

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌هایی با درجات متفاوت آبگریزی

نسرین کریمیان شمس آبادی^۱، شجاع قربانی دشتکی^{۲*}، سید حسن طباطبائی^۳^{۱*} دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی علوم خاک - فیزیک و حفاظت خاک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران^{۲*} نویسنده مسئول مکاتبات: shoja2002@yahoo.com^۲ دانشیار گروه مهندسی علوم خاک - فیزیک و حفاظت خاک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۲۹

چکیده

آبگریزی خاک باعث افزایش مقاومت آن به مرطوب شدن می‌گردد. بسیاری از خصوصیات خاک از جمله ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی آن خاک تحت تأثیر آبگریزی قرار دارند. هدف از این پژوهش، مقایسه برخی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌هایی با آبگریزی متفاوت بوده. بدین منظور یک نمونه خاک آهکی با بافت لوم سیلتی رسی از اراضی دانشگاه شهرکرد تهیه و به وسیله افزودن لجن فاضلاب شهری با نسبت‌های $\frac{0}{100}$ ، $\frac{50}{50}$ و $\frac{80}{20}$ (گرم لجن فاضلاب به گرم خاک) تیمارها به ترتیب با سه درجه بدون آبگریزی (S0)، آبگریزی کم (S50) و آبگریزی زیاد (S80) انتخاب و تهیه شدند. آبگریزی خاک به روش مدت زمان نفوذ قطره آب به خاک اندازه‌گیری گردید. رطوبت وزنی تیمارهای آبگریزی شده در مکش‌های ماتریک ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۳۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر با دستگاه صفحات فشاری و جعبه شنی تعیین شد. پارامترهای مدل ون گنوختن شامل درصد رطوبت اشباع (θ_s)، درصد رطوبت باقی‌مانده (θ_r)، عکس نقطه ورود هوا (α) و پارامترهای شکل (m و n) با استفاده از نرم افزار RETC و حل معکوس تعیین گردید. نتایج نشان داد با افزایش نسبت لجن فاضلاب، آبگریزی خاک در تیمارهای S50 و S80 به ترتیب ۶۱ و ۲۵ برابر گردید. همچنین با آبگریزی شدن خاک روند تغییر رطوبت در برابر مکش خاک متفاوت گردید به صورتی که منحنی رطوبتی خاک با آبگریزی زیاد به منحنی رطوبتی دوکوهانه (Bimodal) تغییر یافت. مطابق نتایج پارامترهای رابطه ون گنوختن تحت تأثیر آبگریزی خاک قرار گرفتند و با افزایش درجه آبگریزی پارامترهای m و α کاهش و پارامترهای θ_s و n افزایش یافتند. همچنین، هدایت هیدرولیکی اشباع تحت تأثیر تیمارها کاهش یافت و مقدار آن از ۲/۱۹ سانتی‌متر بر ساعت در تیمار S0 به ۱/۱۸ سانتی‌متر بر ساعت در تیمار S80 رسید.

کلید واژه‌ها: آبگریزی خاک؛ مدل ون گنوختن؛ منحنی رطوبتی؛ هدایت هیدرولیکی اشباع

مقدمه

عبارت دیگر حضور ترکیبات آلی از جمله اسیدهای چرب، موم‌ها، تانن‌ها (Tannins) و صمغ‌ها باعث ایجاد خاصیت آبگریزی در خاک می‌شوند. اگر این مواد سطح ذرات منفرد خاک از جمله ذرات شن و خاکدانه‌ها را بپوشانند سبب ایجاد آبگریزی در خاک می‌گردند (Burch et al., 1987). اضافه شدن این گونه ترکیبات آلی به خاک تحت

مقاومت خاک به مرطوب شدن برای دوره‌های زمانی چند دقیقه‌ای، چند ساعته و یا زیادتر را آبگریزی خاک (Soil Water Repellency, SWR) گویند (Jong et al., 1999). آبگریزی خاک بر اثر پوشانده شدن سطح ذرات معدنی خاک به وسیله ترکیب‌های آبگریز ایجاد می‌شود. به

خاک می‌گذارد که اصلاح آن‌ها هزینه و زمان زیادی می‌طلبد (Debano, 1971). کاهش ظرفیت نفوذ آب به خاک، افزایش رواناب سطحی، کاهش پیوستگی خاک و آب، کاهش قابلیت خیس خوردگی خاک، خیس خوردگی غیر یکنواخت خاک، تاثیر بر توزیع سه بعدی و پویایی رطوبت خاک، افزایش سیلاب ناشی از باران‌های شدید و تشدید فرسایش، از مهمترین اثرات آبریزی خاک می‌باشد (Wallis, 1990). همچنین پژوهش‌ها بیانگر پیامدهای نامطلوب دفع آب خاک در زمینه‌ی هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی می‌باشد، به طوری که سالانه میلیون‌ها دلار در تمام دنیا برای کاهش خطرات ناشی از سیلاب‌های ناگهانی هزینه می‌شود (Imenson, 1992).

یکی دیگر از ویژگی‌هایی که آبریزی بر آن تاثیرگذار است منحنی رطوبتی خاک می‌باشد (Debano, 1981). رحیم خانی (۱۳۹۱) بیان کرد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از جمله منحنی رطوبتی خاک تحت تاثیر آبریزی خاک قرار دارند و با افزایش آبریزی خاک میزان نگهداشت آب در خاک افزایش می‌یابد، همچنین میزان درصد رطوبت حجمی در یک مکش معین نسبت به خاک آبدوست بیشتر است و منحنی‌های رطوبتی در خاک آبدوست و خاک‌های با درجات آبریزی مختلف متفاوت می‌باشد. Ojeda و همکاران (2006) نیز طی مطالعاتی تاثیر ۳ نوع لجن (تازه، کمپوست و خشک شده) در مقادیر یکسان (۱۰ تن در هکتار) در خاک‌های با بافت لومی و لوم شنی بر نگهداشت آب در خاک، پارامترهای منحنی رطوبتی و پدیده پسماند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد هر ۳ نوع لجن باعث افزایش میزان نگهداشت آب خاک شد. همچنین در همه‌ی مکش‌ها افزودن هر ۳ نوع لجن منجر به افزایش میزان رطوبت حجمی خاک نسبت به شاهد گردید. آن‌ها بیان کردند لجن فاضلاب تاثیر معنی‌داری بر پدیده پسماند و پارامترهای منحنی رطوبتی خاک دارد و تفاوت اندکی بین این ۳ نوع لجن مشاهده شد. آن‌ها علت این تغییرات را افزایش کربن آلی بواسطه‌ی افزودن لجن و

تاثیر عوامل مختلفی قرار دارد. از جمله این فاکتورها می‌توان به آتش‌سوزی، کاربرد پساب (Arey et al., 2011)، آلاینده‌های نفتی (Rasiah et al., 1990)، فعالیت برخی ریزجانداران خاک (Rilling, 2005) و کاربرد لجن فاضلاب (Ojeda et al., 2010) اشاره کرد.

لجن فاضلاب نوعی از پسماندهای آلی است که باعث افزایش غلظت عناصرغذایی پر مصرف و کم مصرف خاک از جمله نیتروژن، فسفر، پتاسیم، مس، روی و آهن برای رشد گیاه می‌گردد. همچنین می‌تواند سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شود (رونقی و بوستانی، ۱۳۹۱). تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که پسماندهای آلی به دلیل دارا بودن مقادیر زیاد ترکیبات آلی می‌توانند نقش بسزایی در تامین ماده آلی خاک و نیز کاهش زیان‌های ناشی از کمبود این مواد در خاک داشته باشند (نورمهند و همکاران، ۱۳۹۲). لجن فاضلاب ماده آلی خاک را افزایش می‌دهد. لیکن به علت وجود ترکیبات آبریز قابلیت مرطوب شدن را کاهش می‌دهد (Ojeda et al., 2010). کاربرد زیاد لجن فاضلاب به دلیل وجود مواد آبریز از قبیل چربی‌ها یا ترکیبات آمفیفیلیک (Amphiphilic) در آن قابلیت مرطوب شدن خاک را کاهش می‌دهد (Ojeda et al., 2010). رحیم خانی (۱۳۹۱) بیان نمود کاربرد مقادیر مختلف لجن فاضلاب شهری اثر معنی‌داری بر افزایش مدت زمان نفوذ قطره آب به داخل خاک دارد. خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب آبریز شده و با افزایش میزان لجن فاضلاب، آبریزی خاک نیز افزایش می‌یابد. Nelson و Kladvko (1979) بیان کردند افزودن لجن فاضلاب به خاک باعث افزایش نگهداشت آب در رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) می‌شود و بیشترین درصد افزایش نگهداشت آب به تیمارهای با درصد لجن زیاد و بافت درشت مربوط است.

آبریزی خاک و تشکیل لایه‌های دافع آب به ویژه در لایه‌های سطحی خاک خسارات جبران ناپذیری بر کیفیت

این تصفیه خانه سیستم لجن فعال از نوع هوادهی گسترده می‌باشد. هر ۳ مرحله تصفیه در این تصفیه خانه بر فاضلاب اعمال می‌شود. بدین منظور ابتدا لجن را هوا خشک کرده و از الک ۱ میلی‌متری عبور داده شد و قبل از شروع آزمایش برخی خصوصیات شیمیایی لجن فاضلاب شهری اندازه‌گیری گردید. از آنجائی‌که هدف بدست آوردن سه سطح متفاوت آبریزی (بدون آبریزی، آبریزی کم و آبریزی زیاد) بود، در ابتدا با اضافه کردن لجن فاضلاب با نسبت‌های وزنی $\frac{0}{100}$ ، $\frac{10}{90}$ ، $\frac{20}{80}$ ، $\frac{30}{70}$ و $\frac{80}{20}$ (گرم لجن فاضلاب به گرم خاک) به نمونه‌های مورد مطالعه، خاک آبریز گردید. در نهایت با نسبت‌های $\frac{0}{100}$ ، $\frac{50}{50}$ و $\frac{80}{20}$ (گرم لجن فاضلاب به گرم خاک) تیمارها به ترتیب با سه درجه بدون آبریزی (S0)، آبریزی کم (S50) و آبریزی زیاد (S80) انتخاب و تهیه شدند. نمونه‌ها پس از یک سال تیمار شدن با لجن فاضلاب در ۴ تکرار مورد آزمایش قرار گرفتند. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و لجن فاضلاب مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه گردیده است.

در نتیجه تغییر در زاویه تماس آب به خاک و آبریز شدن خاک دانستند. Rawle و همکاران (2003) نیز بیان نمودند کربن آلی خاک از طریق تغییر در جرم مخصوص ظاهری و بافت خاک بر میزان نگهداشت آب در خاک موثر است. De Jong (1983) طی پژوهش‌های خود بیان کرد کربن آلی خاک باعث افزایش رطوبت حجمی در تمامی مکش‌ها می‌گردد. لجن فاضلاب بواسطه‌ی افزایش درصد کربن آلی خاک باعث تغییر در منحنی رطوبتی خاک و همچنین پدیده پسماند رطوبتی می‌شود (Abu-Zreig, 2003). با توجه به اهمیت آبریزی خاک و تأثیری که بر ویژگی‌های خاک از جمله منحنی رطوبتی خاک دارد و مطالعات اندکی در بررسی آبریزی خاک و تفاوت‌های کمی بین پارامترهای تحت تأثیر آبریزی انجام شده است، در این پژوهش به بررسی منحنی رطوبتی، پارامترهای مدل ون گنوختن و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های اراضی دانشگاه شهرکرد با بافت لوم سیلتی رسی که توسط افزودن نسبت‌های متفاوت لجن فاضلاب شهری آبریز شدند، پرداخته شد.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های خاک و لجن فاضلاب شهری مورد مطالعه

ویژگی	واحد	خاک	لجن
شن (Sand)	(%)	۱۳/۲۰	-
سیلت (Silt)	(%)	۵۳/۹۰	-
رس (Clay)	(%)	۳۲/۹۰	-
هدایت هیدرولیکی اشباع (K_s)	(cmh ⁻¹)	۲/۱۹	-
واکنش خاک (pH)	-	۷/۴۰	۶/۷۰
هدایت الکتریکی (EC)	(dSm ⁻¹)	۰/۳۰	۳/۹۰
کربن آلی (OC)	(%)	۰/۸۰	۲۶/۷۰
کربنات کلسیم معادل (CaCO ₃)	(%)	۳۰	۳/۳۰
سدیم محلول (Na ⁺)	(ppm)	۱۲۴	-
پتاسیم محلول (K ⁺)	(ppm)	۲۶۱	-

EC در سوسپانسیون ۵ به ۱ و pH در سوسپانسیون ۱۰ به ۱ (آب به خاک) تعیین شد.

برای اندازه‌گیری درجه آبریزی خاک مورد مطالعه از روش زمان نفوذ قطره (Water Drop Penetration Time) استفاده شد و از الگوی Dekker و Ritsema (1994) برای طبقه‌بندی آبریزی خاک استفاده گردید. به این صورت

مواد و روش‌ها

در این پژوهش نمونه‌های خاک مورد مطالعه از اراضی دانشگاه شهرکرد از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر تهیه شدند. این منطقه دارای اقلیم نیمه خشک واقع در بخش مرکزی زاگرس است. ارتفاع منطقه از سطح دریا ۲۰۷۰m می‌باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی در این منطقه به ترتیب زریک و مزیک و میانگین بارندگی سالانه این منطقه mm ۳۲۰ می‌باشد (اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری، ۱۳۸۸). نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن، از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد، سپس برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از افزودن لجن اندازه‌گیری شدند. لجن فاضلاب شهری مورد مطالعه از بخش لجن خشک شده‌ی حوضچه‌های جمع‌آوری لجن تصفیه خانه فاضلاب شهرکرد تهیه گردید (سیستم تصفیه فاضلاب در

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad h < 0 \\ \theta_s \\ 0 \geq h \end{array} \right. \quad (1)$$

در این رابطه $\theta(h)$ (L^3/L^3) ، θ_r (L^3/L^3) ، θ_s (L^3/L^3) به ترتیب رطوبت در مکش h ، رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع، α (L^{-1}) عکس نقطه ورود هوا، m و n پارامترهای شکل می‌باشند.

پس از اندازه‌گیری پارامترهای ذکر شده در ۴ تکرار جدول تجزیه واریانس (ANOVA) برای بررسی اثرات هر تیمار محاسبه و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش LSD فیشر در سطح احتمال ۵٪ در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم افزار SAS ویرایش ۹ مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

در این پژوهش بر اساس الگوی طبقه بندی دکر و ریتسما (*Dekker and Ritsema, 1994*) تیمارهای بدون لجن فاضلاب (مدت زمان نفوذ قطره، کمتر از ۲ ثانیه) آبدوست (S0)، تیمار با نسبت $\frac{50}{50}$ (مدت زمان نفوذ قطره، کمتر از ۲۵ ثانیه) آبگریزی جزئی (S50) و تیمار با نسبت $\frac{80}{20}$ (مدت زمان نفوذ قطره، ۶۰ ثانیه) آبگریزی زیاد (S80) طبقه بندی شد. براساس نتایج حاصله (جدول ۲)، افزودن لجن فاضلاب در سطح احتمال ۵٪ اثر معنی‌داری بر آبگریزی خاک داشت و با افزایش نسبت لجن، آبگریزی خاک افزایش یافت. به گونه ای در تیمار S80 و S50 میزان آبگریزی خاک به ترتیب ۶۱ و ۲۵ برابر گردید.

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر مصرف لجن

فاضلاب بر مدت زمان نفوذ قطره آب به خاک (WDPT)		
منبع تغییر	df	WDPT (ثانیه)
لجن فاضلاب	۲	۴۶
خطا	۹	۰/۶۳
ضریب تغییرات	-	۱/۸۰
Pr>F		≤۰/۰۰۰۱

منحنی رطوبتی اندازه‌گیری شده در تیمارهای S0، S50 و S80 در حالت خشک شدن (شکل ۱) نشان می‌دهد در

که اگر WDPT کمتر از ۵ ثانیه باشد، خاک قابل مرطوب شدن، ۵ تا ۶۰ ثانیه خاک به طور جزئی آبگریزی، ۶۰ تا ۳۶۰۰ ثانیه خاک تقریباً آبگریزی، ۳۶۰۰ تا ۶۰۰۰ ثانیه خاک به شدت آبگریزی و بیشتر از ۳۶۰۰ ثانیه خاک کاملاً آبگریزی می‌باشد (*Dekker and Ritsema, ; Debano, 1981*)، جرم ویژه ظاهری (ρ_b) به روش سیلندر (*Blake and Hatage, 2011*)، pH خاک در سوسپانسیون ۱:۱۰ (آب به خاک) (*Thomas, 1996*)، درصد کربن آلی خاک به روش والکی بلک (*Nelson and Summers, 1996*)، پتاسیم و سدیم محلول خاک با استفاده از دستگاه فلیم فتومتر مدل ۴۱۰ (*Rhoades, 1986*)، کربنات کلسیم معادل با روش خشتی کردن کربنات‌های خاک با اسید کلریدریک و تیتراسیون برگشتی اسید اضافی (*Leoppert and Sparks, 1996*)، هدایت الکتریکی در سوسپانسیون ۱:۵ (آب به خاک) با استفاده از دستگاه هدایت سنج مدل سی ۵۰۱ المیرون (*Rhoades, 1986*) (C 501 Elmeiron)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نیز به روش بارافتان (*Bagarello and Sgroi, 2007*) اندازه‌گیری گردید.

رطوبت وزنی نمونه‌های خاک مورد مطالعه در مکش‌های ماتریک ۰، ۵، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۳۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر با دستگاه صفحات فشاری و صفحه شنی در ۴ تکرار تعیین شد. در مکش‌های پایین تر از ۱۰۰ سانتی‌متر از دستگاه جعبه شنی و در مکش‌های بالاتر از ۱۰۰ سانتی‌متر از دستگاه صفحات فشاری استفاده شد. پس از تعیین رطوبت وزنی نمونه‌ها، با استفاده از جرم مخصوص ظاهری آن‌ها به رطوبت حجمی تبدیل و منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌ها ترسیم گردید. سپس معادله ون گنوختن که به شکل رابطه ۱ است (*Van Genuchten, 1980*) بر داده‌های منحنی رطوبتی برازش داده شد و پارامترهای آن به روش حداقل سازی مجموع مربعات خطا تعیین گردید. در نهایت با استفاده از نرم افزار RETC و حل معکوس پارامترهای رابطه ون گنوختن تعیین شد.

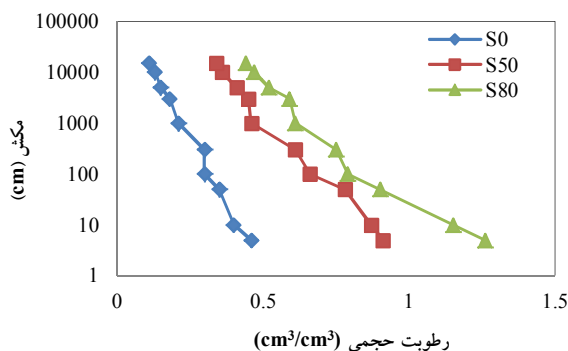
مکش‌های ماتریک اعمال شده کمترین رطوبت حجمی مربوط به تیمار S0 و بیشترین آن مربوط به تیمار S80 بود. به گونه‌ای که در تیمار S80 و S50 میزان رطوبت اشباع به ترتیب ۲/۵۰ و ۱/۹ برابر شد. خاک آبریز در ابتدا نسبت به نفوذ آب مقاومت نشان می‌دهد و نسبت به خاک آبدوست، آب کمتری جذب می‌کند لیکن پس از نفوذ آب به خاک آبریز، این خاک آب بیشتری نسبت به تیمارهای دیگر جذب می‌کند. در این پژوهش ابتدا تیمارها در مکش صفر دستگاه اشباع گردیدند و سپس سایر مکش‌ها اعمال گردید. در نتیجه میزان رطوبت جذب شده در تیمار S80 نسبت به سایر تیمارها بیشتر بود. همچنین با توجه به اینکه در این پژوهش از لجن فاضلاب برای آبریز شدن خاک استفاده گردید و لجن فاضلاب آب زیادی جذب می‌کند در نتیجه حجم خاک مرطوب نسبت به خاک خشک افزایش می‌یابد و منجر به افزایش رطوبت حجمی زیادتر از ۱ می‌گردد. همچنین میزان رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم در تیمار S80 و S50 به ترتیب ۱/۹۷ و ۲/۴۲ برابر و ۳ و ۴ برابر گردید. با آبریز شدن خاک منحنی رطوبتی خاک تغییر نمود و با آبریزی شدید منحنی رطوبتی به منحنی رطوبتی دوکوهانه (Bimodal) تغییر یافت. برابر با نظریه مویبگی علت ایجاد منحنی دونمایی وجود یک توزیع اندازه منافذ دونمایی در خاک‌ها می‌باشد. همچنین در تیمار S80 مدت زمان نفوذ قطره ۶۱ ثانیه و دارای بیشترین ماده آلی و در نتیجه نگهداشت آب در این خاک نسبت به تیمارهای S0 و S50 بیشتر است. هر چه مقدار کربن آلی خاک بیشتر شده (افزایش لجن فاضلاب شهری) مقدار رطوبت در مکشی معین افزایش می‌یابد (Kayode et al., 2009).

منحنی رطوبتی تیمار S0 دارای شیب تندتری نسبت به تیمارهای آبریز بود. تیمارهای آبریز دارای توزیع گسترده‌ی اندازه‌ی منافذ خاک می‌باشد بنابراین منحنی، دارای شیب ملایم‌تر است و شیب نقطه‌ی ورود هوا و نقطه‌ی خشک شدگی کامل خاک ملایم می‌باشد (Kayode et al., 2009).
نتایج Ojeda و همکاران (2010) نیز نشان داد که ظرفیت نگهداشت آب در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب تغییر می‌کند. به گونه‌ای که افزودن لجن باعث افزایش نگهداشت آب در خاک شد. مطالعات نورمهنداد و طباطبائی (۱۳۹۲) نیز تایید کننده تاثیر اضافه شدن لجن فاضلاب و آبریزی خاک بر منحنی مشخصه رطوبتی است و بیان نمودند منحنی مشخصه رطوبتی در خاک‌های آبریز شده توسط لجن فاضلاب در تمامی مکش‌ها به استثنای مجاورت مکش ۱۰۰ سانتی‌متر تفاوت چشمگیری با یکدیگر داشتند. همچنین گزارش کردند تیمارهای با بافت یکسان و درصد لجن کم‌تر در مکش ۱۵۰۰۰ تفاوت معنی‌داری نداشتند. همچنین در حالت مرطوب شدن (شکل ۱) در مکش‌های ماتریک اعمال شده کمترین رطوبت حجمی مربوط به تیمار S0 و بیشترین آن مربوط به تیمار با 80 درصد لجن بود. اختلاف در میزان رطوبت حجمی در حالت مرطوب و خشک شدن در مکش‌های پایین بیشتر بوده و با افزایش مکش‌های بالاتر از ۱۰۰ سانتی‌متر تفاوتی مشاهده نگردید.

با توجه به مقایسه منحنی‌های رطوبتی در حالت خشک و مرطوب شدن (شکل ۱) مقدار رطوبت در زمان مرطوب شدن کمتر از زمان خشک شدن است (پسماند رطوبتی) و با افزایش آبریزی خاک پدیده پسماند بیشتر نمایان شد. به عبارت دیگر میزان رطوبت اشباع در حالت مرطوب شدن نسبت به حالت خشک شدن در تیمار S0 و S50 و S80، به ترتیب ۵/۴۵ درصد، ۱۱/۹۰ درصد و ۱۵/۱۰ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش مصرف لجن فاضلاب پدیده پسماند رطوبتی بیشتر بود. به گونه‌ای که در مکش صفر در تیمار S50 و S80 اختلاف در پدیده پسماند رطوبتی به ترتیب ۲/۲۰ و ۲/۸۰ برابر گردید. در یک نقطه رطوبتی معین در منحنی خشک مکش بیشتر لیکن در منحنی مرطوب شدن مکش کمتری نیاز است. در حقیقت زمانی که یک نوع خاک مرطوب می‌شود نسبت به زمان خشک شدن، آب کمتری در خود نگه می‌دارد (Kirkham, 1964).

مکش‌های ماتریک اعمال شده کمترین رطوبت حجمی مربوط به تیمار S0 و بیشترین آن مربوط به تیمار S80 بود. به گونه‌ای که در تیمار S80 و S50 میزان رطوبت اشباع به ترتیب ۲/۵۰ و ۱/۹ برابر شد. خاک آبریز در ابتدا نسبت به نفوذ آب مقاومت نشان می‌دهد و نسبت به خاک آبدوست، آب کمتری جذب می‌کند لیکن پس از نفوذ آب به خاک آبریز، این خاک آب بیشتری نسبت به تیمارهای دیگر جذب می‌کند. در این پژوهش ابتدا تیمارها در مکش صفر دستگاه اشباع گردیدند و سپس سایر مکش‌ها اعمال گردید. در نتیجه میزان رطوبت جذب شده در تیمار S80 نسبت به سایر تیمارها بیشتر بود. همچنین با توجه به اینکه در این پژوهش از لجن فاضلاب برای آبریز شدن خاک استفاده گردید و لجن فاضلاب آب زیادی جذب می‌کند در نتیجه حجم خاک مرطوب نسبت به خاک خشک افزایش می‌یابد و منجر به افزایش رطوبت حجمی زیادتر از ۱ می‌گردد. همچنین میزان رطوبت ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم در تیمار S80 و S50 به ترتیب ۱/۹۷ و ۲/۴۲ برابر و ۳ و ۴ برابر گردید. با آبریز شدن خاک منحنی رطوبتی خاک تغییر نمود و با آبریزی شدید منحنی رطوبتی به منحنی رطوبتی دوکوهانه (Bimodal) تغییر یافت. برابر با نظریه مویبگی علت ایجاد منحنی دونمایی وجود یک توزیع اندازه منافذ دونمایی در خاک‌ها می‌باشد. همچنین در تیمار S80 مدت زمان نفوذ قطره ۶۱ ثانیه و دارای بیشترین ماده آلی و در نتیجه نگهداشت آب در این خاک نسبت به تیمارهای S0 و S50 بیشتر است. هر چه مقدار کربن آلی خاک بیشتر شده (افزایش لجن فاضلاب شهری) مقدار رطوبت در مکشی معین افزایش می‌یابد (Kayode et al., 2009).

منحنی رطوبتی تیمار S0 دارای شیب تندتری نسبت به تیمارهای آبریز بود. تیمارهای آبریز دارای توزیع گسترده‌ی اندازه‌ی منافذ خاک می‌باشد بنابراین منحنی، دارای شیب ملایم‌تر است و شیب نقطه‌ی ورود هوا و نقطه‌ی خشک شدگی کامل خاک ملایم می‌باشد (Kayode et al., 2009).

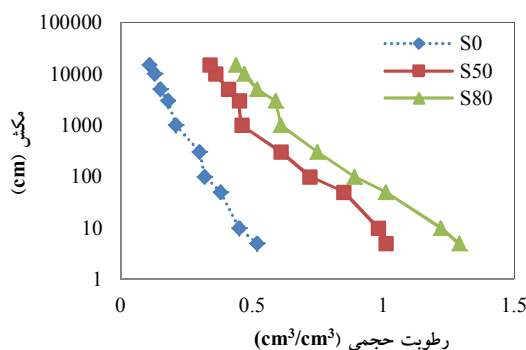


(ب)

شکل ۱. منحنی رطوبتی در حالت خشک (الف) و مرطوب شدن (ب) در تیمارهای آزمایشی

نتایج (جدول ۳) نشان می‌دهد مصرف لجن فاضلاب بر پارامترهای مدل ون گنوختن در حالت خشک شدن تاثیر معنی‌دار ($P \leq 0.0001$) داشت. بیشترین رطوبت اشباع در حالت خشک شدن مربوط به تیمار S80 و کمترین رطوبت اشباع مربوط به تیمار S0 بود (جدول ۴). در بررسی شفیع پور (۱۳۹۰) نیز افزودن لجن فاضلاب باعث افزایش درصد رطوبت اشباع خاک شد. نتایج این پژوهش با مطالعات نورمهند و همکاران (۱۳۹۲) مطابقت دارد. کمترین رطوبت اشباع مربوط به تیمار S0 بود که علت را به کمتر بودن ماده آلی تیمار مربوط کرد. همچنین میزان رطوبت باقیمانده با افزایش آبگریزی خاک، افزایش یافت به صورتی که در تیمار S50 و S80 میزان رطوبت باقیمانده ۲۷/۵۰ و ۲۱/۲۵ برابر گردید. این موضوع نیز می‌تواند به دلیل بیشتر بودن کربن آلی در تیمارهای S50 و S80 باشد. بر اساس نتایج (جدول ۳) پارامتر α بین تیمارهای S0 و S80 تفاوت معنی‌داری نداشت. لیکن بین تیمارهای S0 و S50، S50 و S80 تفاوت معنی‌دار بود. پارامتر α در تیمار S0 دارای بیشترین مقدار و در تیمار S50 کمترین مقدار بود (جدول ۴). Bauters و همکاران (2000) نیز طی مطالعات خود بیان کردند میزان ورود هوا در خاک‌های آبدوست نصف میزان آن در خاک‌های آبگریز است. بر اساس نتایج (جدول ۳) پارامتر n بین تیمارهای S0 و S80 معنی‌دار نبود. لیکن بین تیمارهای S50 و S0، S50 و S80

(2005). تغییر در زاویه قرار گرفتن سطح آب در خلل و فرج در حالت مرطوب و خشک شدن (Lety et al., 2000) و نظریه کوزه‌ای بودن خلل و فرج خاک (علیزاده، ۱۳۸۰) باعث تفاوت در منحنی‌های رطوبتی در حالت مرطوب و خشک شدن می‌شود. نتایج حاصل از منحنی‌های رطوبتی در حالت مرطوب و خشک شدن در مطالعات Ojeda و همکاران (2010) نیز حاکی از آن بود که در خاک‌های آبگریز نگهداشت رطوبت در حالت مرطوب و خشک شدن تحت تاثیر آبگریزی خاک قرار دارد و با افزایش آبگریزی خاک، مکش بیشتری برای رسیدن به رطوبت حجمی ثابت لازم است. نتایج دیگر مطالعات نیز نشان می‌دهد شرایط آبگریزی خاک می‌تواند زاویه تماس آب با خاک را به شدت تحت تاثیر قرار دهد (Lety et al., 2000). Nieber و همکاران (۲۰۰۰) در مطالعات خود روی خاک‌های آب‌گریز شنی، با درجات مختلف آبگریزی، منحنی‌های رطوبتی در حالت مرطوب و خشک شدن را تعیین کردند. منحنی‌های خاک‌های آبگریز با درجات مختلف آب‌گریزی بسیار به هم شبیه بودند و در محدوده‌ی اشباع منحنی‌ها تقریباً یکسان بودند لیکن در حدود درجه اشباع کمتر از ۴۰ درصد با یکدیگر تفاوت داشتند.



(الف)

مرطوب شدن نیز تاثیر داشته باشد. مطابق نتایج حاصله جدول تجزیه واریانس (۳) آبگریزی خاک بر اکثر پارامترهای مدل ون گنوختن تاثیر معنی داری (P ۰/۰۰۰۱) کداشت. همانطور که جدول ۴ نشان می‌دهد بیشترین میزان رطوبت اشباع مربوط به تیمار S80 و کمترین آن مربوط به تیمار S0 بود. در تیمار S80 میزان رطوبت اشباع ۲/۳ برابر و در تیمار S50 ۱/۸ برابر شد. علت را می‌توان مربوط به بیشتر بودن ماده آلی در تیمار S80 در نتیجه مصرف لجن فاضلاب و افزایش آبگریزی خاک دانست. میزان رطوبت باقیمانده نیز با افزایش نسبت لجن مصرفی و بالطبع افزایش آبگریزی خاک، افزایش یافت. پارامتر α در حالت مرطوب شدن نیز تحت تاثیر آبگریزی خاک قرار داشت و در تیمار S50 کاهش یافت. لیکن در درجه آبگریزی شدید تفاوت معنی داری مشاهده نشد. مطابق نتایج حاصله (جدول ۳) پارامتر n بین تیمارهای S0 و S80 تفاوت معنی دار نداشت. لیکن بین تیمار S0 و S80 تفاوت معنی دار بود. افزایش آبگریزی منجر به افزایش پارامتر n شد لیکن در درجات شدید آبگریزی این پارامتر کاهش یافت (جدول ۴). پارامتر m در حالت تر شدن نیز تحت تاثیر آبگریزی قرار گرفت (جدول ۳). با افزایش آبگریزی خاک پارامتر m کاهش یافت (جدول ۴).

پارامترهای مدل ون گنوختن در حالت مرطوب و خشک شدن متفاوت از یکدیگر بودند (جدول ۴). مقدار رطوبت اشباع در تیمارهای S0, S50, S80 در حالت مرطوب شدن نسبت به حالت خشک شدن کمتر بود. به صورتی که در حالت مرطوب شدن میزان رطوبت اشباع در تیمارهای S0, S50, S80 به ترتیب ۵/۵، ۱۱/۲۱ و ۱۴/۴۰ نسبت به حالت خشک شدن کاهش یافت (جدول ۴). این موضوع به دلیل افزایش تفاوت بین درجه اشباع در حالت مرطوب و خشک شدن با افزایش آبگریزی خاک می‌باشد. به عبارت دیگر آبگریزی باعث تفاوت بیشتر رطوبت اشباع در حالت مرطوب و خشک شدن می‌شود (نورمهند و طباطبائی، ۱۳۹۲).

تفاوت معنی داری وجود داشت. مقدار n در تیمار S50 با افزایش آبگریزی دارای بیشترین مقدار بود. لیکن در تیمار S80 به دلیل آبگریزی زیادتر و وجود مواد آبگریز در سطح ذرات خاک کاهش یافت. چنین می‌توان بیان کرد که آبگریزی شدید باعث کاهش پارامتر n شد. پارامتر n به لحاظ اینکه با افزایش سهم ذرات درشت و به تبع آن منافذ درشت افزایش می‌یابد (Nabizadeh and Beigi, 2010). پارامتر m بین تمامی تیمارها تفاوت معنی داری داشت (جدول ۳). با افزایش آبگریزی خاک، پارامتر m کاهش یافت. به بیان دیگر در تیمار S80 پارامتر m نسبت به تیمار شاهد ۱۲/۱۲ درصد و در تیمار S50 ۶ درصد کاهش یافت (جدول ۴). نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعات رحیم خانی (۱۳۹۱) مطابقت دارد و با افزایش درجه آبگریزی پارامترهای m و α کاهش و پارامترهای Θ_s و n افزایش یافتند.

نورمهند و همکاران (۱۳۹۲) نیز به منظور تعیین منحنی رطوبتی خاک و پارامترهای مدل ون گنوختن در خاک‌های آبگریز شده در اثر قرار دادن در کوره با حرارت بالا، یک نوع خاک آلی با آبگریزی اندک به مدت ۳۰ دقیقه در دماهای ۱۰۰(T100)، ۲۰۰(T200)، ۳۰۰(T300)، ۴۰۰(T400) و ۵۰۰(T500) درجه سانتی گراد در کوره حرارت دادند. نتایج حاصل از مطالعات آن‌ها حاکی از آن بود که پارامترهای معادله ون گنوختن تحت تاثیر آبگریزی خاک قرار داشت. همچنین نتایج آنها نشان داد تیمار T500 دارای کمترین مقدار رطوبت اشباع که آن را به افزایش ذرات هم اندازه شن، از بین رفتن مواد آلی و تشکیل خاکستر ارتباط دادند. پارامتر α در تیمارهای خاک آبگریز (T300 و شاهد) نسبت به سایر تیمارها کمتر بود. همچنین پارامتر n در تیمارهای آبگریز شده با حرارت نسبت به سایر تیمارها بیشتر بود.

منحنی رطوبتی خاک در حالت مرطوب شدن نیز به شدت تحت تاثیر آبگریزی خاک قرار می‌گیرد. همچنین آبگریزی خاک می‌تواند بر پارامترهای مدل ون گنوختن در حالت

قطر منافذ، تغییر در شعاع پیشروی و پسروی سطح هلالی شکل آب، هوای محبوس شده و فرآیند تورم یا فرو نشست خاک (Hillel, 1980) از جمله عوامل اصلی در ایجاد پدیده پسماند یا به عبارت دیگر تفاوت در پارامترهای مدل ون گنوختن در حالت مرطوب و خشک شدن می‌باشند.

میزان رطوبت باقیمانده نیز در حالت مرطوب شدن نسبت به حالت خشک شدن در تیمارهای S0، S50 و S80 به ترتیب ۳۷/۵، ۶۴/۷۰ و ۴۰/۹ درصد کاهش یافت. پارامتر α در حالت مرطوب شدن نسبت به حالت خشک شدن بیشتر بود. علت کمتر بودن ورود هوا در حالت تر شدن می‌باشد. تفاوتی در پارامتر m بین تیمارهای مربوطه در حالت مرطوب و خشک شدن مشاهده نگردید. تغییرات

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر آبریزی خاک بر پارامترهای مدل ون گنوختن از جمله Θ_s (درصد رطوبت اشباع)، Θ_r (درصد رطوبت باقیمانده)، α (عکس مکش ورود هوا)، n و m (پارامترهای شکل) در تیمارهای آزمایش در حالت خشک و مرطوب شدن

منبع تغییر	df	Θ_s	Θ_r	α	n	m
خشک شدن						
لجن فاضلاب	۲	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۱۶	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۱
خطا	۹	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۱۳	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۹
ضریب تغییرات	-	۰/۵۷	۱۱/۱۰	۸/۶۳	۰/۷۲	۰/۱
$pr > F$	-	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۲	<۰/۰۰۰۱
مرطوب شدن						
لجن فاضلاب	۲	۰/۱۴۹	۰/۱۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱
خطا	۹	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۳
ضریب تغییرات	-	۰/۳۲	۶/۵۰	۷/۲۳	۰/۷۷	۰/۰۲
$Pr > F$	-	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۱	<۰/۰۰۰۴	۰/۰۵	<۰/۰۰۰۱

جدول ۴. اثر آبریزی خاک بر پارامترهای مدل ون گنوختن از جمله Θ_s (درصد رطوبت اشباع)، Θ_r (درصد رطوبت باقیمانده)، α (عکس مکش ورود هوا)، n و m (پارامترهای شکل) در تیمارهای آزمایشی در حالت خشک و مرطوب شدن

تیمار لجن	Θ_r	Θ_s	α	n	m
خشک شدن					
S0	۰/۰۰۸ ^C	۰/۵۴ ^C	۰/۱۳ ^A	۱/۱۹ ^B	۰/۳۳ ^A
S50	۰/۱۷ ^B	۱/۰۷ ^B	۰/۰۶ ^B	۱/۲۵ ^A	۰/۳۱ ^B
S80	۰/۲۲ ^A	۱/۳۹ ^A	۰/۱۲ ^A	۱/۲۰ ^B	۰/۲۹ ^C
مرطوب شدن					
S0	۰/۰۰۵ ^C	۰/۵۱ ^C	۰/۱۷ ^A	۱/۱۸ ^B	۰/۳۳ ^A
S50	۰/۰۶۱ ^B	۰/۹۵ ^B	۰/۰۸ ^B	۱/۲۶ ^A	۰/۳۱ ^B
S80	۰/۱۳ ^A	۱/۱۹ ^A	۰/۱۶ ^A	۱/۱۹ ^B	۰/۲۹ ^C

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۰.۵٪ براساس آزمون LSD می‌باشند.

جدول ۶. اثر لجن فاضلاب شهری بر هدایت هیدرولیکی اشباع

خاک (K_s)	
تیمار لجن	K_s (cmh^{-1})
S0	$2/19^A$
S50	$1/45^B$
S80	$1/18^C$

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف متفاوت، دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ براساس آزمون LSD می‌باشند.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این مطالعه لجن فاضلاب منجر به آبگریزی شدن خاک گردید که می‌تواند به علت وجود ترکیبات آبگریز در لجن فاضلاب باشد. افزایش مصرف لجن باعث تفاوت در منحنی مشخصه رطوبتی خاک‌های آبگریز گردید. به گونه‌ای که منحنی رطوبتی خاک با آبگریزی شدید به منحنی رطوبتی دوکوهانه (*Bimodal*) تغییر یافت. همچنین با افزایش مصرف لجن میزان رطوبت حجمی خاک افزایش یافت. به صورتی که کمترین رطوبت حجمی مربوط به تیمار S0 و بیشترین آن مربوط به تیمار S80 بود که دلیل این امر می‌تواند بیشتر بودن کربن آلی در تیمار S80 و در نتیجه افزایش نگهداشت آب در خاک باشد. میزان پسماند رطوبتی اندازه‌گیری شده نیز وابسته به میزان آبگریزی خاک بود. به گونه‌ای که با افزایش نسبت لجن فاضلاب و آبگریزی شدن خاک اختلاف در منحنی رطوبتی در حالت مرطوب و خشک شدن (پسماند رطوبتی) بیشتر گردید. همچنین پارامترهای مدل ون گنوختن ($\theta_r, \theta_s, m, n, \alpha$) تحت تاثیر آبگریزی خاک و با یکدیگر تفاوت معنی‌داری داشتند. به صورتی که با افزایش درجه آبگریزی پارامترهای m و α کاهش و پارامترهای θ_s و n افزایش یافتند. نتایج حاکی از این پژوهش نشان داد که هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نیز می‌تواند تحت تاثیر آبگریزی خاک قرار گیرد. به صورتی که بیشترین هدایت هیدرولیکی مربوط به تیمار S0 و کمترین آن مربوط به تیمار S80 بود. وجود ذرات معدنی و آلی موجود در لجن

لجن فاضلاب بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک تاثیر معنی‌داری ($P \leq 0/0001$) داشت (جدول ۵). به گونه‌ای که بیشترین هدایت هیدرولیکی مربوط به تیمار S0 و کمترین آن مربوط به تیمار S80 بود (جدول ۶). به عبارت دیگر در تیمار S80 هدایت هیدرولیکی اشباع خاک $67/12$ درصد و در تیمار S50 $33/78$ درصد کاهش یافت (جدول ۶). علت می‌تواند متورم شدن خاک و بسته شدن منافذ خاک در اثر تورم لجن تورم پذیر باشد. رحیم خانی (۱۳۹۱) نیز بیان نمود وجود ذرات معدنی و آلی در لجن فاضلاب ممکن است باعث انسداد خلل و فرج خاک به خصوص در لایه‌های سطحی خاک شود. این امر می‌تواند باعث کاهش میزان نفوذ آب به درون خاک و هدایت هیدرولیکی خاک شود. بررسی *Nieber* و همکاران (2000) نشان داد خاک‌های آبگریز شده با محلول *octadecyltrichlorosilane* هدایت هیدرولیکی بالاتری نسبت به خاک‌های آبدوست داشتند. *Eepstein* (1975) بیان نمود هدایت هیدرولیکی در اثر افزودن لجن فاضلاب افزایش می‌یابد و این افزایش در خاک‌های رسی چشمگیرتر است. آنچه تعیین کننده میزان تداوم اثر لجن فاضلاب بر هدایت هیدرولیکی است مقدار لجن فاضلاب اضافه شده به خاک است. همچنین با گذشت زمان مواد آلی موجود در لجن می‌تواند تجزیه شود و منجر به تفاوت اثرات آن بر هدایت هیدرولیکی خاک گردد. کاربرد لجن، ابتدا هدایت هیدرولیکی خاک را افزایش می‌دهد لیکن ۵۰ تا ۸۰ روز پس از استفاده از لجن فاضلاب هدایت هیدرولیکی کاهش یافته و با مقدار آن در خاک شاهد برابر می‌شود (*Eepstein, 1975*).

جدول ۵. نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر لجن فاضلاب

شهری بر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_s)		
منبع تغییر	df	K_s
لجن فاضلاب	۲	$1/085$
خطا	۹	$0/0005$
ضرب تغییرات	-	$2/47$
$pr > F$		$\leq 0/0001$

فاضلاب و همچنین متورم شدن خاک ناشی از افزودن لجن فاضلاب باعث انسداد خلل و فرج خاک و در نتیجه کاهش میزان نفوذ آب به درون خاک و هدایت هیدرولیکی آن گردید.

فهرست منابع

- ذوالفقاری، ع.ا. و حاج عباسی، م. ۱۳۸۷. تاثیر کاربری اراضی بر خصوصیات فیزیکی و آبریزی خاک در مراتع فریدون شهر و جنگل‌های لردگان. مجله آب و خاک علوم و صنایع کشاورزی، ۲۲: ۲۵۱ - ۲۶۲.
- رحیم خانی، ی. ۱۳۹۱. کارایی منحنی رطوبتی اندازه گیری شده با دستگاه صفحات فشاری برای شبیه سازی حرکت آب در خاک آبریز. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی. دانشگاه شهرکرد. ایران.
- علیزاده ا. ۱۳۸۰. رابطه آب خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه قدس رضوی. مشهد-ایران. ۴۷۲ صفحه.
- نورمهند، ن.، طباطبایی، س.ح.، نوری امامزاده ای، م.ح. و قربانی دشتکی، ش. ۱۳۹۲. تعیین منحنی رطوبتی و پارامترهای معادله ون گنوختن در خاک های آبدوست و آبریز شده در اثر حرارت. مجله پژوهش های (علوم خاک و آب). ۲۷ (۴): ۵۷۳ - ۵۸۲.
- Abu-Zreig, M., Rudra, P.P., and Dickinson, W.T. 2003. Effect of surfactants on hydraulic properties of soils. *Journal of Biosystems Engineering*, 84: 363-372.
- Arye, G., Tarchitzky, J., and Chen, Y. 2011. Treated wastewater effects on water repellency and soil hydraulic properties of soil aquifer treatment infiltration basins. *Journal of Hydrology*, 397: 136-145.
- Bagarello, V., and Sgroi, A. 2007. Using the simplified falling head technique to detect temporal changes in field-saturated hydraulic conductivity at the surface of a sandy loam soil. *Journal of Soil and Tillage Research*, 94: 283-294.
- Bauters, T.W.J., Steenhuis, T.S., Dicarlo, D.A., Nieber, J.L., Dekker, L.W., Ritsema, C.J., and Parlange, J.Y. 2000. Physics of water repellent soils. *Journal of Hydrology*, 231-243.
- Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Bulk density. In: Klute, A (ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI: PP. 363-375.
- 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 metal. *Journal of Contaminant Hydrology*, 88: 249-268.
- Burch, G.J. Moor, J.D. and Burns, J. 1987. Soil hydrophobic effects on infiltration and catchment runoff. *Journal of Hydrological Processes*, 3:211-222.
- DeBano, L.F. 1971. The effect of hydrophobic substances on water movement in soil during infiltration. *Journal of Proceedings of the Soil Science Society of America*, 35: 340-343.
- DeBano, L.F. 1981. Water repellent soils: a state-of-the-art. General Technical Report PSW- 46. Berkeley, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 21 p.
- De Jong, R. 1983. Soil water desorption curves estimated from limited data. *can. Journal of Soil Science Society of America*, 63: 697-703.
- Dekker, L.W., and Ritsema, C.G. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. 1. Potential and actual water repellency. *Journal of Water Resources Research*, 30:2507-2517.
- Epstein, E. 1975. Effect of sewage sludge on some soil physics properties. *Journal of Environmental Quality*. 41: 139-142.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of soil physics*. Academic Press, San Diego, CA.
- Imenson, A.C. Vertraten, J.M. Van Mullingen, E.J. and Sevink, J. 1992. The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forests. *Journal of Catena*, 19: 345-361.
- Jong, L.W. Jacobsen, O.H. and Moldrup, P. 1999. Soil water repellency: effects of water content, temperature and particle size. *Journal of Soil Science Society of America*, 63:437-442.
- Kayode, S. Are, G.A. Oluwatosino. Adeyolanu A. and Oke, O. 2009. Dlash and burn effect on soil quality of an Alfisol: soil physical properties. *Journal of Soil and Tillage Research*, 103: 4-10.
- Kirkham, M.B. 2005. *Principles of Soil and Plant Water Relation*. Publisher: Pana Preibelbis, Elsevier Academic Press.
- Lety, J.M.L.K., Carrillo and X.P. Pang. 2000. Approaches to characterize the degree of water repellency. *Journal of Hydrology*, 231-232: 61-65.
- Nelson, D.W., and Kladivko, E.J. 1979. Changes in soil properties from application of anaerobic sludge. *Journal of Water Poll controfed*, 51: 325-332.
- Nieber, J.L., Bauters, T.W.J., Steenhuis T.S., and Parlange, J.Y. 2000. Numerical simulation of experimental gravity- driven unstable flow in water repllent sand. *Journal of Hydrology*, 231-232, 295-307.

- Ojeda, G.S., Mattana Alcaniz, J.M., Marando, G., Bonmati, M., Woche, S.K., and Bachmam, J. 2010. Wetting process and soil water retention of a minesoil amended with composted and thermally dried sludges. *Journal of Geoderma*, 156: 399-409.
- Ojeda, G.S., Perfect, F., Alcaniz, J.M., and Ortiz, O. 2006. Fractal analysis of soil water hysteresis as influenced by sewage sludge application. *Journal of Geoderma*, 134: 386-401.
- Rasiah, V., Voroney R.P., Groenvelet and Kachanoski P.H. 1990. Modifications in soil water retention and hydraulic conductivity by an oily waste. *Cremlingen*, 3: 367-372.
- Rawls, W.J. Pachepsky, Y.A. Ritchie, J.C. Sobecki, T.M. Bloodworth, H. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Journal of Geoderma*, 116: 61-76.
- Rillig, M.C. 2005. A connection between fungal hydrophobins and soil water repellency? *Pedobiologia*, 49: 395-399.
- Travis, M.J., Weeisbrod N., and Gross A. 2008. Accumulation of oil and greas in soils irrigated with greywater and their potential role in soil water repellency. *Science of the Total Environment*, 394: 68-94.
- Wallis, M.G. Horne, D.J. and McAuliffe, K.W. 1990. A study of water repellency and its amelioration in yellow-brown sand. 1. Severity of water repellency and the effects of wetting and abrasion. *Journal of Agricultural Research* , 33: 139-144.