

تأثیر کاربرد لجن فاضلاب شهری بر آب‌گریزی و منحنی رطوبتی خاک

نگار نورمهناد^{۱*}، سید حسن طباطبائی^۲، محمد رضا نوری امامزاده‌ای^۳، شجاع قربانی دشتکی^۴، عبدالرحیم هوشمند^۵

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۲/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۷/۰۶

^۱ استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران

^۲ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

^۴ دانشیار گروه خاکشناسی، دانشگاه شهرکرد

^۵ دانشیار گروه آبیاری و زهکشی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Negar_Nourmahnad@yahoo.com

چکیده

لجن فاضلاب مقدار نسبتاً زیادی نمک و مواد آلی دارد که بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق اثر افزودن لجن فاضلاب شهری بر آب‌گریزی و نقاط مهم منحنی رطوبتی خاک بررسی گردید. به این منظور از خاک با بافت لوم رسی استفاده شد که این خاک از منطقه‌ای در مجاورت تصفیه‌خانه فاضلاب فولادشهر- اصفهان برداشت شد و مقادیر مختلفی (۲۵، ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد) از لجن تصفیه‌خانه فاضلاب شهری به آن اضافه شده به این ترتیب تیمارهای S25%، S50%، S65%، S80% به دست آمدند و با تیمار شاهد (بدون لجن فاضلاب S0) مقایسه شدند. حدوداً ۵۰ روز بعد از افزودن لجن آب‌گریزی آن‌ها با استفاده از روش نفوذ قطره آب (WDPT) و مولاریته محلول اتانول (MED) تعیین شد. با افزودن مقادیر فوق درجات آب‌گریزی اندک تا شدید در خاک ایجاد شد. منحنی رطوبتی تیمارها توسط دستگاه غشاء نایلونی فشار و دستگاه جعبه ماسه‌ای تعیین شد، سپس با استفاده از نرم‌افزار SAS8 و آزمون فیشر اثر لجن فاضلاب بر پارامترهای معادله ون گنوختن مشخص شد. نتایج نشان داد که بین زمان نفوذ آب در خاک در مقیاس لگاریتم (Log (WDPT) و مقدار ماده آلی همبستگی مثبت و خطی وجود دارد. به علاوه بین مقادیر MED و WDPT در آزمایش‌های آب‌گریزی نیز رابطه‌ای خطی با ضریب تبیین $R^2 = 0.95$ مشاهده شد. بیشترین میزان θ_s در تیمار آب‌گریز با ۸۰ درصد لجن فاضلاب و کمترین میزان θ_s در خاک آب‌دوست مشاهده شد. علت این موضوع احتمالاً بافت لوم رسی و مواد آلی کمتر در خاک آب‌دوست و مواد آلی بالاتر در خاک آب‌گریز S80% است. میزان رطوبت باقیمانده θ_r در تیمار آب‌گریز S80% نسبت به سایر تیمارها کمتر بود درحالی‌که تیمار آب‌دوست S0 رطوبت باقیمانده بیشتری داشت. پارامتر α در تیمارهای S65% و S80% بیشتر از سایر تیمارها با درجه آب‌گریزی اندک بود که نشانه دامنه کوچک‌تری از ورود هوا به خاک هست. مقدار n با افزایش ماده آلی در تیمار S25% و S50% نسبت به مقدار آن در S0 افزایش، اما در تیمارهای S65% و S80% کاهش یافت. این موضوع می‌تواند به دلیل درجه آب‌گریزی بالاتر و وجود مواد آب‌گریز در سطح ذرات خاک در تیمارهای S65% و S80% باشد. بنابراین شاید آب‌گریزی شدید بر روی این پارامتر نیز تأثیر گذاشته و سبب کاهش آن شود. همچنین خاک‌های آب‌گریز، آب ثقیلی و آب قابل‌استفاده بیشتری نسبت به خاک آب‌دوست اولیه داشتند.

واژه‌های کلیدی: آب ثقیلی، آب قابل‌استفاده، معادله ون گنوختن، مواد آلی

Effect of Urban Sewage Sludge Application on Soil Water Repellency and Water Retention Curve

N Nourmahnad^{1*}, SH Tabatabaei², MR Nouri Emamzade³, Sh Ghorbani Dashtaki⁴, AR Hoshmand⁵

Received: 21 May 2013 Accepted: 28 September 2014

¹- Assist. Prof., Dept. of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran

²- Assoc. Prof., Dept. of Water Engin, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

³- Assoc. Prof., Dept. of Water Engin, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

⁴- Assoc. Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

⁵- Assoc. Prof., Dept. of Water Engin, Faculty of Water Engin, University of Shahid Chamran, Ahvaz, Iran

*Corresponding Author, Email: Negar_Nourmahnad@yahoo.com

Abstract

Sewage sludge contains relatively high amounts of salts and organic matters which may affect the physical and chemical characteristics of soil. In this study the effects of adding the urban sewage sludge on soil water repellency and water retention curve were investigated. A clay loam soil was picked up from Foadshar, Isfahan, a region at the vicinity of a sewage treatment system. Different amounts of urban sewage sludge (25, 50, 65 and 80 percent) were added to the soil and designated by S25%, S50%, S65% and S80%. Then water repellency of them was determined by means of water drop penetration time (WDPT) and molarity of aqueous ethanol (MED), after 50 days of incubation. Sludge addition resulted in low to severe water repellency of the soil samples. The water retention curves were determined by means of the pressure membrane and sand box apparatuses. Finally, sewage sludge effects on van Genuchten equation's parameters were assessed by using SAS8 software and Fisher test. There was a linear and positive correlation between the logarithmic values of WDPT and organic matter quantities. Furthermore, a linear regression was established between the values WDPT and MED with $R^2=0.95$. The S80% treatment had higher Θ_s , while S0 had lower Θ_s , because of higher organic matter in S80% and lower organic matter and clay loam texture of S0. The residual water content in S80% was lower than those in the other treatments and the maximum of Θ_r was observed in S0. The parameter α was higher in S65% and S80% than those in the other treatments with slight water repellency which showed lower air entry value of the soil. The parameter n increased by increasing the organic matter in S25% and S50% rather than that in S0, but it decreased in S65% and S80%. This could be due to existence of higher water repellency and hydrophobic material on the surface of soil particles in S65% and S80% than those in the S25% and S50%. So intensive water repellency perhaps affected the parameter n and caused it to reduce it. Also water repellent soils had higher gravitational and available water than those in the primary wettable soil.

Keywords: Available water, Gravitational water, Organic matter, Van Genuchten equation

طبق تعریف مقاومت خاک به مرطوب شدن برای

دوره‌های زمانی چنددقیقه‌ای، چندساعته و حتی بالاتر

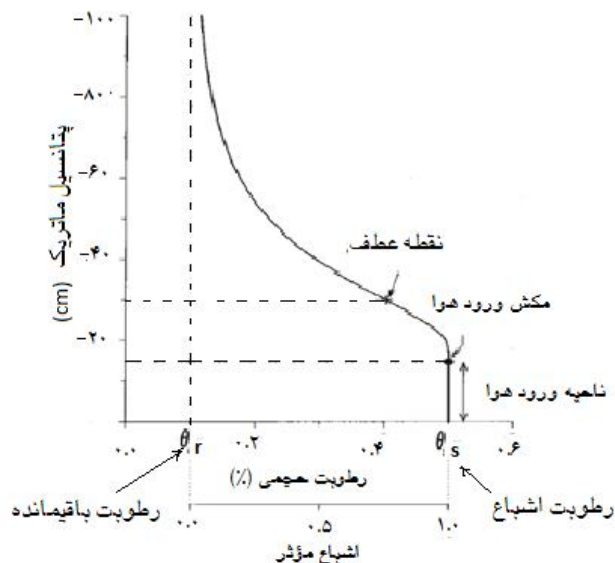
مقدمه

می‌کند، منحنی مشخصه رطوبتی خاک بوده که در بسیاری از پژوهش‌ها به‌عنوان اطلاعات پایه مورد استفاده قرار می‌گیرد (خداوردی لو و همکاران ۱۳۸۳). شکل منحنی مشخصه رطوبتی سیگموئیدی است (بای-بوردی ۱۳۶۸). شماتیکی از این منحنی در شکل ۱ آمده است.

را آب‌گریزی^۱ خاک گویند (ذوالفقاری و حاج عباسی ۱۳۸۷). مفهوم آب‌گریزی در خاک‌ها اولین بار توسط اسپرینر و شور (۱۹۱۰) بیان شد. آنان دریافتند برخی خاک‌های کالیفرنیا نمی‌توانند مرطوب شوند و بنابراین برای کشاورزی مناسب نیستند (دبانو ۱۹۸۱). در مناطق مختلفی از جهان خاک‌های آب‌گریز وجود دارد. پدیده خشک و مرطوب شدن فصلی به تشدید آب‌گریزی خاک کمک می‌کند (اعلامنش و همکاران ۱۳۸۶). عموماً خاک‌های خشک به‌راحتی آب را جذب می‌کنند. یک جاذبه قوی بین مواد معدنی خاک و آب وجود دارد اما در همه خاک‌ها این ویژگی دیده نمی‌شود. این تفاوت در رفتار مرطوب شدن در منحنی‌های نفوذ خاک‌های آب‌دوست و آب‌گریز قابل‌مشاهده است. در یک خاک آب‌دوست سرعت اولیه جذب آب زیاد است، زیرا ذرات خاک خشک و آب زیادی را جذب می‌کنند؛ اما زمانی که خاک مرطوب می‌شود، گرادیان هیدرولیکی و شدت نفوذ کاهش می‌یابد. در صورتی که یک خاک آب‌گریز خشک در برابر نفوذ آب مقاومت زیادی از خود نشان می‌دهد و سرعت نفوذ اولیه آن بسیار کم است (دبانو ۱۹۸۱). درجه اندکی از آب‌گریزی برای پایداری ساختمان خاک (تیسدال و اودز ۱۹۸۲)، تراکم خاک (هالت و یانگ ۱۹۹۹)، بهبود ظرفیت ذخیره آب در خاک (کوبایاشی و شیمیزو ۲۰۰۷) و جلوگیری از پراکندگی و فرسایش (الیس و همکاران ۲۰۰۵) اهمیت دارد. آب‌گریزی شدید به‌رحال اثرات منفی بر نفوذ (والیس و همکاران ۱۹۹۳)، نگهداری آب (دبانو ۱۹۸۱)، فرسایش آبی (الیس و همکاران ۲۰۰۵) و جلوگیری از جوانه‌زنی بذر (اوسبورن و همکاران ۱۹۶۷) دارد.

رابطه میان پتانسیل ماتریک و رطوبت خاک را منحنی رطوبتی یا منحنی مشخصه آب خاک می‌نامند. در حقیقت بخش غیراشباع خاک اهمیتی فراوان در چرخه آبی در طبیعت دارد. یکی از مهم‌ترین شاخص‌هایی که ویژگی‌های این بخش را به‌صورت کمی بیان

¹ -Water repellency



شکل ۱- شماتیکی از منحنی نگهداری آب خاک (به نقل از کوزوگی و همکاران ۲۰۰۲).

خاک، نرخ جریان آب در خاک را کنترل و بر جریان سطحی تأثیر می‌گذارد. بنابراین یک پارامتر مهم در مباحث هیدرولوژیکی و فرسایش هست (وسلینگ و همکاران ۲۰۰۹a). ویژگی نگهداشت آب خاک تابعی از بافت، ساختمان، میزان مواد آلی و چگالی ظاهری است (رایبو و همکاران ۲۰۰۸). میزان رطوبت در یک مکش خاص با کاهش اندازه ذرات و افزایش مواد آلی، افزایش می‌یابد (وسلینگ و همکاران ۲۰۰۹b). لذا انتظار می‌رود که با تغییر هر یک از عوامل چون نوع خاک کاربری اراضی، مدیریت و ناهمواری‌های سطحی میزان آب خاک تغییر کند. یکی دیگر از عواملی که بر منحنی مشخصه خاک تأثیر می‌گذارد، آبریزی خاک است. پدیده آبریزی وابستگی خاک‌ها به آب را کاهش می‌دهد زیرا در یک دوره زمانی مشخصی از چند ثانیه تا چند ساعت یا چندین روز در برابر مرطوب شدن مقاومت می‌کنند (دوار و توماس ۲۰۰۰).

معادلات زیادی برای معرفی توابع نگهداری آب خاک پیشنهاد شده‌اند. غالب این توابع از نظر ریاضی بسیار پیچیده هستند. یکی از معادلات کاربردی و

در مکش‌های پایین (صفر تا یک اتمسفر) مقدار رطوبت خاک به نیروی موئینگی و اندازه منافذ خاک بستگی دارد. به عبارت دیگر، در این محدوده از نیروی مکش، رطوبت خاک بیشتر تحت تأثیر ساختمان خاک هست. از طرفی، در نیروی مکش زیاد (بیشتر از یک اتمسفر) رطوبت موجود تابعی از نیروی جذب سطحی و سطح ویژه ذرات بوده، و در نتیجه در این محدوده از نیروی مکش، بافت خاک عامل مهم به شمار می‌آید. تراکم خاک نیز، منحنی مشخصه رطوبتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (جنسن ۱۹۸۰). اگر خاک در حالت اشباع باشد، تحت تأثیر نیروی ثقل منافذ بزرگ از آب تخلیه و هوا وارد خاک می‌شود؛ پتانسیل این نقطه، مکش ورود هوا^۱ (α) نامیده می‌شود.

نگهداری آب خاک نیز یک فاکتور اصلی در حرکت آب در خاک است و معیاری از میزان آب است که خاک می‌تواند در خود ذخیره کند و یا نفوذ یابد و سرنوشت بارش‌ها را تعیین می‌کند. همراه با هدایت هیدرولیکی غیراشباع و اشباع، ویژگی نگهداشت آب

¹ Air entry suction

آب‌گریزی خاک می‌شود.

اوجدا و همکاران (۲۰۱۰) اثر اضافه کردن کمپوست و لجن خشک را روی قابلیت مرطوب شدن خاک و ویژگی نگهداری آب خاک در طول بازسازی بررسی کردند. سه کمپوست و سه لجن خشک شهری از شهرهای با جمعیت متوسط در کاتالونیا (شهر اسپانیا) با خاک معدنی ترکیب و درون لایسیمتر ریخته شدند. منحنی نگهداشت آب و زمان موردنیاز برای اندازه‌گیری آن‌ها با پارامترهای مختلف و اساسی خاک تعیین شدند. اضافه کردن کمپوست و لجن خشک به خاک میزان کل کربن آلی، زاویه تماس آب-خاک، زیتوده میکروبی، pH و هدایت هیدرولیکی را افزایش داد. لجن خشک بر روی ویژگی مرطوب شدن خاک تأثیر گذاشت. محققان بسیاری ارتباط معکوس آب خاک و آب‌گریزی را گزارش کرده‌اند (کوالهو و همکاران ۲۰۰۵، کیزر و همکاران ۲۰۰۵، لیتون-بویس و همکاران ۲۰۰۵). اخیراً نیز جردن و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی ارتباط آب‌گریزی و مدیریت خاک، میزان آب و دما پرداختند. همچنین به پیش‌بینی وقوع آب‌گریزی از طریق ارتباط آن با ویژگی‌های کلیدی مانند بافت، درصد مواد آلی و ویژگی‌های شیمیایی خاک پرداختند.

مقدار ورود آب در نفوذ و مقدار ورود هوا در زهکشی اهمیت دارد و این مقادیر ورودی را می‌توان از منحنی رطوبتی تخمین زد (ونگ و همکاران ۲۰۰۰). مقدار ورود آب در خاک آب‌گیز مثبت است درحالی‌که در یک خاک آب‌دوست منفی هست، زیرا یک خاک آب‌گیز تا زمانی که عمق آب روی سطح آن به مقدار بحرانی نرسد، مرطوب نمی‌شود. این مقدار بحرانی مقدار ورود آب در خاک آب‌گیز در نظر گرفته می‌شود. شناخت رفتار رطوبتی خاک و به‌خصوص تغییراتی که در منحنی مشخصه آن ایجاد می‌گردد اهمیت زیادی دارد. در همین راستا هدف از این پژوهش بررسی منحنی مشخصه رطوبتی خاک و پارامترهای معادله ون

مناسب در این زمینه معادله ون گنوختن (۱۹۸۰) است که به‌صورت روابط ۱ ارائه شده است (کندلوس و سیمونک ۲۰۱۰).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad \text{الف} \quad [1]$$

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{ب} \quad [1]$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1 \quad \text{ج} \quad [1]$$

در این روابط n و m و α ثابت‌های تجربی مؤثر در

شکل منحنی نگهداری هستند. θ_r میزان آب باقیمانده، θ_s میزان آب اشباع $[L^3 L^{-3}]$ ، α پارامتر تجربی است که به‌طور معکوس متناسب با مکش در نقطه عطف هست $[L^{-1}]$ ، n شاخص توزیع اندازه منافذ، h مکش خاک $[L]$ ، Se اشباع نسبی می‌باشد (کندلوس و سیمونک ۲۰۱۰).

لجن فاضلاب با مقدار بالای مواد آلی، علاوه بر بهبود کیفیت شیمیایی و حاصل‌خیزی خاک می‌تواند در بهسازی ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله تراکم و نگهداری آب خاک نیز اثرات مثبت زیادی داشته باشد. لجن فاضلاب به‌دلیل دارا بودن مقادیر قابل توجهی مواد آلی و عناصر غذایی موردنیاز گیاه می‌تواند به‌عنوان یکی از بهترین و ارزان‌ترین کودهای آلی برای زمین‌های کشاورزی مطرح باشد. کاربرد کمپوست یا لجن خشک روشی متداولی برای احیاء زمین‌ها هست. لجن اصلاح‌کننده، مواد آلی خاک را افزایش می‌دهد اما قابلیت مرطوب شدن خاک را به‌دلیل وجود ترکیبات آب‌گیز کاهش می‌دهد (اوجدا و همکاران ۲۰۱۰). ساختمان، مواد آلی و قابلیت مرطوب شدن خاک، میزان آب در یک فشار مویبندی (ژانگ و همکاران ۲۰۰۸) و توزیع مکانی رطوبت خاک (لمپارتو و همکاران ۲۰۰۹) را به‌دلیل تورم یافتن (ریچاردز و پت ۲۰۰۹)، کلوخه‌ای شدن مواد آلی (سلیمانی و همکاران ۲۰۰۹) و پوشش آب‌گیز ذرات (دکر و ریتسا ۲۰۰۰) تغییر می‌دهند. تامور و همکاران (۲۰۰۵) نیز نشان دادند کاربرد لجن فاضلاب سبب

است. برای آب‌گریز کردن خاک به درجات مختلف، لجن خشک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری به‌صورت زیر به آن اضافه شد. ۲۵ درصد وزنی لجن فاضلاب و ۷۵ درصد خاک (S25%)، ۵۰ درصد وزنی لجن فاضلاب و ۵۰ درصد خاک (S50%)، ۶۵ درصد وزنی لجن فاضلاب و ۳۵ درصد خاک (S65%) و نهایتاً ۸۰ درصد وزنی لجن فاضلاب و ۲۰ درصد خاک (S80%). به‌این‌ترتیب چهار تیمار لجن فاضلاب به‌دست آمد و با تیمار شاهد یا آب‌دوست (بدون اضافه کردن لجن - S0) مقایسه شدند. برخی از ویژگی‌های لجن در جدول ۲ آورده شده است.

گنوختن در خاک‌های آب‌گریز شده در اثر افزودن لجن فاضلاب است.

مواد و روش‌ها

به‌منظور تهیه خاک آب‌گریز از خاک با بافت لوم رسی استفاده شد این خاک از منطقه‌ای در مجاورت تصفیه‌خانه فاضلاب فولادشهر (اصفهان) با موقعیت ۵۱ درجه و ۲۴ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی تهیه گردید. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اولیه.

EC	pH	ماده آلی	چگالی ظاهری	رس	سیلت	شن	نوع خاک
(dS m^{-1})		(%)	(g cm^{-3})	(%)	(%)	(%)	
۲/۸۶	۶/۹۸	۱/۶۴	۱/۲۱	۳۵/۸	۲۸	۳۶/۲	لوم رسی

جدول ۲- ویژگی‌های لجن مورد استفاده.

EC	pH	ماده آلی	رس	سیلت	شن
(dS m^{-1})		(%)	(%)	(%)	(%)
۴/۷	۶/۸۸	۶/۳	۳/۴	۲۰/۶	۷۶

نفوذ آب در خاک (WDPT^1) شامل قرار دادن سه قطره آب مقطر (۸۰ μL) توسط قطره‌چکان پزشکی روی سطح صاف خاک و اندازه‌گیری مدت‌زمان نفوذ و جذب قطره‌ها توسط خاک هست (دکر و جانگریس ۱۹۹۰). این روش

حدوداً پنجاه روز پس از ترکیب خاک‌ها با لجن فاضلاب، آزمایش‌ها موردنظر روی آن‌ها انجام شد. برای تعیین آب‌گریزی از دو روش آزمایش نفوذ قطره آب (دکر و جانگریس ۱۹۹۰) و آزمایش مولاریته محلول آب و الکل (لتی و همکاران ۲۰۰۰) استفاده شد و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. روش نفوذ قطره آب یا زمان

¹ - Water drop penetration time (WDPT)



شکل ۲- آزمایش آب‌گریزی روی نمونه‌های خاک.

پس از حذف مواد آلی به کمک آب‌اکسیژنه، بافت خاک به روش هیدرومتری (بویوکوس ۱۹۶۲) تعیین

به‌علت سادگی تقریباً همیشه مورد استفاده قرار می‌گیرد. حتی اگر روش‌های دیگر برای تعیین آب‌گریزی خاک به‌کاربرده شود، این روش قادر به جداسازی خاک‌ها از نظر آب‌گریز بودن یا نبودن است (لتی و همکاران ۲۰۰۰). در روش مولاریته محلول آب و الکل (MED)^۱ محلول آب و الکی که در کمتر از ۵ ثانیه در خاک نفوذ می‌کند به‌عنوان کشش سطحی بحرانی نامیده می‌شود. در این روش یک سری از محلول‌های آب و الکل با درصد حجمی ۰ تا ۴۰٪ الکل که دارای کشش سطحی متفاوت هستند برای تعیین شدت آب‌گریزی استفاده شدند. هر چه غلظت اتانول در محلول بیشتر باشد کشش سطحی کاهش می‌یابد. افزایش دمای آب کاربردی، کشش سطحی را کاهش می‌دهد و در نتیجه زمان موردنیاز برای مرطوب شدن خاک کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش دمای آب زمان مرطوب شدن کاهش می‌یابد (کینگ ۱۹۸۱)؛ به‌همین لحاظ در زمان اندازه‌گیری باید دما ثابت باشد و در دامنه ۱۸ تا ۲۳ درجه سلسیوس باشد (ریچاردسون ۱۹۸۴). رطوبت نسبی هوای آزمایشگاه نیز روی زمان نفوذ قطره آب تأثیر می‌گذارد. افزایش رطوبت نسبی، زمان ماندگاری قطره آب روی سطح خاک را افزایش می‌دهد (بیسدم و همکاران ۱۹۹۳). بر این اساس آزمایش‌های آب‌گریزی حدوداً ۵۰ روز پس از تیمار نمونه‌ها در شرایط یکسان (دمای ۲۲ درجه سلسیوس، فشار یک اتمسفر و رطوبت نسبی ۲۸ درصد) برای تمام خاک‌ها انجام شد (شکل ۲). آب‌گریزی در دو شرایط رطوبتی آزمایشگاه و شرایط آون خشک، بررسی شدند. لازم به ذکر است که از آنجا که دمای خشک شدن و گاهی دماهای بالا سبب از بین رفتن آب‌گریزی می‌شود، دمای خشک شدن توسط آون طبق نظر نگاین و همکاران (۱۹۹۹)، ۶۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت تنظیم شد.

¹ - Molarity of aqueous ethanol (MED)

شن حدود ۱/۲ تا ۱/۱ برابر تیمار قبلی شد. به گونه‌ای که تیمار **آب‌دوست** کمترین میزان شن و تیمار آب‌گریز با لجن ۸۰٪ دارای بیشترین میزان شن بود. به همین ترتیب درصد رس نیز با اضافه کردن لجن فاضلاب در تیمارها کاهش یافت.

لجن فاضلاب شهری اثر معنی‌داری بر درصد ماده آلی تیمارها داشت. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین درصد ماده آلی مربوط به خاک با ۸۰ درصد لجن فاضلاب شهری و کمترین درصد ماده آلی مربوط به خاک بدون کاربرد لجن فاضلاب بود. افزایش لجن فاضلاب در خاک سبب افزایش ماده آلی خاک گردیده است. به طوری که کمترین مقدار ماده آلی در خاک بدون لجن فاضلاب، ۱/۶۵ درصد و بالاترین مقدار آن در ۸۰٪، ۶/۶۵ درصد بود. اوجدا و همکاران (۲۰۱۰) نیز نشان دادند، کمپوست و لجن اصلاح‌کننده مواد آلی خاک را افزایش می‌دهد اما قابلیت مرطوب شدن خاک را به دلیل وجود ترکیبات آب‌گریز کاهش می‌دهد. طبق بررسی هاراس و اسپامن (۲۰۰۶) نیز کاربرد لجن فاضلاب به عنوان راهی برای ذخیره آب در مناطقی که دچار کم‌آبی هستند، عاملی در جهت ایجاد آب‌گریزی است. تامور و همکاران (۲۰۰۵) نیز نشان دادند کاربرد لجن فاضلاب سبب آب‌گریزی خاک می‌شود. در واقع اضافه کردن لجن فاضلاب سبب افزایش قارچ‌ها و باکتری‌های خاک می‌شود بدون شک هم قارچ هم باکتری پتانسیل تغییر نگهداری آب خاک و ویژگی‌های فیزیکی خاک را دارند (ورونیکا و همکاران ۲۰۱۰). نتایج به دست آمده از آزمایش‌های آب‌گریزی که میانگین سه بار اندازه‌گیری هستند، در شکل‌های ۳ و ۴ آمده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه تیمارها با کاهش رطوبت از هوا خشک تا آون خشک آب‌گریزی خاک نیز افزایش یافت. دکر و ریتسما (۱۹۹۶) نیز نشان دادند پتانسیل آب‌گریزی با دمای خشک شدن در آون افزایش می‌یابد. خاک با خشک شدن تحت دمای ۶۵ درجه سلسیوس نسبت به زیر ۲۵ درجه سلسیوس

شد. درصد ماده آلی خاک نیز به روش واکلی و بلک اصلاح شده (نلسون و سامر ۱۹۸۲)، تعیین شد.

برای سنجش رابطه بین مقدار آب و مکش خاک در محدوده مکش‌های کمتر از ۱۵۰ سانتی‌متر از دستگاه جعبه ماسه^۵ و در مکش‌های بیشتر از ۳۰۰ سانتی‌متر از دستگاه صفحات فشار^۶ استفاده شد. با رسم درصد رطوبت‌های اندازه‌گیری شده در مقابل مکش اعمال شده، منحنی مشخصه رطوبتی خاک به دست آمد. از داده‌های مقادیر رطوبت و مکش، پارامترهای معادلات منحنی مشخصه و هدایت آبی غیراشباع خاک به روش کمینه‌سازی مجموع مربعات و با استفاده از برنامه RETC تعیین گردید. پس از تعیین پارامترهای معادلات منحنی مشخصه و هدایت آبی غیراشباع، میزان تغییرات هر یک از پارامترها و چگونگی تغییر هر یک از آن‌ها مشخص گردید. مشخصات و نمایه‌های مختلف منحنی رطوبتی از جمله ظرفیت زراعی در مکش ۳۰۰ سانتی‌متر و رطوبت نقطه پژمردگی در مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر و نیز میزان آب ثقیلی از تفاضل رطوبت اشباع و ظرفیت زراعی تعیین شد. در انتها نتایج با استفاده از آزمون فیشر (Fisher) توسط نرم‌افزار SAS 8 و نیز آزمون t-Test بررسی و تحلیل شدند.

نتایج و بحث

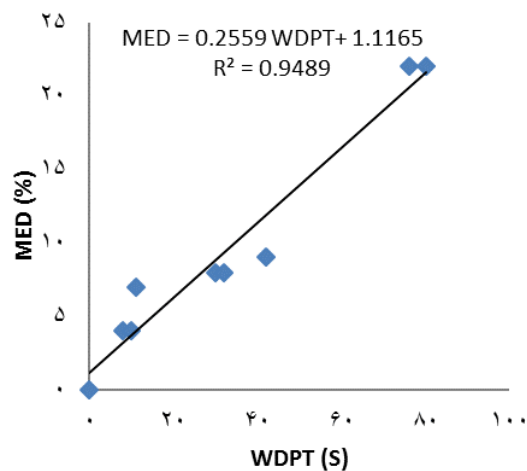
نتایج نشان داد اضافه کردن لجن فاضلاب به خاک در مقادیر بالا سبب تغییر بافت خاک می‌شود. البته افزایش ۲۵ درصد از این مواد تغییری در بافت خاک ایجاد نکرد ولی درصدهای ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد موجب تغییر بافت خاک از لوم رسی به لوم شنی شد (جدول ۳) که این موضوع احتمالاً به دلیل وجود ذرات هم‌اندازه شن در لجن خشک فاضلاب بود (نورمهند ۱۳۹۲). همان‌طور که مشاهده می‌شود، اضافه کردن لجن فاضلاب به اندازه ۲۵ درصد در هر تیمار باعث افزایش

⁵ Sand box

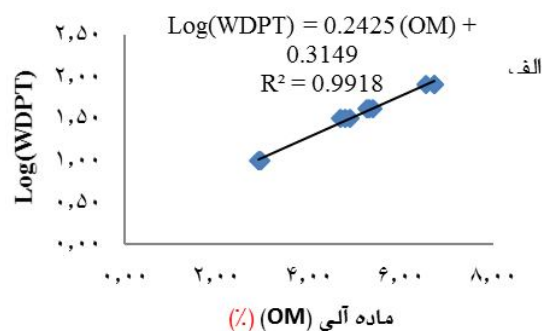
⁶ Pressure plate



شکل ۴- زمان نفوذ قطره آب در تیمارهای مختلف.

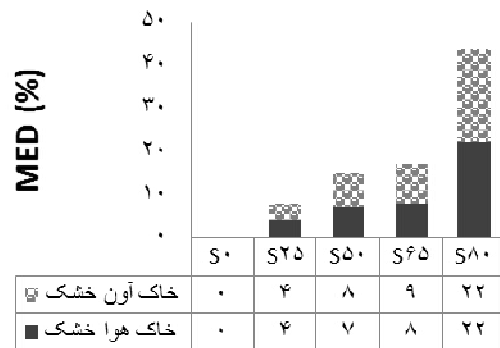


شکل ۵- رابطه بین زمان نفوذ آب به داخل خاک و درصد محلول اتانول در آزمایش آب‌گریزی.



آب‌گریزتر می‌شود. البته طبق آزمون t-Test بین دو حالت آون خشک و هوا خشک در شرایط آزمایشگاه از نظر درجه آب‌گریزی تفاوت معنی‌داری وجود نداشت بر اساس نتایج این آزمون، در آزمایش زمان نفوذ قطره آب $P=0/115$ و در آزمایش محلول اتانول $P=0/178$ به‌دست آمد. تیمارهای به‌دست‌آمده حاصل از اضافه کردن لجن فاضلاب طبق طبقه‌بندی گریفنهاگن و همکاران (۲۰۰۶) دارای درجه‌های آب‌گریزی اتدک و قوی بودند (جدول ۴).

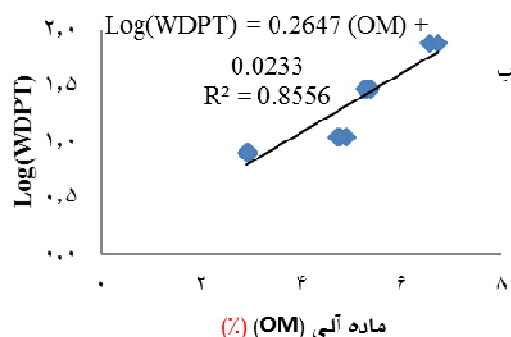
به‌علاوه بین زمان نفوذ قطره آب (WDPT) و درصد اتانول (MED) رابطه‌ای خطی به‌صورت شکل ۵ وجود دارد. باکزکو و همکاران (۲۰۰۶) نیز رابطه‌ای خطی بین WDPT و میزان کشش سطحی بحرانی^۷ که بیان‌گر میزان نفوذ الکل یا MED نیز هست، به‌دست آوردند. مطالعات دیگر نیز نشان دادند همبستگی بین مقادیر WDPT و کشش سطحی بحرانی، با تغییرات عمق، فصل سال و بقیه فاکتورها بسیار متغیر است (باکزکو و همکاران ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵).



شکل ۳- درصد محلول اتانول در تیمارهای مختلف.

⁷ Critical surface tension-CST

شکل ۶- رابطه بین زمان نفوذ قطره آب به داخل خاک و درصد ماده آلی در خاک‌های هوا خشک (الف) و آون خشک (ب).



جدول ۳- درصد نرات خاک، بافت و میزان مواد آلی در تیمارهای مختلف.*

تیمار	بافت	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	ماده آلی (%)
S0	لوم رسی	۳۶/۳۲e	۲۸/۰c	۳۵/۶۸a	۱/۶۵e
S25%	لوم رسی	۴۳/۷۲d	۲۴/۳۷d	۳۱/۹۰b	۲/۹۲d
S50%	لوم شنی	۵۴/۷۰c	۳۴/۶۱a	۱۰/۶۸c	۴/۷۸c
S65%	لوم شنی	۶۱/۳۴b	۲۸/۸۱b	۹/۸۴c	۵/۳۱b
S80%	لوم شنی	۶۷/۶۶a	۲۳/۵۳e	۸/۸۰c	۶/۶۵a

* تیمارهای با حروف مشابه طبق آزمون فیشر در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های آب‌گریزی.

تیمار	درجه آب‌گریزی
S0	آبدوست
S25%	آب‌گریز اندک
S50%	آب‌گریز اندک
S65%	آب‌گریز اندک
S80%	آب‌گریز قوی

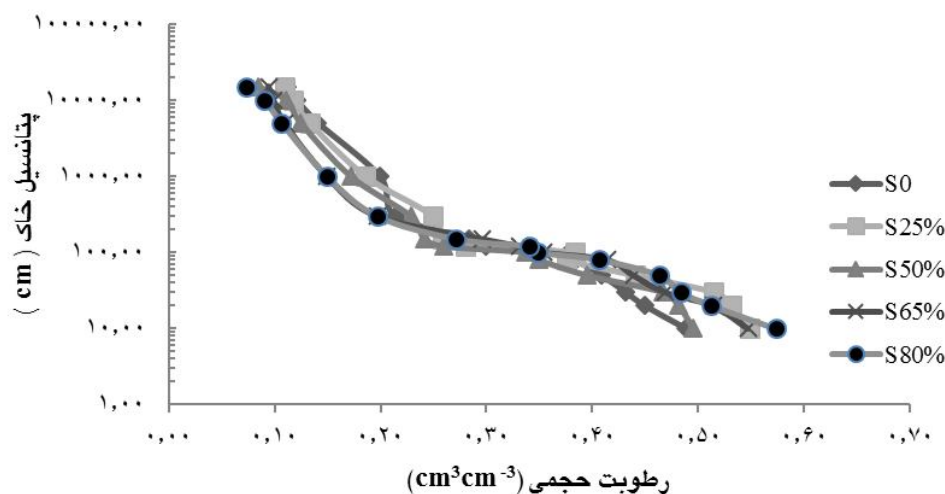
آلی و کاهش قابلیت مرطوب شدن توسط محققان دیگر (ماتائیک- سولرا و دوار ۲۰۰۴) نیز گزارش شده است. البته همبستگی ضعیف یا عدم همبستگی مواد آلی و آب‌گریزی توسط هارپر و همکاران (۲۰۰۰) و اسکات (۲۰۰۰) نیز گزارش شده است. در تحقیقی که توسط ذوالفقاری و حاج عباسی (۱۳۸۷) در منطقه لردگان و فریدون‌شهر انجام شد تأثیر دو عامل رطوبت و میزان مواد آلی بر آب‌گریزی خاک مورد بررسی قرار گرفت و آب‌گریزی خاک به‌روشنی زمان نفوذ آب در خاک به‌دست آمد. در این مطالعه یک رابطه مثبت بین مواد آلی و

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود بین مواد آلی خاک و میزان $\log(WDPT)$ رابطه‌ای خطی وجود دارد که نشان‌دهنده افزایش آب‌گریزی با افزایش میزان مواد آلی است. این موضوع با نظر وسلینگ و همکاران (۲۰۰۹b) نیز مطابقت دارد. وارا و همکاران (۲۰۰۵) در شمال غربی اسپانیا، اسپچول (۱۹۷۱) در خاک‌های رسی در یوتا (آمریکا)، سینگر و یوگولینی (۱۹۷۶) در خاک‌های ایالت واشنگتن آمریکا نیز ارتباط مثبتی بین مواد آلی و آب‌گریزی گزارش کرده‌اند (جردن و همکاران ۲۰۰۹). همبستگی معنی‌داری بین افزایش ماده

Test تیمارهای با بافت یکسان و درصد لجن پایین‌تر (S0 و نیز %S25) در مکش ۱۵۰۰۰ cm (بالاترین مکش) تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند. نتایج این تحقیق مشابه نتایج اوجدا و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که ظرفیت نگهداشت آب در خاک اصلاح‌شده توسط لجن فاضلاب تغییر می‌نماید. به‌نظر می‌رسد اضافه کردن لجن فاضلاب سبب افزایش قارچ‌ها و باکتری‌های خاک و تغییر نگهداشت آب خاک و ویژگی‌های فیزیکی آن شوند (ورونیکا و همکاران ۲۰۱۰). به‌علاوه همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، منحنی رطوبتی تیمارها در مکش‌های بالا متقارب می‌شوند و در مکش‌های پایین تفاوت بیشتری با یکدیگر دارند زیرا تأثیر بافت خاک و آب‌گریزی در این مکش‌ها مشهودتر است، همچنین بیشترین میزان رطوبت در مکش‌های نزدیک اشباع مربوط به تیمار %S80 است که علت آن احتمالاً بافت درشت و درصد بالای شن در این تیمار هست. طبق گزارش هیان و همکاران (۲۰۰۸) منحنی ویژگی‌های رطوبتی در خاک‌های آب‌گریز نفتی نشان داد در مکش‌های کمتر چون منافذ درشت از آلودگی مواد نفتی پرشده بنابراین مقدار آب کمتری را در خود نگه‌داری که این موضوع به‌دلیل خاصیت آب‌گریزی مواد نفتی هست. اما در مکش‌های بیشتر منحنی‌های خاک‌آلوده و خاک اولیه به‌هم نزدیک می‌شود زیرا غلظت آلودگی در منافذ ریز کمتر است.

شدت آب‌گریزی خاک به‌دست آمد. البته احتمالاً این رابطه همیشه برقرار نیست و به عوامل دیگر از جمله نوع مواد آلی نیز وابسته هست. به‌عنوان‌مثال وان دام و همکاران (۱۹۹۰) در هلند به بررسی خاک شنی آب‌گریز و خاک آبدوست پرداختند و در تحقیق آنان لایه آبدوست فوقانی، دارای ۵ درصد رس و ۲ درصد مواد آلی بود ولی خاک آب‌گریز فقط ۳ درصد رس و ۱/۵ درصد مواد آلی داشت. به‌این‌ترتیب خاک آب‌گریز ماده آلی کمتری نسبت به خاک آبدوست داشت. مواد آلی خاک هم شامل ترکیبات آب‌گریز است و هم آبدوست (گرینهاث و همکاران ۲۰۰۷، تارچیزکی و همکاران ۲۰۰۷) که هر دو باهم بر قابلیت مرطوب شدن خاک تأثیر می‌گذارند (هایس و کلاپ ۲۰۰۱).

زاوالا و جردن (۲۰۰۹) نیز با بررسی اثر پوشش‌های مختلف گیاهی در آب‌گریزی خاک‌های منطقه مدیترانه، رابطه‌ای خطی بین $\log(WDPT)$ و درصد کربن آلی خاک به‌دست آوردند. ضریب پی‌رسون R در این رابطه برای سه نوع پوشش گیاهی مختلف معنی‌دار بود. باکزکو و همکاران (۲۰۰۶) نیز بین $\log(WDPT)$ در نمونه‌های خاک با مواد آلی متفاوت در تاریخ‌های مختلف نمونه‌برداری تفاوت معنی‌داری ($p < 0.0001$) مشاهده کردند. منحنی رطوبتی در پنج تیمار در شکل ۷ نشان داده‌شده است. منحنی‌ها در تمامی مکش‌ها به‌استثنا در نزدیکی مکش ۱۰۰ سانتی-متر تفاوت چشمگیری با یکدیگر داشتند. طبق آزمون t-



شکل ۷- منحنی رطوبتی در تیمارهای لجن فاضلاب.

بررسی پارامترهای معادله ون گنوختن

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود پارامترهای معادله ون گنوختن در بین تیمارها تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد با یکدیگر داشتند. بیشترین میزان θ_s در تیمار آب‌گریز با ۸۰ درصد لجن فاضلاب مشاهده شد. البته بر اساس اندازه‌گیری رطوبت اشباع در تیمارهای مختلف بیشترین درصد رطوبت اشباع نیز در این تیمار وجود داشت. در حقیقت افزایش ماده آلی در این تیمار سبب افزایش خلل و فرج و در نتیجه افزایش رطوبت اشباع آن شده است. کمترین میزان θ_s در خاک آبدوست مشاهده شد (جدول ۶). علت این موضوع احتمالاً بافت لوم رسی و مواد آلی کم-تر در این تیمار است. میزان رطوبت باقیمانده θ_r در تیمار آب‌گریز ۸۰٪ نسبت به سایر تیمارها کمتر بود درحالی‌که تیمار آبدوست S0 رطوبت باقیمانده بیشتری داشت. علت این موضوع را می‌توان به بیشتر بودن مقادیر ذرات هم‌اندازه رس و سیلت در تیمار آبدوست در قیاس با تیمار آب‌گریز مرتبط دانست. طبق نظر آدامز و همکاران (۲۰۰۸) خاک‌های شنی بیشتر از خاک‌های با بافت ریز در معرض خشک شدن کامل هستند همین موضوع سبب کاهش رطوبت باقیمانده در

تیمار ۸۰٪ می‌شود. در بررسی شیفیعی پور و همکاران (۱۳۹۰) نیز افزودن لجن فاضلاب سبب افزایش درصد اشباع خاک شد.

پارامتر α در تیمارهای ۶۵٪ S و ۸۰٪ S بیشتر از سایر تیمارها با درجه آب‌گریزی اندک بود که نشانه دامنه کمتری از ورود هوا به خاک در این تیمارها هست. نقطه ورود هوا در خاک آبدوست بالاتر هست. یک دلیل کم بودن مکش نقطه ورود هوا در خاک‌های آب‌گریز، فشار محدود در زمان اشباع کردن نمونه است که در نتیجه خاک کامل اشباع نشده و هنوز ذرات ریز آب‌گریزانند. در بررسی نیبر و همکاران (۲۰۰۰) میزان ورود هوا در خاک‌های آب‌گریز شده توسط محلول octadecyltrichlorasilan. نصف میزان آن در خاک‌های آبدوست بود.

پارامتر n بیان‌گر شیب منحنی رطوبتی خاک است. انتظار می‌رود که این پارامتر در تیمار آبدوست، با بافت سنگین‌تر مقدار کمتری نسبت به تیمارهای دیگر داشته باشد. زیرا معمولاً پارامتر n در خاک‌های سنگین مقدار کمتری نسبت به خاک‌های سبک دارد. به لحاظ اینکه پارامتر n با افزایش سهم ذرات درشت و به تبع آن منافذ درشت افزایش می‌یابد (پروسکا و همکاران ۲۰۰۵،

وجود مواد آب‌گریز در سطح ذرات خاک در تیمارهای S65% و S80% باشد. بنابراین به‌نظر می‌رسد آب‌گریزی شدید روی پارامتر n نیز تأثیر گذاشته و سبب کاهش آن شود.

حق‌شناس و بیگی هرچگانی (۱۳۸۹)، لذا مقدار n با افزایش ماده آلی در تیمار S25% و S50% نسبت به S0 افزایش‌یافته و پس‌از آن روند کاهشی به‌خود گرفته است. این موضوع می‌تواند به‌دلیل آب‌گریزی بالاتر و

جدول ۵- تجزیه واریانس پارامترهای ون گنوختن در حالت خشک شدن.

n	α (cm^{-1})	θ_r ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	درجه آزادی	منابع تغییرات
۰/۰۲۳**	۰/۰۰۰۱**	۰/۰۰۲**	۰/۰۰۸**	۴	تیمار
۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۱	۱۰	خطا
۲/۴۹	۱۴/۰۳	۱۱/۱۱	۰/۶۷	-	ضریب تغییرات (%)
<۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۸	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	-	P

** معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

جدول ۶- مقایسه میانگین پارامترهای ون گنوختن در حالت خشک شدن.

n	α (cm^{-1})	θ_r ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	تیمار
۱/۴۸۰ ^b	۰/۰۲۶۴ ^b	۰/۱۰۱۰ ^a	۰/۵۱۰۹ ^e	آبدوست
۱/۶۲۹۸ ^a	۰/۰۲۸۹ ^b	۰/۱۰۷۸ ^a	۰/۵۹۶۴ ^c	آب‌گریز ۲۵٪
۱/۶۱۰۵ ^a	۰/۰۲۸۰ ^b	۰/۰۹۴ ^a	۰/۵۳۳۵ ^d	آب‌گریز ۵۰٪
۱/۴۳۶۶ ^b	۰/۰۴۱۶ ^a	۰/۰۴۸۷ ^b	۰/۶۱۶۳ ^b	آب‌گریز ۶۵٪
۱/۴۶۸۹۰ ^b	۰/۰۳۷۳ ^a	۰/۰۴۶۱ ^b	۰/۶۲۹۰ ^a	آب‌گریز ۸۰٪

تیمارهای با حروف مشابه طبق آزمون فیشر در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند.

داشتند. بالاترین میزان ظرفیت مزرعه‌ای در تیمار S25% مشاهده شد. علت این موضوع احتمالاً وجود درصد بالای ذرات هم‌اندازه رس و مواد آلی در این خاک هست. طبق نظر کرخام (۲۰۰۵) وجود مواد آلی در خاک موجب نگهداشت بهتر آب در خاک می‌شود تیمار S80% با وضعیت آب‌گریزی شدید مواجه با کاهش رطوبت ظرفیت زراعی بوده و از این منظر رفتاری مشابه خاک‌های با درصد شن بالا دارد. ذکر این نکته ضروری است که روند نگهداشت رطوبتی خاک همیشه با افزایش مواد آلی افزایشی نیست به‌طوری‌که راولز و همکاران (۲۰۰۳) گزارش کردند، با افزایش میزان مواد آلی در خاک‌های رسی سنگین نگهداشت رطوبت کاهش می‌یابد؛ چرا که افزایش ماده آلی سبب کاهش چگالی ظاهری و در نتیجه کاهش میزان رطوبت حجمی خاک می‌شود.

در بررسی نیبر و همکاران (۲۰۰۰) منحنی‌های رطوبتی خاک‌های شنی آب‌گریز شده توسط محلول octadecyltrichlorosilane با درجات مختلف آب‌گریزی بسیار به هم شبیه بوده و در مجاورت محدوده اشباع منحنی‌ها تقریباً متقارب بودند ولی در حدود درجه اشباع کمتر از ۴۰ درصد با یکدیگر تفاوت داشتند با مقایسه تیمارهای آبدوست و S25% و نیز مقایسه S80% و S65% مشاهده شد که با افزایش مواد آلی حساسیت منحنی رطوبتی به تغییرات میزان مواد آلی، کم می‌شود که این نتیجه مشابه ادعای راولز و همکاران (۲۰۰۳) است. برخی از نمایه‌های منحنی رطوبتی خاک در تیمارهای مختلف در جدول ۷ و شکل ۸ آمده است. تمامی نمایه‌ها در بین تیمارها (طبق آزمون فیشر) در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری

پاسکال کاهش داد اما هدایت هیدرولیکی اشباع را ۵۰ درصد افزایش داد. در بررسی آنان میزان رطوبت خاک به طور چشمگیری تحت تأثیر روغن در خاک بود. بیشترین میزان آب قابل استفاده ($0.136 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) در تیمار S50% مشاهده شد علت این بالاتر نسبت به تیمارهای با بافت مشابه (S65% و S80%) و نیز نقطه پژمردگی پایین تر نسبت به تیمار آبدوست و S25% هست.

میزان رطوبت در پتانسیل ماتریک 15000 cm (نقطه PWP) در تیمار آبدوست بیشتر از سایر تیمارها بود و دلیل آن احتمالاً وجود خلل و فرج ریزتر در این تیمار است که آب را تا مکش‌های بالا هم در خود نگه می‌دارد. در صورتی که تیمار آبدوست S80% دارای PWP کمتری بود و در حقیقت در اثر مکش‌های بالا بیشتر آب خود را از دست می‌دهد. طبق بررسی راسیا و همکاران (۱۹۹۰) وجود مواد روغنی در خاک میزان نگهداری آب خاک را تقریباً ۱۰ درصد در پتانسیل ماتریک ۱۰- تا ۲۰۰- کیلو

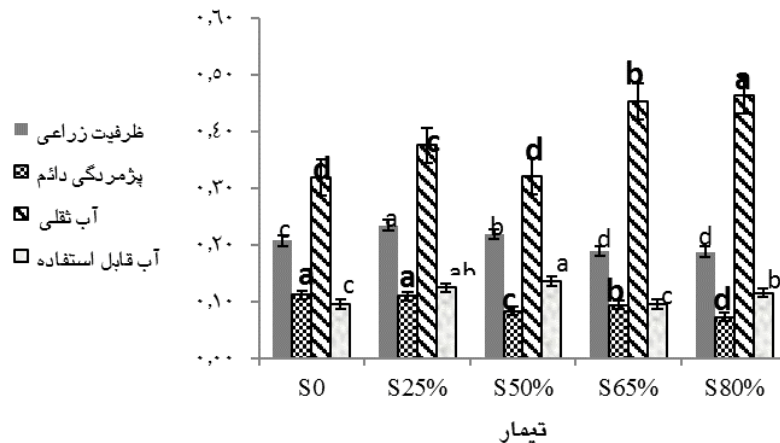
جدول ۷- تجزیه واریانس رطوبت در ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی، آب قابل استفاده و آب ثقلی.

منابع تغییرات	درجه آزادی	θ_{FC} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	θ_{PWP} ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	آب قابل استفاده ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	آب ثقلی ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)
تیمار	۴	0.001^{**}	0.0008^{**}	0.0009^{**}	0.014^{**}
خطا	۱۰	0.0003	0.0001	0.0004	0.0003
ضریب تغییرات (%)		۳/۰۰۸	۴/۶۴	۶/۰۱	۱/۵۲
P		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

** معنی‌داری در سطح یک درصد طبق آزمون فیشر

تیمار S25% کمتر بود اما دلیل آن کاهش شدید چگالی ظاهری در تیمار S50% نسبت به S25% است. در صورتی که این نمایه با توجه به چگالی ظاهری، به جای رطوبت حجمی بر اساس رطوبت جرمی محاسبه شوند نتیجه فوق‌الذکر حاصل می‌شود.

تیمارهای آبدوست، آب ثقلی بیشتری نسبت به تیمار آبدوست داشتند. آب آزاد موجود در این تیمارها به دلیل وجود خلل و فرج درشت‌تر و نیز خاصیت آبدوستی بیشتر آن‌ها بود. در حقیقت روند تغییرات آب ثقلی، با افزایش ماده آلی به صورت صعودی است. البته طبق شکل ۸ اگر چه این نمایه در تیمار S50% نسبت به



شکل ۸- مقایسات میانگین رطوبت در ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی، آب قابل استفاده و آب ثقیلی ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق نشان داد که:

- ۴- وجود مواد آلی بالا در S80% سبب شد بیشترین میزان θ_s در این تیمار مشاهده شود و درصد شن بالای آن نیز سبب شد، کمترین مقدار θ_r در این تیمار به دست آید، برعکس مواد آلی و درصد رس بالای خاک آب‌دوست (S0) نیز به ترتیب موجب کمترین میزان θ_s و بیشترین مقدار θ_r در آن شد.
- ۵- با افزایش ماده آلی، مقدار n در تیمارهای S25% و S50% نسبت به S0 افزایش یافت اما با شدت گرفتن درجه آب‌گریزی مقدار n روند کاهشی به خود گرفت. این موضوع می‌تواند به دلیل وجود مواد آب‌گریز در سطح ذرات خاک در تیمارهای S65% و S80% باشد. بنابراین می‌توان ادعا کرد آب‌گریزی شدید روی پارامتر n تأثیر گذاشته و سبب کاهش آن می‌شود.
- ۶- پارامتر α در تیمارهای S65% و S80% بیشتر از سایر تیمارها با درجه آب‌گریزی اندک بود که نشانه دامنه کمتری از ورود هوا به خاک در این تیمارها هست.

۱- اگرچه کاربرد لجن خشک روشی متداولی برای احیاء زمین‌ها هست و لجن اصلاح‌کننده، مواد آلی خاک را افزایش می‌دهد اما قابلیت مرطوب شدن خاک را به دلیل وجود ترکیبات آب‌گریز کاهش می‌دهد.

۲- با اضافه کردن ۲۵، ۵۰ و ۶۵ درصد لجن فاضلاب، خاک خاصیت آب‌گریزی اندکی پیدا کرد ولی مقادیر ۸۰٪ سبب آب‌گریزی شدید در خاک شد و اثرات منفی روی نفوذ آب در خاک دارد. در حقیقت افزودن لجن فاضلاب به میزان اندک سبب بهبود و اصلاح خاک می‌شود و میزان مواد آلی خاک را افزایش می‌دهد.

۳- بین مواد آلی خاک و میزان \log (WDPT) در هر دو خاک آون خشک و هوا خشک رابطه‌ای خطی با ضریب تبیین ۰/۹۹ و ۰/۸۵ وجود دارد.

منابع مورد استفاده

اعلامنش پ، مصدقی مر و محبوبی ع، ۱۳۸۶. بررسی عوامل مؤثر بر آب‌گریزی و آب‌پذیری در برخی از خاک‌های

- همدان. دهمین کنگره علوم خاک ایران. کرج، شهریور ۱۳۸۶.
- بای‌پوردی م، ۱۳۶۸. اصول مهندسی آبیاری انتشارات دانشگاه تهران.
- حق‌شناس گرگابی م و بیگی هرچگانی ح، ۱۳۸۹. اثر ژئولیت میانه بر ظرفیت نگهداری آب و ضرایب مدل‌های منحنی رطوبتی دو بافت خاک شنی و لوم رسی. مجله پژوهش آب ایران، شماره ۴۲، صفحه‌های ۶ تا ۳۵.
- خداوردی‌لو ح، فتحی پ و همایی م، ۱۳۸۳. تخمین هوشمند منحنی رطوبتی با استفاده از شبکه عصبی. دومین کنفرانس ملی دانشجویی منابع آب‌و خاک، دانشگاه شیراز.
- ذوالفقاری ع و حاج عباسی مع، ۱۳۸۷. تأثیر تغییر کاربری اراضی بر خصوصیات فیزیکی و آب‌گریزی خاک در مراتع فریون‌شهر و جنگل‌های لردگان مجله آب‌و خاک علوم و صنایع کشاورزی، جلد ۲۲، شماره ۲، صفحه‌های ۲۵۱ تا ۲۶۲.
- شفیعی‌پور ش، آیتی ب و گنجی‌دوست ح، ۱۳۹۰. بررسی اثر کاربرد لجن تصفیه‌خانه فاضلاب شهری در بهبود خاک کشاورزی (مطالعه موردی: جزیره کیش). آب و فاضلاب، شماره ۲۲، صفحه‌های ۸۵ تا ۹۳.
- نورمهند ن، ۱۳۹۲. شبیه‌سازی حرکت آب در خاک آب‌گریز در جریان دو بعدی با اصلاح پارامترهای هیدرولیکی خاک. رساله دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
- Adams RH, Osorio FJ and Cruz JZ, 2008. Water repellency in oil contaminated sandy and clayey soils. *Environmental Science and Technology* 5 (4): 445-454.
- Annabi M, Houot S, Francou F, Poitrenaud M and Bissonnais Y, 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Science Society of American Journal* 71: 413-423.
- Bisdorn EBA, Dekker LW and Schouthe JG Th, 1993. Water repellency of sieve fraction from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma* 56: 105-118.
- Bouyoucos GJ. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy* 54: 464-465.
- Buczko U, Bens O, Fischer H and Huttel RF, 2002. Water repellency in sandy luvisols under different forest transformation stages in northeast Germany. *Geoderma* 109: 1-18.
- Buczko U, Bens O and Huttel RF, 2005. Variability of soil water repellency in sandy forest soils with different stand structure under Scots pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*). *Geoderma* 126: 317-336.
- Buczko U, Bens O and Durner W, 2006. Spatial and temporal variability of water repellency in a sandy soil contaminated with tar oil and heavy metals. *Journal of Contaminant Hydrology* 88: 249-268.
- Coelho COA, Laouina A, Regaya K, Ferreira AJD, Carvalho TMM, Chaker M, Naafa R, Naciri R, Boulet AK and Keizer JJ, 2005. The impact of soil water repellency on soil hydrological and erosional processes under Eucalyptus and evergreen Quercus forest in the Western Mediterranean. *Australian Journal of Soil Research* 43: 309-318.
- DeBano LF, 1981. Water Repellent Soils: a state-of-the-art. Gen Tech Rep PSW-46 Berkeley, CA: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station 21 p.
- Dekker LW and Jungerius PD, 1990. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. *Catena Supplement* 18: 173-183.
- Dekker LW and Ritsema CJ, 1996. Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena* 28: 89-105.
- Dekker LW and Ritsema CJ, 2000. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. *Journal of Hydrology* (231-232): 148-164.
- Doerr SH and Thomas AD, 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology* (231-232): 134-147.
- Ellies AC, Ramirez and Mac Donald R, 2005. Organic matter and wetting capacity distribution in aggregates of Chilean soils. *Catena* 59: 69-78.
- Greiffenhagen A, Wessolek G, Facklam M, Renger M and Stoffregen H, 2006. Hydraulic functions and water repellency of forest floor horizons on sandy soils. *Geoderma* 132: 182-195.
- Grinhut T, Hadar Y, Chen Y, 2007. Degradation and transformation of humic substances by saprotrophic fungi: processes and mechanisms. *Fungal Biology Reviews* 21: 179-189.
- Hallett PD and Young IM, 1999. Changes to water repellency of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *European Journal of Soil Science* 50: 35-40.

- Harper RJ, McKissock I, Gilkes RJ, Carter DJ and Blackwell PS, 2000. A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and landuse on water repellency. *Journal of Hydrology* (231–232): 371–383.
- Hayes MHB and Clapp CE, 2001. Humic substances: considerations of compositions, aspects of structure, and environmental in Xuences. *Soil Science* 166: 723–737.
- Hurras J and Schaumann GE, 2006. Properties of soil organic matter and aqueous extracts of actually water repellent and wetttable soil samples. *Geoderma* 132: 222–239.
- Hyun S, Ahn MY, Zimmerman AR, Kim M and Kim JG, 2008. Implication of hydraulic properties of bioremediated diesel-contaminated soil. *Chemosphere* 71: 1646–1653.
- Jensen ME, 1980. Design and Operation of Farm Irrigation Systems. An ASAE Monograph Number 3 in Series Published by American Society of Agricultural Engineers.
- Jordan A, Zavala M, Nava L, Alanis N, 2009. Occurrence and hydrological effects of water repellency in different soil and land use types in Mexican volcanic highlands. *Catena* 79: 60–71.
- Jordán A, Lorena MZ, Mataix-Solera J, Doerr SH, 2013. Soil water repellency: Origin, assessment and geomorphological consequences. *Catena* 105: 1-8.
- Kandelous M, Simunek J, 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management* 97: 1070–1076.
- Keizer JJ, Coelho COA, Matias MJS, Domingues CSP and Ferreira AJD, 2005. Soil water repellency under dry and wet antecedent weather conditions for selected land-cover types in the coastal zone of central Portugal. *Australian Journal of Soil Research* 43: 297–308.
- King P M, 1981. Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. *Australian Journal of Soil Research* 19: 275-85.
- Kirkham MB, 2005. Principles of Soil and Plant Water Relations, Publisher: Dana Dreibelbis, Elsevier Academic Press.
- Kobayashi M and Shimizu T, 2007. Soil water repellency in a Japanese cypress plantation restricts increases in soil water storage during rainfall events. *Hydrological Processes* 21: 2356–2364.
- Kosugi K, Hopmans JW and Dane JH, 2002. Water retention curve: Parametric models, Pp. 1-20. In: Dane JH, (Ed). *Methods of Soil Analysis, Physical Methods, Part 4, Soil Science Society of America, Madison, WI*.
- Lamparter A, Bachmann J, Goebel MO and Woche SK, 2009. Carbon mineralization in soil: impact of wetting–drying, aggregation and water repellency. *Geoderma* 150: 324–333.
- Leighton-Boyce G, Doerr SH, Shakesby RA, Walsh RPD, Ferreira AJD, Boulet AK and Coelho COA, 2005. Temporal dynamics of water repellency and soil moisture in eucalypt plantations, Portugal. *Australian Journal of Soil Research* 43: 269–280.
- Letej JM, Carrillo LK and Pang XP, 2000. Approaches to characterize the degree of water repellency. *Journal of Hydrology* (231–232): 61–65.
- Mataix-Solera J and Doerr SH, 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forest in the south-east of Spain. *Geoderma* 118: 77–88.
- Nelson DW and Sommer LE, 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 539-579. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR, (Eds). *Method of Soil Analyses: Chemical and Microbiological Properties, ASA Monograph, 9(2). American Society of Agronomy, Madison.*
- Nguyen HV, Niber JL, Oduro P, Ritsema CJ, Dekker LW, Steenhuis TS, 1999. Modeling solute transport in a water repellent soil. *Journal of Hydrology* 215: 188–201.
- Nieber JL, Bauters TWJ, Steenhuis TS and Parlange J-Y, 2000. Numerical simulation of experimental gravity-driven unstable flow in water repellent sand. *Journal of Hydrology* (231–232): 295–307.
- Ojeda GS, Mattana Alcaniz JM, Marando G, Bonmati M, Woche SK and Bachmann J, 2010. Wetting process and soil water retention of a minesoil amended with composted and thermally dried sludges. *Geoderma* 156: 399–409.
- Osborn JJ, Letey LF, DeBano and Terry E, 1967. Seed germination and establishment as affected by non-wetttable soils and wetting agents. *Ecology* 48: 494 – 497.
- Porebska D, Sawiński C, Lamorski K and RT Walczak, 2005. Relationship between van Genuchten's parameters of the retention curve equation and physical properties of soil solid phase. *International Agrophysics* 20: 153-159.
- Rasiah V, Voroney RP, Groenvelet and Kachanoski PH, 1990. Modifications in soil water retention and hydraulic conductivity by an oily waste. *Cremlingen* 3: 367-372.
- Rawls WJ, Pachepsky YA, Ritchie JC, Sobecki TM and Bloodworth H, 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* 116: 61–76.
- Richards BG and Peth S, 2009. Modelling soil physical behaviour with particular reference to soil science. *Soil and Tillage Research* 102: 216–224.
- Richardson JL, 1984. Field observation and measurement of water repellency for soil surveyors. *Soil Survey Horizons* 25: 32–36.

- Rubio CM, Llorens P and Gallart F, 2008. Uncertainty and efficiency of pedotransfer functions for estimating water retention characteristics of soils. *European Journal of Soil Science* 59: 339–347.
- Scott DF, 2000. Soil wettability in forested catchments in South Africa as measured by different methods and as affected by vegetation cover and soil characteristics. *Journal of Hydrology* (231–232): 87–104.
- Soleimani S, Van Geel PJ, Burkan Isgor O and Mostafa MB, 2009. Modeling of biological clogging in unsaturated porous media. *Journal of Contaminant Hydrology* 106: 39–50.
- Tarchitzky J, Lerner O, Shani U, Arye G, Lowengart-Aycicegi A, Brener A and Chen Y, 2007. Water distribution pattern in treated wastewater irrigated soils: hydrophobicity effect. *European Journal of Soil Science* 58: 573–588.
- Taumer K, Stoffregen H and Wessolek G, 2005. Determination of repellency distribution using soil organic matter and water content. *Geoderma* 125: 107–115.
- Tisdall JM and Oades JM, 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Soil Science* 33: 141–163.
- Van Dam JC, Hendrickx JMH, van Ommen HC, Bannink MH, van Genuchten MTh, and Dekker LW, 1990. Water and solute movement in a coarse-textured water-repellent field soil. *Journal of Hydrology* 120: 359–379.
- Van Genuchten MT, 1980. A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892–898.
- Varela ME, Benito E and de Blas E, 2005. Impact of wildfires on surface water repellency in soils of northwest Spain. *Hydrological Processes* 19: 3649–3657.
- Veronica LM, Parlange JY and Steenhuis TS, 2010. Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix? A review. *Journal of Hydrology* 393: 29–36.
- Wallis MG, Home DJ and Palmer AS, 1993. Water repellency in a New Zealand development sequence of yellow brown sands. *Australian Journal of Soil Research* 31: 641–654.
- Wang Z, Wu L and Wu QJ, 2000. Water-entry value as an alternative indicator of soil water-repellency and wettability. *Journal of Hydrology* (231–232): 76–83.
- Wesseling JG, Ritsema CJ, Oostindie K, Stoof CR and Dekker LW, 2009a. A new, flexible and widely applicable software package for the simulation of one-dimensional moisture flow. *SoWaM (Soil Water Model). Environmental Modelling & Software* 24: 1127–1132.
- Wesseling JG, Stoof CR, Ritsema CJ, Oostindie K and Dekker LW, 2009b. The effect of Soil texture and organic amendment on the hydrological behaviour of coarse textured soils. *Soil Use and Management* 25: 274–283.
- Zavala LM, and Jordan LA, 2009. Influence of different plant species on water repellency in Mediterranean heathland soils. *Catena* 76: 215–223.
- Zhuang J, McCarthy JF, Perfect E, Mayer LM and Jastrow JD, 2008. Soil water hysteresis in water-stable micro aggregates as affected by organic matter. *Soil Science Society of America Journal* 72: 212–220.