

Research Article

Impact of Oil Contamination and Physical Weathering on Water Repellency and Hydraulic Properties of Sandy Loam and Clay Loam Soils

AMoradi ¹, M R Mosaddeghi ^{2*}, E Chavoshi ³, A Safadoust ⁴, M Soleimani ⁵

Received: January 24, 2023

Accepted: September 17, 2023

Revised: May 30, 2023

Published online: June 21, 2024

1-PhD Student, Dept. of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

2-Prof., Dept. of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

3-Assist. Prof., Dept. of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

4-Assist. Prof., Dept. of Soil Science, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan 65174, Iran

5-Assoc. Prof., Dept. of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran

*Corresponding Author, E-mail: mosaddeghi@iut.ac.ir

Abstract

Background and Objectives

Soil and groundwater contamination by petroleum hydrocarbons might cause negative environmental impacts. It may adversely affect soil physical conditions and quality such as hydraulic properties via raising soil water repellency. Soil structure is an important physical characteristic depending on pore size distribution and continuity, and it can affect several soil physical and chemical processes. Soil structure might be affected by physical weathering processes such as wetting/drying and freezing/thawing cycles. It is possible to reproduce the natural soil structure in the laboratory by imposing wetting/drying and freezing/thawing cycles on the repacked soil samples. This would minimize the possible changes in soil structure during core sampling from the field. Few studies have been conducted about the interactive effect of oil contamination, soil texture and structure on soil water repellency and hydraulic properties. The present study aims to investigate the interaction effects of crude oil application, soil texture and weathering-induced structure on soil water repellency and hydraulic properties.

Methodology

In this study, the effect of crude oil application and physical weathering on water repellency and hydraulic properties of two soils (sandy loam and clay loam) was studied in a factorial experiment of completely randomized design with three replicates. Soil samples were collected from 0–25 cm layer of agricultural lands in Chaharmahal-va-Bakhtiari province, central Iran (sandy loam and clay loam soils were located in 32° 43' N 51° 59' E and 32° 29' N 50° 42' E, respectively). The soil was ground and sieved through a 4-mm mesh to exclude the gravel particles and plant residues. Crude oil was solved in the n-hexane and added to soil with the concentrations of 0.5 and 1 %w/w of total petroleum hydrocarbons (TPHs). Besides, a control without crude oil addition was included in the experiment. The treated soils were then poured into stainless cylinders (height and diameter of 5 cm) and packed to natural bulk density of 1.45 and 1.43 g cm⁻³ for sandy loam and clay loam soils, respectively. Half of the prepared soil samples were tested immediately and named “repacked” treatment and the rest wetted and dried for five months under normal conditions in the greenhouse and was named “physical weathering” treatment. Thus, a total of 36 soil samples were prepared (2 soil types × 3 levels of water repellency × 2 weathering treatments × 3 replicates). Then, water repellency was determined by water drop penetration time (WDPT) on the treated soil cores. Soil water characteristic curve and saturated hydraulic conductivity (K_s) were measured on the soil cores and modeled by van Genuchten equation. Soil physical



quality indicators including field capacity (FC), permanent wilting point (PWP), available water content (AWC), macroporosity (Macro-P), mesoporosity (Meso-P), microporosity (Micro-P), and Dexter's index for soil physical quality (S_{Dexter}) were calculated as well.

Findings

The results showed that soil hydraulic properties were significantly affected by the experimental treatments. Water retention was greater in the clay loam soil compared to the sandy loam soil. Oil contamination reduced soil water retention at all matric suctions (0 to 15000 cm) due to oil-induced water repellency and soil resistance against wetting (as observed by an increment in WDPT). The effect of oil contamination on water retention was greater in the sandy loam soil than in the clay loam soil due to lower specific surface area of coarse-textured soils. The K_s , saturated water content (θ_s) and residual water content (θ_r) decreased, and scaling (α) and shape (n) parameters increased significantly due to oil-induced water repellency. The K_s of 1% TPHs-treated samples (i.e., 5.64 cm h⁻¹) was significantly lower than that of control (i.e., 7.98 cm h⁻¹). The θ_s and θ_r significantly decreased by 1% oil contamination (i.e., 0.457 and 0.112 cm³ cm⁻³) compared to the control (i.e., 0.547 and 0.122 cm³ cm⁻³), respectively. However, the parameters α and n were significantly greater in the 1% TPHs-treated samples (i.e., 0.240 cm⁻¹ and 1.56) compared to the control (i.e., 0.130 cm⁻¹ and 1.36), respectively. Physical weathering significantly increased θ_s . The K_s and Macro-P were significantly greater in the sandy loam soil whereas the Meso-P and Micro-P were significantly greater in the clay loam soil. The FC, PWP and AWC were significantly greater in the clay loam soil than in the sandy loam soil. The FC, PWP, Meso-P and Micro-P decreased but the Macro-P and S_{Dexter} increased in the oil-contaminated soil samples. The AWC significantly decreased from 0.084 (control) to 0.049 cm³ cm⁻³ due to 1% oil contamination. Physical weathering intensified the oil-induced water repellency (i.e., an increment in WDPT from 23.9 in repacked soil to 30.2 s in weathered soil), and reduced water retention in the sandy loam soil more than in the clay loam soil. The K_s , Macro-P and Micro-P were significantly greater in the weathered soil samples than in the repacked ones.

Conclusion

As coarse-textured soils with low specific surface area are more prone to water repellency compared to fine-textured soils, they became water-repellent quicker upon physical weathering. It seems that physical weathering stimulated soil structure formation and intensified the oil-induced water repellency. The findings of this study are important for the management of oil contamination in different soil (texture and structure) conditions.

Keywords: Scaling parameter, Shape parameter, Soil water characteristic curve, Soil water repellency, van Genuchten model

مقاله پژوهشی

تأثیر مواد نفتی و هواپدگی فیزیکی بر آب‌گریزی و ویژگی‌های هیدرولیکی دو خاک لوم شنی و لوم رسی

اعظم مرادی^۱، محمدرضا مصدقی^{۲*}، الهام چاوشی^۳، آزاده صفادوست^۴، محسن سلیمانی^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

۴- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۵- دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mosaddeghi@iut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش تأثیر مواد نفتی و هواپدگی فیزیکی بر آب‌گریزی و ویژگی‌های هیدرولیکی دو خاک لوم شنی و لوم رسی بررسی شد. خاک‌ها با سه سطح مواد نفتی (۰، ۰/۵ و ۱٪) و با دو شرایط ساختمانی خاک (دست‌خورده و هواپدیده فیزیکی) تیمار شدند. سپس آب‌گریزی خاک به روش زمان نفوذ قطره آب (WDPT)، و منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در تیمارهای آزمایشی اندازه‌گیری شد. داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی خاک با معادله ون‌گنوختن مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد به دلیل افزایش آب‌گریزی (WDPT) در اثر افزودن مواد نفتی، نگهداشت آب خاک کاهش یافت. با افزایش درجه آب‌گریزی خاک (ناشی از افزودن نفت)، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) (از مقدار ۷/۹۸ در شاهد به ۵/۶۴ cm h⁻¹ در تیمار ۱٪) و رطوبت اشباع (θ_s) (از مقدار ۰/۵۴۷ در شاهد به ۰/۴۵۷ cm³ cm⁻³ در تیمار ۱٪) و رطوبت باقی‌مانده (θ_r) (از مقدار ۰/۱۲۲ در شاهد به ۰/۱۱۲ cm³ cm⁻³ در تیمار ۱٪) کاهش معنی‌داری یافته و پارامترهای مقیاس (α) (از مقدار ۰/۱۳۰ در شاهد به ۰/۲۴۰ cm⁻¹ در تیمار ۱٪) و شکل (n) (از مقدار ۱/۳۶ در شاهد به ۱/۵۶ در تیمار ۱٪) افزایش معنی‌داری یافتند. هیدروکربن‌های نفتی سبب کاهش آب فراهم خاک برای گیاه (از مقدار ۰/۰۸۴ در شاهد به ۰/۰۴۹ cm³ cm⁻³ در تیمار ۱٪) شدند. درجه آب‌گریزی (WDPT) در خاک هواپدیده فیزیکی (۳۰/۲ s) نسبت به خاک دست‌خورده (۲۳/۹ s) به طور معنی‌داری بیشتر بود. نتایج این پژوهش در مدیریت خاک‌های آلوده به نفت در شرایط مختلف (بافت و ساختمان خاک) قابل استفاده خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: آب‌گریزی خاک، پارامتر شکل، پارامتر مقیاس، مدل ون‌گنوختن، منحنی مشخصه رطوبتی خاک

مقدمه

آگاهی از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک^۱ (SHP) برای بررسی مدل‌های جریان آب و املاح در خاک (پن و همکاران ۲۰۱۲) و بسیاری از برنامه‌های کاربردی در زمینه کشاورزی، هیدرولوژی، هواشناسی، اکولوژی و محیط زیست امری مهم به نظر می‌رسد (توماسلا و همکاران ۲۰۰۳؛ سیلرز و همکاران ۲۰۰۱). اگرچه ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، شامل منحنی مشخصه رطوبتی خاک^۱ (SWCC) و هدایت هیدرولیکی^۲ (HC)، در یک مقیاس کلان (درشت) تعریف می‌شوند (دورنر و فولهر ۲۰۰۵)، اما اغلب تحت‌تأثیر فرآیندهایی قرار می‌گیرند که در مقیاس منفذی^۳ رخ می‌دهند. یکی از پدیده‌هایی که در مقیاس ریز (منافذ)، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد، آب‌گریزی خاک^۴ (SWR) است که در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (لیو و همکاران ۲۰۱۲). آب‌گریزی خاک عواقب هیدرولوژیک و ژئومورفولوژیک قابل‌توجهی دارد که شامل کاهش نفوذپذیری خاک، کاهش فراهمی آب خاک برای گیاهان، تشدید فرسایش خاک، الگوهای ناهمگن مرطوب‌شدن و شست‌شوی سریع مواد شیمیایی کشاورزی در خاک است (دوئر و همکاران ۲۰۰۰). در کنار کاهش نفوذ آب به خاک، آب‌گریزی سبب ایجاد جریان‌های ترجیحی می‌شود. جریان‌های ترجیحی سبب افزایش خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی (ونگ و همکاران ۲۰۰۰؛ دوئر و همکاران ۲۰۰۷) و شست‌شوی مواد شیمیایی کشاورزی به لایه‌های زیرین خاک می‌شود.

در اغلب پژوهش‌ها، خاک‌های آب‌گریز واقعی (آب‌گریز بحرانی^۵ با زاویه تماس خاک-آب بیشتر از ۹۰ درجه) یا آب‌پذیر کامل (زاویه تماس خاک-آب برابر صفر) مورد بررسی قرار گرفته یا این‌گونه فرض شده

است. اما بسیاری از خاک‌های جهان نه آب‌گریز و نه آب-پذیر کامل هستند؛ برای چنین خاک‌هایی (با زاویه تماس خاک-آب بین ۰ تا ۹۰ درجه) که به عنوان خاک‌های با آب‌گریزی زیر-بحرانی^۶ نامیده می‌شوند، پژوهش‌های اندکی وجود دارد که به بررسی اثر آب‌گریزی بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک می‌پردازد. لم‌پارتر و همکاران (۲۰۰۶) دریافتند که برای یک خاک شنی با آب‌گریزی زیر-بحرانی، سرعت نفوذ آب ۱۷۰-۳ درصد در مقایسه با سرعت نفوذ الکل اتانول (که تحت‌تأثیر آب‌گریزی خاک قرار نمی‌گیرد)، کاهش یافت. این یافته‌ها پتانسیل تأثیرگذاری آب‌گریزی زیر-بحرانی بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک را نشان می‌دهد. مارین گارسیا و همکاران (۲۰۱۶) اثر نفت خام را بر آب‌گریزی خاک‌های رسی آبرفتی بررسی کرده و نشان دادند افزایش غلظت مواد نفتی، آب‌گریزی بیشتری را به دنبال دارد. رابطه مستقیمی بین کاهش رطوبت ظرفیت مزرعه و میزان آب-گریزی در خاک‌های آلوده به مواد نفتی گزارش شده است (آدمز و همکاران ۲۰۰۸).

کیفیت خاک برای ارزیابی میزان تخریب اراضی و تعیین نوع فعالیت‌های مدیریتی برای کاربری پایدار خاک، مهم است (دکستر^۷ ۲۰۰۴a). نفوذآبی کم خاک، ایجاد روان‌آب، سخت‌شوندگی، تهویه ضعیف و قابلیت ریشه-دوانی ضعیف در خاک بیانگر کیفیت فیزیکی ضعیف خاک است (دکستر ۲۰۰۴a). دکستر (۲۰۰۴a) با توجه به تأثیرپذیری شدید منحنی مشخصه رطوبتی از توزیع اندازه و آرایش منافذ خاک، نشان داد که شیب این منحنی در نقطه عطف (S_{Dexter}) می‌تواند منعکس‌کننده جنبه‌های مختلف کیفیت فیزیکی خاک مانند نفوذ، سخت‌شوندگی و فشرده‌گی خاک باشد. دکستر (۲۰۰۴b) بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده خاک در هفت کشور که مقادیر رس آنها بین ۴ تا ۷۳ درصد بود کلاس‌های زیر را برای شاخص

⁵ Critical water repellency

⁶ Subcritical water repellency

⁷ Dexter

¹ Soil water characteristic curve

² Hydraulic conductivity

³ Pore scale

⁴ Water repellency

هوا دیدگی فیزیکی با تشکیل خاکدانه سازی بیشتر، سطوح در دسترس خاک برای نگهداشت مواد نفتی و آلاینده‌ها را کاهش داد و جریان ترجیحی برمید و باکتری را تشدید کرد.

در ایران و هم‌چنین در بسیاری از کشورهای دیگر به دلیل نشت نفت از خطوط لوله‌های انتقال نفت و مخازن نگهداری آن‌ها، خاک اطراف پالایشگاه‌ها و معادن اکتشافی نفت دچار آلودگی‌های نفتی می‌شوند که پیامدهای مخربی بر محیط زیست به‌جای می‌گذارد. از مناطق کشاورزی آلوده به نفت در اطراف پالایشگاه‌ها می‌توان به فضای سبز شهرک بختیار دشت و شاهین شهر اصفهان (کرمان‌پور و همکاران ۲۰۱۵) و روستاهای دورسون‌آباد، عظیم‌آباد و اسماعیل‌آباد واقع در اطراف پالایشگاه تهران اشاره کرد.

(<https://newspaper.hamshahronline.ir/id/25501>)

ترکیبات نفتی شامل انواع مختلفی از هیدروکربن‌های آلیفاتیک و آروماتیک هستند، که به علت وجود ترکیبات آلی مختلف در ساختمان آن‌ها، باعث تغییر در برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها می‌گردند. یکی از این تغییرات مهم، ایجاد و تشدید آب‌گریزی خاک‌ها است. چون آب-گریزی سبب کاهش نگهداشت آب در خاک و افزایش پدیده پس‌ماند رطوبتی در خاک‌ها می‌گردد (دیامانتویولس و همکاران ۲۰۱۳) و می‌تواند سبب تأخیر در رشد گیاه و پیامدهای منفی بر محصولات کشاورزی شود (بلکول ۲۰۰۰). آلوده شدن خاک‌ها با آلاینده‌های نفتی به علت دارا بودن گروه‌های آب‌دوست و آب‌گریز مواد نفتی از جمله عوامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها است. از مهمترین نتایج این امر، مسدود شدن منافذ خاک‌ها، کاهش تهویه و نفوذ آب در خاک است (هابرت و همکاران ۲۰۱۵). هیدروکربن‌های نفتی با تحت تأثیر قرار دادن فضای بین خاکدانه‌ها سبب تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها و شکل و شیب منحنی مشخصه رطوبتی می‌شوند (روی و مک‌گیل ۲۰۰۰).

کیفیت فیزیکی خاک پیشنهاد کرد: $S_{Dexter} < 0.02$ خیلی ضعیف، $0.02 < S_{Dexter} < 0.035$ ضعیف و $0.035 < S_{Dexter}$ خوب. با وجود دامنه وسیع درصد رس در بررسی‌های دکستر، برخی از خاک‌های شنی ممکن است از طبقه‌بندی فوق مستثنی باشند. بنابراین شاخص S_{Dexter} می‌تواند به عنوان یک ابزار ارزشمند برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک مورد استفاده قرار گیرد (دکستر ۲۰۰۴b). برای محاسبه سریع شاخص S_{Dexter} نیاز به یک مدل منحنی مشخصه رطوبتی خاک دارای نقطه عطف است.

ساختمان خاک یک ویژگی فیزیکی مهم است که به پیوستگی و توزیع اندازه منافذ خاک بستگی دارد (کی و آنجرز ۱۹۹۹). ساختمان خاک به عنوان یک ویژگی پویا، می‌تواند تحت تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن^۱ قرار گیرد (پاگلیای و همکاران ۱۹۹۸). پژوهش‌ها نشان داده است که چرخه‌های تر و خشک شدن و یخ شدن و ذوب شدن سبب ایجاد تغییرات در مقاومت، چسبندگی ذرات، مقاومت مکانیکی خاکدانه‌ها و توزیع اندازه منافذ خاک می‌شوند (نیومن و توماسسون ۱۹۷۹). هوا دیدگی ستون‌های خاک (تر و خشک شدن، یخ شدن و ذوب شدن و فعالیت بیولوژیک) سبب شکل‌گیری ساختمان طبیعی در خاک خواهد شد. در فرآیند تر و خشک شدن، یخ شدن و ذوب شدن، منافذ خاک با آب پر شده و ذرات خاک به‌طور تغییرناپذیری دوباره در کنار یکدیگر چیده می‌شوند (نیومن و توماسسون ۱۹۷۹). صفادوست و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که تغییرات فیزیکی و بیولوژیک خاک (تر و خشک شدن، یخ شدن و ذوب شدن و فعالیت کرم‌های خاکی) در بازسازی ساختمان خاک تأثیر مثبت داشت. به این صورت که چرخه‌های تر و خشک شدن و یخ زدن تدریجی آب در منافذ، باعث فشردگی و چسبندگی ذرات خاک به یکدیگر و تشکیل خاکدانه‌ها شد. در واقع این فرآیندها با ایجاد درز و ترک و منافذ درشت سبب افزایش گسترده‌تری توزیع اندازه منافذ و رطوبت اشباع در خاک‌ها گردید. مرادی و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان دادند

¹ Drying and wetting

به روش هیدرومتر^۴ (جی و باوئر ۱۹۸۶)، ماده آلی خاک (SOM) به روش اکسیداسیون تر (والکی و بلک ۱۹۳۴)، pH خاک در عصاره اشباع خاک، به وسیله دستگاه pHسنج (توماس ۱۹۹۶)، رسانایی الکتریکی عصاره اشباع (EC_e) با دستگاه رسانایی سنج (رودس ۱۹۹۶)، مقدار کربنات کلسیم معادل (CCE) خاک‌ها به روش تیتراسیون برگشتی (پیچ و همکاران ۱۹۸۶) و گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات آمونیوم اندازه‌گیری شد (راول ۱۹۹۴). میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها^۵ (MWD) به روش الک تر اندازه‌گیری شد (یودر ۱۹۳۶).

آماده‌سازی خاک و اعمال تیمارهای آزمایشی

در این پژوهش تأثیر کاربرد نفت خام و هوادیدگی فیزیکی بر آب‌گریزی و ویژگی‌ها و پارامترهای هیدرولیکی دو خاک با بافت‌های لوم شنی و لوم رسی بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار بررسی شد. به منظور جداسازی ذرات درشت و کلوخه‌ها، نمونه‌های خاک از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شد. سپس خاک به روشی که در ادامه توضیح داده شده است، آب‌گریز شد. برای اعمال تیمار نفتی، نفت خام (در سطوح ۰، ۰/۵ و ۱ درصد) با حلال n-هگزان^۵ رقیق شد (برای این کار به ترتیب ۰، ۰/۵ و ۱ گرم نفت خام در ۱۰۰ میلی‌لیتر n-هگزان حل شد) و با مقدار مشخص خاک، کاملاً به صورت یکنواخت مخلوط گردید. سپس نمونه‌های خاک در سیلندرهای استیل با قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر ریخته شد و به ترتیب به مقادیر چگالی ظاهری طبیعی برابر ۱/۴۳ و ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک‌های CL و SL رسانده شد. وضعیت ساختمان خاک شامل بازسازی شده و هوادیده فیزیکی نیز به عنوان تیمار آزمایشی در نظر گرفته شد.

با توجه به این‌که کشور ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد، خطر تشکیل پدیده‌ی آب‌گریزی و به دنبال آن پیامدهای منفی این پدیده در کشاورزی و آلودگی محیط زیست جانداران، دارای اهمیت بیشتری است زیرا شدت تغییرات آب‌گریزی خاک در اقلیم‌های خشک و بیابانی به مراتب بیشتر از اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب است. اگرچه این پدیده در مناطق بیابانی با تأثیر بر کاهش تبخیر از سطح خاک، در رابطه با حفظ و ذخیره آب در خاک می‌تواند مفید باشد (دکر و جانگریوس ۱۹۹۰). بنابراین ضرورت دارد تأثیر آب‌گریزی ناشی از آلاینده‌های نفتی بر توابع نگهداشت آب و هدایت هیدرولیکی خاک‌ها مورد توجه قرار گیرد. لذا در پژوهش حاضر تأثیر آب‌گریزی ناشی از نفت خام بر ویژگی‌ها و پارامترهای هیدرولیکی خاک مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک

دو خاک با بافت لوم رسی (CL) و لوم شنی (SL) به ترتیب تحت کشت گندم و درختان میوه در زمان مناسب از نظر میزان رطوبت خاک، از زمین‌های کشاورزی منطقه سامان واقع در استان چهارمحال و بختیاری برداشت شد. برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده از لایه رویین (صفر تا ۲۵ سانتی‌متر) برداشته شد.

چگالی ظاهری^۱ خاک (ρ_b) با برداشت نمونه‌های دست‌خورده به روش نمونه‌برداری سیلندرهای استیل با قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر و چگالی حقیقی^۲ خاک (ρ_s) به روش پیکنومتری بر روی نمونه‌های خاک دست‌خورده اندازه‌گیری شد. بافت خاک (درصد ذرات اولیه شن، سیلت و رس)

⁴ Mean weight diameter

⁵ n-Hexane

¹ Bulk density

² Real density

³ Hydrometer method

منحنی مشخصه رطوبتی خاک، $\theta(h)$ ، با استفاده از دستگاه جعبه شن^۳ برای مکش‌های ماتریک کمتر از ۱۰۰ سانتی‌متر (۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۸۰ سانتی‌متر) (کلمنت، ۱۹۶۶) و دستگاه صفحات فشاری^۴ برای مکش‌های ماتریک ۱۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر (۱۰۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر) (کلوت ۱۹۸۶) روی استوانه‌های خاک اندازه‌گیری شد. داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی خاک به‌دست آمده با مدل ون‌گنوختن (ون‌گنوختن ۱۹۸۰) برازش داده شد:

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot (1 + |\alpha h|^n)^{1/n-1} \quad [1]$$

که در آن θ_r و θ_s به ترتیب مقادیر رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، α پارامتر مقیاس مرتبط با عکس مکش ماتریک در نقطه عطف (cm^{-1})، و n پارامتر شکل مرتبط با توزیع اندازه منافذ خاک است (سیلرز و همکاران ۲۰۰۱). پارامترهای هیدرولیکی (θ_s ، θ_r ، n ، α) با برازش مدل ون‌گنوختن بر داده‌های منحنی رطوبتی توسط ابزار Excel Solver بدست آمد. با استفاده از داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی خاک، توزیع اندازه منافذ خاک، مقدار آب فراهم (AWC)، رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) و رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) محاسبه شد. تفاوت رطوبت حجمی در حالت اشباع با رطوبت حجمی در مکش ماتریک ۱۰ سانتی‌متر (مکش نظیر اندازه منافذ ۳۰۰ میکرون و بزرگ‌تر) نشان‌دهنده تخلخل (منافذ) درشت (Macro-P)، با رطوبت حجمی در مکش‌های ماتریک ۱۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر (مکش نظیر اندازه منافذ ۳۰۰ تا ۳۰ میکرون) نشان‌دهنده تخلخل میانه (Meso-P) و با رطوبت حجمی در مکش ماتریک ۱۰۰ سانتی‌متر (مکش نظیر اندازه منافذ ۳۰ میکرون و کوچکتر) نشان‌دهنده تخلخل ریز (Micro-P) هستند (بلک ۱۹۸۶). برای محاسبه رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)، رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) و مقدار آب فراهم (AWC) خاک نیز از داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی خاک استفاده شد. به این

نیمی از استوانه‌های خاک که بازسازی-شده^۱ (R) نام داشتند بلافاصله پس از اعمال تیمار نفتی مورد آزمایش قرار گرفتند. نیم دیگر استوانه‌های خاک پس از اعمال هوا دیدگی فیزیکی^۲ (PW) بررسی شدند. برای اعمال هوا دیدگی فیزیکی، استوانه‌های خاک به گلخانه (با دمای حدود ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۶۰-۵۰ درصد) منتقل شده و به مدت ۵ ماه تحت‌تأثیر چرخه‌های تر و خشک‌شدن قرار گرفتند. برای این منظور استوانه‌های خاک از زیر اشباع شده (تر شدن) و در ادامه به مدت ۷ تا ۱۴ روز به طور طبیعی خشک شدند. در کل ۳۶ سیلندر آزمایشی آماده‌سازی شد که ۱۸ سیلندر تحت‌تأثیر هوا دیدگی فیزیکی قرار گرفت و بقیه بدون هوا دیدگی مورد بررسی قرار گرفتند. سپس ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع به روش‌های زیر اندازه‌گیری شدند.

اندازه‌گیری آب‌گریزی خاک

در این پژوهش برای اندازه‌گیری آب‌گریزی خاک روی نمونه‌های خاک تیمار شده، از آزمون زمان نفوذ قطره آب (WDPT) استفاده شد. در روش WDPT، تعداد ۶ قطره آب مقطر به صورت تصادفی بر روی سطح صاف نمونه خاک با استفاده از قطره چکان پزشکی قرار داده شد (کریستینا و همکاران ۲۰۱۳). سپس زمان نفوذ قطره آب به درون خاک برای هر قطره ثبت شد و میانگین هندسی آنها به عنوان WDPT برای هر نمونه در نظر گرفته شد.

اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک

³ Sand box

⁴ Pressure plate

¹ Repacked

² Physical weathering

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی.

MWD	EC _e	pH	CEC	SOM	CCE	رس	سیل ت	شن	بافت خاک
mm	dS m ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹			kg 100 kg ⁻¹			
۰/۱۲	۰/۷	۸/۱	۳۶/۴	۱/۰۷	۱۵/۵	۱۸/۸	۱۱/۴	۶۹/۸	لوم شنی
۰/۸۱	۱/۴	۸/۴	۵۰/۸	۱/۵۸	۱۹/۶۲	۳۵/۳	۳۰/۳	۳۴/۴	لوم رسی

^۱ CCE, SOM, CEC, EC_e و MWD به ترتیب بیانگر کربنات کلسیم معادل، ماده آلی، گنجایش تبادل کاتیونی، رسانایی الکتریکی عصاره اشباع و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها است.

طرح آماری به کار رفته در این پژوهش، بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار بود. کاربرد نفت خام به عنوان تیمار اول (سه سطح ۰، ۰/۵ و ۱ درصد)، نوع خاک به عنوان تیمار دوم (لوم شنی و لوم رسی) و وضعیت ساختمان خاک به عنوان تیمار سوم (بازسازی شده و هوادیدگی فیزیکی) در نظر گرفته شدند. متغیرهای مورد بررسی شامل هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، تخلخل درشت (Macro-P) (منافذ با قطر موثر بزرگتر از ۳۰۰ میکرون)، منافذ میانه (Meso-P) (منافذ با قطر موثر ۳۰ تا ۳۰۰ میکرون)، منافذ ریز (Micro-P) (منافذ با قطر موثر کوچکتر از ۳۰ میکرون)، رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)، رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP)، مقدار آب فراهم (AWC)، پارامترهای هیدرولیکی خاک (θ_s و θ_r ، n و α) و شاخص کیفیت فیزیکی خاک (S_{Dexter}) بودند. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم-افزار SAS^۱ و مقایسه میانگین‌ها به روش LSD انجام گرفت.

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. دو خاک مورد بررسی آهکی بود ولی درصد ماده آلی و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های خاک لوم رسی بیشتر از خاک لوم شنی

صورت که مقدار رطوبت خاک در مکش‌های ماتریک ۳۳۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر FC و PWP در نظر گرفته شد. AWC با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد (کرکهام ۲۰۰۵):

$$AWC = FC - PWP \quad [۲]$$

شاخص کیفیت فیزیکی خاک پیشنهادی دکستر (S_{Dexter}) به کمک پارامترهای ون‌گنوختن (۱۹۸۰) و با معادله زیر محاسبه شد (دکستر ۲۰۰۴a):

$$S_{Dexter} = -n(\theta_s - \theta_r) \left[\frac{2n-1}{n-1} \right]^{\frac{1}{n}-2} \quad [۳]$$

پس از اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی، هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s) استوانه‌های خاک اندازه-گیری شد. در این روش پس از برقراردن جریان ماندگار، حجم آب خروجی از سطح مقطع نمونه در واحد زمان اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از قانون دارسی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به صورت زیر محاسبه شد:

$$J_w = \frac{Q}{A} = -K_s \frac{\Delta H}{L} \quad [۴]$$

در این رابطه J_w شدت جریان آب در خاک (cm h^{-1})، Q حجم آب عبوری در واحد زمان ($\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$)، A سطح مقطع جریان (cm^2)، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (cm h^{-1})، L طول مسیر جریان (cm)، ΔH اختلاف پتانسیل هیدرولیکی (cm) و $\frac{\Delta H}{L}$ شیب هیدرولیکی است (لال و شوکلا ۲۰۰۴)

۵- تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

دست‌خورده به طور معنی‌داری بیش‌تر بود ($P < 0.05$). این یافته را می‌توان به وجود پوشش‌های هیدروکربنی آب‌گریز روی خاکدانه‌ها و در فضای بین‌خاکدانه‌ای خاک‌های هوادیده نسبت داد، که سبب جلوگیری از نفوذ آب به خاک و در نتیجه تشدید آب‌گریزی خاک می‌شود (گوبل و همکاران ۲۰۱۱). با افزایش مواد نفتی از صفر تا ۱ درصد، WDPT به طور معنی‌داری افزایش یافته است ($P < 0.05$) (جدول ۴). کرمانپور و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان دادند که با افزایش غلظت هیدروکربن‌های نفتی، شاخص آب‌گریزی افزایش می‌یابد. در این روش اگر زمان نفوذ قطره آب کمتر از ۵ ثانیه باشد، خاک آب‌دوست، بین ۵-۶۰ ثانیه خاک نسبتاً آب‌گریز، بین ۶۰-۶۰۰ ثانیه خاک آب‌گریز و بین ۶۰۰ تا ۳۶۰۰ ثانیه به شدت آب‌گریز هستند (دبانو ۱۹۸۱). بر اساس این تعریف خاک‌های لوم رسی دست‌خورده و هوادیده فیزیکی در سطوح ۰/۵ و ۱ درصد نفت خام و خاک‌های لوم شنی دست‌خورده و هوادیده

بود. همچنین خاک‌های مورد بررسی خنثی تا قلیایی و غیرشور بودند.

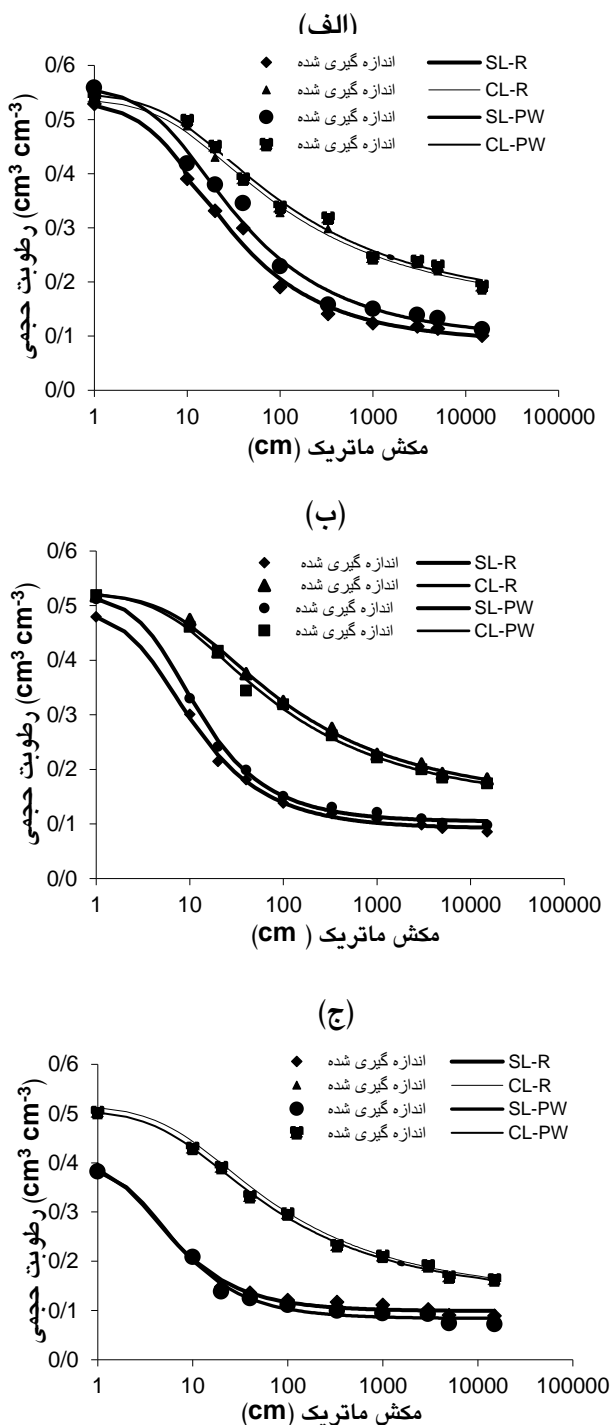
تأثیر تیمارهای آزمایشی بر آب‌گریزی خاک

منابع تغییر و مقایسه میانگین آثار بافت خاک، درصد مواد نفتی، برهم‌کنش بافت خاک \times درصد مواد نفتی، برهم‌کنش ساختمان خاک \times درصد مواد نفتی و برهم‌کنش بافت \times ساختمان خاک بر درجه آب‌گریزی خاک (WDPT) به ترتیب در جداول ۲ و ۴ آورده شده است. مشاهده می‌شود آثار بافت خاک، درصد مواد نفتی، برهم‌کنش بافت خاک \times درصد مواد نفتی، برهم‌کنش ساختمان خاک \times درصد مواد نفتی و برهم‌کنش بافت \times ساختمان خاک بر WDPT در سطوح آماری ۱ و ۵ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۲). مقادیر WDPT در خاک لوم شنی نسبت به خاک لوم رسی به طور معنی‌داری بیش‌تر بود ($P < 0.05$) که بیان‌گر تأثیر متفاوت نفت خام بر آب‌گریزی خاک‌های با بافت متفاوت است. همچنین WDPT در خاک هوادیده فیزیکی نسبت به خاک

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات، MS) برای زمان نفوذ قطره آب (WDPT) و پارامترهای برآزش‌یافته مدل ون‌گنوختن شامل رطوبت باقی‌مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s)، پارامتر مقیاس (α) و پارامتر شکل (n).

n	α	θ_s	θ_r	WDPT	درجه آزادی	منابع تغییرات
۱/۰۵**	۰/۱۰۴**	۰/۰۲۵**	۰/۰۲۳**	۷۰۲/۹۳** ^۱	۱	بافت خاک (T)
۰/۱۳**	۰/۰۳۷**	۰/۰۲۴**	۰/۰۰۰۳**	۱۲۷۰۸/۳۶**	۲	درصد مواد نفتی (O)
۰/۰۰۱ ^{NS}	۰/۰۰۰۸ ^{NS}	۰/۰۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰۰ ^{NS}	۳۵۴/۳۰۵**	۱	ساختمان خاک (S)
۰/۰۰۷۴**	۰/۰۲۴**	۰/۰۰۸۴**	۰/۰۰۰۱**	۲۷۸/۴۸**	۲	T \times O
۰/۰۰۰۱ ^{NS}	۰/۰۰۰۲*	۰/۰۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰۰ ^{NS}	۴۸/۶۹*	۱	T \times S
۰/۰۰۰۴**	۰/۰۰۰۹ ^{NS}	۰/۰۰۰۸**	۰/۰۰۰۲**	۹۲/۴۷**	۲	O \times S
۰/۰۰۰۶**	۰/۰۰۰۱ ^{NS}	۰/۰۰۰۳**	۰/۰۰۰۰ ^{NS}	۱۳/۸۵ ^{NS}	۲	T \times O \times S
					۲۴	خطای آزمایش

^۱ NS، * و ** به ترتیب بیان‌گر اثر غیرمعنی‌دار و اثر معنی‌دار در سطوح آماری ۱ و ۵ درصد است.



شکل ۱- نمونه‌هایی از منحنی مشخصه رطوبتی خاک اندازه‌گیری شده (نقاط) و برآورد شده بر اساس مدل ون-گنوختن (ممتد) برای دو بافت (SL): لوم شنی و (CL): لوم رسی) و دو ساختمان خاک (R): دست‌خورده و (PW): هوادیده فیزیکی) با سطوح مواد نفتی صفر درصد (الف)، ۰/۵ درصد (ب) و ۱ درصد وزنی (ج).

فیزیکی با سطح ۰/۵ درصد نفت خام، در گروه نسبتاً آب-گریز و خاک‌های لوم شنی دست‌خورده و هوادیده فیزیکی با سطح ۱ درصد نفت خام، در گروه آب‌گریز قرار گرفتند.

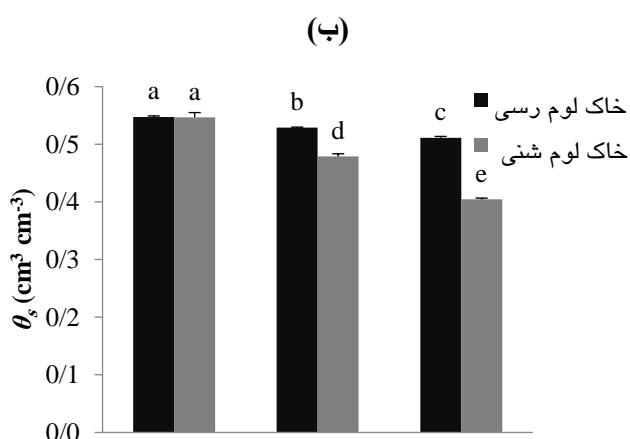
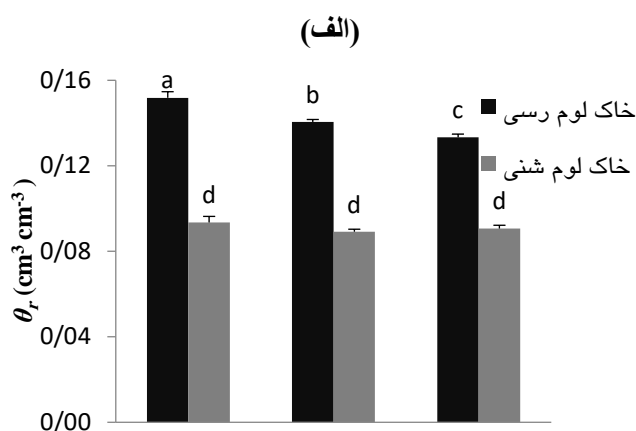
تأثیر تیمارهای آزمایشی بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک

شکل ۱ منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک را در تیمارهای مختلف در دامنه مکش ماتریک ۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد. به طور کلی با افزایش آب‌گریزی خاک، میزان نگهداشت آب در خاک در تمامی مکش‌های ماتریک کاهش یافت که علت آن را می‌توان به نقش مؤثر ترکیبات آب‌گریز بر افزایش مقاومت خاک در برابر مرطوب‌شدن و پایداری خاکدانه‌ها در برابر جذب آب نسبت داد. در واقع یکی از پیامدهای مثبت آب‌گریزی، افزایش پایداری خاکدانه‌های خاک است.

هیدروکربن‌های نفتی، ترکیبات حلقوی با وزن مولکولی زیاد هستند که به آسانی در آب حل نمی‌شوند و با ذرات معدنی خاک، تشکیل کمپلکس‌های پایدار می‌دهند. کرمان‌پور و همکاران (۲۰۱۵) نیز نشان دادند ترکیبات هیدروکربنی با ایجاد آب‌گریزی به پایداری ساختمان خاک کمک می‌کنند. این مواد با ایجاد پوشش‌های هیدروکربنی آب‌گریز روی سطح خاکدانه‌ها از ورود آب به درون آنها جلوگیری کرده و اثر هوای محبوس در شکستن خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. آرسنگا و همکاران (۲۰۰۸) نیز دریافتند که حضور پوشش‌های آب‌گریز روی سطح خاکدانه‌ها پایداری آنها را افزایش داد. هولکه و گوزدوفسکی (۲۰۲۰) گزارش کردند افزایش آلودگی هیدروکربن‌های نفتی سبب کاهش میزان نگهداشت آب در خاک‌های شنی و رسی شد. این عامل پیامدهای مخربی شامل افزایش روان‌آب سطحی، تسریع فرسایش خاک و انتقال آلاینده‌ها به آب‌های سطحی و زیرزمینی را به همراه داشت.

میزان نگهداشت آب در خاک لوم رسی نسبت به خاک لوم شنی بیشتر بود (شکل ۱). پژوهش‌ها نشان

کاهش حجم منافذ خاک و کاهش توان جذب آب توسط خاکدانه‌ها نسبت داد. پژوهش‌های کرمان‌پور و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان داد، افزایش غلظت ترکیبات پلی-هیدروکربنی سبب کاهش سرعت جذب آب و افزایش پایداری ساختمان خاک شد. همچنین θ_r و θ_s در خاک لوم رسی نسبت به خاک لوم شنی در سطح آماری ۵ درصد بیشتر بود (شکل ۲، الف و ب) که این عامل نشان-دهنده تأثیر مثبت رس در نگهداشت آب، بهبود ساختمان خاک و شکل‌گیری منافذ است (آنک و گاوس ۲۰۰۳).



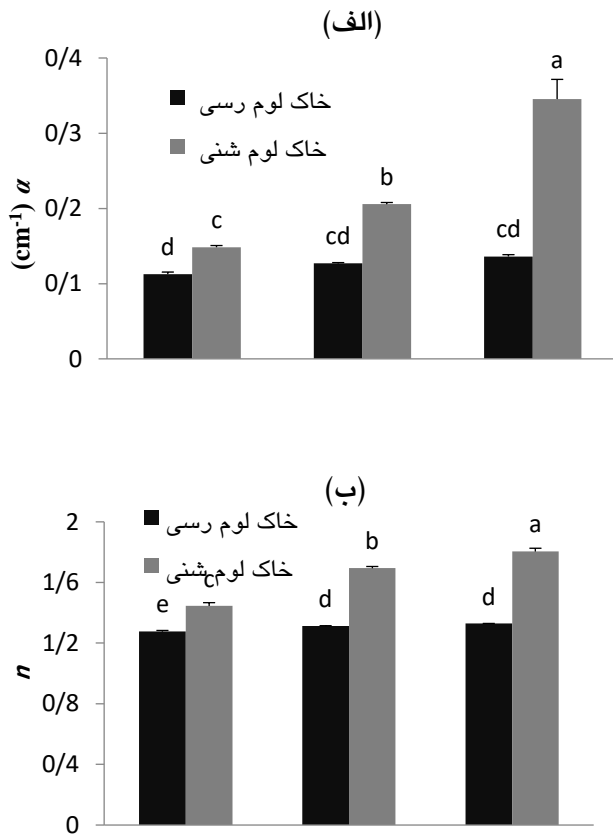
شکل ۲- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش بافت خاک × درصد مواد نفتی بر رطوبت باقی‌مانده (θ_r) (الف) و رطوبت اشباع خاک (θ_s) (ب)؛ حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD است.

داده است که با افزایش مقدار رس، قدرت نگهداشت آب خاک افزایش می‌یابد (کلوتیر ۲۰۰۴). همچنین میزان نگهداشت آب در خاک هوادیده آب‌گریز نسبت به خاک دست‌خورده کمتر بود (شکل ۱ الف، ب و ج). به نظر می‌رسد هوادیدگی با افزایش خاکدانه‌سازی، سبب کاهش سطوح در دسترس خاک برای جذب مواد آب‌گریز و افزایش مقاومت خاک در برابر جذب آب می‌شود. پژوهش‌های کرمان‌پور و مصدقی (۲۰۱۴) نیز نشان داد استفاده از آب آلوده به هیدروکربن‌های نفتی پس از چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن (هوادیدگی فیزیکی)، سبب افزایش شدت آب‌گریزی خاک شد که به دلیل تغییر آرایش و چیدمان هیدروکربن‌های آب‌گریز در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی است.

تأثیر تیمارهای آزمایشی بر پارامترها و ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

منابع تغییر و تأثیر آنها بر پارامترهای مدل ون-گنوختن شامل مقدار رطوبت باقی‌مانده (θ_r)، رطوبت اشباع (θ_s) و پارامترهای α و m در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود آثار بافت خاک، درصد مواد نفتی، برهم‌کنش بافت خاک × درصد مواد نفتی و برهم‌کنش ساختمان خاک × درصد مواد نفتی بر پارامترهای مدل ون‌گنوختن در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شد. در این میان تنها اثر برهم‌کنش ساختمان خاک × درصد مواد نفتی بر پارامتر α در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار نشد. همچنین اثر برهم‌کنش بافت × ساختمان خاک تنها بر پارامتر α در سطح آماری ۵ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۲).

در شکل ۲ مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش بافت خاک × درصد مواد نفتی بر θ_r (الف) و θ_s (ب) نشان داده شده است. با افزایش سطح کاربرد مواد آب‌گریز نفتی، مقدار رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع در هر دو نوع بافت خاک کاهش یافته است. این یافته را می‌توان به تأثیر پوشش‌های هیدروکربنی آب‌گریز بر



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش بافت خاک × درصد مواد نفتی بر پارامتر مقیاس (α) (الف) و پارامتر شکل (n) (ب)؛ حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD است.

افزایش سهم ذرات درشت و به تبع آن منافذ درشت خاک، افزایش می‌یابد. یافته‌های این پژوهش با نتایج رحیم‌خانی (۲۰۱۲) همخوانی دارد که با افزایش درجه آب‌گریزی، پارامتر n افزایش یافت. افزایش پارامتر n در خاک لوم شنی آب‌گریز نسبت به خاک لوم رسی آب‌گریز شدیدتر بود که می‌تواند به دلیل سطح ویژه کم خاک‌های شنی و حساسیت بیشتر آن‌ها نسبت به آب‌گریزی باشد. نورمهنداد و همکاران (۲۰۱۳) منحنی مشخصه رطوبتی و پارامترهای مدل ون‌گونوختن در خاک‌های آب‌گریز و گرماده‌ی شده را بررسی کردند. آن‌ها کم‌ترین مقدار رطوبت اشباع در خاک‌های گرماده‌ی شده را به افزایش

پژوهش‌های صفادوست و همکاران (۲۰۱۲) نیز نشان داد که با افزایش رس، میزان رطوبت نگهداری شده در منافذ ریز خاک افزایش یافت. مقدار رطوبت باقی‌مانده در خاک لوم شنی بین تیمار شاهد (صفر درصد) و تیمارهای آب‌گریز نفتی (۰/۵ و ۱ درصد وزنی) تفاوت معنی‌داری نداشت. ولی مقدار رطوبت باقی‌مانده در خاک لوم رسی بین تیمار شاهد و تیمارهای آب‌گریز نفتی تفاوت معنی‌داری داشت (شکل ۲، الف) به طوری‌که مقادیر آنها در خاک آب‌گریز نسبت به شاهد به طور معنی‌داری کاهش یافته است ($P < 0.05$). دلیل این نتیجه را می‌توان به عدم ورود آب به منافذ ریز یا تخریب آنها در خاک‌های آب‌گریز نسبت داد. رطوبت اشباع نیز با افزایش آب‌گریزی خاک در خاک لوم شنی نسبت به لوم رسی کاهش بیشتری یافته است ($P < 0.05$) (شکل ۲، ب). این یافته می‌تواند به سطح ویژه کم خاک‌های شنی نسبت داده شود که سبب آب‌گریزی شدیدتر و در نتیجه مقاومت بیشتر منافذ خاک‌های آب‌گریز در برابر جذب آب شده است.

در شکل ۳ مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش بافت خاک × درصد مواد نفتی بر پارامترهای α (الف) و n (ب) ارائه شده است. با افزایش سطوح مواد نفتی، مقدار پارامتر α به طور معنی‌داری در هر دو نوع بافت خاک در سطح آماری ۵ درصد افزایش یافته است (شکل ۳، الف). آلودگی نفتی به دلیل کاهش حجم منافذ ریز پر از آب (تخلخل ریز)، سبب افزایش مقدار پارامتر α شده که به مفهوم آزادسازی آب خاک در مکش‌های ماتریک کم است. باترز و همکاران (۲۰۰۰) نیز بیان کردند مکش ورود هوا در خاک‌های غیرآب‌گریز و آب‌گریز متفاوت است. همچنین افزایش پارامتر α در خاک لوم شنی با افزایش آب‌گریزی (کاربرد مواد نفتی) نسبت به خاک لوم رسی شدیدتر است. علت این پدیده، سطح ویژه کم خاک‌های شنی و آب‌گریزتر بودن آن‌ها است. پارامتر n نیز در تیمارهای آب‌گریز دارای بیش‌ترین مقدار بود. بنابراین آب‌گریزی خاک باعث افزایش پارامتر n شد. پارامتر n با

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات، MS) برای هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، تخلخل درشت (Macro-P)، منافذ میانه (Meso-P)، منافذ ریز (Micro-P)، رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)، رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP)، مقدار آب فراهم (AWC) و شاخص کیفیت فیزیکی خاک پیشنهادی دکستر (S_{Dexter}).

S_{Dexter}	AWC	PWP	FC	Micro-P	Meso-P	Macro-P	K_s	درجه آزادی	منابع تغییرات
۰/۰۱۵**	۰/۰۳۱**	۰/۰۷۱**	۰/۱۹۹**	۰/۲۴۵**	۰/۰۰۴ ^{NS}	۰/۰۹۱**	۲۰۸/۸**	۱	بافت خاک (T)
۰/۰۰۰**	۰/۰۰۳**	۰/۰۰۲**	۰/۰۱۳**	۰/۰۱۳**	۰/۰۲۳ ^{NS}	۰/۰۰۳**	۱۴/۴**	۲	درصد مواد نفتی (O)
۰/۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰**	۰/۰۱۰ ^{NS}	۰/۰۰۰**	۸۶/۴**	۱	ساختمان خاک (S)
۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۱**	۰/۰۰۳**	۰/۰۰۷ ^{NS}	۰/۰۰۰۱**	۱۴/۴**	۲	T × O
۰/۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۷ ^{NS}	۰/۰۰۰ ^{NS}	۳/۶*	۱	T × S
۰/۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰**	۰/۰۰۰۸**	۰/۰۰۰۸ ^{NS}	۰/۰۰۰ ^{NS}	۳۲/۴**	۲	O × S
۰/۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰ ^{NS}	۰/۰۰۰۳**	۰/۰۰۷ ^{NS}	۰/۰۰۰ ^{NS}	۱۰/۸**	۲	T × O × S
								۲۴	خطای آزمایش

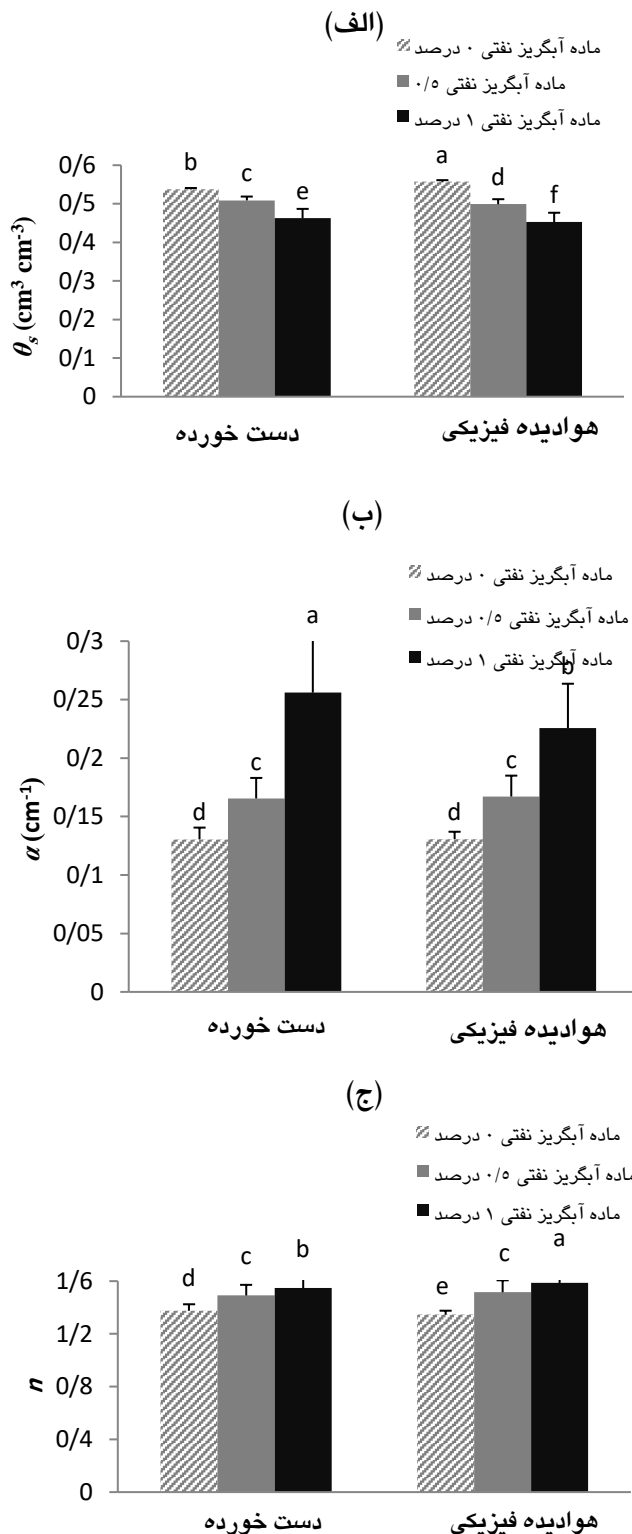
دارای n کوچکتری نسبت به خاک لوم شنی است (شکل ۳). سیلرز و همکاران (۲۰۰۱) نیز مقدار n کوچکتری را برای خاک‌های رسی گزارش کردند.

در شکل ۴ مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش ساختمان خاک × درصد مواد نفتی بر θ_s (الف) و α (ب) نشان داده شده است. فرآیندهای هوا دیدگی فیزیکی با ایجاد درز و ترک و منافذ درشت سبب افزایش معنی‌دار θ_s در خاک‌های غیرآب‌گریز شد (شکل ۴، الف). مقدار θ_s در خاک هوادیده آب‌گریز نسبت به خاک دست‌خورده کمتر است. به نظر می‌رسد هوا دیدگی با تقویت خاکدانه-سازی سبب کاهش سطوح در دسترس خاک برای جذب مواد آب‌گریز و افزایش مقاومت خاک در برابر جذب آب شده است. فرآیند هوا دیدگی به طور معنی‌داری سبب کاهش مقدار α در خاک‌های آب‌گریز شد که می‌توان به تشکیل ساختمان خاک در اثر پدیده هوا دیدگی فیزیکی (افزایش تخلخل ریز خاک هوادیده نسبت به خاک دست-خورده) خاک نسبت داد.

منابع تغییر و تأثیر برهم‌کنش آنها بر شاخص‌های مختلف کیفیت فیزیکی خاک در جدول ۳ ارائه شده است.

نرات هم‌اندازه شن (درشت)، از بین رفتن مواد آلی و تشکیل خاکستر در اثر گرمادهی خاک آب‌گریز ارتباط دادند.

تغییر پارامتر α سبب جابه‌جایی افقی منحنی مشخصه رطوبتی خاک (در امتداد محور مکش ماتریک) می‌شود (سیلرز و همکاران ۲۰۰۱). به طور کلی مقدار α در خاک‌های رسی کوچکتر از خاک‌های شنی است (شکل ۳). در واقع در خاک‌های رسی نیروهای مؤئینه مهم بوده که این عامل سبب افزایش مکش ماتریک خاک شده و α (پارامتر مرتبط با عکس مکش ماتریک خاک) کوچک است در صورتی که در خاک‌های شنی نیروهای مؤئینه ضعیف بوده، سبب کاهش مکش ماتریک خاک و افزایش مقدار α می‌شود. پارامتر n بستگی به توزیع اندازه منافذ دارد و هر چه منافذ خاک یکنواخت‌تر باشند، پارامتر n بزرگتر است (سیلرز و همکاران ۲۰۰۱). پژوهش‌های صفادوست و همکاران (۲۰۱۲) نیز نشان داد با تشکیل ساختمان خاک طی اعمال تیمارها و ایجاد توزیع گسترده‌ای از منافذ در خاک، مقدار n کاهش یافته است. همچنین در مقایسه بافت‌های خاک، خاک لوم رسی



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر برهم‌کنش ساختمان خاک × درصد مواد نفتی بر مقدار رطوبت اشباع خاک (θ_s) (الف)، پارامتر مقیاس (α) (ب) و پارامتر شکل (n) (ج)؛ حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD

همان‌طور که دیده می‌شود آثار بافت خاک، درصد مواد نفتی و برهم‌کنش بافت خاک × درصد مواد نفتی بر متغیرهای K_S ، Macro-P، Micro-P، FC، PWP، AWC و S_{Dexter} در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شده است. اثر ساختمان خاک بر متغیرهای K_S ، Macro-P، Micro-P و S_{Dexter} در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شده است. اثر برهم‌کنش بافت × ساختمان خاک بر متغیرهای K_S ، Macro-P، Micro-P، FC و PWP در سطح آماری ۱ درصد معنی‌دار شده است. اثر برهم‌کنش ساختمان خاک × درصد مواد نفتی بر متغیرهای K_S ، Micro، FC، PWP و AWC در سطوح آماری ۱ و ۵ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۳).

در جدول ۴ مقایسه میانگین اثر تیمارهای بافت خاک، ساختمان خاک و درصد مواد نفتی بر متغیرهای K_S ، Macro-P، Meso-P، Micro-P، FC، PWP، AWC و S_{Dexter} نشان داده شده است. مقادیر K_S و Macro-P در خاک لوم شنی نسبت به لوم رسی به طور معنی‌داری بیشتر بود. مقدار Meso-P بین دو خاک لوم رسی و لوم شنی تفاوت معنی‌داری نداشت ولی مقدار Micro-P در خاک لوم رسی نسبت به خاک لوم شنی در سطح آماری ۵ درصد بیشتر بود (جدول ۴). علت این یافته‌ها فراوانی تخلخل ریز در خاک لوم رسی، تأثیر مثبت رس در فرآیند تشکیل منافذ خاک و ساختمان خاک می‌تواند باشد (آنک و گاوس ۲۰۰۳). مقادیر FC، PWP و AWC در خاک لوم رسی نسبت به خاک لوم شنی به طور معنی‌داری بیشتر بود ($P < 0.05$) (جدول ۴). علت آن تأثیر مثبت رس در فرآیند تشکیل ساختمان خاک است (آنک و گاوس ۲۰۰۳). به عبارت دیگر تخلخل درشت در خاک لوم شنی سبب می‌شود با افزایش مکش ماتریک، به سرعت رطوبت خاک تخلیه شده و آب فراهم برای گیاه کاهش یابد. از آنجایی که افزایش تخلخل درشت در خاک لوم شنی بر زهکشی و هدایت هیدرولیکی خاک مؤثر است، می‌تواند مقدار آب فراهم را در این بافت خاک کاهش دهد. صفادوست و همکاران (۲۰۱۲) نیز نشان دادند که آثار اعمال تیمارهای

کلی با افزایش درصد مواد نفتی، K_s ، FC، PWP و AWC کاهش معنی‌داری یافت ($P < 0.05$) (جدول ۴). علت این یافته را می‌توان به نقش ترکیبات آب‌گریز در کاهش رطوبت اشباع خاک و تا حدودی به مسدود شدن منافذ ریز خاک در انتقال آب نسبت داد. به عبارت دیگر هرچند مواد نفتی سبب افزایش فراوانی منافذ درشت شد ولی اثر آب‌گریزی مواد نفتی و کاهش رطوبت اشباع و نفوذپذیری آبی خاک‌های آب‌گریز، در نهایت سبب کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع خاک شده است.

افزایش فراوانی منافذ درشت در خاک‌های آب-گریز، رطوبت ظرفیت مزرعه خاک را کاهش داد. همچنین دسترسی کم به منافذ ریز خاک برای جذب آب، رطوبت ظرفیت مزرعه خاک را کاهش داد. مقدار PWP نیز تابع تخلخل ریز و آب جذب سطحی شده خاک است. آب-گریزی با کاهش دامنه رطوبتی FC تا PWP، سبب کاهش آب فراهم خاک (AWC) شد (جدول ۴). ذوالفقاری و همکاران (۲۰۰۸) بیان کردند که آب‌گریزی خاک سبب کاهش فراهمی آب برای گیاهان و افزایش روان آب می‌شود. کرمانپور (۲۰۱۴) نیز گزارش کرد آلودگی نفتی سبب کاهش معنی‌دار AWC شد.

شاخص کیفیت فیزیکی خاک پیشنهادی دکستر (S_{Dexter}) در خاک‌های آب‌گریز (سطوح ۰/۵ و ۱ درصد مواد نفتی) نسبت به خاک غیر آب‌گریز (بدون افزودن مواد نفتی) به طور معنی‌داری افزایش یافته است ($P < 0.05$). یافته‌ها نشان می‌دهد که هر چند S_{Dexter} با آلودگی نفتی افزایش یافته است ولی آب قابل استفاده کاهش یافته است (جدول ۴). بنابراین S_{Dexter} همواره شاخص جامع و کامل برای بیان کیفیت فیزیکی خاک نمی‌تواند باشد.

آزمایشی (فیزیکی و بیولوژیک) بر ویژگی‌های هیدرولیکی در خاک لوم رسی شدیدتر از خاک لوم شنی بود که بیانگر تأثیر مثبت رس بر خاکدانه‌سازی و ایجاد منافذ است. میانگین میانگین مقادیر S_{Dexter} در خاک لوم شنی نسبت به لوم رسی بیشتر بود. خاک لوم شنی با افزایش مکش ماتریک، سریع‌تر آب خود را از دست می‌دهد که به مفهوم شاخص S_{Dexter} بیشتر این خاک نسبت به خاک لوم رسی است (جدول ۴).

مقادیر K_s ، Macro-P و Micro-P در خاک هوادیده نسبت به خاک دست‌خورده به طور معنی‌داری بیشتر بود ($P < 0.05$). هوادیدگی فیزیکی با تأثیر بر ساختمان‌سازی خاک سبب افزایش فراوانی منافذ درشت و ریز خاک شده است (جدول ۴). مقادیر FC، PWP، AWC و S_{Dexter} بین خاک هوادیده فیزیکی و خاک دست‌خورده تفاوت معنی‌داری نداشتند (جدول ۴).

با افزایش سطوح مواد نفتی از صفر تا ۱ درصد، فراوانی تخلخل درشت به طور معنی‌داری افزایش یافت ($P < 0.05$) (جدول ۴). کرمانپور و همکاران (۲۰۱۴) نیز گزارش کرد در حضور هیدروکربن‌های نفتی در خاک، تخلخل درشت خاک افزایش یافت. با افزایش مواد نفتی از ۰/۵ تا ۱ درصد، فراوانی تخلخل میانه خاک در سطح آماری ۵ درصد کاهش یافته است. کراوکا و رولدان (۲۰۰۳) گزارش کردند در حضور هیدروکربن‌های نفتی، بسیاری از منافذ متوسط خاک دارای مورفولوژی کشیده شده و به منافذ درشت تبدیل می‌شوند. همچنین آنها با بررسی میکرومورفولوژیک منافذ، دریافتند آلودگی نفتی با ایجاد شکاف‌هایی در خاک به تشکیل مسیرهای ترجیحی کمک می‌کند. همچنین با افزایش درصد مواد نفتی، فراوانی تخلخل ریز به طور معنی‌داری کاهش یافته است (جدول ۴). به طور کلی آب‌گریزی سبب افزایش Macro-P و کاهش Meso-P و Micro-P شده است. به طور

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر تیمارهای بافت و ساختمان خاک و درصد مواد نفتی بر شاخص‌های هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)، تخلخل درشت (Macro-P)، تخلخل میانه (Meso-P)، تخلخل ریز (Micro-P)، رطوبت ظرفیت مزرعه (FC)، رطوبت نقطه پژمرستگی دائم (PWP)، مقدار آب فراهم (AWC) و شاخص کیفیت فیزیکی خاک (S_{Dexter}).

S_{Dexter}	AWC	PWP	FC	Micro-P	Meso-P	Macro-P	K_s	WDPT	تیمار
-	----- $cm^3 cm^{-3}$ -----						$cm h^{-1}$	s	
بافت خاک									
-/۰.۶۴ ^b	-/۰.۹۴ ^a	-/۱۷۸ ^a	-/۲۷۳ ^a	-/۳۱۷ ^a	-/۱۷۵ ^a	-/۰.۶- ^b	۴/۳۲ ^b	۲۲/۷ ^b	CL
-/۱.۰۶ ^a	-/۰.۳۵ ^b	-/۰.۸۹ ^b	-/۱۲۵ ^b	-/۱۵۱ ^b	-/۱۵۳ ^a	-/۱.۶- ^a	۹/۱۲ ^a	۳۱/۵ ^a	SL
-/۰.۰۱۱	-/۰.۰۱۸	-/۰.۰۳۳	-/۰.۰۴۲	-/۰.۰۱۷	-/۰.۶۱۲	-/۰.۰۲	-/۷۲	۲/۳	LSD/۵
ساختمان خاک									
-/۰.۸۵ ^a	-/۰.۶۵ ^a	-/۱۳۵ ^a	-/۲۰۰ ^a	-/۲۳۳ ^b	-/۱۸۱ ^a	-/۱.۰- ^b	۵/۱۶ ^b	۲۳/۹ ^b	R
-/۰.۸۶ ^a	-/۰.۶۵ ^a	-/۱۳۳ ^a	-/۱۹۸ ^a	-/۲۳۵ ^a	-/۱۴۷ ^a	-/۱.۱- ^a	۸/۲۸ ^a	۳۰/۲ ^a	PW
-/۰.۰۱۱	-/۰.۰۱۸	-/۰.۰۳۳	-/۰.۰۴۲	-/۰.۰۱۷	-/۰.۶۱	-/۰.۰۲	-/۷۲	۲/۳	LSD/۵
درصد مواد نفتی (O)									
-/۰.۸۱ ^c	-/۰.۸۴ ^a	-/۱۵۱ ^a	-/۲۳۵ ^a	-/۲۷۱ ^a	-/۱۷۸ ^{ab}	-/۰.۹- ^c	۷/۹۸ ^a	۱/۵ ^c	۰
-/۰.۹- ^a	-/۰.۶- ^b	-/۱۳- ^b	-/۱۹۱ ^b	-/۲۲۵ ^b	-/۱۹۹ ^a	-/۱.۱۳ ^b	۶/۶- ^b	۱۶/۷ ^b	۰/۵
-/۰.۸۵ ^b	-/۰.۴۹ ^c	-/۱۲- ^c	-/۱۷- ^c	-/۲۰۸ ^c	-/۱۱۴ ^b	-/۱.۲۴ ^a	۵/۶۴ ^c	۶۳/۵ ^a	۱
-/۰.۰۱۴	-/۰.۰۲۱	-/۰.۰۴۴	-/۰.۰۵۱	-/۰.۰۰۲	-/۰.۷۵	-/۰.۰۲۴	-/۸۴	۲/۹	LSD/۵

۱. CL و SL به ترتیب نشان‌دهنده بافت لوم رسی و لوم شنی است.

۲. R و PW به ترتیب نشان‌دهنده خاک دست‌خورده و هوادیده فیزیکی است.

۳. در هر گروه حروف مشترک بیان‌گر نبود تفاوت معنی‌دار بین میانگین‌ها در سطح آماری ۵ درصد بر اساس آزمون LSD است.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش تأثیر کاربرد مواد نفتی و هوادیدگی فیزیکی بر ویژگی‌های هیدرولیکی دو خاک با بافت‌های لوم شنی و لوم رسی بررسی شد. آب‌گریزی خاک‌ها به شدت تحت تأثیر بافت و ساختمان خاک و برهم‌کنش آنها قرار گرفت، به طوری‌که خاک‌های شنی نسبت به خاک‌های رسی به دلیل سطح ویژه کم، بیش‌تر

مستعد آب‌گریزی ناشی از مواد نفتی بودند. اعمال چرخه‌های تر و خشک‌شدن (هوادیدگی فیزیکی) خاک‌ها به دلیل ساختمان‌سازی، اثر چشم‌گیری بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک داشته و سبب تشدید آب-گریزی خاک شد. هیدروکربن‌های نفتی سبب تغییر معنی‌دار ویژگی‌های هیدرولیکی خاک (منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک) و پارامترهای مدل

درشت داشته و با تغییر توزیع اندازه منافذ، نگهداشت آب در خاک را کاهش داده است. نتایج این پژوهش در مدیریت خاک‌های آلوده به نفت در شرایط مختلف (بافت و ساختمان خاک) قابل استفاده خواهد بود.

ون‌گنوختن شده و از این طریق آب فراهم خاک برای گیاه را کاهش داده است. هیدروکربن‌های نفتی، به‌رغم افزایش شاخص کیفیت فیزیکی خاک پیشنهادی دکستر، سبب کاهش معنی‌دار آب فراهم خاک برای گیاه شدند. به طور کلی مواد نفتی در خاک بیش‌ترین تأثیر را بر تخلخل

منابع مورد استفاده

- Adams RH, Osorio FG and Cruz JZ, 2008. Water repellency in oil contaminated sandy and clayey soils. *International Journal of Environmental Science and Technology* 5: 445–454.
- Arcenegui V, Mataix-Solera J, Gueuero C, Zomoza R, Malaix-Beneyto J and Garcia-Orenes F, 2008. Intermediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils. *Catena* 74: 219–226.
- Bauters TWJ, Steenhuis TS, Dicarlo DA, Nieber JL, Dekker LW, Ritsema CJ, Parlange JY and Haverkamp R 2000. Physics of water repellent soils. *Journal of Hydrology* 231-232 : 233–243.
- Black GR, 1986. Bulk density. Pp. 374–380 In: Klute A, (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Agronomy Monograph 9, 2nd Ed., Madison, WI.
- Blackwell PS, 2000. Management of water repellency in Australia, and risks associated with preferential flow, pesticide concentration and leaching. *Journal of Hydrology* 231–232: 384–395.
- Caravaca F and Roldan A, 2003. Assessing changes in physical and biological properties in a soil contaminated by oil sludges under semiarid Mediterranean conditions. *Geoderma* 117: 53–61.
- Clement CR, 1966. A simple and reliable tension table. *Soil Science* 17: 133–135.
- Clothier BE, 2004. Soil pores. Pp. 693–699 In: Chesworth W, (Ed.) *Encyclopaedia of Soil Science*. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- DeBano FL, 1981. *Water Repellent Soils: A State of the Art*. US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical, Report (PSW-46).
- Dekker LW and Jungerius PD, 1990. Water repellency in the dunes with special reference to The Netherlands. *Catena* 18: 173–183.
- Dexter AR, 2004a. Soil physical quality. Part I: Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201–214.
- Dexter AR, 2004b. Soil physical quality. Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma* 120: 227–239.
- Diamantopoulos E, Durner W, Reszkowska A and Bachmann J. 2013. Effect of soil water repellency on soil Hydraulic properties estimated under dynamic conditions. *Journal of Hydrology* 486: 175–186.
- Doerr SH, Ritsema CJ, Dekker LW, Scott DF and Carter D, 2007. Water repellence of soils: new insights and emerging research needs. *Hydrological Processes* 21: 2223–2228.
- Doerr SH, Shakesby RA and Walsh RPD, 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogeomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51(1–4): 33–65.
- Durner W and Flüehler H, 2005. Soil hydraulic properties. Pp. 1089–1102 In: Anderson. MG, McDonnell J, (Eds.) *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Gee GW and Bauder JW, 1986. Particles size analysis. Pp. 383–411 In: Klute A, (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Agronomy Monograph 9, 2nd Ed., Madison, WI.
- Goebel MO, Bachmann J, Reichstein M and Janssens IA, 2011. Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition- is there a link to extreme climatic events? *Global Change Biology* 17: 2640–2656.
- Hewelke E and Gozdowski D, 2020. Hydrophysical properties of sandy clay contaminated by petroleum hydrocarbon. *Environmental Science and Pollution Research* 27: 9697–9706.

- Hubbert KR, Busse M, Overby S, Shestak C and Gerrard R, 2015. Pile burning effects on soil water repellency, infiltration, and downslope water chemistry in the Lake Tahoe Basin, USA. *Fire Ecology*. 11: 100–118.
- Kay BD and Angers DA, 1999. Soil structure. Pp: A229–A276 In: *Handbook of Soil Science*. Chapter 7. CRC Press, Boca Raton, pp: A229–A276.
- Kermanpour M, 2014. Effect of petroleum on soil hydraulic properties, available water and water repellency in Bakhtiardasht, Isfahan. Master's Thesis in Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Persian with English abstract)
- Kermanpour M and Mosaddeghi MR, 2014. Effect of petroleum pollution of water and soil on the stability and intensity of soil water repellency in Bakhtiardasht Plain. *Journal of Soil Management* 3(1): 51–43. (In Persian with English abstract)
- Kermanpour M, Mosaddeghi MR, Afyuni M and Hجاباسی MA, 2015. Effect of petroleum pollution on soil water repellency and structural stability in Bakhtiardasht Plain, Isfahan. *Journal of Agricultural Sciences and Techniques and Natural Resources, Water and Soil Sciences* 19(73): 139–149. (In Persian with English abstract)
- Kirkham MB, 2005. *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Elsevier Academic Press, 500 pp.
- Klute A, 1986. Water retention: laboratory methods. Pp. 635–662 In: Klute A, (Ed.) *Method of Soil Analysis*. Part 1: Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Agronomy Monograph 9, 2nd Ed., Madison, WI.
- Lal R and Shukla, MK, 2004. *Principles of Soil Physics*. Marcel Dekker, USA.
- Lamparter A, Deurer M, Bachmann J and Duijnsveld WHM, 2006. Effect of subcritical hydrophobicity in a sandy soil on water infiltration and mobile water content. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169: 38–46.
- Liu H, Ju Z, Bachmann J, Horton R and Ren T, 2012. Moisture-dependent wettability of artificial hydrophobic soils and its relevance for soil water desorption curves. *Soil Science Society of America Journal* 76: 342–349.
- Moradi A, Mosaddeghi MR, Chavoshi E, Safadoust A and Soleimani M, 2019. Effect of crude oil-induced water repellency on transport of *Escherichia coli* and bromide through repacked and physically weathered soil columns. *Environmental Pollution* 255: 113230.
- Marín-García DC, Adams RH and Hernández-Barajas R, 2016. Effect of crude petroleum on water repellency in a clayey alluvial soil. *International Journal of Environmental Science and Technology* 13: 55–64.
- Newman ACD, and Thomasson AJ, 1979. Rothamsted studies of soil structure. III. Pore size distributions and shrinkage processes. *Journal of Soil Science* 30: 415–439.
- Nourmahnad N, Tabatabaei SH, Nouri Imamzadei MH and Ghorbani Dashtaki Sh, 2013. Determining the moisture curve and parameters of the Van Gnuochten equation in hydrophilic and hydrophobic soils due to heat. *Soil and Water Sciences* 27 (4): 573-582. (In Persian with English abstract)
- Page AL, Miller RH and Keeney DR, 1986. *Methods of soil Analysis*. Part 2: Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Agronomy Monograph 9, 2nd Ed., Madison, WI.
- Pagliai M, Rousseva S, Vignozzi N, Piovaneli C, Pellegrini S and Miclaus N, 1998. Tillage impact on soil quality – I. Soil porosity and related physical properties. *Italian Journal of Agronomy* 2: 11–20.
- Pan F, Pachepsky Y, Jacques D, Guber A and Hill RL, 2012. Data assimilation with soil water content sensors and pedotransfer functions in soil water flow modeling. *Soil Science Society of America Journal* 76(3): 829–844.
- Rahimkhani Y, 2012. Efficiency of moisture curve measured with pressure plate device for simulating water movement in hydrophobic soil. Master's Thesis. Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Iran. (In Persian with English abstract)
- Rhoades JD, 1996. Salinity electrical conductivity and total dissolved solid. Pp: 417–436 In: Page, AL, Somner, CE and Nelson PW, (Eds.) *Methods of Soil Analysis*. Part 3: Chemical Methods. American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Agronomy Monograph 9, 2nd Ed., Madison, WI.
- Rowell DL, 1994. *Soil Science: Methods and Applications*. Longman Group, Harlow, 345 pp.
- Roy J L and McGill WB, 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(4): 595–606.

- Safadoust A, Mosaddeghi MR, Mahboubi AA and Yousefi G, 2012. Effects of wetting/drying, freezing/thawing and earth worm activities on soil hydraulic properties. *Water and Soil Journal* 26(2): 340–348. (In Persian with English abstract)
- Sillers WM, Fredlund DG and Zakerzadeh N, 2001. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curves models. *Geotech. Geotechnical and Geological Engineering* 19: 243–283.
- Thomas GW, 1996. Soil pH and soil acidity. Pp: 475–490 In: Page, AL, Somner, CE and Nelson PW, (Eds.) *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Agronomy Monograph 9, 2nd Ed., Madison, WI.*
- Tomasella J, Pachepsky Y, Crestana S and Rawls WJ, 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of America Journal* 67: 1085–1092.
- Unc A and Goss MJ, 2003. Movement of faecal bacteria through the vadose zone. *Water, Air and Soil Pollution* 149: 327–337.
- van Genuchten MTh, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892–898.
- Walkly A and Black IA, 1934. An examination of digestion method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Science* 37: 29–38.
- Wang Z, Wu QJ, Wu L, Ritsema CJ, Dekker LW and Feyen J, 2000. Effects of soil water repellency on infiltration rate and flow instability. *Journal of Hydrology* 231–232: 265–276.
- Yoder RE, 1936. A direct method of aggregate analysis and study of physical nature of erosion losses. *Journal of American Society of Agronomy* 28: 337–351.
- Zolfaghari AA and Hajabbasi MA, 2008. The effects of land use change on physical properties and water repellency of soils in Lordegan forest and Freidunshar pasture. *Water and Soil Journal* 22: 252–262. (In Persian with English abstract)