

اثر آلودگی نفتی بر آب‌گریزی و پایداری ساختمان خاک در منطقه بختیاردشت اصفهان

مهديه کرمانپور*، محمد رضا مصدقی، مجید افیونی و محمد علی حاج‌عباسی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۳/۱۷)

چکیده

آلودگی نفتی یکی از بحران‌های مهم زیست محیطی است که کشورهای دارای صنعت نفت با آن مواجه می‌باشند. به‌منظور بررسی اثر آلودگی نفتی بر آب‌گریزی خاک و ارتباط آن با پایداری ساختمان خاک، این پژوهش در منطقه بختیاردشت اصفهان و در قطعه زمینی آلوده به ترکیبات نفتی در فضای سبز اطراف پالایشگاه نفت اصفهان انجام شد. پس از تعیین مکان‌های آلوده و شاهد، آزمایش آب‌گریزی خاک به‌روش زمان نفوذ قطره آب (WDPT) در مکان‌های آلوده انجام شد و نمونه‌های خاک با حداقل به‌هم‌خوردگی برداشت شده و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی پایداری ساختمان خاک، از روش‌های الک تر و رس قابل پراکنش مکانیکی (MDC) استفاده شد و شاخص‌های میانگین وزنی قطر (MWD) و میانگین هندسی قطر (GMD) خاکدانه‌ها و MDC محاسبه شدند. نتایج نشان داد اثر افزایش آلودگی نفتی بر MWD و GMD و اثر کاهشی آن بر MDC از دیدگاه آماری معنی‌دار شد. با افزایش غلظت کل پلی‌هیدروکربن‌ها (TPHs)، آب‌گریزی خاک افزایش یافت. هم‌بستگی مثبت معنی‌داری بین آب‌گریزی و GMD در خاک‌ها به‌دست آمد. ولی غلظت‌های TPHs بیش‌تر از ۶/۴ درصد در خاک، سبب کاهش MWD و GMD شد که می‌تواند به‌دلیل افزایش دافعه آنیونی بین ذرات رس و گروه‌های عاملی هیدروکربن‌ها باشد. اگرچه آب‌گریزی سبب افزایش پایداری ساختمان خاک در مکان‌های آلوده به نفت نسبت به مکان‌های شاهد شد ولی کاهش شدید نگه‌داشت آب خاک در اثر آلودگی نفتی شرایط نامساعدی را برای فضای سبز منطقه ایجاد نموده است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی نفتی، زمان نفوذ قطره آب، پایداری ساختمان خاک، الک تر، آب‌گریزی خاک

^۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mahdiehkermanpour@yahoo.com

مقدمه

آلودگی خاک به آلاینده‌های نفتی یکی از انواع آلودگی محیط زیست است که در اطراف پالایشگاه‌ها و صنایع وابسته وجود دارد (۲). آلودگی‌های زیست‌محیطی بر کیفیت خاک تأثیرگذارند. ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک تعیین‌کننده کیفیت خاک می‌باشد. ویژگی‌های فیزیکی مانند بافت و چگالی ظاهری بر تهویه، نفوذپذیری، هدایت هیدرولیکی و توانایی نگه‌داشت آب در خاک اثر می‌گذارند (۳). آب‌گریزی به کاهش آب‌پذیری و نگه‌داشت آب در خاک ناشی از پوشش‌های آب‌گریز روی ذرات خاک گفته می‌شود (۱). تغییر ویژگی‌های ساختمانی خاک و تشدید آب‌گریزی خاک یکی از مهم‌ترین پیامدهای آلودگی نفتی در خاک است (۲۱). آب‌گریزی یک پدیده کلیدی در پایداری فیزیکی خاک محسوب می‌شود (۱). علی‌رغم پیامدهای منفی پدیده آب‌گریزی این پدیده پیامدهای مثبتی هم دارد از جمله این‌که به علت وجود پوشش‌های آب‌گریز (سطوح با درجه آب‌گریزی کم تا متوسط) روی خاکدانه‌ها، متلاشی‌شدن خاکدانه‌ها در اثر نیروی آب و هوای محبوس کاهش یافته و تا حدودی فرسایش خاک نیز کاهش می‌یابد. آرسنگا و همکاران (۶) دریافته‌اند با حضور پوشش‌های آب‌گریز روی خاکدانه‌ها، پایداری خاکدانه‌ها افزایش یافته و فرسایش خاک کاهش می‌یابد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد پیامدهای مثبت آب‌گریزی بر پایداری خاکدانه‌های با اندازه ۵/۵ تا ۵ میلی‌متر بیش‌تر بوده و تأثیری بر پایداری خاکدانه‌های بزرگ‌تر ندارد (۱۳). پساب برخی کارخانه‌ها و پالایشگاه‌ها می‌تواند در آب‌گریزساختن خاک‌ها مؤثر باشد. از جمله مواد آلی مؤثر بر آب‌گریزی، هیدروکربن‌های نفتی هستند (۱۷). ترکیبات آب‌گریز در درازمدت سبب ایجاد کمپلکس رس-هیومین شده و از این طریق پایداری خاکدانه‌ها را افزایش می‌دهند. به‌ویژه ملکول‌های بزرگ بخش هیومین مانند ترکیبات آلیفاتیک و آروماتیک که پایداری خاکدانه‌ها را به‌میزان زیادی افزایش می‌دهند (۱۹). از میان فاکتورهای مؤثر بر پایداری ساختمان خاک، مواد

آلی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر خلاف تصور کلی تنها بخشی از ترکیبات آلی در پایداری ساختمان خاک نقش دارد. حضور برخی از یون‌های آلی از ترکیبات اسید فولویک و اسید سیتریک، رس قابل پراکنش (DC) را به‌میزان قابل توجهی افزایش و پایداری خاکدانه‌ها را به شدت کاهش می‌دهد. در واقع برخی آنیون‌های آلی مانند فولوات، سیترات، آگزالات، لاکتات و استات سبب افزایش DC و کاهش پایداری ساختمان خاک می‌شوند. اما وجود اسیدهای آروماتیک در خاک سبب هم‌آوری ذرات رس شده و پایداری ساختمان خاک را افزایش می‌دهد. هم‌چنین هم‌بستگی مثبت معنی‌داری بین ترکیبات آلی مانند مواد هیومیکی آروماتیک و پایداری خاکدانه‌ها وجود دارد (۴ و ۱۹). به‌نظر می‌رسد وجود اسید هیومیک در خاک سبب می‌شود از ذرات در اندازه رس و سیلت حفاظت فیزیکی شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهد کل کربن آلی خاک و کل کربوهیدرات‌های موجود در خاک سبب پایداری ساختمان خاک نمی‌شود اما با افزایش کربن آلی خاک، رس قابل پراکنش کاهش می‌یابد (۴ و ۱۰).

ترکیبات آلی از چند طریق پایداری خاکدانه‌ها را افزایش می‌دهند. ایجاد پیوند کاتیونی (کاتیون‌های چندظرفیتی-ترکیبات آلی) با رس‌های خاک، خثی کردن بارهای موجود در سطح رس‌ها توسط یون‌های آلی و پوشش‌های آب‌گریزی که ترکیبات آلی روی سطوح خاکدانه‌ها تشکیل می‌دهند، بنابراین از متلاشی‌شدن خاکدانه‌ها در برابر متلاشی‌شدن نیروهای مکانیکی و آب حفاظت می‌کنند (۱۹). حضور ترکیبات آلی آب‌گریز در خاک سبب افزایش زاویه تماس آب-خاک شده، بنابراین جذب آب به آهستگی صورت گرفته و از متلاشی‌شدن خاکدانه‌ها در اثر ورود سریع آب جلوگیری می‌کند (۱۱ و ۱۹). کراوکا و همکاران (۹) دریافته‌اند ترکیبات هیدروکربنی لجن نفتی سبب افزایش تخلخل کل خاک شد. این پژوهشگران افزایش تخلخل خاک را به افزایش فراوانی منافذ $500-50 \mu m$ نسبت دادند. روی و مک‌گیل (۲۱) گزارش کردند که حضور نفت خام در خاک‌ها سبب آب‌گریزی شدید شده و هم‌چنین پایداری

ویژگی‌های ساختمانی و درصد سنگ‌ریزه سطحی وضعیت مشابهی داشته باشند. در هر مکان از لایه ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری شده و به آزمایشگاه منتقل شد.

اندازه‌گیری آب‌گریزی خاک

آب‌گریزی خاک به‌روش زمان نفوذ قطره آب (WDPT) در ۹ مکان آلوده به ترکیبات نفتی در منطقه اندازه‌گیری شد. برای هر مکان بین ۷ تا ۱۰ تکرار در نظر گرفته شد. در این روش توسط قطره‌چکان قطره‌های آب بر روی سطح خاک قرار داده شد و با زمان‌سنج زمانی که طول می‌کشد تا قطره‌های آب در خاک کاملاً نفوذ کنند، اندازه‌گیری شد. در این روش تا جایی که امکان داشت سطوح خاک صاف و بدون خراشیدگی انتخاب شد (۷).

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

برای اندازه‌گیری بافت خاک ابتدا ترکیبات نفتی در کوره حذف شد. با توجه به زیادبودن میزان آهک در خاک و تأثیر نامطلوبی که دمای زیاد (بیش از ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد) بر میزان آهک خاک و فراوانی نسبی ذرات خاک دارد (۲۳)، حذف مواد آلی خاک‌ها در دمای ۳۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲ ساعت انجام شد و برای حذف کامل ترکیبات آلی باقی‌مانده در خاک از آب اکسیژنه استفاده شد. سپس به‌روش پیپت بافت خاک تعیین شد (۵). برای اندازه‌گیری آهک خاک از روش تیتراسیون اسید باقی‌مانده با سود نیم نرمال (تیتراسیون برگشتی) استفاده شد (۱۸). استخراج کل پلی‌هیدروکربن‌های (TPHs) خاک‌های آلوده به نفت توسط دستگاه سوکسله انجام شد. بدین‌منظور از دو عصاره‌گیر n-هگزان و دی‌کلرومتان به‌نسبت ۱:۱ استفاده شد و پس از جداسازی عصاره نفتی از حلال‌ها به‌روش وزنی TPHs اندازه‌گیری شد. کربن آلی کل خاک (TOC) توسط دستگاه TOC-Analyser مدل Primacs شرکت Skular اندازه‌گیری شد. ماده آلی (OM) خاک به روش اکسایش تر والکی-بلاک نیز اندازه‌گیری شد (۱۴).

ساختمان خاک در مقایسه با خاک‌های آلوده به نفت آب‌دوست کاهش می‌یابد. در واقع هیدروکربن‌های نفتی در غلظت‌های زیاد علاوه بر تشدید آب‌گریزی، پایداری خاکدانه‌ها را کاهش دادند.

در کشور ایران علی‌رغم آلودگی‌های شدید نفتی و هم‌چنین آلودگی‌های ناشی از پالایشگاه‌ها و صنایع وابسته پژوهش‌های اندکی در مورد تأثیر آلودگی نفتی بر آب‌گریزی و پایداری ساختمان خاک انجام گرفته است. در سال‌های گذشته سازمان پارک‌ها و فضای سبز اصفهان علایمی از وجود لکه‌های نفتی در سطح خاک گزارش کرد. شواهد نشان می‌دهد خاک منطقه طی سال‌های زیادی آلوده به ترکیبات نفتی شده است. به‌مرور زمان پوشش گیاهی منطقه نیز تحت تأثیر قرار گرفته است. امکان دارد به‌دلیل اثر آلودگی بر ساختمان خاک و به‌دنبال آن تغییر وضعیت هیدرولیکی خاک گیاهان منطقه دچار تنش رطوبتی شده و به مرور زمان پوشش گیاهی تخریب شده است. بنابراین به‌منظور بررسی اثر آلودگی نفتی بر آب‌گریزی خاک و ارتباط آن با پایداری ساختمان خاک، این پژوهش در منطقه بختیاردشت اصفهان انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در منطقه بختیاردشت اصفهان روی قطعه زمینی به مساحت صد هکتار که در درازمدت ضایعات نفتی پالایشگاه اصفهان روی آن تخلیه شده است، انجام شد. این قطعه زمین بین طول جغرافیایی ۵۱° و ۳۱' دقیقه تا ۵۱° و ۳۲' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲° و ۴۷' تا ۳۲° و ۴۸' شمالی قرار دارد و دارای میانگین ارتفاع ۱۶۰۷ متر از سطح دریا می‌باشد. در این منطقه ۹ مکان براساس اندازه‌گیری مقادیر TPHs دارای درجه‌های مختلفی از آلودگی نفتی و ۹ مکان بدون آلودگی مجاور (تیمار شاهد) انتخاب شد. به‌کمک مطالعات میدانی (حفر پروفیل) و آزمایشگاهی که در مورد خاک منطقه انجام شد، سعی شد زوج مکان‌های آلوده و شاهد از لحاظ بافت و

اندازه‌گیری پایداری ساختمان خاک

آزمون پایداری ساختمان خاک به روش الک تر انجام شد. بدین منظور سری الک ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌متر استفاده شد. ۵۰ گرم از خاک (بدون کوبیدن) رد شده از الک ۴ میلی‌متر روی بزرگ‌ترین الک قرار گرفت. الک‌ها با جابه‌جایی ۱ سانتی‌متر و ۴۵ دور در دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه در آب بالا و پایین برده شد. سپس خاکدانه‌های باقی مانده روی هر الک شسته شد و پس از آن - خشک کردن توزین شد. هم‌چنین تصحیح مربوط به میزان شن با استفاده از معادله ۱ انجام شد. سپس از معادله ۲ میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌های پایدار در آب محاسبه شد (۸):

$$w_i = \frac{W_{i(g+s)} - W_{i(s)}}{W_T - \sum_{i=0}^n W_{i(s)}} \quad [1]$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i \bar{x}_i \quad [2]$$

که در معادله ۱، $W_{i(g+s)}$ جرم خاکدانه‌ها همراه با شن و سنگریزه در دامنه مورد نظر، $W_{i(s)}$ جرم شن و سنگریزه در دامنه اندازه مورد نظر، W_T جرم کل خاک خشک و w_i نسبت وزنی خاکدانه‌ها در دامنه مورد نظر است و در معادله ۲، \bar{x}_i میانگین حسابی قطر خاکدانه‌ها در هر دامنه است. هم‌چنین میانگین هندسی قطر (GMD) خاکدانه‌های پایدار در آب نیز با معادله زیر محاسبه شد (۸). در این رابطه w_i و \bar{x}_i همان فاکتورها در رابطه ۲ می‌باشند:

$$GMD = \exp \left(\sum_{i=1}^n w_i \log \bar{x}_i \right) \quad [3]$$

رس قابل پراکنش مکانیکی (MDC) نیز به‌عنوان شاخصی از ناپایداری ساختمان ریز خاک به‌روش رنگاسمی و همکاران (۲۰) اندازه‌گیری شد. بدین منظور با ۵۰ گرم خاک رد شده از الک ۲ میلی‌متر و ۵۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر، سوسپانسیون ۱:۱۰ آب و خاک تهیه شد و به مدت ۱ ساعت به‌صورت رفت و برگشتی با دور ۶۵ دور در دقیقه تکان داده شد و سپس به

مزوره‌های ۱ لیتری منتقل شد. پس از گذشت ۲۴ ساعت نمونه‌ها توسط همزن دستی بهم زده شدند و دمای سوسپانسیون‌ها توسط دماسنج ثبت شد. پس از گذشت ۳ ساعت و ۵۰ دقیقه (براساس قانون استوکز) نمونه‌برداری با پیپت ۲۵ میلی‌لیتر از عمق ۵ سانتی‌متری سوسپانسیون انجام شد و پس از آن - خشک شدن توزین شد و MDC براساس میزان رس کل خاک محاسبه شد.

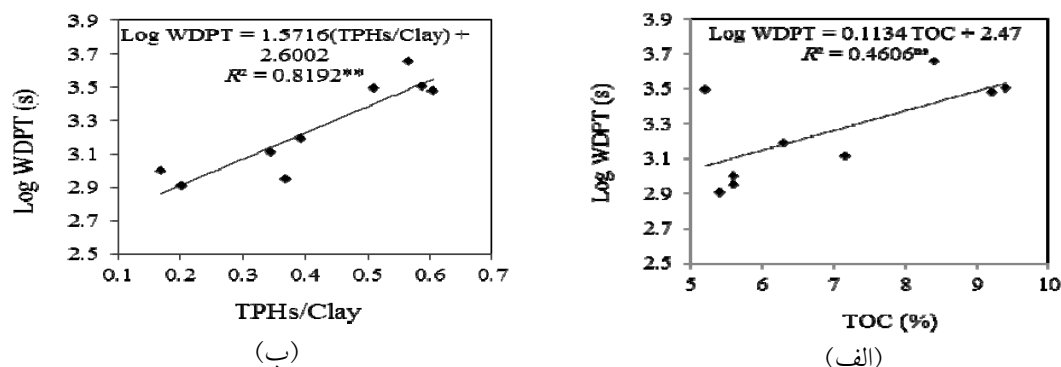
تجزیه‌های آماری

برای تجزیه‌های آماری از طرح گروه‌بندی دوطرفه نامتعادل با چهار گروه بافت خاک (لوم، لوم رسی، لوم شنی، شن لومی) و چهار سطح آلودگی خاک (شاهد، ۳٪، ۳٪ > TPHs > ۶٪، ۶٪ > TPHs) استفاده شد. برای مقایسه میانگین‌ها آزمون توکی در سطح آماری ۵ درصد به‌کار رفت. برای انجام تجزیه‌های آماری از نرم‌افزار Minitab 16 و SAS 9 استفاده شد.

نتایج و بحث

تأثیر آلودگی نفتی بر آب‌گریزی خاک (WDPT)

در جدول ۱ مقدار کل پلی‌هیدروکربن‌ها و WDPT در خاک‌های آلوده ذکر شده است. خاک‌های آلوده شدیداً آب‌گریز و بی‌نهایت آب‌گریز بوده‌اند. مقادیر TPHs خاک‌ها از ۲/۴۱ تا ۹/۴۴ درصد متغیر است. رابطه بین WDPT با نسبت کل پلی‌هیدروکربن‌ها با رس (TPHs/Clay) و کربن آلی کل TOC در شکل ۱ نشان داده شده است. با افزایش کل پلی‌هیدروکربن‌های خاک، WDPT به‌صورت لگاریتمی افزایش یافته است. ذرات رس با داشتن سطح ویژه زیاد بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اثرگذار هستند. حتی مقادیر کم ذرات رس در خاک نیز سبب کاهش تأثیر ترکیبات آلی بر آب‌گریزی می‌شوند (۱۳). به‌همین دلیل با تقسیم TPHs بر مقدار رس اثر بافت خاک بر آب‌گریزی خاک تا حدودی حذف و کنترل می‌شود. هم‌چنین با افزایش کربن آلی کل (TOC)، آب‌گریزی خاک به‌صورت لگاریتمی افزایش یافت (شکل ۲). از آن‌جایی



شکل ۱. الف) تأثیر آلودگی نفتی: TOC و ب) TPHs/Clay بر WDPT در خاک‌های آلوده مورد بررسی

جدول ۱. ویژگی‌های عمومی، مقادیر TPHs و شدت آب‌گریزی در خاک‌های آلوده و غیرآلوده مورد بررسی

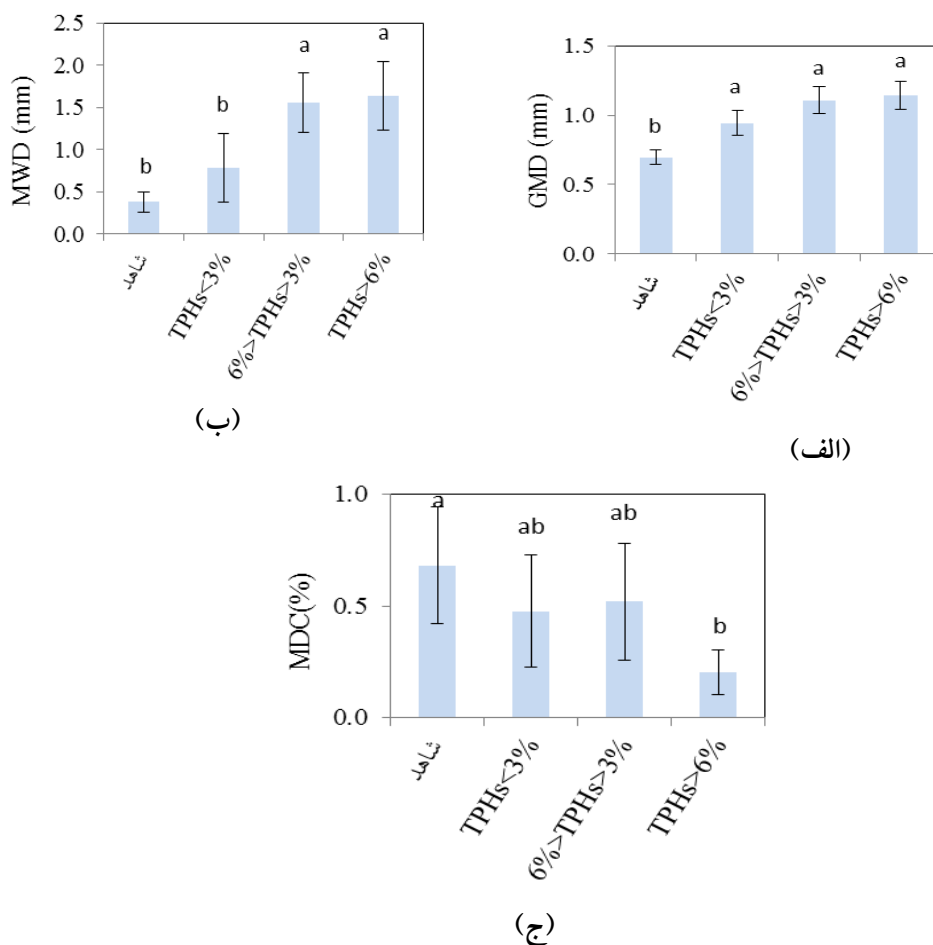
شماره	رس %	سیلت %	شن %	ماده آلی %	TOC %	آهک %	TPHs (%)	WDPT (s)	شدت آب‌گریزی
۱	۱۰/۷	۲۰/۳	۶۹/۰	۵/۷۳	۵/۶۲	۴۷/۷	۳/۹۸	۸۹۱	شدید
۲	۱۷/۲	۳۸/۸	۴۴/۰	۱۳/۹۱	۹/۴۷	۴۳/۳	۸/۰۱	۳۱۸۴	شدید
۳	۱۳/۶	۱۳/۶	۷۲/۸	۹/۵۸	۶/۳۱	۴۹/۱	۴/۷۶	۱۵۴۶	شدید
۴	۹/۶	۶۱/۵	۸۲/۹	۱۵/۶۸	۸/۴۰	۴۶/۰	۵/۶۶	۴۵۳۱	بی‌نهایت
۵	۱۵/۲	۲۴/۴	۶۰/۴	۴/۵۷	۵/۴۳	۴۸/۸	۲/۶۵	۸۰۶	شدید
۶	۱۶/۸	۳۷/۵	۴۵/۷	۵/۷۴	۵/۶۰	۴۶/۴	۲/۴۱	۹۹۷	شدید
۷	۲۰/۵	۳۶/۴	۴۳/۱	۹/۰۸	۷/۱۶	۴۷/۳	۵/۶۹	۱۲۹۵	شدید
۸	۱۹/۷	۴۳/۵	۳۶/۸	۱۴/۳۳	۹/۲۲	۴۵/۶	۹/۴۴	۳۰۰۴	شدید
۹	۱۴/۹	۱۰/۹	۷۴/۲	۵/۳۳	۵/۲۷	۴۹/۲	۶/۹۱	۳۱۳۵	شدید

جداره منافذ و شکاف‌های خاک ایجاد می‌کند. هم‌چنین بخار حاصل از ترکیبات فرار پوسته‌ای روی سطح خاک تشکیل داده که رطوبت‌پذیری خاک را کاهش می‌دهد (۱۵ و ۲۲).

اثر آلودگی نفتی بر پایداری ساختمان خاک (GMD, MWD و MDC)

اثر آلودگی نفتی بر MWD ($P < 0.001$) معنی‌دار شد. آلودگی نفتی در سطوح $TPHs > 1/3$ و $TPHs > 1/6$ سبب افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه‌ها (MWD) شد (شکل ۲-الف). افزایش غلظت ترکیبات پلی‌هیدروکربنی اثر مثبتی بر پایداری ساختمان خاک داشت. اثر آلودگی نفتی بر GMD نیز معنی‌دار

که خاک بدون آلودگی به‌طور کلی ماده آلی کمی دارد، در نتیجه افزایش کربن آلی کل خاک‌های آلوده به‌دلیل وجود ترکیبات نفتی است. نفت دارای ترکیبات آلیفاتیک است که ملکول‌هایی غیرقطبی هستند و تنها در انتهای زنجیره هیدروکربنی‌شان دارای بارهای جزئی مثبت یا منفی می‌باشند (۱۳). لذا این ترکیبات در آب حل نمی‌شوند و به‌صورت پوشش‌های آب‌گریز روی سطوح خاکدانه‌ها را پوشانده و با افزایش زاویه تماس آب-خاک از نفوذ قطره آب به درون خاک جلوگیری می‌کنند. افزون بر این، بخش سیال نفت با جریان روی سطوح خاک به تشدید آب‌گریزی می‌انجامد. با گذشت زمان ملکول‌های کوچک تبخیر شده و بخار حاصل از آن لایه‌ای آلی روی سطوح ذرات و



شکل ۲. اثر سطوح آلودگی نفتی (TPHs) بر: الف) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، ب) میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD)، و ج) رس قابل پراکنش (MDC) در خاک‌های مورد بررسی

با افزایش غلظت هیدروکربن‌های نفتی پایداری ساختمان خاک افزایش یافت. ترکیبات هیدروکربنی موجود در خاک شامل آلکان‌ها با زنجیره طولانی و برخی ترکیبات حلقوی با وزن ملکولی زیاد هستند. این ترکیبات علاوه بر ایجاد آب‌گریزی به راحتی در آب حل نمی‌شوند و با ذرات معدنی خاک تشکیل کمپلکس می‌دهند؛ بنابراین به هم‌آوری ذرات خاک کمک کرده و پراکنده شدن رس در شرایط مرطوب کاهش می‌یابد؛ بنابراین پایداری ساختمان خاک در شرایط مرطوب حفظ می‌شود. از طرفی علاوه بر مواد آلی، آهک نیز در پایداری ساختمان خاک نقش موثر دارد. به نظر می‌رسد وجود آلودگی نفتی اثر آهک را در پایداری ساختمان خاک افزایش می‌دهد که شاید به دلیل تشکیل کمپلکس‌های قوی با یون کلسیم در خاک

شد به طوری که آلودگی نفتی در هر ۳ سطح سبب افزایش معنی‌داری در میانگین هندسی قطر (GMD) خاکدانه‌های پایدار در آب شد (شکل ۲-ب). نتایج تجزیه آماری نشان می‌دهد اثر آلودگی نفتی بر رس قابل پراکنش مکانیکی (MDC) در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شده است. شکل ۲-ج نشان می‌دهد بیشترین MDC در خاک‌های بدون آلودگی (شاهد) و کمترین MDC در خاک‌های با $6\% > \text{TPHs}$ بوده است. در واقع دو گروه خاک‌های با سطوح آلودگی کم‌تر ($6\% > \text{TPHs}$) با تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری نداشته و تنها آلودگی زیاد تاثیر معنی‌داری در کاهش MDC خاک‌ها داشت. ولی اثر بافت خاک بر هیچ‌کدام از شاخص‌های پایداری ساختمان خاک معنی‌دار نشد.

جدول ۲. ماتریس هم‌بستگی شاخص‌های آلی و شاخص‌های پایداری ساختمان خاک ($P < 0/001$)

MDC	GMD	MWD	TOC	OM	
				۱	OM
			۱	۰/۹۶***	TOC
		۱	۰/۸۳***	۰/۷۶***	MWD
	۱	۰/۹۸***	۰/۸۵***	۰/۷۹***	GMD
۱	-۰/۵۳*	-۰/۵۱*	-۰/۴۸*	-۰/۴۲ ^{ns}	MDC

تأثیر بیش‌تری بر پایداری ساختمان خاک دارند. با توجه به مسن شدن ضایعات نفتی (حدود ۱۰ الی ۱۵ سال) در منطقه مورد نظر ممکن است افزایش پایداری ساختمان خاک در اثر کمپلکس شدن ذرات رس با ترکیبات هیدروکربنی در درازمدت بوده باشد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد یکی از نتایج آب‌گریزی تأثیر مثبت ترکیبات آب‌گریز بر پایداری ساختمان خاک می‌باشد (۱۲).

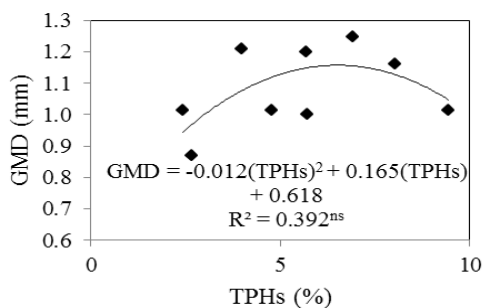
با افزایش کل پلی‌هیدروکربن‌های خاک (TPHs) تا حدود ۶/۴ درصد، GMD و MWD افزایش یافته که به علت افزایش پایداری (اندازه) خاکدانه‌ها در اثر آلودگی نفتی بوده ولی برای مقادیر TPHs بیش‌تر از ۶/۴ درصد، آلودگی نفتی سبب کاهش میانگین وزنی و اندازه خاکدانه‌های پایدار در آب شده است (شکل ۳). با افزایش آلودگی نفتی احتمال دافعه آنیونی بین گروه‌های عاملی ترکیبات نفتی و ذرات رس خاک وجود دارد که در نتیجه از هم‌آوری خاکدانه‌ها جلوگیری می‌کند. روی و مک‌گیل (۲۱) گزارش کردند در خاک‌هایی که در درازمدت آلوده به نفت خام بودند شاخص MWD کاهش شدیدی یافت که نشان‌دهنده اثر تخریبی آلودگی نفتی شدید بر ساختمان خاک است. این یافته حاصل برهم‌کنش اثرات درازمدت آلودگی نفتی و ریزجانداران و ذرات معدنی خاک است.

افزون بر روابط ارائه شده در شکل ۳، با توجه به اثری که ذرات رس بر شاخص‌های پایداری ساختمان خاک دارند، با تقسیم TPHs بر درصد رس اثر بافت بر پایداری ساختمان خاک حذف شد (شکل ۴). دیده می‌شود که با افزایش TPHs/clay در خاک‌های آلوده، شاخص‌های MWD و GMD

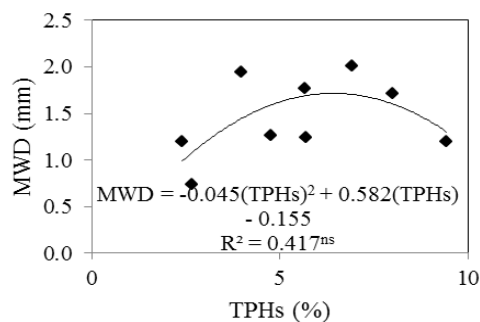
است. ترکیبات هیدروکربنی با ایجاد آب‌گریزی نیز به پایداری ساختمان خاک کمک می‌کنند. این مواد با ایجاد پوشش‌های هیدروکربنی آب‌گریز روی سطوح خاکدانه‌ها از ورود آب به آنها جلوگیری شده و اثر هوای محبوس در شکستن خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. در واقع یکی از پیامدهای مثبت آب‌گریزی در اثر آلودگی نفتی پایداری واحدهای ساختمانی (خاکدانه‌های) خاک است. آرسنگا و همکاران (۶) دریافتند که حضور پوشش‌های آب‌گریز روی خاکدانه‌ها پایداری آنها را افزایش داده و از این جهت سبب کاهش فرسایش خاک می‌شود.

هم‌بستگی پایداری ساختمان خاک و شاخص‌های آلی

در جدول ۲ ضرایب هم‌بستگی بین شاخص‌های پایداری ساختمان و ماده آلی خاک ارائه شده است. اثر ماده آلی و کربن آلی کل خاک بر MWD و GMD افزایشی و بر MDC کاهش‌دهنده است. تمام هم‌بستگی‌ها در سطح آماری ($P < 0/001$) معنی‌دار شد. کاهش MDC و افزایش MWD و GMD با افزایش OM و TOC به مفهوم افزایش پایداری ساختمان خاک‌های آلوده به نفت است. گوئبل و همکاران (۱۶) گزارش کردند افزایش ماده آلی در خاک سبب افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شود. مقادیر ضریب هم‌بستگی نشان می‌دهد تأثیر TOC بر پایداری ساختمان خاک بیش‌تر از OM است. در این زمینه دکستر و همکاران (۱۰) گزارش کردند که تأثیر ترکیبات آلی کربن‌دار بر پایداری ساختمان خاک به چگونگی حضور آنها در خاک بستگی دارد. در واقع زمانی که ترکیبات آلی کربن‌دار با ذرات خاک کمپلکس می‌شوند نسبت به ترکیبات آلی کمپلکس نشده

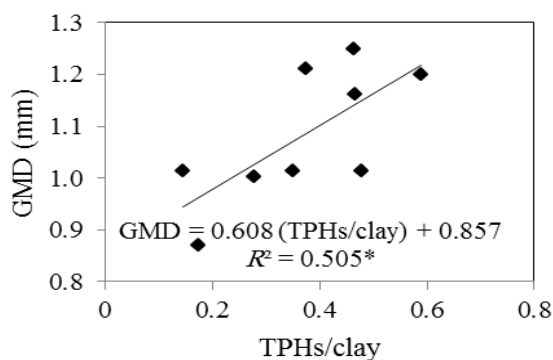


(ب)

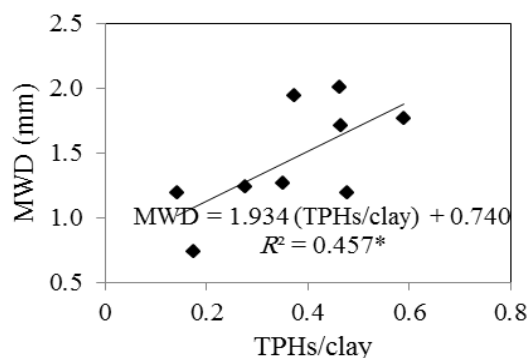


(الف)

شکل ۳. اثر کل پلی‌هیدروکربن‌های خاک (TPHs) بر: الف) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و ب) میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) در خاک‌های آلوده به نفت



(ب)



(الف)

شکل ۴. اثر کل پلی‌هیدروکربن‌های خاک (TPHs/clay) بر: الف) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و ب) میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) در خاک‌های آلوده به نفت

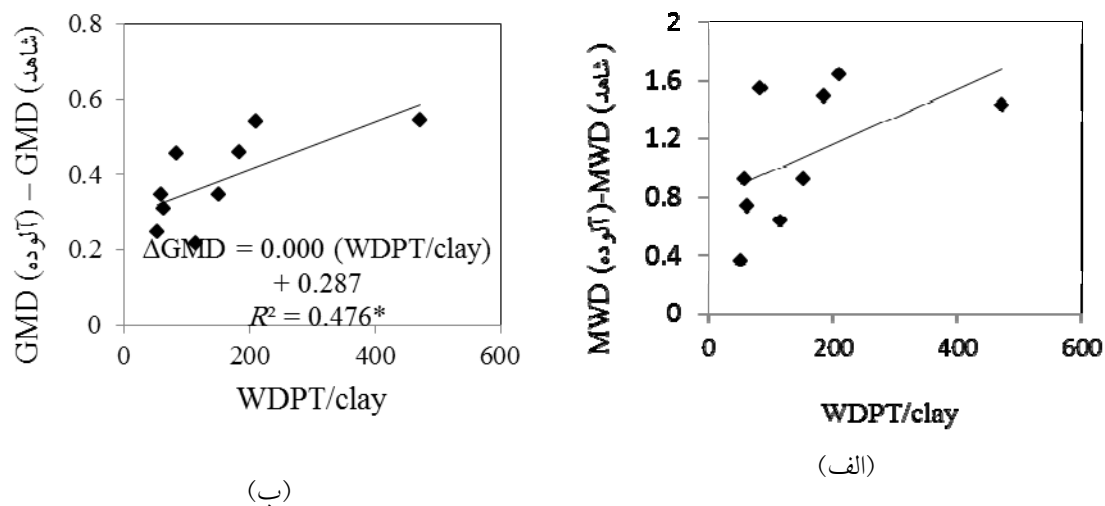
در آب شده‌اند. با وجود اثر افزایشی TPHs بر GMD تا سطح آلودگی ۶/۴ درصد و اثر کاهشی آن در مقادیر TPHs بیش‌تر از ۶/۴ درصد، اثر آلودگی نفتی بر پایداری ساختمان خاک از طریق آب‌گریزی در خاک‌های با آب‌گریزی شدید (آلودگی نفتی زیاد) روند افزایشی داشته است.

نتیجه‌گیری

۱) در اثر آلودگی نفتی در منطقه بختیاردشت، آب‌گریزی در خاک ایجاد شده و با افزایش غلظت کل هیدروکربن‌ها مستقل از بافت خاک، آب‌گریزی خاک (WDPT) شدت یافته است.

افزایش یافته است. بنابراین شاخص‌های پایداری ساختمان خاک با افزایش ترکیبات هیدروکربنی افزایش می‌یابد.

هم‌بستگی شاخص‌های پایداری ساختمان با آب‌گریزی خاک
 رابطه تفاوت GMD در نمونه‌های آلوده و شاهد با پایداری آب‌گریزی (WDPT) در سطح آماری ۵ درصد معنی‌دار شد (شکل ۵). هم‌بستگی مثبت GMD با فاکتورهای آلی OM و TOC (جدول ۲) نشان می‌دهد که با افزایش پایداری آب‌گریزی، GMD در خاک‌های آلوده نسبت به خاک‌های شاهد افزایش یافته است. بنابراین ترکیبات هیدروکربنی علاوه بر اثر بر افزایش پایداری ساختمان و اندازه خاکدانه‌های پایدار در آب، از طریق آب‌گریزی نیز سبب افزایش خاکدانه‌های پایدار



شکل ۵. اثر شدت آب‌گریزی (WDPT/clay) بر: الف) Δ MWD و ب) Δ GMD بین نمونه‌های خاک آلوده و شاهد

خاکدانه‌ها جلوگیری می‌کند. اگرچه تشدید آب‌گریزی، سبب افزایش پایداری ساختمان خاک منطقه (افزایش MWD و کاهش GMD و کاهش MDC) در مکان‌های آلوده به نفت نسبت به مکان‌های شاهد شد؛ ولی هیدروکربن‌ها (مواد آلی) سبب افزایش اندازه خاکدانه‌ها و در نتیجه افزایش منافذ بزرگ در خاک شده و کاهش شدید نگه‌داشت آب را به دنبال داشته است. بنابراین شرایط نامساعدی را برای فضای سبز منطقه ایجاد نموده و به‌مرور زمان سبب تخریب پوشش گیاهی منطقه بختیاردشت شده است.

وجود هیدروکربن‌ها در خاک منطقه طی سال‌های زیاد و با توجه به مسن شدن این ترکیبات، از طریق افزایش فراوانی خاکدانه‌های پایدار در آب و از طریق ایجاد پدیده آب‌گریزی در خاک منجر به پایداری ساختمان خاک در آب شد. بررسی اثر آلودگی بر شاخص‌های پایداری ساختمان خاک (MWD، GMD و MDC) نشان داد که با افزایش غلظت هیدروکربن‌ها در خاک شاخص‌های MWD و GMD افزایش و MDC کاهش یافت.

(۲) غلظت‌های بیش‌تر از ۶/۴ درصد کل پلی‌هیدروکربن‌ها در خاک، سبب کاهش MWD و GMD شد که این وضع می‌تواند به دلیل افزایش دافعه آنیونی بین ذرات رس و گروه‌های عاملی هیدروکربن‌ها باشد به عبارتی مقدار زیاد هیدروکربن از هم‌آوری

منابع مورد استفاده

۱. ذوالفقاری، ع. ا.، م. ع. حاج‌عباسی، ۱۳۸۷. تأثیر تغییر کاربری اراضی بر خصوصیات فیزیکی و آب‌گریزی خاک در مراتع. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۲(۲): ۲۵۱-۲۶۲.
۲. عرفان‌منش، م. و م. افیونی، ۱۳۸۶. آلودگی آب، خاک و محیط زیست. چاپ ششم. فصل اول. انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان.
۳. علیزاده، ا. ۱۳۸۳. فیزیک خاک. چاپ دوم. فصل پنجم. انتشارات آستان قدس رضوی.

4. Amézketa, E. 1999. Soil aggregate stability: a review. J. Sustain. Agric. 14: 83-151.
5. Andrenelli, M., C. V. Fiori and S. Pellegrini. 2013. Soil particle-size analysis up to 250 μ m by X-ray granulometer: Device set-up and regressions for data conversion into pipette-equivalent values. Geoderma 192: 380-393.

6. Arcenegui, V., J. Mataix-Solera, C. Gueuero, R. Zomoza, J. Malaix-Beneyto and F. Garcia-Orenes. 2008. Intermediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils. *Catena*. 74: 219-226.
7. Blanco-Canqui, L. and R. Lal. 2008. Corn stover removal impacts on micro-scale soil physical properties. *Geoderma*. 145: 335-346.
8. Briedis, C., J. C. De Moraes Sá, E. F. Caires, J. D. F. Navarro, Th. M. Inagaki, A. Boer, C. Q. Neto, A. D. O. Ferreira, L. B. Canalli and J. B. D. Santos. 2012. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in gregate classes influenced by surface liming in a no-till system. *Geoderma* 170: 80-88.
9. Caravaca, F. and A. Roldán. 2003. Assessing changes in physical and biological properties in a soil contaminated by oil sludges under semiarid Mediterranean conditions. *Geoderma* 117: 53-61.
10. Dexter, A. R., G. Richard, D. Arrouays, E. A. Czyz, C. Jolivet and O. Duval. 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma*. 144: 620-627.
11. Dexter, A. R., G. Richard, E. A. Czyz, J. Davy, M. Hardy and O. Duval. 2011. Clay dispersion from soil as a function of antecedent water potential. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75: 444-455.
12. Diehl, D. 2013. Soil water repellency: Dynamics of heterogeneous surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 432: 8-18.
13. Doerr, S. H., R. A. Shakesby and R. P. D. Walsh. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance. *Earth Sci.* 51: 33-65.
14. Egodawatta W. C. P., U. R. Sangakkara and P. Stamp. 2012. Impact of green manure and mineral fertilizer inputs on soil organic matter and crop productivity in a sloping landscape of Sri Lanka. *Field Crops Res.* 129: 21-27.
15. Goebel, M. O., J. Bachmann, M. Reichstein and I. A. Janssens. 2011. Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition – is there a link to extreme climatic events? *Glob Change Biol.* 17: 2640-2656.
16. Goebel, M. O., S. K. Woche and J. Bachmann. 2009. Do soil aggregates really protect encapsulated organic matter against microbial decomposition? *Versita*. 64/3: 443-448.
17. Hallett P. D., N. White and K Ritz. 2006. Impact of basidiomycete fungi on the wettability of soil contaminated with a hydrophobic polycyclic aromatic hydrocarbon. *Biologia* 61: S334-S338.
18. Nelson, R. E. 1982. Carbonate and gypsum. PP. 181-197. *In: Buxton, D. R., (Ed.), Method of Soil Analysis, Part 2. Chemical Methods. Agronomy Handbook No 9. ASA and SSSA, Madison, WI.*
19. Piccolo, A., S. C. Mbagwu. 1999. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1801-1810.
20. Rengasamy, P., R. S. B. Greene, G.W. Ford and A. H. Mehanni. 1984. Identification of dispersive behaviour and the management of red-brown earths. *Aust. J. Soil Res.* 22: 413-431.
21. Roy, J. L., W. B. McGill. 1997. Characterization of disaggregated nonwetttable surface soils found at old crude oil spill sites. *Can. J. Sociol.* 331-344.
22. Roy, J. L., W. B. McGill. 2000. Investigation into mechanisms leading to the development, spread and persistence of soil water repellency following contamination by crude oil. *Can. J. Sociol.* 595-606.
23. Salehi, M. H., O. Hashemi Beni, H. Beigi Harchegani, I. Esfandiarpour Borujeni and H.R. Motaghian. 2011. Refining soil organic matter determination by loss-on-ignition. *Pedosphere* 21(4): 473-482.