پاک‌سازی خاک رسی چسبندهٔ آلوده به گازوئیل با استفاده از روش‌های حرارتی و سورفکتنت

محمود بابالار، علی رئیسی استبرق، جمال عبد اللهی؛
دانشگاه تهران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، گروه آبیاری و آبادانی

تاریخ: دریافت ۹۵/۰۷/۱۹ پذیرش ۹۶/۰۲/۲۶

چکیده

در این پژوهش اثر گازوئیل بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک رسی چسبنده بررسی شد. سپس تأثیر روش حرارتی و استفاده از دو نوع سورفکتنت بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک آلوده بررسی شد. خاک رسی چسبنده به‌صورت مصنوعی با درصدهای گوناگون گازوئیل (۱۰٪ و ۵٪) آلوده شد. به‌منظور پاک‌سازی خاک به‌وسیلهٔ اعمال حرارت نمونه‌های خاک آلوده شده در معرض حرارت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد قرار گرفت. علاوه بر آن پاک‌سازی با شوینده‌های سدیم دودسیل سولفات و توبین ۸۰ نیز انجام شد. آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی شامل دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت تک‌محوری روی نمونه‌هایی از خاک طبیعی آلوده شده و خاک پاک‌سازی شده از دو روش گفته شده انجام شد. نتایج نشان داد افزودن گازوئیل موجب تغییراتی در مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک می‌شود و این تغییرات تابعی از درصد گازوئیل است. علاوه بر آن نتایج پژوهش‌ها نشان داد روش حرارتی و استفاده از شوینده در پاک‌سازی خاک مؤثر است.

واژه‌های کلیدی: گازوئیل، خاک چسبنده، پاک‌سازی، آلودگی، شوینده، روش حراراتی

مقدمه

آلودگی را می‌توان ناشی از وجود ترکیبی شیمیایی دانست که باعث می‌شود زندگی انسان در کوتاه مدت یا دراز مدت تحت تأثیر قرار گیرد. آلوده‌کننده‌ها شامل آلاینده‌های آلی و معدنی

*نویسنده مسئول babalar@ut.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

هستند. منشأ آلاینده‌های آلی نفت خام، محصولات نفتی و صنایع پتروشیمی است. پالایشگاه‌ها با تولید مشتقات نفتی از نفت خام به‌عنوان اولین منبع آلاینده‌های آلی محسوب می‌شوند. دومین منبع آلاینده‌های آلی نشت ترکیبات نفتی از مخازن احداث شده روی زمین و زیر زمین، خرابی و فرسوده بودن تأسیسات انتقال مواد نفتی و غیره است.

آلودگی موجب بروز پاره‌ای مسائل در آب و خاک می‌شود که باید راه حل جلوگیری از آن و به‌سازی محیط آلوده را بررسی کرد. بعضی از آلاینده‌های آلی به‌دلیل دوام در برابر تجزیه و هم‌چنین خواص سرطان‌زایی و جهش‌زایی که دارند به‌عنوان آلوده‌کننده‌های خطرناک محسوب می‌شوند [۲]، [۱]. علاوه بر خطرات زیست‌محیطی، آلودگی خاک موجب تغییر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک می‌شود. تحقیقات انجام شده در ارتباط با تغییر خصوصیات مکانیکی خاک‌ها در اثر آلودگی و روش‌های پاک‌سازی آن‌ها بدین‌شرح است:

الف) خصوصیات مکانیکی خاک‌های آلوده

خواص مکانیکی خاک معمولی و خاک آلوده شده به‌وسیلهٔ مواد آلاینده بستگی به ساختمان خاک دارد. ساختمان خاک معمولاً به‌نحوهٔ قرار گرفتن ذرات خاک در کنار یک‌دیگر در داخل تودهٔ خاک اطلاق می‌شود. خاک‌های رسی از دو واحد ساختمانی تحت عنوان میکرو و ماکرو تشکیل می‌شوند. واکنش شیمیایی و فیزیکی و تأثیر متقابل عوامل مختلف با کانی‌های رسی معمولاً در ساختار میکرو رخ می‌دهند. امروزه اطلاعات بسیار مهمی در بارهٔ ساختمان این خاک‌ها از طریق (SEM[1]) مقدور است که به‌گونه‌ای گسترده برای بررسی ویژگی‌های انواع خاک‌ها به‌کار می‌رود [۳]. پژوهش‌گران مختلفی از تحلیل نتایج SEM در نمونه‌های خاک مورد نظر خود برای بررسی ساختمان میکرو خاک تحت تأثیر شرایط گوناگون استفاده کردند [۷]، [٤].

اوگین و داس [۸] مقاومت خاک ماسه‌ای در حالت‌های طبیعی و آلوده شده به آلاینده‌های آلی را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که آلودگی موجب کاهش محسوسی در زاویهٔ اصطکاک خاک آلوده می‌شود. محققان مختلف تحقیقاتی در خصوص اثر آلودگی روی خواص

1. Scanning Electron Microscope

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

فیزیکی و مکانیکی خاک‌های دانه‌ای چسبنده مختلف انجام دادند [۱۵]، [۹]، [۷]. در مجموع می‌توان بیان کرد نتایج این تحقیقات نشان داد که تغییراتی در خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها در اثر آلاینده‌های استفاده شده ایجاد می‌شود. بنابراین استفاده از این خاک‌های آلوده علاوه بر ایجاد مشکلات زیست‌محیطی مستلزم شناخت حاصل از خواص آن‌ها نیز هست. پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد مشخصات مکانیکی خاک‌های آلوده شده به آلاینده‌های آلی و هیدروکربنی با خاک اولیه متفاوت است.

ب) روش‌های پاک‌سازی خاک‌های آلوده

محققان روش‌های متعددی را برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده پیشنهاد کردند [۱۷]، [۱٦]. انتخاب روش مورد نظر بر اساس خواص مهندسی خاک (نوع خاک، تخلخل، درصد اشباع خاک)، زمین‌شناسی منطقه، وسعت و عمق آلودگی، توپوگرافی منطقه، موقعیت آب و هوایی، کاربری زمین، وضعیت آب زیرزمینی منطقه، در دسترس بودن روش مورد نظر و نوع مواد شیمیایی منطقه است [۱۸].

روش‌های گوناگون پاک‌سازی خاک آلوده شامل روش‌های بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی است. استفاده از روش شیمیایی موجب وقوع تعدادی واکنش شیمیایی برگشت‌ناپذیر در خاک می‌شود. از جمله روش‌های شیمیایی پاک‌سازی خاک می‌توان تثبیت آلودگی در خاک با استفاده از روش Stabilization /Solidification را نام برد [۱۹]. روش بیولوژیک نیازمند انتخاب صحیح باکتری‌های فعال و شرایط مناسب خاک برای فعالیت میکروبی است. هم‌چنین این روش دارای مشکلاتی از قبیل مقاوم بودن گروهی از آلودگی‌ها به تجزیه زیستی و نیز امکان ایجاد متابولیت‌های خطرناک‌تر از آلودگی اولیه خاک بعد از اعمال روش است [۲۰].
روش‌های فیزیکی موجود شامل روش‌های شستشو با آب، اعمال حرارت ، استفاده از شوینده‌ها و غیره است. تاکنون پژوهش‌های اندکی روی پاک‌سازی خاک به‌وسیلهٔ اعمال حرارت صورت گرفته است. ونگ و همکاران [۲۱] از پژوهش‌های خود نتیجه‌گیری‌کردند که اعمال درجه حرارت تا ۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد در تغییر ماهیت خاک (حدود اتربرگ و غیره) تأثیری ندارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

پاک‌سازی خاک به‌وسیلهٔ روش شستشو روشی کم‌هزینه برای پاک‌سازی است [۲۲] که براساس جداسازی مواد آلوده‌کننده به‌وسیلهٔ آب [۲۳] یا استفاده از سورفکتنت‌ها [۲٤] که ممکن است غیر یونی [۲۵] یا آنیونی [۲٦] باشند انجام می‌گیرد. شوینده‌ها دارای یک بخش آب دوست و بخش دیگر آب گریز هستند. بخش آب دوست می‌تواند حلالیت آلاینده‌های آلی را در آب افزایش دهد و موجب جدایی این ذرات از سطح ذرات خاک شود. شوینده از نوع آنیونیک به‌علت داشتن بار منفی خاصیت جذب نسبتاً کمی دارد اما نوع کاتیونیک دارای بار مثبت است و ممکن است سمی باشد و به میکروارگانیسم‌های موجود در خاک زیان وارد کند. بازده پاک‌سازی در روش شستشو تحت تأثیر عواملی مانند pH خاک، نوع خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، دانه‌بندی و نفوذپذیری خاک و نوع آلاینده‌ها قرار دارد [۲۷]. بعد از عمل پاک‌سازی با سورفکتنت‌ها فاز مایع باقی مانده از فرایند شستشو که حاوی آلاینده‌های جذب شده است حذف می‌شود یا مورد پاک‌سازی‌های بیش‌تر شیمیایی یا بیوشیمیایی قرار می‌گیرد.

محققانی مختلفی از سورفکتنت‌های آنیونی مانند سدیم دودسیل سولفات (SDS) و سورفکتنت‌های غیریونی مانند Tween 80، Brij 35 و Triton x-100 استفاده کردند و نتیجه‌گیری کردند که استفاده از آن‌ها راندمان پاک‌سازی خاک را افزایش می‌دهد [۳۰]، [۲۸].

بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون تحقیقات اندکی روی تأثیر آلاینده‌های آلی بر مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌های چسبنده و هم‌چنین تأثیر روش‌های حرارتی و استفاده از شوینده بر بازسازی مشخصات فیزیکی خاک‌های مذکور انجام شده است. در این کار پژوهشی یک خاک رسی با چسبندگی زیاد به‌وسیلهٔ درصدهای گوناگون گازوئیل به‌صورت مصنوعی آلوده شد. سپس خاک آلوده شده از روش حرارتی و با استفاده از شوینده‌های (سورفکتنت) موجود پاک‌سازی شد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی (دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تراکم ، مقاومت) خاک طبیعی، خاک آلوده و خاک پاک‌سازی شده اندازه‌گیری شد تا میزان تغییر مشخصات فیزیکی خاک طبیعی و میزان تأثیر هرکدام از روش‌های پاک‌سازی بر مشخصات فیزیکی خاک ارزیابی شود.

هدف این کار پژوهشی بررسی میزان پاک‌سازی خاک رسی آلوده به گازوئیل با مقایسهٔ پارامترهای فیزیکی و مکانیکی آن در حالت طبیعی، آلوده و پاک‌سازی شده از دو روش بیان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

شده و بررسی میزان بازگشت‌پذیری مشخصات ژئوتکنیکی خاک به‌وسیلهٔ مقایسهٔ این مشخصات با پارامترهای اندازه‌گیری شده خاک طبیعی و هم‌چنین مقایسهٔ هرکدام از روش‌های حرارتی و استفاده از شوینده در میزان پاک‌سازی است.

مواد و روش‌ها

مواد اصلی استفاده شده در این پژوهش شامل خاک، گازوئیل و شوینده است که خواص آن‌ها بدین‌شرح است:

الف) خاک

خاک استفاده شده در این پژوهش خاک رسی است که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. براساس اطلاعات دانه‌بندی و حدود اتربرگ جدول ۱، خاک یاد شده مطابق طبقه‌بندی متحد از نوع رس با خاصیت خمیری زیاد (CH) طبقه‌بندی شد.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک استفاده شده

مشخصه	استاندارد	مقدار
وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_s)	ASTM-D-۸۵٤	۲/٦۷
ماسه(٪)		٤
سیلت(٪)		۵۷
رس(٪)		۳۹
حد روانی (LL) (٪)		۵۳
حد خمیری (PL) (٪)	ASTM-D-٤۳۱۸	۲٤
نشانهٔ خمیری (PI) (٪)		۲۹
طبقه‌بندی متحد (USCS)	ASTM-D-۲٤۸۷	CH
درصد رطوبت بهینه (W_{opt}) (٪)		۱۷/۵
وزن واحد حجم خشک حداکثر (γ_{dmax}) (kN/m^3)		۱۸/۱٦

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک مورد استفاده

مشخصه	مقدار
pH	۸/۰
(ds/m) EC	۱۰/۷٤
(meq/Lit) K^+	۲/٤
(meq/Lit) Ca^{2+}	۰/۳۳
(meq/Lit) SO_4^{2-}	۲٤/۰
(meq/Lit) Mg^{2+}	۱۰/۰
(meq/Lit) Cl^-	٦۰/۰
(meq/Lit) CO_3^2	۰/٦
(meq/Lit) HCO_3^-	٤/۰

ب) گازوئیل

گازوئیل استفاده شده به‌وسیلهٔ شرکت ملی نفت تولید شده است و به‌عنوان سوخت در وسایل گاز سوز خانگی، سوخت جای‌گزین در خودروها و سوخت در صنایع مختلف کاربرد دارد. این ماده دارای ثابت دی‌الکتریک ۲ در ۷۰ درجه فارنهایت و جرم واحد حجم Kg/m^3 ۸٦۰–۸۲۰ و نقطه جوش ۳۸۵ درجهٔ سانتی‌گراد است. گازوئیل به‌عنوان مادهٔ آلاینده خاک استفاده شده است. درصدهای استفاده شدهٔ گازوئیل ۵ و ۱۰ درصد از وزن خشک خاک استفاده شده است.

پ) شوینده‌ها

در این پژوهش از شوینده‌ای آنیونی به‌نام سدیم دودسیل‌سولفات (SDS) و شوینده‌ای غیریونی با نام توین ۸۰ (Tween 80) در پاک‌سازی خاک استفاده شده است. مشخصات شوینده‌های مورد نظر در جدول ۳ آورده شده است.

تهیهٔ نمونهٔ آزمایشگاهی

به‌منظور انجام آزمایش‌های پاک‌سازی خاک نیاز به نمونه‌ای از خاک آلوده شده به گازوئیل است. بدین‌منظور به خاک انتخاب شده ۵ و ۱۰ درصد وزنی گازوئیل به‌صورت اسپری اضافه می‌شود و اختلاط به‌صورت یک‌نواخت انجام شد. خاک آلوده شده به‌مدت یک هفته در کیسه‌ای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

نایلونی قرار گرفت تا واکنش‌های شیمیایی لازم با خاک انجام گیرد. سپس روی نمونهٔ تهیه شده، عملیات پاک‌سازی انجام شد. برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی نیز روی نمونه‌هایی از خاک طبیعی، خاک آلوده به گازوئیل و خاک پاک‌سازی شده آزمایش تراکم استاندارد انجام شده و منحنی تراکمی برای آن‌ها تهیه و مقایسه شد. سپس باتوجه به رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه، نمونه‌های لازم برای تعیین مقاومت فشاری از روش تراکم استاتیکی تهیه شد. به‌منظور تهیه نمونه‌ها به‌روش تراکم استاتیکی ابتدا رطوبت اولیه

جدول ۳. مشخصات SDS و Tween80

مشخصه	واحد اندازه‌گیری	مقدار	مشخصه	واحد اندازه‌گیری	مقدار
نام	-	Sodium Dodecyl Sulfate	نام	-	Tween 80
فرمول شیمیایی	-	$NaC_{12}H_{25}SO_4$	فرمول شیمیایی	-	$C_{64}H_{124}O_{26}$
وزن مولکولی	g	۲۸۸/۵	وزن مولکولی	g	۱۳۱۰
کلاس شوینده	-	Anionic	کلاس شوینده	-	Nonionic
حد بحرانی تشکیل مایسل	mM	۸-۶	حد بحرانی مایسل	mM	۰/۰۱۲

شکل ۱. قالب ویژه برای تهیه نمونه‌های آزمایشی تراکم استاتیکی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

نمونه به رطوبت بهینه رسانده می‌شود و سپس با استفاده از قالب مخصوص که در شکل ۱ نشان داده شده است و دستگاه بارگذاری ویژهٔ نمونه مورد نظر در سه لایه به‌روش تراکم استاتیکی تهیه می‌شود. میزان بار وارده به هر لایه از روش سعی و خطا به گونه‌ای تعیین شد که اعمال آن موجب ایجاد وزن واحد حجم خشک بیشینه مربوط هر منحنی تراکمی شد.

به‌منظور پاک‌سازی خاک آلوده‌شده به گازوئیل به‌وسیله شوینده، خاک آلوده مورد نظر در یک ظرف پلاستیکی قرار داده شد. سپس به اندازه ۵۰٪ از وزن آلاینده موجود در خاک از شوینده سدیم دودسیل‌سولفات[1] و ۲۵٪ از وزن آلاینده موجود در خاک از شوینده توین ۸۰ در آب حل شده و پس از اضافه کردن آن به خاک، مخلوط حاصل به‌مدت یک ساعت به خوبی هم زده شد. بعد از گذشت زمان لازم برای ته نشین شدن خاک، مایع موجود در مخلوط حاصل که روی سطح خاک قرار گرفته بود به‌وسیلهٔ سیفون خارج شد و خاک در هوای آزاد قرار گرفت تا خشک شود. فرآیند شستشو مطابق روش انجام شدهٔ ساین و همکاران [۱۱] و میگودا و راتناورا [۱۸] است. سپس ۵۰ گرم از خاک شستشو یافته از الک شمارهٔ ۲۰۰ عبور داده شد و آزمایش دانه‌بندی روی آن انجام گرفت. برای انجام آزمایش تراکم استاندارد ۳ کیلوگرم از خاک مورد نظر از الک شماره ٤ عبور داده شد و آزمایش تراکم مطابق استاندارد ASTM-D-698 روی نمونه‌ها انجام شد. سپس باتوجه به وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه به‌دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد، نمونه‌های مورد نظر برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تهیه شده و آزمایش تراکم استاتیکی مطابق با استاندارد ASTM-D-1633 روی نمونه‌ها انجام شد.

ب) روش حرارتی

به‌منظور پاک‌سازی خاک به‌وسیلهٔ روش حرارتی ۸ کیلوگرم از خاک آلوده شده به ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل به‌مدت یک هفته درحرارت‌های ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه‌سانتی‌گراد قرار داده شد. لازم به یادآوری است در طول مدت پاک‌سازی نمونه‌ها را مرتباً از آون خارج کرده و خوب هم می‌زنیم تا تأثیر حرارت روی نمونه‌ها به‌طور یک‌نواخت اعمال شود. آون باید دارای

1. Sudium Dodecyl Sulfate (SDS)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

تهویه مناسب باشد. بعد از گذشت یک هفته خاک مورد نظر را از آون خارج کرده و آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی مورد نظر برابر آن‌چه در روش شستشو گفته شد روی آن انجام شد.

نتایج

آزمایش‌های مورد نظر (حدود اتربرگ، تراکم، دانه‌بندی و مقاومت) روی نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده شده به گازوئیل و خاک پاک‌سازی شده در سه مرحله تکرار شدند و سپس میانگین آن‌ها به‌عنوان نتایج قابل قبول ارائه شدند. جدول‌های ٤ و ٥ نتایج حدود اتربرگ و دانه‌بندی برای خاک طبیعی، خاک آلوده شده به ٥ و ١٠ درصد گازوئیل و هم‌چنین خاک پاک‌سازی شده با اعمال درجه حرارت‌های ٥٠ ، ١٠٠ و ١٥٠ درجهٔ سانتی‌گراد و خاک شستشو یافته به‌وسیلهٔ شوینده‌های سدیم دودسیل سولفات (SDS) و توین ٨٠ را نشان می‌دهد. برابر نتایج نشان داده شده در این جدول‌ها حد روانی (LL) حد خمیری (PL) و اندکس خمیری (PI) برای خاک طبیعی به‌ترتیب برابر ٥٣ ، ٢٤ و ٢٩ درصد است. این مقادیر برای خاک آلوده شده به ٥ درصد گازوئیل به‌ترتیب برابر ٧٠، ٣٥ و ٣٥ درصد و برای خاک آلوده به ١٠٪ گازوئیل برابر ٧٥ ، ٣٧ و ٣٨ درصد است. نتایج حدود اتربرگ خاک‌های آلوده شده به گازوئیل نشان می‌دهد گازوئیل باعث افزایش حدود اتربرگ می‌شود و این افزایش تابعی از درصد آلودگی است. در اثر اعمال درجه حرارت ١٥٠ درجهٔ سانتی‌گراد بر خاک آلوده به ٥٪ گازوئیل حد روانی ٤٩ درصد، حد خمیری ٣٨ درصد و شاخص خمیری به ١١ درصد تغییر می‌یابد. هم‌چنین حدود اتربرگ برای خاک پاک‌سازی شده در دمای ١٥٠ درجهٔ سانتی‌گراد و حاوی ١٠ درصد گازوئیل برابر LL =٥٠ و PL =٢٨ و PI =٢٢ درصد است. بنابراین حدود اتربرگ با اعمال درجه حرارت در مقایسه با حالت آلوده کاهش می‌یابد. مقادیر حدود اتربرگ برای خاک پاک‌سازی شده به‌وسیلهٔ شوینده توین ٨٠ برای خاک آلوده شده به ٥ و ١٠ درصد گازوئیل به‌ترتیب برابر LL =٥٦ و PL =٣٤ و PI=٢٢ درصد و LL=٤٥ و PL=٣٤ و PI=١١ درصد است. هم‌چنین نمونه‌های خاک پاک‌سازی شده به‌وسیله شویندهٔ سدیم دودسیل سولفات (SDS) که ٥ و ١٠ درصد گازوئیل دارد، حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری به‌ترتیب

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

برابر ٤٠، ٢٧، ١٣ و ٤٣، ٣٦، ٧ درصد دارد. نتایج شستشوی خاک به‌وسیلهٔ شوینده‌های سدیم دودسیل سولفات (SDS) و توین ٨٠ (Tween 80) نشان می‌دهد استفاده از این شوینده‌ها حدود اتربرگ خاک‌های آلوده را کاهش می دهد و به حدود اتربرگ خاک طبیعی نزدیک می‌کند.

جدول ٤. پارامترهای فیزیکی به‌دست آمده از آزمایش دانه‌بندی و حدود اتربرگ برای خاک آلوده به ٥٪ گازوئیل

نمونه	رس (٪)	سیلت (٪)	ماسه (٪)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
خاک طبیعی	٣٩	٥٧	٤	٥٣	٢٤	٢٩
٥٪ آلودگی	٣٨	٥٥	٧	٧٠	٣٥	٣٥
T=50	٠	٩٤	٦	٦٦	٣٢	٣٤
T=100	٠	٧٨/٩٢	٢١	٥٥	٣٤	٢١
T=150	٠	٨٠/٩	١٩/١	٤٩	٣٨	١١
SDS	٠	٧٠	٣٠	٤٠	٢٧	١٣
Tween 80	٠	٩٢/٨	٧/٢	٥٦	٣٤	٢٢

شکل‌های ٢ و ٣ منحنی‌های دانه‌بندی برای خاک طبیعی و خاک‌های آلوده شده به ٥ و ١٠ درصد گازوئیل و هم‌چنین خاک پاک‌سازی شده با اعمال درجه حرارت‌های ٥٠، ١٠٠ و ١٥٠ درجه سانتی گراد و خاک پاک‌سازی شده به‌وسیلهٔ شوینده‌های سدیم دودسیل سولفات (SDS) و توین ٨٠ (tween 80) را نشان می‌دهد. جدول‌های ٤ و ٥ درصدهای رس، سیلت و ماسه را برای خاک طبیعی، خاک آلوده به گازوئیل و خاک پاک‌سازی شده با حرارت و شوینده را نشان می دهد. براساس جدول‌های ٤ و٥ درصد رس، سیلت و ماسه برای خاک طبیعی به‌ترتیب برابر ٣٩، ٥٧ و ٤ درصد است که این مقادیر برای خاک آلوده شده به ٥ درصد گازوئیل به‌ترتیب برابر ٣٨ و ٥٥ و ٧ درصد و برای خاک آلوده شده به ١٠ درصد گازوئیل برابر ٠، ٨٥ و ١٥ درصد است. نتایج نشان می‌دهد دراثر آلودگی به گازوئیل درصد رس موجود در خاک کاهش یافته اما درصدهای سیلت و ماسه موجود در خاک افزایش می‌یابد. نتایج مقادیر رس، سیلت و ماسه برای خاک پاک‌سازی شده با اعمال حرارت ١٠٠ درجهٔ سانتی‌گراد نشان می‌دهد برای خاک آلوده به ٥ درصد گازوئیل این مقادیر به‌ترتیب برابر ٠،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

۷۸/۹۲ و ۲۱/۰۸ درصد و برای ۱۰ درصد گازوئیل این مقادیر به‌ترتیب برابر ۰، ۸۸/٤۸ و ۱۱/۵۲ درصد است. نتایج نشان داد در اثر اعمال حرارت مقادیر رس موجود در خاک به صفر رسیده و درصدهای ماسه و سیلت موجود در خاک افزایش می‌یابد .

جدول ۵. پارامترهای فیزیکی به‌دست آمده از آزمایش دانه‌بندی و حدود اتربرگ برای خاک آلوده به ۱۰ ٪ گازوئیل

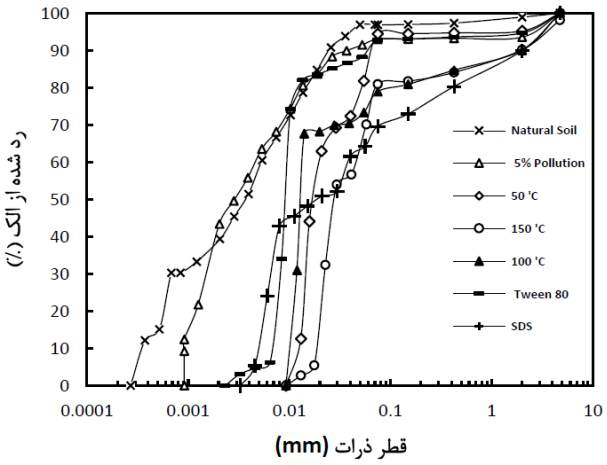
نمونه	رس (٪)	سیلت (٪)	ماسه (٪)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
خاک طبیعی	۳۹	۵۷	٤	۵۳	۲٤	۲۹
۱۰٪ آلودگی	۰	۸۵	۱۵	۷۵	۳۷	۳۸
T=50	۰	۹٤/٤	۵/٦	٦۹	٤۸	۲۱
T=100	۰	۸۸/٤۸	۱۱/۵۲	٦۰	۳۱	۲۹
T=150	۰	۹۱/۷٦	۸/۲٤	۵۰	۲۸	۲۲
SDS	۰	۹۱/۸۵	۸/۱۵	٤۳	۳٦	۷
Tween 80	۰	۹٤/٤	۵/٦	٤۵	۳٤	۱۱

نتایج دانه‌بندی خاک‌های آلوده به ۱۰ درصد گازوئیل شستشو شده با شوینده سدیم دودسیل سولفات (SDS) نشان می‌دهد در این خاک صفر درصد رس، ۹۱/۸۵ درصد سیلت و ۸/۱۵ درصد ماسه وجود دارد. هم‌چنین در اثر پاک‌سازی خاک آلوده شده به ۱۰ درصد گازوئیل با شویندهٔ توین ۸۰ مقادیر رس و سیلت و ماسه به‌ترتیب به ۰، ۹٤/٤ و ۵/٦ درصد رسیده است.

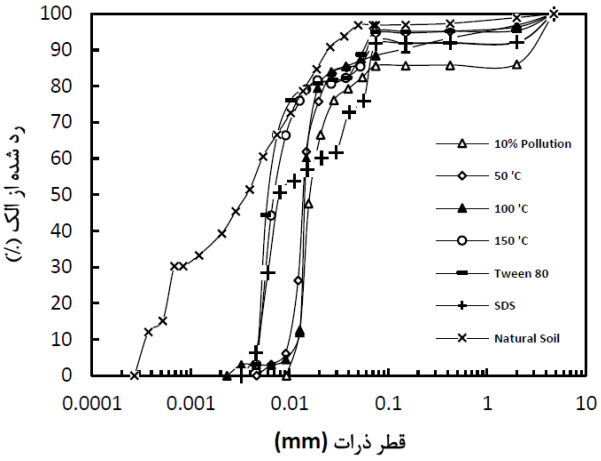
جدول ٦. پارامترهای فیزیکی به‌دست آمده از آزمایش تراکم و مقاومت فشاری برای خاک آلوده به ۵٪ گازوئیل

نمونه	W_{opt} (%)	γ_{dmax} (KN/m^3)	q_a (kPa)	ε (%)
خاک طبیعی	۱۷/۵	۱۸/۱٦	۱۸۰	۵/٤
۵٪ آلودگی	۱٦/۵	۱۷/۵	۱۳۰	۵/٦
T=50	۱۷/۷	۱۷/٦	۱٤۱	٤/٦
T=100	۱۹/۲	۱۷/۷	۱٤٤	٤
T=150	۲۰	۱۷/۷	۱۵۰	۳/۲
SDS	۱۲/۱	۱٦/۵	۱٤۰	۵
Tween 80	۱۲	۱۵/۸	۱۷۰	۵/٤

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی برای خاک طبیعی و خاک آلوده به ۵٪ گازوئیل و خاک پاک‌سازی شده با اعمال حرارت و استفاده از شوینده‌های SDS و توین ۸۰

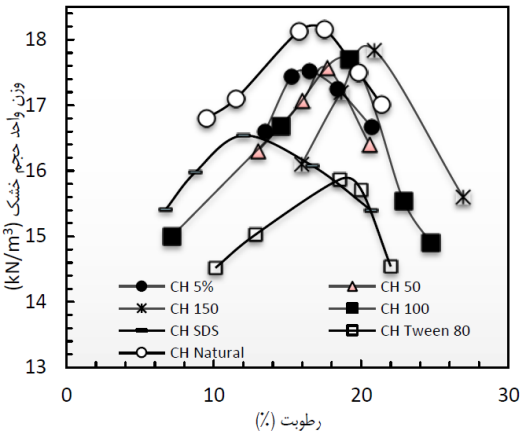


شکل ۳. منحنی دانه‌بندی خاک طبیعی و خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل و خاک پاک‌سازی شده با اعمال حرارت و استفاده از شوینده‌های SDS و توین ۸۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

جدول ۷. پارامترهای فیزیکی به‌دست آمده از آزمایش تراکم و مقاومت فشاری برای خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل

نمونه	W_{opt} (%)	γ_{dmax} (KN/m^3)	q_a (kPa)	ε (%)
خاک طبیعی	۱۷/۵	۱۸/۱٦	۱۸۰	٥/٤
۱۰٪ آلودگی	۱۳	۱۷/۸	۱۲۲	٦
T=50	۱٦/٥	۱۷/۳	۱۳۰	٥
T=100	۱٦/۷	۱۷/٦	۱۳۹	٤/۳
T=150	۱٦/۹	۱۷/٦	۱٤۲	۳
SDS	۱٥/۲	۱٦/۹	۱٦۷	۳/۲
Tween 80	۱۳/٦٥	۱٦/٥	۱٤۳	٤



شکل ٤. منحنی‌های تراکم برای خاک طبیعی و خاک آلوده به ٥٪ گازوئیل و خاک پاک‌سازی شده با اعمال حرارت و استفاده از شوینده‌های SDS و توین ۸۰

پاک‌سازی نمونه‌ها

الف) استفاده از شوینده

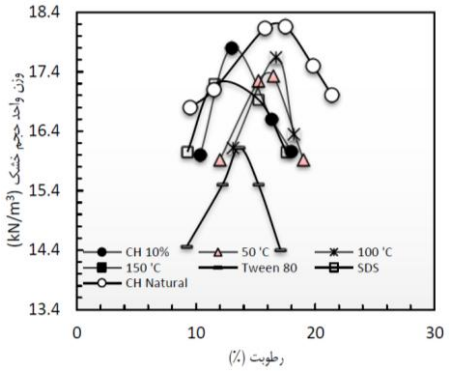
جدول‌های ٦ و ۷ نشان‌دهندهٔ مقادیر رطوبت بهینه، وزن واحد حجم بیشینه، مقاومت فشاری نهایی و کرنش متناظر با مقاومت فشاری نهایی برای نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به ٥ و ۱۰ درصد گازوئیل و خاک پاک‌سازی شده با اعمال حرارت و استفاده از شوینده‌ها است. شکل‌های ٤ و٥ نشان‌دهندهٔ منحنی‌های تراکم برای خاک‌های آلوده به ٥ و ۱۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

درصد گازوئیل و نمونه‌های پاک‌سازی شده با شوینده و اعمال حرارت است. برابر داده‌های موجود در جدول ٦ رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه برای خاک طبیعی ۱۷/۵ درصد و ۱۸/۱٦ KN/m^3 است. این مقادیر برای خاک آلوده به ۵ درصد گازوئیل برابر ۱٦/۵ درصد و ۱۷/۵ KN/m^3 است. مقادیر رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه برای خاک پاک‌سازی شده از ۵ درصد گازوئیل با اعمال حرارت ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد برابر ۲۰ درصد و ۱۷/۷ KN/m^3 است. این پارامترهای تراکمی برای خاک پاک‌سازی شده با شوینده سدیم دودسیل سولفات (SDS) برابر ۱۲/۱ درصد و ۱٦/۵ KN/m^3 است. رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک آلوده شده به ۱۰ درصد گازوئیل ۱۳ درصد و KN/m^3 ۱۷/۸ است. در اثر پاک‌سازی خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل با اعمال حرارت ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد رطوبت بهینه به ۱٦/۷ درصد و وزن واحد حجم خشک بیشینه به ۱۷/٦ KN/m^3 رسید. استفاده از شوینده‌های سدیم دودسیل سولفات (SDS) و توین ۸۰ به‌منظور پاک‌سازی خاک آلوده به ۱۰ درصد گازوئیل نشان داد خاک پاک‌سازی شده با شوینده سدیم دودسیل سولفات (SDS) دارای رطوبت بهینه ۱۵/۲ درصد و وزن واحد حجم خشک بیشینه KN/m^3 ۱٦/۹ است . در خاک پاک‌سازی شده با توین ۸۰ این مقادیر به ۱۳/٦۵ درصد و KN/m^3 ۱٦/۵ تغییر یافت. نتایج نشان می‌دهد پارامترهای تراکمی خاک در اثر آلودگی به گازوئیل کاهش می‌یابد. در اثر پاک‌سازی خاک آلوده به ۵٪ گازوئیل با اعمال حرارت مقادیر رطوبت بهینه نسبت به خاک طبیعی افزایش یافته و وزن واحد حجم خشک بیشینه کاهش می‌یابد. هم‌چنین استفاده از شوینده‌ها در پاک‌سازی خاک موجب کاهش قابل توجهی در رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک می‌شود این نتایج در شکل‌های ٤ و ۵ قابل مشاهده است. شکل‌های ٦ و ۷ نمودار تنش- کرنش برای خاک طبیعی و خاک پاک‌سازی شده را نشان می‌دهد. مقادیر مقاومت فشاری نهایی و کرنش متناظر با مقاومت فشاری نهایی برای تمامی نمونه‌ها در جدول‌های ٦ و۷ ارائه شده است. چنان‌که ملاحظه می‌شود مقاومت نهایی خاک طبیعی برابر ۱۸۰ kPa در کرنش متناظر ۵/٤ درصد است. لیکن این مقادیر برای خاک آلوده به

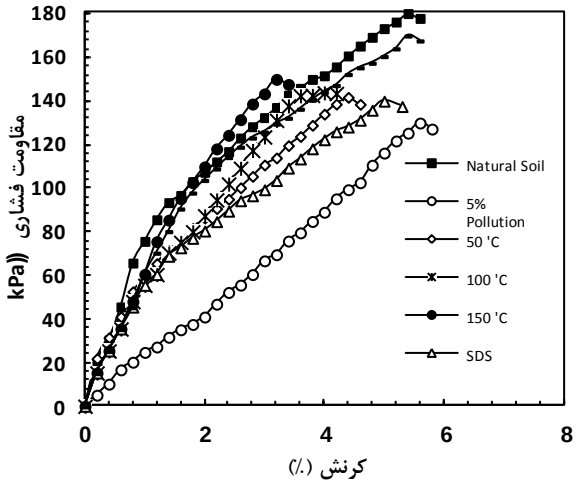
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

۵ درصد گازوئیل به kPa ۱۳۰ و ۵/٦ درصد تبدیل می‌شود. مقادیر مقاومت نهایی برای خاک پاک‌سازی شده از ۵ درصد گازوئیل در دمای ۱۰۰ درجه برابر ۱٤٤kPa در کرنش ٤ درصد است. در اثر استفاده از شوینده‌های سدیم دودسیل‌سولفات (SDS) و توین ۸۰ برای پاک‌سازی خاک آلوده به ۵ درصد گازوئیل مقادیر مقاومت نهایی و کرنش متناظر نمونه‌ها به‌ترتیب به kPa ۱٤۰ و ۵ درصد و kPa ۱۷۰ و ۵/٤ درصد تغییر می‌یابد. در اثر آلودگی خاک به ۱۰ درصد گازوئیل مقادیر مقاومت نهایی و کرنش متناظر آن به kPa ۱۲۲ و ٦ درصد و طی عمل پاک‌سازی این خاک با اعمال دمای ۱۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد این مقادیر به kPa ۱۳۹ در کرنش ٤/۳ درصد تبدیل می‌شود. استفاده از شوینده‌های سدیم دودسیل سولفات (SDS) و توین ۸۰ در پاک‌سازی خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل موجب تغییر این مقادیر به kPa ۱٦۷ و ۳/۲ درصد و kPa ۱٤۳ و ٤ درصد می‌شود. پارامترهای مقاومت فشاری اندازه‌گیری شده برای نمونه‌ها نشان می‌دهد در اثر آلودگی به گازوئیل میزان مقاومت فشاری نهایی خاک کاهش یافته و کرنش متناظر با مقاومت فشاری نهایی افزایش می‌یابد. در اثر پاک‌سازی خاک با اعمال حرارت مقاومت فشاری نهایی خاک پاک‌سازی شده نسبت به خاک آلوده افزایش یافته و کرنش کرنش متناظر آن کاهش می‌یابد. در اثر کاربرد شوینده‌های سدیم دودسیل سولفات (SDS) و توین ۸۰ مقاومت فشاری نهایی نسبت به خاک آلوده افزایش یافته و برای نمونه‌های پاک‌سازی شده با شوینده توین ۸۰ این افزایش در خاک آلوده به ۵٪ گازوئیل بیش‌تر است.

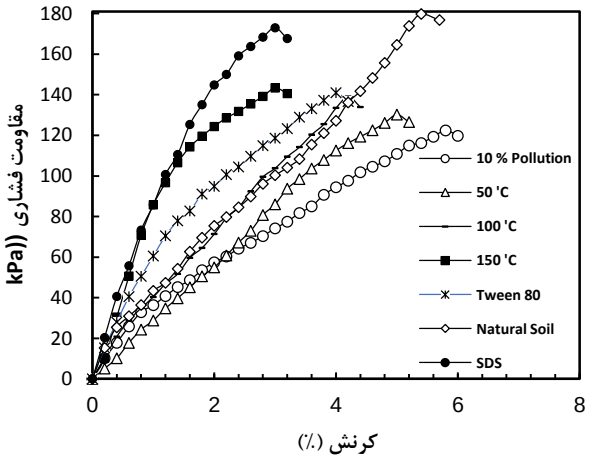


شکل ۵. منحنی‌های تراکم خاک طبیعی و خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل و خاک پاک‌سازی شده با اعمال حرارت و استفاده از شوینده‌های SDS و توین ۸۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]



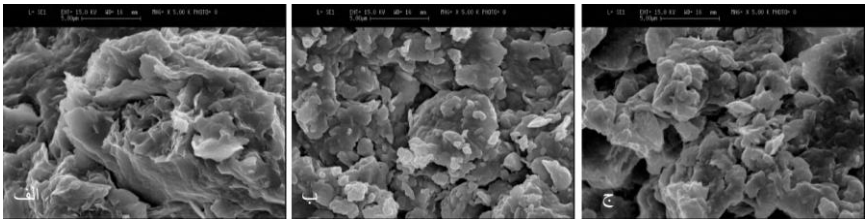
شکل ٦. منحنی‌های تنش-کرنش خاک طبیعی و خاک آلوده به ۵٪ گازوئیل و خاک پاک‌سازی شده با اعمال حرارت و استفاده از شوینده‌های SDS و توین ۸۰



شکل ۷. منحنی‌های تنش-کرنش خاک طبیعی و خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل و خاک پاک‌سازی شده با اعمال حرارت و استفاده از شوینده‌های SDS و توین ۸۰

شکل ۸ نتایج عکس میکروسکوپی SEM خاک طبیعی، خاک آلوده به ۵٪ و خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل ساختمان میکرو خاک طبیعی، خاک آلوده به ۵٪ و ۱۰٪ گازوئیل نشان داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]



شکل ۸. نتایج عکس‌های SEM از الف) خاک طبیعی، ب) خاک آلوده به ۵٪ گازوئیل ج) خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل

بحث

ذرات رس در هر حالت (خشک و یا تر) حامل بار منفی هستند و می‌توانند ذرات با بار مثبت را جذب کنند به‌گونه‌ای که یون‌های مثبت محکم به سطح ذرات رس می‌چسبند. معمولاً وجود کاتیون‌ها در اطراف ذرات رس برای خنثی کردن بار منفی آن‌ها ضروری است. در هر حال مجموعه‌ای از کاتیون‌ها و آنیون‌ها در اطراف ذره رس وجود دارد که با افزودن آب به خاک، آن‌ها در این محلول به‌صورت شناور در می‌آیند. معمولاً تراکم کاتیون‌ها در اطراف ذره رس زیادتر است و با دور شدن از ذره رس میزان آن کاهش یافته و برعکس تعداد آنیون‌ها افزایش می‌یابد. این سامانه که متشکل از ذرات باردار است تحت عنوان لایه مضاعف DDL[1] نام‌گذاری شده است. DDL روی سطح خارجی ذرات رس تشکیل می‌شود و ضخامت آن به عواملی مانند ضریب دی‌الکتریک، درجه حرارت، غلظت مایع الکترولیت و غیره بستگی دارد. تغییر در ضخامت این لایه موجب تغییراتی در ساختمان خاک می‌شود. هنگامی که خاک در معرض آلودگی هیدروکربنی قرار می‌گیرد، مواد آلاینده با ذرات خاک واکنش می‌دهند و در نتیجه واکنش آب با ذرات خاک کاهش یافته و ضخامت لایه مضاعف کاهش می‌یابد. کاهش در ضخامت لایه مضاعف باعث فلکوله شدن ذرات خاک می‌شود. این امر خصوصیات مکانیکی خاک مانند حدود اتربرگ را تغییر می‌دهد.

نتایج حدود اتربرگ برای خاک آلوده شده به ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل نشان داد در اثر آلودگی حدود اتربرگ خاک افزایش می‌یابد. این نتایج با نتایج تحقیقات محققانی مانند

1. Double Diffusion Layer

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

خسروی و همکاران [۳۱] مطابقت دارد. آن‌ها دریافتند با افزودن گازوئیل به خاک تا مقدار ۱۲ درصد حد روانی افزایش یافته و افزایش درصد گازوئیل به بیش از ۱۲ درصد کاهش حد روانی را به‌دنبال دارد. بنابراین این نتایج با فرض ایجاد ساختمان فلکوله در خاک مطابقت ندارد. می‌توان گفت افزودن گازوئیل به خاک باعث افزایش گرانروی مخلوط می‌شود و این افزایش موجب می‌شود مخلوط یاد شده نیروی مقاومی در برابر روان شدن از خود نشان دهد که این امر باعث افزایش حد روانی خاک می‌شود. حدود اتربرگ خاک پاک‌سازی شده با درجه حرارت نشان می‌دهد حد روانی با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد لیکن کاهش حد روانی در خاک آلوده شده به ۱۰ درصد گازوئیل از خاک آلوده شده به ۵ درصد گازوئیل کم‌تر است. بالاتر بودن حد روانی در خاک پاک‌سازی شده از ۱۰ درصد گازوئیل نسبت به خاک آلوده شده به ۵ درصد گازوئیل در حرارت یک‌سان را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که در خاک‌های آلوده به مواد آلی رسانایی گرمایی با افزایش درجه آلودگی افزایش می‌یابد [۹]. بنابراین با افزایش درصد آلودگی، حرارت اعمال شده در مدت زمان کم‌تری از خاک عبور کرده و میزان پاک‌سازی خاک در اثر اعمال حرارت کم‌تر خواهد بود. در نتیجه مقدار گازوئیل باقی‌مانده در خاک پاک‌سازی شده از ۱۰ درصد گازوئیل از مقدار گازوئیل باقی‌مانده در خاک پاک‌سازی شده از ۵ درصد گازوئیل در دمای یک‌سان بیش‌تر است و این امر موجب افزایش حدود اتربرگ در خاک آلوده به ۱۰ درصد گازوئیل می‌شود. در خاک‌های پاک‌سازی شده با شوینده‌های سدیم دودسیل سولفات (SDS) و توین ۸۰ مقادیر حدود اتربرگ تقریباً با حدود اتربرگ خاک طبیعی برابر است. مطابق داده‌های ارائه شده در جدول ٦ و ۷ نتایج آزمایش تراکم استاندارد نشان می‌دهد در اثر آلودگی به ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل مقادیر رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک کاهش می‌یابد. می‌توان گفت در خاک آلوده به گازوئیل مقدار زیادی از فضای بین ذرات خاک از گازوئیل پر شده که این امر موجب می‌شود خاک آلوده در درصدهای کم‌تری از رطوبت به نقطه رطوبت بهینه برسد. در خاک‌های پاک‌سازی شده با اعمال حرارت مقدار رطوبت بهینه خاک افزایش یافته و وزن واحد حجم بیشینه کاهش می‌یابد. اعمال حرارت موجب تبخیر شدن آب آزاد و بخشی از آب لایه دوگانه در ذرات رس می‌شود. این پدیده باعث بالا رفتن پتانسیل جذب آب توسط خاک برای رسیدن به رطوبت بهینه می‌شود. پارامترهای تراکمی برای خاک پاک‌سازی شده با شوینده‌ها نشان می‌دهند وزن

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

واحد حجم خشک بیشینه در خاک‌های پاک‌سازی شده تقریباً با خاک طبیعی برابر است لیکن مقادیر رطوبت بهینه برای خاک پاک‌سازی شده با شوینده‌ها با اختلاف فاحشی از خاک طبیعی کم‌تر است. منحنی‌های تنش کرنش در شکل‌های ٦ و ۷ نشان می‌دهد در اثر آلودگی به گازوئیل مقادیر مقاومت نهایی خاک کاهش یافته و کرنش متناظر با آن افزایش می‌یابد و این تغییرات تابعی از افزایش درصد گازوئیل است. این نتایج با نتایج به‌دست آمدهٔ راتناورا و میگودا [۳۲] مطابقت دارد. دلیل کاهش مقاومت با افزایش آلاینده را می‌توان این گونه بیان نمود که چنان‌که پیش‌تر گفته شد ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌های آلوده ممکن است متاثر از پارامترهای دیگری غیر از ضریب ثابت دی‌الکتریک هم است. در این‌باره می‌توان گفت گازوئیل دارای گرانروی بیش‌تری نسبت به آب است از این رو، سهولت جابه‌جایی ذرات در اثر اعمال بار در آن بیش‌تر است و در نتیجه مقاومت کاهش می یابد و هرچه درصد گازوئیل بیش‌تر باشد عمل جابه‌جایی بیش‌تر و در نتیجه کاهش مقاومت نیز بیش‌تر است. شکل ۸ تغیرات ساختمان میکرو خاک در حالت طبیعی و آلوده شده به ۵ و ۱۰٪ گازوئیل را نشان می‌دهد. چنان‌که در شکل ۸ الف ملاحظه می‌شود ذرات خاک به‌صورت ورقه‌ای در کنار یک‌دیگر قرار گرفته‌اند. لیکن در شکل‌های ۸ ب و ۸ ج مشاهده می‌شود ذرات خاک از حالت ورقه‌ای به حالت مجتمع تبدیل شده‌اند و نسبت به حالت طبیعی فضای بین ذرات بیش‌تر شده است. از مقایسه شکل‌های ۸ ب و ۸ ج نتیجه‌گیری می‌شود که تعداد ذرات به هم چسبیده و مجتمع در حالت آلودگی به ۱۰٪ گازوئیل بیش‌تر از آلودگی به ۵٪ گازوئیل است. هم‌چنین فضای بین ذرات در حالت آلودگی به ۱۰٪ گازوئیل بیش‌تر از آلودگی به ۵٪ گازوئیل است. بنابراین افزودن گازوئیل منجر به تغییر ساختار خاک شده است که این امر ناشی از اثر گازوئیل بر لایه مضاعف خاک است. به‌طوری‌که لایه مضاعف با افزودن گازوئیل کاهش می‌یابد و کاهش آن موجب پیدایش ساختمان جدید در خاک می‌شود. از این رو، می‌توان گفت که خاک در حالت آلوده به گازوئیل ساختمان فلوکوله پیدا کرده است و افزایش میزان فلوکوله شدن خاک نیز با افزایش درصد گازوئیل متناسب است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر گازوئیل بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک رسی با پلاستیسیته بالا بررسی شد. خاک مورد نظر با استفاده از روش‌های حرارتی و استفاده از سورفکتنت‌ها پاک‌سازی شد و سپس مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن با خاک طبیعی مقایسه شد. و این نتایج از این بررسی قابل برداشت است:

- افزودن گازوئیل به خاک موجب تغییر دانه‌بندی خاک از ریزدانه به درشت‌دانه می‌شود، و این تغییرات متناسب با درصد افزایش گازوئیل است به‌طوری‌که در ۱۰٪ آلودگی تغییرات از ۵٪ آلودگی بیش‌تر است.
- افزودن گازوئیل به خاک موجب تغییر پارامترهای تراکمی خاک و به‌خصوص درصد رطوبت بهینه می‌شود، به‌طوری‌که با آلودگی خاک طبیعی به ۵٪ گازوئیل به میزان کم‌تری از رطوبت بهینه نسبت به آلودگی خاک طبیعی به ۱۰٪ گازوئیل کاسته می‌شود.
- مقاومت خاک آلوده شده به گازوئیل کاهش می‌یابد، و این کاهش مقاومت با افزایش درصد گازوئیل متناسب است. به‌طوری‌که در آلودگی به ۵٪ گازوئیل کاهش مقاومت خاک طبیعی نسبت به ۱۰٪ گازوئیل کم‌تر است.
- در اثر اعمال روش حرارتی پارامترهای تراکمی خاک تغییر می‌کند به‌گونه‌ای که رطوبت بهینه افزایش می‌یابد و وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک کاهش می‌یابد.
- در پاک‌سازی خاک آلوده به ۵٪ گازوئیل به‌وسیلهٔ اعمال حرارت رطوبت بهینه افزایش و وزن واحد حجم خشک حداکثر افزایش می‌یابد اما با افزایش درجه حرارت در ۱۰٪ آلودگی به گازوئیل تغییراتی در این خصوص مشاهد می‌شود. این تغییرات در پاک‌سازی خاک به‌وسیلهٔ سورفکتنت‌های SDS و Tween 80 نیز قابل مشاهده است.
- مقاومت فشاری برای نمونه‌های پاک‌سازی شده از ۵٪ و ۱۰٪ گازوئیل با افزایش درجه حرارت افزایش می‌یابد و این افزایش برای آلودگی به ۵٪ گازوئیل بیش‌تر از آلودگی به ۱۰٪ گازوئیل است.
- نتایج پاک‌سازی نشان می‌دهد اعمال حرارت و استفاده از شوینده‌های سدیم دودسیل سولفات (SDS) و توین ۸۰ در پاک‌سازی خاک موثر است لیکن عملکرد شوینده‌ها در پاک‌سازی خاک از روش حرارتی مؤثرتر است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

منابع

1. Gao Y. Z., Ling W. T., "Comparison for plant uptake of phenanthrene and pyrene from soil and water", Biology and Fertility of soils, Vol. 42 (2006) 387-394.

2. Wilson S. C., Jones K. C., "Bioremediation of soil contaminated with poly-cyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review", Environmental Pollution Vol. 81 (1993) 229-249.

3. Collins K., McGown A., "The form and function of microfabric features in a variety of natural soils", Geotechnique, Vol. 24 (2) (1974) 223-254.

4. Cai Y., Shi B., Ng C. W. W., Tang C-S., "Effect of polypropylene fiber and lime admixture on engineering properties of clayey soil", Engineering Geology, Vol. 87 (2006) 230-240.

5. Tremblay H., Duchesne J., Locat J., Leroueil S., "Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39 (3) (2002) 535-546.

6. Botta D., Dotelli G., Biancardi R., Pelosato R., Natali Sora I., "Cement-clay pastes for stabilization/solidification of 2-chloroani-line", Waste management, Vol. 24(2) (2004) 207-216.

7. Estabragh A. R., Beytolahpour I., Moradi M., Javadi A. A., "Mechanical behavior of a clay soil contaminated with glycerol and ethanol", European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 20(5) (2016) 503-519.

8. Evgin E., Das B.M., "Mechanical behavior of an oil contaminated sand. In H. Usman and Y. Acar (Eds.)", Environmental Geotechno-logy, (1992) 101-108.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

9. Khamehchiyan M., Charkhabi A.H., Tajik M., "Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils", Engineering Geology, Vol. 89 (3-4) (2007) 220-229.
10. Singh S. K., Srivastava R. K., John S., "Settlement characteristic of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons"", Soil and Sediment Contamination, Vol. 17(3) (2008) 290-300.
11. Singh S. K., Srivastava R. K., Siby J., "Studies on soil contamination due to used motor oil and its remediation", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46 (2009) 1077-1083.
12. Ghadyani M., Hamidi A., Hatambeigi M., "Triaxial shear behavior of oil contaminated clays", European Journal of Environmental and civil Engineering, (2016) 1-24.
13. Olgun M., Yildiz M., "Effect of organic fluids on the geotechnical behavior of a highly plastic clayey soil", Applied clay science, Vol. 48(4) (2010) 615-621.
14. Matteo L., Bigotti F., Ricco R., "Compressibility of Kaolinitic clay contaminated by Ethanol-Gasoline Blends", Journal of Geotechni-cal and Geoenvironmental Engineering, Vol. 137 (9) (2011) 846-849.
15. Estabragh A. R., Khatibi M., Javadi A. A., "Effect of cement on treatment of a clay soil contaminated with Glycerol", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 28 (4) (2016) 04015157.
16. Eliss W. D., Payne J. R., Tatuni A.N., Freestone F. J., "The development of chemical countermeasures for hazardous waste contaminated soil", Conference of Hazardous Materials Spills, (1984) 116-125.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

17. EPA., "Remedial action at waste disposal site", EPA-625,6-85,006, Office of research and development, Handbook, EPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, (1985), Cincinnati, OH.

18. Meegoda N. J., Ratnaweera P., "Treatment of Oil Contaminated Soils for identification and classification", Geotechnical Testing Journal, Vol.18 (1995) 41-49.

19. Meegoda N. J., "Stabilization/Solidification of petroleum-contaminated soils with asphalt emulsions", Practice periodical of hazardous, toxic and radioactive waste management, Vol. 3(1) (1999) 46-55.

20. Boopathy R., "Factors limiting bioremediation technologies", Bioresource technology, Vol. 74 (2000) 63-67.

21. Wang M. C., Benway J. M., Aray ssi A. M., The effect of heating on engineering properties of clays, "Physico-chemical Aspects of soil and related materials", ASTM STP 1095 (1990) 139-158.

22. Kuhlman M. I., Greenfield T. M., "Simplified soil washing processes for a variety of soils", Journal of Hazardous Materials, Vol. 66 (1999) 31-45.

23. Griffiths R. A., "Soil washing technology and practice", Journal of Hazardous Materials, Vol. 40 (1995) 175-189.

24. Deshpande S., Shiau B. J., Wade D., Sabatini D. A., Harwell J. H., "Surfactant selection for enhancing ex situ soil washing", Water Resources. Vol. 33(2) (1999) 351-360.

25. Garon D., Krivobok S., Wouessidjewe D., Seigle-Murandi F., "Influence of surfactants on solubilization and fungal degradation of fluorine", Chemosphere, Vol. 47 (2002) 303-309.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]

26. Chun C. L., Lee J. J., Park J. W., "Solubilization og PAH mixtures by three different anionic surfactants, Environmental Pollution", Vol. 118 (2002) 307-313.

27. Mulligan C. N., Yong R. N., Gibbs B. F., "Surfactant enhanced remediation of contaminated soil: a review", Engineering Geology, Vol. 60 (2001) 371-380.

28. Lopez-Vizcaino R., Saez C., Canizares P., Rodrigo M. A., "The use of a combined process of surfactant-aided soil washing and coagulation for PAH contaminated soils treatment", Separation and Purification Technology. Vol. 88 (2012) 46-51.

29. Ahn C. K., Kim Y. M., Woo S. H., Park , J. M., "Soil washing using various nonionic Surfactants and their recovery by selective adsorption with activated carbon", Journal of Hazardous Materials, Vol. 154 (2008) 153-160.

30. Paterson I. F., Chowdhry B. Z., Leharne S. A., "Polycyclic aromatic hydrocarbon extraction from a coal tar-contaminated soil using aqueous solutions of nonionic surfactants", Chemosphere Vol 38 (13) (1999) 3095-3107.

31. Khosravi E., Ghasemzadeh H., Sabour M. R., Yazdani H., "Geotechnical properties of gas-oil contaminated Kaolinite", Engineering Geology. Vol. 166 (2013) 11-16.

32. Ratnaweera P., Meegoda J. N., "Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soil", Geotechnical testing Journal. Vol. 29 (2) (2006) 133-140.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.2.3.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.2.213]