اثر گلیسرول و استون بر خواص فیزیکی و مکانیکی یک خاک رسی

الناز افسری*، علی رئیسی استبرق، محدثه امینی؛
دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی آبیاری و آبادانی

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۵/۱۹

چکیده

در این پژوهش اثر دو نوع آلاینده گلیسرول و استون بر خواص فیزیکی و مکانیکی یک خاک رسی با خمیرایی پایین (CL) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات حدود آتربرگ، تراکم، تورم آزاد، تحکیم، مقاومت تک‌محوری و سی‌بی‌آر بر روی نمونه‌هایی از خاک در حالت طبیعی و آلوده شده با درصدهای گوناگون (۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) از دو مادهٔ آلاینده هیدروکربنی فوق صورت پذیرفت. علاوه بر این عکس‌بردای میکروسوپ الکترونی روبشی (SEM) روی نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده شده با دو مادهٔ یاد شده، انجام شد. نتایج نشان دادند که با افزودن گلیسرول، حدود آتربرگ و درصد تورم کاهش، ولیکن پارامترهای تراکمی شامل وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابند. لیکن افزودن استون به خاک برخلاف تغییرات ایجاد شده ناشی از افزودن گلیسرول را نشان داد به گونه‌ای که حدود آتربرگ و درصد تورم افزایش و نیز وزن واحد حجم خشک بیشینه کاهش و رطوبت بهینه افزایش یافتند که این تغییرات ایجاد شده نیز تابعی از درصد وزنی مادهٔ آلاینده بودند. علاوه بر این نتایج نشان دادند که مقاومت و سی‌بی‌آر (ظرفیت باربری) خاک آلوده شده با هر دو ماده نسبت به حالت طبیعی در خاک، روند کاهشی داشته که این کاهش در خاک‌های حاوی گلیسرول بیشتر بوده است. نتایج آزمایشات تحکیم نیز نشان دادند که مقادیر نشانهٔ فشردگی (C_c) و نشانهٔ تورم (C_s) مستقل از درصد آلاینده می‌باشند. همچنین نتایج SEM نشان داد که تغییرات ناشی از دو آلایندهٔ یاد شده در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک، ناشی از تغییرات ایجاد شده در ساختمان خاک است و تأثیر آنها بر ویژگی‌های خاک مورد استفاده یکسان نمی‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آلایندهٔ هیدوکربنی، حدود آتربرگ، تورم آزاد، مقاومت تک‌محوری، سی‌بی‌آر، تحکیم.

مقدمه

آلودگی خاک به وسیلهٔ مواد هیدروکربنی نفتی از مسائل مهم زیست‌محیطی محسوب می‌شود زیرا می‌تواند اثرات سوئی بر آب، هوا، خاک و نهایتاً زندگی بشر داشته باشد. مواد آلاینده در داخل خاک ممکن است یا در فضای بین ذرات خاک قرار بگیرند و یا جذب ذرات خاک شوند. اگر ذرات تشکیل‌دهندهٔ تودهٔ خاک خنثی باشند، مواد آلاینده در بین ذرات و یا این‌که به صورت لایه‌هایی روی ذرات قرار می‌گیرند و همانند یک پوشش عمل می‌نمایند. بنابراین ویژگی‌های خاک‌های آلوده تابعی از تغییرات کیفیت مایع آلوده‌کننده و عمل متقابل آن با ذرات خاک است و می‌توان گفت حساسیت واکنش خاک با مواد آلاینده به شرایط محیطی و دانه‌بندی آن بستگی دارد [۱]، [۲].

*نویسندهٔ مسئول Afsari.e@alumni.ut.ac.ir

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

فانگ[۱] [۳] در سال ۱۹۹۷ شاخصی به نام شاخص حساسیت که دارای محدوده تغییراتی بین ۱-۰ و نشان‌دهندهٔ شدت عمل متقابل ذرات خاک با مواد آلاینده است، معرفی کرد. مقدار این شاخص برای شن و ماسه در محدودهٔ ۰/۱-۰/۰۱ و برای خاک‌های رسی در محدودهٔ ۰/۹- ۰/۶ است. براساس محدودهٔ مقادیر، خاک‌های رسی به دلیل دارا بودن ذرات باردار و سطح ویژهٔ زیاد ذرات، بیشترین واکنش را با مواد آلاینده نسبت به خاک‌های دانه‌ای از خود نشان می‌دهند. بنابراین مواد آلاینده بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌های رسی تأثیرگذار می‌باشند.

حدود آتربرگ خاک‌های آلوده شده با مواد آلی نفتی نسبت به خاک طبیعی تغییر می‌یابد به‌گونه‌ای‌که این تغییرات بستگی به نوع خاک و آلاینده دارد. کایا[۲]و فانگ [۴]، اسریدهاران[۳]و همکاران [۵] و فورمن[۴]و دانییل[۵] [۶] از آزمایش‌های خود نتیجه‌گیری نمودند که حد روانی خاک آلوده شده به آلاینده کاهش می‌یابد و این مقدار کاهش برای یک خاک مشخص بستگی به ثابت دی‌الکتریک مایع آلاینده دارد. الگان[۶]و ییلدیز[۷] [۷] گزارش نمودند که کاهش ثابت دی‌الکتریک و افزایش درصد وزنی آلاینده موجب کاهش حد روانی و شاخص خمیری آن می‌شود.

آل‌سند[۸] و همکاران [۸] از انجام آزمایشات تراکم روی نمونه‌های ماسه آلوده‌شده با درصدهای مختلف نفت خام نتیجه‌گیری نمودند که در درصدهای کم از آلاینده (حدود ۲٪ و ۴٪) نسبت به خاک طبیعی، وزن واحد حجم خشک بیشینه افزایش و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد ولیکن این تغییرات با افزایش درصد آلاینده کاهش می‌یابد. سینگ[۹]و همکاران [۹] آزمایشات تراکمی استاندارد را روی نمونه‌هایی از خاک CH و CL آلوده شده با روغن موتور استفاده شده با درصدهای گوناگون انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که افزودن آلاینده ذکرشده موجب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه می‌شود.

پژوهشگرانی از قبیل لد[۱۰]و مارتین[۱۱] [۱۰]، مور[۱۲]و میشل[۱۳] [۱۱] و ایوانس[۱۴]و همکاران [۱۲] در پژوهش‌های خود در مورد خاک‌های ماسه‌ای آلوده به مواد هیدروکربنی نفتی نتیجه‌گیری نمودند که تغییراتی در مقاومت آنها صورت نمی‌گیرد. لیکن اسریدهاران و رائو[۱۵] [۱۳]، [۱۴] گزارش نمودند که مقاومت خاک‌های دانه‌ای آلوده به مواد نفتی نسبت به خاک طبیعی افزایش می‌یابد و این مسئله را مربوط به کاهش در ثابت دی‌الکتریک آن‌ها دانستند. آل‌سند و همکاران [۸] اقدام به انجام آزمایشات سه‌محوری روی نمونه خاک‌های ماسه‌ای آلوده به مواد نفتی نمودند و به این نتیجه رسیدند

---

۱ Fang
۲ Kaya
۳ Sridharan
۴ Foreman
۵ Daniel
۶ Olgun
۷ Yildiz
۸ Al-Sanad
۹ Singh
۱۰ Ladd
۱۱ Martin
۱۲ Moore
۱۳ Mitchell
۱۴ Evans
۱۵ Rao

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

که زاویهٔ اصطکاک آنها در مقایسه با نمونه‌های غیرآلوده به اندازه ۲ درجه کاهش می‌یابد. راتناورا[۱]و میگودا[۲] [۱۵] از آزمایش‌های تک‌محوری روی نمونه‌های خاک رسی با خاصیت خمیرایی کم و زیاد که آلوده به گلیسرول بودند چنین نتیجه‌گیری نمودند که مقاومت خاک با افزودن گلیسرول به آن کاهش می‌یابد. سینگ و همکاران [۹] نیز از آزمایشات خود روی نمونه‌های خاک رسی دریافتند که افزودن آلوده‌کننده‌های هیدروکربنی موجب کاهش پارامترهای مقاومتی خاک می‌شود. خسروی[۳] و همکاران [۱۶] آزمایشات برش مستقیم و تک‌محوری متعددی را روی نمونه‌های خاک رسی آلوده به درصدهای گوناگون گازوئیل انجام دادند و نتیجه‌گیری نمودند که اثر آلوده‌کننده یادشده موجب افزایش چسبندگی و کاهش زاویه اصطکاک پوش مقاومتی خاک می‌شود. استبرق[۴]و همکاران [۱۷] با انجام آزمایشات سه‌محوری روی یک نمونه خاک رسی آلوده به گلیسرول و یا اتانول به این نتیجه نائل شدند که زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک آلوده نسبت به غیرآلوده افزایش می‌یابد و این افزایش تابعی از نوع آلاینده و غلظت آن است. پژوهشگرانی از قبیل بابالار و همکاران [۱۸]، رجبی و شریف‌پور [۱۹] و قدیانی و همکاران [۲۰] اثر گازوئیل و نفت خام را بر خواص مکانیکی خاک رسی و مدول الاستیک یک خاک ماسه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آنها نتیجه‌گیری نمودند که خواص خاک تحت تأثیر این آلاینده‌ها قرار می‌گیرد و پارامترهای مربوطه تغییر می‌کند.

بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که ویژگی‌ها و رفتار خاک‌های آلوده به مواد هیدروکربنی نفتی مشابه خاک‌های طبیعی نمی‌باشد. استفاده از این خاک‌ها در صورتی که امکان انتقال آلایندهٔ موجود در آنها به منابع آب زیرزمینی امکان‌پذیر نباشد و نیز مسائل زیست‌محیطی را موجب نشود، در پروژه‌های عمرانی امکان‌پذیر است از طرفی افزایش ضریب اطمینان سازه‌های ذخیرهٔ مواد نفتی که امکان دارد در زمان بهره‌برداری پدیدهٔ نشت در آنها به وجود آید، ایجاب می‌نماید که شناخت کافی از خواص این خاک‌ها به دست آید. پژوهش‌های قبلی انجام شده بیشتر متمرکز بر استفاده از محلول‌های مختلف آلاینده‌ها و اثرات آنها بر پارامترهای مقاومتی خاک می‌باشد. در این پژوهش، از مواد آلاینده به صورت خالص در درصدهای مختلف جهت آلوده‌سازی خاک استفاده شد و علاوه بر اثر آنها بر مقاومت خاک، تغییرات حدود آتربرگ، پتانسیل تورمی، پارامترهای تراکمی، تحکیم و سی‌بی‌آر برای یک نمونه، خاک رسی با خاصیت خمیرایی پایین (CL) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این تحقیق خاک، گلیسرول و استون می‌باشند که در زیر به مشخصات آنها پرداخته می‌شود.

خاک

در این کار پژوهشی، یک خاک رسی مورد استفاده قرار گرفت. خاک انتخاب‌شده از یکی از تهیه‌کنندگان محلی تأمین شد. براساس اطلاعات داده شده توسط نامبرده، خاک مذکور از اطراف کرج (اشتهارد) تهیه شده بود. نتایج آزمایش دانه‌بندی این خاک مطابق با استاندارد ASTM-D422 نشان داد که این خاک دارای ۱۵/۳٪ ماسه، ۵۹/۳٪ سیلت و ۲۵/۴٪ رس است. همچنین حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری آن به ترتیب برابر ۴۱٪ ، ۲۱٪ و ۲۰٪ اندازه‌گیری

[۱] Ratnaweera
[۲] Meegoda
[۳] Khosravi
[۴] Estabragh

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

شدند. مطابق طبقه‌بندی یونیفاید[۱]، این خاک از نوع CL (رس با خاصیت خمیرایی کم) طبقه‌بندی شد. نتایج آزمایش تراکم استاندارد نیز نشان داد که وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه آن به ترتیب معادل ۱۷/۶ kN/m^3 و ۱۸/۲٪ می‌باشد. از سوی دیگر، مقدار درصد تورم آزاد اندازه‌گیری‌شده این خاک معادل ۸/۶٪ محاسبه شد که مطابق طبقه‌بندی مکین[۲] [۲۱]، خاک با پتانسیل تورمی کم است. همچنین مشخصات شیمیایی اندازه‌گیری شده این خاک در جدول (۱) آورده شده است.

جدول۱. مشخصات شیمیایی خاک مورد استفاده

مشخصه	مقدار
اسیدیته، pH	۸/۴
هدایت الکتریکی، EC (dS/m)	۶/۴۲
Na^+ (meq/L)	۳۲/۸
K^+ (meq/L)	۳/۴
Ca^{+2} (meq/L)	۱۷/۹
Mg^{+2} (meq/L)	۱۵/۲
Cl^- (meq/L)	۳۲/۸
CO_3^{-2} (meq/L)	۰
HCO_3^{-2} (meq/L)	۳/۱
SO_4^{-2} (meq/L)	۳۲/۵

گلیسرول و استون

در این کار پژوهشی از گلیسرول و استون برای آلوده ساختن خاک استفاده شد. گلیسرول به صورت گسترده در صنایع شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاربرد مهم آن در صنایع داروسازی و تولید مواد شوینده است. علت انتخاب گلیسرول، قابلیت انحلال در آب، نقطهٔ جوش و لزوجت بالا نسبت به آب است. با توجه به ویژگی‌های ذکر شده، این ماده به آسانی می‌تواند با خاک واکنش نشان دهد. بنابراین می‌تواند مایع مناسب برای ایجاد مایع منفذی و توزیع خوب لزوجت در فضای بین ذرات باشد [۱۵]. استون مادهٔ آلی است که قابلیت انحلال بسیار بالایی در آب دارد. در صنایع به عنوان یک حلال برای مواد پلیمری و پلاستیکی کاربرد دارد. از طرفی این ماده در زباله‌های صنعتی و شهری نیز تولید می‌شود [۲۲]. بیشتر استونی که وارد محیط‌زیست می‌شود دارای منشا صنعتی است. استون می‌تواند در خاک نفوذ کند و روی ویژگی‌های آن اثر بگذارد. در نتیجه به عنوان مادهٔ دیگری از آلایندهٔ مورد استفاده، انتخاب شد. معمولاً در مناطقی که صنایع مرتبط با این مواد آلی وجود دارد، احتمال آلودگی خاک آن نواحی به این مواد زیاد است. از طرفی با وقوع حادثه‌ای در حین انتقال این مواد از محل تولید به محل مصرف نیز ممکن است خاک آلوده شود. در هر حالت شناسایی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک آلوده به این آلاینده‌ها قبل از کاربرد در هر نوع پروژهٔ عمرانی ضروری است. مواد شیمیایی انتخاب شده (گلیسرول و استون) از مجتمع شیمیایی یکتا (Yekta Chemical Complex) خریداری شد. درجهٔ خلوص آنها بیش از ۹۸٪ است. براساس اطلاعات اخذ شده از تولیدکننده مذکور، مشخصات فیزیکی و شیمیایی آنها در

[۱] Unified Soil Classification System(USCU)

[۲] McKeen

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

جدول (۲) نشان داده شده است. در این کار پژوهشی از گلسیرول و استون خالص استفاده شد. مواد مذکور محلول در آب و غیرسمی می‌باشند. همان‌گونه که در جدول (۲) ملاحظه می‌شود، ثابت دی‌الکتریک این دو ماده با یکدیگر تفاوت زیادی دارد. بنابراین بررسی ویژگی‌های ایجاد شده ناشی از عمل متقابل آنها با خاک و مقایسهٔ این تغییرات با آب به عنوان مایع منفذی که دارای ثابت دی‌الکتریک (۸۰) است، امکان‌پذیر می‌باشد.

جدول۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی گلیسرول و استون

مشخصات	گلیسرول	استون
فرمول شیمیایی	$C_3H_5(OH)_3$	$(CH_3)_2CO$
نقطهٔ ذوب (^{o}C)	۱۷/۸	۹۳- تا ۹۵-
نقطهٔ جوش (^{o}C)	۲۹۰	۵۷ تا ۵۶
حلالیت در آب	حلالیت دارد	حلالیت دارد
لزجت (گرانروی) (Pa.s)	۱/۴۱۲	۰/۰۰۰۳
ثابت دی‌الکتریک (در دمای $۲۵^{o}C$)	۴۲/۵	۲۰/۷

تهیهٔ نمونه‌های آزمایشی

آزمایشات گوناگونی شامل حدود آتربرگ، تراکم، پتانسیل تورمی، مقاومت تک‌محوری، سی‌بی‌آر (CBR) و تحکیم مطابق استاندارد ASTM روی نمونه‌هایی از خاک طبیعی و خاک آلوده شده با گلیسرول (۱۰، ۱۵ و۲۰ درصد) و استون (۱۰، ۱۵ و۲۰ درصد) صورت گرفت. پینکوس و همکاران [۲۳] بیان نمود که خاک آلوده‌شده به مواد آلایندهٔ آلی نفتی، زمانی خاک آلوده تلقی می‌شود که درصد آلودگی آن بیش از ۳٪ وزنی باشد. در این کار پژوهشی حد بالای آلودگی، ۲۰٪ انتخاب شد که علت انتخاب آن به ساخت نمونه برمی‌گردد. براساس آزمایش‌های انجام شده، امکان ساخت نمونه با بیش از ۲۰٪ آلودگی به علت روغنی شدن و ایجاد حالت خمیری زیاد در نمونه، امکان‌پذیر نبود. بنابراین ۲۰٪ به عنوان حد بالای آلودگی در نظر گرفته شد و برای بررسی تغییرات درصد گلیسرول با ویژگی‌های خاک، درصدهای ۱۰ و ۱۵ نیز در نظر گرفته شد. برای تهیهٔ خاک آلوده به گلیسرول یا استون با درصدهای یاد شده، حدود ۶ کیلوگرم خاک خشک تهیه و با درصدهای وزنی انتخاب شده از مواد آلاینده مخلوط شد و سپس هر نمونهٔ خاک آلوده در درون کیسهٔ پلاستیکی مسدود شده‌ای به مدت یک هفته جهت انجام واکنش‌های شیمیایی لازم نگهداری شد [۱]. لازم به ذکر است که عمل اختلاط خاک و استون در یک ظرف پوشیده از نایلون جهت جلوگیری از تبخیر شدن و نیز تهیهٔ یک خاک یکنواخت صورت پذیرفت. پس از سپری شدن این مدت، آزمایش‌هایی مانند حدود آتربرگ، تراکم و سی‌بی‌آر روی آنها صورت پذیرفت. جهت انجام آزمایشات تعیین پتانسیل تورمی، مقاومت و تحکیم احتیاج به ساخت نمونه مناسب از خاک طبیعی و خاک آلوده شده با گلیسرول و یا استون است. برای تهیهٔ نمونه‌های مورد نیاز از قالب‌های ویژه در آزمایشگاه استفاده شد. قالب تهیهٔ نمونه برای آزمایش تحکیم و تورم از سه بخش تشکیل شده که ابعاد بخش میانی آن دقیقاً مطابق قالب دستگاه تحکیم می‌باشد که جزئیات قالب گفته شده توسط استبرق و همکاران [۲۴] بیان شده است. قالب تهیهٔ نمونه های مقاومتی نیز از سه بخش تشکیل شده که بخش میانی آن دارای قطر۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر بوده به طوری که نمونهٔ مورد استفاده دارای ابعاد یاد شده است [۲۵]. در قالب‌های مذکور نمونه‌هایی از خاک طبیعی و یا خاک آلوده‌شده به گلیسرول و یا استون، به روش تراکم استاتیکی در سه لایه به وسیلهٔ یک دستگاه بارگذاری محوری با سرعت ۱/۵ mm/min تهیه شد. رطوبت نمونه‌های مورد نظر، رطوبت بهینهٔ حاصل از آزمایش تراکم استاندارد بوده و بار وارده به هر لایه طوری اعمال شد که وزن واحد حجم خشک بیشینه حاصل از منحنی تراکم مربوطه در آنها حاصل شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

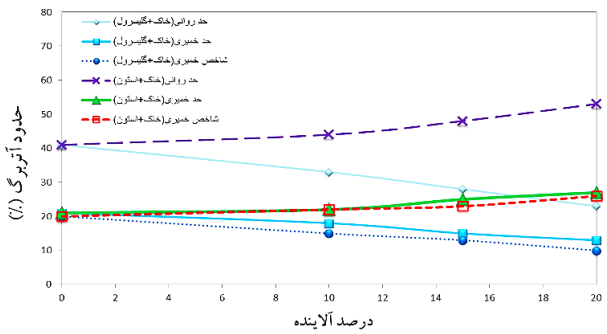
بنابراین نمونه‌های تهیه شده به روش فوق برای آزمایش تورم و تحکیم دارای قطر ۷۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲ سانتی‌متر و نمونه‌های آزمایش تک‌محوری دارای قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر بودند.

روش آزمایش

کلیه آزمایش‌های موردنظر (حدود آتربرگ، تراکم، پتانسیل تورمی و غیره) در این پژوهش مطابق استاندارد ASTM انجام شدند. در آزمایشات تک‌محوری تعیین مقاومت نمونه موردنظر با اعمال بار با سرعت mm/min ۱ توسط یک دستگاه بارگذاری بر نمونه صورت پذیرفت. در هنگام بارگذاری مقدار نیروی اعمال شده و نیز تغییرشکل حادث شده در نمونه به طور مداوم قرائت و ثبت شد و انجام آزمایش تا گسیختگی کامل نمونه ادامه یافت. در آزمایش‌ها تورم آزاد میزان درصد تورم (S) در هر زمان از رابطهٔ $(\frac{\Delta h}{h_i}) \times 100$ تعیین شد که در آن h_i ارتفاع اولیهٔ نمونه و Δh افزایش ارتفاع نمونه در فواصل زمانی مختلف است. آزمایش تورم آزاد روی نمونه‌ها تا زمانی ادامه یافت که مقدار S به عدد ثابتی رسید. در آزمایشات تحکیم، بارگذاری روی نمونه‌های مورد آزمایش تا زمانی ادامه داده شد که تحکیم بکر یا نرمال در نمونه‌ها ایجاد شود و پس از آن عمل باربرداری انجام شد. آزمایش سی‌بی‌آر نیز روی نمونه‌هایی از خاک طبیعی و خاک آلوده به گلیسرول و استون با درصدهای مختلف براساس استاندارد ASTM انجام شد. سپس از روی منحنی تنش-نفوذ، مقدار تنش لازم برای نفوذ سنبه به اندازهٔ ۲/۵ و ۵ میلی‌متر تعیین شد که در محاسبهٔ عدد سی‌بی‌آر مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج

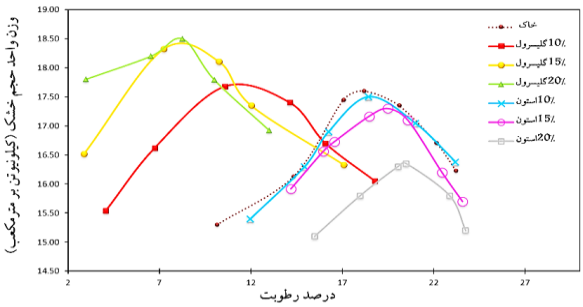
شکل (۱) نتایج آزمایش‌های حدود آتربرگ (حد روانی، خمیری و شاخص خمیری) را برای دو نوع آلایندهٔ (گلیسرول و استون) در درصدهای وزنی گوناگون نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشهود است، افزودن گلیسرول در درصدهای گوناگون موجب کاهش حدود آتربرگ نسبت به خاک طبیعی می‌شود. به طور مثال افزودن ۲۰٪ گلیسرول موجب کاهش ۴۳/۹٪ حد روانی، ۳۸/۱٪ حد خمیری و ۵۰٪ شاخص خمیری نسبت به خاک طبیعی شده است. نتایج مربوط به خاک اختلاط یافته با استون، عکس نتایج یاد شده را نشان داده به طوری که افزودن استون موجب افزایش حدود آتربرگ شده است مثلاً در ۲۰٪ استون مقادیر حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری به ترتیب به میزان ۱۲، ۶ و ۶ واحد نسبت به خاک طبیعی افزایش می‌یابد.



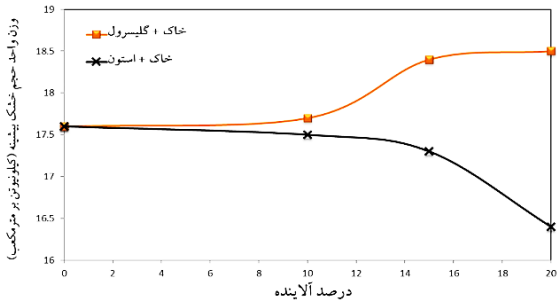
شکل۱. نتایج حدود آتربرگ خاک با درصدهای گوناگون دو مادهٔ آلایندهٔ گلیسرول و استون

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

منحنی‌های تراکمی استاندارد خاک طبیعی به همراه منحنی‌های تراکمی استاندارد خاک آلوده با درصدهای وزنی گوناگون آلاینده‌های گلیسرول و استون در شکل (۲) آورده شده است. براساس این شکل با افزایش مقدار گلیسرول، منحنی تراکمی به سمت چپ و بالای خاک طبیعی انتقال پیدا کرده است. به عبارت دیگر با افزودن گلیسرول به خاک، وزن واحد حجم خشک خاک افزایش و رطوبت بهینه کاهش یافته است. افزودن استون به خاک سبب جابه‌جایی منحنی تراکمی به سمت راست و پایین خاک طبیعی (کاهش وزن واحد حجم خشک خاک و افزایش رطوبت بهینه) می‌شود. همچنین پارامترهای تراکم (وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه) از منحنی‌های تراکمی مربوطه (شکل (۲)) استخراج و تغییرات نتایج حاصله با درصدهای گوناگون گلیسرول و استون در شکل‌های (۳-الف) و(۳-ب) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌کنید اثر این دو آلاینده بر این پارامترها کاملاً متفاوت است. به عنوان مثال در ۲۰٪ گلیسرول رطوبت بهینه از ۱۸/۲٪ (خاک طبیعی) به ۸٪ و وزن واحد حجم بیشینه از $17/6\ kN/m^3$ (خاک طبیعی) به $18/5\ kN/m^3$ تغییر یافته که درصد کاهش و افزایش آن به ترتیب معادل ۵۶/۰۴٪ و ۵/۱٪ می‌باشد. این پارامترها برای خاک اختلاط یافته با ۱۰و ۲۰٪ استون به ترتیب برابر۱۸/۴۵٪ و$17/5\ kN/m^3$ و ۲۰/۵٪ و $16/4\ kN/m^3$ تغییر می‌یابند. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشهود است (شکل‌های (۳)) افزودن بیشتر درصد گلیسرول و یا استون موجب تغییرات بیشتری در مقادیر وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه می‌شود.

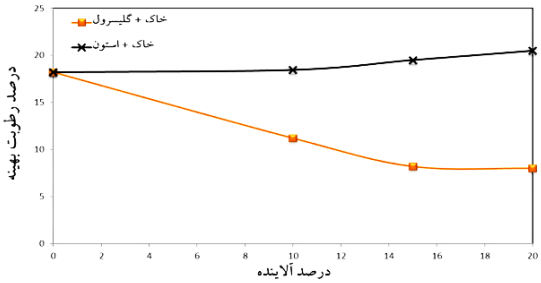


شکل۲.منحنی‌های تراکمی استاندارد خاک آلوده‌شده با درصدهای وزنی گوناگون دو مادهٔ آلایندهٔ گلیسرول و استون



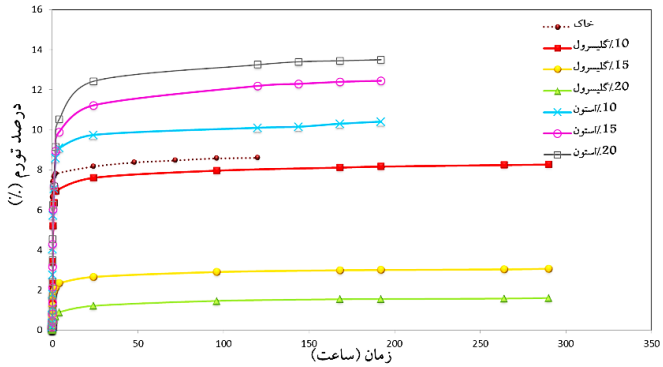
شکل۳. الف-نتایج وزن واحد حجم خشک بیشینه برای درصدهای گوناگون دو مادهٔ آلایندهٔ گلیسرول و استون

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]



شکل۳.ب-نتایج درصد رطوبت بهینه برای درصدهای گوناگون دو ماده آلاینده گلیسرول و استون

تغییرات میزان تورم خاک طبیعی و خاک اختلاط‌یافته با درصدهای گوناگون گلیسرول و یا استون با زمان در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود موقعیت منحنی‌های تورمی نسبت به خاک طبیعی و یکدیگر بستگی به نوع آلاینده و درصد آن دارد. اگر منحنی تورمی خاک طبیعی در این شکل به عنوان یک مرز تلقی شود، منحنی‌های تورمی خاک آلوده به گلیسرول و خاک آلوده به استون در بخش تحتانی و فوقانی آن قرار دارد. در این شکل مشاهده می‌شود که منحنی‌های تورمی مربوط به گلیسرول با افزایش درصد آن روند نزولی، ولیکن منحنی‌های مربوط به استون سیر صعودی از خود نشان می‌دهند. نتایج به دست آمده نیز نشان دادند که نرخ تورم برای کل نمونه‌ها از زمان استقرار تا ۲۴ ساعت پس از آن دارای تغییرات افزایشی زیادی بوده، ولیکن پس از آن نرخ تغییرات زیاد نمی‌باشد. این تغییرات پس از سپری شدن مدت زمان ۲۹۰ و ۱۹۲ ساعت برای نمونه‌های گلیسرول و استون تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد که آن را به عنوان درصد تورم نهایی در نظر گرفته شده است.

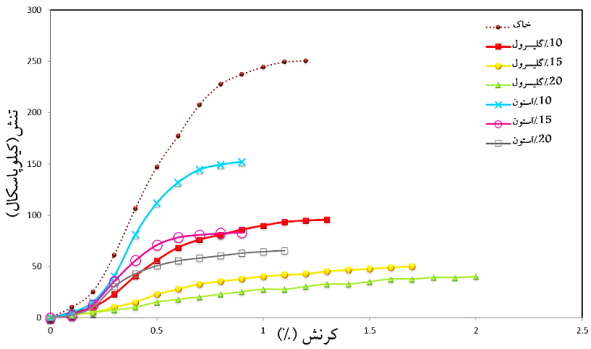


شکل۴. نتایج آزمایش تورم آزاد خاک طبیعی و خاک اختلاط‌یافته با درصدهای گوناگون گلیسرول و استون

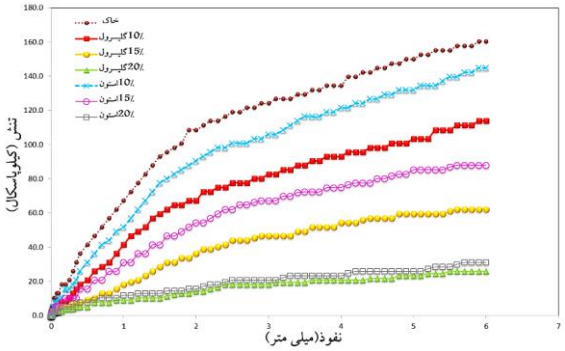
شکل‌های (۵) و (۶) نتایج آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری و سی‌بی‌آر را برای خاک طبیعی و خاک اختلاط‌یافته با درصدهای گوناگون گلیسرول و استون نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزودن گلیسرول و یا استون به خاک مورد استفاده موجب کاهش مقاومت آن می‌شود به طوری که برای خاک آلوده‌یافته با ۲۰٪ گلیسرول و یا استون مقاومت نهایی خاک طبیعی از ۲۵۱ کیلوپاسکال به ترتیب به مقادیر ۴۰ و ۶۶ کیلوپاسکال می‌رسد که نشان‌دهندهٔ کاهش معادل ۸۴/۱ و ۷۳/۷ درصد نسبت به خاک طبیعی است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش مقاومت وابسته به نوع و درصد آلاینده است به طوری که افزایش بیشتر آلاینده موجب کاهش بیشتر آن می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، ترتیب قرار گرفتن منحنی‌های تنش- کرنش نسبت به خاک طبیعی متناسب با درصد آلاینده است. مقایسهٔ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

نتایج مقاومتی دو آلاینده نیز نشان می‌دهد که کاهش مقاومت برای خاک آلوده‌شده به گلیسرول بیشتر از استون است. مشابه همین روند تغییرات در شکل (۶) برای منحنی‌های سی‌بی‌آر نیز قابل مشاهده می‌باشد. نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد که تنش لازم برای نفوذ سنبه استاندارد دستگاه سی‌بی‌آر به اندازه ۲/۵ میلی‌متر در خاک طبیعی و آلوده متراکم شده به گلیسرول در درصدهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ به ترتیب برابر ۱۱۸/۸، ۷۷/۵، ۴۴ و ۱۸ کیلوپاسکال می‌باشد. نتایج شکل (۶) نیز نشان می‌دهد که با افزایش درصد آلودگی، میزان تنش لازم برای نفوذ کاهش می‌یابد. مشابه این تغییرات در شکل برای استون نیز قابل مشاهده است.



شکل۵. نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری خاک طبیعی و خاک اختلاط‌یافته با درصدهای گوناگون گلیسرول و استون

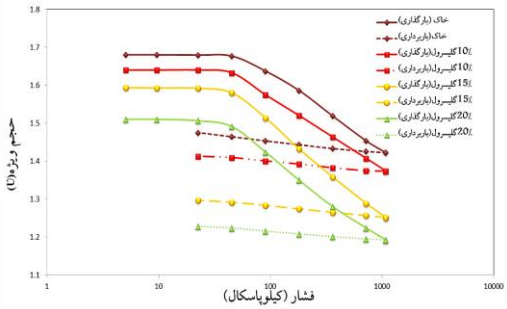


شکل۶. نتایج آزمایش سی‌بی‌آر خاک طبیعی و خاک اختلاط‌یافته با درصدهای گوناگون گلیسرول و استون

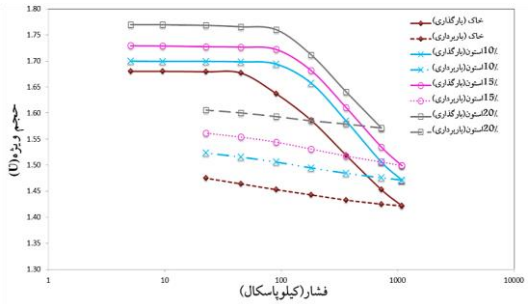
نتایج آزمایش‌های تحکیم شامل تغییرات حجم ویژه (υ =1+e) با بار اعمال شده (P) درحین بارگذاری و باربرداری برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با هر دو نوع آلاینده در درصدهای گوناگون به صورت υ:logP' در شکل‌های (۷) و (۸) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش بارگذاری روی نمونه‌ها موجب رسیدن آنها به وضعیت بکر (تحکیم‌یافته عادی) می‌شود. ترتیب قرار گرفتن منحنی‌های مذکور نسبت به خاک طبیعی برای خاک اختلاط یافته با گلیسرول و استون یکسان نمی‌باشد. به‌گونه‌ای که نمونه‌های آلوده شده با گلیسرول دارای تغییرات حجم ویژه کمتری نسبت به خاک طبیعی بوده ولیکن نمونه‌های حاوی استون عکس این حالت را دارا هستند. فشار پیش‌تحکیمی (P_c) برای خاک طبیعی و خاک آلوده شده با گلیسرول ۴۵ کیلوپاسکال و برای خاک‌های حاوی استون ۵۸ کیلوپاسکال تعیین شده است. نشانهٔ فشردگی (C_c) شیب منحنی بکر و نشانهٔ تورم (C_s) شیب منحنی باربرداری می‌باشند که برای نمونه های گوناگون تعیین شده‌اند. مقدار C_c و C_s برای خاک طبیعی به ترتیب ۰/۲ و ۰/۰۳۲ محاسبه شد. این مقادیر به طور

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

میانگین برای درصدهای گوناگون خاک آلوده شده با گلیسرول به ترتیب تقریباً ۰/۲۱ و ۰/۰۲۵ است. این مقادیر (C_c و C_s) برای خاک آلوده یافته با استون به ترتیب معادل ۰/۲۱ و ۰/۰۳۱ تعیین شده است.



شکل۷. نتایج آزمایش تحکیم شامل تغییرات حجم ویژه با بار اعمال شده در حین بارگذاری و باربرداری برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با گلیسرول

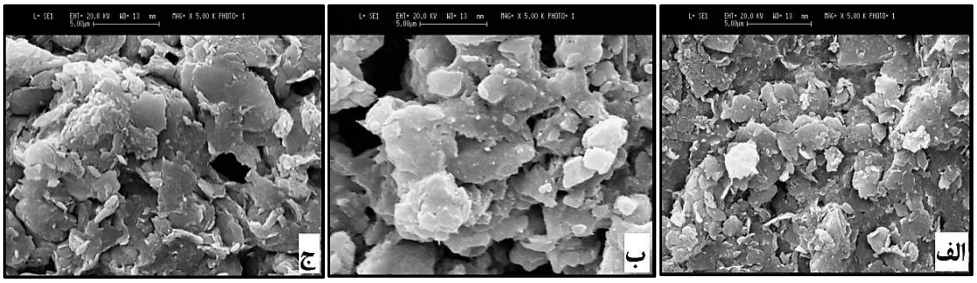


شکل۸. نتایج آزمایش تحکیم شامل تغییرات حجم ویژه با بار اعمال شده در حین بارگذاری و باربرداری برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با استون

به منظور بررسی میکروساختار ذرات خاک رسی موردنظر و نیز بررسی تغییرات ساختاری ناشی از آلوده شدن این نمونهٔ خاک با آلاینده‌های گلیسرول و یا استون، اقدام به گرفتن عکس SEM[1] از نمونه‌های خاک در حالت طبیعی و آلوده شده با ۱۵٪ وزنی گلیسرول و یا استون شد. در شکل‌های (۹-الف، ۹-ب و ۹-ج) به ترتیب میکروساختار نمونه‌های خاک طبیعی و اختلاط یافته با گلیسرول و استون قابل مشاهده می‌باشند. همان‌گونه که از شکل (۹-الف) مشخص است میکروساختار خاک طبیعی، بافت و ذراتی نسبتاً دانه‌ای و منفرد و نیز ساختمانی فلوکوله دارد که با توجه به شکل (۹-ب)، با آلوده شدن خاک با ۱۵٪ گلیسرول درجه فلوکولاسیون ذرات خاک بیشتر شده است. این درحالی است که افزودن ۱۵٪ استون به خاک، پیوند موجود بین ذرات خاک را از بین برده و آنها را به ذرات ریز و تقریباً لایه‌لایه و موازی تبدیل کرده است (شکل۹-ج).

[1] Scanning Electron Microscopy

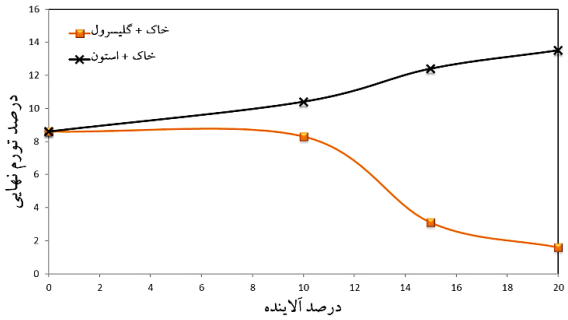
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]



شکل۹. نتایج SEM، الف-خاک طبیعی، ب-خاک آلوده‌شده با ۱۵٪ گلیسرول، ج-خاک آلوده‌شده با ۱۵٪ استون

بحث

نتایج نهایی آزمایشات حدود آتربرگ، تراکم، تورم (شکل‌های شمارهٔ ۱، ۳ و ۴) نشان دادند که افزودن گلیسرول موجب کاهش حدود آتربرگ، پتانسیل تورم و نیز تغییر مقادیر پارامترهای تراکمی (افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه) می‌شود، لیکن استون اختلاط‌یافته با خاک موجب عکس نتایج مذکور می‌شود. از نتایج نشان داده شده در شکل (۴)، مقادیر تورم نهایی (مقادیر ثابت شده درصد تورم) برای خاک طبیعی و خاک آلوده‌یافته با درصدهای مختلف گلیسرول و استون تعیین شده و تغییرات آنها با درصدهای مختلف آلاینده‌ها در شکل (۱۰) ارائه شده است. از شکل مذکور می‌توان نتیجه گرفت که افزودن گلیسرول موجب کاهش تورم نهایی خاک نسبت به خاک طبیعی می‌شود. درحالی که افزودن استون موجب افزایش پتانسیل تورمی نهایی خاک می‌شود. به طور مثال در ۲۰٪ گلیسرول مقدار درصد تورم از ۸/۶٪ (برای خاک طبیعی) به ۱/۶٪ رسیده درحالی‌که در همان درصد از استون مقدار آن به ۱۳/۵٪ رسیده است. بنابراین نتایج نشان می‌دهند که تغییرات میزان پتانسیل تورمی و درصد تورم نهایی تابعی از نوع و درصد آلاینده است.



شکل۱۰.نتایج درصد تورم نهایی برای درصدهای گوناگون دو ماده آلاینده گلیسرول و استون

به منظور تجزیه و تحلیل این نتایج می‌بایست به بررسی ساختار خاک‌های رسی پرداخته شود. سطوح ذرات رس خاک دارای بار منفی بوده که قادر به جذب کاتیون‌ها با نیروی بسیار زیادی هستند. افزودن آب به خاک رسی موجب قرار گرفتن یون‌ها در محلول آب و خاک می‌شوند، به طوری که غلظت آنها در مجاورت ذرات رسی زیاد بوده و با افزایش فاصله از سطح رس این غلظت کاهش می‌یابد. این مجموعه متشکل از آب و ذرات باردار که اطراف ذرات رس را احاطه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

کرده‌اند را تحت عنوان لایه مضاعف می‌نامند[۱]. ضخامت این لایه به عوامل گوناگونی مانند درجهٔ حرارت، ثابت دی-الکتریک، غلظت الکترولیت و غیره بستگی دارد. تغییر در ضخامت این لایه منجر به تشکیل ساختمان‌های مختلفی ازخاک رسی، تحت عنوان پراکنده[۲]و یا فلوکوله می‌شود. کاهش ضخامت لایهٔ مضاعف موجب افزایش نیروی جاذبه بین ذرات و چسبیدن ذرات به یکدیگر و تشکیل ساختمان فلوکوله می‌شود. تغییر در کیفیت شیمیایی مایع بین ذرات موجب تغییر در ضخامت لایه مضاعف و پیدایش ساختمان جدید در خاک می‌شود. گلیسرول دارای ثابت دی‌الکتریک ۴۲/۵ که در حدود نصف ثابت دی‌الکتریک آب (۸۰) است، می‌باشد. لذا در خاک حاوی گلیسرول به دلیل کاهش ثابت دی‌الکتریک، ضخامت لایهٔ مضاعف کاهش یافته و درنتیجه موجب چسبیدن ذرات به یکدیگر و تشکیل ذرات درشت‌تر می‌شود که این تغییرات در شکل (۹-ب) میکروساختار خاک موردنظر حاوی گلیسرول مشهود است. این ذرات درشت‌تر تشکیل شده دارای سطح ویژه نسبتاً کمتری نسبت به حالت طبیعی است. این امر موجب کاهش ویژگی رسی و در نتیجه کاهش جذب آب توسط آنها می‌شود. این واکنش ایجاد شده موجب کاهش حدود آتربرگ و پتانسیل تورمی و نیز از طرفی تمایل به حالت دانه‌ای شدن موجب افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه می‌گردد. این یافته‌ها (تغییرات ناشی از افزودن گلیسرول بر حد روانی) با نتایج پژوهشگران دیگر مانند کایا و فانگ [۴] ، الگان و ییلدیز [۷] و استبرق و همکاران [۲۶] مطابقت دارند. کایا و فانگ [۴] آزمایشات مختلفی را روی خاک‌های رسی از نوع کائولینیت، بنتونیت و یک خاک رسی محلی با مایعات مختلف که دارای ثابت دی‌الکتریک متفاوت بودند، انجام دادند. آنها نتیجه-گیری نمودند که حدود آتربرگ از جمله حد روانی نسبت به ثابت دی‌الکتریک مایعی که به عنوان مایع منفذی به کار می‌رود، حساس است. آنها بیان نمودند که خاک در این شرایط تمایل به دانه‌ای شدن یا ساختار فلوکوله داشته و ثابت دی‌الکتریک مایع منفذی کاهش می‌یابد. الگان و ییلدیز [۷] به بررسی اثر مواد آلی از قبیل متانول، اتانول، ایزوپروپیل‌الکل و استیک‌اسید با درصدهای مختلف نسبت به آب به عنوان مایع منفذی بر خواص ژئوتکنیکی یک خاک رسی پرداختند. نتایج آزمایش حد روانی نمونه‌های خاک آلوده به این آلاینده‌ها نشان داد که حد روانی خاک آلوده در مقایسه با آب به عنوان مایع منفذی کاهش می‌یابد و این کاهش متناسب با درصد استفاده از آلاینده است. آنها بیان نمودند که این امر ناشی از تغییر ساختار خاک در ارتباط با تغییر در ثابت دی‌الکتریک مایع منفذی است. همچنین استبرق و همکاران [۲۶] بهسازی یک خاک آلوده به محلول گلیسرول در درصدهای مختلف (۳، ۶ و ۹٪) و با غلظت ۴۰٪ را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش حدود آتربرگ روی نمونه‌های آلوده به گلیسرول انجام شد و نتایج نشان داد که حدود آتربرگ نمونه‌های آلوده نسبت به خاک طبیعی کاهش می‌یابد و مقدار کاهش آن بستگی به درصد آلودگی خاک به گلیسرول دارد. نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج میگودا و راتناورا [۱] مطابقت ندارد. آنها در پژوهش خود از محلول گلیسرول، پروپانول و استون با غلظت‌های مختلف و نیز آب را جهت تعیین حدود آتربرگ مورد استفاده قرار دادند. حد روانی به دست آمده برای محلول‌های ذکر شده نسبت به آب معمولی روند افزایشی را نشان داد، ولیکن حد خمیری به صورت کاهشی گزارش شد. آنها بیان نمودند که در تعیین این پارامترها، اثر طولانی‌مدت در نظر گرفته شده که سبب بروز این نتایج شده است و پژوهشگران قبلی اثر کوتاه مدت را مدنظر قرار داده بودند. همچنین نتایج SEM (شکل (۹-

[۱] DDL

[۲] Disperse

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

ب)) با نتایج استبرق و همکاران [۲۶] مطابقت دارد. آنها دریافتند که ساختمان خاک آلوده به محلول گلیسرول، فلوکوله و دانه‌ای می‌شود.

در شکل‌های (۱، ۳، ۴ و ۱۰) مشاهده می‌شود که افزودن استون موجب افزایش حدود آتربرگ، پتانسیل تورمی و تغییر پارامترهای تراکمی (کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش درصد رطوبت بهینه) می‌شود. همان‌گونه که در جدول (۲) نشان داده شده است مقدار ثابت دی‌الکتریک استون ۲۰/۷ می‌باشد که تقریباً نصف ثابت دی‌الکتریک گلیسرول و یک چهارم ثابت دی‌الکتریک آب است. مطابق با تئوری فوق یعنی تغییر ساختار خاک براساس تغییرات ثابت دی‌الکتریک می‌بایست درجهٔ فلوکوله شدن و دانه‌ای شدن خاک افزایش و حدود آتربرگ و سایر ویژگی‌های فوق اندکی نسبت به گلیسرول کاهش یابند. لیکن نتایج عکس روند یاد شده را نشان می‌دهند. دلیل این مسأله را می‌توان این‌گونه بیان نمود که گلیسرول از گروه الکل‌ها محسوب می‌شود ولیکن استون از اکسیداسیون الکل‌ها حاصل می‌شود که دارای فرمول شمیایی CH_3COCH_3 است. از سوی دیگر استون در اثر عمل اکسیداسیون تحت تأثیر عواملی شامل pH محیط (اسیدی شدن)، باردار بودن ذرات و نیز وجود میکروارگانیسم‌ها در خاک، می‌تواند به دو مولکول اسید تبدیل شود (رابطهٔ ۱). از آن‌جایی که خاک موردنظر عاری از میکروارگانیسم‌ها بوده، در نتیجه می‌توان عامل مؤثر در اکسیداسیون استون را، pH محیط و باردار بودن ذرات خاک بیان کرد (یانگ[۱][۲]).

$$CH_3COCH_3 + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CH_3(COOH) + HCOOH \qquad (۱)$$

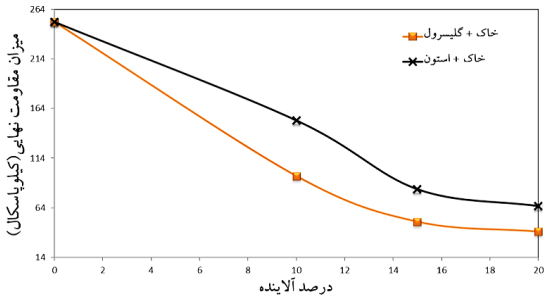
از طرفی در ساختار مولکولی استون، پیوند دوگانه بین اتم‌های کربن و اکسیژن، قطبی است. به عبارت دیگر تراکم الکترونی از اتم کربن به سوی اتم اکسیژن است که در نتیجه اتم اکسیژن بار جزئی منفی و اتم کربن بار جزئی مثبت می‌گیرند. در نتیجهٔ آن، مولکول‌های استون به سبب قطبی شدن می‌توانند با ذرات باردار رس، پیوند ایجاد نمایند. بنابراین با توجه به ویژگی‌های ذکر شده در رابطه با استون، افزودن آن موجب از بین رفتن پیوند موجود بین ذرات خاک و نیز تبدیل ذرات تودهٔ خاک رس به ذرات بسیار ریزتر می‌شود که این تغییرات را می‌توان در تصویر میکروساختار خاک مورد نظر آلوده به استون (شکل۹-ج) مشاهده کرد. چارترس[۲]و همکاران [۲۷] نیز با انجام آزمایشات پراش اشعهٔ ایکس (XRD) روی نمونه‌های رس آغشته به استون این امر را تأیید نمودند. بنابراین پیدایش ذرات بسیار ریز رس موجب افزایش سطح ویژه و افزایش خاصیت رسی توده خاک و جذب آب مخلوط یافته با استون می‌شود و در نتیجه افزایش حدود آتربرگ، پتانسیل تورمی و افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه حاصل از آزمایش تراکم را در پی خواهد داشت. افزایش بیشتر درصد استون موجب افزایش بیشتر تغییرات یاد شده می‌شود. این امر نشان می‌دهد وجود مقدار بیشتر استون در یک تودهٔ مشخص از خاک رسی موجب از بین رفتن پیوند بیشتری در بین ذرات و در نتیجه ایجاد ذرات ریزتر بیشتری می‌شود به طوری که تغییرات بیشتری را در پی خواهد داشت. همچین نمودار خمیری حاصله از آزمایش حدود آتربرگ (شکل(۱)) نشان داد که خاک اختلاط یافته با استون براساس طبقه‌بندی یونیفاید، دارای طبقه‌بندی CL و یا خاصیت خمیرایی بیشتری نسبت به حالت طبیعی خود می‌شود. درحالی‌که خاک آلوده شده با گلیسرول، خاصیت خمیرایی کمتری نسبت به حالت طبیعی خود شده است که در نتیجه می‌توان گفت گلیسرول موجب چسبیدن ذرات به یکدیگر و تشکیل ذرات درشت‌تر و دانه‌ای‌تر شدن خاک می‌شود (شکل ۹-ب) در

[۱] Yong
[۲] Chartres

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

حالی‌که استون موجب جدا شدن ذرات از هم و تشکیل ذرات ریزتری نسبت به حالت طبیعی می‌شود (شکل ۹-ج) که این تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک بسیار مؤثر هستند.

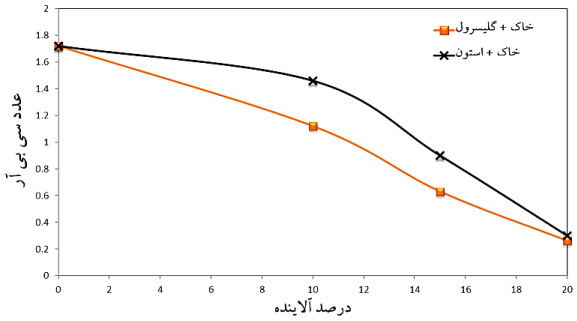
به عنوان مثال نتایج آزمایش مقاومت و سی‌بی‌آر (شکل‌های ۵ و ۶) نشان می‌دهند که افزایش گلیسرول و استون موجب کاهش مقاومت و عدد سی‌بی‌آر نسبت به خاک طبیعی شده است. شکل (۱۱) تغییرات مقادیر مقاومت نهایی نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده شده با درصدهای گوناگون گلیسرول و استون را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، مقاومت نهایی نمونهٔ خاک طبیعی ۲۵۱ کیلوپاسکال می‌باشد که افزودن ۱۰٪ گلیسرول و استون موجب می‌شود که مقاومت نهایی به ترتیب به میزان ۹۶ کیلوپاسکال و ۱۵۲ کیلوپاسکال برسد. این روند کاهش تغییرات مقاومت در درصدهای دیگر آلاینده‌ها نیز قابل مشاهده بوده ولیکن روند کاهشی مقاومت برای گلیسرول در درصدهای آزمایش شده بیشتر از استون می‌باشد. در رابطه با کاهش میزان مقاومت خاک آلوده یافته با گلیسرول، پژوهشگرانی مانند راتناورا و میگودا [۱۵] و استبرق و همکاران [۲۴] نیز به نتایج مشابه‌ای دست یافتند. این درحالی است که برخی از پژوهشگران از جمله اسریدهاران و رائو [۱۴] با افزودن آلاینده هیدروکربنی به خاک با افزایش مقاومت روبه‌رو شدند. روند تغییرات اعداد سی‌بی‌آر محاسبه شده برای درصدهای گوناگون از دو آلایندهٔ گلیسرول و استون در شکل (۱۲) آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، عدد سی‌بی‌آر برای هر دو آلاینده نسبت به خاک طبیعی کاهش یافته است ولیکن این کاهش تغییرات برای گلیسرول نسبت به استون بیشتر می‌باشد. مقدار عدد سی‌بی‌آر در ۱۰٪ آلاینده برای گلیسرول و استون به ترتیب برابر ۱/۱۲ و ۱/۴۶ بدست آمده که میزان کاهش آنها نسبت به خاک طبیعی با سی‌بی‌آر برابر ۱/۷۲، به ترتیب معادل ۳۴/۹٪ و ۱۵/۱٪ است. همچنین تفاوت اثر گلیسرول نسبت به استون در این درصد از آلودگی در خاک معادل ۰/۳۴ است. لیکن این تفاوت با افزایش درصد آلاینده کاهش می‌یابد به‌گونه‌ای که در ۲۰٪ آلودگی با گلیسرول و یا استون عدد سی‌بی‌آر به حدود ۰/۰۴ و تقریباً یکسان رسیده است. این نتایج به دست آمده با نتایج آل‌سند و همکاران [۸] از نقطه نظر کاهش ظرفیت باربری به ازاء درصدهای وزنی بالا از مادهٔ آلاینده مطابقت دارد.



شکل۱۱. نتایج مقاومت تک‌محوری نهایی برای درصدهای گوناگون دو مادهٔ آلایندهٔ گلیسرول و استون

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]



شکل۱۲. اعداد سی‌بی‌آر برای درصدهای گوناگون دو مادهٔ آلایندهٔ گلیسرول و استون

همان‌گونه که ذکر شد، تغییرات ضخامت لایهٔ مضاعف به جذر ثابت دی‌الکتریک مایع بین ذرات (مایع منفذی) بستگی دارد. بنابراین گلیسرول با ثابت دی‌الکتریکی کمتر از آب و یا به عبارتی درجه فلوکولاسیون بیشتر از آب، کاهش ضخامت لایهٔ مضاعف زیادتری را موجب می‌شود. بنابراین در این حالت مقاومت و عدد سی‌بی‌آر خاک می‌بایست بیشتر از نمونه‌ای با مایع منفذی آب که دارای ثابت دی‌الکتریکی حدود دو برابر گلیسرول است، شود. زیرا درجهٔ فلوکولاسیون خاک حاوی آلاینده بیشتر از نمونه‌های خاک حاوی مایع منفذی آب شده که در نهایت به دلیل بیشتر شدن اصطکاک بین ذرات خاک می‌بایست مقاومت خاک حاوی آلاینده افزایش یابد. لیکن علی‌رغم این فرضیه مقاومت نمونه‌های تهیه شده از خاک آلوده به گلیسرول از نمونهٔ خاک طبیعی کمتر شده است. از طرف دیگر نیز تغییرات کاهش مقاومت نمونه‌های حاوی استون در مقایسه با گلیسرول نسبت به خاک طبیعی نیز کمتر بوده است که دلیل این نتایج را می‌توان در وجود اختلاف لزجت گلیسرول، استون و آب دانست. به گونه‌ای که افزایش لزجت موجب سهولت جابه‌جایی ذرات و در نهایت کاهش مقاومت می‌شود [۱]. در نتیجه گلیسرول با لزجت ۱/۴۱۲ پاسکال- ثانیه، دارای لزجت بیشتر از آب بوده و همین امر منجر به کاهش مقاومت نمونه‌های حاوی آن شده است. از طرف دیگر لزجت استون (۰/۰۰۰۳ پاسکال-ثانیه) بسیار کمتر از گلیسرول و آب می‌باشد که در این حالت می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که افزودن استون موجب ریزدانه‌تر شدن بیشتر تودهٔ خاک و تبدیل ساختار خاک به صورت پراکنده گردیده (شکل ۹- ج) که به سبب آن که ذرات به صورت موازی با هم قرار گرفته‌اند که اصطکاک بین آنها نسبت به حالت فلوکوله کمتر بوده و در نتیجه مقاومت کاهش یافته است. بنابراین منحنی‌های تنش- کرنش (شکل شمارهٔ ۵) آن نسبت به خاک طبیعی در سطح پایین‌تری در صفحه تنش- کرنش قرار گرفته‌اند (کاهش مقاومت). ولیکن منحنی‌های تنش- کرنش مربوط به خاک آلوده با استون نسبت به نمونه‌های خاک حاوی گلیسرول در درصد ثابتی از آلاینده مقاومت بیشتری را دارا بودند که این تغییرات را می‌توان مرتبط با تفاوت لزجت استون و گلیسرول نسبت به هم دانست. موارد ذکر شده در تفسیر و بیان نتایج سی‌بی‌آر نیز صادق می‌باشند.

نتایج آزمایشات تحکیم برای خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با درصدهای گوناگون گلیسرول و استون در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. درمورد تحکیم خاک اختلاط یافته با گلیسرول (شکل شماره۷)، منحنی‌های تحکیم مربوطه پایین‌تر از منحنی تحکیم خاک طبیعی قرار گرفته و میزان نشانهٔ فشردگی (C_c) آنها کاهش یافته است که نشان‌دهندهٔ تراکم‌پذیری کمتر آنها نسبت به خاک طبیعی است. ولیکن منحنی‌های تحکیم یافته خاک اختلاط یافته با استون (شکل شمارهٔ ۸) در سطوح بالاتری نسبت به خاک طبیعی واقع شده‌اند و میزان نشانهٔ فشردگی (C_c) آنها افزایش پیدا کرده است که نشان‌دهندهٔ تراکم‌پذیری بیشتر آنها نسبت به خاک طبیعی می‌باشد. ترتیب قرارگرفتن منحنی‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

تحکیم در هر دو حالت متناسب با درصد آلودگی آنها می‌باشد. این تفاوت در موقعیت منحنی‌های تحکیم نسبت به خاک طبیعی را می‌توان مربوط به ساختار ایجاد شده در خاک در ارتباط با واکنش آلاینده‌ها دانست به گونه‌ای که استون موجب ایجاد ذرات بسیار ریز در توده خاک و افزایش نسبت تخلخل در آن می‌شود (شکل ۹-ج). همان‌طورکه قبلاً بیان شد ضرایب فشردگی (C_c) برای هر دو نوع آلاینده برای درصدهای مختلف آن تقریباً یکسان به دست آمده است. ولیکن ضرایب تورم (C_s) برای خاک اختلاط یافته با استون قدری بیشتر از خاک آلوده‌شده به گلیسرول است. فشار پیش-تحکیمی(P_c) نیز برای همهٔ نمونه‌ها در درصدهای گوناگون گلیسرول حدود ۴۵ کیلوپاسکال و در درصدهای مختلف استون حدود ۵۸ کیلوپاسکال می‌باشد که این یافته‌ها با نتایج ارائه شده توسط پژوهشگران دیگر مانند: میگودا و راتناورا [۱]، سینگ و همکاران [۲۸]، الگان و ییلدیز [۷]، دی-متئو[۱]و همکاران [۲۹] و استبرق و همکاران [۲۴] مطابقت ندارد که دلیل این عدم هماهنگی را می‌توان علاوه بر یکسان نبودن نوع خاک و آلاینده استفاده شده، تفاوت در نحوهٔ انجام آزمایش دانست به گونه‌ای که پژوهشگران فوق جهت مستغرق نمودن نمونه در آزمایش تحکیم از همان مایع آلاینده‌ای استفاده کردند که برای ساخت خاک آلوده نیز استفاده شده بود. ولیکن در این کار پژوهشی، استغراق نمونه‌ها با آب طبیعی انجام شده که در نتیجه موجب این تفاوت شده است.

همان‌طور که بیان شد، تغییر ضخامت لایهٔ مضاعف سبب تغییر در ساختار خاک و در نتیجه تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی آن می‌شود. عوامل مختلفی در این فرآیند تاثیرگذار می‌باشد که یکی از آنها ثابت دی‌الکتریک مایع منفذی است. کاهش آن موجب افزایش نیروهای جاذبه بین ذرات می‌شود که بهم چسبیدن ذرات و فلوکوله شدن ساختار خاک را در پی خواهد داشت. از طرفی هرچه مقدار مایع منفذی بیشتر باشد، خاصیت ذکر شده بیشتر می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های (۱، ۳، ۱۰، ۱۱و ۱۲) نشان داده شده است، افزایش درصد گلیسرول سبب تغییر در پارامترهای اندازه‌گیری شده نسبت به درصدهای کمتر آن می‌شود. گرچه در به وجود آمدن این پدیده ثابت دی‌الکتریک نقش مهمی دارد ولیکن نوع آلاینده و تغییرات آنها در برابر عوامل محیطی نیز در تغییر و پیدایش خواص جدید در خاک مؤثر است. به طوری که این خصوصیت در استون مشخص شد که روند تغییرات عکس اثر گلیسرول است. لیکن در مورد استون نیز افزایش مقدار آن در فضای بین ذرات سبب افزایش تغییرات می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر دو نوع آلاینده آلی گلیسرول و استون بر خواص فیزیکی و مکانیکی یک خاک رسی با خاصیت خمیرایی کم با انجام آزمایشات آزمایشگاهی مربوطه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد.

۱. هر دو آلایندهٔ گلیسرول و استون موجب بروز تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مانند حدود آتربرگ، تورم آزاد و پارامترهای تراکمی شدند. ولیکن این تغییرات به صورت عکس یکدیگر بوده به گونه‌ای که گلیسرول موجب دانه‌ای و فلوکوله شدن خاک و کاهش حدود آتربرگ و پتانسیل تورمی و نیز تغییر پارامترهای تراکمی شامل افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش درصد رطوبت بهینه خاک شده است. در حالی که استون موجب ریزدانه‌تر شدن و ساختمان پراکنده در خاک شده که در نتیجه تغییراتی خلاف تغییرات ایجاد شده در رابطه با گلیسرول را ایجاد نموده

[۱] Di-Matteo

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

است. علاوه بر این، این تغییرات تابعی از درصد وزنی آلاینده بودند به طوری‌که با افزایش درصد وزنی آلاینده به خاک، تغییرات بیشتری در خواص خاک ایجاد شد.

۲. کاهش مقاومت نهایی و سی‌بی‌آر برای خاک آلوده شده به هر دو مادهٔ آلایندهٔ (گلیسرول و استون) مشاهده شد ولیکن کاهش این پارامترها برای گلیسرول بیشتر از استون است.

۳. نتایج آزمایشات تحکیم نشان دادند که مقادیر ضریب فشردگی (C_c) و ضریب تورم (C_s) مستقل از درصد آلاینده می‌باشند.

۴. عکس‌های SEM حاکی از تغییر ساختمان خاک آلوده شده با هر دو ماده گلیسرول و استون نسبت به ساختمان خاک در حالت طبیعی بودند. به طوری که افزودن گلیسرول ساختمان خاک را فلوکوله نموده و استون موجب از بین رفتن پیوند بین ذرات خاک و ریزتر شدن ذرات خاک شده است.

۵. گرچه ویژگی‌هایی از آلاینده مانند ثابت دی‌الکتریک، لزجت و غیره در تغییر ویژگی‌های خاک مؤثر هستند، ولیکن منشأ و نوع آلاینده نیز نقش مهمی را در تغییر خواص خاک‌های آلوده شده ایفا می‌نماید.

منابع

1. Meegoda, N. J., and P. Ratnaweera. "Compressibility of contaminated fine-grained soils." Geotechnical Testing Journal 17, no. 1 (1994): 101-112.
2. Yong, R. N. “Geoenvironmental engineering: Contaminated soils, pollutant fate, and mitigation.” CRC press, (2000).
3. Fang H.Y., Daniels J. “Introduction to Environmental Geotechnology”. CRC Press; (1997) Sep 24.
4. Kaya A., Fang HY. “The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils”. Canadian Geotechnical Journal. (2000) Oct 1; 37(5):943-50.
5. Sridharan A., Prakash K. “Percussion and cone methods of determining the liquid limit of soils: controlling mechanisms”. Geotechnical Testing Journal. (2000) Jun 1; 23(2):236-44.
6. Foreman DE., Daniel DE. “Permeation of compacted clay with organic chemicals”. Journal of geotechnical engineering. (1986) Jul; 112(7):669-81.
7. Olgun M., Yıldız M. “Effect of organic fluids on the geotechnical behavior of a highly plastic clayey soil”. Applied Clay Science. (2010) May 1; 48(4):615-21.
8. Al-Sanad H.A., Eid W.K., Ismael N.F. “Geotechnical properties of oil-contaminated Kuwaiti sand”. Journal of geotechnical engineering. (1995) May; 121(5):407-12.
9. Singh S.K., Srivastava R.K., John S. “Studies on soil contamination due to used motor oil and its remediation.” Canadian Geotechnical Journal. (2009) Sep; 46(9):1077-83.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

10. Ladd C.C., Martin R.T. “The effects of pore fluid on the undrained strength of kaolinite.” Department of Civil Engineering, School of Engineering, Massachusetts Institute of Technology; (1967).
11. Moore C.A., Mitchell J.K. “Electromagnetic forces and soil strength.” Geotechnique. (1974) Dec; 24(4):627-40.
12. Evans, J. C., I. J. Kugelman, and H-Y. Fang. "Organic fluids effects on the strength, deformation and permeability of soil-bentonite slurry walls." (1985).
13. Sridharan, A., and G. Venkatappa Rao. "Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of the effective stress concept." Geotechnique 23, no. 3 (1973): 359-382.
14. Sridharan, A., and G. Venkatappa Rao. "Shear strength behaviour of saturated clays and the role of the effective stress concept." Geotechnique 29, no. 2 (1979): 177-193.
15. Ratnaweera, P., and Jay N. Meegoda. "Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils." Geotechnical Testing Journal 29, no. 2 (2006): 133-140.
16. Khosravi, E., H. Ghasemzadeh, M. R. Sabour, and H. Yazdani. "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite." Engineering Geology 166 (2013): 11-16.
17. Estabragh, A. R., I. Beytolahpour, M. Moradi, and A. A. Javadi. "Mechanical behavior of a clay soil contaminated with glycerol and ethanol." European Journal of Environmental and Civil Engineering 20, no. 5 (2016): 503-519.
۱۸. بابالار م.، رئیسی ع.، عبداللهی ج.. "پاک‌سازی خاک رسی چسبندهٔ آلوده به گازوئیل با استفاده از روش‌های حرارتی و سورفکتنت." نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی. ۱۳۹۷; ۱۲ (۲) :۲۱۳-۲۳۶.
19. Rajabi, H., and M. Sharifipour. "Effects of light crude oil contamination on small-strain shear modulus of Firoozkooh sand." European Journal of Environmental and Civil Engineering 23, no. 11 (2019): 1351-1367.
20. Ghadyani, M., Hamidi, A. and Hatambeigi, M. "Triaxial shear behaviour of oil contaminated clays." European Journal of Environmental and Civil Engineering 23, no. 1 (2019): 112-135.
21. McKeen, R. G. "A model for predicting expansive soil behavior." In International conference on expansive soils, pp. 1-6. (1992).
22. Brown K.W. and Donnelly K. C., "An estimation of the risk associated with the organic constituents of hazardous and municipal waste landfill leachates." Hazard Waste Hazard Mater 5, (1988): 1-30.
23. Pincus, H.J., Meegoda, N.J., and Ratnaweera, P. (1995). "Treatment of oil-contaminated soils for identification and classification." Geotechnical Testing Journal 18, no. 1 (1995): 41-49.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]

24. Estabragh, A. R., I. Beytolahpour, M. Moradi, and A. A. Javadi. "Consolidation behavior of two fine-grained soils contaminated by glycerol and ethanol." Engineering geology 178 (2014): 102-108.
25. Estabragh, A. R., I. Beytolahpour, and A. A. Javadi. "Effect of resin on the strength of soil-cement mixture." Journal of Materials in Civil Engineering 23, no. 7 (2011): 969-976.
26. Estabragh, A. R., M. Khatibi, and A. A. Javadi. "Effect of cement on treatment of a clay soil contaminated with glycerol." Journal of Materials in Civil Engineering 28, no. 4 (2016): 04015157.
27. Chartres, C. J., A. J. Ringrose-Voase, and M. Raupach. "A comparison between acetone and dioxane and explanation of their role in water replacement in undisturbed soil samples." Journal of soil science 40, no. 4 (1989): 849-863.
28. Singh, S. K., R. K. Srivastava, and Siby John. "Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons." Soil & sediment contamination 17, no. 3 (2008): 290-300.
29. Di Matteo, L., F. Bigotti, and R. Ricco. "Compressibility of kaolinitic clay contaminated by ethanol-gasoline blends." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 137, no. 9 (2011): 846-849.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.3.6.5]