن اختلاط یافته با سیمان است.

به هر حال، نتایج این پژوهش نشان داد که بهسازی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی با افزودن سیمان امکان‌پذیر است، لیکن ارزیابی بهتر از نتایج بهسازی، با انجام آزمایش‌های صحرایی امکان‌پذیر بوده و در صورت حصول به نتایج مطلوب و با در نظر گرفتن شرایط زیست محیطی و اقتصادی، می‌توان آن را بصورت یک روش کاربردی تلقی کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی روی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به آنتراسن، خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان به منظور ارزیابی امکان بهسازی خاک آلوده به ماده هیدروکربنی آنتراسن انجام شد و نتایج زیر به دست آمد:

- افزودن ماده آلی آنتراسن، سبب افزایش حدود اتربرگ خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی می‌شود که علت این موضوع در پوشانده شدن بخشی از ذرات رس و کاهش آب ورودی به لایه دوگانه است.

- 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؛ که این افزایش مقاومت با افزایش درصد سیمان، افزایش می‌یابد.

- افزایش مقاومت خاک آلوده به آنتراسن اختلاط یافته با سیمان، به علت پوشانده شدن بخشی از ذرات سیمان به وسیله 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 تاثیر مثبت سیمان و قابلیت آن را در بهسازی خاک آلوده به آنتراسن نشان می‌دهد.

- بررسی نتایج مدول الاستیسیته که به روش تری محاسبه شد، نشان دهنده‌ی افزایش شکنندگی نمونه‌های خاک-سیمان و

جلوگیری می‌نماید؛ 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، امکان واکنش با سیمان را داشته‌اند، کاسته شده و همچنین مقداری از ذرات سیمان به وسیله ماده آلی پوشانده شده‌اند، مقاومت خاک آلوده بهسازی شده با سیمان نسبت به خاک-سیمان کمتر خواهد بود که این موضوع به خوبی در شکل (۴) مشخص است. علاوه بر این موارد، همچنان که اشاره شد، افزودن ماده آلی آنتراسن به خاک، سهولت و افزایش جابه‌جایی ذرات خاک آلوده را در پی خواهد داشت که این موضوع نیز به نوبه خود سبب کاهش مقاومت خاک آلوده بهسازی شده با سیمان نسبت به خاک-سیمان است [23].

با توجه به شکل (۵)، با بیشتر شدن زمان عمل‌آوری و تکمیل فرایند هیدراسیون، بر میزان مدول الاستیسیته نمونه‌های خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان افزوده شده است. تحلیل نتایج بیانگر آن است که مدول الاستیسیته تابعی از مقدار سیمان بکار رفته و زمان عمل‌آوری است. مانند این نتیجه به وسیله پژوهشگران دیگری نیز گزارش شده است [5، 24]. این نتیجه را می‌توان ناشی از سمنته شدن ذرات خاک دانست. زمانی که خاک-سیمان فشرده می‌شود، تعدادی پیوند شیمیایی بین سطوح مجاور دانه‌های سیمان باهم و همچنین بین دانه‌های سیمان و ذرات خاک شکل می‌گیرد. در خاک‌های رسی، زمانی که هیدراسیون سیمان انجام می‌شود، یک پیوند قوی همراه با یک پارچه‌گی ساختار جدید بین مواد معدنی و مصالح، شکل می‌گیرد. این موضوع سبب می‌شود تا دانه‌های خاک نتوانند روی یکدیگر بلغزند. این پیوند بین ذرات خاک و سیمان در طی زمان، توسعه یافته و کامل‌تر می‌شود. بنابراین، واکنش‌های بین خاک و سیمان نهایتاً منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌شود [5، 8]. البته همان‌گونه که در بخش‌های پیشین ذکر شد، بعلت پوشیده شدن ذرات خاک توسط آنتراسن، واکنش کمتری بین سیمان و خاک، در خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان صورت می‌پذیرد و خاک-سیمان کمتری تشکیل

Building and Environment, 40(5), 2005, pp681-687.

[9] Sezer, A. Inan, G. Yilmaz, H. R. & Ramyar, K.; "Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmin clay", *Build. Environ.*, 41(2), 2006, pp150-155.

[10] Tremblay, H. Duchesne, J. Locat, J. & Leroueil, S.; "Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement", *Can. Geotech. J.*, 39, 2002, pp535-546.

[11] Meegoda, J. N. Ezeldin, A. S. Vaccari, D. A. & Muller, R. T.; "Petroleum contaminated soils in highway construction", *Third materials engineering conference, infrastructure: New materials and methods of repair*, 1994, pp904-911.

[12] Hassan, H. F. Taha, R. Al Rawas, A. Al Shandoudi, B. Al Gheithi, K. & Al Baram, A. M.; "Potential uses of petroleum-contaminated soil in highway construction", *Construction and Building Materials*, 2005, pp646-652.

[13] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR).; "Public Health Statement, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons", Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services 1990.

[14] Faust, R. A.; "Toxicity Summary for Anthracene", Oak Ridge National Laboratory, Chemical Hazard Evaluation Group. Oak Ridge, TN 1991.

[15] Delgado, L. and Romero, E. M.; "Removal of Anthracene from Recently Contaminated and Aged Soils", *Water Air Soil Pollut.*, 2013, pp224:1420.

[16] Eibes, G., Lú-Chau, T., Feijoo, G., Moreira, M. T., & Lema, J. M.; "Complete degradation of anthracene by manganese peroxidase in organic solvent mixtures", *Enzyme and Microbial Technology*, 37(4), 2005, pp365-372.

[17] Hansen, H. K., Riverol, C., & 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), 2000, pp1168-1174.

[18] Kermani, M. & Ebadi, T.; "The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2012, pp655-671.

[19] Delgado, L. Aguilar, A. A. Luna, M. L. & Dendooven, L.; "Mixing of ananthracene-contaminated soil: A simple but efficient Remediation technique?", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, pp238-241.

[20] Ratnaweera, P., & Meegoda, J. N.; "Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils", *Geotechnical Testing Journal*, 29(2), 2006, 133.

[21] Moore, C. A., & Mitchell, J. K.; "Electromagnetic forces and soil strength", *Geotechnique*, 24(4), 1974,

خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان، با افزایش در صد سیمان و زمان عمل آوری است؛ آلودگی خاک به آنتراسن، میزان شکنندگی آن را کاهش داده است.

۶- پیشنهادات

در این پژوهش نمونه‌های ساخته شده مطابق منحنی تراکمی دارای رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه یا به عبارتی دارای درجه‌ی تراکمی در حدود ۱۰۰٪ بودند. پیشنهاد می شود این پژوهش برای نمونه‌هایی در شاخه‌ی خشک و تر منحنی تراکمی با درجات تراکمی دیگر مانند ۸۰ و ۹۵ درصد انجام و نتایج با یکدیگر مقایسه شوند تا آثار تغییرات تراکمی نیز در نتایج دیده شود.

References

۷- مراجع

[1] Zhang, S. Y., Wang, Q. F., Wan, R., & Xie, S. G.; "Changes in bacterial community of anthracene bioremediation in municipal solid waste composting soil", *Journal of Zhejiang University*, 2011, pp760-768.

[2] Oluseyi, T. Olayinka, K. Alo, B. & 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*, Vol. 5(7), 2011, pp482-493.

[3] Human Health Risk Assessment.; "Technical Data Report Appendix D: Toxicological Reference Values", 2010.

[4] Chi, F.H. Leu, M.H. and Lee, R.C.; "Removal of Anthracene Contaminated Soil Using Soybean Oil", *Sustain. Environ. Res.*, 2010, pp275-280.

[5] Estabragh, A.R. Beytolahpour, I. & Javadi, A.A.; "Effect of Resin on the Strength of Soil-Cement Mixture", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 7, 2011, pp969-976.

[6] Khamehchiyan, M., Charkhabi, A. H., & Tajik, M.; "Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils", *Engineering Geology*, 89(3), 2007, pp220-229.

[7] Estabragh, A.R. Khatibi, M. & Javadi, A.A.; "Effect of Cement on Treatment of a Clay Soil Contaminated with Glycerol", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015.

[8] Al-Rawas, A. A. Hago, A. W. & Al-Sarmi, H.; "Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman",

pp627-640.

[22] Sridharan, A., & Rao, G. V.; "Shear strength behaviour of saturated clays and the role of the effective stress concept", *Geotechnique*, 29(2), 1979, pp177-193.

[23] Botta, D. Dotelli G. Biancardi R. Pelosato R. & Natali S.; "Cement-clay pastes for stabilization/solidification of 2-chloroaniline", *Waste Manag*, 2004 ,pp207-216.

[24] Bahar, R. Benazzoug, M. & Kenai, S.; "Performance of compacted cement stabilized soil." *Cem. Concr. Compos*, 2004, pp811-820.

Archive of SID

Effect of Cement on Geotechnical Properties of Hydrocarbon-Contaminated Clay Soil

M. M. Kholoosi^{1*}, A. R. Estabragh², J. Abdollahi³

1-Postgraduate Student, Irrigation and Reclamation Engineering Department, University of Tehran

2- Associate Professor, Irrigation and Reclamation Engineering Department, University of University of Tehran

3- Instructor, Irrigation and Reclamation Engineering Department, University of Tehran

mm.kholoosi@ut.ac.ir

Abstract:

Pollution of the soil by hydrocarbon is a significant Geo-Environmental problem that may affect the environmental quality of soil, groundwater and air. Soil can be contaminated by organic materials attributable to leakage from underground or aboveground storage tanks and accidental spills. The response of soil to the contaminants not only depends on the local environment but also is influenced by factors such as particle size, bonding characteristics among particles, and ion exchange capacity. The transport of contaminant components from soil into groundwater can cause serious problems. Use of contaminated soil and its stabilization can be considered in earthworks such as embankments, backfills, and roads where there is no pathway for leaching of contaminants to underground water or if the contaminants pose no risk to the public and the environment. In some areas, the native soil is contaminated with hydrocarbon substances. For performing projects in such areas, use of local soil is dictated for construction as a result of haulage distance and economic considerations. Thus, the treatment and stabilization of local soil must be considered. On the other hand, in the areas where the soil has been contaminated and the treatment is not economical, effects of the contaminating substance on the soil behavior should be evaluated for the design of the projects. Therefore, understanding the mechanical behavior of contaminated soils and their treatment is important. Improving the mechanical behavior of clay soils by stabilization is a means of fulfilling geotechnical design criteria.

An investigation on the behavior of a contaminated clay soil with Anthracene and its treatment is carried out through an experimental program. Anthracene is a representative of a group of hydrocarbon, which are called PAHs (Poly Aromatic Hydrocarbons). PAHs are created due to incomplete combustion of fossil fuels or wastes.

In order to investigate the effect of cement on the stabilization of clay contaminated soil with Anthracene, several specimens are prepared by static compaction method at maximum dry density and optimum moisture. The specimens are of natural clay soil, contaminated soil with Anthracene, soil-cement and Anthracene-contaminated stabilized with different percentage of cement (5, 10, 15 and 20%) in different curing times (3, 7, 14 and 28 days). Atterberg limits and Unconfined compressive strength (UCS) tests are conducted on the specimens. The results of the experimental work show that adding Anthracene to clay soil, changes the compaction parameters. As an example, the dry specific weight of soil is reduced and the optimum water content is increased. Although, adding cement to the Anthracene-contaminated soil improves the compaction of soil, it increases the dry specific weight and reduces the optimum water content. In addition, adding the Anthracene may change the unconfined compressive strength of soil and will reduce the strength of soil. The strength of the contaminated soil is increased by adding cement. The amount of increase in the strength is depended on the percentage of cement and curing (type or time). The results show that Atterberg limits are increased by adding Anthracene to the clay soil, but are reduced by adding Anthracene or cement to soil-cement. The results indicate that adding the Anthracene to the soil, changes its structure to flocculated shape, but decrease of friction between soil particles due to adding Anthracene, may lead the soil particles to move easily together. By the way, the results of this research show that the cement could stabilize contaminated soil with Anthracene.

Keywords: Atterberg limits, Curing time, Flocculation, Elastic modulus