

## Improving the Mechanical Behavior of Anthracene-Contaminated Kaolinite Clay Using Portland Cement and Lime

MOHAMMAD HAJIMOHAMMADI<sup>1</sup>, AMIR HAMIDI<sup>1\*</sup>

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Karaj, Iran.  
(Received: Apr. 5, 2020- Revised: Apr. 28, 2020- Accepted: May. 5, 2020)

### ABSTRACT

Leakage of hydrocarbon organic fluids into the soil usually causes a reduction in its bearing capacity and performance. Cementation is one of the most effective and suitable solutions to improve the geotechnical parameters of contaminated clays. In this study, the effect of Portland cement (3, 6 and 9%) and lime (10, 20 and 30%) on improvement of kaolinite clay contaminated with anthracene (0.06, 0.09 and 0.12%) was investigated by performing an experimental study. For this purpose, the samples were prepared as mixtures of clean or anthracene-contaminated clay with different cement and lime contents for a curing time of 7 days. Then, unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted on the samples. The results showed the strength reduction of anthracene-contaminated kaolinite clay compared to the clean soil. The reduction in the unconfined strength was about 46% with an increase in degree of contamination up to 0.12%. Adding Portland cement and lime to the clean and contaminated soil increased the compressive strength. As, the addition of 3% Portland cement or 10% lime to clay contaminated with 0.12% anthracene increased UCS up to 4 times. Thus, according to the results of soil improvement, the strength of soil-cement mixture containing 3% Portland cement is approximately equal to that of soil-lime containing 10% lime. Both the Portland cement and lime were capable of improving the strength of anthracene-contaminated soil. However, the rate of improvement by cement was more than that of lime. The main reason was due to the reduction of double layer thickness which causes flocculation of particles and tendency of clay structure to behave like granular soils.

**Keywords:** Kaolinite Clay, Anthracene, Improvement, Unconfined Compressive Strength.

---

\*Corresponding Author's Email: [hamidi@khu.ac.ir](mailto:hamidi@khu.ac.ir)

## بهسازی رفتار مکانیکی رس کائولینیت آلوده به آنتراسن با سیمان و آهک

محمد حاجی محمدی<sup>۱</sup>، امیر حمیدی<sup>\*</sup>

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۱۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۲/۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۲/۱۶)

### چکیده

نشت مواد آلی هیدروکربنی به داخل خاک معمولاً سبب افت ظرفیت باربری و عملکرد آن می‌شود. یکی از راهکارهای مؤثر و مناسب جهت بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های رسی آلوده به این مواد، بهسازی با مواد سیمانی می‌باشد. در این پژوهش، مطالعات آزمایشگاهی برای بررسی اثر سیمان پرتلند با مقادیر (۳، ۶ و ۹ درصد وزنی) و آهک با مقادیر (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی) در بهسازی خاک رس کائولینیت آلوده به ماده آلی آنتراسن با مقادیر (۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۱۲ درصد وزنی)، انجام شده است. به این منظور، نمونه‌های خاک تمیز، خاک آلوده، ترکیب خاک و سیمان، ترکیب خاک و آهک، خاک آلوده بهسازی شده با سیمان و خاک آلوده بهسازی شده با آهک در زمان عمل‌آوری ۷ روزه تهیه گردید. سپس آزمایش مقاومت تک‌محوری بر روی کلیه نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که مقاومت خاک رس کائولینیت آلوده به آنتراسن نسبت به رس تمیز کاهش می‌یابد و این کاهش مقاومت با افزایش درصد آلاینده به میزان ۰/۱۲ درصد، در حدود ۴۶ درصد است. افزودن سیمان و آهک به خاک تمیز و خاک آلوده موجب افزایش مقاومت آن‌ها شده و افزایش ۳ درصد سیمان یا ۱۰ درصد آهک به خاک آلوده به ۰/۱۲ درصد آنتراسن، موجب افزایش حدوداً ۴ برابری مقاومت می‌شود. بنابراین طبق نتایج، بهسازی رس با ۳ درصد وزنی سیمان تقریباً معادل ۱۰ درصد وزنی آهک است. سیمان و آهک قابلیت بهسازی خاک آلوده به آنتراسن را دارند اما تأثیر سیمان در بهسازی نمونه‌های آلوده به آنتراسن، به دلیل رفتار شبه دانه‌ای و فولوکوله شدن خاک در اثر کاهش لایه مضاعف آب توسط آنتراسن، بیشتر از آهک می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** رس کائولینیت، ماده آلی آنتراسن، بهسازی، مقاومت تک‌محوری.

### مقدمه

هرگونه تغییر در ویژگی‌های اجزای محیط به‌واسطه حضور ماده‌ای خارجی که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، آلودگی نامیده می‌شود. در این میان، محصولات نفتی و مواد آلی هیدروکربنی یکی از مهمترین آلوده‌سازهای محیط‌زیست محسوب می‌شود. آلوده شدن خاک علاوه بر ایجاد اثرات مخرب زیست‌محیطی، موجب تغییر رفتار مهندسی آن و وضعیت سازه‌های واقع بر آن می‌شود. تغییرات می‌تواند منجر به کاهش در ظرفیت باربری پی، افزایش نشست سازه و امکان ایجاد نشست نامتقارن به دلیل ویژگی‌های متفاوت تراکم‌پذیری در اثر نشت آلاینده‌ها شود و خطراتی را به وجود آورد (Cuypers et al., 2002 و Tremblay et al., 2002).

رفتار خاک‌های آلوده و روش‌های بهسازی و اصلاح آن‌ها توسط محققین مختلفی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. Srivastava et al. (2010) به بررسی تثبیت رس با پلاستیسیته پایین و آلوده به ۱۰ درصد روغن موتور، توسط مقادیر مختلف

سیمان<sup>۱</sup> CKD پرداختند. نتایج نشان داد با اضافه شدن آلودگی به خاک، مقاومت تک‌محوری کاهش یافته و پارامترهای مقاومت برشی یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. همچنین (Zanjarani and Hamidi, 2014) به بررسی رفتار ژئوتکنیکی خاک رس کائولینیت آلوده به دو نوع سیال نفتی پرداختند. بر این اساس مشخص شد که با افزایش درصد آلودگی، تراکم‌پذیری خاک آلوده نسبت به خاک تمیز افزایش می‌یابد. اما ضریب تحکیم و نفوذپذیری خاک با ازدیاد درصد آلاینده کاهش خواهند یافت که میزان کاهش مرتبط با نوع آلاینده است. به‌علاوه روغن کاری ذرات خاک به دلیل حضور سیال نفتی به دلیل لزجت بالای آن نسبت به آب نیز موجب لغزش بهتر و افزایش تراکم‌پذیری خاک خواهد شد.

تثبیت به روش شیمیایی و با استفاده از سیمان و آهک یکی از راه‌حل‌های مناسب و اقتصادی است که معمولاً برای بهسازی خاک استفاده می‌شود. سیمان و آهک هر دو باعث بهبود خصوصیات مهندسی خاک‌های رسی می‌شوند اما با این حال

نسبت به وضعیت تمیز و طبیعی کاهش می‌دهد. افزودن سیمان به مخلوط ذکرشده، سبب افزایش مقاومت می‌شود و این افزایش تابعی از درصد سیمان به‌کاررفته و زمان عمل‌آوری است. بدین ترتیب نتیجه گرفتند که سیمان پرتلند قابلیت بهسازی خاک آلوده به آنتراسن را دارد. (Oluwatuyi *et al.* (2020) اثر مخلوط سیمان و آهک به نسبت ۱ به ۲ را بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس کائولینیت آلوده به نفت خام در درصدهای مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه اثربخشی مخلوط سیمان و آهک در تثبیت رس کائولینیت آلوده به نفت خام و استفاده احتمالی از خاک تثبیت‌شده به‌عنوان یک مصالح جایگزین را نشان داد. همچنین طبق نتایج به‌دست‌آمده از میکروسکوپ الکترونی مشاهده شد که با اضافه کردن مخلوط سیمان و آهک به رس کائولینیت آلوده به نفت خام، از میزان ساختار فولوکوله و لخته‌ای به وجود آمده به علت آلودگی، کاسته می‌شود.

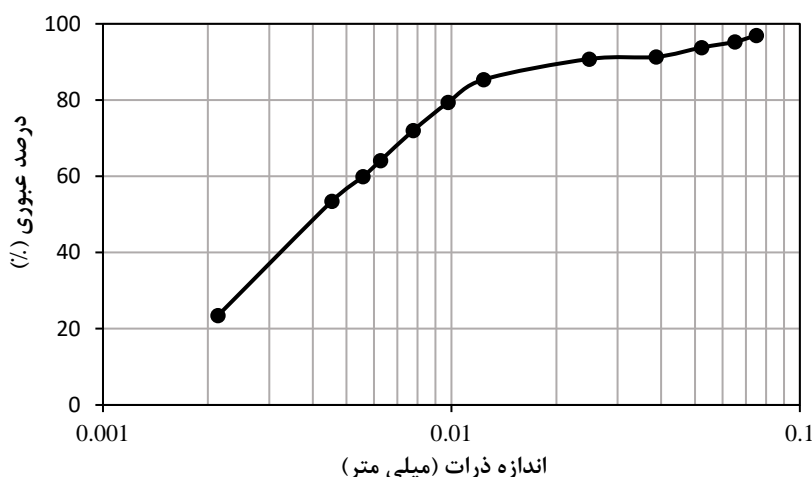
در این پژوهش برای بررسی آلودگی خاک و ارزیابی نحوه تأثیر آلاینده بر ساختار آن، از ماده آلی آنتراسن که نماینده گروه هیدروکربن‌های چند حلقه‌ای معطر (PAHs<sup>۳</sup>) می‌باشد، استفاده شده است. به‌طورمعمول، PAHs در اثر سوختن ناقص نفت، گاز، زغال‌سنگ و نیز توسط شیرابه زباله‌های شهری و صنعتی ایجاد می‌شوند و به درون محیط خاک راه می‌یابند (Health Human Risk Assessment, 2010). همچنین وجود کارخانه‌های تولید سموم دفع آفات و صنایع پلاستیک در اطراف شهر کرج و در نزدیکی تهران که منشأ تولید آنتراسن هستند، باعث آلوده شدن خاک و کاهش مقاومت اراضی اطراف آن‌ها شده است (Estabragh *et al.*, 2018). در ضمن بررسی مراجع داخلی و خارجی مورد مطالعه نیز نشان داده است که اکثر تحقیقات در رابطه با بهسازی خاک‌های آلوده به مواد آلی، به سیمان پرتلند محدود بوده و در خصوص بهسازی خاک‌های آلوده به مواد آلی با آهک و همچنین مقایسه کارایی آن با سیمان پرتلند تحقیقات محدودی انجام گرفته است. بدین ترتیب در تحقیق حاضر از آنتراسن به‌عنوان ماده آلاینده و از سیمان پرتلند و آهک به‌عنوان دو ماده رایج و اقتصادی، در درصدهای مختلف جهت بهسازی خاک آلوده استفاده شده است. سپس نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه و مورد بحث قرار گرفته‌است.

### مواد و روش‌ها

مواد اصلی مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل خاک رس کائولینیت، سیمان پرتلند نوع یک، آهک هیدراته، آب و ماده آلی

استفاده از سیمان برای تثبیت خاک‌های ریزدانه با خمیری زیاد کمتر توصیه شده زیرا آهک در این خاک‌ها و آهک نتایج بهتری ارائه می‌کند (Mallik and Prusinski and Bhattacharja, 1999) و (El-Korchi, 2009). همچنین این روش به‌طور گسترده برای اصلاح خاک‌های آلوده نیز به کار می‌رود. در تحقیقی (Akinwumi *et al.* (2016) به بررسی اثر سیمان پرتلند معمولی نوع یک با مقادیر مختلف بر تثبیت خاک رس در رطوبت طبیعی و آلوده‌شده به ۱۰ درصد نفت خام پرداختند. مقاومت و نفوذپذیری خاک با افزودن نفت خام کاهش یافت. درحالی‌که با بهسازی خاک آلوده توسط سیمان، خواص خمیری و نفوذپذیری آن کاهش و مقاومت افزایش یافت. (Chen *et al.* (2017) نیز اثر افزودن سیمان در زمان‌های عمل‌آوری مختلف بر رفتار رس آلوده با درصدهای مختلف روغن دیزل را تحت آزمایش تک‌محوری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقاومت نمونه‌های آلوده فاقد سیمان با افزایش زمان، کاهش می‌یابد. ولی پس از تثبیت نمونه‌ها با سیمان، مقاومت نمونه‌ها با افزایش درصد سیمان و مدت‌زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. همچنین در درصد سیمان ثابت، مقاومت نمونه‌ها با افزایش مقدار روغن دیزل کاهش می‌یابد. در تحقیق دیگر، (Mohammadi and Moharamzade (2015) به بررسی کارایی آهک بر بهسازی خاک‌های ماسه سیلت دار و رس با حد روانی پایین، آلوده‌شده با مواد نفتی در محدوده پالایشگاه تبریز پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از بهسازی نمونه‌های آلوده به مواد نفتی مشخص شد که با افزودن آهک زنده، خواص خمیری خاک کاهش یافته و پارامترهای مقاومتی افزایش می‌یابد. (Estabragh *et al.* (2016) به بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی خاک رس آلوده به ۳، ۶ و ۹ درصد گلیسرول و ترکیب‌شده با ۳ و ۶ درصد سیمان پرتلند نوع یک پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بهبود پارامترهای مقاومتی با بهسازی خاک توسط سیمان پرتلند مشاهده شد. همچنین (Estabragh *et al.* (2018) تأثیر افزودن سیمان پرتلند برای بهسازی خاک رسی آلوده به ۰/۱۲ درصد ماده آلی آنتراسن را از منظر ریزساختاری و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به آنتراسن، ترکیب خاک و سیمان و همچنین خاک آلوده بهسازی شده با ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی سیمان، در زمان‌های مختلف عمل‌آوری را تهیه و بر روی آن‌ها آزمایش مقاومت تک‌محوری انجام دادند. با بررسی نتایج آزمایشگاهی و همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی<sup>۱</sup>، نشان دادند که افزودن آنتراسن به خاک، علی‌رغم ایجاد حالت لخته<sup>۲</sup> در آن، مقاومت را

نفت خام و ذخایر آن وجود دارد، به وفور یافت می‌شود (Juo and Franzluebbers, 2004). همچنین کائولینیت یکی از رایج‌ترین مواد معدنی خاک‌ها در جنوب ایران است که بیشتر پالایشگاه‌های ایران بر روی آن‌ها قرار دارد و خطر آلودگی به نفت در آن‌ها بسیار بالا است (Khamehchiyan et al., 2007). رده خاک کائولینیت بنا بر سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (USCS<sup>۱</sup>) از نوع رس با پلاستیسیته کم (CL) است. همچنین منحنی دانه‌بندی، مشخصات فیزیکی و شیمیایی رس کائولینیت به ترتیب در شکل (۱) و جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی خاک رس کائولینیت

### سیمان

در این پژوهش از سیمان پرتلند نوع یک معمولی (به دلیل فراوانی و در دسترس بودن آن) جهت تثبیت و اصلاح خاک استفاده شده است. محققان دیگری همچون Vipulanandan (1995) و Estabragh et al. (2018) نیز از سیمان پرتلند نوع یک برای تثبیت و جامدسازی رس با خمیری کم و آلوده به ماده آلی استفاده کردند. برخی مشخصات فیزیکی و مکانیکی این سیمان طبق استاندارد ASTM تعیین و در جدول (۳) نمایش داده شده است. میزان سیمان اضافه‌شده به نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده به ماده آلی مشابه تحقیقات (Estabragh et al. 2016) و (Majeed et al. 2017) برابر صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد وزن خشک خاک انتخاب شده است.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان مورد استفاده

مقادیر	مشخصات
۲۹/۳	غلظت نرمال (%)
۱۰۸	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۱۸۰	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
۲۳	مقاومت فشاری ۷ روزه (مگا پاسکال)
۳۴	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگا پاسکال)

آنتراسن بوده که برای ساخت نمونه‌ها از آن‌ها استفاده شده است. در ادامه، ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی این مواد به تفصیل بیان شده است.

### خاک

برای انجام این پژوهش از خاک رس کائولینیت تجاری که به‌صورت بسته‌بندی عرضه می‌شود، استفاده شده است. علت انتخاب خاک رس کائولینیت، به این دلیل است که این خاک در مناطق با آب و هوای گرمسیری و خشک، جایی که اکتشافات

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک رس کائولینیت

مقادیر	مشخصات
CL	سیستم متحد طبقه‌بندی خاک
۳۲	حد روانی (درصد)
۲۲	حد خمیری (درصد)
۱۰	نشانه خمیری (درصد)
۲/۶۶	چگالی ویژه
۱۷/۰۷	وزن مخصوص خشک حداکثر ( $kN/m^2$ )
۱۷	رطوبت بهینه (درصد)

جدول ۲- مشخصات شیمیایی رس کائولینیت

ترکیبات شیمیایی	میزان (درصد)
SiO <sub>۲</sub>	۶۷/۱۲
Al <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۱۷/۰۳
Fe <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۲-۳/۳۹
TiO <sub>۲</sub>	۰/۷۹
CaO	۰/۴۴
Na <sub>۲</sub> O	۰/۱۷
MgO	۰/۷۰
K <sub>۲</sub> O	۳/۲۶
L.O.I	۷/۱۳

## آهک

ظاهری شبیه کریستال جامد، بی رنگ و یا زرد کم رنگ است و از قطران زغال سنگ به دست می آید. عمده کاربردهای آن را می توان در تولید رنگ، نگهداری چوب، پوشش فلزات، صنعت پلاستیک، تولید سموم دفع آفات و همچنین ایجاد در اثر احتراق ناقص سوخته های فسیلی یافت. آنتراسن توسط آژانس حفاظت محیط زیست (EPA) به عنوان یکی از اولویت های اصلی آلودگی زیست محیطی معرفی شده و از مفاد لیست نگرانی های خیلی بزرگ (VHCL) آژانس شیمی اروپا (ECHA) است (Delgado and Romero, 2013). مشخصات فیزیکی این ماده در جدول (۵) نشان داده شده است.

مشخصات	مقادیر
گرانروی مطلق $240^{\circ}\text{C}$ (cP)	۰/۶۰۲
ثابت دی الکتریک	۲/۳۵
جرم مولکولی (g/mol)	۱۷۸/۲۳
چگالی در دمای $20^{\circ}\text{C}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	۱/۲۵
حلالیت در آب با دمای $25^{\circ}\text{C}$ (mg/L)	۰/۰۴۴
نقطه ذوب ( $^{\circ}\text{C}$ )	۲۱۸
نقطه جوش ( $^{\circ}\text{C}$ )	۳۴۰

## آماده سازی و نگهداری نمونه ها

نمونه های مورد نظر در این پژوهش شامل خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک-آهک، خاک آلوده، خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک هستند. برای تهیه نمونه های خاک آلوده، از ماده آلی آنتراسن به میزان ۶۰۰، ۹۰۰ و ۱۲۰۰ میلی گرم در یک کیلوگرم خاک (متناظر درصد های وزنی به ترتیب ۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۱۲) استفاده شده است. میزان آنتراسن در مطالعات محققان دیگری همچون (Estabragh *et al.*, 2018)، ۱۲۰۰ میلی گرم در یک کیلوگرم و در مطالعات (Chi *et al.*, 2010) و (2011) و (Delgado-Balbuena *et al.*, 2013)، به ترتیب ۲۰۰ و ۵۰۰ میلی گرم در یک کیلوگرم بوده است. با توجه به بررسی پژوهش ها و گزارش های d مبنی بر مقدار موجود آنتراسن در مناطق آلوده به این ماده آلی، بیشینه مقدار گزارش شده، ۰/۱۲ درصد می باشد (Estabragh *et al.*, 2018). آنتراسن در حالت طبیعی جامد است، بنابراین به منظور توزیع یکنواخت آن در توده خاک باید ابتدا در یک حلال حل شده و سپس محلول ساخته شده به خاک اضافه شود. به دلیل آنکه میزان حلالیت آنتراسن در آب بسیار کم و ناچیز است (۰/۰۴۴ mg/L در دمای  $25^{\circ}\text{C}$ )، از استون به دلیل حلالیت نسبتاً خوب (۱۰ g/L در دمای  $25^{\circ}\text{C}$ ) استفاده

آهک مورد استفاده در این پژوهش به صورت پودر و از نوع آهک هیدراته است که به طور عمده شامل هیدروکسید کلسیم یا  $\text{Ca(OH)}_2$  می باشد. برای استفاده از آهک هیدراته، ابتدا از الک نمره ۴۰ عبور داده شد. مشخصات شیمیایی این آهک در جدول (۴) نشان داده شده است. میزان آهک اضافه شده به نمونه های خاک مقادیر صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزن خشک خاک انتخاب شده است. به منظور تعیین درصد آهک معادل با سیمان پرتلند با در نظرگیری شاخص مقاومت تک محوری یکسان (که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت)، در تحقیق حاضر از مقادیر آهک بیشتری نسبت به سیمان پرتلند (با فواصل ۱۰ درصد وزنی) استفاده شد. لازم به ذکر است که مقدار نهایی آهک مصرفی به ۳۰ درصد وزنی محدود شد تا کاربرد آن از لحاظ اقتصادی نیز موجه و مقرون به صرفه باشد.

## جدول ۴- مشخصات شیمیایی ترکیب آهک

میزان (درصد)	ترکیبات شیمیایی
۲/۵۵	SiO <sub>2</sub>
۰/۶۶	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۴۳	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۰/۰۴	TiO <sub>2</sub>
۶۱/۶۲	CaO
۰/۰۶	Na <sub>2</sub> O
۳/۸۲	MgO
۰/۲۳	K <sub>2</sub> O
۰/۰۳	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
۰/۸۱	SO <sub>3</sub>
۲۹/۷۵	L.O.I

## آب

آب مورد استفاده در این پژوهش، آب آشامیدنی با pH برابر ۷/۷۶ و میزان کلر ۱/۷ میلی اکی والان در لیتر بوده است.

## آنتراسن

ماده آلی آنتراسن با فرمول  $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$  که از سه حلقه بنزن ذوب شده تشکیل شده است، به عنوان نماینده گروه هیدروکربن های چند حلقه ای معطر (PAHs)، استفاده شده است (ATSDR, 1990). گروه PAHs متعلق به آلاینده های آلی پایدار بوده که در برابر تجزیه بیولوژیکی مقاوم هستند و می توانند برای مدت زمان طولانی در داخل محیط باقی بمانند (Maliszewska-Kordybach, 1999 و Jones and Wild, 1995). آنتراسن از نظر

ریختن لایه بعدی، سطح رویه لایه قبلی برای پیوند بهتر میان لایه‌ها اندکی خراشیده شد. به روش سعی و خطا، میزان نیروی وارد جهت 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 مربوط به آن نمونه شود. در این پژوهش، تمامی اندازه‌گیری‌های وزن با ترازویی به دقت ۰/۱ گرم انجام شد. نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده به آنتراسن پس از ساخت و نمونه‌های خاک-سیمان، خاک-آهک، خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک پس از عمل‌آوری ۷ روزه تحت آزمایش مقاومت تک‌محوری قرار گرفتند.

### آزمایش‌ها

آزمایش مقاومت تک‌محوری ( $^2UC$ )، مطابق با استاندارد ASTM D1633-07 برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها انجام شده است. طبق استاندارد مذکور، نمونه‌ها ۲ ساعت قبل از قرارگیری در دستگاه بارگذاری، خارج از شرایط نگهداری (محیط مرطوب) قرار داده شدند. سپس با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه تا گسیختگی کامل تحت بارگذاری محوری قرار گرفته‌اند (Kumar et al., 2007) و (Estabragh et al., 2016). به منظور بررسی اثرات تکرارپذیری بر نتایج و کاهش خطا در هنگام انجام آزمایش‌های تراکم و مقاومت تک‌محوری، از هر نمونه دو تکرار انجام شد و متوسط دو آزمایش به‌عنوان نتیجه نهایی منظور شده است. در مواردی که اختلاف نتایج دو نمونه بیشتر از ۵ درصد متوسط آن دو بود، نمونه سوم نیز مورد آزمایش قرار گرفت و از دو نتیجه نزدیکتر میانگین‌گیری شد.

### نتایج و بحث

#### آزمایش تراکم

با انجام آزمایش تراکم بر خاک رس کائولینیت طبیعی، وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه به ترتیب برابر با  $(kN/m^3)$  ۱۷/۴۰ و ۱۷ درصد به دست آمد. شکل (۲) تغییرات وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه خاک طبیعی و خاک آلوده به درصدهای مختلف آنتراسن (۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۱۲ درصد) را نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور با افزایش مقدار ماده آلی آنتراسن، نمودار تراکمی به سمت راست و پایین انتقال پیدا کرده است. یعنی با افزودن آنتراسن به خاک، وزن واحد خشک خاک کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافته است.

شد. همچنین این حلال از دسته ترکیبات آلی فرار (VOC) می‌باشد و به‌سرعت از توده خاک خارج شده و تأثیری بر روند انجام آزمایش‌های صورت‌گرفته بر روی نمونه‌های خاک آلوده ندارد (Eibes et al., 2005). بدین ترتیب ابتدا آنتراسن در استون (۱۰ گرم آنتراسن در یک لیتر استون) حل و سپس محلول مذکور به توده خاک اضافه شده است. خاک آلوده به‌منظور خروج استون، در معرض هوا قرار داده شده است. خاک آلوده شده با آنتراسن جهت ایجاد ترکیب متعادل و انجام واکنش‌های شیمیایی خاک و آلاینده، به مدت یک هفته در کیسه پلاستیکی در بسته و دور از نور خورشید نگهداری شده است (Meegoda et al., 1994) و (Estabragh et al., 2018).

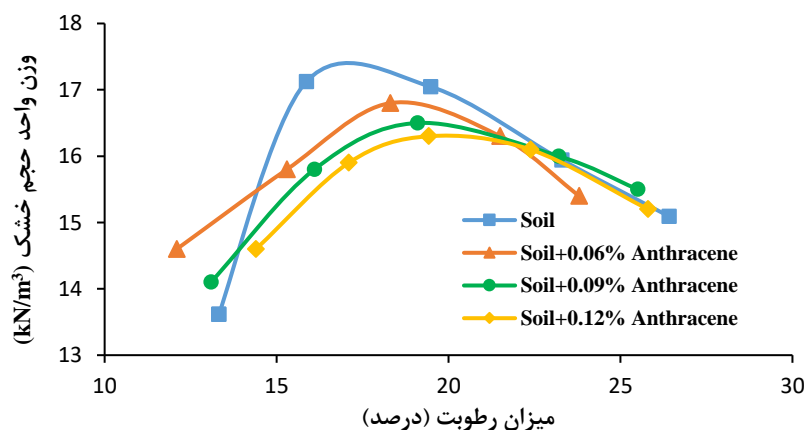
برای ساخت نمونه‌های خاک-سیمان، خاک-آهک، خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک، از مقادیر صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی سیمان و صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی آهک در زمان عمل‌آوری ۷ روزه استفاده شد. برای جلوگیری از تغییرات رطوبت، نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی بسته‌بندی شده و سپس جهت عمل‌آوری در اتاق مرطوب با دمای  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بیشتر از ۹۵ درصد به مدت‌زمان مشخص نگهداری شدند (Consoli et al., 2007). بیشینه وزن مخصوص و در نتیجه مقاومت یک خاک، در شرایط رطوبت بهینه ( $\omega_{opt}$ ) و وزن واحد حجم خشک بیشینه ( $\gamma_d(max)$ ) اتفاق می‌افتد (Estabragh et al., 2011). با توجه به اینکه یکی از اهداف اصلی در مطالعات مربوط به بهسازی خاک‌ها، بررسی شرایط مکانیکی و مقاومتی نمونه‌ها است و از طرف دیگر به‌منظور ایجاد شرایط معیار برای مقایسه مقاومت نمونه‌های ساخته‌شده در این پژوهش، تمامی نمونه‌ها در وضعیتی ساخته شدند که دارای وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه معادل آن باشند. بدین منظور، ابتدا این مقادیر با انجام آزمایش تراکم، بر مبنای استاندارد ASTM D698-12 بر نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده به درصدهای مختلف آنتراسن تعیین شد. سپس با اضافه کردن آب و رساندن رطوبت اولیه این نمونه‌ها به رطوبت بهینه، 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 شیوه تراکم به شرایط واقعی در عمل، به تراکم دینامیکی ترجیح داده شد. بدین منظور، نمونه‌ها در قالبی به طول ۷۶ و قطر ۳۸ میلی‌متر، در سه لایه ریخته شده و هر لایه به‌وسیله دستگاه بارگذاری با سرعت ۱/۵ میلی‌متر بر دقیقه متراکم شد. قبل از

فراوانی انجام شده است که طبق نتایج آن‌ها، ضخامت لایه مضاعف با مجذور ثابت دی‌الکتریک رابطه مستقیم دارد (Oldham, 2008). همان‌گونه که در جدول (۵) در خصوص ویژگی‌های ماده آنتراسن اشاره شده است؛ از آنجایی که مقدار ثابت دی‌الکتریک ماده آلی آنتراسن بسیار کمتر از ثابت دی‌الکتریک آب است، سبب کاهش ضخامت لایه مضاعف تشکیل یافته در اطراف ذرات رس شده و ساختار خاک را لخته‌ای‌تر می‌کند. بنابراین نقش ماده آلی آنتراسن در نتایج تراکم را می‌توان به کاهش ضخامت لایه مضاعف و در نتیجه، ایجاد ساختار لخته‌ای‌تر در خاک مرتبط دانست.

در ساختاری که ذرات خاک فولوکوله هستند، ذرات به هم چسبیده ولی فضای بین آن‌ها خالی است. بنابراین سیال حفره‌ای که وزن مخصوص کمتری نسبت به مخلوط خاک و مواد افزودنی دارد، می‌تواند در این فضا قرار بگیرد. بنابراین اعمال یک انرژی ثابت تراکمی بر روی مخلوط خاک و مواد افزودنی، قابلیت تغییر و جابه‌جایی ذراتی که با درجه فولوکوله بیشتری نسبت به خاک طبیعی قرار گرفته‌اند را ندارد و در نتیجه وزن واحد حجم خشک بیشینه کاهش و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. همچنین چون آنتراسن یک ماده آلی غیر قطبی بوده و جذب آن به‌وسیله ذرات باردار رس محدود است، افزودن آن به خاک رس موجب قرارگیری این ماده در فضای بین ذرات رس شده و با کاهش اصطکاک بین ذرات و در نتیجه سهولت جابجایی آن‌ها، سبب کاهش وزن واحد حجم بیشینه و افزایش رطوبت بهینه می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده در این خصوص با نتایج برخی محققان برای خاک‌های رسی مختلف، مطابقت و سازگاری دارد (Delgado and Romero, 2013) و (Singh et al., 2008).

به‌منظور بحث پیرامون نتایج آزمون تراکم، در ابتدا به توضیح تئوری لایه مضاعف پرداخته می‌شود. 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 ذکرشده در اطراف ذرات رس شناور می‌شوند. به این شرایط، لایه مضاعف الکتریکی (DDL) گفته می‌شود. به علت وجود لایه آب 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 ساختار خاک رسی را تشکیل دهند. نیروها بسته به اینکه بین بارهای هم نام یا غیر هم نام اعمال شوند، می‌توانند باعث ایجاد 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، به‌گونه‌ای که گوشه‌های هر ذره با بار مثبت، در تماس با سطح ذرات دیگر با بار منفی قرار می‌گیرند. ذرات خاک در این حالت، ساختار لخته‌ای را تشکیل می‌دهند (Das, 2013).

مطالعه نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در رابطه با افزودن مواد آلی به خاک‌های رسی نشان می‌دهد که افزودن آن‌ها به خاک، با کاهش ضخامت لایه آب مضاعف همراه است. علت این امر را می‌توان فشرده‌شدن ساختار خاک در اثر کاهش نیروهای دافعه دانست. در نتیجه همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، با کاهش نیروهای دافعه مذکور، خاک ساختار لخته‌ای و نامنظم بیشتری پیدا می‌کند (Brosky and Pamukcu, 2015). ثابت دی‌الکتریک آلاینده نقش زیادی در تعیین ساختار جدید خاک دارد. در ارتباط با نقش ضریب دی‌الکتریک در ضخامت لایه مضاعف تاکنون پژوهش‌های



شکل ۲- نمودار تراکم خاک طبیعی و خاک آلوده با درصد‌های مختلف آنتراسن

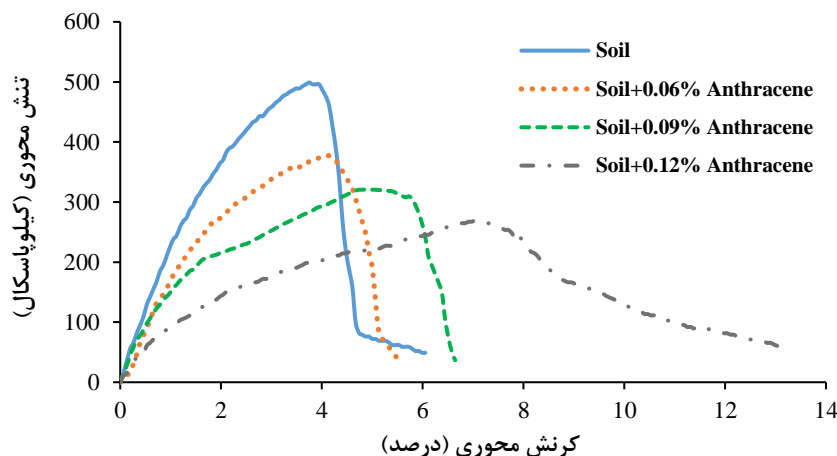
درصد‌های ۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۱۲ درصد است. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری خاک طبیعی برابر ۴۹۹ kPa و کرنش محوری نظیر آن ۳/۷۵ درصد است. در این شکل

### آزمایش فشار تک‌محوری

شکل (۳) نشان‌دهنده منحنی‌های تنش محوری-کرنش محوری برای نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده به آنتراسن با

حدود ۱۸۰ درصدی کرنش نسبت به خاک در حالت طبیعی شده است. همان‌گونه که در نتایج مربوط به آزمایش تراکم گفته شد؛ چون افزودن آنتراسن به خاک موجب کاهش ضخامت لایه مضاعف، افزایش حالت لخته‌ای و همچنین کم شدن اصطکاک بین ذرات و سهولت جابجایی آن‌ها می‌شود، سبب کاهش مقاومت خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی خواهد شد.

دیده می‌شود که با اضافه شدن آنتراسن به خاک، مقدار مقاومت تک‌محوری خاک آلوده کاهش و کرنش نظیر افزایش یافته است. این روند با افزایش میزان درصد آنتراسن همچنان ادامه دارد؛ به‌گونه‌ای که با افزودن ۰/۱۲ درصد آنتراسن به خاک، مقاومت فشاری تک‌محوری به ۲۶۹/۶ kPa و کرنش متناظر آن ۷ درصد می‌شود. به عبارت دیگر افزودن ۱۲۰۰ میلی‌گرم آنتراسن به یک کیلوگرم خاک موجب کاهش ۴۶ درصدی مقاومت نهایی و افزایش



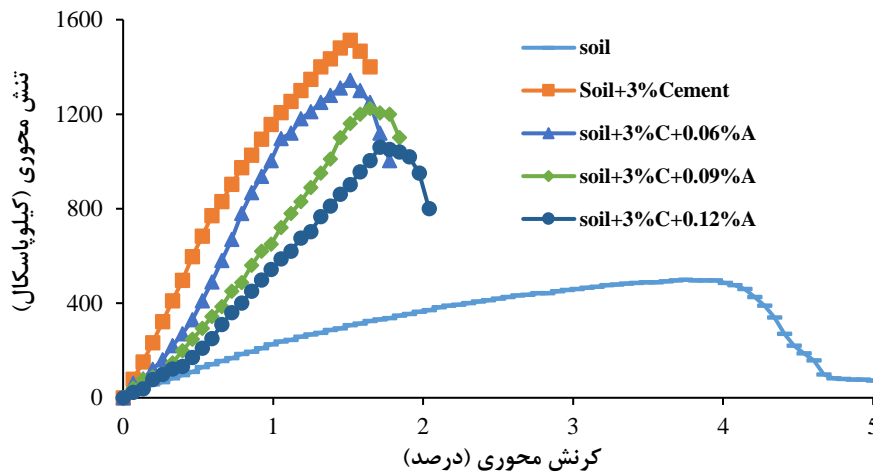
شکل ۳- منحنی تنش-کرنش خاک طبیعی و خاک آلوده با درصدهای مختلف آنتراسن

محوری برای نمونه‌های خاک طبیعی، مخلوط خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با ۳ درصد سیمان پرتلند را نشان می‌دهد. شکل (۵) نیز همین منحنی‌ها را برای مقایسه رفتار خاک تمیز، مخلوط خاک-آهک و خاک آلوده اختلاط یافته با ۱۰ درصد آهک ارائه می‌کند. بر اساس نتایج، با اضافه شدن سیمان و یا آهک به خاک طبیعی و تمیز، مقاومت تک‌محوری افزایش و کرنش محوری نظیر نقطه اوج تنش، از حدود ۴ درصد تا مقدار ۱/۵ درصد کاهش یافته است. همچنین با توجه به شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود که با افزایش درصد آلاینده آنتراسن، مقاومت تک‌محوری کاهش و کرنش محوری نظیر، افزایش یافته است. این موضوع مؤید کاهش در سختی محوری با ازدیاد درصد آلاینده در نمونه‌ها است. البته اختلاط سیمان یا آهک با خاک آلوده مجدداً موجب افزایش در سختی محوری خاک شده است. لازم به توضیح است که رفتار مشاهده‌شده، برای سایر درصدهای سیمان پرتلند یا آهک نیز به همین ترتیب می‌باشند. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، هم‌راستا با نتایج حاصل از مطالعات (Singh et al., 2008) و همچنین Estabragh et al. (2018) هستند.

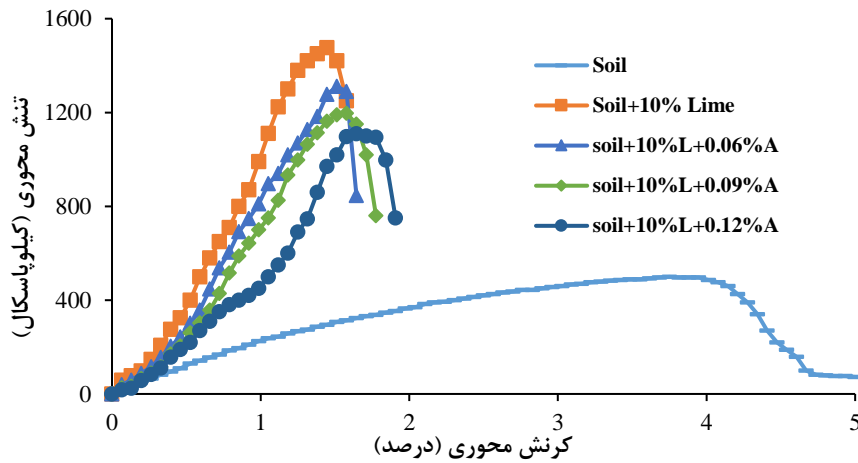
کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک‌های رسی حاوی بار الکتریکی هستند و میزان جذب آب آن‌ها به میزان بار الکتریکی و سطح ویژه آن‌ها مرتبط است. خاک‌های رسی به‌وسیله کاتیون‌هایی مانند  $Na^{++}$ ،  $K^{+}$ ،  $Ca^{++}$ ،  $Mg^{++}$  می‌توانند مواد آلی را جذب کنند. بخشی از مواد آلی به علت عدم وجود کانی‌های لازم، عدم قطبیت و نیز سطح ویژه مناسب، جذب ذرات رس نشده و در فضای بین ذرات باقی می‌مانند لذا در سهولت جابه‌جایی ذرات در اثر بار وارده مؤثر هستند (Yong and Mulligan, 2019). بنابراین با توجه نتایج مطالعات سایر پژوهشگران در ارتباط با نقش مواد آلی در ایجاد ساختار لخته‌ای در خاک، کاهش مقاومت خاک‌های آلوده به آنتراسن نسبت به خاک طبیعی را می‌توان به سهولت جابجایی ذرات و افزایش جابه‌جایی آن‌ها در خاک آلوده مرتبط دانست. به‌عبارت‌دیگر، از آنجایی که آنتراسن یک ماده آلی غیر قطبی است، جذب آن توسط ذرات باردار رس محدود است و در نتیجه، افزودن آن به خاک رسی موجب قرارگیری ماده مذکور در فضای بین ذرات رس می‌شود که با کاهش اصطکاک بین ذرات و در نتیجه سهولت جابجایی آن‌ها، کاهش مقاومت مجموعه خاک آلوده را در پی خواهد داشت.

شکل (۴) نشان‌دهنده منحنی‌های تنش محوری-کرنش





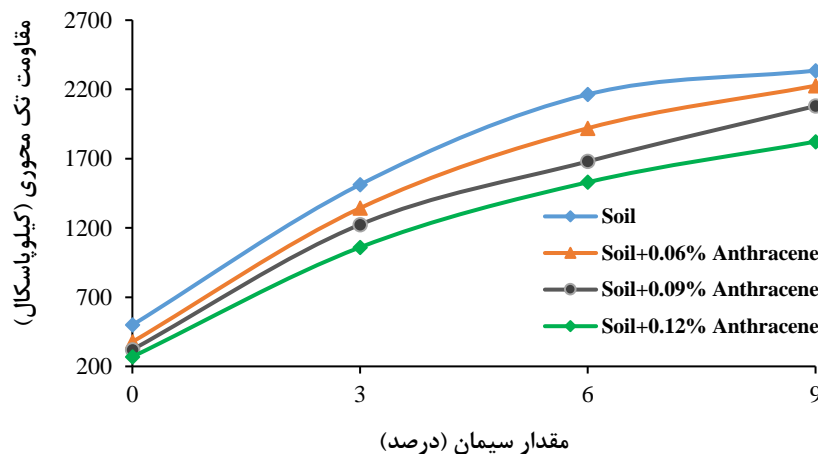
شکل ۴- منحنی‌های تنش- کرنش خاک تمیز، مخلوط خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با ۳ درصد سیمان



شکل ۵- منحنی‌های تنش- کرنش خاک تمیز، مخلوط خاک-آهک و خاک آلوده اختلاط یافته با ۱۰ درصد آهک

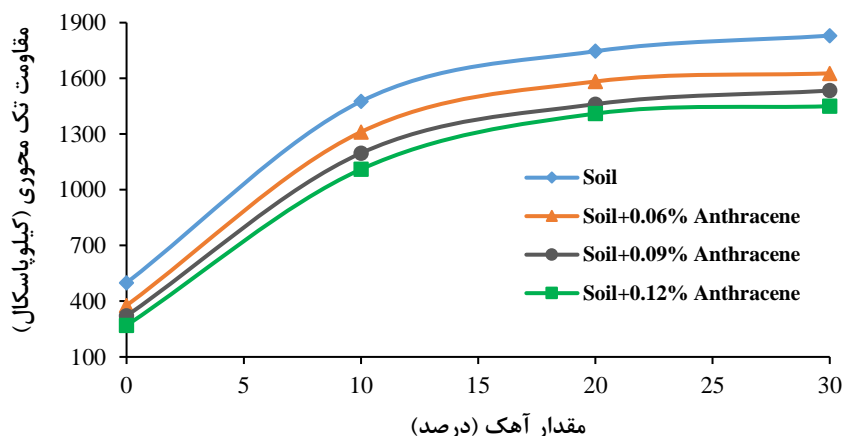
که با افزایش درصد سیمان، مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط یافته با سیمان، افزایش یافته است.

شکل (۶) مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های خاک-سیمان و خاک آلوده به درصدهای مختلف آنتراسن (۰/۰۶، ۰/۰۹، ۰/۱۲ درصد) اختلاط یافته با درصدهای مختلف سیمان (صفر، ۳، ۶ و ۹ درصد) را نشان می‌دهد. مطابق نمودار مشاهده می‌شود



شکل ۶- تغییرات مقاومت تک‌محوری با درصدهای مختلف سیمان برای خاک طبیعی و خاک آلوده با درصدهای مختلف آنتراسن

نمونه‌های خاک-آهک و خاک آلوده اختلاط یافته با آهک، افزایش یافته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شیب نمودار با افزایش میزان آهک به تدریج کاهش یافته است؛ به طوری که تأثیر بهسازی با ۳۰ درصد آهک نسبت به ۲۰ درصد آهک بسیار کمتر شده است.



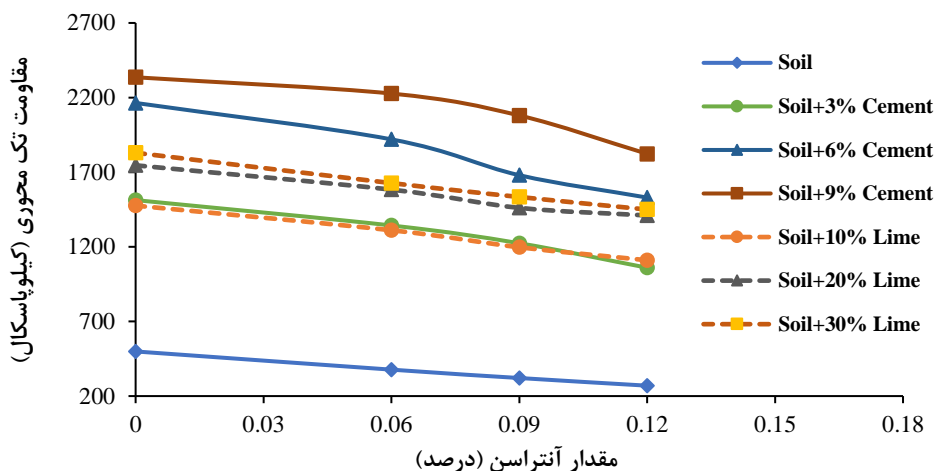
شکل ۷- تغییرات مقاومت تک‌محوری با درصدهای مختلف آهک برای خاک طبیعی و خاک آلوده با درصدهای مختلف آنتراسن

سیمان را سبب مختل نمودن مکانیزم سیمانی شدن به دلیل مهار هیدراسیون و در نتیجه عدم افزایش مقاومت ذکر نمودند. به علاوه اشاره شد که افزودن آنتراسن به خاک و تسهیل جابه‌جایی ذرات خاک آلوده، سبب کاهش مقاومت خاک آلوده بهسازی شده با سیمان و آهک نسبت به خاک طبیعی و تمیز ترکیب شده با سیمان و آهک می‌شود.

همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، تأثیر بهسازی با ۳ درصد سیمان تقریباً معادل ۱۰ درصد آهک در نمونه‌های آلوده به آنتراسن است. همچنین تأثیر بهسازی با آهک به میزان ۳۰ درصد نسبت به ۲۰ درصد بسیار کمتر است؛ در حالی که تأثیر بهسازی سیمان به میزان ۹ درصد نسبت به ۶ درصد بیشتر است. حتی تأثیر بهسازی با ۲۰ و ۳۰ درصد آهک نسبت به نمونه‌های بهسازی شده با ۶ و ۹ درصد سیمان نیز کمتر شده است. این بدان معنی است که سیمان و آهک قابلیت بهسازی خاک آلوده به آنتراسن را داشته‌اند اما تأثیر سیمان در بهسازی نمونه‌های آلوده به آنتراسن بیشتر از آهک است. علت این امر را می‌توان در نقش ثابت دی‌الکتریک ماده آلی آنتراسن در ضخامت لایه مضاعف دانست. از آنجایی که ماده آنتراسن، ثابت دی‌الکتریک کمتری از آب دارد، سبب کاهش ضخامت لایه مضاعف در اطراف ذرات رس شده و ساختار خاک را فولوکوله و

شکل (۷) مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های خاک-آهک و خاک آلوده به درصدهای مختلف آنتراسن (۰/۰۶، ۰/۰۹، ۰/۱۲ درصد) اختلاط یافته با درصدهای مختلف آهک (صفر، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) را نشان می‌دهد. مطابق نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش درصد آهک، مقاومت فشاری نهایی

شکل (۸) مقاومت فشاری نهایی برای نمونه‌های خاک، خاک-سیمان، خاک-آهک و خاک آلوده به درصدهای مختلف آنتراسن (۰/۰۶، ۰/۰۹، ۰/۱۲ درصد) و اختلاط یافته با درصدهای مختلف سیمان (۳، ۶ و ۹ درصد) یا آهک (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد) در زمان عمل‌آوری ۷ روزه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار دیده می‌شود، با اضافه شدن آنتراسن به خاک مقدار مقاومت فشاری خاک آلوده کاهش یافته است. این روند با افزایش میزان آنتراسن همچنان ادامه دارد. همچنین مطابق نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش درصد سیمان و آهک، مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک-سیمان، خاک-آهک و خاک آلوده به آنتراسن اختلاط یافته با سیمان و آهک، افزایش یافته است. با افزایش مقدار سیمان و آهک، مقادیر مقاومت نهایی تمامی نمونه‌های مورد آزمایش در این پژوهش افزایش یافته‌اند و مقاومت نمونه‌های خاک-سیمان و خاک-آهک بسیار بیشتر از خاک طبیعی است. در خصوص این میزان افزایش مقاومت در خاک آلوده باید توجه داشت که چون تعدادی از ذرات سیمان و آهک به‌وسیله ماده آلی پوشانده می‌شود، مقاومت خاک آلوده بهسازی شده با سیمان و آهک نسبت به مقاومت ترکیب خاک طبیعی با سیمان و آهک کمتر خواهد بود. این موضوع به‌خوبی در شکل (۸) قابل مشاهده است و با افزایش درصد آنتراسن، مقاومت خاک آلوده بهسازی شده کاهش یافته است. همچنین



شکل ۸- تغییرات مقاومت تک‌محوری با درصدهای مختلف آنتراسن برای خاک بهسازی‌شده با درصدهای مختلف سیمان و آهک

می‌توان مربوط به کاهش ضخامت لایه آب مضاعف و در نتیجه، ایجاد ساختار لخته‌ای در آن، کاهش اصطکاک بین ذرات و در نتیجه سهولت جابجایی آن‌ها دانست.

افزودن ماده آلی آنتراسن به خاک سبب کاهش مقاومت تک‌محوری و افزایش کرنش محوری نظیر آن نسبت به نمونه خاک طبیعی می‌شود. بر این اساس مشخص می‌شود که ازدیاد درصد این آلودگی سبب کاهش سختی خاک رس شده است. کاهش در سختی با افزودن سیمان یا آهک رفع می‌شود زیرا این دو موجب افزایش مقاومت تک‌محوری و کاهش در کرنش نظیر نقطه اوج مقاومت هستند.

افزودن سیمان و آهک به خاک موجب افزایش مقاومت نهایی و کاهش کرنش محوری نمونه‌ها شده است و این خصوصیت با افزایش درصد سیمان و آهک افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد سیمان و آهک موجب افزایش مقاومت خاک اختلاط یافته با درصدهای مختلف آنتراسن نیز می‌شود.

تأثیر بهسازی با ۳ درصد سیمان تقریباً معادل ۱۰ درصد آهک در نمونه‌های آلوده به آنتراسن است و تأثیر بهسازی با ۳۰ درصد آهک نسبت به ۲۰ درصد آهک بسیار کمتر شده است؛ درحالی‌که تأثیر بهسازی سیمان به میزان ۹ درصد نسبت به ۶ درصد بیشتر است. حتی تأثیر بهسازی با ۲۰ و ۳۰ درصد آهک به ترتیب نسبت به نمونه‌های بهسازی‌شده با ۶ و ۹ درصد سیمان نیز کمتر است. بنابراین استفاده از سیمان پرتلند به علت عملکرد مناسب‌تر آن نسبت به آهک در پروژه‌های بهسازی خاک رس آلوده به آنتراسن، قابل توصیه است.

سیمان و آهک قابلیت بهسازی خاک آلوده به آنتراسن را داشته است اما تأثیر سیمان در بهسازی نمونه‌های آلوده به آنتراسن به دلیل

محققینی چون Olgun, Schmertmann *et al.* (2001)، Ghadyani و Jedari and Hamidi (2013)، and Yildiz (2012) et al (2019) تغییرات مشخصات ژئوتکنیکی رس کائولینیت در معرض چندین سیال شیمیایی با ثابت دی‌الکتریک مختلف را چنین بیان کردند که کاهش هرچه بیشتر ثابت دی‌الکتریک، باعث افزایش فولوکوله شدگی ذرات خاک و تمایل رفتار خاک رسی به رفتار خاک دانه‌ای می‌شود. عملکرد بهتر سیمان نسبت به آهک در بهسازی خاک با رفتار دانه‌ای توسط محققین مختلفی چون Haeri *et al.* (1987)، Kennedy *et al.* (2002)، و Ismail *et al.* (2006) مشاهده و گزارش شده است. به علاوه، با توجه به آنکه هیدراتاسیون سیمان نسبت به آهک نیاز به آب کمتری دارد، در شرایط ضخامت لایه مضاعف کمتر در اطراف ذرات، سیمان عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. این موضوع نیز در تحقیقات پژوهشگرانی چون Ampera and Aydogmus (2005) و Hastuty (2019) تأیید شده است.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر افزودن درصدهای مختلف سیمان و آهک بر ویژگی‌های مکانیکی خاک رس کائولینیت آلوده به درصدهای مختلف ماده آلی آنتراسن و امکان بهسازی آن، از طریق مطالعات آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

افزودن ماده آلی آنتراسن به خاک طبیعی، سبب تغییر در مشخصات تراکمی خاک می‌شود. با افزایش درصد آنتراسن در خاک، وزن واحد حجم خشک خاک کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافته است. نقش ماده آلی آنتراسن در نتایج تراکم را

حصول نتایج مثبت و با در نظر گرفتن شرایط زیست‌محیطی و اقتصادی می‌توان آن را به‌عنوان یک روش کاربردی در ایجاد بستر مناسب برای راه‌سازی و ساخت‌وساز تلقی نمود.

رفتار شبه دانه‌ای و فولوکوله شدن خاک در اثر کاهش لایه مضاعف آب توسط آنتراسن، بیشتر از آهک می‌باشد. ارزیابی بهتر از نتایج بهسازی، با انجام آزمایش‌های صحرایی امکان‌پذیر است و در صورت

## REFERENCES

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (1990). Public health statement, polycyclic aromatic hydrocarbons. *Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services.*
- Akinwumi, I., Booth, A. and Diwa, D. (2016). Cement stabilisation of crude-oil-contaminated soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*. 169(4), 336-345.
- Ampera, B. and Aydogmus, T. (2005). Recent experiences with cement and lime – stabilization of local typical poor cohesive soil. *In book: Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg*, Edition: Heft 2005-2, Publisher: TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Editors: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Herbert Klapperich. 121-144.
- ASTM D698. (2012). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, *American Society of Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Brosky, R.T. and Pamukcu, S. (2015). Role of DDL processes during electrolytic reduction of Cu (II) in a low oxygen environment. *Journal of Hazardous Materials*. 262, 878-882.
- Chen, H., Jiang, Y., Zhang, W., & He, X. (2017). Experimental study of the stabilization effect of cement on dieselcontaminated soil. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 50, 199–205.
- Chi, F.H., Leu, M.H. and Lee, R.C. (2010). Removal of anthracene contaminated soil using soybean oil. *Sustain. Environ. Res.* 5(5), 275-280.
- Chi, F-H., Lou, M.-H., Tsao, C-W. and Shiu, G-C. (2011). Removal of anthracene contaminated soil using micro-emulsified solvent and mixed surfactant. *Sustain. Environ. Res.* 21(3), 181-186.
- Consoli, N.C., Foppa, D., Festugato, L., Heineck, K.S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 133 (2), 197-205.
- Cuypers, C., Pancras, T., Grotenhuis, T. and Rulkens, W. (2002). The estimation of PAH bioavailability in contaminated sediments using hydroxypropyl-B-cyclodextrin and triton x-100 extraction techniques, *Chemosphere*, 46(8), 1235-1245.
- Das, B.M. (2013). *Advanced Soil Mechanics*. CRC Press, Fifth Edition, US.
- Delgado, L. and Romero, E.M. (2013). Removal of anthracene from recently contaminated and aged soils. *Water, Air and Soil Pollution*. 224(2), DOI: 10.1007/s11270-012-1420-1.
- Delgado-Balbuena, L., Aquilar-Chàvez. A.R., Luna-Guido, M.L. and Dendooven, L. (2013). Mixing of an anthracene-contaminated soil: a simple but efficient remediation technique?. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 96(1), 238-241.
- Eibes, G., L'u-Chau, T., Feijoo, G., Moreira, M.T. and Lema. J.M. (2005). Complete degradation of anthracene by Manganese Peroxidase in organic solvent mixtures. *Enzyme and Microbial Technology*. 37(4), 365-372.
- Estabragh, A. R., Kholoosi, Ghaziani, M. F. and Javadi, A. A. (2018). Mechanical and leaching behavior of a stabilized and solidified anthracene-contaminated soil. *Journal of Environmental Engineering*. 144(2), DOI: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001311.
- Estabragh, A.R. Beytolahpour, I. & Javadi, A.A. (2011). Effect of resin on the strength of soil-cement mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 23(7), 969-976.
- Estabragh, A.R. Khatibi, M. & Javadi, A.A. (2016). Effect of cement on treatment of a clay soil contaminated with glycerol, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4), DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001443.
- Ghadyani, M., Hamidi, A. and Hatambeigi, M. (2019). Triaxial shear behaviour of oil contaminated clays. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 23(1), 112-135.
- Haeri, S.M., Hamidi, A., Hosseini, S.M., Asghari, E. and Toll. D. G. (2006). Effect of cement type on the mechanical behavior of a gravelly sand. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24, 335.
- Hastuty, I. (2019). Comparison of the use of cement, gypsum, and limestone on the improvement of clay through unconfined compression test. *Journal of the Civil Engineering Forum*. 5(2), 131-138.
- Human Health Risk Assessment. (2010). *Technical Data Report Appendix D :Toxicological Reference Values*.
- Ismail, M.A., Joer, H.A., Sim, W.H. and Randolph, M.F. (2002). Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil. *Geotechnical and Geological Engineering*. 128(6), 520–529.
- Jedari, C., and Hamidi, A. (2013). Investigating the consolidation behavior of contaminated clay. *Sharif Civil Engineering Journal*. 29, 29–35 (In Farsi).
- Juo, A. S. R. and Franzluebbbers, K. (2004). Tropical soils: Properties and management for sustainable agriculture. *Geoderma* 123, 373–375.
- Kennedy, T., Smith, R., Holgreen, R.J. and Tahmoressi, M. (1987). An evaluation of lime and cement stabilization. *Transportation Research Board*. 11-25.
- Khamehchiyan, M., Charkhabi, A.H. and Tajik, M.

- (2007). Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology*, 89, 220–229.
- Kumar, A., Walia, B.S. and Bajaaj, A. (2007). Influence of fly ash, lime and polyester fibers on compacted and strength properties of expansive soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(3), 242-248.
- Majeed, A.H., Al Zayadi, A. and Abdul Abbas, J.M. (2017). Improvement of unconfined compressive strength of natural organic soil. *Civil and Environmental Research*, 9(1), 47-52.
- Maliszewska-Kordybach, B. (1999). Sources, concentrations, fate and effects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the environment. Part A: PAHs in Air. *Pol. J. Environ. Stud.* 8(3), 131-136.
- Mallik R. B., El-Korchi T. (2009). *Pavement engineering: principle and practice*, second Edition, CRS Press, Newyork, US.
- Meegoda, J. N. Ezeldin, A. S. Vaccari, D. A. and Muller, R.T. (1994). Petroleum contaminated soils in highway construction. In: *Proceedings of the 3rd materials engineering conference, infrastructure: new materials and methods of repair*, San Diego, CA. 904–911.
- Mohammadi, S. D. and Moharamzade Saraye, K. (2015). The study of workability of lime on improvement of oil materials contaminated soils around the Tabriz oil refinery. *Modares Civil Engineering journal*, 15, 223-233 (In Farsi).
- Oldham, K.B. (2008). A Gouy-Chapman-Stern model of the double layer at a (metal)/ (ionic liquid) interface. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 613(2), 131-138.
- Olgun, M. and Yildiz, M. (2012). The Effects of pore fluids with different dielectric constants on the geotechnical behaviour of kaolinite. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37(7), DOI: 10.1007/s13369-012-0266-6.
- Oluwatuyi, O., Ojuri, O. and Khoshghalb, A. (2020). Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12, 160-167.
- Prusinski, J. R. and Bhattacharja, S. (1999). Effectiveness of Portland cement and Lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record*, 1652(1), 215–227.
- Schmertmann, J., Teachavorasinskun A., S. and D. Zhao, A. (2001). Triaxial behavior of kaolinite in different pore fluids. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(5), DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:2(148).
- Singh, S., Srivastava, R. and John, S. (2008). Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 17(3), 290-300.
- Srivastava, L.P., Paramkusam, B.R. and Arun Prasad. (2010). Stabilisation of engine oil contaminated soil using cement kiln dust, proc. *Indian Geotechnical Conference, GEOTrendz, IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay*. India.
- Tremblay, H., Duchesne, J., Locat, J. and Leroueil S. (2002). Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. *Canadian Geotechnical J.* 39, 535–546.
- Vipulanandan, C. (1995). Effect of clays and cement on the solidification/stabilization of phenol-contaminated soils. *Waste. Manage.* 15, 399-406.
- Wild, S. R. and Jones, K. C. (1995). Polynuclear aromatic hydrocarbons in the United Kingdom environment: A preliminary source inventory and budget. *Environ. Pollut.* 88, 91-108.
- Yong, R.N. and Mulligan, C.N. (2019). *Natural attenuation of contaminants in soils*, Second Edition, CRC Press, US.
- Zanjarani Farahani, M. and Hamidi, A. (2014). Consolidation behavior and geotechnical parameters of oil contaminated kaolinite clay. *Iranian Journal of Petroleum Geology*, 4(8), 1-15 (In Farsi).