بررسی تأثیر ماده افزودنی سیمان در بهسازی خاک رسی آلوده به فنانترن

محدثه امینی، علی رئیسی استبرق*، عبدالحسین هورفر، فاطمه غازیانی
دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۰/۰۳/۳۰

چکیده

خاک‌های رسی و خاک‌های رسی آلوده به مواد هیدروکربنی، دارای خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب نمی‌باشند. بنابراین قبل از کاربرد آنها به‌عنوان منبع قرضه جهت اجرای یک پروژه و یا بستر مناسب جهت احداث سازه‌های عمرانی بر روی آنها، می‌بایست بهسازی شوند تا خواص مطلوب در آنها ایجاد شود و ایمنی پروژه‌ها حاصل شود. بدین منظور در این پژوهش، خواص فیزیکی و مکانیکی یک خاک رسی آلوده به ماده هیدروکربنی فنانترن و امکان بهسازی آن با اضافه کردن سیمان مورد بررسی قرار گرفت. خاک رسی به‌صورت مصنوعی با فنانترن آلوده گردید و سیمان در درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۲۰٪ به خاک طبیعی و خاک آلوده به فنانترن اضافه گردید. سپس آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی خاک شامل حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت تک‌محوری روی نمونه‌هایی از آنها صورت پذیرفت. جهت آزمایش‌های مقاومتی، نمونه‌های آزمایشگاهی به‌روش تراکم استاتیکی تهیه شد و تعیین مقاومت آنها در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۱٤،۷ و ۲۸ روز تعیین شد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن فنانترن به خاک منجر به کاهش حدود اتربرگ و درصد رطوبت بهینه خاک می‌شود. همچنین نتایج بیانگر افزایش مقاومت خاک غیرآلوده و آلوده به فنانترن با افزودن سیمان می‌باشد که این افزایش مقاومت تابعی از درصد سیمان اضافه شده و زمان عمل‌آوری می‌باشد. مقایسه نتایج نشان داد که در درصد ثابت سیمان و زمان عمل‌آوری یکسان، مقاومت ایجاد شده در نمونه خاک آلوده بهسازی شده با سیمان بیشتر از خاک–سیمان می‌باشد. این موضوع می‌تواند ناشی از اکسیده شدن فنانترن و ترکیب مواد تولید شده با اکسیدهای سیلیکات‌های سازنده خاک و یون‌های OH^- محیط باشد که در نتیجه این امر سبب تشکیل پیوندهای قوی بین ذرات خاک آلوده بهسازی شده و افزایش مقاومت در مقایسه با خاک طبیعی بهسازی شده می‌گردد. همچنین نتایج SEM بیانگر تغییر و پراکنده شدن ساختار خاک در حضور ماده آلی فنانترن می‌باشد. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که بهسازی خاک به‌کار رفته در این پژوهش که آلوده به فنانترن شده است، با افزودن سیمان امکان‌پذیر است.

واژه‌های کلیدی: فنانترن، خاک رسی، سیمان، مقاومت تک‌محوری، SEM.

* نویسندهٔ مسئول: raeesi@ut.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

مقدمه

آلودگی یک عنصر، یون یا ترکیب شیمیایی است که می‌تواند وارد چرخه محیط‌زیست شود و در بلندمدت یا کوتاه‌مدت زندگی انسان و محیط‌زیست را تحت تأثیر قرار دهد [١]. آلاینده‌ها به دو گروه آلاینده‌های آلی و معدنی تقسیم‌بندی می‌گردند [١]. فلزاتی مانند کادمیوم، کروم، مس، آهن، سرب، جیوه، نیکل، نقره، قلع و روی به‌عنوان آلاینده‌های معدنی شناسایی شده‌اند و از منابع تولیدکننده آن می‌توان به صنایع تولید فلزات و آبکاری و نشت در معادن استخراج و پالایش سنگ اشاره کرد. این نوع از آلاینده‌ها می‌توانند در ترکیب مایع منفذی و یا ترکیب با اجزا جامد تشکیل‌دهنده خاک وجود داشته باشند. دستهٔ دیگر از آلاینده‌ها، آلاینده‌های آلی هستند که از منابع اصلی تولیدکننده آن می‌توان به صنایع مرتبط با نفت و فرآورده‌های نفتی، حلال‌ها، آفت‌کش‌ها و مواد منفجره اشاره کرد. آلاینده‌های آلی می‌تواند در اثر نشت مواد نفتی و مشتقات آنها از مخازن ذخیره، خطوط انتقال (در اثر فرسودگی و شکستگی لوله‌های انتقال)، نشت در محل پالایشگاه‌ها و جایگاه‌های سوخت‌گیری و یا بر اثر تصادف تانکرها و نفت‌کش‌های حامل مواد نفتی موجب آلودگی خاک شود. آلودگی خاک به مواد آلاینده، مختص نقاط آلوده شده نبوده و همراه با بارندگی یا رواناب آب‌های سطحی می‌تواند در خاک حرکت کرده و خود را به منابع آب زیرزمینی برساند و موجب آلودگی آنها نیز شود. متداول‌ترین آلاینده‌های نفتی شامل هیدروکربن‌های نفتی کل[1] (TPH)، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای[2] (PAHs) و ترکیبات آلیفاتیک[3] می‌باشد که از این میان PAHs به‌دلیل طولانی بودن تجزیه‌پذیری در محیط از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد [٢]. همچنین این ترکیبات شدیداً سمی بوده و عامل تغییرات ژنتیکی، ناهنجاری‌های مادرزادی و سرطان می‌باشند [٢]. PAHs به‌دلیل آب‌گریزی و حلالیت کمی که در آب دارند، در محیط پایدار می‌باشند [٣]. ویلد و همکاران[4] در سال ١٩٩٠ گزارش نمودند که این گروه از آلاینده‌ها حتی تا حدود ٢٠ سال هم می‌توانند در خاک باقی بمانند [٤].

PAHs به‌صورت طبیعی در سوخت‌های فسیلی مانند زغال و نفت خام یافت می‌شوند. ترکیبات آروماتیک حدود ٢٠ تا ٤٠٪ نفت را شامل می‌شود [٥] و ممکن است این ترکیبات هنگام استخراج و پالایش نفت خام و فعالیت‌های مربوط به انتقال آنها، عدم مدیریت صحیح جمع‌آوری فاضلاب‌های مربوطه و یا رها کردن آنها در طبیعت و همچنین در اثر سوختن و احتراق ناقص مواد آلی وارد محیط‌زیست شوند و آلودگی هوا، آب و خاک را سبب گردند [٦]. اگرچه PAHs آلاینده‌های اصلی هوا بوده لیکن خاک به‌عنوان مخزن نهایی این مواد می‌باشد [٧]. ردی و سایچک[5] در سال ٢٠٠٤ گزارش نمودند که مکان‌های زیادی در سرتاسر ایالات متحده و جهان آلوده به PAHs می‌باشند که میزان آلودگی در مکان‌هایی که در آنها کارخانه‌های قدیمی تولید گاز[6] (MGP) می‌باشد، بیشتر بوده است [٨]. نشت و گسترش آلودگی‌های نفتی در بخش‌های مختلف صنعت نفت در کشور نفت‌خیزی مانند ایران به‌علت در اختیار داشتن نزدیک به ٩٪ منابع نفتی جهان و وجود بیش از ١٤٠٠٠ کیلومتر خط انتقال نفت، امری اجتناب‌ناپذیر بوده [٩] و همواره گزارش‌هایی از وجود هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای به

[1] Total Petroleum Hydrocarbon
[2] Polycyclic Aromatic Hydrocarbons
[3] Aliphatic compound
[4] Wild
[5] Reddy & Saichek
[6] Manufactured Gas plant

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

خصوص فنانترن[7] در خاک اطراف پالایشگاه‌ها گزارش شده است. فنانترن یکی از هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای با سه حلقه بنزن بوده که جزو ١٦ آلاینده اولویت‌داری می‌باشد که توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا[8] (U.S. EPA) گزارش شده است [١٠]. شاکری و همکاران با بررسی هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای در خاک مناطق نفتی استان بوشهر، بیشینه غلظت فنانترن در مناطق نفتی این استان را ١٨٦/٥٨ mg/kg گزارش نمودند [٢]. علایی و همکاران نیز دامنه غلظت فنانترن در منطقه مجاور تاسیسات نفتی ری را حدود ١٧-١٣ mg/kg گزارش کردند [١١]. همچنین اربابی[9] و همکاران در پژوهش خود غلظت فنانترن در مناطق نزدیک به پالایشگاه نفت تهران را ٦٠ mg/kg اندازه‌گیری و گزارش نمودند [١٢].

همواره استفاده از روش پاکسازی مناسب که در کوتاه‌ترین زمان و با کمترین هزینه از حرکت آلاینده در خاک و رسیدن به آب زیرزمینی جلوگیری می‌کند، الزامی می‌باشد. آلودگی خاک علاوه بر تهدیدات زیست‌محیطی، از نظر ژئوتکنیکی نیز حائز اهمیت می‌باشد زیرا با ورود آلاینده به خاک امکان تغییر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک وجود دارد. فانگ و چانی[10] برای بیان عمل متقابل خاک با آلاینده، نمایه‌ای به نام شاخص حساسیت[11] (PSI) ارائه نمودند که تغییرات آن بین ۰-۱ می‌باشد که مقدار این شاخص برای خاک‌های دانه‌ای بین ۰/۰۱-۰/۱ و برای خاک‌های رسی بین ۰/٦-۰/۹ می‌باشد [١٣]. بنابراین خاک‌های رسی بیشترین واکنش را با مواد آلاینده از خود نشان می‌دهند که علت این امر را می‌توان سطح ویژه بالای ذرات رس و باردار بودن آنها دانست. در خاک‌های دانه‌ای واکنش آلاینده با خاک از نوع مکانیکی می‌باشد. به‌عبارت دیگر آلاینده در بین ذرات قرار گرفته و موجب سهولت جابه‌جایی ذرات بر روی یکدیگر می‌شود، در صورتی که در خاک‌های چسبنده واکنش از نوع فیزیکوشیمیایی می‌باشد. میگودا و راتناویرا[12]، افزایش تراکم‌پذیری خاک ریزدانه آلوده به گلیسرول و پروپانول را گزارش نمودند [١٤]. همچنین نتایج پژوهشی نشان داد که ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک (حدود اتربرگ، پارامترهای تراکمی و مقاومت) پس از آلودگی به نفت خام کاهش پیدا می‌کند [١٥].

بهسازی خاک‌های رسی به‌روش‌های مختلفی صورت می‌پذیرد که از معمول‌ترین آنها، روش شیمیایی می‌باشد. در روش شیمیایی مواد افزودنی مانند سیمان، آهک و خاکستر بادی در جهت بهبود ویژگی‌های خاک به آن اضافه می‌گردد [١٦]. بهسازی خاک با سیمان سابقه طولانی دارد و پژوهشگران زیادی به بررسی اثر سیمان بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک طبیعی و خاک آلوده به آلاینده آلی پرداختند و چنین نتیجه گرفتند که افزودن سیمان به خاک سبب بهبود ویژگی‌های خاک می‌شود [١٦]، [١٧]، [١٨] و [١٩]. نتایج پژوهش صورت گرفته توسط استبرق[13] و همکاران نشان داد که اضافه کردن سیمان به خاک آلوده به گلیسرول سبب افزایش مقاومت می‌شود که این افزایش به درصد سیمان، زمان عمل‌آوری و مقدار آلودگی بستگی دارد [٢٠]. همچنین خلوصی و همکاران به بررسی نحوه تأثیر سیمان در بهسازی خاک رسی آلوده به ماده هیدروکربنی آنتراسن پرداختند و نتایج آنها بیانگر افزایش مقاومت با اضافه کردن سیمان می‌باشد که این افزایش مقاومت با افزایش درصد

[7] Phenanthrene
[8] United States Environmental Protection Agency
[9] Arbabi
[10] Fang & Chaney
[11] Pollution Sensitivity Index
[12] Meegoda & Ratnaweera
[13] Estabragh

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

سیمان و زمان عمل‌آوری متناسب است [٦]. چن[14] و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی تثبیت خاک رسی آلوده به درصدهای مختلف دیزل با افزودن درصدهای مختلف سیمان پرداختند [۲۱]. نتایج آنها نشان داد که مقاومت خاک آلوده اختلاط‌یافته با سیمان با افزایش درصد سیمان و زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. همچنین به‌ازای درصد ثابت سیمان، مقاومت خاک آلوده با افزایش درصد ماده آلاینده کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۲۰ پژوهشی در مورد امکان بهسازی خاک رسی کائولین آلوده به نفت خام با استفاده از ترکیب آهک و سیمان در درصدهای وزنی مختلف صورت پذیرفت [۲۲]. نتایج نشان داد که این ترکیب سبب بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک آلوده می‌شود و پس از بهسازی، می‌توان از آن به‌عنوان مصالح در پروژه‌ها استفاده کرد. همچنین حاجی‌محمدی و حمیدی اثر افزودن درصدهای مختلف سیمان و آهک را بر رفتار مکانیکی خاک رسی آلوده به درصدهای مختلف ماده آلی آنتراسن مورد بررسی قرار دادند [۲۳]. آنها نتیجه‌گیری نمودند که سیمان و آهک قابلیت بهسازی خاک آلوده به آنتراسن را دارد، لیکن تأثیر و عملکرد سیمان از آهک مناسب‌تر می‌باشد.

با بهسازی خاک‌های آلوده و رفع آلودگی آنها امکان استفاده از آنها در پروژه‌های مختلف عمرانی مانند روسازی، راهسازی و.... فراهم می‌گردد. همچنین در برخی مواقع، عمق و وسعت آلودگی به میزانی است که امکان جابه‌جایی و جایگزینی با خاک مناسب وجود ندارد و یا دسترسی محلی به مصالح، آسان و مقرون به صرفه نمی‌باشد. در چنین شرایطی می‌توان از خاک‌های آلوده بهسازی شده به‌عنوان منبع قرضه در پروژه‌های عمرانی و بستری مناسب برای ساخت سازه‌ها استفاده کرد. بنابراین برای بهره‌برداری صحیح از خاک‌های بهسازی شده لازم است که ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آنها مطالعه و بررسی دقیق شود. بررسی منابع نشان می‌دهد که با وجود اهمیت بهسازی خاک‌های آلوده، تاکنون پژوهشی در ارتباط با بهسازی خاک آلوده به ماده آلی فنانترن صورت نگرفته‌است. در این پژوهش امکان بهسازی خاک آلوده به فنانترن با افزودن درصدهای وزنی مختلف سیمان در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت با انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی خاک (تراکم، حدود اتربرگ و مقاومت تک‌محوری) مورد مطالعه قرار می‌گیرد و نتایج آن با بهسازی خاک غیرآلوده (به‌عنوان مبنا) مقایسه می‌گردد. برای آن‌که بررسی اثر ریزساختار خاک در ارتباط با خواص آنها مورد ارزیابی قرار بگیرد، اقدام به تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی[15] (SEM) از نمونه‌هایی از خاک طبیعی، آلوده و بهسازی شده نیز گردید.

مواد و روش‌ها

۱. مواد استفاده شده

مواد مورد استفاده در این پژوهش خاک، فنانترن، استون، سیمان و آب می‌باشد. ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی این مواد در ادامه آورده شده است.

[14] Chen
[15] Scanning Electron Microscope

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

۱-۱.خاک

در این پژوهش از یک نوع خاک رسی که محل قرضه آن در اطراف دشت تاکستان در استان قزوین می‌باشد، استفاده گردید. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM تعیین گردید و نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است. بر اساس نتایج حاصل از دانه‌بندی و حدود اتربرگ، خاک مورد استفاده طبق سامانه طبقه‌بندی متحد[16] (USCS) رس با خمیرایی (پلاستیسیته) پایین[17] (CL) طبقه‌بندی می‌گردد. نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان داد که رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه این خاک به‌ترتیب برابر ۱۸٪ و ۱٦/۸ kN/m^3 می‌باشد (منحنی تراکمی خاک در بخش نتایج (شکل (۳)) آورده شده است). آزمایش‌های شیمیایی نیز بر اساس روش‌های ارایه شده توسط اسپارکس[18] روی خاک انجام گردید [٢٤] که نتایج آن در جدول (۲) نشان داده شده است. همچنین آزمایش پراش پرتو ایکس[19] (XRD) روی خاک مورد استفاده انجام پذیرفت که بر اساس نتایج، کانی‌های خاک شامل کوارتز، کلسیت و فلدسپار (سدیم، کلسیم و پتاسیم) و کانی‌های رسی غالب این خاک ایلیت و کلریت می‌باشد.

جدول۱- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک

مشخصه	مقدار
وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_s)	۲/۷
دانه‌بندی	
شن (٪)	۰
ماسه (٪)	۲
سیلت (٪)	٤٥
رس (٪)	٥۳
حدود اتربرگ	
حد روانی (LL) (٪)	٤۷
حد خمیری (PL) (٪)	۲٦
نشانه خمیری (PI) (٪)	۲۱
طبقه‌بندی	
طبقه‌بندی متحد (USCS)	CL
پارامترهای تراکمی	
درصد رطوبت بهینه (w_{opt}) (٪)	۱۸
وزن واحد حجم خشک بیشینه (γ_{dmax}) (kN/m^3)	۱٦/۸

[16] Unified Soil Classification System
[17] Low-plasticity Clay
[18] Sparks
[19] X-Ray Diffraction

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

جدول۲- ویژگی‌های شیمیایی خاک

مشخصه	واحد اندازه‌گیری	مقدار
pH	-	۸
EC	dS/m	۱۰/۷٤
K^+	meq/ L	۰/۳۳
Ca^{++}	meq/ L	۲٤
Mg^{++}	meq/ L	۱۰
Cl^-	meq/ L	٦۰
CO_3^{2-}	meq/ L	۰/٦
HCO_3^{2-}	meq/ L	٤
SO_4^{2-}	meq/ L	۸۳
$CaCO_3$	٪	۱۰/۲
O.C*	٪	۰/۰۵

*Organic Content

۲-۱. فنانترن

فنانترن یک هیدروکربن آروماتیک چند حلقه‌ای زاویه‌دار[۲۰] بوده که نام آن ترکیبی از فنیل[۲۱] و آنتراسن[۲۲] می‌باشد. این ماده، پودری سفیدرنگ بوده و به‌صورت طبیعی در سوخت‌های فسیلی وجود دارد. همچنین این ماده از سوختن ناقص ترکیبات آلی مانند سوخت‌های فسیلی و چوب به وجود می‌آید. در دوده‌های سیگار نیز این ماده یافت می‌شود. از فنانترن در تولید رنگ، دارو، مواد منفجره و پژوهش‌های بیوشیمی استفاده می‌شود [۲۵]. از آنجا که ساختار شیمیایی این ماده در هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای سرطان‌زا وجود دارد، از آن به‌عنوان یکی از ترکیبات شاخص جهت تعیین آلودگی به‌کار می‌رود [۲٦]. در این پژوهش از فنانترن با خلوص۹۷٪ که محصولی از شرکت مرک[۲۳] آلمان است، به‌عنوان ماده آلاینده استفاده شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی این ماده بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از تولیدکننده، در جدول (۳) آورده شده است.

[20] Angular PAHs
[21] Phenyl
[22] Anthracene
[23] Merck

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

جدول۳- ویژگی‌های فیزیکی فنانترن

مشخصه	واحد اندازه‌گیری	مقدار
فرمول شیمیایی	-	$C_{14}H_{10}$
جرم مولکولی	g/mol	۱۷۸/۲۳
شکل ظاهری	-	جامد بی‌رنگ
چگالی	g/cm^3	۱/۱۸
نقطه ذوب	°C	۹۷-۱۰۰
نقطه جوش	°C	۳۳٦
حلالیت در آب	mg/L	۱/۱۵

۳-۱. استون

از آن‌جا که فنانترن حلالیت بسیار پایینی در آب دارد، از استون به‌عنوان حلال استفاده گردید. در این پژوهش از استون با درصد خلوص ۹۹/۹٪ که محصولی از شرکت شیمی دارویی نوترون می‌باشد، استفاده شده است. مشخصات فیزیکی استون مصرفی بر اساس اطلاعات درج شده بر روی محصول در جدول (٤) آورده شده است.

جدول٤- ویژگی‌های فیزیکی استون

مشخصه	واحد اندازه‌گیری	مقدار
فرمول شیمیایی	-	CH_3COCH_3
جرم مولکولی	g/mol	۵۸/۰۸
چگالی	g/cm^3	۰/۷۹
نقطه ذوب	°C	-۹۵
نقطه جوش	°C	۵٦/۲

۴-۱. سیمان

سیمان مورد استفاده در این پژوهش از نوع پرتلند نوع ۱ با وزن مخصوص ۳/۱۵ و درجه نرمی بلین cm^2/g ٤۱۰۰ می‌باشد. بررسی منابع نشان می‌دهد که معمول‌ترین سیمان به‌کار رفته در پروژه‌های بهسازی خاک‌های آلوده از نوع پرتلند نوع ۱ بوده که این نوع سیمان نسبت به انواع دیگر قابلیت دسترسی آسان‌تری را دارد[۱]. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سیمان بر اساس استاندارد ASTM تعیین و در جدول (۵) ارائه گردیده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

جدول۵- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سیمان

مشخصه	واحد اندازه‌گیری	مقدار
غلظت نرمال	٪	۲۹/۲
گیرش اولیه	min	۱۰۸
گیرش نهایی	min	۱۸۰
مقاومت فشاری ۷ روزه	MPa	۲۳
مقاومت فشاری ۲۸ روزه	MPa	۳٤
مقاومت کششی ۷ روزه	MPa	۱/٦
مقاومت کششی ۲۸ روزه	MPa	۲/٤
مقاومت خمشی ۷ روزه	MPa	۳/۱
مقاومت خمشی ۲۸ روزه	MPa	٤/۲

۵-۱. آب

در این پژوهش از آب شرب با اسیدیته (pH) ۷/۷٦ و هدایت الکتریکی (EC) dS/m ۰/۰۱ برای انجام آزمایش‌ها و تهیه نمونه‌ها استفاده شد.

۲. تهیهٔ خاک آلوده

نمونه‌هایی از خاک طبیعی، خاک آلوده به فنانترن، خاک-سیمان و خاک آلوده به فنانترن اختلاط‌یافته با سیمان جهت انجام آزمایش‌ها تهیه گردید. در پژوهش‌های پیشین، از غلظت mg/kg ۵۰۰ فنانترن برای آلوده کردن خاک استفاده شده است [۲۷]، [۲۸] و [۲۹]. لیکن در این پژوهش با هدف برجسته‌تر کردن اثر این ماده بر رفتار خاک از غلظت آلودگی mg/kg ۱۲۰۰ جهت تهیه نمونه‌های آلوده به فنانترن استفاده گردید. از آنجا که فنانترن ماده‌ای جامد بوده و حلالیت پایینی در آب دارد (۱/۱۵ mg/L)، از استون به‌عنوان حلال استفاده شد. انتخاب استون به‌عنوان حلال به این دلیل می‌باشد که فنانترن در آن به خوبی حل شده و پس از اضافه کردن محلول حاصل به خاک، به‌علت فرار بودن به سرعت از محیط خاک خارج شده و تأثیری بر روند آزمایش‌ها نمی‌گذارد. این حلال برای حل کردن فنانترن توسط پژوهشگران دیگری نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۲۷]، [۲۹] و [۳۰]. پس از حل کردن فنانترن در استون، محلول مورد نظر به‌صورت اسپری به خاک اضافه گردید و هم‌زمان عمل اختلاط صورت گرفت. خاک آلوده پس از آن در معرض هوا قرار داده شد و استون از آن تبخیر شد. سپس مخلوط به مدت یک هفته جهت انجام واکنش شیمیایی بین خاک و آلاینده در یک کیسه پلاستیکی نگهداری شد [۲۰].

۳. آزمایش‌ها

همان طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، آزمایش‌های صورت گرفته بر روی خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک آلوده، خاک آلوده اختلاط‌یافته با سیمان و نمونه‌های ساخته شده از آنها شامل حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت تک‌محوری و SEM

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

می‌باشد. به‌منظور بررسی اثر افزودن ماده آلی فنانترن و سیمان بر روی حدود اتربرگ، حدود روانی و خمیری نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به فنانترن، خاک–سیمان و خاک آلوده به فنانترن اختلاط‌یافته با سیمان در درصدهای متفاوت سیمان بر اساس استاندارد ASTM-D4318-17$^{\varepsilon 1}$ تعیین شد [۳۱]. قبل از ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، آزمایش تراکم استاندارد بر اساس استاندارد ASTM-D698-12$^{\varepsilon 2}$ بر روی نمونه‌های مختلف خاک صورت پذیرفت و منحنی تراکمی آنها و پارامترهای تراکمی منحنی‌های مربوطه تعیین گردید [۳۲]. تهیه نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های مقاومتی با استفاده از روش تراکم استاتیکی و بر اساس رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه به‌دست‌آمده از منحنی تراکم استاندارد مربوطه، صورت گرفت. خاک مورد نظر در قالبی مخصوص در سه لایه توسط دستگاه بارگذاری تک‌محوری با سرعت اعمال نیروی ۱/۵ mm/min به‌روش تراکم استاتیکی متراکم شدند. نمونه‌های ساخته شده دارای قطر و طول معادل ۵ و ۱۰ cm بودند. نمونه‌های خاک حاوی سیمان پس از ساخت در اتاقک مخصوص با رطوبت نسبی بالای ۹۰٪ و دمای ۲۲ °C بر اساس استاندارد ASTM-D1632-17 نگهداری شدند [۳۳] و آزمایش مقاومت فشاری در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ١٤ و ۲۸ روز روی آنها صورت پذیرفت. برای اندازه‌گیری مقاومت نمونه‌ها، آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (تک‌محوری) بر اساس استاندارد ASTM-D1633-17 روی آنها با سرعت بارگذاری ۱ mm/min صورت گرفت [۳٤]. اعمال بار تا گسیختگی نمونه‌ها ادامه یافت و در طی آزمایش، میزان بار وارده و تغییر شکل ایجاد شده در نمونه ثبت گردید که با این داده‌ها اقدام به تعیین منحنی تنش–کرنش برای آنها شد. لازم به ذکر است که هر آزمایش به‌طور متوسط ۳ بار تکرار گردید و در مجموع ۷۸ عدد نمونه جهت تعیین مقاومت نمونه‌های خاک طبیعی، آلوده و بهسازی شده تهیه شد. از آنجا که خاک‌های رسی دارای ساختار ریز[۲٤] و درشت[۲۵] بوده و ساختار ریز در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آنها نقش مهمی را دارد، برای کسب اطلاعات لازم از این ساختار، اقدام به عکس‌برداری میکروسکوپی از نمونه‌های خاک شد. این آزمایش در آزمایشگاه نانوالکتریک دانشکده برق دانشگاه تهران به انجام رسید.

[24] Micro
[25] Macro

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

شکل ۱- آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش

نتایج

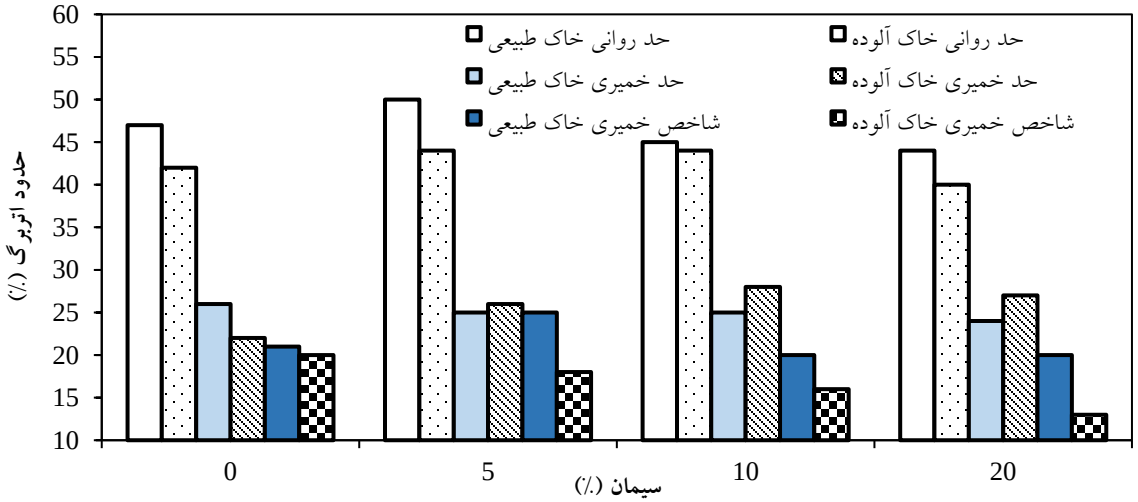
نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت تک‌محوری و SEM انجام شده بر روی خاک طبیعی، خاک آلوده، خاک-سیمان، خاک آلوده اختلاط‌یافته با سیمان به شرح زیر می‌باشد.

۱. آزمایش حدود اتربرگ

در شکل (۲) نتایج آزمایش حدود اتربرگ خاک طبیعی، خاک آلوده به فنانترن، خاک-سیمان و خاک آلوده به فنانترن اختلاط‌یافته با سیمان آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با اضافه کردن ماده آلی فنانترن به خاک، حدود اتربرگ کاهش داشته است و حد روانی خاک طبیعی از ۴۷ به ۴۲٪ و حد خمیری از ۲۶ به ۲۲٪ و شاخص خمیری از ۲۱ به ۲۰٪ تغییر نموده است. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، به‌طور کلی حد روانی با اضافه کردن سیمان به خاک طبیعی و خاک آلوده کاهش می‌یابد، لیکن این موضوع برای مقدار ۵٪ سیمان در خاک طبیعی و ۵ و ۱۰٪ سیمان در خاک آلوده صدق نمی‌کند. با افزودن ۵٪ سیمان به خاک طبیعی، حد روانی به ۵۰٪، حد خمیری و شاخص خمیری به ۲۵٪ می‌رسد که نشان‌دهنده افزایش حد روانی و شاخص خمیری و کاهش ۱٪ حد خمیری می‌باشد. همچنین با اضافه کردن ۵ و ۱۰٪ سیمان به خاک آلوده، حد روانی و حد خمیری روندی افزایشی و شاخص خمیری روندی کاهشی داشته است. به‌طوری که حد روانی به مقدار ۴۴٪، حد خمیری به‌ترتیب به مقادیر ۲۶ و ۲۸٪ و شاخص خمیری به‌ترتیب به مقادیر ۱۸ و ۱۶٪ رسیده است. با افزودن ۱۰ و ۲۰٪ سیمان به خاک طبیعی کاهش حد روانی به میزان ۲ و ۳٪ ، کاهش حد خمیری به میزان ۱ و ۲٪ و کاهش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

شاخص خمیری به میزان ۱٪ مشاهده گردید. با افزودن ۲۰٪ سیمان به خاک آلوده، حد روانی برابر ٤٠٪، حد خمیری برابر ۲۷٪ و شاخص خمیری برابر ۱۳٪ گردیده است.

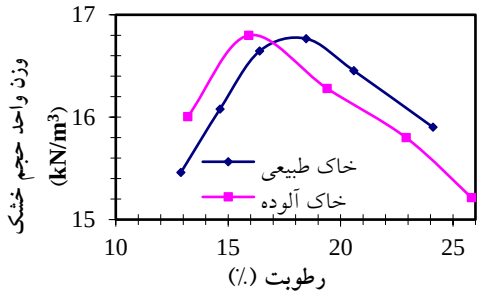


شکل ۲- نتایج آزمایش حدود اتربرگ نمونه‌های مورد آزمایش

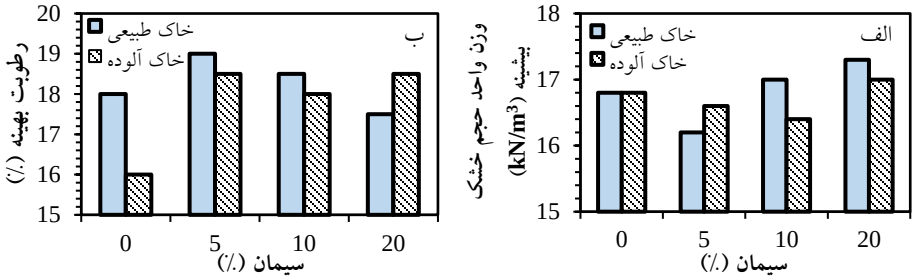
۲. آزمایش تراکم استاندارد

نتایج آزمایش تراکم خاک طبیعی و خاک آلوده به فنانترن در شکل (۳) آورده شده است. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، با اضافه کردن ماده آلی فنانترن به خاک وزن واحد حجم خشک بیشینه تغییری نکرده و در مقدار kN/m^3 ١٦/٨ ثابت مانده، لیکن درصد رطوبت بهینه کاهش پیدا کرده است و از ۱۸٪ در خاک طبیعی به ١٦٪ در خاک آلوده رسیده است. برای مقایسه بهتر پارامترهای تراکمی نمونه‌های حاوی سیمان با یکدیگر، تمامی نتایج نمونه‌های مورد آزمایش در شکل (٤) به‌صورت نمودار میله‌ای آورده شده است. با توجه به شکل (٤-الف)، با اضافه کردن سیمان به خاک طبیعی و خاک آلوده، γ_{dmax} افزایش پیدا کرده است لیکن این امر برای ۵٪ سیمان در خاک طبیعی و ۵ و ۱۰٪ سیمان در خاک آلوده صدق نمی‌کند و γ_{dmax} کاهش پیدا کرده است. همچنین با اضافه کردن سیمان به خاک آلوده w_{opt} افزایش یافته، لیکن تغییرات w_{opt} با اضافه کردن سیمان به خاک طبیعی چشمگیر نبوده است (شکل (٤-ب)). بر اساس شکل (٤)، با اضافه کردن ۵٪ سیمان به خاک طبیعی w_{opt} و γ_{dmax} به ۱۹٪ و kN/m^3 ١٦/٢ می‌رسد. همچنین با اضافه کردن ۵ و ۱۰٪ سیمان به خاک آلوده، w_{opt} به‌ترتیب برابر ۱۸/۵ و ۱۸٪ و γ_{dmax} به‌ترتیب برابر ١٦/٦ و kN/m^3 ١٦/٤ شده است. با افزودن ۱۰ و ۲۰٪ سیمان به خاک طبیعی w_{opt} به‌ترتیب برابر ۱۸/۵ و ۱۷/۵٪ و γ_{dmax} به‌ترتیب برابر ۱۷ و ۱۷/۳ kN/m^3 گردید که این امر افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه را نشان می‌دهد. این موضوع در خاک آلوده اختلاط‌یافته با ۲۰٪ سیمان نیز مشاهده گردید. با افزودن ۲۰٪ سیمان، w_{opt} و γ_{dmax} برابر ۱۸/۵٪ و kN/m^3 ۱۷ شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]



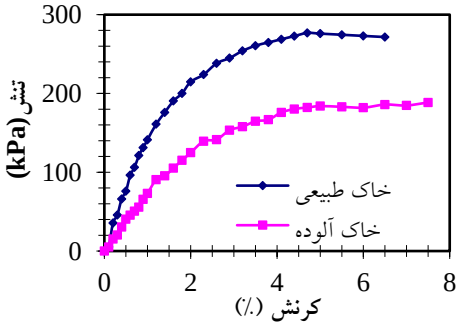
شکل۳- منحنی تراکم خاک طبیعی و خاک آلوده به فنانترن



شکل ٤- نتایج آزمایش تراکم روی نمونه‌های مورد آزمایش، الف) وزن واحد حجم خشک بیشینه و ب) درصد رطوبت بهینه

۳. آزمایش مقاومت تک‌محوری

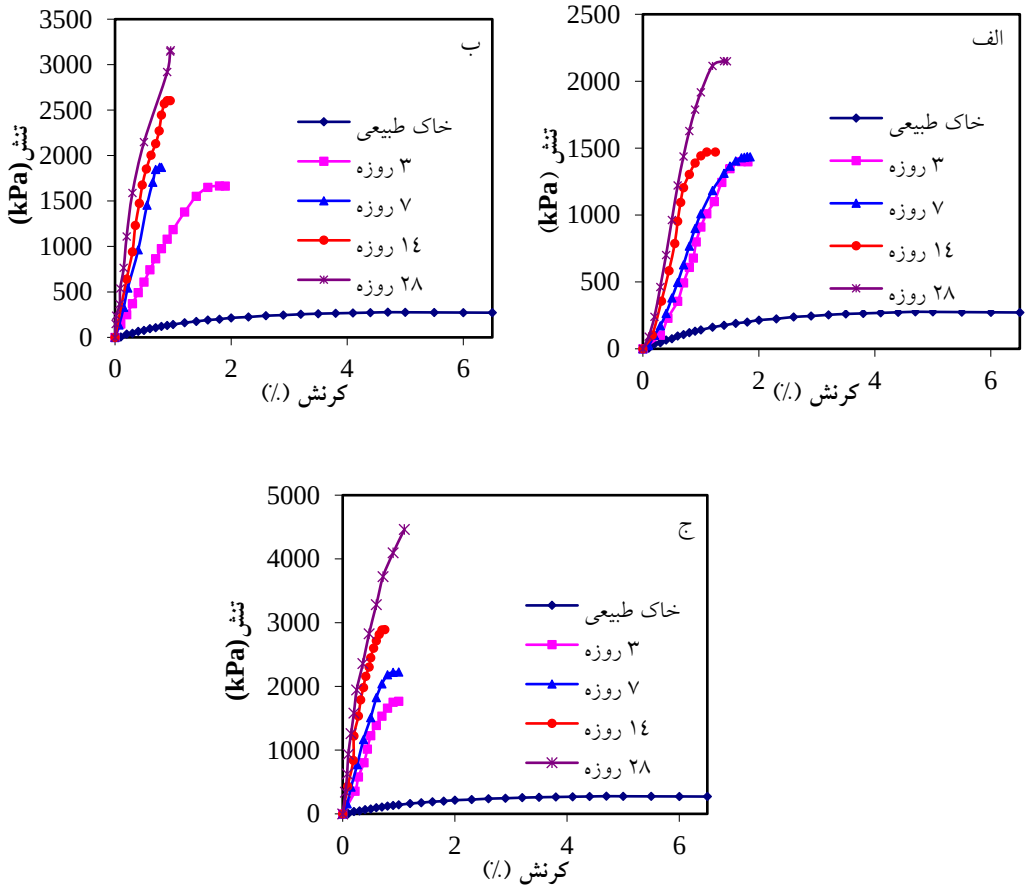
شکل (۵) نشان‌دهنده منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده به فنانترن می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نهایی خاک طبیعی kPa ۲۷۲ در کرنش ٪٦/۵ می‌باشد که این مقادیر با اضافه کردن ماده آلی فنانترن به kPa ۱۸۸ و ٪۷/۵ می‌رسد.



شکل۵- منحنی تنش-کرنش خاک طبیعی و خاک آلوده به فنانترن

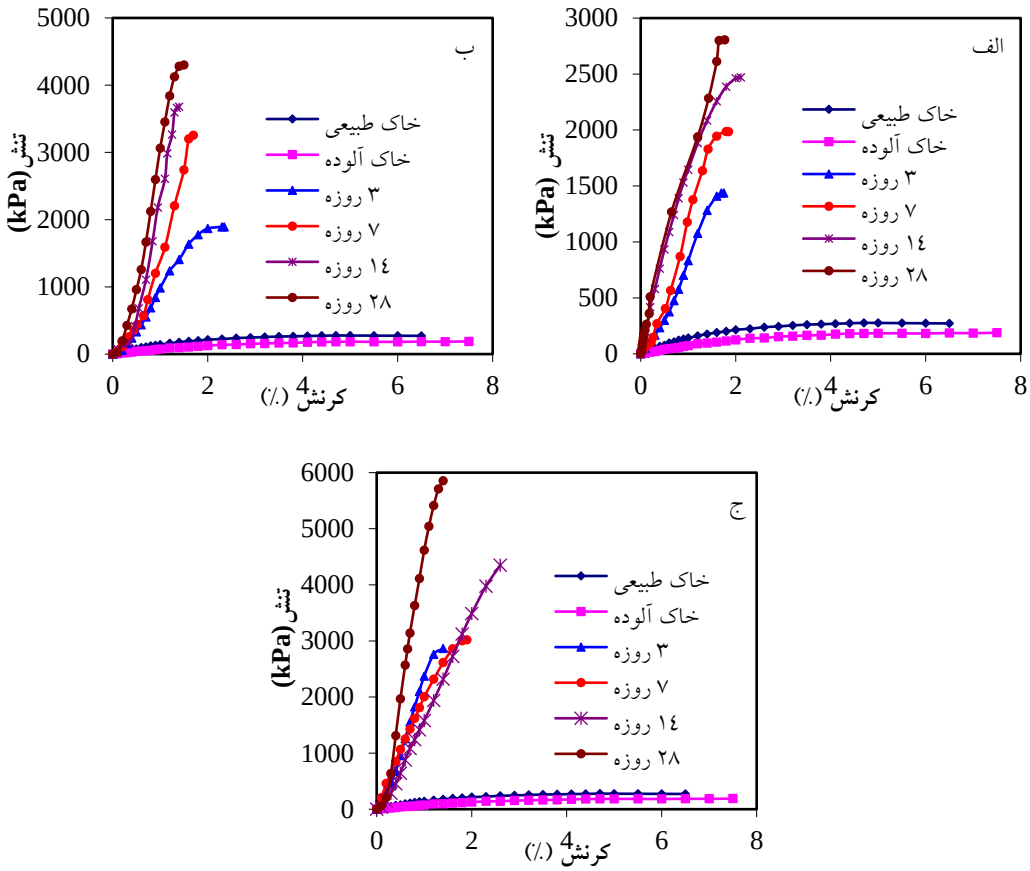
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

منحنی‌های تنش-کرنش خاک-سیمان و خاک آلوده اختلاط‌یافته به سیمان در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت و به‌ازای درصد ثابت سیمان در شکل‌های (٦) و (٧) آورده شده است. همان طور که در شکل (٦-الف) مشاهده می‌شود به‌ازای افزودن ۵٪ سیمان به خاک طبیعی، میزان مقاومت نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ١٤ و ۲۸ روز به‌ترتیب برابر ۱۳۷۹، ١٤٣۵، ١٤٧١ و ۲١٤٩ کیلوپاسکال به‌ازای کرنش‌های ۱/۸، ۱/۸، ۱/۲۵ و ۱/٤۵٪ گردید که این مقادیر نشان می‌دهد که به‌ازای افزودن درصد ثابت سیمان به خاک طبیعی و با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت افزایش یافته و گیسختگی نمونه‌ها در کرنش کمتری رخ می‌دهد. با توجه به شکل‌های (٦-ب) و (٦-ج) مشاهده می‌شود که به‌ازای افزودن ۱۰ و ۲۰٪ سیمان، مقاومت نمونه‌های خاک با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد و نمونه‌های خاک در کرنش‌های کمتری گسیخته می‌گردند. این امر در نمونه‌های خاک آلوده اختلاط‌یافته با سیمان در شکل (٧) نیز مشاهده گردید. با توجه به شکل (٧-ج)، به‌ازای اضافه کردن ۲۰٪ سیمان به خاک آلوده مقاومت در حالت گسیختگی نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ١٤ و ۲۸ روز به‌ترتیب برابر ۲۸٦۳، ۳۳۵۵، ٤۳٤۸ و ۵۵٤۲ کیلوپاسکال ثبت گردیده است.



شکل ٦- منحنی‌های تنش-کرنش خاک-سیمان در درصدهای مختلف سیمان (الف- ۵٪ سیمان، ب- ۱۰٪ سیمان و ج- ۲۰٪ سیمان)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]



شکل ۷- منحنی‌های تنش-کرنش خاک آلوده اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف سیمان

(الف- ۵٪ سیمان، ب- ۱۰٪ سیمان و ج- ۲۰٪ سیمان)

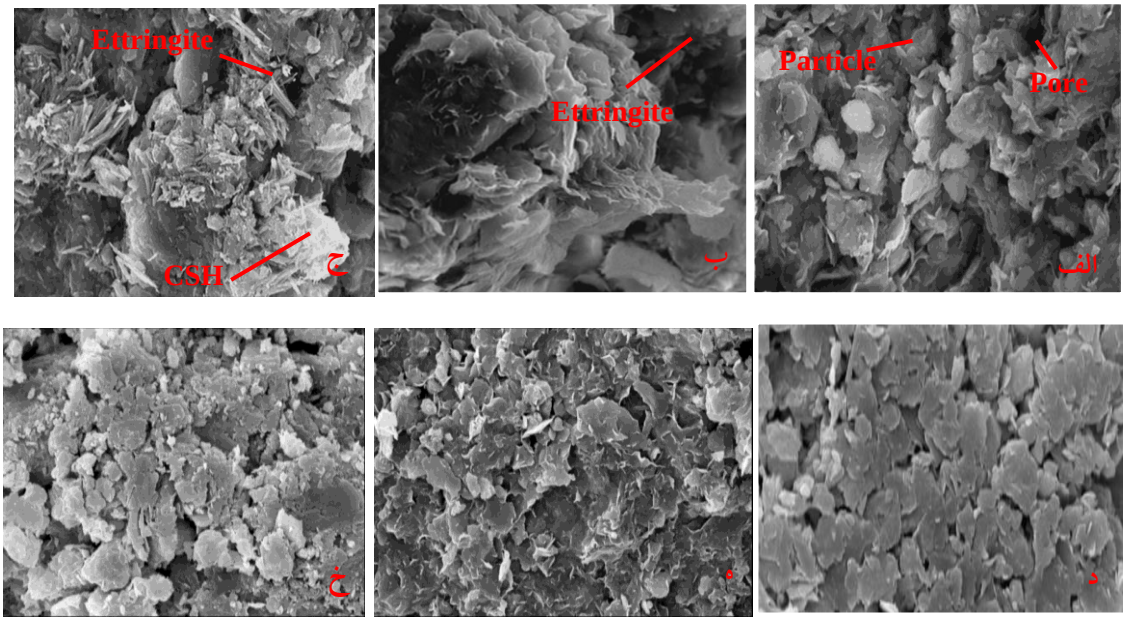
۴. SEM

شکل (۸) تصاویر میکروسکوپ الکترونی خاک طبیعی، خاک-سیمان (۵ و ۲۰٪ سیمان و زمان عمل‌آوری ۲۸ روز)، خاک آلوده و خاک آلوده اختلاط‌یافته با سیمان (۵ و ۲۰٪ سیمان و زمان عمل‌آوری ۲۸ روز) را نشان می‌دهد. با مقایسه دو شکل (۸-الف) و (۸-د) مشاهده می‌گردد که اضافه کردن فنانترن به خاک سبب تغییر ساختار خاک طبیعی شده، به‌گونه‌ای که ساختار را به سمت پراکنده شدن پیش می‌برد. همچنین با افزودن فنانترن، ذرات خاک صفحه‌ای شکل و تقریبا موازی نسبت به یکدیگر قرار گرفته و فضای بین ذرات کاهش پیدا کرده است. با کمک نرم‌افزار ImageJ مقدار حدودی فضاهای خالی موجود در بین ذرات خاک طبیعی و آلوده تخمین زده شد که این مقادیر در خاک طبیعی برابر ۹/۱٪ و خاک آلوده ٦/۳٪ می‌باشد. این مقادیر براساس نسبت منافذ موجود در عکس به سطح کل عکس تعیین شده است. با توجه به شکل (۸-ب) با اضافه کردن ۵٪ سیمان به خاک طبیعی، تمامی سیمان وارد واکنش می‌شود و ساختمان خاک را به سمت لخته[26] شدن می‌برد

[26] flocculated

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

اما در حالت اضافه کردن ۲۰٪ سیمان (شکل (۸–ج)) بخشی از سیمان اضافه شده وارد واکنش می‌شود و با ایجاد ذرات سوزنی شکلی به ذرات خاک می‌چسبد و سیمان اضافی در فضاهای خالی بین ذرات خاک قرار می‌گیرد. در خاک آلوده اختلاط‌یافته با سیمان، به‌علت حضور فنانترن در محیط و تغییر ساختار خاک، تقریبا تمامی فضاهای خالی بین ذرات توسط مواد حاصله از واکنش هیدراسیون سیمان و مواد به وجود آمده از واکنش‌های شیمیایی در محیط پر شده است.



شکل ۸– تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر الف– خاک طبیعی، ب– خاک–سیمان (۵٪ سیمان و زمان عمل‌آوری ۲۸ روز)، ج– خاک–سیمان (۲۰٪ سیمان و زمان عمل‌آوری ۲۸ روز)، د– خاک آلوده، ه– خاک آلوده اختلاط‌یافته با سیمان (۵٪ سیمان و زمان عمل‌آوری ۲۸ روز) و خ– خاک آلوده اختلاط‌یافته با سیمان (۲۰٪ سیمان و زمان عمل‌آوری ۲۸ روز)

بحث

آرایش ذرات خاک در کنار هم در توده خاک، ساختمان خاک نامیده می‌شود. ساختمان اثر اساسی بر رفتار خاک‌ها دارد. به‌طور کلی پذیرفته شده‌است که خاک‌های رسی دارای ساختارهای ریز و درشت هستند. در این پژوهش، ساختار ریز خاک توسط SEM بررسی گردید. مقایسه دو شکل (۸–الف) و (۸–د) نشان می‌دهد که اضافه کردن فنانترن به خاک سبب تغییر ساختمان خاک و پراکنده شدن آن شده است به نحوی که ذرات خاک به‌صورت موازی نسبت به یکدیگر قرار گرفته و فضای بین آنها در خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی کاهش شدیدی پیدا کرده است. همچنین مقایسه منحنی‌های تراکمی خاک طبیعی و آلوده (شکل (۳)) نشان می‌دهد که وزن واحد حجم خشک بیشینه دو خاک طبیعی و آلوده یکسان بوده، لیکن رطوبت بهینه خاک آلوده ۲٪ کمتر از خاک طبیعی می‌باشد که این امر نشان‌دهنده و تاییدکننده تغییر ساختار و کاهش فضاهای بین ذرات خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی می‌باشد. می‌توان بیان کرد که خاک آلوده به‌علت داشتن ساختار پراکنده دارای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

فضاهای بین ذرات کمتری در مقایسه با خاک طبیعی که دارای ساختار لخته است، می‌باشد. لازم به ذکر است که انرژی تراکمی به‌کار رفته برای هر دو نوع خاک یکسان بوده است، بنابراین با اعمال انرژی تراکمی در حالت لخته و با اضافه کردن رطوبت، جابه‌جایی ذرات صورت پذیرفته است، لیکن این امر در حالت آلوده با ساختار پراکنده به‌علت محدودیت فضاها و پیوندهای محکم که بین آنها وجود دارد، کمتر اتفاق می‌افتد. بنابراین در حالت لخته تحت این انرژی، فضاهای بین ذرات کاهش می‌یابد به‌گونه‌ای که به فضاهای بین ذرات در حالت پراکنده می‌رسد که این امر موجب می‌شود که دو خاک دارای وزن واحد حجم خشک بیشینه یکسانی شوند. نتایج این پژوهش با نتایج ارائه شده توسط خلوصی و همکاران (١٣٩٦) و حاجی‌محمدی و حمیدی (١٣٩٩) مطابقت ندارد [٦] و [٢٣]. آنها بیان نمودند که با افزودن ماده آلی به خاک، w_{opt} افزایش و γ_{dmax} کاهش می‌یابد و علت این امر را به کاهش ضخامت لایه مضاعف و ایجاد ساختار لخته‌تر در خاک آلوده مرتبط دانستند. همچنین استبرق و همکاران (٢٠١٦) بیان نمودند که به‌ازای افزودن ٣٪ گلیسرول به خاک، w_{opt} و γ_{dmax} در مقایسه با خاک طبیعی به‌ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد که این تغییرات به‌ازای اضافه کردن ٦ و ٩٪ گلیسرول بالعکس می‌شود (w_{opt} کاهش و γ_{dmax} افزایش می‌یابد) [٢٠]. آنها بیان نمودند که با اضافه کردن محلول گلیسرول به خاک، ثابت دی‌الکتریک مایع منفذی بین ذرات کاهش یافته و در نتیجه سبب تشکیل ساختمان فولکوله و ذرات درشت‌تر نسبت به خاک طبیعی می‌شود که در نهایت این امر باعث افزایش γ_{dmax} و کاهش w_{opt} می‌شود. آنها همچنین نتیجه‌گیری نمودند که با افزایش درصد محلول گلیسرول، میزان دانه‌ای شدن ذرات خاک بیشتر می‌شود.

با توجه به شکل (٤) و مقایسه مقادیر w_{opt} و γ_{dmax} نمونه‌های خاک می‌توان گفت که اضافه کردن درصدهای بالای سیمان به خاک طبیعی و خاک آلوده سبب افزایش γ_{dmax} و کاهش w_{opt} می‌شود. اما این امر در مورد خاک طبیعی حاوی ٥٪ سیمان و خاک آلوده دارای ٥ و ١٠٪ سیمان صدق نمی‌کند. دلیل این امر را به این‌صورت می‌توان توجیه کرد که هر خاکی دارای ظرفیت تبادل کاتیونی مشخصی می‌باشد که به عواملی مانند درصد رس، نوع کانی‌های رسی و سطح ویژه بستگی دارد. با اضافه کردن ٥٪ سیمان به خاک طبیعی در رطوبت بهینه، تبادل یونی بین یون‌های سیمان و کانی‌های رسی صورت می‌گیرد و سبب اتصال ذرات با پیوندهای قوی می‌گردد. از طرفی با اضافه کردن ٥٪ سیمان به خاک، درجه لخته شدن ذرات نسبت به یکدیگر افزایش می‌یابد. از آنجا که آزمایش تراکم تحت انرژی ثابتی صورت گرفته است، در خاک–سیمان جابه‌جایی ذرات و کاهش فضای بین آنها مانند خاک طبیعی نمی‌باشد، بنابراین کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه مشاهده می‌شود. در درصدهای ١٠ و ٢٠٪ سیمان، مقداری از سیمان که بیشتر از ظرفیت تبادل کاتیونی می‌باشد در فضاهای بین ذرات قرار می‌گیرد و موجب کاهش فضاهای بین آنها نسبت به خاک طبیعی می‌شود، بنابراین تحت انرژی ثابت تراکمی، وزن واحد حجم خشک بیشینه افزایش و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. دلایل آورده شده در خصوص خاک آلوده نیز صادق است. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج ارایه شده شده توسط پژوهشگران دیگر هم‌خوانی دارد [٦]، [٢٠] و [٣٥].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

آزمایش تعیین حدود اتربرگ نشان داد که خاک آلوده به فنانترن دارای حدود اتربرگ کمتری نسبت به خاک طبیعی می‌باشد. با ورود فنانترن به خاک، بخشی از این ماده آلی سطح ذرات خاک را می‌پوشاند. از آنجا که این ماده غیرقطبی می‌باشد، قدرت جذب آب توسط ذرات خاک کاهش می‌یابد و در نتیجه کاهش حدود اتربرگ را سبب می‌شود. این نتایج با یافته‌های پژوهش خلوصی و همکاران مطابقت ندارد [٦]. آنها گزارش نمودند که اضافه کردن آنتراسن به خاک سبب افزایش حد روانی و خمیری در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود. آنها بیان کردند که افزایش حدود اتربرگ خاک آلوده در مقایسه با خاک طبیعی ناشی از پوشانده شدن بخشی از ذرات خاک توسط آلاینده و در نتیجه نرسیدن آب به لایه مضاعف می‌باشد. در نتیجه آب بیشتری برای رسیدن خاک آلوده به حد خمیری نیاز می‌باشد و آن مقداری از آب که به لایه مضاعف نرسیده، در لایه آب آزاد قرار گرفته و سبب افزایش حد روانی می‌شود. لیکن استبرق و همکاران (٢٠١٦) کاهش حدود اتربرگ خاک آلوده به گلیسرول را در مقایسه با خاک طبیعی مشاهده نمودند [٢٠]. آنها بیان نمودند که محلول گلیسرول دارای ثابت دی‌الکتریک کمتر از آب می‌باشد که این امر سبب کاهش ضخامت لایه مضاعف و تشکیل ساختمان درشت‌دانه و در نتیجه کاهش سطح ویژه ذرات و جذب آب توسط آنها می‌گردد.

حدود اتربرگ با اضافه کردن درصد بالای سیمان به خاک طبیعی و خاک آلوده کاهش می‌یابد. این امر به‌دلیل تبادل یونی بین ذرات خاک و سیمان و تشکیل ذرات درشت‌دانه و در نتیجه کاهش سطح ویژه و میزان جذب آب می‌باشد. نتایج این پژوهش با یافته‌های پژوهشگران دیگر هم‌خوانی دارد [٦] و [٢٠].

بر اساس شکل (۵) مشاهده می‌شود که اضافه کردن فنانترن به خاک سبب کاهش مقاومت فشاری نهایی خاک می‌شود. با توجه به شکل (۸–د)، افزودن آلاینده موجب پراکنده شدن ذرات و موازی شدن آنها نسبت به یکدیگر شده است که این وضعیت نشان‌دهنده آن است که بین ذرات هیچ‌گونه اصطکاکی وجود ندارد که این امر در کاهش مقاومت موثر می‌باشد. لیکن در خاک طبیعی، ذرات دارای ساختار لخته بوده (شکل (۸–الف)) و بین آنها اصطکاک وجود دارد. بنابراین عدم وجود اصطکاک بین ذرات موجب کاهش مقاومت در نمونه آلوده به فنانترن شده است. نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های پژوهشگران دیگر هم‌خوانی دارد [٦]، [٢٠]، [٢١] و [٢٣]. با اضافه کردن سیمان به خاک طبیعی و خاک آلوده، مقاومت فشاری نهایی خاک افزایش می‌یابد و دلیل آن واکنش‌های شیمیایی ناشی از عمل هیدراسیون سیمان می‌باشد. واکنش سیمان با خاک شامل سه مرحله تبادل کاتیونی، هیدراسیون سیمان و واکنش پوزولانی[٢٧] می‌باشد. تبادل کاتیونی با اضافه کردن سیمان به خاک آغاز می‌شود و یون‌های کلسیم در حین هیدراسیون اولیه سیمان آزاد می‌گردد و تبادل کاتیونی با ذرات خاک صورت می‌گیرد. در مرحله هیدراسیون سیمان، pH مایع منفذی افزایش یافته و سبب حل شدن واحدهای سیلیکا و آلومینای کانی‌های رسی می‌شود. در مرحله پوزولانی، $Ca(OH)_2$ با سیلیکات و آلومینات آزاد شده از مرحله قبل که ناشی از قلیایی بودن محیط

[27] Pozzolanic reaction

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

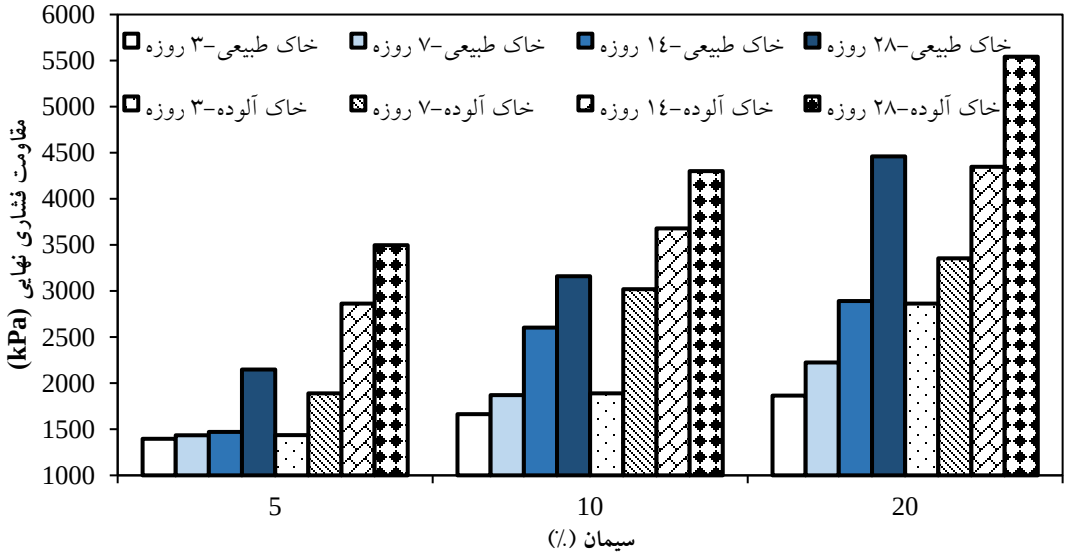
بوده واکنش داده و ژل هیدراته‌سیلیکات‌کلسیم[۲۸] (CSH) و ژل هیدراته‌آلومینات‌کلسیم[۲۹] (CAH) تشکیل می‌شود. این ژل‌ها ذرات خاک را بهم متصل می‌کند، به‌گونه‌ای که ذرات خاک نمی‌توانند به راحتی بر روی یکدیگر بلغزند و این امر سبب افزایش مقاومت خاک با افزودن سیمان می‌شود [۱]. نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری و SEM نشان می‌دهد که به‌دلیل انجام عمل هیدراسیون و تولید ژل CSH و اترینگایت[۳۰] در محیط، ژل CSH سبب پر کردن فضاهای خالی بین ذرات رس شده و اترینگایت با ایجاد ذراتی سوزنی شکل به ذرات خاک می‌چسبد و این امر سبب متراکم شدن خاک و افزایش مقاومت خاک می‌شود. هرچه مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بیشتر باشد، تولید این مواد و در نتیجه مقاومت بیشتر خواهد شد. این نتایج با نتایج ارائه شده به‌وسیله پژوهشگران دیگر هم‌خوانی دارد [٦]، [۲۰]، [۲۱]، [۲۳] و [۳۵].

شکل (۹) نتایج مقاومت فشاری نهایی را برای نمونه‌های خاک–سیمان و خاک آلوده اختلاط‌یافته با سیمان در درصدهای مختلف سیمان را به‌ازای زمان‌های عمل‌آوری مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در یک زمان عمل‌آوری ثابت مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک با افزایش درصد سیمان افزایش می‌یابد. با توجه به این شکل، کمینه مقدار مقاومت فشاری نهایی خاک مربوط به نمونه خاک–سیمان حاوی ۵٪ سیمان در زمان عمل‌آوری ۳ روز (۱۳۹۷ kPa) و بیشینه آن مربوط به نمونه خاک آلوده اختلاط‌یافته با ۲۰٪ سیمان در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز (۵۵٤۲ kPa) می‌باشد. علاوه بر این می‌توان بیان نمود که مقاومت نمونه‌های آلوده اختلاط‌یافته بیشتر از نمونه‌های خاک–سیمان می‌باشد. این در حالی است که پژوهشگران خلاف این موضوع را نشان دادند [٦] و [۲۰]. علت این امر آن است که در خاک آلوده اختلاط‌یافته با سیمان، فنانترن در حضور محصولات هیدراسیون سیمان به خصوص ژل سیلیکا اکسیده می‌شود [۳٦] و مواد تولید شده می‌تواند با اکسیدهای سیلیکات‌های سازنده خاک و یون‌های OH^- محیط واکنش دهد و پیوندهای هیدروژنی قوی‌ای تولید گردد که در نتیجه این پیوندها سبب افزایش مقاومت نمونه‌های آلوده اختلاط‌یافته با سیمان نسبت به خاک–سیمان می‌شود. همچنین تغییر ساختار خاک در نمونه‌های آلوده، سبب کاهش فضاهای خالی بین ذرات شده و مواد حاصله از واکنش خاک با سیمان در این فضاها قرار می‌گیرد و آنها را کاملا پر می‌کند (شکل‌های (۸–ه) و (۸–خ)) لیکن در نمونه‌های خاک–سیمان به‌علت داشتن ساختار لخته، ذرات نسبت بهم دارای فضاهای بزرگتر و پیوندهای ضعیف‌تر در مقایسه با خاک آلوده می‌باشند (شکل‌های (۸–ب) و (۸–ج)) و این امر سبب سهولت و افزایش جابه‌جایی ذرات خاک با اعمال نیرو و کاهش مقاومت نسبت به نمونه‌های آلوده حاوی سیمان می‌گردد.

[28] Calcium Silicate Hydrate
[29] Calcium Aluminate Hydrate

[30] Ettringite

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]



شکل ۹- مقاومت فشاری نهایی برای نمونه‌های بهسازی شده با سیمان در زمان‌های عمل‌آوری مختلف

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که بهسازی خاک آلوده به فنانترن با افزودن سیمان امکان‌پذیر می‌باشد و با توجه به شرایط زیست‌محیطی و توجیه اقتصادی که این روش دارد، می‌توان نتایج این کار را به‌عنوان یک روش کاربردی تلقی کرد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی بهسازی خاک آلوده به ماده آلی فنانترن با استفاده از سیمان در درصدها و زمان‌های عمل‌آوری مختلف سیمان انجام گردید. برای بررسی این امر، آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی روی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک-سیمان، خاک آلوده به فنانترن و خاک آلوده اختلاط‌یافته با سیمان صورت پذیرفت و نتایج زیر به‌دست آمد:

- افزودن ماده آلی فنانترن به خاک سبب تغییر ساختمان خاک می‌گردد و ساختمان خاک را به سمت پراکنده شدن پیش می‌برد.
- با اضافه کردن فنانترن به خاک، وزن واحد حجم خشک بیشینه تغییری نیافته، لیکن درصد رطوبت بهینه کاهش دو درصدی نسبت به خاک طبیعی داشته است. دلیل این امر آن است که با اعمال انرژی تراکمی، جابه‌جایی ذرات در خاک آلوده به‌علت داشتن ساختار پراکنده، محدودیت فضاها و پیوندهای محکم که بین آنها وجود دارد، در مقایسه با خاک طبیعی (که دارای ساختار لخته است) کمتر اتفاق می‌افتد.
- با اضافه کردن سیمان به خاک طبیعی و خاک آلوده، وضعیت تراکمی خاک تغییر می‌کند. به‌گونه‌ای که در درصدهای پایین، سیمان موجب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه و در درصدهای بالاتر سبب بهبود وضعیت تراکمی می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

- افزودن فنانترن به خاک سبب کاهش حدهای روانی و خمیری نسبت به خاک طبیعی می‌شود که دلیل آن پوشانده شدن بخشی از ذرات خاک با فنانترن می‌باشد. از آنجا که این ماده غیرقطبی می‌باشد، موجب کاهش قدرت جذب آب توسط ذرات خاک و در نتیجه کاهش حدود اتربرگ می‌شود.
- آلوده نمودن خاک با فنانترن سبب کاهش مقاومت آن نسبت به خاک طبیعی می‌شود و افزودن سیمان به‌منظور بهسازی موجب افزایش مقاومت خاک آلوده می‌گردد که میزان این افزایش مقاومت متناسب با افزایش درصد سیمان و زمان عمل آوری می‌باشد.
- میزان مقاومت نهایی نمونه‌های آلوده بهسازی شده با سیمان بیشتر از نمونه‌های خاک–سیمان می‌باشد که این امر به‌علت تشکیل پیوندهای قوی بین ذرات خاک آلوده بهسازی شده در اثر اکسیده شدن فنانترن و ترکیب مواد تولید شده با اکسیدهای سیلیکات‌های سازنده خاک و یون‌های OH^- محیط می‌باشد.

منابع

1. A. R. Estabragh, M. Kholoosi, F. Ghaziani, and A. A. Javadi, “Mechanical and Leaching Behavior of a Stabilized and Solidified Anthracene-Contaminated Soil,” *J. Environ. Eng.*, vol. 144, no. 2, p. 04017098, 2018.

۲. شاکری. ع، رضی کرد محله. ل، اسماعیلی. ا. «بررسی غلظت هیدروکربن‌های نفتی کل، پلی‌هیدروآروماتیک‌ها وآلیفاتیک‌ها در خاک مناطق نفتی استان بوشهر». پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، ۱۳۹۰.

3. S. M. Bamforth and I. Singleton, “Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: Current knowledge and future directions,” *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol. 80, no. 7. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 723–736, 2005.

4. S. R. Wild, K. S. Waterhouse, K. C. Jones, and S. P. McGrath, “Organic Contaminants in an Agricultural Soil with a Known History of Sewage Sludge Amendments: Polynuclear Aromatic Hydrocarbons,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 11, pp. 1706–1711, 1990.

۵. ملکوتی‌خواه. جواد. «پاکسازی ناخالصی‌های نفتی از آب بر پایه فناوری نانو». ماهنامه فناوری نانو، شماره ۱۱، بهمن ۱۳۹٤.

٦. خلوصی. م م، رئیسی استبرق. ع، عبدالهی ج. «بررسی تغییرات خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک رسی آلوده به ماده هیدروکربنی با افزودن سیمان». مهندسی عمران مدرس. دوره ۱۷، شماره، ۱۳۹٦.

7. A. K. Haritash and C. P. Kaushik, “Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 169, no. 1–3. J Hazard Mater, pp. 1–15, 2009.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

8. K. R. Reddy and R. E. Saichek, “Enhanced Electrokinetic Removal of Phenanthrene from Clay Soil by Periodic Electric Potential Application,” *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.*, vol. 39, no. 5, pp. 1189–1212, 2004.
9. https://www.ioptc.ir.
10. U.S. EPA. List of the sixteen PAHs with highest carcinogenic effect, *IEA Coal Research*, London, 1984.
١١. علایی.ا، وکیلی. ف، شریف. اع م. «گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به فنانترن با استفاده از گیاه سورگوم». محیط‌شناسی، دوره ٣٦، شماره ٥٣، ١٣٨٩.
12. M. Arbabi, S. Nasseri, and A. Chimezie, “Biodegradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Petroleum Contaminated Soils,” *Iran. journal of chemistry and chemical engineering (IJCCE)*, vol. 28, no. 3, pp. 53–59, 2009.
13. H.-Y. Fang and R. C. Chaney, *Introduction to Environmental Geotechnology*. CRC Press, 2016.
14. N. J. Meegoda and P. Ratnaweera, “Compressibility of contaminated fine-grained soils,” *Geotech. Test. J.*, vol. 17, no. 1, pp. 101–112, 1994.
15. M. Khamehchiyan, A. H. Charkhabi, and M. Tajik, “Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils,” *Eng. Geol.*, vol. 89, no. 3–4, pp. 220–229, 2007.
16. M. Mollamahmutoglu and E. Avci, “Cement type effect on improvement of clayey soil properties,” *ACI Mater. J.*, vol. 115, no. 6, pp. 855–866, 2018.
17. J. B. Croft, “The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization,” *Geotechnique*, vol. 17, no. 2, pp. 119–135, 1967.
18. F. G. Bell, and M. J. Tyrer, “The enhancement of the properties of clay soils by the addition of cement or lime,” In *12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, , Rio de Janiero, Brazil*,1989.
19. R. Bahar, M. Benazzoug, and S. Kenai, “Performance of compacted cement-stabilised soil,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 7, pp. 811–820, 2004.
20. A. R. Estabragh, M. Khatibi, and A. A. Javadi, “Effect of Cement on Treatment of a Clay Soil Contaminated with Glycerol,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 4, p. 04015157, 2016.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

21. H. Chen, Y. Jiang, W. Zhang, and X. He, “Experimental study of the stabilization effect of cement on dieselcontaminated soil,” *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, vol. 50, no. 2, pp. 199–205, 2017.

22. O. E. Oluwatuyi, O. O. Ojuri, and A. Khoshghalb, “Cement-lime stabilization of crude oil contaminated kaolin clay,” *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 160–167, 2020.

۲۳. حاجی‌محمدی. م، حمیدی. ا. « بهسازی رفتار مکانیکی رس کائولینیت آلوده به آنتراسن با سیمان و آهک». تحقیقات آب و خاک ایران. دوره ۵۱، شماره۷، ۱۳۹۹.

24. DL. Sparks. *Methods of Soil Analysis Part 3. Chemical Methods* .American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 1998.

25. P. Wexler, B.D. Anderson, S.C. Gad, P.B. Hakkinen, M. Kamrin, A. De Peyster, B. Locey, C. Pope, H.M. Mehendale, and L.R. Shugart, *Encyclopedia of toxicology* (Vol. 3). Academic Press, 2005.

26. J. D. Moody, J. P. Freeman, D. R. Doerge, and C. E. Cerniglia, “Degradation of Phenanthrene and Anthracene by Cell Suspensions of Mycobacterium sp. Strain PYR-1,” *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 67, no. 4, pp. 1476–1483, 2001.

27. R. López-Vizcaíno, C. Sáez, P. Cañizares, and M. A. Rodrigo, “The use of a combined process of surfactant-aided soil washing and coagulation for PAH-contaminated soils treatment,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 88, pp. 46–51, 2012.

28. K. R. Reddy and R. E. Saichek, “Effect of Soil Type on Electrokinetic Removal of Phenanthrene Using Surfactants and Cosolvents,” *J. Environ. Eng.*, vol. 129, no. 4, pp. 336–346, 2003.

29. T. Alcántara, M. Pazos, C. Cameselle, and M. A. Sanromán, “Electrochemical remediation of phenanthrene from contaminated kaolinite,” *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 30, no. 2, pp. 89–94, 2008.

30. M. C. Chang, C. R. Huang, and H. Y. Shu, “Effects of surfactants on extraction of phenanthrene in spiked sand,” *Chemosphere*, vol. 41, no. 8, pp. 1295–1300, 2000.

31. ASTM D4318-17e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

32. ASTM D698-12e2, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
33. ASTM D1632-17, Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
34. ASTM D1633-17, Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
35. A. R. Estabragh, I. Beytolahpour, and A. A. Javadi, “Effect of Resin on the Strength of Soil-Cement Mixture,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 7, pp. 969–976, 2011.
36. J. T. Barbas, M. E. Sigman, and R. Dabestani, “Photochemical oxidation of phenanthrene sorbed on silica gel,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 5, pp. 1776–1780, 1996.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]