

تأثیر روش‌های حرارتی و شستشو در پاکسازی یک خاک رسی آلوده به گازوئیل

محمود بابالار^{۱*}، علی رئیسی استبرق^۲، جمال عبدالهی علی بیگ^۳، غلامعلی وکیلی^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشیار دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. مربی دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۴. کارشناس دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۱۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۰/۵)

چکیده

در این پژوهش اثر حرارت و استفاده از دو نوع شوینده در پاکسازی یک خاک رسی آلوده شده به گازوئیل مورد بررسی قرار گرفت. یک خاک رسی طبیعی به صورت مصنوعی با درصد‌های گوناگون گازوئیل (۵٪ و ۱۰٪) آلوده گردید. سپس نمونه خاک آلوده شده در معرض حرارت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد مورد پاکسازی قرار گرفت. علاوه بر آن پاکسازی به وسیله شوینده‌های Tween 80 و SDS هم صورت پذیرفت. آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی شامل حدود اتربرگ، دانه‌بندی، تراکم و مقاومت تک محوری روی نمونه‌هایی از خاک طبیعی آلوده شده و خاک پاکسازی شده، از دو روش پیش گفته انجام گردید. نتایج نشان داد که افزودن گازوئیل موجب تغییراتی در اندازه ذرات، حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت خاک می‌گردد که این تغییرات تابعی از درصد گازوئیل است. علاوه بر این نتایج نشان داد که هر دو روش حرارتی و استفاده از شوینده در پاکسازی خاک به ویژه خاک حاوی ۵٪ گازوئیل مؤثر می‌باشد لیکن عملکرد شوینده‌ها در پاکسازی خاک مؤثرتر است. با افزایش درصد آلاینده از ۵٪ به ۱۰٪ عملکرد هر دو روش به ویژه مواد شوینده کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: گازوئیل، خاک رس، پاکسازی، روش حرارتی، شستشو، آلودگی

مقدمه

آلودگی یک ماده یا ترکیب شیمیایی است که در بلندمدت یا کوتاه‌مدت زندگی انسان و محیط زیست را به خطر می‌اندازد (Estabragh et al. 2014). رشد سریع صنایع و توسعه مناطق شهری در کشورهای صنعتی و توسعه یافته موجب آلودگی خاک و آب گردیده و در حال حاضر یکی از مسائل مهم زیست محیطی برای بشر محسوب می‌گردد. آلودگی می‌تواند بوسیله آلاینده‌های معدنی (فلزات سنگین و...) یا آلاینده‌های آلی (هیدروکربن‌های نفتی و مشتقات آن‌ها) بوجود آید. آلاینده‌های هیدروکربنی نفتی معمولاً به صورت DNAPLs (مواد سنگین‌تر از آب) و LNAPLs (مواد سبک‌تر از آب) در محیط یافت می‌شوند (Estabragh et al. 2014). می‌توان گفت آلودگی خاک به صورت یک پتانسیل خطرناک در مقابل سلامتی زندگی انسان و محیط اطراف مطرح است.

در بسیاری از موارد مواد زائد بدون توجه خاصی به داخل زهکش‌ها ریخته می‌شوند و یا در محل‌های نامناسب انبار

می‌شوند که این امر سبب آلوده شدن خاک طبیعی می‌گردد (Kiem et al., 2003). خاک محیطی پیچیده و در تقابل همیشگی با عوامل محیطی مانند آب و هوا می‌باشد (Schwarzenbach et al., 2003). در نتیجه آلودگی خاک می‌تواند منجر به آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی و نیز هوا شود (Fent. 2003). آلودگی خاک به مواد هیدروکربنی نفتی ممکن است ناشی از نشت این مواد از مخازن نفتی ساخته شده زیرزمینی یا روزمینی باشد. به گونه‌ای که EPA (1988) اعلام نمود در حدود ۲۵ درصد از مخازن نفتی در آمریکا، مسئله نشت وجود دارد. تخریب تصادفی خطوط انتقال مواد نفتی و پالایشگاه‌ها و همچنین ورود فاضلاب پالایشگاه‌ها به محیط خاک نیز موجب آلودگی خاک می‌شود. مواد آلاینده وقتی وارد خاک می‌شوند برحسب نوع دانه‌بندی خاک، معمولاً جذب ذرات خاک می‌گردند و یا در فضای بین ذرات قرار می‌گیرند. بنابراین واکنش خاک با مواد آلاینده نه تنها وابسته به شرایط محیطی است بلکه عواملی مانند دانه‌بندی، تبادل یونی و نوع کاتیون‌های خاک نیز در این رابطه تأثیر گذارند (Fang.1997).

هیدروکربنی هستند (Singh et al. 2009). شوینده‌های مورد استفاده در پاکسازی خاک مشابه دترجنت‌ها می‌باشند که محصولی از هیدروکربن‌های پارافینی موجود در نفت هستند. در این ترکیبات الکل‌های یک عاملی شامل ۱۲ تا ۲۰ کربن را بوسیله اسید سولفوریک بصورت یک ترکیب سولفات اسید در می‌آورند که دارای قدرت انحلال زیادی می‌باشند. مولکول آن‌ها دارای یک بخش با بار مثبت و بخشی دیگر با بار منفی است. شوینده‌های مورد استفاده در پاکسازی خاک اکثراً ترکیبات آلی هستند که متشکل از دو بخش آب‌دوست و غیر آب‌دوست می‌باشند (Mehrasebi et al. 2013) که بخش غیر آب‌دوست به هیدروکربن متصل شده و قسمت آب‌دوست در آب قرار می‌گیرد و به معلق ماندن و حل شدن آلودگی در آب کمک می‌کند و در نتیجه آلودگی به صورت امولسیون در آمده و با آب خارج می‌گردد. محلول شوینده را می‌توان از خاک جدا نمود و یا می‌توان با روش تغییر شرایط شیمیایی و ترکیب این مواد با مواد هیدروکربنی موجود در خاک و نهایتاً رسوب نمک حاصل در محیط مورد نظر، از آلودگی آب جلوگیری کرد. عوامل اصلی در انتخاب شوینده جهت پاکسازی خاک آلوده را می‌توان محلول بودن در آب در دمای معمولی، جذب کمتر به خاک، مؤثر بودن در غلظت کم (کمتر از ۳٪)، سمی نبودن برای انسان و گیاه و حیوان و اقتصادی بودن را نام برد (Mulligan et al. 2001). پژوهشگرانی مانند (Singh et al. 2009) از سورفکتانت SDS در پاکسازی خاک آلوده به روغن موتور استفاده کردند و گزارش کردند این ماده در پاکسازی خاک بسیار مؤثر بوده است. اخیراً محققینی مانند (Seid Razavi et al. 2011 و Golshan et al. 2014) اثر بیوسورفکتانت‌ها (شوینده های زیستی) را در پاکسازی خاک آلوده به نفت خام و گازوئیل مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گیری نمودند این نوع شوینده ها در پاکسازی خاک بسیار مؤثر هستند.

پاکسازی خاک‌های آلوده به مواد آلاینده یکی از مسائل مهم زیست محیطی است که بر حیات جانوران و نباتات تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش یک خاک رسی به صورت مصنوعی به مقادیر ۵٪ و ۱۰٪ گازوئیل آلوده گردید و سپس خاک آلوده شده از روش حرارتی و استفاده از مواد شوینده مورد پاکسازی قرار گرفت. مقایسه میان ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی (حدود اتربرگ، دانه‌بندی خاک، تراکم و مقاومت تک‌محوری) خاک پاکسازی شده و خاک طبیعی انجام گرفت تا مشخص شود کدام یک از روش‌های مورد استفاده قادر است خاک را به حالت اولیه خود نزدیک کند. همچنین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی (دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت) خاک آلوده به

پاکسازی خاک‌های آلوده به مواد هیدروکربنی نفتی همواره مورد توجه محققین بوده و روش‌هایی در این زمینه ارائه گردیده است (Chu and Kwan. 2003). پاکسازی خاک آلوده در محل انجام می‌گیرد و یا اینکه خاک به محل دیگری منتقل و در آنجا ایزوله (جداسازی) می‌گردد به گونه‌ای که بعداً مورد پاکسازی قرار می‌گیرد و یا اینکه در آنجا دفن می‌شود. روش‌های متعددی برای پاکسازی خاک در حالت درجا و یا غیر درجا پیشنهاد شده است (Eliss et al. 1984; EPA. 1985) که شامل روش‌های بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی می‌باشد. انتخاب روش پاکسازی علاوه بر مسائل اقتصادی به عواملی مانند نوع خاک، درجه اشباع، وضعیت زمین شناسی (ابعاد گسترش آلودگی، شرایط آب زیرزمینی، شرایط آب و هوایی و نوع آلودگی) بستگی دارد. بنابراین با توجه به شرایط موجود همواره می‌توان بهترین روش پاکسازی را انتخاب نمود. از میان روش‌های ذکر شده کاربرد روش بیولوژیک احتیاج به زمان طولانی دارد و از طرفی اجرای آن در آزمایشگاه‌های ژئوتکنیک به علت نیاز به ادوات و لوازم ویژه امکان‌پذیر نمی‌باشد. استفاده از روش شیمیایی موجب وقوع تعدادی واکنش‌های شیمیایی برگشت ناپذیر در خاک می‌گردد که به‌عنوان روش Solidification/Stabilization می‌باشد. این روش بیشتر جهت تثبیت آلاینده و جلوگیری از انتقال آن به لایه‌های زیرین و منابع آب زیرزمینی انجام می‌پذیرد. روش‌های فیزیکی موجود شامل شستشو، اعمال حرارت، یا بخار، استفاده از شوینده‌ها و ... می‌باشد.

گروهی از پژوهشگران معتقدند استفاده از روش حرارتی موجب تغییر ماهیت خاک (حدود اتربرگ و ...) می‌شود. لیکن (Wang et al. 1990) از پژوهش‌های خود نتیجه‌گیری کردند که اعمال حرارت تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در تغییر ماهیت خاک تأثیری ندارد.

روش شستشو (Washing and Flushing) نیز برای پاکسازی خاک‌های آلوده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش تزریق مواد شستشو دهنده از طریق ترانشه‌های سطحی، زهکش‌های افقی یا عمودی در داخل خاک آلوده صورت می‌پذیرد که تحت عنوان شستشوی درجا هم نامیده می‌شود. در این روش آب یا مخلوط آب و ماده افزودنی جهت عمل شستشو و حل ماده آلاینده بکار می‌رود. راندمان پاکسازی خاک به نفوذپذیری آن بستگی دارد به گونه‌ای که در نتیجه نفوذپذیری بیشتر نتایج بهتری حاصل خواهد شد. محلول بودن ماده آلاینده در آب نیز یکی از عواملی است که در راندمان پاکسازی تأثیر زیادی دارد (Mulligan et al. 2001). شوینده‌ها (Surfactants) دارای کاربرد زیادی در زمینه پاکسازی خاک‌های آلوده به مواد

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده

مقدار	استاندارد	مشخصه
۲/۶۷	ASTM-D-۸۵۴	وزن مخصوص دانه‌های جامد (G_s)
۱۵/۲		ماسه (%)
۵۹/۰		سیلت (%)
۲۵/۴		رس (%)
۴۰/۰		حد روانی (LL) (%)
۲۰/۰	ASTM-D-۴۳۱۸	حد خمیری (PL) (%)
۲۰/۰		نشانه خمیری (PI) (%)
CL	ASTM-D-۲۴۸۷	طبقه‌بندی متحد (USCS)
۱۷/۳		درصد رطوبت بهینه (W_{opt}) (%)
۱۷/۵		وزن واحد حجم خشک حداکثر (γ_{dmax}) (kN/m^3)

جدول ۲- مشخصات شیمیایی خاک مورد استفاده

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

جدول ۳- مشخصات SDS

مقدار	واحد اندازه‌گیری	مشخصه
Sodium Dodecyl Sulfate	-	نام
$NaC_{12}H_{25}SO_4$	-	فرمول شیمیایی
۲۸۸/۵	g	وزن مولکولی
Anionic	-	کلاس شوینده
۶-۸	mM	حد بحرانی تشکیل مایسل

جدول ۴- مشخصات Tween 80

مقدار	واحد اندازه‌گیری	مشخصه
Tween 80	-	نام
$C_{64}H_{124}O_{26}$	-	فرمول شیمیایی
۱۳۱۰	g	وزن مولکولی
Nonionic	-	کلاس شوینده
۰/۰۱۲	mM	حد بحرانی تشکیل مایسل

گازوئیل نیز مورد بررسی قرار گرفت تا علل تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی آن مشخص گردد.

بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که معمولاً ارزیابی درجه پاکسازی خاک‌های آلوده شده به فلزات یا هیدروکربن‌های نفتی از روش GC (کروماتوگرافی گازی) صورت می‌پذیرد. این در حالی است که مطالعه درباره ارزیابی پاکسازی از طریق اندازه‌گیری عوامل فیزیکی و مکانیکی خاک پاکسازی شده بسیار محدود می‌باشد. بنابراین هدف از این تحقیق عبارت است از بررسی درجه پاکسازی یک خاک آلوده شده به درصد‌های مختلف گازوئیل از طریق اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و مکانیکی (دانه بندی، حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت) خاک. اندازه‌گیری این پارامترها برای خاک طبیعی و خاک پاکسازی شده و مقایسه با یکدیگر نشان‌دهنده میزان پاکسازی خاک خواهد بود.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این پژوهش خاک، گازوئیل، آب و سورفکتانت‌های SDS و Tween 80 می‌باشند که ویژگی‌های آن‌ها به شرح زیر است.

الف) خاک

در این پژوهش از یک خاک رسی که مطابق طبقه‌بندی Unified از نوع CL (رس با پلاستیسیته پایین) می‌باشد استفاده شده است. نتایج آزمایش تراکم خاک رس با پلاستیسیته پایین نشان داد این خاک دارای حد روانی ۴۰ درصد، حد خمیری ۲۰ درصد و شاخص خمیری ۲۰ درصد می‌باشد. نتایج آزمایش تراکم استاندارد این خاک نشان داد که رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه این خاک به ترتیب برابر ۱۷/۳ درصد و $17/5 \text{ KN/m}^3$ می‌باشد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده مطابق با استاندارد ASTM تعیین گردیده و به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.

ب) گازوئیل

گازوئیل به عنوان ماده آلاینده مورد استفاده قرار گرفته و مطابق اطلاعات ارائه شده توسط شرکت ملی نفت دارای ثابت دی‌الکتریک ۲ در ۷۰ درجه فارنهایت و جرم واحد حجم $860-820 \text{ Kg/m}^3$ و نقطه جوش ۳۸۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

ج) شوینده

در این کار پژوهشی از یک شوینده آنیونی با نام Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) و یک شوینده غیر یونی با نام Tween 80 در پاکسازی خاک استفاده شده است. مشخصات شوینده‌های مورد نظر در جداول ۳ و ۴ آورده شده است.

تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

(1995; Meegoda and Ratnaweera, 2009) استفاده شده است. شوینده مورد نظر در آب حل شده و سپس رطوبت خاک تا حد روانی افزایش یافت و مخلوط خاک و سورفکتانت حاصل به مدت ۲ ساعت به طور مداوم هم‌زده شد به گونه‌ای که اختلاط کامل میان خاک و سورفکتانت صورت پذیرفت. پس از طی زمان لازم برای ته نشینی خاک، مایع تجمع یافته روی سطح خاک بوسیله سیفون تخلیه گردید. عمل ته نشینی برای خاک چند روز طول کشید و سپس خاک در هوای آزاد خشک شد و آزمایش‌های مورد نظر روی آن انجام شد.

پاکسازی بوسیله حرارت

نمونه‌های خاک آلوده شده به گازوئیل در دماهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ به مدت یک هفته در آون قرار داده شد و سپس نمونه مورد نظر از آون خارج شد و در دمای آزمایشگاه قرار داده شد و آزمایش‌های مورد نظر روی آن انجام گرفت.

نتایج

جداول شماره ۵ و ۶ نتایج حدود اتربرگ (LL, PL, PI) را برای خاک طبیعی و خاک حاوی ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل نشان می‌دهد. علاوه بر این در این جداول نتایج حدود اتربرگ برای خاک پاکسازی شده از گازوئیل با اعمال درجه حرارت‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ و نیز استفاده از شوینده‌های SDS و Tween 80 آورده شده است. همان‌گونه که در این جداول نشان داده شده است، حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و شاخص خمیری (PI) برای خاک طبیعی به ترتیب ۴۰، ۲۰ و ۲۰ درصد می‌باشد، لیکن این مقادیر برای خاک اختلاط یافته با ۵٪ گازوئیل معادل ۵۰، ۲۲ و ۲۸ تغییر یافته و برای خاک حاوی ۱۰٪ گازوئیل برابر ۵۶، ۳۰ و ۲۶ درصد گردیده است. مقایسه نتایج مذکور با نتایج بدست آمده برای خاک طبیعی نشان دهنده آن است که افزودن گازوئیل موجب افزایش این حدود گردیده است و این افزایش تابعی از افزایش درصد گازوئیل در خاک می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد حدود اتربرگ به‌ویژه حدروانی برای خاک پاکسازی شده با اعمال درجه حرارت تغییر می‌نماید. به‌طوری که حدود اتربرگ برای خاک پاکسازی شده که حاوی ۵٪ گازوئیل است با اعمال درجه حرارت ۱۵۰ °C برابر LL=31% و PL=25% و PI=6% می‌باشد. و این حدود در همین درجه حرارت برای خاک پاکسازی شده از خاک اختلاط یافته با ۱۰٪ گازوئیل به ترتیب معادل ۳۷، ۲۰ و ۱۷ درصد گردید. این تغییرات برای سایر درجه حرارت‌های اعمال شده نیز مشاهده گردید. حدود اتربرگ خاک پاکسازی شده با استفاده از شوینده‌های SDS و Tween 80 نیز نسبت به خاک طبیعی کاهش می‌یابد (جدول‌های ۵ و

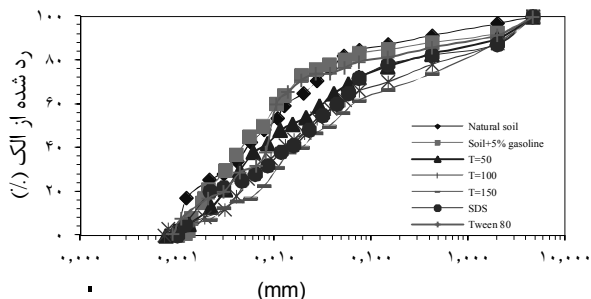
نمونه‌های مورد استفاده شامل خاک طبیعی، خاک آلوده به گازوئیل و خاک پاکسازی شده می‌باشند. در تهیه نمونه‌های آلوده شده به گازوئیل درجه آلودگی به عنوان درصدی از وزن آلاینده به مخلوط خاک خشک شده در هوا اضافه گردید. در تهیه نمونه‌ها آلودگی به میزان ۵٪ و ۱۰٪ وزنی خاک در نظر گرفته شده است. انتخاب درجه آلودگی ۵٪ و ۱۰٪ به این دلیل می‌باشد که حداقل آلودگی به میزان ۳٪ مطابق طبقه‌بندی ایالت نیوجرسی آمریکا (Pincus et al. 1995) به‌عنوان ماده زیان‌آور در محیط زیست در نظر گرفته شده است. با محاسبه وزن آلاینده (گازوئیل)، آلاینده مورد نظر به صورت اسپری روی ۶ کیلوگرم خاک دارای رطوبت اولیه ۳٪ که در یک سینی مخصوص قرار گرفته بود پخش و هم‌زمان عمل اختلاط صورت پذیرفت. مخلوط حاصل به مدت یک هفته جهت انجام واکنش‌های شیمیایی بین خاک و آلاینده در یک کیسه پلاستیکی نگهداری شد. سپس تراکم استاندارد بر روی نمونه‌های خاک طبیعی آلوده‌شده به گازوئیل و پاکسازی‌شده انجام و وزن واحد حجم خشک حداکثر و رطوبت بهینه برای آنها تعیین گردید. آماده‌سازی نمونه‌های اصلی برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، از روش تراکم استاتیکی با توجه به رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حداکثر حاصل از آزمایش تراکم استاندارد مربوط، صورت پذیرفت. قالب مورد استفاده در آزمایش تراکم استاتیکی دارای طول و قطر داخلی به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر بوده و عمل تراکم با استفاده از یک دستگاه بارگذاری با سرعت ۱/۵ mm/min انجام شد و بنابراین نمونه‌های حاصل دارای قطر و ارتفاع ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند.

آزمایش‌ها

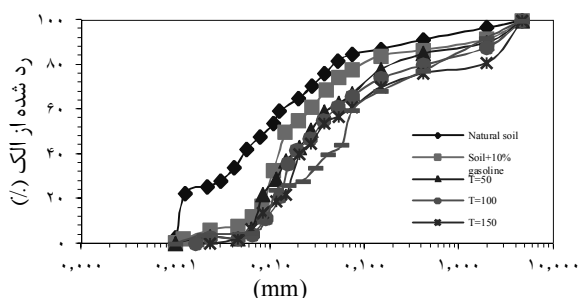
آزمایش‌های انجام شده شامل آزمایش‌های حدود اتربرگ، دانه بندی، تراکم و مقاومت فشاری برای نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده شده به گازوئیل و خاک پاکسازی شده می‌باشند. این آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ASTM صورت پذیرفت. در آزمایش تک‌محوری که برای تعیین مقاومت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت سرعت بارگذاری ۱ mm/min در نظر گرفته شد. سپس تغییرات بار اعمال شده و تغییر طول ایجاد شده بطور مرتب تا لحظه گسیختگی نمونه ثبت گردید.

پاکسازی بوسیله شوینده

جهت پاکسازی نمونه‌های آلوده به گازوئیل به اندازه ۲۵٪ وزن آلاینده از شوینده Tween 80 و ۵۰٪ وزن آلاینده از شوینده SDS مطابق روش توصیه شده توسط (Singh et



شکل ۱ - منحنی‌های دانه‌بندی برای خاک طبیعی، خاک آلوده به ۵٪ گازوئیل و خاک پاکسازی شده با روش‌های حرارتی و شوینده



شکل ۲ - منحنی‌های دانه‌بندی برای خاک طبیعی، خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل و خاک پاکسازی شده با روش‌های حرارتی و شوینده

۶). لیکن کاهش تغییرات مذکور برای شوینده SDS خیلی قابل ملاحظه نمی‌باشد. منحنی‌های دانه‌بندی خاک طبیعی، خاک اختلاط یافته با گازوئیل (۵ و ۱۰ درصد) به همراه منحنی‌های دانه‌بندی خاک پاکسازی شده بوسیله اعمال حرارت (T=50, 100, 150) و نیز استفاده از شوینده‌های SDS و Tween 80 در اشکال شماره ۱ و ۲ نشان داده شده است. در جدول‌های شماره ۵ و ۶ درصد رس، سیلت و ماسه استخراج شده از منحنی‌های دانه‌بندی یادشده آورده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد خاک طبیعی دارای ۲۵/۴ درصد رس ۵۹/۳ درصد سیلت و ۱۵/۲۸ درصد ماسه می‌باشد لیکن این مقادیر برای خاک شامل ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل عبارت از ۲۱٪ رس، ۶۲/۳۷ سیلت و ۱۶/۶۳٪ ماسه می‌باشد. مقایسه درصد‌های تشکیل‌دهنده یادشده نشان می‌دهد که افزودن گازوئیل به خاک موجب کاهش درصد رس و افزایش درصد سیلت و ماسه توده خاک می‌گردد و این تغییرات تابعی از افزایش درصد وزنی گازوئیل است.

جدول ۵- پارامترهای فیزیکی بدست آمده از آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت برای خاک آلوده به ۵٪ گازوئیل

مواد	رس (%)	سیلت (%)	ماسه (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	$\gamma_{dmax}(KN/m^3)$	$w_{opt}(\%)$	$q_a (kPa)$	$\epsilon_a(\%)$
خاک طبیعی CL	۲۵/۴	۵۹/۳۲	۱۵/۲۸	۴۰	۲۰	۲۰	۱۷/۵	۱۷/۳	۱۹۱	۶/۲
خاک + ۵٪ گازوئیل	۲۱	۶۲/۳۷	۱۶/۶۳	۵۰	۲۲	۲۸	۱۷	۱۸	۱۶۵	۷/۶
T= ۵۰ °C	۱۳	۵۷/۳	۲۷/۷	۳۷	۲۵	۱۲	۱۷/۶	۱۶/۳	۱۷۱	۷/۴۲
T= ۱۰۰ °C	۸/۲	۵۷/۸	۳۴	۳۳	۲۵	۸	۱۷/۷۱	۱۶/۲	۱۷۹	۷/۲۵
T= ۱۵۰ °C	۷/۴	۵۴/۵	۳۸/۱	۳۱	۲۵	۶	۱۷/۷۳	۱۶/۲	۱۸۱/۸	۵/۳۵
SDS	۲۰	۵۲	۲۸	۴۱	۲۷	۱۴	۱۷/۲۵	۱۷/۲	۲۱۹/۳	۵/۴
Tween 80	۱۷	۶۲	۲۱	۳۴	۲۲	۱۲	۱۷/۲	۱۶/۵	۱۹۲	۵/۴

جدول ۶- پارامترهای فیزیکی بدست آمده از آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت برای خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل

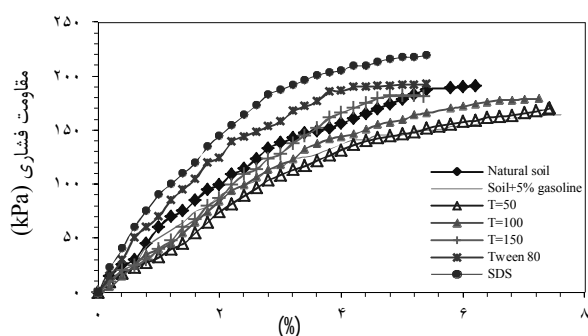
مواد	رس (%)	سیلت (%)	ماسه (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	$\gamma_{dmax}(KN/m^3)$	$w_{opt}(\%)$	$q_a (kPa)$	$\epsilon_a(\%)$
خاک + ۱۰٪ گازوئیل	۶	۷۲	۲۲	۵۶	۳۰	۲۶	۱۷/۱۶	۱۴	۱۱۱/۲	۶/۳۵
T= ۵۰ °C	۳/۱	۶۴/۱	۳۲/۸	۴۲	۲۲	۲۰	۱۷/۱۲	۱۴/۸۳	۱۲۱	۶/۲
T= ۱۰۰ °C	۲/۷	۶۳/۳	۳۴	۳۹	۲۱	۱۸	۱۷/۵	۱۵	۱۳۰	۶/۱
T= ۱۵۰ °C	۰	۶۱	۳۹	۳۷	۲۰	۱۷	۱۷/۸	۱۶/۲۱	۱۵۰	۵/۸
SDS	۴	۶۰	۳۶	۴۰	۲۲	۱۸	۱۷/۱۴	۱۴/۷۱	۱۱۹/۸	۶
Tween 80	۰	۶۷/۹۹	۳۲/۰۱	۳۸	۲۱	۱۷	۱۷/۱۸	۱۴/۶۵	۱۲۲/۷	۵/۸

شده بوسیله حرارت است. شکل‌های شماره ۳ و ۴ منحنی تراکم را برای خاک طبیعی، خاک اختلاط یافته با ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل و نیز خاک پاکسازی شده بوسیله اعمال حرارت در درجه حرارت‌های گوناگون و نیز استفاده از شوینده‌های SDS و Tween 80 نشان می‌دهد.

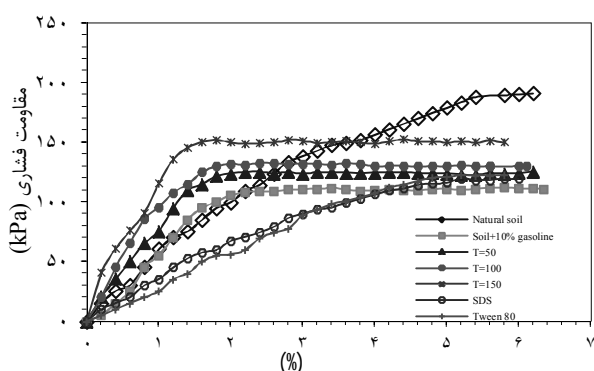
مقادیر وزن واحد حجم بیشینه و رطوبت بهینه در حالات

نتایج مقادیر درصد‌های رس سیلت و ماسه بدست آمده برای خاک پاکسازی شده با حرارت نیز نشان می‌دهد که درصد رس توده خاک نسبت به خاک طبیعی و خاک اختلاط یافته با ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل کاهش یافته لیکن تغییرات درصد ماسه در آن‌ها سیر افزایشی دارد. نتایج مربوط به خاک بهسازی شده بوسیله شوینده‌های SDS و Tween 80 نیز مشابه خاک بهسازی

در جداول ۵ و ۶ مقدار مقاومت نهایی نمونه‌ها و کرنشی که متناظر با آن در نمونه گسیختگی روی داده است، بیان شده است. این اطلاعات نشان می‌دهد که مقاومت نهایی خاک طبیعی ۱۹۱ kPa در کرنش ۶/۲٪ می‌باشد. لیکن این مقدار برای خاک حاوی ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل به ۱۶۵ kPa و ۱۱۱/۲ تبدیل می‌گردد. مقایسه این اعداد نشان می‌دهد که افزایش گازوئیل موجب کاهش مقاومت نهایی خاک می‌گردد و این مقدار تابع افزایش درصد وزنی گازوئیل می‌باشد. مقاومت نهایی خاک بهسازی شده بوسیله حرارت نشان می‌دهد که مقاومت آن نسبت به خاک آلوده به گازوئیل (۵ و ۱۰ درصد) افزایش می‌یابد و این افزایش تابعی از افزایش درجه حرارت است به گونه‌ای که مقاومت نهایی نمونه خاک پاکسازی شده از ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل در دمای اعمال شده ۱۵۰°C معادل ۱۸۱/۸ و ۱۵۰ kPa می‌باشد در حالی که مقادیر مقاومت نهایی برای خاک پاکسازی شده و از ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل به وسیله Tween 80 برابر ۱۹۲ kPa و ۱۲۲/۷ kPa بدست آمده است.



شکل ۵ - منحنی‌های تنش-کرنش برای خاک طبیعی، خاک آلوده شده به ۵٪ گازوئیل، خاک پاکسازی شده بوسیله حرارت و شوینده

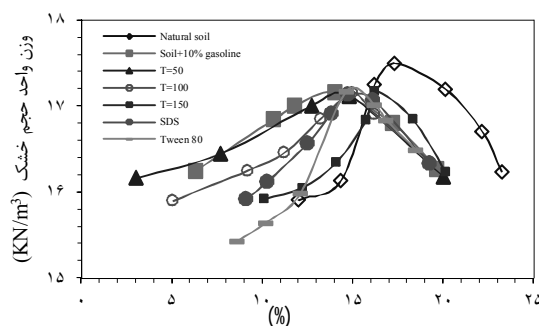


شکل ۶ - منحنی‌های تنش-کرنش برای خاک طبیعی، خاک آلوده شده به ۱۰٪ گازوئیل، خاک پاکسازی شده بوسیله حرارت و شوینده

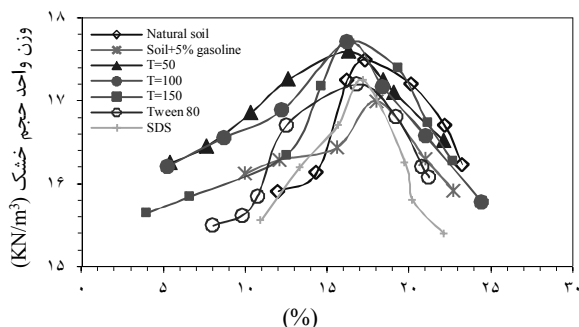
بحث

ذرات رس در هر حالت (خشک و یا تر) حامل بار منفی می‌باشند و می‌توانند ذرات با بار مثبت را جذب نمایند به گونه‌ای که

گونگون خاک در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. همان گونه که در نمودارها و جداول یادشده مشاهده می‌شود رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه برای خاک طبیعی برابر ۱۷/۳٪ و $17/5 \text{ KN/m}^3$ می‌باشد. این مقادیر برای خاک حاوی ۵٪ گازوئیل برابر ۱۸٪ و 17 KN/m^3 گردید لیکن برای خاک اختلاط یافته با ۱۰٪ گازوئیل به ۱۴٪ و $17/16 \text{ KN/m}^3$ تغییر یافت. این پارامترهای تراکمی برای خاک پاکسازی شده از گازوئیل بوسیله اعمال حرارت و استفاده از شوینده‌ها نیز تغییر می‌نماید. به گونه‌ای که اعمال حرارت موجب می‌گردد خاک پاکسازی شده رطوبت بهینه کمتر و وزن واحد حجم خشک بیشینه بیشتری نسبت به خاک طبیعی داشته باشد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه برای خاک پاکسازی شده از ۵ درصد گازوئیل با استفاده از شوینده SDS معادل ۱۷/۲٪ و $17/25 \text{ KN/m}^3$ است لیکن استفاده از شوینده Tween 80 موجب تغییر این پارامترهای تراکمی به ۱۶/۵٪ و $17/2 \text{ KN/m}^3$ گردیده است. نتایج تراکمی خاک پاکسازی شده از ۱۰٪ گازوئیل با استفاده از محلول SDS نشان می‌دهد رطوبت بهینه به ۱۴/۷٪ و وزن واحد حجم خشک بیشینه به $17/4 \text{ KN/m}^3$ تغییر می‌یابد اما استفاده از Tween 80 در پاکسازی خاک پیش گفته باعث می‌گردد که رطوبت بهینه به ۱۴/۶۵٪ و وزن واحد حجم خشک خاک به $17/18 \text{ KN/m}^3$ تبدیل گردد.



شکل ۳ - منحنی‌های تراکم برای خاک طبیعی، خاک آلوده شده به ۱۰٪ گازوئیل، خاک پاکسازی شده بوسیله حرارت و شوینده



شکل ۴ - منحنی‌های تراکم برای خاک طبیعی، خاک آلوده شده به ۵٪ گازوئیل، خاک پاکسازی شده بوسیله حرارت و شوینده

ساختمان فلکوله (دانه‌ای شدن) خاک‌ریز دانه که به آن اشاره شد مطابقت ندارد. می‌توان گفت افزودن گازوئیل به خاک موجب افزایش گرانیروی مخلوط می‌گردد و این افزایش موجب می‌گردد مخلوط یاد شده نیروی مقاومی در برابر روان شدن از خود نشان دهد که این امر باعث افزایش حد روانی می‌گردد.

حدود اتربرگ برای خاک پاکسازی شده بوسیله حرارت، نشان می‌دهد که LL به ویژه با افزایش درجه حرارت کاهش می‌یابد و مقایسه این حدود برای درصد‌های آلاینده ۵ و ۱۰ درصد نشان می‌دهد که کاهش مقدار LL برای ۵٪ گازوئیل در دماهای گوناگون نسبت به ۱۰٪ بیشتر است. این مورد را می‌توان چنین توجیه کرد که در درجه حرارت ثابت مقدار مشخصی از گازوئیل تبخیر می‌گردد. لذا برای ۱۰٪ گازوئیل مقدار باقیمانده آن در خاک پاکسازی شده نسبت به ۵٪ به بیشتر است. وجود درصدی از گازوئیل (گازوئیل باقیمانده در خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل) موجب می‌گردد که توده خاک دارای گرانیروی بیشتری نسبت به خاکی که مقدار اولیه گازوئیل آن ۵٪ بوده گردد و در برابر روان شدن از خود مقاومت بیشتری نشان دهد. همان گونه که در جداول ۵ و ۶ مشاهده می‌گردد حد روانی خاک حاوی ۱۰٪ گازوئیل بهسازی شده در اثر حرارت بیشتر از خاک بهسازی شده با ۵٪ گازوئیل است. در خاک‌های بهسازی شده بوسیله شوینده SDS و Tween 80 مقدار حد روانی مشابه خاک طبیعی است و لیکن آزمایش تراکم استاندارد نشان می‌دهد که خاک آلوده شده به ۵٪ گازوئیل دارای وزن واحد حجم خشک حداکثر 17 KN/m^3 و رطوبت بهینه ۱۸٪ می‌باشد؛ اما در خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل مقادیر وزن واحد حجم خشک حداکثر و رطوبت بهینه به ترتیب به $17/16 \text{ KN/m}^3$ و ۱۴٪ می‌گردد که کاهش در مقادیر پارامترهای تراکمی به ویژه رطوبت بهینه مشاهده می‌شود. می‌توان گفت در حالت خاک آلوده به ۱۰٪ گازوئیل بخش زیادی از فضای بین ذرات نسبت به ۵٪ گازوئیل از ماده آلاینده پر شده و این امر موجب می‌گردد که در درصد رطوبت کمتری نسبت به ۵٪ گازوئیل خاک به نقطه بهینه برسد.

پارامترهای تراکمی (رطوبت بهینه، وزن واحد حجم خشک حداکثر) خاک پاکسازی شده بوسیله SDS و Tween80 برای ۵٪ گازوئیل مشابه خاک طبیعی است لیکن برای ۱۰٪ این مقادیر به ویژه مقادیر رطوبت بهینه اختلاف قابل ملاحظه‌ای با خاک طبیعی دارند به گونه‌ای که رطوبت بهینه خاک طبیعی ۱۷/۳٪ است که برای SDS و Tween 80 رطوبت بهینه به ترتیب به ۱۴/۷۱٪ و ۱۴/۶۵٪ تغییر می‌یابد؛ که این امر می‌تواند ناشی از آن باشد که در این حالت مقداری از گازوئیل در فضای بین ذرات باقی‌مانده و عمل پاکسازی به طور کامل صورت نپذیرفته

یون‌های مثبت محکم به سطح ذرات رس می‌چسبند. معمولاً وجود کاتیون‌ها در اطراف ذرات رس برای خنثی نمودن بار منفی آن‌ها ضروری می‌باشند. در هر حال مجموعه‌ای از کاتیون‌ها و آنیون‌ها در اطراف ذره رس وجود دارند که با افزودن آب به خاک، آن‌ها در این محلول به صورت 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 نامگذاری شده است. به هر حال DDL روی سطح خارجی ذرات رس تشکیل می‌گردد 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 می‌گردد.

Fang برای بیان واکنش یک خاک نسبت به یک آلاینده آلی در سال ۱۹۹۷ ضریبی را بنام شاخص حساسیت معرفی کرد که مقدار آن بین ۱-۰ تعیین گردید. مقدار این شاخص برای خاک‌های دانه‌ای بین ۰/۱-۰/۰۱ و برای خاک‌های رسی بین ۰/۹-۰/۶ می‌باشد. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد نشان دهنده واکنش بیشتر خاک نسبت به آلاینده است. بنابراین در خاک‌های دانه‌ای واکنش خاصی بین آلاینده و ذرات خاک صورت نمی‌پذیرد. آلاینده در فضای بین ذرات قرار می‌گیرد و یا به صورت پوششی سطوح ذرات را پوشش می‌دهد. با توجه به مقدار این شاخص نتیجه‌گیری می‌شود که در مورد خاک‌های چسبنده واکنش‌هایی بین ذرات خاک و ماده آلاینده صورت می‌پذیرد به گونه‌ای که نتیجه این واکنش‌ها افزایش نیروی جاذبه و کاهش ضخامت لایه مضاعف است. این مقدار کاهش ضخامت لایه مضاعف با ضریب ثابت دی‌الکتریک آلاینده متناسب می‌باشد. تغییر در ضخامت لایه مضاعف موجب تغییر در ساختمان خاک می‌شود به گونه‌ای که کاهش در ضخامت لایه مضاعف موجب ایجاد ساختمان فلکوله در خاک می‌گردد. در این نوع ساختار ذرات خاک از طریق سطوح، گوشه و لبه‌ها به یکدیگر وصل می‌شوند. به عبارت دیگر ذرات به هم می‌چسبند و ذرات درشت‌تر تشکیل می‌شود.

نتایج حدود اتربرگ برای خاک آلوده شده به ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل نشان داد که حد روانی آن‌ها نسبت به خاک طبیعی افزایش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های پژوهشگران دیگری مانند (Khosravi et al. 2013) مطابقت دارد. آنها نیز دریافتند با افزودن گازوئیل به خاک تا مقدار ۱۲٪ حد روانی افزایش یافته و افزایش درصد گازوئیل بیش از ۱۲٪ کاهش حد روانی را به دنبال خواهد داشت. بنابراین این نتایج با فرض ایجاد

آلوده به ۱۰٪ گازوئیل در یک درجه حرارت یکسان مقاومت کمتری نسبت به ۵٪ گازوئیل دارد. همان گونه که پیشتر بیان شد علت این امر آن است که در درجه حرارت ثابت مقدار گازوئیل کمتری از خاک آلوده به ۵٪ گازوئیل نسبت به ۱۰٪ گازوئیل بین ذرات باقی می ماند و این امر باعث کاهش مقاومت در درصدهای بالاتر پاکسازی شده می گردد. مقاومت نهایی خاکهای پاکسازی شده بوسیله SDS و Tween 80 برای ۵٪ آلودگی نشان می دهد مقدار مقاومت به ترتیب برابر ۲۱۹ و ۱۹۲ kPa است که به ویژه نتایج Tween 80 مشابه خاک طبیعی است لیکن در ۱۰٪ گازوئیل مقادیر ۱۱۹/۸ و ۱۲۲/۷ kPa می باشد که نشان دهنده آن است که مقدار شوینده کافی نمی باشد.

نتیجه گیری کلی

در این مطالعه یک خاک رسی با پلاستیسیته (خواص خمیری) پایین انتخاب و با ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل مخلوط گردید. پاکسازی خاک بوسیله روش حرارتی و اعمال درجه حرارت های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ و نیز استفاده از شوینده های SDS و Tween 80 انجام گرفت. نتایج زیر از این مطالعه قابل برداشت می باشد.

افزودن گازوئیل به خاک موجب می گردد ذرات تشکیل دهنده توده خاک به سمت دانه ای شدن تغییر نمایند.

در اثر افزودن گازوئیل به خاک پارامترهای تراکمی به ویژه رطوبت بهینه نیز کاهش می یابد و به همین صورت مقاومت نهایی خاک آلوده شده به گازوئیل نیز کاهش می یابد. افزایش این تغییرات با افزایش درصد وزنی گازوئیل همراه است. نتایج پاکسازی نشان می دهد که هم اعمال حرارت و هم استفاده از شوینده های SDS و Tween 80 در پاکسازی خاک حاوی ۵٪ گازوئیل مؤثر می باشد لیکن عملکرد دو شوینده مذکور بهتر از اعمال حرارت هست.

نتایج پاکسازی خاک حاوی ۱۰٪ گازوئیل، پاکسازی مطلوبی را نشان نمی دهد که این امر می تواند ناشی از مقادیر کم شوینده و نیز اعمال حرارت کم باشد.

است بنابراین می توان گفت مقدار ماده شوینده کافی نبوده و می بایست مقدار آن بیش از ۵۰٪ وزن آلاینده باشد. منحنی های تنش کرنش در اشکال ۵ و ۶ نشان می دهد که افزودن گازوئیل به خاک موجب کاهش مقاومت نهایی نسبت به خاک طبیعی می گردد و این کاهش همراه با افزایش درصد گازوئیل است. این نتایج با فرض اینکه افزودن گازوئیل موجب کاهش لایه مضاعف و ایجاد ساختمان فلکوله بیشتر نسبت به خاک طبیعی می گردد و می بایست مقاومت نسبت به آن افزایش یابد مغایرت دارد. این نتایج با یافته های پژوهشگرانی مانند Moore and Mitchall. 1974 و Sridharan and Rao. 1979) مطابقت ندارد زیرا آنها گزارش نمودند که افزودن ماده آلاینده به خاک موجب افزایش مقاومت خاک می گردد لیکن نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده توسط (Ratnaweera and Meegoda. 2005) سازگاری دارد. دلیل کاهش مقاومت با افزودن آلاینده را می توان این گونه بیان نمود که ویژگی های فیزیکی و مکانیکی خاک های آلوده ممکن است متأثر از پارامترهای دیگری غیر از ضریب ثابت دی الکتریک هم باشد. در این باره می توان گفت گازوئیل دارای گرانیوی بیشتری نسبت به آب است لذا سهولت جابه جایی ذرات در اثر اعمال بار در آن بیشتر است و لذا مقاومت کاهش می یابد و هرچه درصد گازوئیل بیشتر باشد عمل جابه جایی بیشتر و در نتیجه کاهش مقاومت نیز بیشتر است. همان گونه از جداول ۵ و ۶ و شکل های ۵ و ۶ مشخص است مقاومت نهایی خاک طبیعی ۱۹۱ kPa است، لیکن افزودن ۵ و ۱۰ درصد گازوئیل موجب تغییر مقاومت به ۱۶۵ kPa و ۱۱۱/۲ kPa می گردد که نشان دهنده کاهش مقاومت با افزایش درصد گازوئیل است. این نتایج با یافته پژوهشگرانی مانند (Ratnaweera and Meegoda. 2005) سازگاری دارد. مقاومت نهایی خاک های پاکسازی شده از ۵٪ گازوئیل بوسیله حرارت نشان می دهد که افزایش درجه حرارت موجب افزایش مقاومت می گردد به گونه ای که در ۱۵۰ درجه سانتی گراد مقاومت نهایی ۱۸۱/۸ KN و نزدیک به مقاومت نهایی خاک طبیعی است لیکن خاک های

REFERENCES

- Chu, W., and Kwan, C.Y. (2003), Remediation of Contaminated soil by a Solvent/Surfactant System. *Chemosphere*. 53, 9-15.
- Eliss, W.D., Payne, J.R., Tatuni, A.N. and Freestone, F.J. (1984). The Development of Chemical Countermeasures for Hazardous Waste Contaminated soil. Preceding of the hazardous materials spills conference. pp.116-125.
- EPA (1988). Must for USTs, A summary of the New Regulations for the Underground Storage Tank System. EPA, 530, UST-88,008. Office of underground storage tanks, U.S environmental protection agency, Washington, DC.
- EPA (1985). Remedial Action at Waste Disposal Site. EPA-625, 6-85,006, Office of Research and Development, Handbook, EPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH.
- Estabragh, A.R, Beytollahpour, I., Moradi, M. and Javadi, A.A. (2014). Consolidation Behavior of Two Fine-Grained Soils Contaminated by Glycerol and Ethanol. *Engineering Geology*. 178. 102-108.

- Fang, M.Y. (1997). Introduction to Environmental Geotechnology, CRC press, FL.USA.
- Fent, K., (2003). Ecotoxicological Problems Associated with Contaminated Sites. *Toxicol. Lett.* 140 (141), 353-365.
- Golshan, M., Naseri, S., Farzadkia, M., Eshrafi, A., Rezaei Kalantari, R. and Karimi Takanlu, L., (2014) Performance Assessment of rhamnolipid MR01 biosurfactant and Triton X-100 Chemical Surfactant in Removal of Phenanthrene from soil. *Iranian Journal of Health and Environment.* 7.(2), 143-156.
- Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M.R. and Yazdani, H. (2013). Geotechnical Properties of Gas Oil-Contaminated Kaolinite. *Engineering Geology.* 166, 11-16.
- Kiem, R., Knicker, H., Ligouis, B. and Kogel-knabner, I., (2003). Airborne Contaminants in the Refractory Organic Carbon Fraction of Arable Soils in Highly Industrialized Areas. *Geoderma.* 114, 109-137.
- Meegoda, N.J. and Ratnaweera, P., (1995). Treatment of Oil Contaminated Soils for Identification and Classification. *Geotechnical Testing Journal.* 18, 41-49.
- Mehrsebi, M., Baziari, M., Naddafi, K., Mohammadian Fazli, M., and Assadi, A., (2013). Efficiency of Brij35 and Tween 80 Surfactants for Treatment of Gasoline Contaminated Soil. *Iranian Journal of Health and Environment.* 6(2), 211-220.
- Moore, C.A. and Mitchell, J.K. (1974). Electromagnetic Forces and Soil Strength. *Geotechnique.* 24.(4), 627-640.
- Mulligan, C.N., Yong, R.N. and Gibbs, B.F. (2001). Surfactant-Enhanced Remediation of Contaminated Soil: Review. *Engineering Geology,* 60., 371-380.
- Pincus, H.J., Meegoda, N.J., and Ratnaweera, P. (1995). Treatment of Oil Contaminated Soil for Identification and Classification. *Geotechnical Testing Journal.* 1.18 (1), 41-49.
- Ratnaweera, P. and Meegoda, J.N., (2005). Shear Strength and Stress-Strain Behavior of Contaminated soil. *Geotechnical Testing Journal.* 22 (2), 1-8.
- Schwarzenbach, A.R., Gschwend, P.M. and Imboden, D.M. (2003). Environmental Organic Chemistry. Second ed. J. Wiley and sons, New York.
- Seyed Razavi, S.N., Khodadadi, A. and GanjiDoust, H. (2011). Treatment of Soil Contaminated with Crude-Oil using Biosurfactants. *Journal of Environmental Studies.* 37 (60), 107-116.
- Singh, S.K., Srivastava, R.K. and Sibby, J. (2009). Studies on Soil Contamination due to Used Motor Oil and its Remediation. *Canadian Geotechnical Journal,* 46, 1077-1083.
- Sridharan, A. and Rao, G. (1979). Shear Strength of Saturated Clays and the Role of the Effective Stress Concept. *Géotechnique.* 2, 177-193.
- Wang, M.C., Benway, J.M., and Arayssi, A.M. (1990). The Effect of Heating on Engineering Properties of Clays. *Physico-Chemical Aspects of Soil and Related Materials.* ASTM STP 1095, (139-158).