



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



تأثیر آلودگی نفتی بر ویژگی‌های هیدرولیکی و ظرفیت نگهداری آب خاک در مناطق پالایشگاهی

بندر عباس

تورج اسدی^۱، پیام نجفی^{۲*}، الهام چاوشی^۱، مهرا ن هودجی^۲

^۱دانشجوی دکترای خاکشناسی، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، واحد اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
^۲گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، واحد اصفهان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

* نویسنده مسئول: Payam.najafi@gmail.com

چکیده

آلودگی نفتی یکی از چالش‌های زیست‌محیطی کلیدی در خاک‌های مناطق صنعتی است که ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک را تغییر می‌دهد. این مطالعه تأثیر آلودگی نفتی بر آبگریزی، نفوذپذیری، گنجایش زراعی (FC)، نقطه پژمردگی دائم (PWP) و آب قابل استفاده گیاه (PAW) را در خاک‌های اطراف پالایشگاه نفت بندرعباس بررسی کرد. نمونه‌های خاک با سطوح مختلف آلودگی از مناطق پیرامونی پالایشگاه جمع‌آوری و آزمایش‌هایی شامل تحلیل منحنی نگهداشت آب، هدایت هیدرولیکی و شاخص‌های آلی مانند کربن آلی کل (TOC) انجام شد. نتایج نشان داد که آلودگی نفتی در سطوح متوسط و زیاد به‌طور معنی‌داری ($p < 0.05$) گنجایش زراعی را کاهش می‌دهد، در حالی که اثر آن بر PWP در سطح آماری ۵٪ معنی‌دار نبود. در این بررسی آب قابل استفاده گیاه نیز به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت. تحلیل همبستگی رابطه منفی بین افزایش TOC و کاهش FC، PWP و PAW را تأیید کرد. این تغییرات به دلیل تشکیل لایه‌های هیدروکربنی آبگریز، نفوذپذیری خاک را کاهش داده و تنش رطوبتی را در گیاهان تشدید می‌کند. نتایج این پژوهش اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت زیست‌محیطی، بازسازی خاک‌های آلوده و برنامه‌ریزی کشاورزی در مناطق صنعتی ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: آلودگی نفتی، آبگریزی خاک، نفوذپذیری، گنجایش زراعی، آب قابل استفاده گیاه، پالایشگاه بندرعباس

مقدمه

آلودگی خاک توسط هیدروکربن‌های نفتی یکی از مسائل زیست‌محیطی برجسته در مناطق صنعتی، به‌ویژه اطراف پالایشگاه‌ها، است که از نشت نفت خام و فرآورده‌های نفتی ناشی می‌شود (Chen et al., 2021). این آلودگی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی خاک را تغییر داده و بر کیفیت آب زیرزمینی، تنوع زیستی و کارایی اکوسیستم‌های خاکی تأثیر منفی می‌گذارد (Zhang et al., 2020).

هیدروکربن‌های نفتی با ایجاد خاصیت آبگریزی، نفوذپذیری خاک را کاهش داده و جذب رطوبت توسط گیاهان و فعالیت میکروبی را مختل می‌کنند (Doerr et al., 2000). مطالعات نشان داده‌اند که افزایش غلظت هیدروکربن‌های کل (TPHs) با زمان نفوذ قطره آب (WDPT) رابطه لگاریتمی دارد و آبگریزی خاک را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد (Mata et al., 2022). همچنین، افزایش کربن آلی کل (TOC) با جذب بیشتر هیدروکربن‌ها، این اثر را تشدید می‌کند (Khalili et al., 2018). در نهایت، این تغییرات منجر به کاهش ظرفیت نگهداری آب، افزایش رواناب و فرسایش خاک می‌شود که برای کشاورزی و پایداری اکوسیستم چالش‌برانگیز است (Li et al., 2021).

پالایشگاه نفت بندرعباس، به‌عنوان یکی از مراکز اصلی تولید نفت در جنوب ایران، منبع مهمی برای آلودگی خاک محسوب می‌شود. خاک‌های ساحلی این منطقه با بافت لوم تا شنی و درصد بالای سنگریزه، به‌ویژه در برابر آلودگی‌های نفتی



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



آسیب‌پذیر هستند و کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب را تجربه می‌کنند (کراموز و همکاران، ۱۳۹۹). مطالعات اراضی پیرامون پالایشگاه‌ها هم نشان داده‌اند که نشت هیدروکربن‌ها نفوذپذیری را کاهش داده و آبگریزی را افزایش داده و پیامدهای منفی برای فعالیت میکروبی و تولید زیستی خاک دارد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۸؛ حسینی و همکاران، ۱۳۹۹). مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر آلودگی نفتی بر آبگریزی، نفوذپذیری، گنجایش زراعی (FC)، نقطه پژمردگی دائم (PWP) و آب قابل استفاده گیاه (PAW) در خاک‌های اراضی پیرامون پالایشگاه بندرعباس انجام شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت زیست‌محیطی، بازسازی خاک‌های آلوده و برنامه‌ریزی کشاورزی در مناطق صنعتی فراهم کند.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

این مطالعه در اراضی پیرامون پالایشگاه نفت بندرعباس (با مختصات تقریبی: ۲۷,۱۸۳۳° شمالی، ۵۶,۲۶۶۷° شرقی) انجام شده است. محدوده نمونه‌برداری شامل ۱۸ نقطه (۹ نقطه آلوده و ۹ نقطه شاهد) بود که بر اساس بافت خاک، استقرار پیرامون تأسیسات پالایشگاه، و احتمال آلودگی نفتی انتخاب شدند. نقاط شاهد با ویژگی‌های مشابه (بافت، ساختار، و شیب) اما بدون آلودگی نفتی انتخاب شدند تا تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از آلودگی باشند (Hewelke et al., 2020).

نمونه برداری

نمونه‌برداری از لایه سطحی خاک (۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) در بهار ۱۴۰۳ انجام شد. نمونه‌ها با استفاده از مته دستی از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شدند. در هر نقطه نمونه‌برداری، سه تکرار انجام شده و به صورت کامپوزیت ترکیب شدند تا نماینده خاک منطقه باشند (Khalili et al., 2018). نمونه خاک‌ها در آزمایشگاه خشک شده و از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شدند تا ذرات درشت حذف شوند. برای حفظ ساختار خاک، خاک کوبی انجام نشد. نمونه‌های آب از دو منبع جمع‌آوری شد: (۱) آب آلوده از چاه شماره ۱ شهرک مسکونی پالایشگاه، نزدیک به تعمیرگاه و انبار اضطراری سوخت، و (۲) آب بدون آلودگی از سیستم آبیاری فضای سبز شهرک به‌عنوان شاهد. نمونه‌های آب با استفاده از پمپ دستی جمع‌آوری، در بطری‌های استریل ۵۰۰ میلی‌لیتری و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. این نمونه‌ها در آزمایشگاه، برای تحلیل شیمیایی به وسیله فیلتر واتمن شماره ۴۲، با اندازه منافذ ۲/۵ میکرومتر فیلتر شدند.

تحلیل‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل چگالی ظاهری (BD)، بافت خاک (روش هیدرومتری)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD) و رس قابل پراکنش مکانیکی (MDC1 و MDC2) اندازه‌گیری شد. چگالی ظاهری با روش استوانه (Core Method) و با استوانه‌های ۱۰۰ سانتی‌متر مکعبی محاسبه شد (Blake and Hartge, 1986).

هدایت الکتریکی (EC) و pH خاک در عصاره اشباع (۱:۵ خاک به آب) با دستگاه‌های EC متر (Hanna HI9813) و pH متر (Metrohm 827) اندازه‌گیری شدند.

ویژگی‌های شیمیایی شامل کربن آلی کل (TOC) (به روش واکلی - بلک)، ماده آلی (OM) (به روش احتراق)، کربنات کلسیم (به روش تیتراسیون) و کل پلی‌هیدروکربن‌های نفتی (TPHs) (به روش استخراج سوکسله) تحلیل شدند.



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



تحلیل آبگریزی و ویژگی‌های هیدرولیکی

آبگریزی خاک با روش زمان نفوذ قطره آب (WDPT) ارزیابی شد. برای این منظور، ۵ قطره آب مقطر (حجم ۵۰ میکرولیتر) روی سطح خاک قرار گرفت و میانگین زمان نفوذ ثبت شد. خاک‌هایی با WDPT بیش از ۵ ثانیه به‌عنوان آبریز طبقه‌بندی شدند (Doerr et al., 2000). هدایت هیدرولیکی اشباع (Ks) با روش دیسک نفوذسنج (Mini-Disk Infiltrometer) در مکش‌های ۰/۵ تا ۳ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد (Zhang, 1997). منحنی نگهداشت آب خاک با استفاده از دستگاه صفحه فشاری (Soilmoisture Equipment Corp.) در مکش‌های ۱۰، ۳۳، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال تعیین شد تا گنجایش زراعی (FC)، نقطه پژمردگی دائم (PWP) و آب قابل استفاده گیاه (PAW = FC - PWP) محاسبه شدند.

تحلیل ترکیبات هیدروکربنی

ترکیبات هیدروکربنی خاک با کروماتوگرافی گازی-جرمی (GC-MS)، دستگاه (Agilent 7890B) تحلیل شدند. بدین منظور، نمونه‌های خاک با حلال دی‌کلرومتان استخراج شده و ترکیبات آلی (اتر، کربونیل، کربوکسیل، آمید) شناسایی شدند. غلظت TPHs با استاندارد EPA Method 8015D کمی‌سازی شد.

تحلیل آماری

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۶) تحلیل شدند. مقایسه میانگین ویژگی‌های خاک (EC، pH، BD، TOC، OM) بین تیمارهای آلوده و شاهد با آزمون t مستقل انجام شد. روابط همبستگی بین TOC، TPHs و WDPT با روش پیرسون بررسی شد. برای تحلیل منحنی‌های نگهداشت آب، مدل ون‌گنختن (van Genuchten, 1980) استفاده شد. سطح معنی‌داری آماری ۰/۰۵ (p > ۰) در نظر گرفته شد.

یافته‌ها

نتایج حاصل از آزمایشگاه نمونه‌های خاک در جدول ۱ ارائه شده است. بر این اساس، میانگین چگالی ظاهری خشک ۱/۱۸ ± ۰/۱۸۶ (mg m⁻³)، چگالی ظاهری مرجع ۱/۳۷ ± ۰/۱۵ (mg m⁻³)، چگالی ظاهری نسبی ۰/۱۶ ± ۰/۱۲۶، رس ۱/۷۶ ± ۱۶/۱۱ (%)، سیلت ۱۳/۵۴ ± ۲۶/۲۶ (%)، شن ۱۵/۳۹ ± ۵۱/۴۳ (%)، ماده آلی ۵/۲۴ ± ۶/۱۷ (%)، کربنات کلسیم ۱/۵۷ ± ۳۹/۷۶ (%)، MWD ۰/۵۸ ± ۰/۸۸ (mm)، GMD ۰/۳۲ ± ۰/۹۱ (mm)، MDCI ۰/۳۸ ± ۰/۶۳ (%)، MDC₂ ۲/۴۹ ± ۴/۱۶ (%)، TOC ۳/۱۸ ± ۴/۷۶ (%). TPHs ۲/۲۲ ± ۵/۴۸ (%). است (جدول ۱).

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی در داخل و پیرامون پالایشگاه نفت بندرعباس

ردیف	ویژگی خاک	تعداد نمونه	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
۱	چگالی ظاهری خشک	۱۸	mg m ⁻³	۱/۱۵	۱/۶۵	۱/۴۶	۰/۱۸	۱۱/۸۶	-۰/۱۴	۱/۵۹
۲	چگالی ظاهری مرجع	۱۸	mg m ⁻³	۱/۰۵	۱/۴۶	۱/۳۷	۰/۱۵	۷/۷۵	-۰/۱۸۸	۰/۴۸
۳	چگالی ظاهری نسبی	۱۸	-	۱/۰۶	۱/۴۷	۱/۲۶	۰/۱۶	۱۳/۸۳	-۰/۲۳	-۱/۵۹
۴	رس	۱۸	%	۸/۵	۳۱/۶۴	۱۶/۱۱	۶/۷۶	۲۶/۶۸	۱/۳۱	۱/۲۱
۵	سیلت	۱۸	%	۴/۴۳	۴۹/۳۵	۲۶/۲۶	۱۳/۵۴	۳۸/۸۸	۰/۴۷	۰/۵۸
۶	شن	۱۸	%	۳۵/۴۳	۶۶/۴۳	۵۱/۴۳	۱۵/۳۹	۲۶/۲۶	۰/۲۹	-۱/۲۹
۷	ماده آلی	۱۸	%	۰/۲۷	۱۴/۲۶	۶/۱۷	۵/۲۴	۹۷/۱۵	۰/۸۳	-۰/۳۷
۸	کربنات کلسیم	۱۸	%	۳۹/۲	۳۵/۴۳	۳۹/۷۶	۱/۵۷	۲/۳۵	-۱/۱۱	۱/۴۶

ردیف	ویژگی خاک	تعداد نمونه	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضرب تغییرات	چولگی	کشیدگی
۹	MWD	۱۸	mm	۰/۱۱	۲/۰۶	۰/۸۸	۰/۵۸	۵۶/۱۵	۰/۴۵	-۱/۱۸
۱۰	GMD	۱۸	mm	۰/۵۸	۱/۱۳	۰/۹۱	۰/۳۲	۱۸/۰۸	۰/۳۸	-۱/۳۲
۱۱	MDCI	۱۸	%	۰/۲۴	۱/۴۵	۰/۶۳	۰/۳۸	۶۸/۷۷	۰/۷۴	-۰/۶۷
۱۲	MDC ₂	۱۸	%	۱/۲۶	۹/۰۶	۴/۱۶	۲/۴۹	۵۹/۸۳	۱/۱۲	-۰/۱۷
۱۳	TOC	۱۸	%	۰/۲۷	۸/۳۵	۴/۷۶	۳/۱۸	۶۸/۱۶	۰/۲۹	-۱/۳۹
۱۴	TPHs	۱۸	%	۲/۴۲	۸/۲۷	۵/۴۸	۲/۲۲	۳۷/۲۷	۰/۲۶	-۰/۵۶

توضیح: MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه های پایدار در آب، GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه های پایدار در آب، MDCI: رس قابل پراکنش مکانیکی بر حسب کل وزن خاک، MDC₂: رس قابل پراکنش مکانیکی بر حسب رس خاک، TOC: کربن آلی خاک و TPHs: کل پلی هیدروکربن های خاک

جدول ۲- مقادیر آزمون t برای پارامترهای EC, pH, BD, TOC, OM

ویژگی مورد بررسی	مقدار t	درجه آزادی
OM	۴/۴۷***	۱۶
TOC	۹/۳۷***	۱۶
BD	۳/۳۶*	۱۶
pH	۲/۵۲	۱۶
EC	۱/۲۶ ^{ns}	۱۶

TOC: کربن آلی کل خاک، BD: چگالی ظاهری خاک، OM: مواد آلی؛ pH: پ - هاش، EC: هدایت الکتریکی

نتایج کروماتوگرافی جرمی - گازی (GC-Mass) نشان داد حدود ۲۱ نوع ترکیب هیدروکربنی در خاک های آلوده منطقه وجود دارد که اکثراً گروه های عاملی اتر، کربونیل، کربوکسیل و آمید دارند. بیش از ۸۰ درصد این ترکیبات شامل ۹- اکتادیسینال (۳۱درصد)، ۹- اکتادستئوئیک اسید (اولئیک اسید) (۲۹ درصد)، اکتادستئوئیک اسید (گلیسرول) (۱۱/۴۵ درصد)، ۹- اکتادستئوئیک اسید (روغن قرمز) (۷/۲۱ درصد) و هگزادی کربوکسیلیک اسید (۴/۵۸درصد) هستند که آلکان با زنجیره طولانی به شمار می روند (جدول ۳).

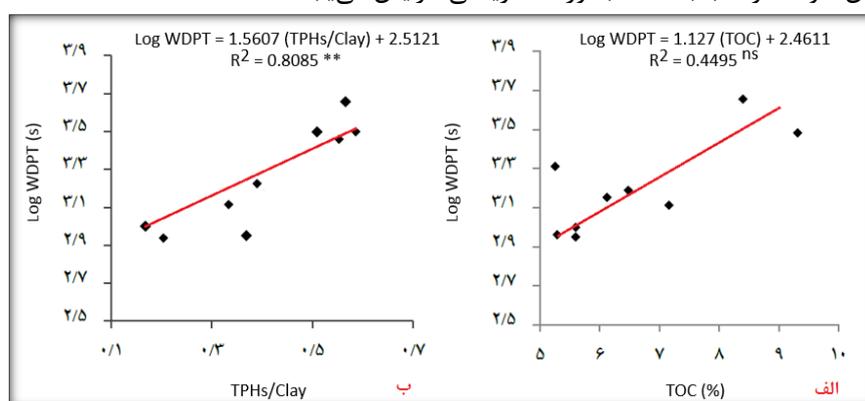
جدول ۳- برخی از ترکیبات نفتی موجود در خاک های مورد بررسی در پالایشگاه نفت بندرعباس

ردیف	نام ترکیب شیمیایی	جرم مولکولی (g.mol ⁻¹)	نوع ترکیب شیمیایی	درصد	درصد تجمعی
۱	۹- اکتادیسینال	۲۶۶/۴۶۲	آلکان با زنجیره ی طولانی	۳۱/۰۰	۳۱/۰۰
۲	۹- اکتادستئوئیک اسید (اولئیک اسید)	۲۸۴/۴۶	آلکان با زنجیره ی طولانی	۲۹/۰۰	۶۰/۰۰
۳	۹- اکتادستئوئیک اسید (روغن قرمز)	۴۰۸/۴۹	پلی هیدروکربن آروماتیک	۱۱/۴۵	۷۱/۴۵
۴	اکتادستئوئیک اسید (گلیسرول)	۱۷۲/۰۷	آلکان با زنجیره ی طولانی	۷/۲۱	۷۸/۶۶
۵	هگزادی کربوکسیلیک اسید	۲۰۱/۱۵	آلکان با زنجیره ی طولانی	۴/۵۸	۸۳/۲۴
۶	۲- زایلن - دی ۱۰	۱۶۱/۲۰	پلی هیدروکربن آروماتیک	۳/۱۳	۸۶/۳۷
۷	سیکلوهگزان	۸۴/۱۶	سیکلوالکان	۱/۱۸	۸۷/۵۵
۸	اکتان	۱۱۴/۲۲	آلکان	۰/۶۸	۸۸/۲۳
۹	اکتاکوسان (کربونیک اسید)	۲۹۴/۷۶	آلکان با زنجیره ی طولانی	۰/۵۹	۸۸/۸۲

بررسی تاثیر آلودگی نفتی بر آبگریزی و نفوذ آب به خاک

رابطه بین آبگریزی (WDPT) با (TPHs/Clay) و TOC که به ترتیب بصورت

$\text{Log WDPT} = 1.127 (\text{TOC}) + 2.4611$ و $\text{Log WDPT} = 1.5607 (\text{TPHs/Clay}) + 2.5121$ محاسبه شد که مویده افزایش لگاریتمی است (شکل ۱). به این معنی که با افزایش کل پلی هیدروکربن‌های خاک (TPHs) و یا کربن آلی کل خاک (TOC)، زمان نفوذ قطره آب به خاک بصورت لگاریتمی افزایش می‌یابد.



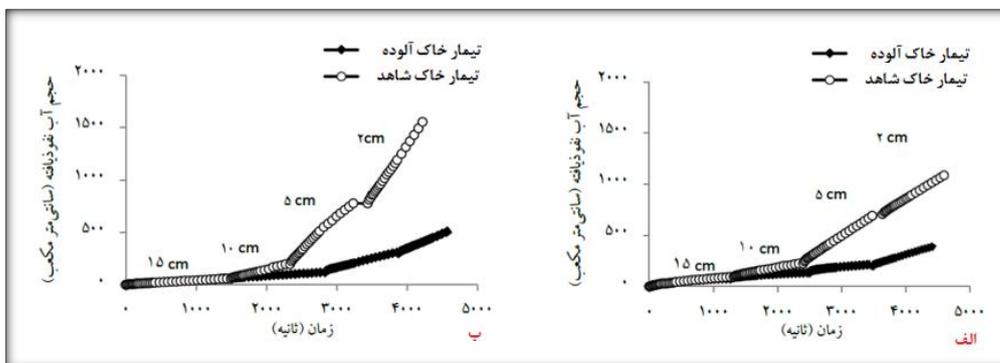
شکل ۱- تاثیر آلودگی نفتی TOC بر TPHs/Clay (الف) و بر آبگریزی یا زمان نفوذ قطره آب به خاک (WDPT) (ب) در خاک های آلوده مورد بررسی

در راستای بررسی تاثیر آلودگی نفتی بر نفوذ غیراشباع آب به خاک، درصد کاهش حجم نفوذ نهایی ناشی از افزایش آلودگی نفتی در دو نوع خاک لومی و الفنی با درصد سنگریزه سطح یکسان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای خاک آلوده اول (TPHs بیشینه برابر با ۸/۲۷ درصد) و خاک آلوده دوم (TPHs کمینه برابر با ۲/۴۲ درصد) به ترتیب ۷۲/۷۵ و ۶۴/۹۳ درصد کاهش حجم آب نفوذ یافته نسبت به تیمار شاهد دیده می‌شود (جدول ۴).

جدول ۴- نمونه ای از کاهش حجم نفوذ تجمعی نهایی آب در خاک در اثر افزایش آلودگی نفتی

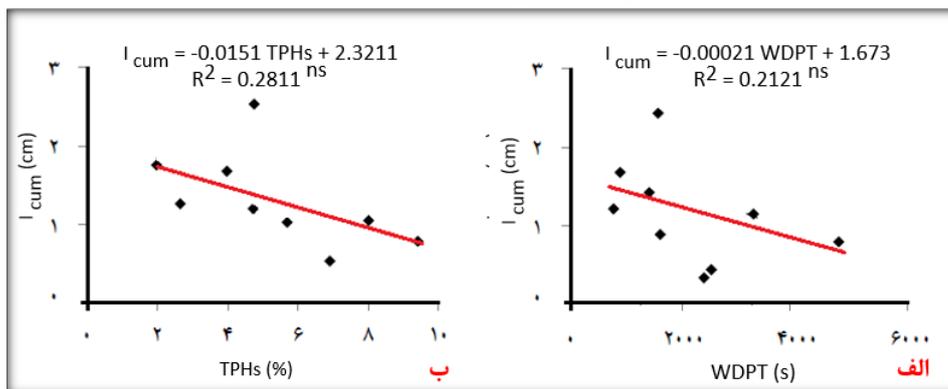
خاک	TPHs (%)	حجم نفوذ نهایی در تیمار شاهد (سانتی متر مکعب)	حجم نفوذ نهایی در تیمار آلوده (سانتی متر مکعب)	درصد کاهش حجم نفوذ نهایی
خاک اول (الف)	۸/۲۷	۱۱۶۳	۳۱۷	۷۲/۷۵
خاک دوم (ب)	۲/۴۲	۱۶۳۱	۵۷۲	۶۴/۹۳

اثر آلودگی نفتی بر منحنی‌های نفوذ تجمعی آب در خاک های با TPHs زیاد (۸/۲۷ درصد) و خاک با TPHs کم (۲/۴۲ درصد) در شکل ۲ نشان داده شده است. اندازه گیری نفوذ آب به خاک در منطقه و مقایسه مکان‌های آلوده و شاهد نشان می‌دهد در هر مکان نفوذ تجمعی نهایی در خاک آلوده خیلی کمتر از خاک شاهد است.



شکل ۲- اثر آلودگی نفتی بر منحنی‌های نفوذ تجمعی آب در خاک‌های با TPHs متفاوت: (الف) خاک با TPHs زیاد (۸/۲۷ درصد) و (ب) خاک با TPHs کم (۲/۴۲ درصد)

بررسی اثر کل پلی‌هیدروکربن‌های نفتی بر نفوذ تجمعی آب در خاک و همچنین همبستگی آبیگریزی خاک با نفوذ تجمعی و TPHs نشان می‌دهد با افزایش پلی‌هیدروکربن‌های نفتی نفوذ تجمعی آب در خاک کاهش می‌یابد و از طرف دیگر با افزایش آبیگریزی خاک (WDPT) نفوذ تجمعی کاهش می‌یابد (شکل ۳).



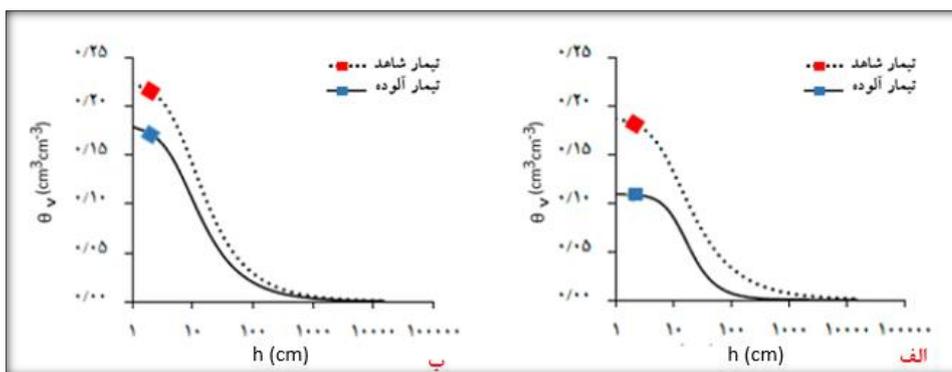
شکل ۳- اثر TPHs و WDPT بر نفوذ تجمعی آب در خاک‌های آلوده به نفت

(I_{cum}: نفوذ تجمعی نهایی آب در خاک، WDPT: زمان نفوذ قطره آب به خاک، TPHs: کل پلی‌هیدروکربن‌های خاک) نتایج حاصل از تجزیه واریانس پارامترهای هیدرولیکی خاک در روش حل عددی داده‌های نفوذسنجی در جدول ۵ ارائه شده است. بطور کلی بررسی تأثیر آلودگی نفتی بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک حاصل از داده‌های نفوذسنجی و با استفاده از روش حل عددی در برنامه رایانه ای DISC نشان داد که تأثیر آلودگی نفتی بر پارامترهای θ , n , m , α معنی‌دار نشد ($P > 0.05$) اما آلودگی نفتی بر θ_s , $\theta_{(h=2cm)}$ و K_s در سطح آماری ۵ درصد اثر معنی‌داری داشت ($P < 0.05$).

جدول ۵ - جدول تجزیه واریانس پارامترهای هیدرولیکی خاک در روش حل عددی داده‌های نفوذسنجی

پارامتر هیدرولیکی	میانگین مربعات خطا	درجه آزادی پارامتر	درجه آزادی خطا
n	۰/۰۴ ^{ns}	۳	۱۱
α	۰/۰۰۱۸ ^{ns}	۳	۱۱
θ_1	۰/۰۰۶۸ ^{ns}	۳	۱۱
θ_s	۰/۰۰۸۶ [*]	۳	۱۱
K_s	۱/۴۸ [*]	۳	۱۱
θ_2	۰/۰۰۹۵ [*]	۳	۱۱

اثر آلودگی نفتی و شدت آلودگی نفتی خاک بر متحتی نگهداشت آب خاک برآورد شده توسط برنامه DISC و به کمک مدل ون گنوختن (محدودیت معلم)^۱ در شکل ۴ ارائه شده است. منحنی‌های نگهداشت آب خاک برآورد شده توسط برنامه DISC نشان داد که در تیمار آلودگی متوسط رطوبت اشباع نسبت به تیمار شاهد ۱۸/۲ درصد و در آلودگی بالا رطوبت اشباع نسبت به تیمار شاهد به اندازه ۳۹/۱ درصد داشته است.



شکل ۴- منحنی تأثیر شدت آلودگی نفتی خاک بر متحتی نگهداشت آب برآورد شده توسط برنامه DISC و به کمک مدل ون گنوختن (محدودیت معلم)

بحث

یکی از معضلات عمده خاک‌های آلوده به نفت به ویژه در مناطق خشک دنیا آبریزی است. آبریزی و آبدوستی ویژگی‌های مهم فیزیکی هستند که تأثیر زیادی بر روابط آب و خاک دارند. 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 (Fidanza et al., 2020). یکی از دلایل آبریزی خاک، حضور ترکیبات آلی آبریز است که سطح ذرات خاک را می‌پوشانند (قوبدل و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین نشان داده شده است که حضور آلاینده‌های نفتی در خاک سبب بروز آبریزی شدید در خاک شده (Takawira et al., 2014) و شدت آبریزی پس از گذشت یک دوره خشکی طولانی مدت، افزایش می‌یابد (Mirbabaei, et al., 2013). همچنین آبریزی سبب کاهش نفوذپذیری و ظرفیت نفوذ آب به خاک، افزایش رواناب سطحی، کاهش قابلیت خیس خوردگی خاک، خیس خوردگی غیریکنواخت خاک، تأثیر بر توزیع سه بعدی و پویایی رطوبت خاک، افزایش سیلاب ناشی از باران‌های شدید و همچنین توسعه جریان تشدید فرسایش خاک می‌شود (Eibisch et al., 2015).

آبریزی خاک با میزان کربن آلی و رطوبت خاک ارتباط مستقیم دارد (Hallett et al., 2006). قابل ذکر است که عوامل زیادی مانند مقدار و نوع ماده آلی، بافت خاک، نوع کاربری زمین، مقدار رطوبت خاک، پهباش خاک و آتش سوزی در ایجاد و تغییر شدت آبریزی خاک دخالت دارند (Vogelmann et al., 2013) و غالباً همبستگی معنی داری بین مقادیر کربن آلی و آبریزی خاک مشاهده شده است (Mirbabaei et al., 2013).

با توجه به اینکه ایران کشوری نفت خیز 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 ارزیابی اثر آلاینده‌های هیدروکربنی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در اطراف پالایشگاه نفت بندرعباس انجام شد.

^۱ Mualem



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان داد که بافت خاک محدوده مطالعاتی عمدتاً متوسط تا سبک است. همچنین در خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی منطقه مطالعاتی، ویژگی‌های مرتبط با مواد آلی از قبیل مقدار مواد آلی (OM)، مقدار کربن آلی (TOC) و کل پلی‌هیدروکربن‌های خاک (TPHs) افزایش قابل توجهی نسبت به خاک‌های فاقد آلودگی دیده شد که نشان دهنده تجمع هیدروکربن‌ها در خاک‌های آلوده در محدوده مطالعاتی است. در حالیکه از نظر هدایت الکتریکی (شوری) خاک در خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی با تیمار شاهد در سطح آماری ۵ درصد تفاوت معنی‌داری دیده نمی‌شود.

کاهش چگالی ظاهری در خاک‌های آلوده به دلیل وجود هیدروکربن‌ها به عنوان ترکیبات سبک‌تر از ذرات معدنی خاک است. با توجه به جنس خاک‌های محدوده بندر شهید باهنر تا بندر خمیر که عمدتاً درصد بالایی از آهک دارند و لایه‌های سخت آهکی^۲ در برخی مناطق در نیم‌رخ خاک دیده می‌شود به علت حضور سنگریزه در خاک منطقه و آلودگی به لجن‌های نفتی درجه تراکم خاک‌ها زیاد تا بسیار زیاد بود. لایه‌های متراکم در خاک محدودیت جدی در برابر نفوذ آب و رشد و توسعه ریشه گیاهان می‌باشد. همچنین بررسی‌های این تحقیق نشان داد که pH نمونه‌های آلوده به نفت از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با pH خاک‌های شاهد نداشت. در واقع ترکیبات هیدروکربنی تغییری در pH خاک‌های منطقه ایجاد نکرده‌اند که احتمالاً به دلیل همان خاصیت بافری خاک‌های آهکی است. اگرچه تحقیقات نشان داد که نفت خام سبب افزایش pH خاک می‌شود که به دلیل ایجاد شرایط بی‌هوازی ناشی از افزایش فعالیت باکتری‌ها می‌باشد (Eibisch et al., 2015).

نتایج تحقیق نشان می‌دهد هیدروکربن‌های نفتی اثر معنی‌داری بر افزایش یا کاهش هدایت الکتریکی (شوری) خاک نداشته‌اند. در اکثر اوقات لجن‌های نفتی سبب افزایش شوری و EC خاک می‌شوند و به دنبال آن افزایش فشار اسمزی و ایجاد تنش شوری سبب تخریب پوشش گیاهی می‌شود (کرمانپور و همکاران، ۱۳۹۴). این شوری به دلیل نمک‌هایی است که در پالایشگاه در فرآیند تصفیه از نفت خام جدا شده و وارد پساب پالایشگاه می‌شود (Singh et al., 2020). اما به نظر می‌رسد آلودگی نفتی در خاک‌های مورد بررسی در درازمدت تحت فرآیند مسن شدن^۳ قرار گرفته‌اند و به مرور زمان توسط آبیاری و بارندگی نمک‌های محلول آبشویی شده است و این مشکل وجود ندارد.

بررسی ترکیبات نفتی موجود در خاک‌های پالایشگاه نفت بندرعباس نشان می‌دهد که حدود ۹۰ درصد کل ترکیبات شامل پلی‌هیدروکربن‌های آروماتیک (PAHs) و تعدادی از آلکان‌ها با وزن ملکولی زیاد و سیکلوآلکان‌ها است. مقادیر ارائه شده از هر ترکیب درصدی از کل پلی‌هیدروکربن‌های خاک است. همچنین اکثر ترکیبات شناسایی شده دارای وزن ملکولی زیادی می‌باشند. این ترکیبات عمدتاً در ضایعات نفتی به وفور دیده می‌شوند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۸). تعدادی از آلکان‌های با وزن ملکولی کمتر مانند اکتان و سیکلوهگزان توسط متابولیسم ریزجانداران خاک به سرعت تجزیه می‌شوند و پایداری کمتری در خاک دارند (قویدل و همکاران، ۱۴۰۰). اما PAHs و ترکیباتی که در ساختار ملکولی آنها بیش از ۲۰ اتم کربن دارند مانند کربونیک اسیدها، گلیسرول و ترکیبات روغنی پایداری زیادی دارند. جذب این ترکیبات از طریق تبادل یونی و عمدتاً از طریق نیروهای فیزیکی، واندروالس و پیوند هیدروژنی با سطوح پلیمرهای آلی خاک (هیومیک اسید و فولویک اسید) و یا سطح رس‌های ۱:۱ و سطوح داخلی و خارجی رس‌های ۲:۱ می‌باشد.

^۲ Petrocalcic

^۳ Aging



۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



تحقیق حاضر نشان داد که یک رابطه افزایشی لگاریتمی بین آبگریزی (WDPT) با (TPHs/Clay) و TOC وجود دارد. ذرات رس با داشتن سطح ویژه زیاد سبب کاهش تاثیر ترکیبات بر آبگریزی می‌شوند (Doerr et al., 2000). به همین دلیل با تقسیم TPHs بر مقدار رس اثر بافت خاک بر آب - خاک حذف می‌شود. از آنجایی که خاک فاقد آلودگی بطور کلی ماده آلی کمی دارد (کرمانپور و همکاران، ۱۳۹۴)، در نتیجه می‌توان گفت افزایش کربن آلی خاک های آلوده به دلیل وجود ترکیبات نفتی است. علاوه بر این نفت دارای ترکیبات آلیفاتیک است که ملکول غیرقطبی هستند و تنها در انتهای زنجیره هیدروکربنی شان دارای بارهای جزئی مثبت یا منفی می‌باشند (Doerr et al., 2000). بنابراین این ترکیبات در آب حل نمی‌شوند و به صورت پوشش های آبگریز روی سطوح دانه‌ها را پوشانده و با افزایش زاویه تماسی آب - خاک از نفوذ قطرهای آب به درون خاک جلوگیری کنند. علاوه بر این، بخش سیال نفت با جریان روی سطوح خاک به تشدید آبگریزی می‌انجامد. با تا زمان ملکول های کوچک تبخیر شده و بخار حاصل از آن لایه ای آلی روی سطوح ذرات منافذ و شکاف های خاک ایجاد می‌کند (کرمانپور و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین بخار حاصل از ترکیبات فرار پوسته ای روی خاک تشکیل داده که رطوبت پذیری خاک را کاهش می‌دهد (Mata et al., 2022). کرمانپور و همکاران (۱۳۹۴) در اصفهان گزارش کردند که همبستگی مثبت معنی داری بین Log WDPT و مقدار ماده آلی در خاک وجود دارد. همچنین Hallett و همکاران (۲۰۰۶) هم دریافتند که با افزایش غلظت آنتراسن، هیدروکربن پلی آروماتیک) در خاک آبگریزی خاک بصورت خطی افزایش می‌یابد. گزارش شده است که ترکیبات هیدروکربنی نسبت به مواد آلی دیگر آبگریزی پایدار (۱۰ دقیقه >WDPT) در خاک ایجاد می‌شود (Roy and McGill, 2002).

بررسی منحنی اثر آلودگی نفتی بر منحنی های نفوذ تجمعی آب در خاک نشان می‌دهد که علاوه بر اینکه آلودگی نفتی سبب کاهش حجم آب نفوذ یافته در خاک می‌شود، تفاوت میزان حجم آب نفوذ یافته تیمارهای آلوده و شاهد با نزدیک شدن به شرایط اشباع (کاهش مکش ماتریک) نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش کل پلی هیدروکربن های نفتی (TPHs) در خاک نفوذ تجمعی آب به خاک کاهش یافت. مطالعات پیشین نشان داده اند که با افزایش غلظت آلاینده های نفتی در خاک درصد سطوحی که دارای پوشش های هیدروکربنی می‌شوند افزایش می‌یابد (Chau et al., 2014). بنابراین بر جداره منافذ و سطوح ذرات آب گریز افزوده می‌شود (کرمانپور و همکاران، ۱۳۹۴). این پدیده سبب کاهش نفوذ پذیری خاک شده و میزان آب نفوذ یافته به خاک کاهش می‌یابد. همچنین تحقیقات پیشین نشان داده اند که ترکیبات آب گریز در خاک سبب کاهش نفوذ آبی خاک می‌شوند و با ایجاد نفوذ موضعی و جریان های ترجیحی رژیم های رطوبتی در خاک را تغییر می‌دهند (Li et al., 2021). علاوه بر این پژوهشگران دریافته اند خاک های شدیداً آب گریز تنها از ۱ درصد ظرفیت نفوذ پذیری شان استفاده می‌کنند (Doerr et al., 2000).

تحقیق حاضر نشان داد که با افزایش پلی هیدروکربن های نفتی و آبگریزی خاک (WDPT) نفوذ تجمعی آب در خاک کاهش می‌یابد. نتایج این تحقیق تاییدی بر مطالعات کرمانپور و همکاران (۱۳۹۴) در اصفهان بوده که در شن های آبگریز نفوذ پذیری خاک به شدت کاهش یافته و جریان های ترجیحی ایجاد می‌شود.

نتیجه گیری کلی

این مطالعه نشان داد که آلودگی نفتی در خاک های اطراف پالایشگاه بندرعباس به طور معنی داری گنجایش زراعی و آب قابل استفاده گیاه را کاهش داده و آبگریزی و نفوذ پذیری خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. افزایش کربن آلی کل (TOC) و پلی هیدروکربن های نفتی (TPHs) با کاهش ظرفیت نگهداری آب و تشدید تنش رطوبتی در گیاهان مرتبط است. این یافته ها ضرورت اقدامات بازسازی خاک و مدیریت زیست محیطی در مناطق پالایشگاهی را برجسته می‌کند.



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



منابع

- حسینی، س. م.، رضایی، ا.، و مددی، ح. (۱۳۹۹). بررسی آلودگی فلزات سنگین و هیدروکربن‌های نفتی در خاک‌های اطراف پالایشگاه آبادان. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*, ۵۱(۴), ۹۸۵-۱۰۶۶.
- رضایی، ا.، حسینی، س. م.، و مددی، ح. (۱۴۰۰). اثرات هم‌زمان هیدروکربن‌های نفتی و فلزات سنگین بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک. *مجله مهندسی بهداشت محیط*, ۹(۳), ۱۶۷-۱۷۷.
- قویدل، ا.، ناجی راد، س.، علیخانی، ح.، ۱۴۰۰، بررسی تأثیر رطوبت و دمای خاک بر زیست پالایی نفت خام توسط باکتری سودوموناس پوتیدا، *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست*, ۲۳(۱), ۶۵-۷۶.
- محمدی، ع.، قائمی، م.، و شکری، ف. (۱۳۹۸). بررسی اثر هیدروکربن‌های نفتی بر ویژگی‌های خاک‌های اطراف پالایشگاه گچساران. *مجله تحقیقات خاک ایران*, ۳۳(۱), ۴۵-۵۶.
- فرزادیان، م.، حجتی، س.، صیاد، غ. ا.، و عنایتی، ن. (۱۳۹۴). استفاده از زئولیت برای کاهش آب‌گریزی خاک‌های آلوده به نفت. *مجله علوم آب و خاک*, ۱۹(۷۳), ۱۰۱-۱۱۲.
- کراموز، م.، مددی، ح.، و رضایی، ا. (۱۳۹۹). تأثیر آلودگی نفتی بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در جنوب ایران. *مجله علوم محیطی ایران*, ۴۶(۲), ۲۳۳-۲۴۵.
- کرمانپور، مصدقی، م. ر.، افیونی، م.، حاج‌عباسی، م. ع.، ۱۳۹۴، اثر آلودگی نفتی بر آب‌گریزی و پایداری ساختمان خاک در منطقه بختیارداشت اصفهان، *مجله علوم آب و خاک*, ۱۹(۷۳), ۱۳۹-۱۴۸.
- Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). Bulk density. In *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods* (pp. 363–375). American Society of Agronomy.
- Chau, H.W., Biswas, A., Vujanovic, V., & Si, B.C. (2014). Relationship between the severity, persistence of soil water repellency and the critical soil water content in water repellent soils. *Geoderma*, 221, 113-120.
- Chen, M., Xu, P., Zeng, G., Yang, C., Huang, D., & Zhang, J. (2021). Biodegradation of petroleum hydrocarbons in contaminated soil: A review. *Science of the Total Environment*, 749, 141–172.
- Doerr, S.H. (1998). On standardizing the 'water drop penetration time' and the 'molarity of an ethanol droplet' techniques to classify soil hydrophobicity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(7), 663–668.
- 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(1–4), 33–65.
- Doerr, S.H., Dekker, L.W., Ritsema, C.J., Shakesby, R.A., & Bryant, R. (2006). Water repellency of soils: The influence of ambient relative humidity, temperature and water content. *European Journal of Soil Science*, 57(1), 13–23.
- Eibisch, N., Durner, W., Bechtold, M., Fuß, R., Mikutta, R., Woche, S. K., & Helfrich, M. (2015). Does water repellency of pyrochars and hydrochars counter their positive effects on soil hydraulic properties? *Geoderma*, 245, 31-39.
- Hallett, P.D., White, N.A., & Ritz, K. (2006). Impact of basidiomycete fungi on the wettability of soil contaminated with a hydrophobic polycyclic aromatic hydrocarbon. *Biologia*, 61(19), S334-S338.
- Hewelke, E., Szatylowicz, J., Gnatowski, T., & Oleszczuk, R. (2020). Hydrophysical properties of sandy clay contaminated by oil. *Scientific Reports*, 10, 4147.
- Imeson, A.C., & Vis, M. (1990). The impact of water repellency on soil erosion processes. *Catena*, 18(2), 125–141.
- Islam, M.S., Ahmed, M.K., Raknuzzaman, M., Habibullah-Al-Mamun, M., & Masunaga, S. (2019). Heavy metal pollution in soils around oil refineries: Geochemical indices and ecological risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, 270–278.
- Khalili, K., Karimi, A., & Sharifi, F. (2018). Effect of petroleum contamination on hydrophobicity of soils: A case study from Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(5), 1023–1034.
- Li, J., Li, F., Liu, Q., & Zhang, Y. (2021). Chemical alterations in petroleum hydrocarbon-contaminated soils: Implications for remediation. *Chemosphere*, 270, 129–138.



19th Iranian Soil Science Congress

2-4 December, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران

۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴



۰۴۲۵۰-۲۲۰۳۱

مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



- Mata, C., Sánchez, J., & García, R. (2022). Hydrocarbon contamination induces soil water repellency and reduces water infiltration. *Journal of Hydrology*, 605, 127–179.
- Mirbabaei, S.M., Shahrestani, M. S., Zolfaghari, A., & Abkenar, K. T. (2013). Relationship between soil water repellency and some of soil properties in northern Iran. *Catena*, 108(1), 26-34.
- 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.
- Singh, T., Bhatiya, A., Mishra, P., & Srivastava, N. (2020). An effective approach for the degradation of phenolic waste: phenols and cresols. In *Abatement of Environmental Pollutants* (pp. 203-243): Elsevier.
- van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898.
- Vogelmann, E. S., Reichert, J. M., Reinert, D. J., Mentges, M. I., Vieira, D. A., de Barros, C. A. P., & Fasinmirin, J. T. (2010). Water repellency in soils of humid subtropical climate of Rio Grande do Sul, Brazil. *Soil and Tillage Research*, 110(1), 126-133.
- Zhang, R. (1997). Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 61(4), 1024–1030.
- Zhang, Z., Hou, Z., Yang, C., Ma, C., & Tao, F. (2020). Effects of petroleum hydrocarbon pollution on soil microbial communities: A review. *Journal of Environmental Management*, 258, 110–128.

The Impact of Petroleum Contamination on Hydraulic Properties and Water Retention Capacity of Soils in the Bandar Abbas Refinery Area

Touraj Asadi^{1*}, Payam Najafi², Elham Chavoshi², Mehran Houdaji²

1. PhD student in soil science, Islamic Azad University, Isfahan Branch, Isfahan, Iran.

2. Dept. of Soil Sci., College of Agric., Islamic Azad University Isfahan Branch, Isfahan, Iran.

* Corresponding Author, Email: tasadi@gmail.com

Petroleum contamination is a major environmental challenge in industrial soils, significantly altering their physical and hydraulic properties. This study investigated the effects of petroleum contamination on soil water repellency, permeability, field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), and plant available water (PAW) in soils surrounding the Bandar Abbas Oil Refinery, Iran. Soil samples with varying contamination levels were collected from the refinery's vicinity, and laboratory analyses, including soil water retention curves, hydraulic conductivity, and organic indices such as total organic carbon (TOC), were conducted. Results indicated that petroleum contamination significantly reduced FC at medium and high levels ($p < 0.05$), while its effect on PWP was not statistically significant at the 5% level. PAW was markedly decreased due to altered soil hydraulic properties. Correlation analysis confirmed a negative relationship between increased TOC and reductions in FC, PWP, and PAW. These changes, driven by the formation of hydrophobic hydrocarbon layers, reduce soil permeability and exacerbate plant moisture stress. The findings provide critical insights for environmental management, soil remediation, and agricultural planning in contaminated industrial regions.

Keywords: Petroleum contamination, Soil water repellency, Permeability, Field capacity, Plant available water, Bandar Abbas Refinery