

Effect of Some Petroleum Products on Water Repellency of Texturally Different Soils

RAZIYEH DARYAEE¹, ALI AKBAR MOOSAVI^{1*}, REZA GHASEMI¹, MASOUD RIAZI²

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

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

ABSTRACT

One of the most important soil and environmental pollutants, particularly around refineries and oil pipelines are oil pollutants which can affect on soil properties. Water repellency, as one of the important soil physical properties, can also be affected by different pollutants in different soils. Therefore, the aim of this study aimed is to evaluate the effect of 0, 1.5, 3, and 4.5% levels of crude oil, kerosene and gasoline on the static (soil-water contact angle) and dynamic (water droplet penetration time) water repellency in clay loam, loamy sand, and sandy loam soils. The results showed that the mean value of dynamic water repellency in loamy sand soil was significantly more than of clay loam and sandy loam soils by 27 times and the mean value of static water repellency in loamy sand and sandy loam soils was significantly more than of clay loam soil by 7% and 1%, respectively. Furthermore, the mean value of dynamic water repellency in soils treated with kerosene and gasoline were significantly lower than crude oil-treated soils by 100% and 96%, respectively and were respectively lower by 19% and 15% for the mean value of static water repellency. In general, petroleum products caused a significant increase in water repellency and the maximum value of water repellency was observed in the crude oil-treated soils.

Keywords: Clay Loam, Crude Oil, Gasoline, Kerosene, Loamy Sand, Sandy Loam.

اثر برخی مواد نفتی بر آب‌گریزی خاک‌های با بافت مختلف

راضیه دریایی^۱، سید علی اکبر موسوی^{۱*}، رضا قاسمی^۱، مسعود ریاضی^۲

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: ۱۴۰۰/۱/۲۴ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۲۲ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۴/۲۱)

چکیده

آلاینده‌های نفتی از مهم‌ترین آلاینده‌های خاک و محیط زیست به‌ویژه در اطراف پالایشگاه‌ها و مسیرهای انتقال نفت هستند که می‌توانند بر بسیاری از ویژگی‌های خاک موثر باشند. آب‌گریزی، به‌عنوان یکی از ویژگی‌های مهم فیزیکی خاک نیز می‌تواند در خاک‌های مختلف به میزان متفاوتی تحت تاثیر آلاینده‌های نفتی قرار گیرد. بنابراین این پژوهش با هدف بررسی اثر کاربرد سطوح صفر، ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد نفت خام، نفت سفید و گازوئیل بر آب‌گریزی ایستا (زاویه تماس تعادلی آب با خاک) و پویا (مدت زمان نفوذ قطره آب به خاک) در خاک‌های لومرسی، شن‌لومی و لوم‌شنی انجام شد. نتایج نشان داد که میانگین آب‌گریزی پویا در خاک شن‌لومی به‌طور معنی‌داری به میزان ۲۷ برابر بیشتر از خاک‌های لومرسی و لوم‌شنی و میانگین آب‌گریزی ایستا در خاک‌های شن‌لومی و لوم‌شنی به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به میزان ۷ و ۱ درصد بیشتر از خاک لومرسی بود. همچنین میانگین آب‌گریزی پویا در خاک‌های تیمار شده با نفت سفید و گازوئیل در مقایسه با نفت خام به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب به میزان ۱۰۰ و ۹۶ درصد و میانگین آب‌گریزی ایستا به‌ترتیب به میزان ۱۹ و ۱۵ درصد کمتر بود. به‌طور کلی مواد نفتی سبب افزایش معنی‌دار آب‌گریزی شدند و بیشینه مقادیر آب‌گریزی در خاک‌های تیمار شده با نفت خام مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: شن‌لومی، گازوئیل، لوم‌رسی، لوم‌شنی، نفت خام، نفت سفید.

مقدمه

آلودگی‌های نفتی یک پیامد اجتناب‌ناپذیر حاصل از افزایش سریع جمعیت و فرایند صنعتی شدن هستند و از آن‌جا که بیشتر تاسیسات پالایشگاهی بر روی خاک احداث می‌شوند، آلودگی خاک با مواد نفتی در محدوده‌ی پالایشگاه‌ها با توجه به پوسیدگی مخازن، پوسیدگی یا شکست خطوط لوله‌های انتقال و یا تصادف تانکرها در مسیر انتقال امری شایع است (Seyed Alikhani et al., 2011). آلاینده‌های نفتی با اثرات منفی زیست محیطی گوناگون و تأثیر بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک و آب، کیفیت آنها را به مخاطره انداخته و سلامت بشر را تهدید می‌کند (Fallah et al., 2013). فرآورده‌های نفتی از جمله رایج‌ترین و خطرناک‌ترین آلاینده‌هایی هستند که سبب آلودگی محیط زیست می‌شوند (Seyed Alikhani et al., 2011). زندگی بشر وابسته به منابع انرژی و به ویژه سوخت‌های فسیلی همچون نفت خام و دیگر فرآورده‌های نفتی پرمصرف همچون نفت سفید و گازوئیل است. هیدروکربن‌های نفتی مذکور به صورت طبیعی نیز در مواد شیمیایی که توسط انسان و برای فعالیت‌های مختلف شامل سوخت‌گیری وسایل نقلیه و گرم کردن منازل استفاده

می‌شوند، وجود دارند. نشت ترکیبات نفتی تحت تأثیر نیروهای مؤینگی و ثقلی منجر به حرکت عمودی در خاک‌های غیر اشباع شده و خلل و فرج خاک را پر می‌کند (Delleur, 2000). حضور ترکیبات نفتی در خاک می‌تواند سبب بروز سمیت برای انسان و سایر موجودات زنده و نیز آلودگی آب‌های زیر زمینی شود. هیدروکربن‌های نفتی به دلیل زیست تخریب‌پذیر بودن یکی از شایع‌ترین گروه‌های آلوده‌کننده‌های آلی در محیط زیست می‌باشند (Saadati et al., 2015) و 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; Chattopadhyay et al., 2020; Hamid et al., 2019). بنابراین پالایش مکان‌های آلوده به ترکیبات نفتی امری ضروری و مهم می‌باشد که لازمه‌ی آن شناخت و بررسی تاثیر این آلاینده‌ها بر ویژگی‌های خاک است (Saadati et al., 2015). مطالعاتی که تاکنون در ارتباط با اثر آلودگی‌های نفتی بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و مقاومت خاک‌ها انجام شده، نشان می‌دهد که برخی ویژگی‌های خاک از جمله نفوذپذیری، زاویه اصطکاک داخلی، حدود آتربرگ و سایر

Young, 1999). با توجه به مطالعات عوامل زیادی مانند مقدار و نوع ماده آلی، بافت خاک، نوع کاربری زمین، مقدار رطوبت خاک، پهاش خاک و آتش‌سوزی در ایجاد و تغییر شدت آبریزی خاک دخالت دارند (Vogelmann *et al.*, 2013). برخی پژوهشگران ماده آلی را به عنوان عامل شکل‌گیری پدیده آب‌گریزی در خاک معرفی نمودند (Bisdorn *et al.*, 1993). در اغلب پژوهش‌های انجام شده همبستگی معنی‌داری بین مقادیر کربن آلی و آبریزی خاک مشاهده شده است (Mirbabaei *et al.*, 2014; Aelamanesh *et al.*, 2013).

با توجه به اینکه ایران کشوری نفت‌خیز است، آلوده شدن خاک با مواد نفتی مختلف در ایران امری شایع بوده و شناسایی رفتار خاک در مواجهه با این مشکل و تعیین چگونگی مدیریت آن ضروری می‌باشد. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی اثر سطوح مختلف نفت خام، نفت سفید و گازوئیل به عنوان سه ماده نفتی پر مصرف بر آبریزی پویا و ایستا در سه خاک با بافت‌های لوم رسی، لوم شنی و شن لومی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۳۹۸ در بخش علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در منطقه باجگاه (طول جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی، عرض جغرافیایی ۵۴ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی، و ارتفاع ۱۸۱۰ متر از سطح دریا) انجام شد.

مراحل آماده‌سازی

پژوهش در قالب آزمایش‌های فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت گلدانی و با سه تکرار انجام شد. تیمارهای 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 خاک مختلف شامل کلاس بافت‌های لوم رسی، شن لومی و لوم شنی بودند (لازم به ذکر است سطوح انتخابی آلاینده‌های نفتی با بررسی مقالات متعدد، انجام آزمایش و همچنین جلوگیری از روانی بیش از حد نمونه‌های خاک انتخاب شدند). خاک با بافت لوم رسی به صورت طبیعی از خاک سری دانشکده واقع در منطقه باجگاه و دو بافت دیگر به صورت مصنوعی و دست‌ساز تهیه شد (به منظور دستیابی به مقادیر تقریبی از شن و رس و کلاس‌های بافت خاک معرف در خاک‌های مورد استفاده، در این پژوهش از دو خاک مصنوعی و دست‌ساز استفاده شد). به‌این ترتیب که برای تهیه ۳ کیلوگرم از نمونه‌های خاک مورد نظر، به مقدار لازم از دو نوع بافت خاک رس لومی و شنی به عنوان بافت پایه که به ترتیب از سری کوی اساتید دانشکده کشاورزی شیراز و منطقه سیوند استان فارس تهیه شده بودند استفاده شد. برای ساخت ۳ کیلوگرم

ویژگی‌های مقاومتی خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی متفاوت است (Estabragh *et al.*, 2011; Estabragh *et al.*, 2016). عمده پژوهش‌ها در ارتباط با تاثیر آلودگی خاک بر نفوذپذیری خاک بوده که در کشاورزی بسیار حائز اهمیت است و با سایر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک ارتباط زیادی دارد (Heidarpoor & Oliaei, 2013; Antony *et al.*, 2016; Ghahremani *et al.*, 2018).

یکی از معضلات عمده خاک‌های آلوده به نفت به‌ویژه در مناطق خشک دنیا آبریزی است. آبریزی و آب‌دوستی ویژگی‌های مهم فیزیکی هستند که تأثیر زیادی بر روابط آب و خاک دارند. آبریزی خاک با مقاومت خاک در برابر جذب آب در دوره‌های زمانی متفاوت مشخص می‌شود (Tadayonnejad *et al.*, 2017)؛ به بیان دیگر آبریزی خاک شامل مقاومت خاک در برابر خیسیدگی است که می‌تواند سبب کاهش سرعت نفوذ آب برای چند ثانیه تا چند ساعت و یا حتی چند هفته شود (Atashnama *et al.*, 2017). یکی از دلایل آبریزی خاک، حضور ترکیبات آلی آبریز است که سطح ذرات خاک را می‌پوشاند. این ترکیبات آلی معمولاً از برگ‌ها و ریشه‌های گیاهان شامل موم‌ها، اسیدهای چرب و کوتین‌ها می‌باشند (Hosseini *et al.*, 2017; Tadayonnejad *et al.*, 2015; *al.*). آبریزی شدید ممکن است سبب تنش گیاهی و کاهش تولید محصول شود (Doerr *et al.*, 2000; Tadayonnejad *et al.*, 2017). پژوهش‌ها، نتایج نشان داده است که حضور آلاینده‌های نفتی در خاک سبب بروز آبریزی شدید در خاک می‌شود (Buczko and Bens, 2006; Takawira *et al.*, 2014). در پژوهشی نیز بیان شده که شدت آبریزی پس از گذشت یک دوره‌ی خشکی طولانی مدت، افزایش می‌یابد (Ghazanshahi, 2006). همچنین آب‌گریزی سبب کاهش نفوذپذیری و ظرفیت نفوذ آب به خاک، افزایش رواناب سطحی، کاهش قابلیت خیس خوردگی خاک، خیس خوردگی غیر یکنواخت خاک، تاثیر بر توزیع سه بعدی و پویایی رطوبت خاک، افزایش سیلاب ناشی از باران‌های شدید و تشدید فرسایش خاک می‌شود (Wallis *et al.*, 1990; Zarei *et al.*, 2015; Amjadian *et al.*, 2018). همچنین توسعه جریان انگشت‌مانند یا گذرگاه‌های جریان ترجیحی، تلفات عناصر غذایی، ایجاد ناپایداری در جریان و جبهه رطوبتی نامنظم نیز پدیده‌هایی هستند که در اثر آبریزی خاک به وجود می‌آیند (Jordan *et al.*, 2009). آبریزی خاک با میزان کربن آلی خاک (Nelson & Sommer, 1996) و رطوبت خاک (Fishkis *et al.*, 2015) ارتباط مستقیم دارد و حساس‌ترین فاکتور مرتبط با تغییرات آب‌گریزی و آب‌دوستی، مقدار رطوبت خاک است (Hallett &

مطالعه، تیمارهای نفتی با درصدهای ذکر شده و در سه تکرار به خاک‌های مورد مطالعه اضافه شد، سپس نمونه‌های ۳ کیلوگرمی تیمار شده 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 نگهداری شدند. پس از گذشت ۷۲ ساعت، نمونه‌های مربوط به هر بافت توزین و سپس به مدت ده هفته و هر هفته یک بار در حد رطوبت ظرفیت مزرعه (که قبلاً با استفاده از روش گلدانی تعیین شده بود) با آب مقطر آبیاری شدند. در پایان مدت آزمایش (پس از ده هفته)، ویژگی‌های مورد نظر به شرح زیر در نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شدند:

خاک با بافت شن لومی به ترتیب مقدار ۹۳/۴۸ و ۶/۵۲ درصد از خاک‌های شنی و لوم رسی و برای ساخت ۳ کیلوگرم خاک با بافت لوم شنی به ترتیب مقدار ۴۶/۱۶ و ۵۳/۸۴ درصد از خاک‌های شنی و لوم رسی استفاده و ترکیب شد. لازم به ذکر است در نمونه‌هایی از خاک‌های مورد مطالعه، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اولیه با استفاده از روش‌های استاندارد معمول اندازه‌گیری شد (جدول ۱). بافت خاک‌های تهیه شده نیز با روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1986) اندازه‌گیری شد. برای آشنایی بیشتر با ترکیب شیمیایی و ساختار آلاینده‌های نفتی مورد مطالعه نیز آزمایش‌هایی در آزمایشگاه مرکزی نفت دانشکده نفت دانشگاه شیراز انجام و نتایج گزارش شد (جدول ۲). پس از تهیه نسبت‌های مختلف از خاک‌های اولیه و آماده‌سازی بافت‌های خاک مورد

جدول ۱- برخی ویژگی‌های عمومی خاک‌های مورد استفاده در پژوهش

نمونه‌های خاکی			ویژگی‌ها	
خاک سوم	خاک دوم	خاک اول		
۸/۹۵	۳/۶	۲۹/۹۳	رس (درصد)	
۲۸/۳۱	۹/۱۵	۳۲/۷۸	سیلت (درصد)	
۶۲/۷۴	۸۷/۲۵	۳۷/۲۹	شن (درصد)	
لوم شنی	شن لومی	لوم رسی	کلاس بافت	
۲۰	۱۷	۲۵	رطوبت ظرفیت مزرعه (درصد وزنی)	
۲۵/۱۵	۳۹/۷۵	۳۶/۸۵	کربنات کلسیم معادل (درصد)	
۳۰/۱۷	۳۷/۹۰	۳۱/۱۰	سدیم عصاره اشباع (میلی‌گرم در لیتر)	
۱۲/۹۰	۲۷/۱۰	۱۶/۱۰	پتاسیم عصاره اشباع (میلی‌گرم در لیتر)	
۸/۷	۸/۴	۱۷/۲۳	ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بار در کیلوگرم)	
۷/۶۸	۷/۳۸	۷/۶۳	پهاش خمیر اشباع	
۰/۶۴۰	۰/۸۶۱	۰/۷۳۶	قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع (دسی زیمنس بر متر)	
۰/۴۷۷	۰/۳۴۱	۰/۸۸۵	ماده آلی (درصد)	

رگرسیون بین میزان رطوبت و زمان نفوذ آب در خاک به دست آمد. سپس میزان زمان نفوذ قطره آب در خاک در رطوبت ظرفیت مزرعه برای هر تیمار محاسبه شد و مقایسه تیمارها از نظر زمان نفوذ آب به خاک در این رطوبت انجام شد. چنانچه زمان لازم برای نفوذ قطره آب به خاک کمتر از ۵ ثانیه باشد، خاک قابل مرطوب شدن است، در غیر این صورت اگر زمان لازم برای نفوذ قطره آب ۵ تا ۶۰ ثانیه، ۶۰ تا ۶۰۰ ثانیه، ۶۰۰ تا ۳۶۰۰ ثانیه و بیشتر از ۳۶۰۰ ثانیه باشد خاک به ترتیب به طور جزئی آب‌گریز، قویا آب‌گریز، به شدت آب‌گریز و بی‌نهایت آب‌گریز خواهد بود (Dekker & Ritsema, 1994). لازم به ذکر است این آزمایش بلافاصله پس از آخرین آبیاری بر روی خاک دست‌نخورده موجود در گلدان، در طول یک هفته و در رطوبت‌های مختلف انجام شد.

آب‌گریزی پویا (آب‌گریزی به روش قطره آب، WDPT)
 برای تعیین آب‌گریزی پویای خاک از روش زمان لازم برای نفوذ قطره آب به خاک (Dekker et al., 2009) استفاده شد. به این ترتیب که در این روش، سه قطره آب روی سطح صاف و دست‌نخورده خاک موجود در هر گلدان قرار داده شد و مدت زمان لازم برای نفوذ و جذب قطره‌ها (سه قطره در هر گلدان در هر روز) توسط خاک در پنج روز متوالی اندازه‌گیری و میانگین آنها گزارش شد (شکل ۱- الف). لازم به ذکر است قطره چکان مورد استفاده، قطره چکان پلاستیکی با حجم ۵ میلی‌لیتر و قطر قطره حدود ۲/۵ میلی‌متر بود. در این مرحله از آزمایش، برای به دست آوردن رطوبت خاک، گلدان‌ها در روزهای اندازه‌گیری آب‌گریزی پویا (زمان لازم برای نفوذ قطره آب به خاک) توزین شدند. رابطه

جدول ۲- برخی ویژگی‌های مواد نفتی مورد استفاده در پژوهش

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

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

آب‌گریزی ایستا (زاویه تماس تعادلی آب با خاک)

برای انجام این آزمایش، زاویه تماس تعادلی آب با خاک به شرح زیر اندازه‌گیری شد (Roy & McGill, 2002). ابتدا خاک مورد مطالعه از الک ۲ میلی‌متر عبور داده و با استفاده از سیستم قیف و شیلنگ (برای حفظ دانه‌بندی خاک) در دو لوله شیشه‌ای مدرج به طول ۵۰ سانتی‌متر و قطر ۱/۵ سانتی‌متر که انتهای آن‌ها به خوبی با توری پوشانده شده است (برای جلوگیری از ریختن خاک)، ریخته شد (به گونه‌ای که در هر لوله ارتفاع خاک ۲۰ تا ۲۵ سانتی‌متر باشد). سپس چند ضربه به تعداد مساوی به هر کدام از ستون‌ها زده شد تا دانه‌بندی خاک حالت طبیعی‌تری به خود بگیرد و دو پتری‌دیش که کف آن دو قطعه چوب چسبانده شده بود (برای صعود راحت آب و الک) را انتخاب کرده و در یکی از پتری‌دیش‌ها آب مقطر و دیگری الک اتیلیک ۹۶ درصد ریخته شد. با قرار دادن ستون‌های خاک در پتری‌دیش‌ها آب و الک در داخل ستون‌ها صعود کرده و منجر به خیس شدن خاک شدند (شکل ۱- ب). سپس در زمان‌های مختلف ارتفاع صعود آب و الک اندازه‌گیری شد تا زمانی که سرعت صعود کم یا ناچیز شود. با رسم مقادیر سرعت صعود در برابر معکوس ارتفاع صعود برای آب و الک در یک دستگاه مختصات بهترین خطوط رگرسیون به

نقاط مشخص شده برازش داده و معادله خطوط تعیین شد.

در حداکثر صعود، سرعت صعود برابر با صفر می‌شود و در نتیجه محل تقاطع نمودار با محور افقی (عکس حداکثر ارتفاع) برابر با ارتفاعی است که معادل بیشترین صعود مویینگی می‌باشد. با توجه به دانستن اطلاعات مربوط به الک با استفاده از رابطه (۱) میانگین شعاع خلل و فرج خاک محاسبه شد.

$$h_a = \frac{-2\delta_a \cdot \cos\theta}{\rho_a \cdot g \cdot r} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن h_a حداکثر ارتفاع صعود الک در خاک (سانتی-متر)، δ_a کشش سطحی الک (۲۲/۳ دین بر سانتی‌متر)، g شتاب ثقل (۹۸۱ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه)، ρ_a جرم مخصوص الک (۰/۷۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، r متوسط شعاع خلل و فرج خاک (سانتی‌متر) و θ زاویه تماس الک با خاک و برابر با صفر (درجه) است.

با استفاده از حداکثر ارتفاع صعود آب و شعاع خلل و فرج محاسبه شده از رابطه قبل و قرار دادن ویژگی‌های آب در معادله (۲)، زاویه تماس آب با خاک محاسبه می‌شود.

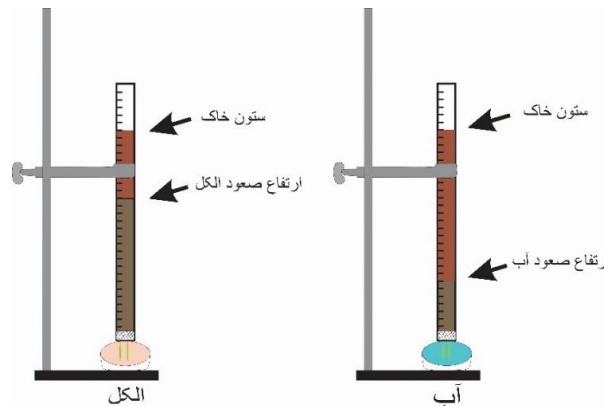
$$h_w = \frac{-2\delta_w \cdot \cos\theta}{\rho_w \cdot g \cdot r} \quad (\text{رابطه ۲})$$

- 1- Dynamic viscosity
- 2- Kinematic viscosity
- 3- Pour point
- 4- Revolution per minute (RPM)
- 5- Torque

که در آن حداکثر ارتفاع صعود آب در خاک (سانتی‌متر)،
 مخصوص آب (یک گرم بر سانتی‌متر مکعب) و θ زاویه تماس آب
 با خاک (درجه) می‌باشد. δ_w کشش سطحی آب (۷۲/۲ دین بر سانتی‌متر)، ρ_w جرم



(الف)



(ب)

شکل ۱- شیوه اندازه‌گیری آب‌گیری پویا (الف) و ایستا (ب) در خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

مقادیر آب‌گیری پویا و ایستای اندازه‌گیری شده در خاک‌های تیمار شده با تیمارهای مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزارهای آماری EXCEL و SAS تجزیه و تحلیل شد و میانگین‌های مربوط به اثر هر یک از تیمارها به صورت جداگانه و نیز برهمکنش‌های مورد بررسی آنها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد مقایسه شد.

نتایج و بحث

آب‌گیری پویای خاک (مدت زمان لازم برای نفوذ قطره آب به خاک)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کاربرد سطوح ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد آلاینده‌های نفت خام، نفت سفید و گازوئیل بر آب‌گیری پویای خاک (مدت زمان لازم برای نفوذ قطره آب) در سطح

احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. همچنین نتایج نشان داد که بافت خاک، تیمار نفتی و سطوح مختلف آنها و همچنین هر یک از برهمکنش‌های دوتایی و سه تایی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بودند (جدول ۳ و ۴).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (دو عاملی) اثر مواد نفتی بر آبریزی ایستا، زاویه تماس تعادلی آب با خاک، θ (درجه) و آبریزی پویا، مدت زمان نفوذ قطره آب به خاک، WDPT (ثانیه) در خاک‌های با بافت مختلف

میانگین مربعات						درجه آزادی	منابع تغییر
گازوئیل		نفت سفید		نفت خام			
WDPT	θ	WDPT	θ	WDPT	θ		
۴۵۳۸۰۱**	۲۵/۰۹**	۱۶۷/۴۸**	۹۹/۱۵**	۴۳۴۲۷۸۶۴۹**	۱۴۰۵**	۲	بافت
۲۶۱۴۹۵**	۹۶۶**	۳۰۱/۶۷**	۶۵۶**	۸۴۵۹۶۱۳۳**	۳۹۰۸**	۳	سطوح مواد نفتی
۱۵۳۰۹۸**	۹۱/۹۱**	۱۵/۰۲**	۳۲**	۷۱۴۰۴۷۱۸**	۳۲۰**	۶	برهم کنش بافت خاک و سطوح مواد نفتی
۱۹۳/۵۷	۱/۰۷	۰/۵۳۸	۰/۲۳۴	۳۷۱۹۳۱	۳/۸۷	۲۴	خطا
۸/۹۹	۱/۵۱	۵/۱۵	۰/۷۳۷	۱۶/۶۴	۲/۴۴		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 آبریزی ایستا، زاویه تماس تعادلی آب با خاک، θ (درجه) و آبریزی پویا، مدت زمان نفوذ قطره آب به خاک، WDPT (ثانیه) در خاک‌های با بافت مختلف

میانگین مربعات		درجه آزادی	منابع تغییر
θ	WDPT		
۲۶۱**	۱۳۴۹۹۴۷۶۱**	۲	بافت خاک
۲۲۶۳**	۱۵۲۸۷۴۷۰۷**	۲	نوع ماده نفتی
۴۶۰۴**	۳۰۵۴۳۶۸۲**	۳	سطوح مواد نفتی
۶۳۴**	۱۴۶۱۶۲۰۳۱**	۴	بر هم کنش بافت خاک و نوع ماده نفتی
۹۴/۲۸**	۲۱۳۳۸۳۹۱**	۶	بر هم کنش بافت خاک و سطوح مواد نفتی
۴۶۳**	۲۶۴۰۲۶۱۷**	۶	بر هم کنش نوع و سطوح مواد نفتی
۱۷۵**	۲۳۹۶۴۲۴۳**	۱۲	برهم کنش بافت خاک، نوع و سطوح مواد نفتی
۱/۷۳	۱۲۵۷۸۹	۷۲	خطا

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

مطالعه سبب افزایش معنی‌دار آبریزی پویای خاک در مقایسه با شاهد (سطح صفر تیمار نفتی) شد (البته لازم به ذکر است که این افزایش تنها در سطح ۱/۵ درصد خاک‌های لوم رسی معنی‌دار نبود). به عبارتی کاربرد سطوح مذکور به ترتیب سبب افزایش معنی‌دار آبریزی پویا به میزان حدود ۲، ۲۶ و ۲۸ برابر در خاک لوم رسی؛ ۳۴۲، ۶۲۲ و ۸۷۷ برابر در خاک‌های شن لومی و ۳، ۶ و ۷۵ برابر در خاک‌های لوم شنی در مقایسه با شاهد شد (جدول ۵). بیشترین و کمترین مقدار آبریزی پویا در خاک لوم رسی به ترتیب به میزان ۷۶۷ و ۶/۵۱ ثانیه و به ترتیب در خاک‌های تیمار شده با ۴/۵ درصد گازوئیل و شاهد (بدون کاربرد نفت سفید) مشاهده شد. در حالی که بیشترین و کمترین مقدار آبریزی پویا در خاک شن لومی به ترتیب به میزان ۲۰۲۲۵ و ۴/۶ ثانیه و در خاک‌های تیمار شده با ۴/۵ درصد نفت سفید و شاهد (بدون کاربرد نفت سفید) مشاهده شد. در خاک‌های لوم شنی نیز بیشترین و کمترین مقدار آبریزی پویا به ترتیب به میزان

نتایج مقایسه میانگین نشان داد به طور میانگین در هر دو بافت خاک شن لومی و لوم شنی میزان آبریزی پویا در خاک-های تیمار شده با نفت سفید و گازوئیل در مقایسه با خاک‌های تیمار شده با نفت خام به طور معنی‌داری کمتر بود (جدول ۵). به طوری که در خاک‌های مذکور تیمار شده با نفت سفید میانگین آبریزی پویای خاک به ترتیب به میزان حدود ۱۰۰ و ۹۶ درصد و در خاک‌های تیمار شده با گازوئیل به ترتیب به میزان حدود ۱۰۰ و ۸۱ درصد کمتر از خاک‌های تیمار شده با نفت خام بود. این درحالیست که در خاک‌های لوم رسی روند تغییرات به شکل دیگری بود، بدین گونه که کاربرد نفت سفید و گازوئیل نسبت به نفت خام، آبریزی پویای خاک را به ترتیب به میزان حدود ۴ درصد و ۲۲ برابر افزایش داد (هر چند افزایش حاصل از کاربرد نفت سفید نسبت به نفت خام از نظر آماری معنی‌دار نبود). همچنین نتایج نشان داد به طور میانگین کاربرد سطوح ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد تیمارهای نفتی در همه خاک‌های مورد

۱۳۵۰ و ۶/۶۷ ثانیه و در شرایط تیمار با ۴/۵ درصد نفت سفید و شاهد (بدون کاربرد نفت سفید) مشاهده شد (جدول ۵).

جدول ۵- اثر سطوح مواد نفتی مورد مطالعه بر آب‌گریزی پویا (مدت زمان لازم برای نفوذ قطره آب به خاک، ثانیه) در خاک- های با بافت مختلف

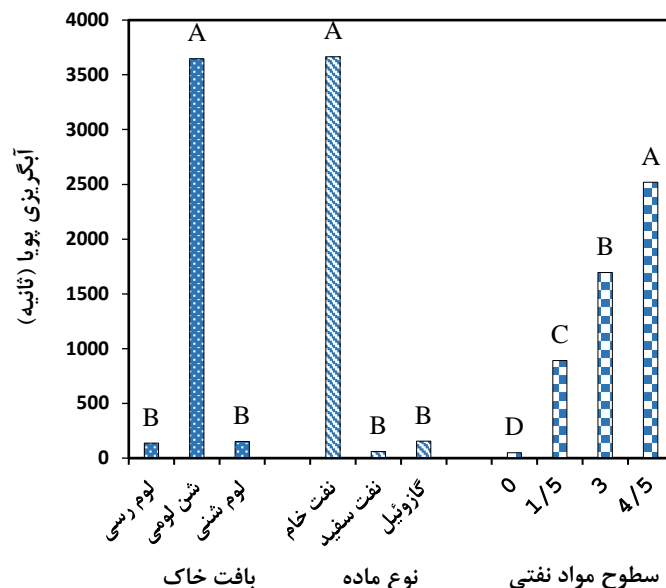
میانگین	مواد نفتی			سطوح (درصد وزنی)
	گازوئیل	نفت سفید	نفت خام	
بافت لومرسی (میانگین = ۱۳۷ B)				
۹/۶۲C	۱۰/۲۰c	۶/۵۱ c	۱۲/۱۷* c	صفر
۱۵/۴۴ C	۱۵/۰۴ c	۱۷/۷۵ c	۱۳/۵۳ c	۱/۵
۲۵۳B	۷۱۶ b	۲۳/۴۲ c	۱۹/۴۸ c	۳
۲۷۱ A	۷۶۷ a	۲۳/۱۱ c	۲۲/۸۴ c	۴/۵
	۳۷۷A	۱۷/۷۰ B	۱۷/۰۰ B	میانگین
بافت شن لومی (میانگین = ۳۶۴۶ A)				
۷/۷۰ D	۶/۷۰ d	۴/۶۰ d	۱۰/۷۰ d	صفر
۲۶۳۰ C	۱۲/۵۰ d	۷/۴۰d	۷۸۷۱ c	۱/۵
۴۷۸۷ B	۱۷/۹۰ d	۱۴/۴۰ d	۱۴۳۲۷b	۳
۶۷۵۵ A	۲۶/۳۰ d	۱۳/۵۰ d	۲۰۲۲۵ a	۴/۵
	۱۵/۹۰ B	۱۰/۵۰ B	۱۰۶۰۹ A	میانگین
بافت لوم‌شنی (میانگین = ۱۵۲ B)				
۷/۱۵ D	۷/۳۹ i	۶/۶۷ i	۷/۳۹ i	صفر
۲۳/۰۲ C	۹/۹۵ hi	۱۲/۹۴gh	۴۶/۱۷d	۱/۵
۴۲/۹۴B	۳۶/۴۶ e	۱۶/۲۹ fg	۷۶/۰۸c	۳
۵۳۴A	۲۳۲ b	۲۰/۹۸ f	۱۳۵۰a	۴/۵
	۷۱/۴۹B	۱۴/۲۲ C	۳۷۰ A	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.

بی‌نهایت آب‌گریز و قویا آب‌گریز قرار گرفتند. همچنین میانگین مدت زمان لازم برای نفوذ قطره آب نشان داد که خاک‌های تیمار شده با نفت خام، نفت سفید و گازوئیل در خاک‌های لوم رسی به ترتیب در دسته‌ی خاک به طور جزئی آب‌گریز، به طور جزئی آب-گریز و قویا آب‌گریز؛ در خاک‌های شن لومی به ترتیب بی‌نهایت آب‌گریز، به طور جزئی آب‌گریز و به طور جزئی آب‌گریز و در خاک‌های لوم‌شنی به ترتیب قویا آب‌گریز، به طور جزئی آب‌گریز و قویا آب‌گریز قرار گرفتند. از سوی دیگر نتایج نشان داد به طور میانگین خاک‌های تیمار شده با سطوح ۰، ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد تیمارهای نفتی در خاک‌های لوم رسی به ترتیب در دسته به طور جزئی آب‌گریز، به طور جزئی آب‌گریز، قویا آب‌گریز و قویا آب‌گریز؛ در خاک‌های شن لومی به ترتیب به طور جزئی آب‌گریز، به شدت آب‌گریز، بی‌نهایت آب‌گریز و بی‌نهایت آب‌گریز و در خاک‌های لوم‌شنی به ترتیب به طور جزئی آب‌گریز، به طور جزئی آب‌گریز، به طور جزئی آب‌گریز و قویا آب‌گریز قرار گرفتند.

نتایج همچنین نشان داد میانگین آب‌گریزی پویا در خاک شن لومی به طور معنی‌داری به میزان حدود ۲۷ برابر بیشتر از آب‌گریزی پویا در خاک‌های لوم رسی و لوم‌شنی می‌باشد (شکل ۱). به طور کلی میانگین آب‌گریزی پویا در خاک‌های تیمار شده با نفت سفید و گازوئیل در مقایسه با نفت خام به طور معنی‌دار و به ترتیب به میزان حدود ۱۰۰ و ۹۶ درصد کمتر بود (شکل ۱) و کاربرد سطوح ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد تیمارهای نفتی مورد نظر نیز به طور کلی سبب افزایش معنی‌دار میانگین آب‌گریزی پویا به ترتیب به میزان حدود ۱۰۹، ۲۰۷ و ۳۰۸ برابر در مقایسه با شاهد شدند (شکل ۱).

نتایج نشان داد بر اساس معیار Dekker & Ritesma (1994)، خاک‌های مختلف تیمار شده با سطوح مختلف مواد نفتی مورد استفاده در دسته‌های مختلف آب‌گریزی قرار گرفته‌اند (جدول ۵). اما به طور کلی میانگین هر یک از بافت‌های لوم رسی، شن لومی و لوم‌شنی به ترتیب در دسته‌ی خاک‌های قویا آب‌گریز،



شکل ۱- اثر سطوح مختلف مواد نفتی مورد آزمایش بر آلودگی یویا (مدت زمان لازم برای نفوذ قطره آب به خاک) 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).

و ۶۲ درصد و در خاک‌های لوم شنی به میزان حدود ۵۵، ۳۹ و ۶۶ درصد در مقایسه با شاهد شد (جدول ۶).

بیشترین و کمترین مقدار آلودگی ایستا در خاک لوم رسی به ترتیب به میزان ۸۰/۳۶ و ۵۴/۷۰ درجه و به ترتیب در خاک تیمار شده با ۴/۵ درصد گازوئیل و بدون کاربرد نفت خام (شاهد) مشاهده شد. در حالی‌که بیشترین و کمترین مقدار آب-گریزی ایستا در خاک شن لومی به ترتیب به میزان ۵۳/۴۸ و ۱۲۶ درجه و در خاک تیمار شده با ۴/۵ درصد نفت خام و بدون کاربرد نفت خام (شاهد) مشاهده شد. در خاک‌های لوم شنی نیز بیشترین و کمترین مقدار آلودگی ایستا به ترتیب به میزان ۹۹/۴۷ و ۵۰/۰۵ درجه و در شرایط تیمار با ۴/۵ درصد نفت خام و بدون کاربرد نفت خام (شاهد) مشاهده شد (جدول ۶). نتایج همچنین نشان داد که به طور کلی میانگین آلودگی ایستا در خاک‌های شن لومی و لوم شنی به طور معنی‌دار و به ترتیب به میزان حدود ۷ و ۱ درصد بیشتر از خاک لوم رسی بود (شکل ۲). به طور کلی میانگین آلودگی ایستا در خاک‌های تیمار شده با نفت سفید و گازوئیل در مقایسه با نفت خام به طور معنی‌داری و به ترتیب به میزان حدود ۱۹ و ۱۵ درصد کمتر بود (شکل ۲) و کاربرد سطوح ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد تیمارهای نفتی مورد نظر سبب افزایش معنی‌دار میانگین آلودگی ایستا به ترتیب به میزان حدود ۳۴، ۴۹ و ۵۵ درصد در مقایسه با شاهد شد (شکل ۲).

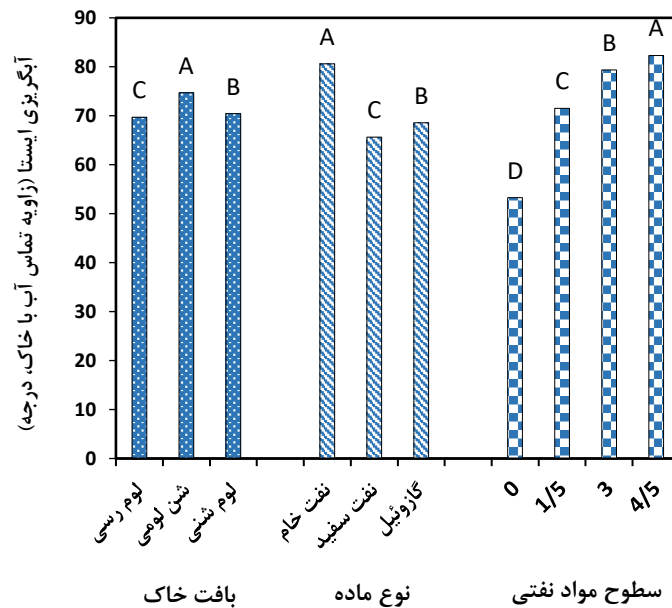
آلودگی ایستا (زاویه تماس تعادلی آب با خاک)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کاربرد سطوح ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد آلاینده‌های نفت خام، نفت سفید و گازوئیل بر آلودگی ایستا در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. همچنین نتایج نشان داد که بافت خاک، تیمار نفتی و سطوح مختلف آنها و همچنین هر یک از برهمکنش‌های دوتایی و سه تایی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳ و ۴). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که به طور میانگین در هر سه بافت خاک مورد مطالعه میزان آلودگی ایستا در خاک‌های تیمار شده با نفت سفید و گازوئیل در مقایسه با خاک‌های تیمار شده با نفت خام به طور معنی‌داری کمتر است. به طوری که در خاک‌های لوم رسی، شن لومی و لوم شنی تیمار شده با نفت سفید میزان آلودگی ایستا به ترتیب به میزان حدود ۴، ۳۲ و ۱۶ درصد و در خاک‌های تیمار شده با گازوئیل به ترتیب به میزان حدود ۲، ۲۵ و ۱۵ درصد کمتر از خاک‌های تیمار شده با نفت خام بود (جدول ۶). همچنین نتایج نشان داد که به طور میانگین کاربرد سطوح ۱/۵، ۳ و ۴/۵ درصد تیمارهای نفتی در همه خاک‌های مورد مطالعه سبب افزایش معنی‌دار آلودگی ایستا در مقایسه با شاهد (سطح صفر تیمار نفتی) شد. به طوری‌که کاربرد سطوح مذکور در خاک‌های لوم رسی به ترتیب سبب افزایش آلودگی ایستا به میزان حدود ۲۲، ۴۱ و ۳۷ درصد؛ در خاک‌های شن لومی به میزان حدود ۴۲، ۵۲

جدول ۶- اثر سطوح مواد نفتی مورد مطالعه بر آب‌گریزی ایستا (زاویه تماس آب با خاک، درجه) در خاک‌های با بافت مختلف

میانگین	مواد نفتی			سطوح (درصد وزنی)
	گازوئیل	نفت سفید	نفت خام	
بافت لومرسی (میانگین = ۶۹/۷۰ C)				
۵۵/۷۸D	۵۵/۸۳ fg	۵۶/۷۹ f	۵۴/۷۰* g	صفر
۶۸/۲۲ C	۶۴/۰۸ e	۶۸/۸۳ d	۷۱/۷۴ c	۱/۵
۷۸/۵۷ A	۷۸/۵۲ b	۷۷/۹۸ b	۷۹/۲۱ ab	۳
۷۶/۲۵ B	۸۰/۳۶ a	۶۹/۶۲ d	۷۸/۷۸ b	۴/۵
	۶۹/۷۰ B	۶۸/۳۱ C	۷۱/۱۱ A	میانگین
بافت شن لومی (میانگین = ۷۴/۶۹ A)				
۵۳/۷۲D	۵۳/۹۱ g	۵۳/۷۷ g	۵۳/۴۸ g	صفر
۷۶/۳۰C	۷۷/۲۸d	۶۰/۳۳ f	۹۱/۲۸ c	۱/۵
۸۱/۴۴B	۷۵/۷۱ d	۶۹/۳۸ e	۹۹/۲۲ b	۳
۸۷/۲۹A	۶۹/۴۳ e	۶۶/۹۰ e	۱۲۶ a	۴/۵
	۶۹/۰۸ B	۶۲/۶۰ C	۹۲/۳۸ A	میانگین
بافت لوم‌شنی (میانگین = ۷۰/۴۳ B)				
۵۰/۲۸ D	۵۰/۵۰ h	۵۰/۲۷ h	۵۰/۰۵ h	صفر
۶۹/۹۴C	۷۰/۰۲ f	۶۸/۴۷ g	۷۱/۳۵ e	۱/۵
۷۸/۱۰B	۷۰/۱۹ f	۷۱/۷۰ e	۹۲/۴۲ b	۳
۸۳/۳۹ A	۷۷/۰۶ c	۷۳/۶۴ d	۹۹/۴۷ a	۴/۵
	۶۶/۹۴ B	۶۶/۰۲ C	۷۸/۳۲ A	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 ۲- اثر سطوح مختلف مواد نفتی مورد آزمایش بر آب‌گریزی ایستا 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).

است. زاویه تماس یک قطره از مایع با سطح جامد در تعیین میزان خیس شدن موثر است. هر چه زاویه تماس به ۱۸۰ درجه نزدیک‌تر باشد، آب‌گریزی افزایش و ترشوندگی کاهش می‌یابد. بنابراین زاویه تماس، از طریق اندازه‌گیری زاویه‌ای که یک قطره از مایع با سطح جامد ایجاد می‌کند، به دست می‌آید و کمیتی برای بیان ترشوندگی سطح جامد به وسیله مایع است. بسته به اینکه اندازه

در رابطه با آب‌گریزی ایستای خاک، شاخص دیگری به نام ترشوندگی (Wettability) استفاده می‌شود که توانایی یک مایع در برقراری تماس با سطح جامد است و نشأت گرفته از نیروهای بین ملکولی می‌باشد. درجه‌ی ترشوندگی از تعادل بین نیروهای پیوستگی و چسبندگی تعیین می‌شود. تر شدن، به بیان دیگر، تمایل به کسب حداکثر سطح تماس برای یک مایع با سطح جامد

و ۵۰/۰۵ در خاک لوم شنی بود. که به ترتیب در نمونه‌های تیمار شده با ۴/۵ درصد گازوئیل و تیمار شده با صفر درصد نفت خام (شاهد) در خاک‌های لوم رسی؛ تیمار شده با ۴/۵ درصد نفت خام و تیمار شده با صفر درصد نفت خام (شاهد) در خاک‌های شن لومی و تیمار شده با ۴/۵ درصد نفت خام و تیمار شده با صفر درصد نفت خام (شاهد) در خاک‌های لوم شنی دیده شد. بر اساس نظریه Chow (1998) مایعات مختلف از نظر زاویه تماس یا سطوح جامد به صورت جدول ۷ تقسیم بندی می‌شوند.

جدول ۷- اثر زاویه تماس بر درجه خیس‌شوندگی و قدرت برهمکنش‌های دوگانه (Chow, 1998)

زاویه تماس، θ (درجه)	درجه خیس‌شوندگی	قدرت	
		برهمکنش جامد/مایع	برهمکنش مایع/مایع
صفر	خیس‌شوندگی کامل	قوی	ضعیف
$0 < \theta < 90$	خیس‌شوندگی زیاد	قوی	قوی
$90 \leq \theta < 180$	خیس‌شوندگی کم	ضعیف	ضعیف
۱۸۰	غیر خیس‌شوندگی کامل	ضعیف	قوی

مورد استفاده در این پژوهش با دارا بودن ترکیباتی مانند صمغ‌ها، اسیدهای چرب، تان‌ها، موم‌ها و به طور جزئی‌تر مواردی مانند مواد مومی مربوط به گیاهان و پوست آن‌ها، آلکان‌ها، اسیدهای چرب و نمک‌های آنها، استرها، فیتان‌ها و استرول‌ها و پوشاندن ذرات تشکیل‌دهنده خاک (رس، سیلت و شن) و همچنین خاکدانه‌ها، می‌توانند مانع تماس مولکول‌های آب با سطوح معدنی شوند و از این رو سبب ایجاد پدیده آبریزی در خاک شوند که با افزایش مقدار این مواد نیز به طبع آبریزی در خاک تشدید می‌شود. سایر پژوهشگران (Dekker & Jungerius, 1990; Doerr et al., 2000; Roy & McGill, 2000; Buczko & bens, 2006; Arye et al., 2011; Takawira et al., 2014; Zavala et al., 2014; Gavili et al., 2018) نیز در پژوهش‌های خود گزارش کردند حضور مواد ذکر شده در خاک سبب بروز و تشدید پدیده آبریزی می‌شود. نتایج این پژوهش همچنین نشان می‌دهد که درشت شدن بافت خاک و به عبارتی کاهش تخلخل سبب می‌شود تا میزان کمتری از مواد آبریز برای رسیدن به درجه مشابهی از آبریزی نسبت به خاک ریز بافت نیاز باشد و به عبارتی سبب افزایش خاصیت آبریزی در خاک‌های درشت بافت نسبت به سایر خاک‌ها می‌شود. همچنین احتمال می‌رود زیادتر بودن آب-گریزی در خاک‌های شنی به این دلیل باشد که هر چقدر بافت خاک درشت‌تر و میزان شن در آن بیشتر باشد، به دلیل داشتن سطح ویژه کمتر، با سهولت و بخش بیشتری از ذرات خاک توسط مواد آبریز پوشیده شده و در معرض آبریز شدن قرار می-

زاویه کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از ۹۰ درجه باشد، سطح جامد آب-دوست یا آبریز است؛ در زاویه صفر سطح کاملاً خیس می‌شود، به عبارت دیگر زاویه ۹۰ درجه مرز بین آب‌دوستی و آبریزی است. به حد اکثر زاویه تماس یک قطره با سطح، زاویه پیشروی و به کمینه زاویه تماس، زاویه پسروی گفته می‌شود (Chow, 1998). بر این اساس و با توجه به نتایج (جدول ۶) می‌توان گفت در هر یک از بافت‌های خاک لوم رسی، شن لومی و لوم شنی زاویه پیشروی و پسروی به ترتیب برابر با ۸۰/۳۶ و ۵۴/۷۰ درجه در خاک لوم رسی، ۱۲۶ و ۵۳/۴۸ درجه در خاک شن لومی و ۹۹/۴۷

بر اساس نظریه Chow (1998) و اطلاعات جداول ۶ و ۷، در تمام تیمارها درجه ترشوندگی زیاد با قدرت برهمکنش مایع/مایع، ضعیف و قدرت برهمکنش جامد/مایع، قوی مشاهده شد (به جز در مورد اثر نفت خام در خاک شن لومی که به طور میانگین نشان‌دهنده درجه ترشوندگی کم، قدرت برهم‌کنش مایع-مایع قوی و جامد-مایع ضعیف بود). از طرفی آب‌دوستی خاک ویژگی پویای آن است و با ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن ارتباط دارد. یکی از روش‌های کمی ارزیابی آب‌دوستی خاک، اندازه‌گیری زاویه تماس آب با خاک است؛ خاک‌هایی که خود به خودی و سریع خیس می‌شوند، آب‌دوست هستند و زاویه تماس آب با خاک در آن‌ها صفر است؛ اگر خاکی به طور جزئی یا به‌کندی خیس می‌شود، زاویه تماس آب با خاک در آن‌ها صفر تا ۹۰ درجه است و آبریزی کمتر از حد بحرانی دارند. چنانچه یک قطره آب بر سطح خاک قرار گیرد و نتواند وارد خاک شود، زاویه تماس آن با خاک بزرگ‌تر از ۹۰ درجه است و چنین خاکی آبریز واقعی است (Muller & Deurer, 2011)، بر این اساس نیز می‌توان گفت تمام نمونه‌ها به طور میانگین بر اساس اطلاعات جدول ۶ دارای آبریزی کمتر از حد بحرانی هستند و به طور جزئی و یا به‌کندی خیس می‌شوند اما خاک‌های شن لومی تیمار شده با نفت خام با زاویه تماس بیش از ۹۰ درجه، آبریز واقعی هستند و در آن‌ها، آب به صورت یک قطره بر روی خاک باقی می‌ماند.

با توجه به نتایج این طور به نظر می‌رسد که مواد نفتی آلی

شنی به افزودن ترکیبات مختلف از جمله مواد نفتی مورد مطالعه باشد. به علاوه تفاوت در رفتار و پاسخ خاک‌های مختلف و همچنین نتایج متفاوت احتمالی در پژوهش‌های متفاوت می‌تواند به دلیل وجود تفاوت در بین ویژگی‌های خاک‌ها، مواد نفتی و سطوح مختلف مورد مطالعه و همچنین شرایط مختلف محیطی (دما، رطوبت، ...) حجم نمونه و ... باشد که می‌تواند سبب انجام واکنش‌های فیزیکی شیمیایی مختلف بین انواع خاک‌ها و انواع ترکیبات افزودنی شده و در نتیجه سبب تفاوت در پاسخ‌ها و تغییرات آب‌گریزی خاک‌ها شود.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد به طور کلی تیمارهای نفتی سبب افزایش معنی‌دار آب‌گریزی پویا (مدت زمان نفوذ قطره آب به خاک) و ایستا (زاویه تماس تعادلی آب با خاک) شدند و با افزایش سطوح تیمارهای نفتی میزان آب‌گریزی نیز بیشتر شده و بیشینه مقادیر هر دو ویژگی در خاک‌های تیمار شده با نفت خام مشاهده شد (به جز در خاک‌های لوم رسی که بیشینه آب‌گریزی پویا در خاک‌های تیمار شده با گازوئیل مشاهده شد). بیشینه مقدار آب‌گریزی پویا و ایستا در بافت شن لومی مشاهده شد و با افزایش شن و درشت‌تر شدن بافت خاک، میزان هر دو آب‌گریزی افزایش یافت. نتایج نشان داد که میانگین آب‌گریزی پویا در خاک شن لومی به‌طور معنی‌داری به میزان ۲۷ برابر بیشتر از خاک‌های لوم‌رسی و لوم‌شنی و میانگین آب‌گریزی ایستا در خاک‌های شن لومی و لوم‌شنی به‌طور معنی‌داری به ترتیب به میزان حدود ۷ و ۱ درصد بیشتر از خاک لوم‌رسی بود. میانگین آب‌گریزی پویا در خاک‌های تیمار شده با نفت سفید و گازوئیل در مقایسه با نفت خام به‌طور معنی‌داری به ترتیب به میزان ۱۰۰ و ۹۶ درصد و میانگین آب‌گریزی ایستا به ترتیب به میزان ۱۹ و ۱۵ درصد کمتر بود. همچنین نتایج نشان داد به‌طور کلی سطوح مختلف مواد نفتی اثرات معنی‌داری بر آب‌گریزی خاک دارد و آب‌گریزی‌های ایجاد شده در اثر کاربرد نفت خام بیش از سایر مواد نفتی مورد مطالعه است. با توجه به اینکه آب‌گریزی ایجاد شده در خاک در اثر افزودن مواد نفتی می‌تواند سبب جلوگیری از نفوذ آب و خیس شدن خاک و در نتیجه افزایش رواناب و تبعات منفی ناشی از آن در خاک‌های آلوده به مواد نفتی شود، پیشنهاد می‌شود تا حد امکان از آلودگی خاک‌ها به مواد نفتی جلوگیری شود و در خاک‌های آلوده شده به مواد نفتی در مناطق نفت‌خیز از روش‌های توصیه شده و مناسب برای کاهش آلودگی‌های نفتی (مانند روش‌های زیست‌پالایی و یا گیاه‌پالایی و ...) برای اصلاح و کاهش آلودگی خاک‌ها و در نتیجه کاهش تبعات منفی فیزیکی و شیمیایی استفاده شود. همچنین

از طرفی در خاکی که میزان تخلخل به دلیل بافت درشت‌تر، کمتر است همان میزان تخلخل کم توسط مواد نفتی پر شده و فرصتی برای تاثیر و برهمکنش آب با خاک باقی نمی‌گذارد. برخی پژوهشگران (Harper & Gilkes, 1994; Doerr *et al.*, 2000; Martinez-Zavala *et al.*, 2009; Hosseini *et al.*, 2017; Kamel *et al.*, 2018) نیز بیان کردند که بافت خاک اثر مهمی در شدت اثر مواد آب‌گریز بر ایجاد آب‌گریزی در خاک دارد به طوری که با افزایش میزان رس در خاک خاصیت آب‌گریزی کاهش می‌یابد و حتی مقادیر کم ذرات رس در خاک نیز سبب کاهش تأثیر ترکیبات آلی بر آب‌گریزی خاک می‌شوند.

همچنین از نقطه نظر آب‌گریزی ایستا نیز می‌توان اینگونه تحلیل نمود که مواد نفتی در آب حل نمی‌شوند و به صورت پوشش‌های آب‌گریز روی سطوح خاکدانه‌ها را پوشانده و با افزایش زاویه تماس آب با خاک از نفوذ قطره آب به درون خاک جلوگیری می‌کنند. افزون بر این، بخش سیال نفت با جریان روی سطوح خاک سبب تشدید آب‌گریزی می‌شوند. با گذشت زمان ملکول‌های کوچک تبخیر شده و بخار حاصل از آن لایه‌ای آلی روی سطوح ذرات و جداره منافذ و شکاف‌های خاک ایجاد می‌کند. همچنین بخار حاصل از ترکیبات فرار می‌تواند پوسته‌ای روی سطح ذرات خاک تشکیل دهد که رطوبت‌پذیری خاک را کاهش می‌دهد. به عبارتی این ترکیبات، به دلیل دارا بودن اجزای غیر قابل حل در آب پدیده‌ی آب‌گریزی را ایجاد کرده و سبب می‌شوند که ترکیبات آلی مورد نظر به صورت پوششی روی سطح خاک و خاکدانه‌ها قرار گرفته و با افزایش زاویه تماس بین آب و فصل مشترک خاک و هوا (سطح خاک)، مانع ورود آب به خاک و جذب آن شوند و با توجه به گرانی ترکیبات و آلاینده‌های آلی و بافت خاک مورد نظر، مقدار و شدت آب‌گریزی حاصل نیز متفاوت خواهد بود. همانگونه که نتایج این پژوهش نشان داد به طور کلی مشاهده می‌شود میزان آب‌گریزی در خاک‌های تیمار شده با نفت خام بیشتر از گازوئیل و بیشتر از نفت سفید بود که این موضوع را می‌توان به چگال‌تر بودن و همچنین گرانی بیشتر نفت خام نسبت به گازوئیل و نفت سفید نسبت داد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان رس زاویه تماس تعادلی آب با خاک نیز کاهش یافته که به طور کلی می‌تواند به زیاد بودن انرژی سطحی ذره رس مرتبط باشد. سایر پژوهشگران نیز افزایش خاصیت آب‌گریزی خاک را در اثر افزودن مواد آلی گزارش کردند (Roy & McGill, 2000; Goebel *et al.*, 2011; Beyrami *et al.*, 2015; Kamel *et al.*, 2018). لازم به ذکر است که ویژگی‌های میکروساختاری رس‌های موجود در خاک می‌تواند موجب بروز تفاوت‌ها و روند عکس در رفتار و پاسخ خاک‌های رسی و

سپاس‌گزاری

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

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

در شرایط و مناطقی که امکان اصلاح خاک‌های آلوده به مواد نفتی وجود ندارد بایستی تمهیدات لازم برای جلوگیری از (و مقابله با) تبعات منفی مستقیم و غیرمستقیم ناشی از آلودگی‌های نفتی اندیشیده و به کار گرفته شود.

REFERENCES

- Aelamanesh, P., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, B. & Safari Singani, A. A. (2014). Water Repellency in Calcareous Soils Under Different Land Uses in Western Iran. *Pedosphere*, 24(3), 378-390.
- 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.
- Amjadian, M., Moosavi, A. A. & Ronaghi, A. (2018). Effect of pistachio residue and salinity on dynamic and static water repellency of three texturally different calcareous soils. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 32(3), 403-417. (in Persian).
- 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.
- Arye, G., Tarchitzky, J. & Chen, Y. (2011). Treated wastewater effects on water repellency and soil hydraulic properties of soil aquifer treatment infiltration basins. *Journal of Hydrology*, 397, 136-145.
- Atashnama, K., Golchin, A. & Musavi Kupar, S. A. (2017). Evaluation the soil water repellency in relation to tree species, soil organic carbon pools and aggregate stability (Case study: Shalman seed and seedling of forest tree species research station, Guilan province). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 7(1), 71-86. (in Persian).
- Beyrami, H., Neyshabouri, M. R., Abbasi, F. & Nazemi, A. H. (2015). Effects of Soil Water Repellency on Soil Moisture Retention Curve and S-Index in Two Soils with Different Textures. *Journal of Water and Soil Sciences*, 25 (4), 17-25. (in Persian).
- Bisdorn, E. B. A., Dekker, W. & Schoute, J. F. Th. (1993). Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma*, 56, 105-118.
- Buczko, U. & Bens, O. (2006). Assessing soil hydrophobicity and its variability through the soil profile using two different methods. *Soil Science Society of America Journal*, 70(3), 718-727.
- 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.
- Chow, T. S. (1998). Wetting of rough surfaces. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 10(27), 445-451.
- Dekker, L. W. & Jungerius, P. D. (1990). Water repellency in the dunes with special reference to Netherlands. *Catena, Supplement*, 18, 173-183.
- Dekker, L. W. & Ritsema, C. J. (1994). How water moves in a water repellent sandy soil: 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*, 30(9), 2507-2517.
- Dekker, L. W., Ritsema, C. J., Oostindie, K., & Moore, D. (2009). Methods for determining soil water repellency of field-moist samples. *Water Resources Research*, 45, 33.
- Delleur, J. (2000). Handbook of Ground water engineering, springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A. & Walsh, R. P. D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro- geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51, 33-65.
- 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.
- Fallah, M., Ebrahimi, S. & Shabanpour, M. (2013). Hydrocarbon pollution emission in the pilot and pulse condition in saturated porous media of soil. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20(3), 227-240. (in Persian).
- 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).
- Fishkis, O., Wachten, M. & Hable, R. (2015). Assessment of soil water repellency as a function of soil moisture with mixed modelling. *Eurasian Journal of Soil Science*, 66(5), 910-920.
- Gavili, E., Moosavi, A. A. & Moradi Choghamarani, F. (2018). Cattle manure biochar potential for ameliorating soil physical characteristics and spinach response under drought. *Archives of*

- Agronomy and Soil Science*, 64(12), 1714-1727.
- 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.
- Ghahremani, 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).
- Ghazanshahi, J. (2006). Soil and Plant Analysis. Iran, Tehran: Abizh Press.
- Goebel, M. O., Bachmann, J., Reichstein, M. & Janssens, I. A. (2011). Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition – is there a link to extreme climatic events? *Glob Change Biology*, 17, 2640-2656.
- Hallett, P. D. & Young, I. M. (1999). Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *Eurasian Journal of Soil Science*, 50, 35–40.
- 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.
- Harper, R. J. & Gilkes, R. J. (1994). Soil attributes related to water repellency and the utility of soil survey for predicting its occurrence. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 1109-1124.
- Harper, R. J. & Gilkes, R. J. (1994). Soil attributes related to water repellency and the utility of soil survey for predicting its occurrence. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 1109-1124.
- Heidarpoor, M. & Oliaei, M. (2013). Oil contamination propagation patterns in soils. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.L)*, 13, 39-51. (in Persian).
- Hosseini, F., Mosaddeghi, M. R., Hajabbasi, M. A. & Sabzalian, M. R. (2015). Influence of tall fescue endophyte infection on structural stability as quantified by high energy moisture characteristic in a range of soils. *Geoderma*, 249(250), 87–99.
- Hosseini, F., Mosaddeghi, M. R., Hajabbasi, M. A., Sabzalian, M. R., Soleimani, M. & Sepehri, M. (2017). Effects of Endophyte-infected (*Epichloë coenophaila*) Tall Fescue residues on water repellency and structural stability of texturally different soils. *Journal of Water and Soil Sciences (Sciences & Technology of Agricultural & Natural Resources)*, 21(2), 69-82. (in Persian).
- Jordan, A., Martinez-Zavala, L., Nava, A. L. & Alanis, N. (2009). Occurrence and hydrological effects of water repellency in different soil and land use types in Mexican volcanic highlands. *Catena*, 79, 60–71.
- 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).
- Martinez-Zavala, L., Gonzalez, F. A. & Jordan, A. (2009). Fire-induced soil water repellency under different vegetation types along the Atlantic dune coast-line in SW Spain. *Catena*, 79, 153–162.
- Mirbabaei, S. M., Shabanpour Shahrestani, M., Zolfaghari, A. & Taheri Abkenar, K. (2013). Relationship between soil water repellency and some of soil properties in northern Iran. *Catena*, 108, 26-34.
- Mirbabaei, S. M., Shabanpour, M. & Zolfaghari, A. A. (2013). Investigating occurrence and intensity of soil water repellency in Talesh Forest sites, Guilan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 44(2), 163-172. (in Persian).
- Muller, K. & Deurer, M. (2011). Review of the remediation strategies for soil water repellency. *Agriculture of Ecosystems and Environment*, 144, 208–221.
- Nelson, D. W. & Sommers, L. E. (1996). Total carbone (organic carbone) and organic matter. In: D. L. Sparks (Eds), Methods of Soil Analysis, Part 3-Chemical Methods. Agronomy Monograph (vol. 9). ASA and SSSA, Madison, WI, 961-1010.
- Roy, J. L. & McGill, W. B. (2000). Investigation into mechanisms leading to the development, spread and persistence of soil water repellency following contamination by crude oil. *Canadian Journal of Soil Science*, 80, 595–606.
- Roy, J. L. & McGill, W. B. (2002). Assessing Soil Water Repellency Using the Molarity of Ethanol Droplet (Med) Test. *Soil Science*, 167(2), 83-97.
- Saadati, N., Davatgar, N., Roodpeyma, M., Mosaddeghi, M. R. & Bostani, A. A. (2015). Evaluation of petroleum contamination effects on soil water repellency intensity in Bakhtiardasht of Isfahan. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 29 (3), 359-369. (in Persian).
- Seyed 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).
- Tadayonnejad, M., Ghorbani Dashtaki, Sh., Mohamadi, J., Mosaddeghi, M. R. & Panahi, M. (2017). The effect of long-term drip irrigation and polyacrylamide application on soil water repellency in quince orchard garden. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 7(2), 85-102. (in Persian).
- Takawira, A., Gwenzi, W., & Nyamugafata, P. (2014). Does hydrocarbon contamination induce water repellency and changes in hydraulic properties in inherently wetttable tropical sandy soils? *Geoderma*, 235, 279–289.
- Vogelmann, E. S., Reichert, J. M., Prevedello, J. & Awe, G. O. (2013). Hydro-physical processes and soil properties correlated with origin of soil hydrophobicity. *Ciencia Rural*, 43, 1582-1589.
- Wahl, N. A. (2008). Variability of water repellency in

- sandy forest soils under broad leaves and conifers in northwestern Jutland/Denmark. *Soil and Water Research*, 3, 155-164.
- Wallis, M. G., Horne, D. J., & McAuliffe, K. W. (1990). A study of water repellency and its amelioration in yellow brown sand. 1. Severity of water repellency and the effects of wetting and abrasion. *Journal of Agricultural Research*, 33, 139-144.
- Zarei, Z., Moosavi, A. A., Sameni, A. & Kamgar Haghighi, A. A. (2015). Effects of some organic and mineral soil amendments on temporal variability of dynamic and static water repellency in a calcareous soil. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 29(4), 475-486. (in Persian).
- Zavala, L. M., Garcia-Moreno, J., Gordillo-Rivero, A. J., Jordan, A. & Mataix-Solera, J. (2014). Natural soil water repellency in different types of Mediterranean woodlands. *Goedema*, 226, 170-178.
- 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.