



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۰ | دی ۱۴۰۰ (ص ۲۶۲۱-۲۶۰۷)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.329800.669061>

(مقاله علمی - پژوهشی)

## Effect of Petroleum Products on the Strength of Calcareous Soils

RAZIYEH DARYAEE<sup>1</sup>, SEYED ALI AKBAR MOOSAVI<sup>1\*</sup>, REZA GHASEMI<sup>1</sup>, MASOUD RIAZI<sup>2</sup>

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

2. Department of Petroleum Engineering, Faculty of Chemical, Petroleum, and Gas Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

(Received: Aug. 31, 2021- Revised: Oct. 31, 2021- Accepted: Nov. 6, 2021)

### ABSTRACT

Different viscosity and dielectric constants in petroleum products cause physicochemical interactions in the porous fluid electrolyte system, followed by changes in the physical and mechanical properties of the soil. Shear strength of surface soil is one of the most important mechanical properties influencing determination and prediction of soil erosion as a global problem. Penetration resistance is also another mechanical properties of soil that affects tillage operations, plant growth, and soil biological activities and has an important role in seed germination, root growth and development, and crop yield. This study aimed to investigate the effect of application of 0, 1.5, 3.5, and 4.5% of three types of common petroleum products including crude oil, kerosene, and gasoline on shear strength and penetration resistance of three calcareous soils with clay loam, loamy sand, and sandy loam textures. Results showed that the mean value of shear strength in loamy and sandy loam soils compared to that of clay loam soils was significantly higher by nearly 100 and 35%, respectively, and the penetration resistance in loamy sand soils compared to that of clay loam and sandy loam soils was significantly lower by nearly 83% and 88%, respectively. The mean value of shear strength in soils mixed with kerosene and gasoline compared to that of the soils mixed with crude oil was significantly higher by nearly 17 and 15%; and penetration resistance was significantly higher by nearly 61 and 53%, respectively. In general, the application of 1.5, 3, and 4.5% of oil products caused a significant increase in soil shear strength by about 58, 47, and 14%, respectively, and also caused a significant increase in soil penetration resistance by about two times in all cases compared to that of control.

**Keywords:** Clay Loam, Crude Oil, Gasoline, Kerosene, Loamy Sand, Soil Erosion.

---

\*Corresponding Author's Email: aamousavi@gmail.com, aamousavi@shirazu.ac.ir

## اثر مواد نفتی بر مقاومت خاک‌های آهکی

راضیه دریایی<sup>۱</sup>، سید علی اکبر موسوی<sup>۱\*</sup>، رضا قاسمی<sup>۱</sup>، مسعود ریاضی<sup>۲</sup>

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۲. گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۹ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۸/۸ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۸/۱۵)

### چکیده

لزوجت و ثابت دی‌الکتریک متفاوت در آلاینده‌های نفتی سبب برهمکنش‌های فیزیکی-شیمیایی در سیستم الکترولیت سیال منفذی و به دنبال آن ایجاد تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک می‌شود. مقاومت برشی خاک سطحی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی مؤثر در تخمین و اندازه‌گیری فرسایش خاک به عنوان یک مشکل جهانی است. مقاومت فروروی (نفوذی) نیز یکی دیگر از ویژگی‌های مکانیکی مهم خاک است که عملیات خاک‌ورزی، رشد گیاه و فعالیت‌های زیستی خاک را تحت تاثیر قرار داده و نقش مهمی در جوانه‌زنی بذر، رشد و توسعه ریشه گیاه و تولید محصول دارد. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر کاربرد مقادیر صفر، ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد سه نوع فراورده‌ی نفتی شامل نفت خام، نفت سفید و گازوئیل بر مقاومت برشی و نفوذی سه خاک آهکی با بافت لوم رسی، ماسه لومی و لوم ماسه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد که میانگین مقاومت برشی در خاک‌های ماسه لومی و لوم ماسه‌ای در مقایسه با خاک لوم رسی به طور معنی‌داری و به ترتیب به میزان حدود ۱۰۰ و ۳۵ درصد و مقاومت نفوذی در خاک ماسه لومی در مقایسه با خاک‌های لوم رسی و لوم ماسه‌ای به طور معنی‌داری و به ترتیب به میزان حدود ۸۳ و ۸۸ درصد کمتر بود. میانگین مقاومت برشی در خاک‌های ترکیب شده با نفت سفید و گازوئیل نیز در مقایسه با خاک‌های ترکیب شده با نفت خام به طور معنی‌داری و به ترتیب به میزان حدود ۱۷ و ۱۵ درصد و مقاومت نفوذی نیز به ترتیب به میزان حدود ۶۱ و ۵۳ درصد بیشتر بود. به طور کلی کاربرد مقادیر ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد مواد نفتی مورد نظر سبب افزایش معنی‌دار مقاومت برشی خاک به ترتیب به میزان حدود ۵۸، ۴۷ و ۱۴ درصد و همچنین سبب افزایش معنی‌دار مقاومت نفوذی خاک به میزان حدود ۲ برابر در همه‌ی موارد و در مقایسه با نمونه‌های شاهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** ماسه لومی، لوم رسی، نفت سفید، نفت خام، گازوئیل، فرسایش خاک.

### مقدمه

می‌شوند (Suja *et al.*, 2014). امروزه آلودگی خاک به مواد نفتی (TPHs) از مشکلات بسیار مهم و عمده‌ای می‌باشد که محیط زیست انسان و سایر موجودات زنده را به طور جدی تهدید می‌کند (Alharbi *et al.*, 2018; Zeng *et al.*, 2018; Farzadkia *et al.*, 2019; Hamid *et al.*, 2020; Chattopadhyay *et al.*, 2019). به عبارتی فراورده‌های نفتی از مهمترین آلاینده‌های آلی محیط زیست و به‌ویژه خاک هستند. ورود این ترکیبات به طبیعت به دلیل سمی بودن و ایجاد جهش و سرطان‌زایی برای موجودات زنده، از مهم‌ترین نگرانی‌های حامیان محیط زیست می‌باشد. این دسته از آلاینده‌های آلی، پایداری زیادی در خاک دارند و انباشته شدن تدریجی آنها در خاک سبب اختلال در کارکرد طبیعی خاک و به دنبال آن تغییر در ویژگی‌های خاک و در نتیجه کاهش عملکرد محصولات کشاورزی می‌شود (Alexander, 1995; Namkoong *et al.*, 2002). آلودگی‌های نفتی از لحاظ توزیع و

خاک یکی از منابع مهم و ارزشمند طبیعی است و برنامه‌ریزی برای داشتن خاکی سالم و تولیدکننده، لازمه‌ی بقای انسان می‌باشد (Mandari & Lin, 2007). از سوی دیگر زندگی بشر وابسته به منابع انرژی و به‌ویژه سوخت‌های فسیلی همچون نفت خام و دیگر فراورده‌های نفتی پرمصرف همچون نفت سفید و گازوئیل است. هیدروکربن‌های نفتی مزبور همچنین به صورت طبیعی در مواد شیمیایی که توسط انسان و برای فعالیت‌های مختلف شامل سوخت‌گیری وسایل نقلیه و گرم کردن منازل استفاده می‌شوند، وجود دارند. واژه هیدروکربن نفتی کل<sup>۱</sup> (TPHs) یک اصطلاح مورد استفاده برای توصیف یک خانواده بزرگ شامل چند صد ترکیب شیمیایی با منشأ نفت خام است. هیدروکربن نفتی کل، مخلوطی از مواد شیمیایی است؛ اما همه آنها به‌طور عمده از هیدروژن و کربن تشکیل شده‌اند و از این رو هیدروکربن نامیده

\* نویسنده مسئول: aamousavi@gmail.com; aamousavi@shirazu.ac.ir

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک وجود دارد. از جمله روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک می‌توان به آزمایش برش مستقیم، آزمایش تک محوری غیرمحصور (فشاری غیرمحصور) و آزمایش سه محوری فشاری اشاره نمود. برای اندازه‌گیری مقاومت برشی خاک در مزرعه نیز ممکن است از دستگاه‌هایی مانند رینگ برشی، پنترومتر مخروطی، پنترومتر جیبی و دستگاه برش پره یا توروین استفاده شود (Khalil Moghaddam, 2009). مقاومت برشی لایه سطحی خاک می‌تواند همان مقاومت اصطکاکی ناشی از لغزیدن ذرات روی یکدیگر، حرکت غلتک مانند بین دانه‌های مجاور و قفل شدن دانه‌ها در یکدیگر باشد. به همین ترتیب پیوندهای شیمیایی بین ذرات رس خاک سبب چسبندگی و مقاومت در برابر نیرو و تنش وارده می‌شود (Khalil Moghaddam, 2009; Vafaeian, 1997). مقاومت برشی لایه سطحی خاک تحت تاثیر ویژگی‌های متفاوتی از خاک می‌باشد که این ویژگی‌ها عبارتند از: شیمی کانی‌ها و کلئیدهای آلی که بر چسبندگی خاکدانه‌ها اثر می‌گذارند؛ اندازه، شکل و پایداری خاکدانه‌ها که مقاومت اصطکاکی خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهند؛ وجود شبکه‌ی ریشه‌ها که ساختار بزرگتری از خاکدانه‌ها را تشکیل می‌دهند (Khalil Moghaddam, 2009). یکی از دیگر روش‌های تجربی به منظور اندازه‌گیری مقاومت خاک و یا مقاومت مکانیکی ظاهری<sup>۱</sup> خاک، اندازه‌گیری میزان مقاومت فرو روی خاک است. مقاومت فرو روی از دیگر ویژگی‌های ساختمانی حساس به مدیریت می‌باشد و عبارت است از آسانی حرکت یک جسم به داخل خاک که توسط دستگاهی به نام فروسنج<sup>۲</sup> اندازه‌گیری می‌شود؛ بافت خاک، مواد آلی، مقدار آب، تراکم، عمق خاک و جرم مخصوص ظاهری از عوامل موثر بر مقاومت مکانیکی و یا همان مقاومت فروری خاک در برابر فروسنج است (Herrick & Jones, 2002; Shirani et al., 2010; Zangeneh et al., 2017).

مطالعاتی که تاکنون در ارتباط با اثر آلودگی‌های نفتی بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و مقاومت خاک‌ها انجام شده نشان می‌دهد برخی ویژگی‌های خاک از جمله نفوذپذیری، زاویه اصطحاک داخلی، حدود آتربرگ و سایر ویژگی‌های مقاومتی خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی متفاوت است (Estabragh et al., 2016; Estabragh et al., 2011). عمده مطالعات در ارتباط با اثر آلودگی خاک بر نفوذپذیری خاک بوده که در کشاورزی بسیار حائز اهمیت بوده و دارای نقشی بسیار مهم در ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک است (Heidarpoor & Oliaei, 2013; Antony et al., 2016; Ghahremani et al., 2018). مرور نتایج سایر پژوهشگران نیز نشان می‌دهد که با وجود برخی

میزان آلودگی در طبیعت به دو گروه تقسیم می‌شوند؛ آلودگی در محل: به عنوان نمونه آلودگی ناشی از تصادفات تانکرهای نفتی، تخریب و یا انفجار یک ترمینال نفتی و اسکله‌های نفتی و خطوط انتقال، و آلودگی پراکنده: به عنوان نمونه استفاده از آفت‌کش‌ها در امور کشاورزی (Alikhani et al., 2011). تاثیر آلودگی‌های نفتی بر خاک یکی از مسائلی می‌باشد که در سال‌های اخیر، به‌ویژه پس از جنگ‌های اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی در خاورمیانه، توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Aiban, 1998) و با توجه به این‌که ایران یکی از کشورهای نفت‌خیز است بنابراین آلوده شدن خاک با آلاینده‌های نفتی به ویژه مواد نفتی پرکاربرد در ایران امری شایع می‌باشد و شناسایی و بررسی رفتار خاک در مواجهه با این مشکل و مدیریت آن امری ضروری است (Kamel et al., 2018). نشت ترکیبات نفتی تحت‌تأثیر نیروهای موئینگی و ثقلی منجر به حرکت عمودی در خاک‌های غیراشباع شده و خلل و فرج خاک را پر می‌کند (Delleur, 2000). آلودگی نفتی همچنین سبب کاهش حاصلخیزی خاک و غیرقابل استفاده شدن آن برای کشاورزی، نفوذ آلودگی به آب‌های زیرزمینی و ورود آنها به آب می‌شود، همچنین در برخی موارد سبب آلودگی هوا و اثرات منفی بر تنفس نیز می‌شود (Hassanshahian et al., 2014). آلاینده‌های نفتی بر ویژگی‌های فیزیکی همچون ساختمان خاک، تراکم خاک، هدایت هیدرولیکی و مقاومت فروری خاک نیز تاثیر می‌گذارند (Goodarzi, 2015).

خاک به‌عنوان یک سیستم پویا، همواره تحت تأثیر نیروهای خارجی قرار داشته که این نیروها می‌توانند طبیعی مانند قطرات باران، رواناب، انسان، گیاهان و جانوران یا غیرطبیعی مانند ادوات کشاورزی باشند. توده خاک تا حد معینی در برابر نیروهای خارجی مقاومت نشان می‌دهد و بیش از آن حد، خاک گسیخته می‌شود. گسیختگی خاک معمولاً از نوع برشی می‌باشد و به حداکثر مقاومتی که خاک در برابر گسیختگی و لغزش در امتداد هر صفحه دلخواه نشان دهد، مقاومت برشی خاک گفته می‌شود (Vafaeian, 1997). در بسیاری از مطالعات از مقاومت برشی سطح خاک به عنوان شاخصی مناسب برای بررسی فرسایش‌پذیری خاک نام برده شده است (Franti et al., 1999; Leonard & Richard, 2004; Khalilmoghaddam et al., 2009). براساس این پژوهش‌ها، شرایط خاک زمانی که به وسیله جریان شیاری به حد آستانه فرسایش‌پذیری برسد به وسیله مقاومت برشی سطح خاک کنترل می‌شود (Rauws & Gavers, 1988). هم‌چنین گزارش شده که فرایند جداسازی ذرات خاک به وسیله قطرات باران با مقاومت برشی سطح خاک مرتبط است (Brunori et al., 1989).

خاک با بافت لوم رسی به صورت طبیعی از خاک محوطه دانشکده واقع در منطقه باجگاه و دو بافت دیگر به صورت مصنوعی و دست ساز تهیه شد به این ترتیب که برای تهیه ۳ کیلوگرم از نمونه‌های خاک مورد نظر، به مقدار لازم از دو نوع بافت خاک رس لومی و ماسه‌ای به عنوان بافت پایه که به ترتیب از سری کوی برداشته شده بودند، استفاده شد. در شکل (۱) منحنی دانه بندی نمونه های خاک نشان داده شده است.

در نمونه‌های خاک مورد مطالعه نیز برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه با استفاده از روش‌های استاندارد معمول اندازه‌گیری شد (جدول ۲)، بافت خاک‌های تهیه شده با روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1986) اندازه‌گیری و کلاس‌های بافت خاک نیز بر اساس سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) و با استفاده از مثلث استاندارد بافت خاک تعیین شد.

مطالعات انجام شده بر روی خاک‌های ریزدانه و ماسه‌ای آلوده به مواد نفتی، تاکنون پژوهش‌های کافی و مدون در ارتباط با مقاومت برشی و نفوذی خاک‌های آلوده به مواد نفتی با بافت مختلف انجام نشده است. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی اثر مقادیر مختلف نفت خام، نفت سفید و گازوئیل به عنوان سه ماده نفتی بر مصرف و رایج بر مقاومت برشی و نفوذی (فرو روی) در سه خاک با بافت-های لوم رسی، لوم ماسه‌ای و ماسه لومی انجام شده است.

## مواد و روش‌ها

پژوهش و آزمایش‌های مربوطه در سال ۱۳۹۸ در گلخانه و آزمایشگاه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در منطقه باجگاه انجام شده است. برای تعیین ترکیب شیمیایی و ساختار آلاینده‌های نفتی مورد مطالعه، آزمایش‌هایی در آزمایشگاه مرکزی نفت دانشکده نفت دانشگاه شیراز انجام شده و نتایج در جدول (۱) ارائه شده است.

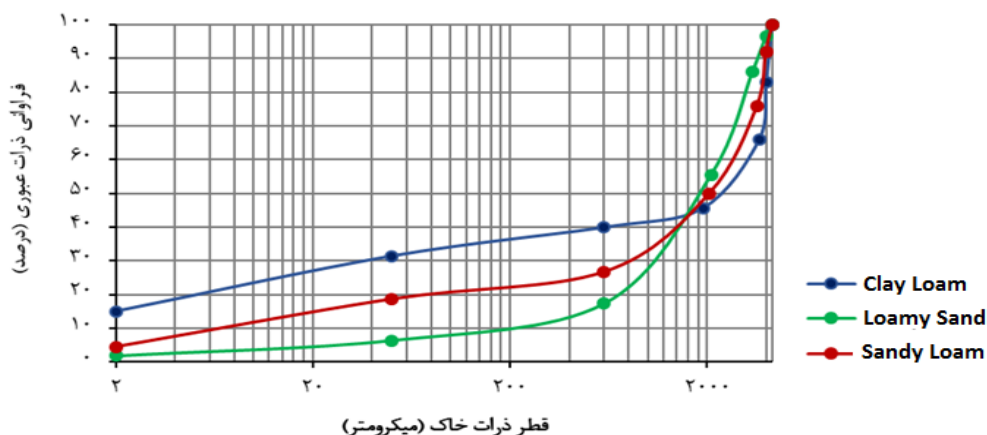
جدول ۱- برخی ویژگی‌های مواد نفتی مورد استفاده

روش / وسیله اندازه‌گیری	مقدار			ویژگی (واحد)
	نفت خام			
	گشتاور <sup>۲</sup> (%)	دور در دقیقه <sup>۴</sup>	گرانروی دینامیک	
ویسکومتر چرخشی	۲۵/۴	۳۰	۵۰/۸	گرانروی دینامیک <sup>۱</sup> (سانتی پواز)
	۴۲/۳	۵۰	۵۰/۹	
	۶۰/۸	۷۰	۵۲/۲	
	۸۰/۳	۹۰	۵۳/۶	
ASTM D97-02		+۲		نقطه ریزش <sup>۴</sup> (درجه سانتی‌گراد) چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
پیکنومتر		۰/۹۲۳۱		
	نفت سفید			
ویسکومتر چرخشی		۱/۶۱		گرانروی دینامیک (سانتی پواز) گرانروی سینماتیک <sup>۵</sup> (سانتی استوک) نقطه ریزش (درجه سانتی‌گراد) چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
ASTM D445-03		۱/۹۴		
ASTM D97-02		< - ۶۰		
پیکنومتر		۰/۸۳۰۰		
	گازوئیل			
ویسکومتر چرخشی		۴/۲۶		گرانروی دینامیک (سانتی پواز) گرانروی سینماتیک (سانتی استوک) نقطه ریزش (درجه سانتی‌گراد) چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
ASTM D445-03		۴/۹۳		
ASTM D97-02		-۴/۵		
پیکنومتر		۰/۸۶۴۷		

همه ویژگی‌ها در دما و فشار معمول آزمایشگاه (دمای ۲۶/۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۶۴۰ میلی‌متر جیوه) اندازه‌گیری شده‌اند.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های اولیه خاک‌های مورد مطالعه

خاک			ویژگی
لوم ماسه‌ای	ماسه لومی	لوم رسی	
۲۵/۱۵	۳۹/۷۵	۳۶/۸۵	کربنات کلسیم معادل (درصد)
۳۰/۱۷	۳۷/۹۰	۳۱/۱۰	سدیم عصاره اشباع (میلی‌گرم در لیتر)
۸/۷	۸/۴	۱۷/۲۳	ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بار در کیلوگرم)
۰/۶۴۰	۰/۸۶۱	۰/۷۳۶	قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع (دسی زیمنس بر متر)
۰/۴۷۷	۰/۳۴۱	۰/۸۸۵	ماده آلی (درصد)
۸/۹۵	۳/۶	۲۹/۹۳	رس (درصد)
۲۸/۳۱	۹/۱۵	۳۲/۷۸	سیلت (درصد)
۶۲/۷۴	۸۷/۲۵	۳۷/۲۹	ماسه (درصد)



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی سه بافت خاک مورد مطالعه در پژوهش

### مراحل آماده‌سازی و انجام آزمایش

پژوهش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی و به صورت گلدانی با سه تکرار برای هر یک از آلاینده‌های نفتی انجام شد. آزمایش شامل چهار سطح صفر، ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد وزنی از سه نوع آلاینده آلی نفت خام، نفت سفید و گازوئیل و سه نوع بافت مختلف لوم رسی، ماسه لومی و لوم ماسه‌ای بود (لازم به ذکر است مقادیر انتخابی آلاینده‌های نفتی با بررسی مقالات متعدد، انجام آزمایش و همچنین با لحاظ جلوگیری از روانی بیش از حد نمونه‌های خاک انتخاب شدند). خاک با بافت لوم رسی به صورت طبیعی از خاک محوطه دانشکده واقع در منطقه باجگاه و دو بافت دیگر به صورت مصنوعی و دست ساز تهیه شد به این ترتیب که برای تهیه ۳ کیلوگرم از نمونه‌های خاک مورد نظر، به مقدار لازم از دو نوع بافت خاک رس لومی و ماسه‌ای به عنوان بافت پایه که به ترتیب از سری کوی اساتید دانشکده کشاورزی شیراز و منطقه سیوند استان فارس برداشته شده بودند، استفاده شد. برای ساخت ۳ کیلوگرم خاک با بافت ماسه لومی به ترتیب مقادیر ۹۳/۴۸ و ۶/۵۲ درصد از خاک‌های ماسه‌ای و لوم رسی و برای ساخت ۳ کیلوگرم خاک با بافت لوم ماسه‌ای به ترتیب مقدار ۴۶/۱۶ و ۵۳/۸۴ درصد از خاک‌های ماسه‌ای و لوم رسی استفاده و ترکیب شدند (منحنی دانه‌بندی سه خاک مورد مطالعه در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است). پس از آماده‌سازی

بافت‌های خاک، آلاینده‌های نفتی با درصدهای ذکر شده و در سه تکرار به خاک‌های مورد مطالعه اضافه و مخلوط شد. به این ترتیب که پس از افزودن مواد نفتی به خاک قرار داده شده در کیسه‌های پلاستیکی، با چندین بار به هم زدن نمونه‌ها، اختلاط کامل خاک با مواد نفتی تا رسیدن به یک ترکیب کاملاً همگن انجام شد. سپس نمونه‌های ۳ کیلوگرمی ترکیب شده با هر یک از آلاینده‌های نفتی به گلدان‌های استوانه‌ای شکل پلاستیکی منتقل شد و به مدت ۷۲ ساعت در یک محیط در بسته و در داخل پاکت، به منظور اثرگذاری بهتر و بیشتر آلاینده بر خاک و جلوگیری از تبخیر آنها رها شدند (دانسیته، جرم مخصوص ظاهری هر یک از سه خاک مورد مطالعه لوم رسی، ماسه لومی و لوم ماسه‌ای قرار داده شده در گلدان‌ها معادل حدود ۱/۰۴، ۱/۴۰ و ۱/۲۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود). پس از گذشت ۷۲ ساعت، نمونه‌ها توزین و سپس به مدت ده هفته و هر هفته یک بار در حد رطوبت ظرفیت مزرعه برای هر بافت (این مقدار رطوبت حجمی در هر یک از سه بافت لوم رسی، ماسه لومی و لوم ماسه‌ای به ترتیب برابر با حدود ۲۵، ۱۷ و ۲۰ درصد وزنی بود)، با آب مقطر آبیاری شد. در پایان مدت آزمایش (پس از ده هفته)، مقاومت برشی و نفوذی خاک‌ها به شکلی که در ادامه توضیح داده شده اندازه‌گیری شدند. تصاویری از نمونه‌های خاک آماده شده در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۲- تصویری از برخی از نمونه‌های خاک مورد مطالعه

## مقاومت برشی خاک

انجام شد.

### مقاومت فرو روی (نفوذی) خاک

برای تعیین مقاومت فرو روی (مثل مقاومت به نفوذ ریشه) در خاک‌های مورد آزمایش، در خاک‌های دست‌نخورده موجود در گلدان‌ها میزان مقاومت فرو روی خاک‌ها با دستگاه نفوذسنج جیبی مدل ELE (شکل ۳-ب) با میله نفوذ باریک استوانه‌ای شکل با قطر ۶ میلی‌متر و طول ۵/۷ سانتی‌متر و لوله ضخیم به قطر ۱/۷ سانتی‌متر و طول ۱۲/۵ سانتی‌متر و جرم ۷۵ گرم اندازه‌گیری شد (Bradford, 1986). اندازه‌گیری‌ها در پنج روز متوالی و برای اطمینان از صحت کار به تعداد سه نقطه در هر گلدان انجام و سپس میانگین گرفته شد. به این ترتیب که نفوذسنج تا حد قسمت علامت‌گذاری شده (حدود ۶ میلی‌متر) به داخل خاک فشار داده شده و مقدار فشار لازم (بر حسب مگاپاسکال) برای نفوذ از روی شاخص کناری آن که از صفر تا پنج مندرج است، یادداشت شد (Bradford, 1986). گلدان‌ها برای تعیین میزان رطوبت در روزهای متوالی اندازه‌گیری مقاومت، توزین شدند و با توجه به متفاوت بودن مقدار مقاومت نفوذی خاک در رطوبت‌های مختلف و وابستگی این ویژگی به رطوبت خاک، روابط رگرسیونی بین مقدار رطوبت و مقاومت به نفوذ ریشه تعیین شد. برای مقایسه تمامی تیمارها مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه هر یک از خاک‌های مورد مطالعه در روابط رگرسیونی قرار داده شد تا میزان مقاومت به نفوذ ریشه خاک در مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه تعیین شود. سپس این مقادیر برای تیمارهای مختلف با یکدیگر مقایسه شدند. لازم به ذکر است اندازه‌گیری‌های مذکور بلافاصله پس از آخرین آبیاری بر روی خاک دست‌نخورده، در طول یک هفته و در رطوبت‌های مختلف انجام شد.

برای تعیین مقاومت برشی، پس از هفته دهم آبیاری و بر روی نمونه‌های خاک دست‌نخورده موجود در گلدان‌ها، از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت برشی، دستگاه برش پره‌ای (توروین<sup>۱</sup>) مدل SO 843 (شکل ۳-الف) استفاده و اندازه‌گیری انجام شد (Ghebreyessus *et al.*, 1994; Franti *et al.*, 1999; Gimenez & Govers, 2002). به این ترتیب که پره برشی به صورت عمودی روی سطح خاک قرار می‌گیرد و تا جایی که پره‌ها کاملاً در خاک قرار گیرند به داخل خاک وارد می‌شود. سپس در جهت عقربه‌های ساعت شروع به دوران پره برشی کرده و دوران تا برش (گسیختگی) خاک (لحظه شکست) ادامه می‌یابد. حداکثر مقدار تنش وارده برای گسیختگی خاک (مقاومت برشی) بر حسب مگاپاسکال مستقیماً از روی قرائت عدد شاخص دستگاه که در صفحه مدرج دستگاه ثبت می‌شود تعیین شد. برای افزایش دقت، هر یک از اندازه‌گیری‌ها در رطوبت‌های مختلف در دو نقطه از سطح گلدان انجام و میانگین‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها در سه روز مختلف و در رطوبت‌های مختلف انجام شد. گلدان‌ها برای تعیین میزان رطوبت در روزهای مختلف اندازه‌گیری مقاومت، توزین شدند و با توجه به متفاوت بودن و وابستگی مقدار مقاومت برشی خاک به رطوبت، روابط رگرسیونی بین مقدار رطوبت و مقاومت برشی تعیین شد. برای مقایسه تمامی تیمارها مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه هر یک از خاک‌های مورد مطالعه در روابط رگرسیونی قرار داده شد تا میزان مقاومت برشی خاک در مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه تعیین شود. سپس این مقدار برای تیمارهای مختلف با یکدیگر مقایسه شد. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری‌های گفته شده بلافاصله پس از آخرین آبیاری بر روی خاک دست‌نخورده، در طول یک هفته و در رطوبت‌های مختلف



(ب)



(الف)

شکل ۳- تصاویر مربوط به دستگاه‌های (الف) برش پره‌ای (توروین) مدل SO 843 و (ب) نفوذسنج جیبی مدل ELE برای اندازه‌گیری مقاومت‌های برشی و نفوذی در خاک‌های مورد مطالعه

## تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

داده‌های اندازه‌گیری شده مقاومت‌های برشی و نفوذی در آلودگی‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزارهای آماری EXCEL و SAS تجزیه و تحلیل شد و میانگین‌های مربوط به اثر هر یک از آلودگی‌ها به صورت جداگانه و نیز برهمکنش‌های مورد بررسی آنها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه شدند.

## نتایج و بحث

### مقاومت برشی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کاربرد مقادیر ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد نفت خام، نفت سفید و گازوئیل بر مقاومت برشی خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است. همچنین نتایج نشان داد که اثر بافت خاک، آلاینده نفتی و مقادیر مختلف آنها و همچنین اثر هر یک از برهمکنش‌های دوتایی و سه تایی بر مقاومت برشی خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است (جداول ۳ و ۴).

نتایج نشان داد در هر سه بافت خاک مورد مطالعه میانگین مقاومت برشی خاک در خاک‌های ترکیب شده با آلاینده گازوئیل در مقایسه با خاک‌های ترکیب شده با آلاینده نفت خام به طور معنی‌داری بیشتر است. به طوری که در خاک‌های لوم رسی و لوم ماسه‌ای ترکیب شده با آلاینده گازوئیل در مقایسه با نفت خام، میزان مقاومت برشی خاک به ترتیب به میزان حدود ۱۱ و ۲۱ درصد بیشتر بود و در خاک‌های ماسه لومی نیز مقاومت برشی در اثر کاربرد گازوئیل در مقایسه با نفت خام به طور معنی‌داری به میزان ۱۰۰ درصد افزایش یافت. در حالی که کاربرد نفت سفید در سه بافت خاک مورد مطالعه دارای روند غیرمشابهی بود. به گونه‌ای که در خاک‌های لوم رسی و ماسه لومی کاربرد نفت سفید در مقایسه با نفت خام اثر معنی‌داری بر مقاومت برشی خاک نداشت و در مورد خاک‌های لوم ماسه‌ای کاربرد نفت سفید در مقایسه با نفت خام، مقاومت برشی خاک را به طور معنی‌داری به میزان حدود ۵۱ درصد افزایش داد (جدول ۵).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (دو عاملی) اثر مواد نفتی بر مقاومت برشی، SR و مقاومت نفوذی، PR در خاک‌های با بافت مختلف

میانگین مربعات						درجه آزادی	منابع تغییر
گازوئیل		نفت سفید		نفت خام			
PR	SR	PR	SR	PR	SR		
۱۰/۴۰**	۱/۹۵**	۱۲/۳۰**	۱/۷۴**	۴/۷۰**	۱/۵۷*	۲	بافت
۲/۳۱**	۰/۰۸۵**	۲/۱۸**	۰/۰۸۰**	۰/۲۸۷**	۰/۰۷۵**	۳	مقادیر مواد نفتی
۱/۴۲**	۰/۰۳۶**	۱/۲۲**	۰/۰۲۲**	۰/۸۹۷**	۰/۰۴۲**	۶	برهم کنش بافت خاک و مقادیر مواد نفتی
۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۰۱۴	۰/۰۰۲	۰/۰۱۰	۰/۰۰۴	۲۴	خطا
۸/۵۳	۱۰/۵۶	۸/۵۸	۸/۷۵	۱۱/۹۷	۱۶/۲۵		ضریب تغییرات (درصد)

\* و \*\* به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهند.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس (سه عاملی) اثر مواد نفتی بر مقاومت برشی، SR و مقاومت نفوذی، PR در خاک‌های با بافت مختلف

میانگین مربعات		درجه آزادی	منابع تغییر
SR	PR		
۵/۱۶**	۲۶/۰۰**	۲	بافت خاک
۰/۰۴۴**	۲/۹۲**	۲	نوع ماده نفتی
۰/۱۹۹**	۳/۹۶**	۳	مقادیر مواد نفتی
۰/۰۵۵**	۰/۷۰**	۴	بر هم کنش بافت خاک و نوع ماده نفتی
۰/۰۶۵**	۲/۳۹**	۶	بر هم کنش بافت خاک و مقادیر مواد نفتی
۰/۰۲۱**	۰/۴۱۱**	۶	بر هم کنش نوع و مقادیر مواد نفتی
۰/۰۱۸**	۰/۵۷۲**	۱۲	برهم کنش بافت خاک، نوع و مقادیر مواد نفتی
۰/۰۰۲	۰/۰۱۲	۷۲	خطا

\* و \*\* به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهند.

مقادیر مذکور در خاک‌های لوم رسی به ترتیب سبب افزایش معنی‌دار مقاومت برشی به ترتیب به میزان حدود ۶۹، ۵۱ و ۲۵ درصد در مقایسه با شاهد شد. در حالی که در خاک‌های ماسه

نتایج همچنین نشان داد اثر کاربرد مقادیر ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد آلاینده‌های نفتی بر مقاومت برشی در خاک‌های مورد مطالعه دارای روند تغییرات مشابهی نبود. به طوری که

و نمونه شاهد (بدون کاربرد نفت سفید) مشاهده شد. در حالی که بیشترین و کمترین مقدار مقاومت برشی در خاک ماسه لومی به ترتیب به میزان ۰/۰۴ و ۰ مگاپاسکال و در خاک آلوده شده با ۱/۵ درصد گازوئیل و سایر خاک‌ها مشاهده شد. در خاک لوم ماسه‌ای نیز بیشترین و کمترین مقدار مقاومت برشی به ترتیب به میزان ۲/۱۳ و ۰/۳۵۳ مگاپاسکال و در شرایط آلودگی با ۱/۵ درصد نفت سفید و ۴/۵ درصد نفت خام مشاهده شد (جدول ۵).

لومی تنها کاربرد ۱/۵ درصد آلاینده‌های نفتی سبب افزایش معنی‌دار مقاومت برشی شد و سایر مقادیر اثر معنی‌دار نداشتند. در خاک‌های لوم ماسه‌ای نیز کاربرد مقادیر ۱/۵ و ۳ درصد آلاینده‌های نفتی سبب افزایش معنی‌دار مقاومت برشی خاک به-ترتیب به میزان حدود ۴۱ و ۴۰ درصد در مقایسه با شاهد شد (جدول ۵). نتایج نشان داد بیشترین و کمترین مقدار مقاومت برشی در خاک لوم رسی به ترتیب به میزان ۳/۲۷ و ۱/۵۵ مگاپاسکال و به ترتیب در خاک آلوده شده با ۱/۵ درصد گازوئیل

جدول ۵- اثر مقادیر مختلف مواد نفتی بر مقاومت برشی (مگاپاسکال) در خاک‌های با بافت مختلف

میانگین	مواد نفتی			مقدار (درصد وزنی)
	گازوئیل	نفت سفید	نفت خام	
بافت لوم رسی (میانگین- ۰/۲۲۶ A)				
۰/۱۷۳ D	۰/۱۸۶ fg	۰/۱۵۵ g	۰/۱۷۹* fg	صفر
۰/۲۹۳ A	۰/۳۲۷ a	۰/۲۷۷bc	۰/۲۷۷ bc	۱/۵
۰/۲۶۲ B	۰/۲۹۶ ab	۰/۲۴۰cde	۰/۲۵۰ cd	۳
۰/۲۱۷ C	۰/۲۱۰ ef	۰/۲۲۱ de	۰/۲۰۹ ef	۴/۵
	۰/۲۵۵A	۰/۲۲۶ B	۰/۲۲۹ B	میانگین
بافت ماسه لومی (میانگین- ۰/۰۰۳ C)				
۰ B	۰ b	۰ b	۰ b	صفر
۰/۰۰۱ A	۰/۰۰۴a	۰ b	۰ b	۱/۵
۰ B	۰ b	۰ b	۰ b	۳
۰ B	۰ b	۰ b	۰ b	۴/۵
	۰/۰۰۱A	۰ B	۰ B	میانگین
بافت لوم ماسه‌ای (میانگین- ۰/۱۵۳ B)				
۰/۱۲۷ B	۰/۱۱۱ e	۰/۱۲۹ de	۰/۱۴۰ cde	صفر
۰/۱۷۹A	۰/۱۶۵bc	۰/۲۱۳ a	۰/۱۶۱ cd	۱/۵
۰/۱۷۸ A	۰/۱۶۸ bc	۰/۲۱۰ a	۰/۱۵۵ cd	۳
۰/۱۲۶ B	۰/۱۵۰ cd	۰/۱۹۴ ab	۰/۰۳۵ f	۴/۵
	۰/۱۴۹B	۰/۱۸۶ A	۰/۱۲۳ C	میانگین

\* در مورد هر خاک، میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون حداقل در یک حرف آماری بزرگ و اعدادی که در بدنه جدول حداقل در یک حرف آماری کوچک مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

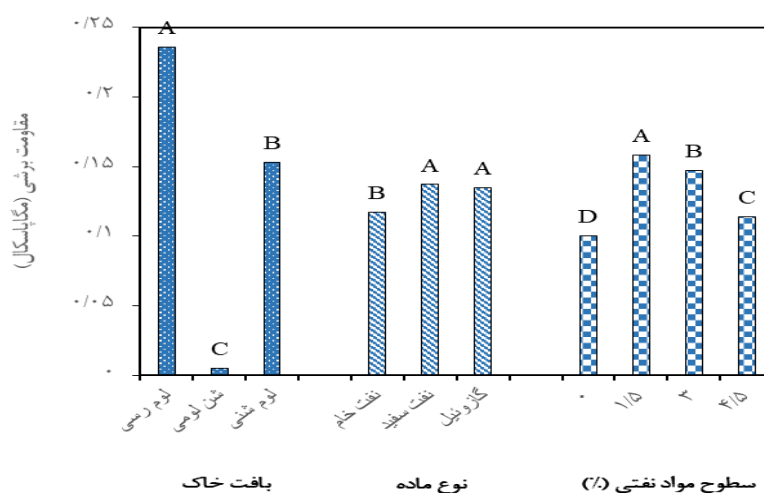
نتایج هم‌چنین نشان داد به‌طور کلی میانگین مقاومت برشی در خاک‌های ماسه لومی و لوم ماسه‌ای به‌طور معنی‌داری و به ترتیب به میزان حدود ۱۰۰ و ۳۵ درصد کمتر از خاک لوم رسی بود (شکل ۴). میانگین مقاومت برشی در خاک‌های آلوده شده با نفت سفید و گازوئیل نیز در مقایسه با خاک‌های آلوده شده با نفت خام به‌طور معنی‌داری و به ترتیب به میزان حدود ۱۷ و ۱۵ درصد بیشتر بود (شکل ۴). هم‌چنین نتایج نشان داد به‌طور کلی کاربرد مقادیر ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد آلاینده‌های نفتی مورد نظر سبب افزایش معنی‌دار مقاومت برشی خاک به ترتیب به میزان حدود ۵۸، ۴۷ و ۱۴ درصد در مقایسه با شاهد شد (شکل ۴). در شکل (۵) روند تاثیر مقدار هر یک از مواد نفتی بر مقاومت برشی هر یک از بافت‌های خاک مورد مطالعه در قالب معادلات رگرسیونی نشان داده شده است (به جز در خاک ماسه لومی مورد مطالعه که مقاومت برشی آن صفر اندازه‌گیری شده

است). نتایج نشان داد با افزایش مقادیر نفت خام، میزان مقاومت برشی خاک‌های لوم رسی و لوم ماسه‌ای به صورت روابط درجه ۲ به ترتیب با ضرایب تعیین ۰/۸۹ و ۰/۹۰ افزایش یافت. به گونه‌ای که با افزایش نفت خام تا ۱/۵ درصد در هر دو خاک مذکور مقاومت برشی افزایش یافت و با افزایش بیشتر نفت خام، مقاومت برشی کاهش یافت. تغییرات مقاومت برشی با افزایش مقدار نفت سفید و گازوئیل در خاک‌های مذکور نیز از روند مشابهی تبعیت نمود و با افزایش مقدار نفت سفید و گازوئیل مقاومت برشی در خاک لوم رسی به شکل معادلات درجه دوم به ترتیب با ضرایب تعیین ۰/۷۷ و ۰/۹۴ و در خاک لوم ماسه‌ای با ضرایب تعیین ۰/۹۴ و ۰/۹۷ افزایش یافت (شکل ۵). به عبارتی در هر دو خاک مورد مطالعه و همه مواد نفتی، با افزایش مقدار مواد نفتی مقاومت برشی خاک افزایش یافته و پس از رسیدن به مقدار بیشینه، کاهش یافت. روند نزولی مشاهده شده در مقادیر زیاد (بیش از

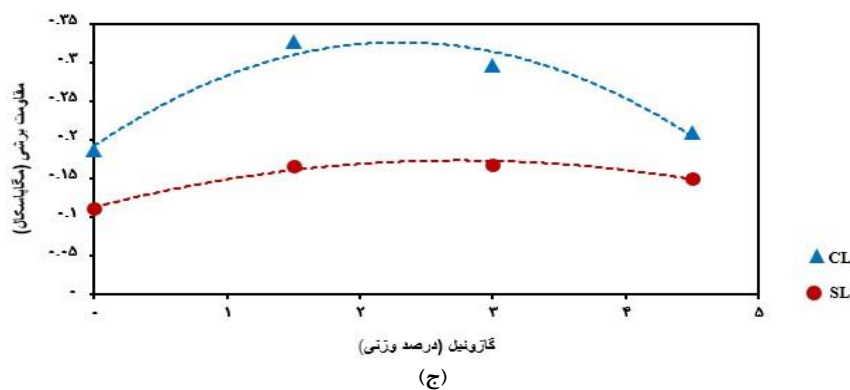
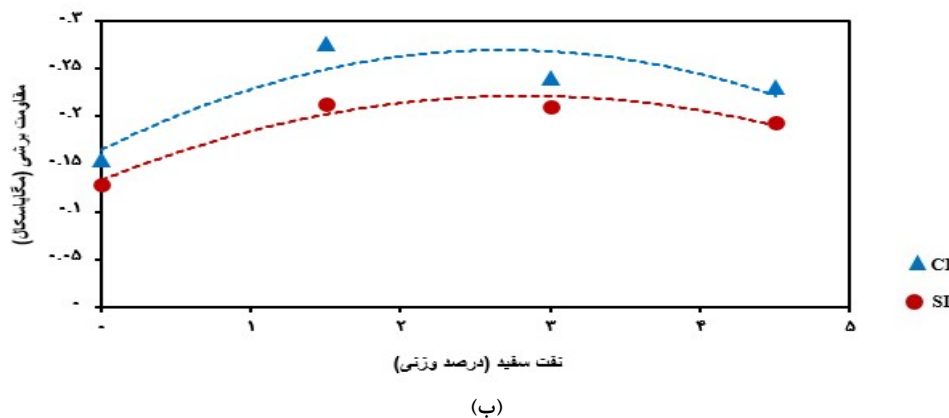
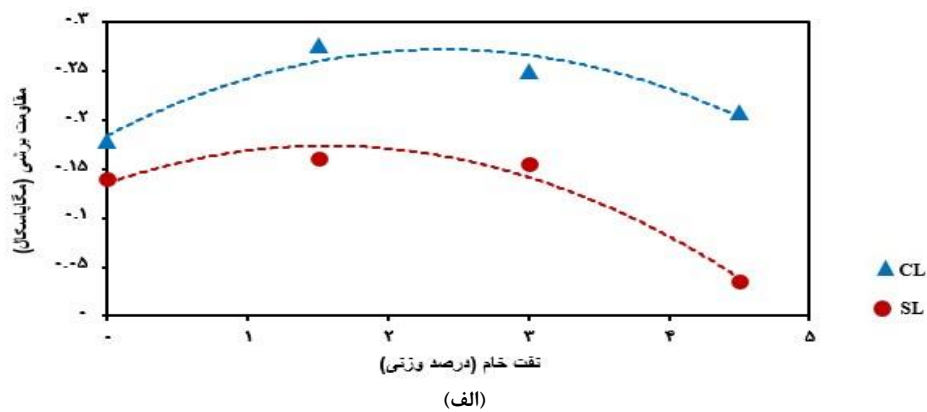


نتایج نشان می‌دهد نوع بافت خاک نیز یک ویژگی تاثیرگذار در چگونگی و شدت روند تغییرات در پاسخ به افزودن مواد نفتی به خاک می‌باشد. به طوری که در خاک‌های با درصد ماسه بیشتر (لوم ماسه‌ای) در مقایسه با خاک‌های با رس بیشتر (لوم رسی)، بیشینه مقاومت برشی در مقادیر کمتر مواد نفتی مشاهده می‌شود که می‌تواند به دلیل تخلخل کمتر خاک‌های ماسه‌ای و رسیدن به درجه اشباع بیشتر در مقدار یکسان مواد نفتی افزوده شده به خاک در مقایسه با خاک‌های رسی باشد. در این ارتباط Alsanad و همکاران (۱۹۹۵) نیز در نتایج پژوهش خود مشاهده کردند که افزودن نفت خام سبب کاهش نفوذپذیری و مقاومت برشی در خاک ماسه‌ای می‌شود. Khamsehchiyan و همکاران (۲۰۰۷) نیز گزارش کردند نفوذپذیری در اثر افزودن نفت خام در انواعی از خاک (رس با خاصیت خمیرایی کم، ماسه بد دانه‌بندی شده، ماسه با مقدار زیاد سیلت) کاهش می‌یابد اما تاثیر نفت خام بر مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای و رسی را متفاوت گزارش کردند. سایر پژوهشگران نیز با بررسی اثر گازوئیل و نفت خام بر مقاومت برشی خاک‌های ماسه‌ای نشان دادند با افزایش این مواد نفتی تا چهار درصد، مقاومت برشی افزایش و پس از آن با افزایش بیشتر مواد نفتی، مقاومت برشی تا ۱۰ درصد کاهش می‌یابد (George *et al.*, 2015; Adeoye *et al.*, 2015; Shin & Das, 2011). نیز در آزمایش‌های خود شاهد کاهش مقاومت برشی خاک آلوده به نفت در خاک ماسه‌ای غیر اشباع بودند.

۱/۵ درصد) کاربرد مواد نفتی می‌تواند به دلیل نزدیک شدن بیشتر به حالت اشباع (افزایش درجه اشباع) و افزایش خاصیت روانی در خاک و در نتیجه کاهش مقاومت برشی باشد. با توجه به نتایج به دست آمده و با بررسی اثر افزودن آلاینده‌های آلی مختلف مانند نفت خام، نفت سفید، گازوئیل بر مقاومت برشی خاک، به نظر می‌رسد حضور این آلاینده‌ها در خاک به دلیل دارا بودن ثابت دی‌الکتریک کمتر از آب، سبب هم‌آورد شدن و چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر و پر شدن منافذ و در نتیجه کاهش نفوذپذیری و در مقابل تاثیر دو گانه بر مقاومت برشی خاک به عنوان یک ویژگی مهم مکانیکی خاک شده است. بدین ترتیب که در مقدار کمتر آلاینده، به سبب هم‌آورد شدن ذرات، مقاومت برشی افزایش و با افزایش بیشتر این مواد و افزایش درجه اشباع خاک از این مواد و ایجاد روانی بیشتر در خاک، مقاومت برشی کاهش می‌یابد. سایر پژوهشگران (Habib- ur- Rahman *et al.*, 2007; Khamsehchiyan *et al.*, 2007; Kermanpour *et al.*, 2015; Khabbazi & Hasanloord, 2018; Roshanghiyas & Bagheri Pour, 2019) نیز در پژوهش‌های خود به نتایج مشابهی دست یافتند و تاثیر دوگانه مواد نفتی را گزارش کردند و در اغلب موارد مرز تغییر روند مقاومت برشی خاک را حدود سه درصد گزارش نمودند. آنان همچنین بیان کردند هر قدر خاک خشک‌تر باشد مقاومت برشی خاک نیز بیشتر خواهد بود. لازم به ذکر است همان‌طور که از



شکل ۴- اثر مقادیر مختلف آلاینده‌های نفتی مورد آزمایش بر مقاومت برشی در خاک‌های با بافت مختلف (ستون‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).



شکل ۵- رابطه بین مقادیر هر یک از مواد نفتی و مقاومت برشی (SR) در خاک‌های با بافت مختلف (لوم رسی CL، لوم ماسه‌ای SL)

### مقاومت نفوذی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کاربرد مقادیر ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد نفت خام، نفت سفید و گازوئیل بر مقاومت نفوذی خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است. همچنین نتایج نشان داد که اثر بافت خاک، آلاینده نفتی و مقادیر مختلف آنها و همچنین اثر هر یک از برهمکنش‌های دوتایی و سه تایی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۳ و ۴).

نتایج نشان داد در هر سه بافت خاک مورد مطالعه میانگین مقاومت نفوذی در خاک‌های آلوده شده با نفت سفید و گازوئیل در مقایسه با خاک‌های آلوده شده با نفت خام به طور معنی‌داری بیشتر است. به طوری که در خاک‌های لوم رسی، ماسه لومی و لوم

ماسه‌ای خاک‌های آلوده شده با نفت سفید میزان مقاومت فروری خاک به ترتیب به میزان حدود ۴۳، ۹۶ و ۷۶ درصد و در خاک‌های آلوده شده با گازوئیل به ترتیب به میزان حدود ۲۳، ۱۳۹ و ۷۱ درصد بیشتر از خاک‌های آلوده شده با نفت خام بود (جدول ۶).

همچنین نتایج نشان داد به طور میانگین کاربرد مقادیر ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد آلاینده‌های نفتی در خاک‌های لوم رسی و لوم ماسه‌ای مورد مطالعه به طور مشابهی سبب افزایش معنی‌دار مقاومت نفوذی خاک نسبت به شاهد شد، به طوری که مقادیر مذکور در خاک‌های لوم رسی به ترتیب سبب افزایش حدود ۳، ۴ و ۳ برابری مقاومت فروری و در خاک‌های لوم ماسه‌ای سبب

مگاپاسکال و به ترتیب در خاک‌های آلوده شده با ۳ درصد نفت سفید و شاهد مشاهده شد. در حالی که بیشترین و کمترین مقدار مقاومت نفوذی در خاک ماسه لومی به ترتیب به میزان ۲/۶۵ و ۰ مگاپاسکال و در خاک‌های آلوده شده با ۱/۵ درصد گازوئیل و سایر خاک‌ها مشاهده شد. در خاک لوم ماسه‌ای نیز بیشترین و کمترین مقدار مقاومت نفوذی به ترتیب به میزان ۹/۷۳ و ۲/۵۰ مگاپاسکال و در شرایط آلودگی با ۴/۵ درصد نفت سفید و شاهد مشاهده شد (جدول ۶).

افزایش ۲، ۳ و ۳ برابری مقاومت فروروی در مقایسه با شاهد شد. در حالی که روند تغییرات در خاک‌های ماسه لومی برعکس بود و کاربرد ۳ و ۴/۵ درصد مواد نفتی سبب کاهش معنی‌دار مقاومت نفوذی به میزان حدود ۱۰۰ درصد در هر دو مورد در مقایسه با شاهد شد و کاربرد ۱/۵ درصد مواد نفتی اثر معنی‌داری نداشت (جدول ۶).  
نتایج آزمایشات نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار مقاومت نفوذی در خاک لوم رسی به ترتیب به میزان ۷/۵۹ و ۱/۳۰

جدول ۶- اثر مقادیر مختلف مواد نفتی بر مقاومت نفوذی (مگاپاسکال) در خاک‌های با بافت مختلف

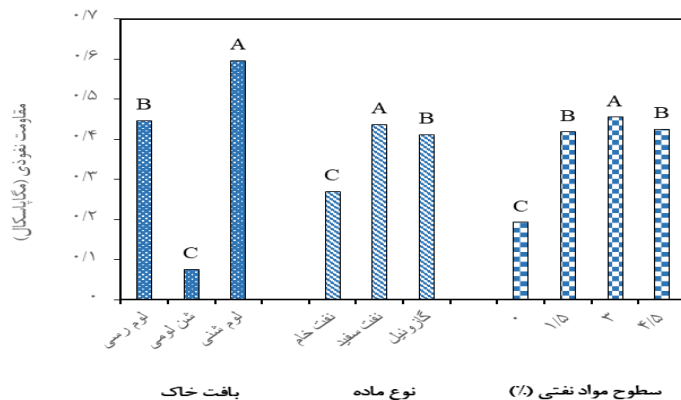
میانگین	مواد نفتی			مقادیر (درصد وزنی)
	گازوئیل	نفت سفید	نفت خام	
	بافت لوم رسی (میانگین = ۰/۴۴۷ B)			
۰/۱۶۴ D	۰/۱۳۰ g	۰/۱۹۵ f	۰/۱۶۶* fg	صفر
۰/۴۴۵ C	۰/۴۳۷ d	۰/۶۰۶ b	۰/۲۹۳ e	۱/۵
۰/۶۲۶ A	۰/۶۱۹ b	۰/۷۵۹ a	۰/۵۰۱ c	۳
۰/۵۵۲ B	۰/۶۱۸ b	۰/۵۳۱ c	۰/۵۰۶ c	۴/۵
	۰/۴۵۱ B	۰/۵۲۳ A	۰/۳۶۷ C	میانگین
	بافت ماسه لومی (میانگین = ۰/۰۷۵ C)			
۰/۱۴۴ A	۰/۱۳۶ d	۰/۱۲۸ d	۰/۱۶۷ c	صفر
۰/۱۵۵ A	۰/۲۶۵ a	۰/۱۹۹ b	۰ e	۱/۵
۰ B	۰ e	۰ e	۰ e	۳
۰ B	۰ e	۰ e	۰ e	۴/۵
	۰/۱۰۰ A	۰/۰۸۲ B	۰/۰۴۲ C	میانگین
	بافت لوم ماسه‌ای (میانگین = ۰/۵۹۶ A)			
۰/۲۷۰ C	۰/۲۷۴ f	۰/۲۸۸ f	۰/۲۵۰ f	صفر
۰/۶۵۳ B	۰/۵۸۷ d	۰/۷۲۲ c	۰/۶۵۱ cd	۱/۵
۰/۷۲۷ A	۰/۹۴۵ a	۰/۸۳۵ b	۰/۴۳۱ e	۳
۰/۷۲۴ A	۰/۹۳۱ a	۰/۹۷۳ a	۰/۲۶۹ f	۴/۵
	۰/۶۸۴ A	۰/۷۰۴ A	۰/۴۰۰ B	میانگین

\* در مورد هر خاک، میانگین‌هایی که در هر ردیف یا ستون حداقل در یک حرف آماری بزرگ و اعدادی که در بدنه جدول حداقل در یک حرف آماری کوچک مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند.

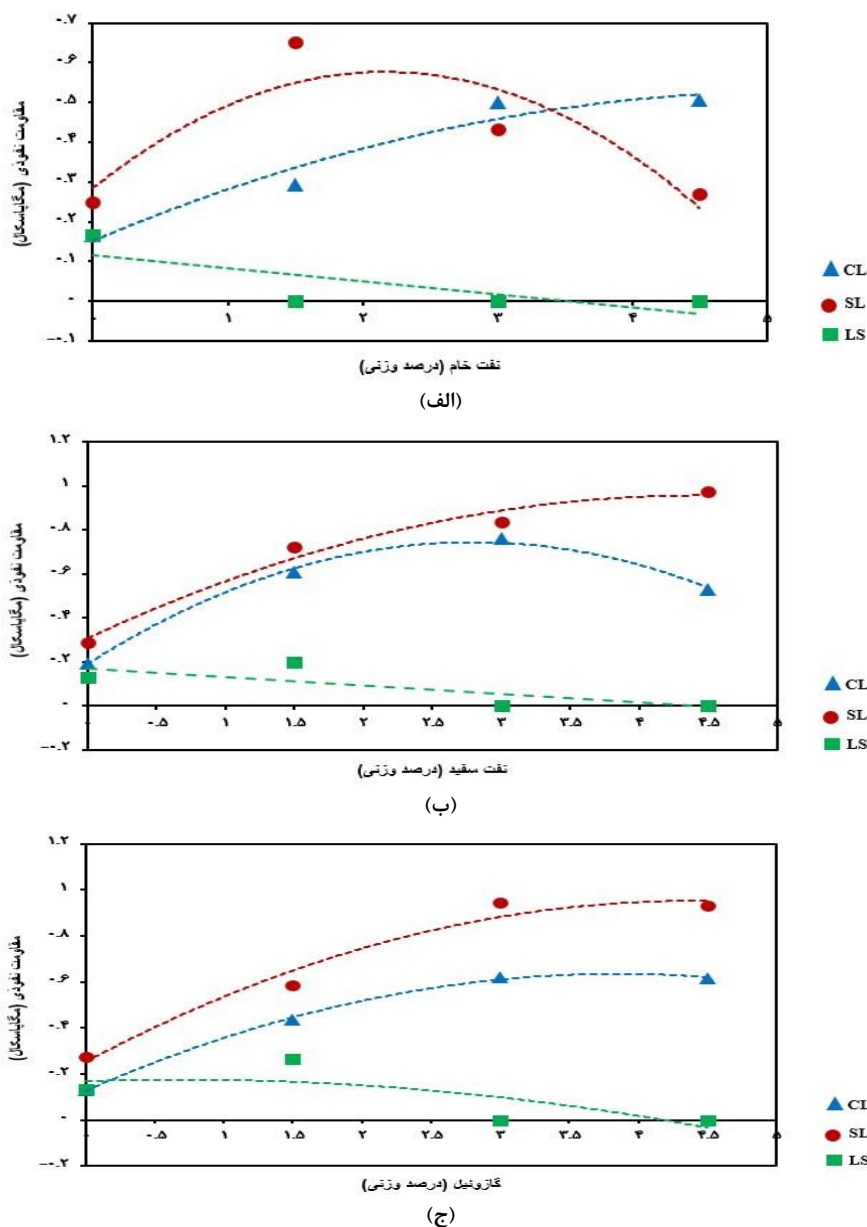
شکل (۷) روابط رگرسیونی بین مقدار مواد نفتی و مقاومت نفوذی هر یک از بافت‌های خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در همه آلاینده‌های نفتی مورد مطالعه با افزایش مقدار مواد نفتی در خاک‌های لوم رسی و لوم ماسه‌ای، مقاومت نفوذی در قالب توابع سهمی درجه دو افزایش یافت. در حالی که در همه نمونه‌های آلوده شده با مواد نفتی، مقاومت نفوذی خاک ماسه لومی با افزایش مقادیر مواد نفتی به کار رفته به طور معنی‌داری به صورت خطی کاهش یافت. با کاربرد نفت خام در خاک‌های لوم رسی و لوم ماسه‌ای به ترتیب تا مقادیر ۱/۵

نتایج همچنین نشان داد که به طور کلی مقاومت نفوذی خاک در خاک‌های ماسه لومی در مقایسه با لوم رسی و لوم ماسه‌ای به طور معنی‌داری و به ترتیب به میزان حدود ۸۳ و ۸۸ درصد کمتر بود (شکل ۶).

به طور کلی میزان مقاومت نفوذی خاک در خاک‌های آلوده شده با نفت سفید و گازوئیل در مقایسه با خاک‌های آلوده شده با نفت خام به طور معنی‌داری و به ترتیب به میزان حدود ۶۱ و ۵۳ درصد بیشتر بود (شکل ۶). به طور کلی کاربرد مقادیر ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد آلاینده‌های نفتی مورد مطالعه سبب افزایش معنی‌دار مقاومت نفوذی خاک به میزان حدود ۲ برابر در همه‌ی موارد و در مقایسه با شاهد شد (شکل ۶).



شکل ۶- اثر مقادیر مختلف آلاینده‌های نفتی مورد آزمایش بر مقاومت نفوذی در خاک‌های با بافت مختلف (ستون‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند از نظر آماری با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).



شکل ۷- رابطه بین مقدار هر یک از مواد نفتی و مقاومت نفوذی (PR) در خاک‌های با بافت مختلف (لوم رسی CL، لوم ماسه‌ای SL، ماسه لومی LS)

(Estabragh, 2015; Askarbioki et al., 2019).

به‌طور کلی لازم به ذکر است که خواص میکروساختاری رس‌های موجود در خاک می‌تواند سبب بروز تفاوت‌ها و روند عکس موجود میان خاک‌های رسی و ماسه‌ای باشد و علاوه بر آن در حالت کلی شاید وجود تفاوت‌هایی در نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با برخی منابع مشابه، به سبب تفاوت در شرایط انجام آزمایش به منظور دستیابی به ویژگی‌های مزبور از نقطه نظر تفاوت در شرایط محیطی، رطوبتی، حجم نمونه، ویژگی‌های متفاوت مواد افزودنیست که خود سبب انجام واکنش‌های فیزیکوشیمیایی مختلف بین انواع خاک‌ها و ترکیبات افزودنی به خاک می‌شود.

### نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج نشان داد که مقادیر مختلف مواد نفتی اثرات معنی‌داری بر مقاومت‌های نفوذی و برشی خاک دارد به طوری‌که کاربرد مقادیر مختلف آلاینده‌های نفتی سبب افزایش معنی‌دار مقاومت‌های برشی و فرو روی در دو بافت خاک لوم رسی و لوم ماسه‌ای شد در حالی که مواد نفتی سبب کاهش معنی‌دار آنها در بافت ماسه لومی شد. به‌طور کلی با افزایش مقدار مواد نفتی، مقادیر مقاومت‌های نفوذی و برشی خاک در مقایسه با شاهد افزایش یافت. البته مقاومت‌های برشی و نفوذی ابتدا و در مقادیر کم کاربرد مواد نفتی به سبب ایجاد نوعی چسبندگی ظاهری بین ذرات خاک افزایش و در مقادیر زیاد مواد نفتی و پس از افزایش درجه اشباع مواد نفتی، مقادیر مقاومت‌ها کاهش می‌یابد. همچنین به‌طور کلی بیشینه مقدار مقاومت برشی در خاک‌های لوم رسی آلوده شده با ۱/۵ درصد نفت سفید و بیشینه مقدار مقاومت نفوذی در خاک‌های لوم ماسه‌ای آلوده شده با ۳ درصد نفت سفید مشاهده شد. خاطر نشان می‌شود که مواد نفتی سبب تاثیراتی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک همچون مقاومت-های برشی و نفوذی خاک شده که خود می‌توانند بر میزان نفوذ و توسعه ریشه گیاه در خاک و همچنین میزان فرسایش‌پذیری خاک و حساسیت خاک‌ها به فرسایش آبی و بادی موثر باشند. بنابراین مطالعه اثر این مواد بر ویژگی‌های مذکور، برای پیشگیری و یا کنترل و رفع این مخاطرات و تاثیرات زیان بار بر ابعاد مختلف استفاده‌های گوناگون از زمین و خاک مهم می‌باشد.

### سپاس‌گزاری

مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نویسنده اول می‌باشد. نویسندگان مقاله صمیمانه از دانشگاه شیراز به سبب حمایت‌های لازم برای انجام پژوهش سپاس‌گزاری می‌نمایند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

و ۳ درصد، مقاومت نفوذی افزایش و در مقادیر بیشتر، کاهش یافت. در نمونه‌های آلوده شده با نفت سفید، مقاومت نفوذی خاک لوم رسی با افزایش مقادیر نفت سفید تا سطح سه درصد به طور معنی‌داری و با ضریب تعیین ۰/۹۹ افزایش ولی در مقادیر بیشتر نفت سفید، کاهش یافت. در حالی که در خاک لوم ماسه‌ای با افزایش مقادیر نفت سفید، مقاومت نفوذی خاک به‌طور معنی‌داری و به صورت معادله درجه دو و با ضریب تعیین ۰/۹۷ افزایش یافت. در خاک‌های آلوده شده با گازوئیل نیز مقاومت نفوذی خاک‌های لوم رسی و لوم ماسه‌ای با افزایش مقادیر نفت سفید به‌طور معنی‌داری و به ترتیب با ضرایب تعیین ۰/۹۹ و ۰/۹۷ افزایش یافت. به‌عبارتی در دو خاک لوم رسی و لوم ماسه‌ای مورد مطالعه و همه مواد نفتی، تقریباً با افزایش مقادیر مواد نفتی مقاومت نفوذی خاک افزایش یافته ولی شیب افزایش در مقادیر زیاد مواد نفتی کاهش یافته و یا اینکه مقاومت نفوذی پس از رسیدن به مقدار بیشینه، کاهش یافته است. کاهش شیب و یا روند نزولی مشاهده شده در مقادیر زیاد کاربرد مواد نفتی می‌تواند به دلیل نزدیک شدن بیشتر به حالت اشباع (افزایش درجه اشباع)، پر شدن بیشتر فضای خالی بین ذرات خاک به وسیله مواد نفتی و کاهش همبستگی و انسجام ذرات خاک و افزایش خاصیت روانی در خاک و در نتیجه کاهش مقاومت نفوذی خاک باشد.

مقاومت فروروی به نوع خاک، توزیع اندازه و شکل ذرات خاک، کانی‌شناسی رس، اندازه اکسیدهای بی‌شکل (آمورف)، درصد ماده آلی و شیمی محلول خاک بستگی دارد، از سوی دیگر جرم مخصوص ظاهری، رطوبت و ساختمان خاک و گذشت زمان بر مقاومت فروروی تأثیر زیادی دارند. به عنوان نمونه گزارش شده که مقاومت فرو روی با افزایش رطوبت خاک کاهش و با افزایش جرم مخصوص ظاهری در اثر کاهش تخلخل و به‌عبارتی پر شدن منافذ، افزایش می‌یابد (Gerard, 1965; Byrd & Cassel, 1980; Koolen & Kuipers, 1983; Perfect et al., 1992).

از طرفی بررسی منابع نشان می‌دهد که شاخص فشردگی نیز می‌تواند مرتبط با مقاومت فروروی خاک و معیاری از آن باشد، بر این اساس مشاهده شده است که شاخص فشردگی (Cc) با افزایش آلودگی مواد نفتی و غلظت مایعات آلی در خاک، افزایش و با رسیدن به یک حد کمی مشخص کاهش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان به عواملی همچون پر شدن فضای خالی بین ذرات خاک به وسیله آلاینده‌های نفتی و سایر علل ذکر شده در ارتباط با مقاوت برشی خاک نسبت داد که این افزایش در (Cc) و مرز تغییر روند تغییرات به عنوان معیاری از مقاومت نفوذی در پاسخ به افزودن مواد نفتی وابسته به نوع بافت، کانی‌های خاک و مایعات آلی آلاینده می‌باشد (Beytollahpour & Raesi).

## REFERENCES

- Adeoye, O., Olatokunbo, O., & Ademola, A. (2015). Effect of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of Lateritic soil. *New York Science Journal*, 8(10), 82-86.
- Aiban, S. (1998). The effect of temperature on the engineering properties of oil-contaminated sands. *Environment International*, 24, 153-161.
- Alexander, M. (1995). How toxic are toxic chemicals in soil. *Environmental Science and Technology*, 29, 2713-2717.
- Alharbi, B. H., Pasha, M. J., Alhudhudi, A. H., & Alduwais, A. K. (2018). Assessment of soil contamination caused by underground fuel leakage from selected gas stations in Riyadh, Saudi Arabia. *Soil and Sediment Contamination*, 27, 674-691.
- Alsanad, H. A., Eid, W. K., & Ismael, N. F. (1995). Geotechnical properties of oil contaminated Kuwaiti sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(5), 407-412.
- Antony, R., Saravanan, S., & Manjula, R. (2016). Effects of treated wastewater irrigation on soil properties— A case study at NIT Trichy. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 9(6), 2041-2047.
- Askarbioki, M. H., Kargaran Bafghi, F., Mokhtari, M. & Khaleghi, M. (2019). Impact of gasoline contamination on mechanical behavior of sandy clay soil. *Journal of Mining and Environment*, 14(51), 389-400. (In Persian).
- Beytolahpour, I. & Raeesi Estabragh, A. (2015). Investigation of the effect of organic pollution on the consolidation behavior of fine soils. *Oil Research*, 85 (1), 169-179. (In Persian).
- Bradford, J. M. (1986). Penetrability. In: A. Klute (Ed), *Methods of Soil Analysis*. Part 1. Agron. Monogr. 9, pp. 463-478. American Society of Agronomy and Soil Science of America, Madison WI, USA.
- Brunori, F., Penzo, M. C. & Torri, D. (1989). Soil shear strength: its measurement and soil detachability. *Catena*, 16, 59-71.
- Byrd, C. W. & Cassel, D. K. (1980). The effect of sand content upon cone index and selected physical properties. *Soil Science*, 129, 197-204.
- Chattopadhyay, P., Karthick, A., & Roy, B. (2019). A review on the application of chemical surfactant and surfactant foam for remediation of petroleum oil contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 243, 187-205.
- Delleur, J. (2000). Handbook of ground water engineering, springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Estabragh, A. R., Beytolahpour, I., & Javadi, A. A. (2011). Effect of resin on the strength of soil-cement mixture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 969-976.
- Estabragh, A. R., Khatibi, M., & Javadi, A. A. (2016). Effect of cement on treatment of a clay soil contaminated with glycerol. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4), 1-36.
- Farzadkia, M., Abdollahinejad, B., Jonidi Jafari, A. & Esrafil, A. (2019). Bioremediation of soils contaminated with gasoline in bioreactors containing earthworms *Eisenia Fetida* and mixture of vermicompost and raw activated sludge. *Journal of Environmental Health Engineering*, 7(1), 53-68. (In Persian).
- Franti, T. G., Laflen, J. M. & Watson, D. A. (1999). Predicting soil detachment from high discharge concentrated flow Trans. *American Society of Association Executives*, 42, 329-335.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size Analysis. In: Klute, A.(ed.). *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods*. Agronomy Monograph 9 (2Ed). American Society of Agronomy, Madison, WI. 383-411.
- George, S., Aswathy, E., Sabu, B., Krishnaprabha, N., & George, M. (2014). Study on geotechnical properties of diesel oil contaminated soil. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, 2(2), 113-117.
- Gerard, C. J. (1965). The influence of soil moisture, soil texture, drying conditions and exchangeable cations on soil strength. *Soil Science Society of America Proceedings*, 29, 641- 645.
- Gahremani, N., Hafezi Moghaddas, N., Ghafoori, M. & Lashkaripour, G. R. (2018). Effect of urban wastewater on chemical, physical and mechanical properties of soil (Case study: Central Area of Mashhad). *Iranian Journal of Engineering Geology*, 11(3), 1-13. (In Persian).
- Ghebreiyessus, Y. T., Gantzer, C. J., Alberts, E. E. & Lentz, R. W. (1994). Soil erosion by concentrated flow: shear stress and bulk density. *Transactions of the American Society of Association Executives*, 37, 1791-1797.
- Gimenez, R. & Goverz, G. (2002). Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soil Science Society of America Journal*, 66(5), 1475-1483.
- Goodarzi, S. (2015). Effect of petroleum hydrocarbons, rice husk ash and coal ash on stability limits and some soil mechanical properties. master thesis, Soil Science Department, School of Agriculture, Isfahan University of Technology, Esfahan, Iran. (In Persian).
- Habib- ur- Rahman, S., Abduljawwad, S. N., & Akram, T. (2007). Geotechnical behavior of oil contaminated fine-grained soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 12, 1-12.
- Hamid, F. S., Ossai, I. C., Ahmed, A., & Hassan, A. (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 1-42.
- Hassanshahian, M., Zeinalipour, M. S., & Hosseinzadeh Musa, F. (2014). Isolation and characterization of crude oil degrading bacteria from the Persian Gulf (Khorramshahr province). *Marine Pollution Bulletin*, 82, 39-44.
- Heidarpoor, M. & Oliaei, M. (2013). Oil contamination

- propagation patterns in soils. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.L)*, 13, 39-51. (In Persian).
- Herrick, J. E. & Jones, T. L. (2002). A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1320-1324.
- Kamel, E., Safadoust, A. & Mosaddeghi, M. R. (2018). Effects of petroleum contamination on water repellency and water characteristic curve of two different soil textures. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 32(1), 85-97. (In Persian).
- Kermanpour, M., Mosaddeghi, M. R., Afyuni, M. & Hajabassi, M. A. (2015). Effect of petroleum pollution on soil water repellency and structural stability in Bakhtiardasht Plain, Isfahan. *Journal of Water and Soil Sciences*, 19 (73), 139-149. (In Persian).
- Khabbazi, H. & Hasanloord, M. (2018). Oil contaminants effect on the dispersivity potential and shear strength of dispersive clay soils. *AMIRKABIR Journal of Civil Engineering*, 50 (2), 401-408. (In Persian).
- Khalil Moghaddam, B. (2009). Estimation of shear strength, hydraulic conductivity and soil penetration rate using artificial neural networks. Ph.D. Thesis, Soil Science Department, School of Agriculture, Isfahan University of Technology, Esfahan, Iran. (In Persian).
- Khalilmoghadam, B., Afyuni, M., Abbaspour, K.C., Jalalian, A., Dehghani, A.A. & Schulin, R. (2009). Estimation of surface shear strength in Zagros region of Iran-A comparison of artificial neural networks and multiple-linear regression models. *Geoderma*, 153, 29-36.
- Khamehchiyan, M., Charkhabi, A. M., & Tajik, M. (2007). Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Journal of Engineering Geology*, 89(3), 220-229.
- Koolen, A. J. & Kuipers, H. (1983). *Agricultural Soil Mechanics*. Heidelberg: Springer- Verlag.
- Leonard, J. & Richard, G. (2004). Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. *Catena*, 57, 233-249.
- Mandari, T., Lin, J., (2007), Isolation and characterization of engine oil degrading indigenous microorganisms in wazulu- Natal, South Africa. *African Journal of Biotechnology*, 6(1): 023-027.
- Namkoong, W., Hwang, E. Y., Park, J. S., Choi, J. Y. (2002). Bioremediation of diesel- contaminated soil with composting, *Environmental Pollution*, 23-31.
- Perfect, E., Rasiah, V. & Kay, B. D. (1992). Fractal dimensions of soil aggregate-size distributions calculated by number and mass. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1407-1409.
- Rauws, G. & Govers, G. (1988). Hydraulic and soil mechanical aspects of till generation on agricultural soils. *Journal of Soil Science*, 39, 111-124.
- Roshanghiyas, S. M. & Bagheri Pour, M. H. (2019). The impact of crude oil contaminant on the geomechanical properties of Kaolinite clay soil at road bases. *Transportation infrastructure engineering*, 5(18), 101-112. (In Persian).
- Alikhani, S., Shorafa, M., Tavassoli, A. & Ebrahimi, S. S. (2011). The effect of plants' growth at different densities on soil petroleum hydrocarbons remediation. *Journal of Water and Soil*, 25(5), 961-970. (In Persian).
- Shin, E. C. & Das, B. M. (2001). Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand. *International Society of Offshore and Polar Engineers*, 11(3), 220-227.
- Shirani, H., Hajabassi, M., Afyuni, M. & Hemmat, A. (2010). Impact of tillage systems and farmyard manure on soil penetration resistance under corn cropping. *Journal of Water and Soil Sciences*, 14(51), 141-155. (In Persian).
- Suja, F., Rahim, F., Taha, M., Hambali, N., Razali, A., Khalid, A., & Hamzah, A. (2014). Effects of local microbial bioaugmentation and biostimulation on the bioremediation of total petroleum hydrocarbons (TPH) in crude oil contaminated soil based on laboratory and field observations. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 90, 115- 122.
- Vafaeian, M. (1997). *Soil engineering properties*. Iran, Esfahan: Arkan Isfahan Publishers. 424p. (In Persian).
- Zangeneh, Z., Bayat, H., Bayazidi, F. & Hamzei, J. (2017). Effect of different tillage systems and cover crop on aggregate stability, aggregate tensile strength and penetration resistance of a silt loam soil in Hamedan. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(5), 1015-1029. (In Persian).
- Zeng, G., Tang, L., Ren, X., Wang, J., Wan, J., Wang, J., Deng, Y., Liu, Y., & Peng, B. (2018). The potential impact on the biodegradation of organic pollutants from composting technology for soil remediation. *Waste Management*, 72, 138-149.