

بررسی وجود و شدت آب‌گریزی خاک در مناطق جنگلی تالش در استان گیلان

سیده مهرنوش میربابایی^۱، محمود شعبان‌پور^{۲*}، علی اصغر ذوالفقاری^۳

۱. کارشناس ارشد دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان

۲. استادیار دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان

۳. دانشجوی دکتری پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۹/۲۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۳/۸)

چکیده

در این پژوهش وجود و شدت آب‌گریزی در سه منطقه تحت پوشش کاج تدا و توسکا و اقطی در شهرستان تالش، بخشی از غرب گیلان، مطالعه شده است. ۷۹ نمونه دست‌نخورده (۵-۰ سانتی‌متر) برای تعیین آب‌گریزی و زاویه تماس آب با خاک در فصل خشک سال جمع‌آوری شد. آب‌گریزی با استفاده از آزمون‌های زمان نفوذ قطره آب (WDPT) و مولاریته قطره اتانول (MED) بررسی شد. همبستگی مثبت و معنادار ($r = 0.77$) بین دو آزمون WDPT و MED به‌دست آمد. زاویه تماس آب-خاک به‌وسیله آزمون MED بیشتر از ۹۰ درجه در نمونه‌های آب‌گریز برآورد شد. زاویه تماس آب-خاک با افزایش میزان آب‌گریزی خاک افزایش یافت؛ به‌طوری‌که در نمونه‌های با آب‌گریزی ۵۸۲۰ تا ۶۰۰۰ ثانیه زاویه تماس با ۱۰۸/۸ تا ۱۰۹ درجه محاسبه شد. متوسط آب‌گریزی اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله آزمون WDPT و MED در منطقه ۳ به‌طور معناداری بیشتر از دو منطقه دیگر بود. این روند در زاویه تماس آب-خاک محاسبه‌شده نیز مشاهده شد. در این پژوهش همبستگی بالایی بین MED، Log WDPT، و زاویه تماس با مقدار ماده آلی (با r به ترتیب ۰/۸۳، ۰/۷۷، ۰/۷۸) به‌دست آمد. همبستگی این پارامترها با pH خاک منفی و در سطح احتمال یک درصد معنادار (با r به ترتیب ۰/۶۹، ۰/۷۲) به‌دست آمد. همبستگی آب‌گریزی (MED، Log WDPT) و زاویه تماس خاک با درصد شن خاک مثبت و با درصد رس خاک منفی به‌دست آمد. البته رابطه بین پارامترهای بافت خاک و آب‌گریزی نسبت به ماده آلی و اسیدیته خاک ضعیف بود. نتایج نشان می‌دهد مقدار ماده آلی، بافت، و اسیدیته خاک عوامل مهم ایجاد و شدت آب‌گریزی در خاک‌های مناطق بررسی‌شده هستند.

کلیدواژگان: آب‌گریزی خاک، آزمون زمان نفوذ قطره آب، آزمون مولاریته قطره اتانول، زاویه تماس آب-خاک.

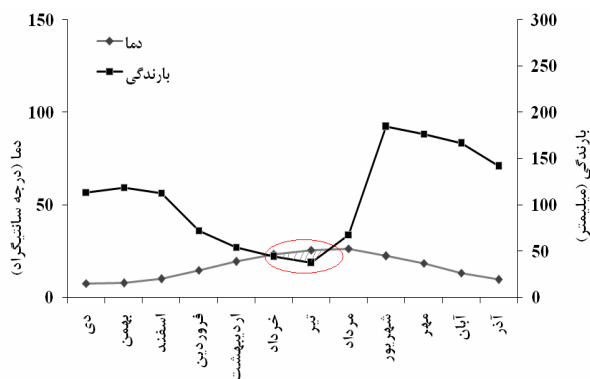
مقدمه

(Jordan et al., 2009). به‌طور کلی آب‌گریزی در نتیجه پوشش مواد آب‌گریز روی ذرات خاک یا در نتیجه تجمع مواد آب‌گریز در خاک رخ می‌دهد. منبع این مواد ممکن است مواد ترشح‌شده از گیاهان (روغن‌های آروماتیک، رزین‌ها، یا سایر ترکیبات آب‌گریز)، هیف قارچ، و فعالیت میکروبی باشد (Buczko et al., 2005; Muller and Deurer, 2011). بسیاری از محققان گزارش کردند که آب‌گریزی در خاک‌های تحت پوشش گیاهان همیشه‌سبز با مقدار قابل ملاحظه رزین، مثل اکالیپتوس و کاج‌ها، رخ می‌دهد (Martinez-Zavala and Jordan-Lopez, 2009; Muller and Deurer, 2011). البته نمی‌توان فرض کرد که این گونه‌ها همیشه باعث ایجاد آب‌گریزی در خاک می‌شوند یا فقط این‌گونه از گیاهان در خاک آب‌گریزی ایجاد می‌کنند (Doerr et al., 2000).

امروزه پدیده آب‌گریزی بیشتر از آنچه تصور می‌شد گسترش یافته است و آب‌گریزی خفیف تا خیلی شدید در خاک‌های بسیاری از مناطق جهان با بافت شن و لوم و

آب‌گریزی خاک در نیمه اول قرن ۱۱ در خاک‌های پیت در هلند مشاهده شد؛ وقتی که زمین‌های پست ساحلی به‌کمک سدبندی برای زراعت استفاده شدند (Kirkham, 2005). در یک خاک آب‌گریز، وقتی قطرات آب روی سطح خاک قرار می‌گیرند، آب قادر به خیس‌کردن خاک نیست و خاک، بسته به شدت آب‌گریزی، از چند ثانیه تا ساعت‌ها یا روزها در برابر خیس‌شدن مقاومت می‌کند. این موضوع آثار زیان‌آوری بر رشد گیاه و فرایندهای هیدرولوژی دارد (Martinez-Zavala and Jordan-Lopez, 2009). آب‌گریزی سبب کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب و فرسایش خاک می‌شود. همچنین توسعه جریان انگشت‌مانند یا گذرگاه‌های جریان ترجیحی، تلفات عناصر غذایی، ایجاد ناپایداری در جریان، و جبهه رطوبتی نامنظم نیز پدیده‌هایی هستند که در اثر آب‌گریزی خاک به‌وجود می‌آیند

طبق دوره آماری یازده ساله، ۳۷/۲۳ میلی‌متر و متوسط بارش سالیانه مناطق ۱۲۸۹/۵۶ میلی‌متر است (سایت هواشناسی گیلان). رژیم رطوبتی این مناطق یودیک و رژیم حرارتی آن‌ها ترمیک است. بر اساس منحنی آمبروترمیک، دوره خشکی در تابستان در این مناطق مشاهده می‌شود (قسمت هاشورخورده شکل ۱). طی دوره خشکی خاک‌ها کاملاً خشک می‌شوند و پس از این دوره در شهریورماه بارندگی‌هایی با متوسط ۱۸۴/۵۴ میلی‌متر رخ می‌دهد. بنابراین، در صورت وجود خاک‌های آب‌گریز در جنگل‌های این مناطق، این نقاط پتانسیل فرسایش‌پذیری بالایی دارند.



شکل ۱. منحنی آمبروترمیک رسم‌شده با استفاده از اطلاعات هواشناسی ایستگاه سینوپتیک رشت

در این مطالعه نمونه‌برداری برای مطالعه وجود آب‌گریزی در فصل خشک‌سال (تیرماه) صورت گرفت. نمونه‌های خاک به‌صورت دست‌نخورده و از لایه سطحی (۵-۰ سانتی‌متر) به‌وسیله سیلندر نمونه‌برداری به قطر ۵/۵ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر جمع شد. در مجموع از سه منطقه ۷۹ نمونه دست‌نخورده (به ترتیب ۲۴، ۲۰، ۳۵ نمونه از مناطق ۱ و ۲ و ۳) با استفاده از سیلندرهاى فلزی و به‌صورت تصادفی از زیر تاج‌پوشش و فاصله بین درختان جمع شد. در هر سه منطقه لاش‌برگ زیادی روی سطح خاک وجود داشت. از آنجا که آب‌گریزی باید در سطح خاک بررسی شود، ابتدا لاش‌برگ‌ها کاملاً از سطح خاک برداشته و سپس نمونه‌ها جمع شد. از هر نقطه مقداری خاک برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نیز برداشته شد. در این پژوهش بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee and Or, 2002)، کربن آلی به روش والکلی- بلاک (Nelson and Sommer, 1996)، و pH خاک در نسبت ۱ به ۲/۵ خاک به محلول CaCl_2 و با استفاده از pH متر (Thomas, 1996) اندازه‌گیری شد.

نمونه‌های دست‌نخورده جمع‌شده در آن با دمای ۲۵ درجه به مدت دو تا سه روز خشک شدند. سپس در شرایط آزمایشگاه به مدت ۲۴ ساعت، برای حذف آثار پتانسیل رطوبت

خاک‌های پیتی با کاربری‌های اراضی و شرایط آب‌وهوایی مختلف گزارش شده است (Woche *et al.*, 2005; Doerr *et al.*, 2006; Muller and Deurer, 2011). بافت خاک اثر مهمی در ایجاد آب‌گریزی دارد. خاک‌های درشت‌بافت برای آب‌گریز شدن مستعدترند (Martinez-Zavala *et al.*, 2009a). سطح ویژه خاک‌های درشت‌بافت سبب می‌شود این خاک‌ها راحت‌تر به‌وسیله مواد آب‌گریز پوشیده شوند. در نتیجه بیشتر در معرض آب‌گریز شدن قرار می‌گیرند (Doerr *et al.*, 2000). آب‌پذیری خاک ویژگی پویای آن است و با ویژگی‌های بیولوژیکی و شیمیایی و فیزیکی خاک ارتباط دارد. یکی از روش‌های کمی ارزیابی آب‌پذیری خاک اندازه‌گیری زاویه تماس آب- خاک است. خاک‌هایی که خودبه‌خودی و سریع خیس می‌شوند آب‌دوست‌اند و زاویه تماس آب- خاک در آن‌ها صفر است. اگر خاکی به‌طور جزئی یا به‌کندی خیس می‌شود، زاویه تماس آب- خاک آن ۹۰-۰ درجه است و آب‌گریزی زیر بحرانی دارد. اگر یک قطره آب بر سطح خاک قرار گیرد و نتواند وارد خاک شود، زاویه تماس آن با سطح خاک بزرگ‌تر از ۹۰ است. چنین خاکی آب‌گریز واقعی است (Muller and Deurer, 2011).

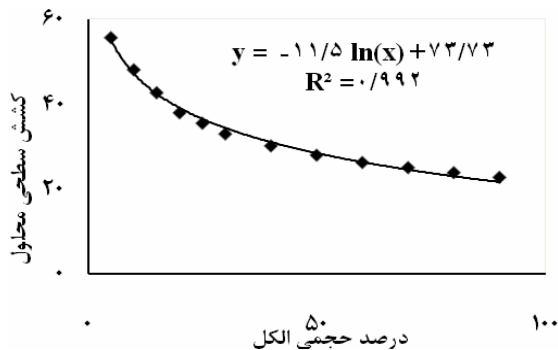
با وجود اهمیت آب‌گریزی خاک در ایجاد رواناب و فرسایش و کاهش آب قابل استفاده برای گیاهان، پژوهش‌های محدودی در این زمینه در کشور ایران صورت گرفته است. هدف پژوهش حاضر عبارت است از ۱. بررسی وجود خاک‌های آب‌گریز در جنگل‌های غرب استان گیلان؛ ۲. برآورد شدت آب‌گریزی خاک و اندازه‌گیری زاویه تماس آب- خاک؛ ۳. تعیین تأثیر برخی خصوصیات خاک، از قبیل مقدار ماده آلی و pH و درصد شن و رس بر شدت آب‌گریزی و زاویه تماس آب- خاک.

مواد و روش‌ها

استان گیلان، با مساحت ۱۴۷۱۱ کیلومتر مربع، حدود ۵۲۲۰۰۰ هکتار جنگل دارد. این مطالعه در سه منطقه ساحلی شهرستان تالش، بخشی از استان گیلان، صورت گرفت. مناطق ۱ و ۲ به‌صورت دست‌کاشت با درختان سوزنی‌برگ کاج تدا به‌ترتیب سی و بیست و پنج ساله جنگل کاری شده است. منطقه ۳ جنگل طبیعی است با پوشش درختان توسکا^۱، لرگ^۲، و گیاه علفی آقطی^۳. منطقه ۴ در حد فاصل منطقه ۱ و ۲ در امتداد ساحل قرار دارد. اطلاعات اقلیمی به‌دست‌آمده از ایستگاه سینوپتیک نشان می‌دهد متوسط بارندگی مناطق در تیرماه،

1. Pinus taeda
2. Alnus subcordata
3. Pterocarya fraxinifolia
4. Sambucus ebulus

نفوذ می‌کند کمتر باشد، یعنی محلول غلیظ‌تر باشد، آب‌گریزی خاک شدیدتر است (Buczko et al., 2005).



شکل ۲. رابطه بین درصد حجمی الکل و کشش سطحی محلول آب-الکل (Vazquez et al., 1995)

محاسبه زاویه تماس آب- خاک

اگر منافذ خاک به صورت لوله‌های مویین فرض شود، ارتفاع مویینگی با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$h = \frac{2\gamma_l \cos \alpha}{\rho g r} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در معادله ۱، h ارتفاع مویینگی (m)، γ کشش سطحی آب (erg/cm^2)، α زاویه تماس بین مایع و جامد، r شعاع لوله مویین (m)، ρ چگالی مایع (kgm^{-3})، و g شتاب ثقل (ms^{-2}) است. زمانی که α بزرگ‌تر از 90° درجه است $\cos \alpha$ منفی است و آب به لوله وارد نخواهد شد؛ مگر اینکه فشار مثبت به کار رود. کشش سطحی بین فاز مایع و جامد به وسیله معادله ۲ (Good and Girifalco, 1960) قابل برآورد است:

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - 2\phi(\gamma_s \gamma_l)^{1/2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در معادله ۲، γ_{sl} کشش سطحی مایع-جامد (erg/cm^2)، γ_s کشش سطحی هوا-جامد (erg/cm^2)، γ_l کشش سطحی مایع-هوا (erg/cm^2)، و ϕ تابعی است که خصوصیات مولکولی جامد را نشان می‌دهد و معمولاً برابر واحد است. کشش سطحی مایع به وسیله معادله Young (1805) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\gamma_l \cos \alpha = (\gamma_s - \gamma_l) \quad \text{رابطه (۳)}$$

ادغام معادلات ۲ و ۳ با فرض ϕ برابر ۱ به معادله ۴ منجر می‌شود:

$$\cos \alpha = 2\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_l}\right)^{1/2} - 1 \quad \text{رابطه (۴)}$$

با انتخاب $\alpha = 90^\circ$ ، $\cos \alpha$ برابر صفر می‌شود. بنابراین γ_l کشش سطحی محلولی است که زاویه تماس آن با خاک 90° درجه است. با قراردادن $\cos \alpha$ برابر صفر در معادله ۴ و با تغییر نام γ_l به γ_{ND} معادله ۵ حاصل می‌شود:

نسبی روی آب‌گریزی خاک، نگهداری شدند (Doerr et al., 2002). پس از این دوره اختلاف رطوبت خاک در نمونه‌ها به زیر ۰/۶ درصد رسید، که در بیشتر موارد قابل چشم‌پوشی بود. آب‌گریزی این نمونه‌ها با روش زمان نفوذ قطره آب^۱ (WDPT) و روش مولاریته محلول آب و الکل^۲ (MED) بررسی شد و از روش Letey et al. (2000) برای طبقه‌بندی آب‌گریزی خاک استفاده شد. این روش شامل قراردادن سه قطره آب مقطر به قطر حدود ۵ میلی‌متر به وسیله قطره‌چکان (Krammes and DeBano, 1965) بر سطح صاف خاک و اندازه‌گیری زمان نفوذ قطره‌های آب در خاک است (Dekker and Ritsema, 2000). اگر WDPT کمتر از ۵ ثانیه باشد، خاک قابل مرطوب شدن است (کلاس صفر). WDPT بین ۵ تا ۶۰ ثانیه نشان‌دهنده خاک جزئی آب‌گریز (کلاس ۱)، WDPT بین ۶۰ تا ۶۰۰ ثانیه نشان‌دهنده خاک‌های بسیار آب‌گریز (کلاس ۲)، WDPT بین ۶۰۰ تا ۳۶۰۰ ثانیه بیان‌کننده خاک‌های به شدت آب‌گریز (کلاس ۳)، و WDPT بیشتر از ۳۶۰۰ ثانیه حاکی از خاک‌های بی‌نهایت آب‌گریز است (کلاس ۴) (Bisdorn et al., 1993). آزمون MED روش دیگر تعیین شدت آب‌گریزی خاک است. Watson and Letey (1970) کشش سطحی محلولی را که خاک با آن خیس می‌شود به منزله شاخص آب‌گریزی خاک پیشنهاد کردند. در این روش یک سری از محلول‌های آب و اتانول با درصد حجمی صفر تا ۴۰ درصد الکل، که کشش سطحی متفاوت دارند، برای تعیین شدت آب‌گریزی استفاده می‌شوند (Buczko et al., 2005). در این پژوهش از نتایج شکل ۲ برای تعیین کشش سطحی درصد‌های متفاوت آب و الکل استفاده شد (Vazquez et al., 1995). هر چه غلظت اتانول در محلول بیشتر باشد کشش سطحی محلول کاهش می‌یابد (شکل ۲). بنابراین محلول‌هایی که کشش سطحی کمتری دارند خودبه‌خود در خاک نفوذ می‌کنند. اگر چند قطره از محلول‌های آب-الکل روی سطح صاف نمونه خاک قرار گیرد، کشش سطحی محلولی که در کمتر از ۵ ثانیه در خاک نفوذ کند کشش سطحی محلولی است که خاک را با زاویه تماس کمتر از 90° درجه خیس می‌کند (Letey et al., 2000). بیشترین کشش سطحی (کمترین غلظت اتانول) یک قطره محلول (آب-اتانول)، که بر سطح خاک قرار گیرد و در زمان مرجع (۵ ثانیه) جذب شود، کشش سطحی خاک برای جذب آب است و درجه آب‌گریزی را نشان می‌دهد. هر چه کشش سطحی محلولی که در خاک

1. Water Drop Penetration Time
2. Molarity of Ethanol Droplet

داده‌های WDPT و به‌منظور افزایش همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده و WDPT از لگاریتم WDPT برای بررسی همبستگی‌ها استفاده شد (Jordan *et al.*, 2009; Martinez-Zavala and Jordan-Lopez, 2009; Martinez-Zavala *et al.*, 2009a).

یافته‌ها و بحث

ویژگی مناطق بررسی‌شده

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مناطق بررسی‌شده در جدول ۱ می‌آید. هر سه منطقه درصد شن بالایی دارند و کلاس بافتی آن‌ها شنی است. در زمان نمونه‌برداری درصد وزنی رطوبت خاک در مناطق بین ۳٫۹۸ تا ۶٫۰۸ بود. تغییرات ماده آلی خاک در نمونه‌های بررسی‌شده زیاد (بین ۰٫۷۸ تا ۱۱٫۶۰ درصد) بود. مناطق بین درختان نسبت به مناطق زیر تاج پوشش درختان مقدار ماده آلی کمتری داشتند. در نمونه‌های بررسی‌شده اختلاف زیادی در pH خاک مناطق مختلف مشاهده نشد و دامنه تغییرات آن در نمونه‌های جمع‌آوری‌شده بین ۶٫۴۵ تا ۷٫۲۲ متغیر بود.

$$\gamma_s = \frac{\gamma_{ND}}{4} \quad \text{رابطه ۵}$$

در معادله ۵، γ_{ND} کشش سطحی محلولی است که در مدت زمان کمتر از ۵ ثانیه در خاک نفوذ می‌کند و به‌وسیله آزمون MED اندازه‌گیری می‌شود. با ادغام معادله ۵ و ۴ معادله ۶ به‌دست می‌آید:

$$\cos \alpha = \left(\frac{\gamma_{ND}}{\gamma_l} \right)^{1/2} - 1 \quad \text{رابطه ۶}$$

در معادله ۶، γ_l کشش سطحی آب در دمای ۲۵ درجه و برابر با $72.01 \text{ (erg/cm}^2\text{)}$ است. با استفاده از معادله ۶ و با تعیین کشش سطحی محلولی که در مدت زمان کمتر از ۵ ثانیه در نمونه خاک آب‌گریز نفوذ می‌کند (γ_{ND}) زاویه تماس آب-خاک (α) تعیین شد.

در این پژوهش برای مقایسه ویژگی‌های خاک در مناطق مختلف از طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. آنالیز داده‌ها، شامل مقایسه میانگین‌ها و همبستگی‌ها (همبستگی پیرسون)، با نرم‌افزار آماری SPSS انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن بررسی شد. با توجه به توزیع نرمال لگاریتمی بودن

جدول ۱. میانگین و دامنه تغییرات برخی پارامترهای اندازه‌گیری‌شده

منطقه	تعداد نمونه	pH	رطوبت (%)	ماده آلی (%)	شن (%)	رس (%)	بافت
۱	۲۴	۶٫۸۶b (۶٫۴۵-۷٫۱۶)	۴٫۹۰ (۳٫۹۸-۵٫۵۴)	۳٫۹۷ (۰٫۷۸-۷٫۱۳)	۹۰٫۷۱b (۹۰-۹۱٫۵۰)	۵ a (۵-۵)	Sandy
۲	۲۰	۶٫۹۹a (۶٫۷۰-۷٫۲۲)	۵٫۰۶ (۵٫۰۱-۶٫۰۸)	۳٫۶۵ (۰٫۷۹-۱۱٫۶۰)	۹۲٫۴۴ a (۹۰-۹۴٫۷۰)	۴٫۲۰ b (۳-۵)	Sandy
۳	۳۵	۶٫۸۷ab (۶٫۶۷-۷٫۱۷)	۵٫۳۶ (۴٫۹۲-۵٫۲۶)	۴٫۲۹ (۱٫۱۸-۱۰٫۲۰)	۹۲٫۲۱ a (۹۰-۹۳)	۳٫۸۱ b (۳-۵)	Sandy

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده معنادار بودن اختلاف میانگین‌ها به روش دانکن در سطح ۱ درصد است. اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده حداکثر و حداقل پارامتر اندازه‌گیری‌شده در منطقه است.

آب‌گریزی خاک

درصد و ۷۹٫۱۶ درصد از نمونه‌ها MED ۶ تا ۱۵ درصد را دارا بودند. همچنین نمونه‌های طبقه‌بندی‌شده در کلاس ۳ WDPT (۶۰۰ تا ۳۶۰۰ ثانیه) دارای MED بین ۱۷ تا ۲۳ درصد بودند (جدول ۲). نمونه‌هایی که WDPT بیشتر از ۳۶۰۰ ثانیه داشتند (کلاس ۴) دارای MED بیشتر از ۲۱ درصد بودند. در ۳۰ درصد نمونه‌ها MED بین مقادیر ۲۱، ۲۳ و ۲۵ درصد و در ۷۰ درصد آن‌ها MED بین مقادیر ۲۸، ۳۰ و ۳۱ درصد است (جدول ۲). Doerr (1998) و Martinez-Zavala *et al.* (2009b) توزیع فراوانی MED را با کلاس‌های WDPT اندازه‌گیری‌شده مقایسه کردند. در بررسی آن‌ها نمونه‌هایی که دارای MED صفر درصد بودند کلاس صفر WDPT داشتند و WDPT اکثر نمونه‌هایی که

در این پژوهش آب‌گریزی نمونه‌های جمع‌آوری‌شده از هر یک از مناطق به‌وسیله آزمون MED و WDPT اندازه‌گیری شد. توزیع فراوانی MED اندازه‌گیری‌شده و کلاس‌های دسته‌بندی WDPT در جدول ۲ می‌آید. MED اندازه‌گیری‌شده نمونه‌هایی که کلاس صفر (WDPT کمتر از ۵ ثانیه) داشتند صفر درصد (محلول صفر درصد الکل) بود. از ۱۰ نمونه‌ای که کلاس ۱ WDPT بین ۵ تا ۶۰ ثانیه) داشتند ۷ نمونه MED ۱ درصد و ۳ نمونه MED ۲ درصد داشتند.

نمونه‌هایی که در کلاس ۲ WDPT بین ۶۰ تا ۶۰۰ ثانیه) طبقه‌بندی شدند ۲۰٫۸۰ درصد از نمونه‌های MED ۱ تا ۳

می‌آید. مشاهده می‌شود که متوسط Log WDPT و MED در منطقه ۳ به‌طور معنادار بیشتر از دو منطقه دیگر است و هر دو روش آب‌گریزی شدید را در این منطقه نشان می‌دهند. این روند در زاویه تماس آب- خاک نیز مشاهده شد.

MED بیشتر از ۲۴ درصد داشتند بیشتر از یک ساعت اندازه‌گیری شد. متوسط آب‌گریزی اندازه‌گیری شده با دو آزمون WDPT و MED و زاویه تماس محاسبه شده (α) در هر منطقه در جدول ۳

جدول ۲. فراوانی نسبی MED اندازه‌گیری شده در مقابل WDPT در هر یک از مناطق مطالعه شده

منطقه	تعداد داده	کلاس WDPT	MED%	منطقه	تعداد داده	کلاس WDPT	MED%	منطقه	تعداد داده	کلاس WDPT	MED%
۱	۴	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۲	۱
۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۱
۱	۲	۱	۲	۱	۳	۰	۰	۱	۲	۲	۱
۱	۱	۲	۱	۱	۴	۱	۱	۱	۲	۲	۱
۱	۱	۲	۳	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۳	۱
۱	۱	۲	۶	۱	۲	۲	۲	۱	۲	۳	۱
۱	۱	۲	۷	۱	۲	۱	۱۰	۱	۳	۲	۱
۱	۲	۳	۱۷	۱	۲	۱	۱۱	۱	۳	۲	۱
۱	۱	۳	۱۸	۱	۲	۲	۱۳	۱	۳	۲	۱
۱	۲	۳	۲۰	۱	۲	۱	۱۸	۱	۳	۳	۱
۱	۱	۳	۲۱	۱	۲	۱	۱۹	۱	۳	۳	۱
۱	۱	۳	۲۲	۱	۲	۱	۲۲	۱	۳	۳	۱
۱	۱	۴	۲۱	۱	۲	۲	۲۰	۱	۳	۳	۱
۱	۱	۴	۲۳	۱	۲	۲	۳۰	۱	۴	۳	۱
۱	۱	۴	۲۵	۱	۳	۱	۲	۱	۴	۳	۱

سانتی‌گراد) آب را جذب می‌کند و آب‌دوست است. Tschapek (1984) اعلام کرد که همه کانی‌های اصلی خاک انرژی آزاد سطحی بالاتر از آب دارند و آب‌دوست‌اند. بنابراین، در خاک‌های معمولی آب به‌راحتی جذب می‌شود. Zisman (1964) اعلام کرد خاک‌های آلی درشت‌بافت حاوی واکس‌ها و پلی‌مرهای آلی مقادیر انرژی آزاد سطحی کمتر از ۷۲٫۰۱ ارگ بر سانتی‌متر مربع دارند و در نتیجه آب‌گریزند. در خاک‌های آب‌گریز، چون کشش سطحی خاک برای جذب آب کمتر از نیروی پیوستگی بین مولکول‌های آب است، قطره آب وقتی بر سطح خاک قرار می‌گیرد جذب نمی‌شود.

تغییرات WDPT اندازه‌گیری شده در مناطق بین ۴ تا ۶۰۰۰ ثانیه است و در هر سه منطقه نمونه‌های با آب‌گریزی بیشتر از یک ساعت با آزمون WDPT مشاهده شد. این نمونه‌ها دارای مقادیر ماده آلی بیشتر از ۶ درصد بودند. منطقه ۳ نسبت به دو منطقه دیگر متوسط مواد آلی بالاتری دارد.

برای مرطوب‌شدن سطح خاک باید نیروی چسبندگی بین آب و خاک بیشتر از نیروی پیوستگی بین مولکول‌های آب باشد. بنابراین، سطح با انرژی آزاد سطحی^۱ بیشتر از ۷۲٫۰۱ ارگ بر سانتی‌متر مربع (کشش سطحی آب در دمای ۲۵ درجه

جدول ۳. میانگین و تغییرات برخی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در نمونه‌های مناطق ۲٫۰۱ و ۳

منطقه	تعداد	MED(%)	کشش سطحی محلول آب-الکل (erg,cm ²)	Log WDPT(s)	WDPT(s)	تماس زاویه (α) (درجه)
۱	۲۴	۱۳٫۵۴ ab	۵۰٫۰۵ab	ab۲٫۴۶	۱۳۰۰	۱۰۰٫۴ ab
۲	۲۰	۹٫۴۵ b	۵۵٫۴۱a	b۲٫۰۹	۸۳۷	۹۷٫۸ b
۳	۳۵	۱۶٫۶۰ a	۴۲٫۷۲B	a۲٫۷۶	۱۳۳۵	۱۰۳٫۴a

حروف متفاوت بالای هر عدد در هر ستون نشان‌دهنده معنادار بودن اختلاف میانگین‌ها به روش دانکن در سطح ۱ درصد است. اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده حداکثر و حداقل پارامتر اندازه‌گیری شده در منطقه است.

جدول ۴. ضرایب همبستگی بین Log WDPT و MED و زاویه تماس آب- خاک با پارامترهای اندازه‌گیری شده در ۷۹ نمونه جمع‌آوری شده

زاویه تماس	MED	Log WDPT	
۰٫۷۷ **	۰٫۸۳ **	۰٫۸۰ **	O.M
-۰٫۷۲ **	-۰٫۶۹ **	-۰٫۷۸ **	pH
-۰٫۹۹ **	-۰٫۹۵ **	-۰٫۹۰ **	γ_{ND}^a (erg/cm ²)
-	۰٫۹۷ **	۰٫۹۱ **	زاویه تماس
-۰٫۳۴ **	-۰٫۲۷ *	-۰٫۳۴ **	% رس
۰٫۳۸ **	۰٫۳۲ **	۰٫۴۰ **	% شن
۰٫۶۶ **	۰٫۷۷ **	-	WDPT

a کشش سطحی محلولی است که در مدت زمان کمتر از ۵ ثانیه در خاک نفوذ می‌کند. * و ** بیانگر سطوح معنادار به ترتیب ۵ و ۱ درصد است.

شکل ۳ رابطه Long WDPT و MED را با ماده آلی خاک نشان می‌دهد. نتایج ثابت کرد رابطه بین این دو آزمون و مقدار ماده آلی خاک مثبت است. به عبارت دیگر افزایش مواد آلی خاک سبب افزایش آب‌گریزی خاک‌های مورد آزمون شد. *Martinez-Zavala et al.* (2009b) در تحقیقی در جنوب اسپانیا آب‌گریزی خاک را با استفاده از این دو آزمون بررسی کردند. آن‌ها رابطه مثبتی بین آزمون‌های WDPT و MED با ماده آلی خاک به دست آوردند. همچنین *Mataix-Solera et al.* (2007) و *Martinez-Zavala and Jordan-Lopez* (2009) رابطه مثبت بین آزمون WDPT و مقدار ماده آلی خاک را گزارش کردند. البته برخی محققان، *Doerr et al.* (2000) و *Harper et al.* (2006) رابطه ضعیفی بین آب‌گریزی خاک و مقدار ماده آلی خاک گزارش کردند. *Vogelmann et al.* (2010) بیان کردند که اثر نوع و کیفیت ماده آلی در آب‌گریزی خاک مهم‌تر از مقدار ماده آلی خاک است.

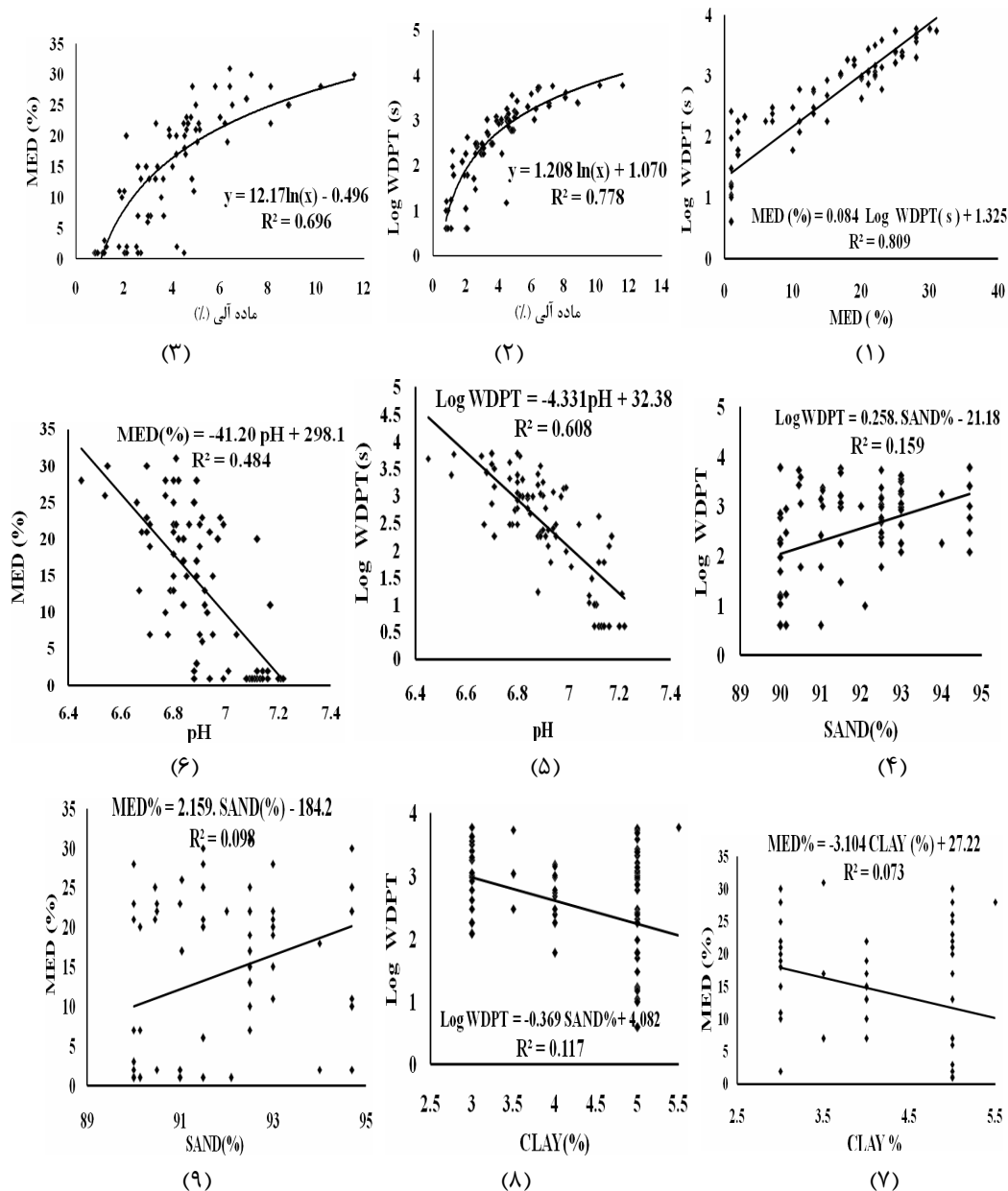
همبستگی بین Log WDPT و MED و زاویه تماس آب با pH خاک منفی و معنادار بود (جدول ۴). در بیشتر نمونه‌هایی که pH بالاتر از ۷ داشتند آب‌گریزی خفیفی مشاهده شد. روابط رگرسیونی خطی بین آب‌گریزی (Log WDPT و MED) با pH در شکل ۳ می‌آید. رابطه این دو آزمون و pH خاک منفی است. نتایج نشان می‌دهد با کاهش pH خاک آب‌گریزی افزایش می‌یابد. این نتیجه با یافته‌های *Doerr et al.* (2009) و *Martinez-Zavala and Jordan-Lopez* (2009) و *Zavala et al.* (2009b) و *Lebron et al.* (2012) هماهنگ است. *Hurrass and Schaumann* (2006) علت رابطه pH پایین خاک و آب‌گریزی را قابلیت انحلال اسیدهای هیومیک در خاک‌های اسیدی بیان کردند.

اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند مقدار متوسط کشش سطحی محلول آب-الکل، که در زمان کمتر از ۵ ثانیه در نمونه‌ها نفوذ می‌کند، کمتر از ۷۲٫۰۱ ارگ بر سانتی‌متر مربع است (جدول ۳). بنابراین با قراردادن این کشش سطحی (γ_{ND}) در معادله ۶ زاویه تماس آب- خاک بیشتر از ۹۰ درجه به دست آمد. با توجه به معادله ۶ با کاهش کشش سطحی محلول آب-الکلی (افزایش غلظت الکل) که در کمتر از ۵ ثانیه در خاک نفوذ می‌کند زاویه تماس آب- خاک بزرگ‌تر می‌شود و خاک آب‌گریزی شدیدتری دارد. کمترین کشش سطحی محلول آب-الکل که در کمتر از ۵ ثانیه در خاک نفوذ می‌کند در منطقه ۱ و ۲ برابر ۳۲٫۹۸ و در منطقه ۳ برابر ۳۲٫۷۰ ارگ بر سانتی‌متر مربع بود. در این نمونه‌ها MED ۳۰ تا ۳۱ درصد و WDPT بین ۵۸۲۰ تا ۶۰۰۰ ثانیه اندازه‌گیری شد. زاویه تماس در این نمونه‌ها ۱۰۸٫۹ تا ۱۰۹ درجه محاسبه شد. *Huffman et al.* (2001) در جنگل کاجی در کلرادو کشش سطحی بحرانی را کمتر از ۳۳ ارگ بر سانتی‌متر مربع اندازه گرفتند و اعلام کردند که این کشش سطحی بر آب‌گریزی شدید تا بی‌نهایت دلالت دارد.

رابطه خطی بین نتایج دو آزمون آب‌گریزی خاک در شکل ۳ می‌آید. رابطه‌ای مثبت و معنادار ($R^2 = 0.809$) بین دو آزمون به دست آمد. جدول ۴ همبستگی (r) ویژگی‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. وجود همبستگی مثبت و معنادار ($r = ۰٫۷۷$) بین نتایج دو آزمون WDPT و MED نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای بیشترین MED بالاترین مقادیر WDPT را دارند. این نتیجه با یافته‌های *Doerr* (1998)، *Rodriguez-Alleres et al.* (2007)، و *Martinez-Zavala et al.* (2009b) هماهنگی دارد. همبستگی هر دو آزمون WDPT و MED با کشش سطحی محلولی که در کمتر از ۵ ثانیه نفوذ می‌کند منفی و با زاویه تماس آب- خاک مثبت و معنادار بود (جدول ۴). همبستگی بین Log WDPT و MED با مقدار ماده آلی خاک مثبت و در سطح ۱ درصد معنادار بود. همبستگی زاویه تماس آب- خاک هم با ماده آلی مثبت و معنادار بود (جدول ۴). در نمونه‌هایی که مقدار ماده آلی بالاتری داشتند زاویه تماس آب- خاک بیشتری اندازه‌گیری شد؛ به طوری که زاویه تماس آلی آن‌ها بین ۷٫۱۳ تا ۱۱٫۵۹ درصد بود اندازه‌گیری شد. *Vogelmann et al.* (2010) همبستگی بین آب‌گریزی و زاویه تماس آب- خاک را با ماده آلی مثبت به دست آوردند.

خاک با R^2 به ترتیب ۰/۱۱۷ و ۰/۰۷۳ به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه ضعیفی بین بافت خاک و آب‌گریزی وجود دارد. علت را می‌توان این‌گونه بیان کرد که چون تغییرات درصد شن و رس خاک در این سه منطقه محدود و بافت خاک در هر سه منطقه شنی بود، سایر پارامترهای اندازه‌گیری‌شده (ماده آلی و pH) در ایجاد و شدت آب‌گریزی رابطه‌ای قوی‌تر داشتند. این نتیجه با یافته‌های *Jordan et al* (2009) هماهنگ بود.

در این تحقیق همبستگی بین Log WDPT و MED با درصد رس خاک منفی و معنادار و با درصد شن خاک مثبت و معنادار بود. همبستگی بین زاویه تماس با درصد رس خاک منفی و با درصد شن خاک مثبت و معنادار بود (جدول ۴). رابطه خطی بین آب‌گریزی با این پارامترهای بافت خاک (درصد شن و رس) در شکل ۳ می‌آید. رابطه‌ای خطی و مثبت بین Log WDPT و MED و درصد شن خاک با R^2 به ترتیب ۰/۱۵۹ و ۰/۰۹۸ و رابطه‌ای خطی و منفی بین این دو آزمون با درصد رس



شکل ۳. رابطه بین (۱) Log WDPT و MED، (۲) Log WDPT و ماده آلی، (۳) MED و ماده آلی خاک، (۴) pH و Log WDPT، (۵) pH و MED، (۶) pH و MED، (۷) MED و درصد شن، (۸) Log WDPT و درصد رس، و (۹) MED و درصد رس در ۷۹ نمونه جمع‌آوری‌شده از مناطق

درصد رس و درصد شن و سیلت در برآورد Log WDPT آزمایش شد. اثر درصد شن و سیلت در برآورد Log WDPT

در این مطالعه از رگرسیون گام‌به‌گام برای پیش‌بینی Log WDPT استفاده شد. ابتدا متغیرهای Ph و درصد ماده آلی و

تماس خاک با مقدار ماده آلی و درصد شن خاک مثبت و رابطه آن با اسیدیته و درصد رس خاک منفی بود. بررسی‌ها و نتایج نشان داد درصد ماده آلی خاک و رس و شن و اسیدیته عوامل مهمی در آب‌گریز شدن خاک‌ها و افزایش زاویه تماس آب-خاک‌اند. آزمون WDPT مدت زمانی را که قطره آب روی سطح متخلخل (خاک) باقی می‌ماند اندازه می‌گیرد و با مفاهیم هیدرولوژی آب‌گریزی در ارتباط است. مقدار رواناب سطحی تحت تأثیر زمان مورد نیاز برای نفوذ قطرات باران در خاک است. بنابراین وجود آب‌گریزی در خاک نشان‌دهنده وضعیت آب‌خیز طی باران‌های شدید (سیلاب‌ها) است. اثر آب‌گریزی، به‌خصوص در شروع فصل مرطوب سال، پس از طی فصل خشک قابل ملاحظه است؛ زیرا مقدار رواناب ایجادشده از بارندگی‌ها در خاک‌های خشک آب‌گریز افزایش می‌یابد و خاک دچار فرسایش شود.

همچنین در احیا و احداث جنگل با گونه‌های گیاهی غیر بومی، به‌خصوص گونه‌های کاج، باید این نکته را در نظر گرفت که جنگل‌کاری با این گونه‌ها احتمال ایجاد آب‌گریزی خاک را توسعه می‌دهد و این مسئله منجر به تغییراتی در فرایند هیدرولوژی خاک می‌شود. همچنین تغییرات احتمالی در pH خاک به‌وجود می‌آید که ممکن است بر چرخه بیوژئوشیمیایی و سازگاری گیاهان و آب‌گریزی خاک تأثیر داشته باشد. بنابراین این نکات باید در برنامه‌های احداث جنگل در نظر گرفته شود. با توجه به وسعت زیاد جنگل‌ها در استان گیلان و زیادبودن درصد ماده آلی خاک، خاک‌های این استان مستعد آب‌گریزی‌اند. با توجه به آثار محیطی این پدیده باید در بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی با استفاده از دو آزمون WDPT و MED وجود و شدت این پدیده در خاک‌ها بررسی و آثار آن در برنامه‌های مدیریت کشاورزی و جنگل‌داری در نظر گرفته شود.

نمادها و علائم

MED: مولاریته قطره اتانول، روشی جهت اندازه‌گیری شدت آب‌گریزی خاک.

WDPT: آزمون زمان نفوذ قطره آب، روشی جهت اندازه‌گیری آب‌گریزی خاک.

γ_1 : کشش سطحی آب در دمای ۲۵ درجه و برابر با $72.01 \text{ (erg.cm}^2\text{)}$.

γ_{ND} : کشش سطحی محلولی که در مدت زمان کمتر از ۵ ثانیه در خاک نفوذ می‌کند.

γ_{sl} : کشش سطحی مایع-جامد (erg.cm^2) .

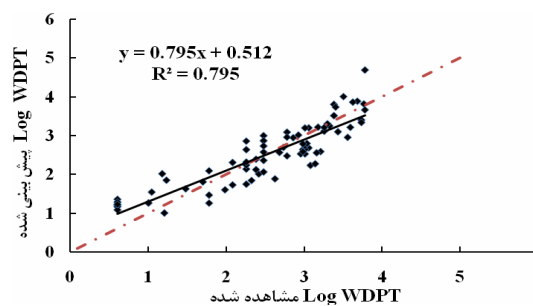
ϕ : تابعی که ویژگی‌های مولکولی جامد (ماده آلی) را نشان می‌دهد و معمولاً برابر واحد است.

معنادار نبود؛ اما سه متغیر دیگر در برآورد Log WDPT معنادار بودند. بنابراین از متغیرهای pH و درصد ماده آلی و درصد رس برای برآورد Log WDPT استفاده شد. معادله ۷ رابطه Log WDPT را با متغیرهای مؤثر مذکور نشان می‌دهد:

$$\text{Log WDPT} = -2.404 \times \text{pH} + 0.3274 \times \text{O.M} - 0.2104 \times \text{Clay} + 19.23$$

این معادله نشان می‌دهد که اثر درصد رس و pH خاک بر Log WDPT منفی و اثر درصد مواد آلی خاک با Log WDPT مثبت است. شکل ۴ رابطه بین Log WDPT مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده را نشان می‌دهد.

ضریب تبیین بالا ($R^2 = 0.795^{**}$) و ریشه میانگین مربعات خطای^۱ پایین ($\text{RMSE} = 0.425$) نشان می‌دهد که معادله مذکور در خاک‌های بررسی‌شده قادر به پیش‌بینی شدت آب‌گریزی خاک‌اند. البته آب‌گریزی خاک، علاوه بر ویژگی‌های شیمیایی، به عواملی چون شرایط آب‌وهوایی، پوشش گیاهی صرف‌نظر از حادثه آتش‌سوزی، مقدار رطوبت خاک، زمان تر و خشک شدن خاک، دما، رطوبت نسبی هوا، کیفیت ماده آلی، و غیره بستگی دارد. وجود و شدت آب‌گریزی خاک ممکن است در یک فاصله کوچک چند سانتی‌متری تغییر کند (Doerr et al., 2009). بنابراین به‌نظر می‌رسد معادله مذکور فقط در خاک‌های مورد مطالعه و شرایط خاص آن‌ها قابل استفاده باشد.



شکل ۴. رابطه Log WDPT مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده. خط چین نشان‌دهنده خط ۱:۱ است.

نتیجه‌گیری

در مناطق بررسی‌شده آب‌گریزی شدیدی در خاک مشاهده شد و زاویه تماس آب-خاک در همه نمونه‌های آب‌گریز بیشتر از ۹۰ درجه به‌دست آمد. در این مطالعه همبستگی مثبت و معناداری بین دو آزمون WDPT و MED وجود داشت. رابطه مثبت و معنادار بین Log WDPT و درصد MED با ماده آلی و درصد شن خاک و رابطه منفی و معنادار بین Log WDPT و درصد MED با pH و درصد رس خاک به‌دست آمد. رابطه زاویه

1. Root Mean Square Error

REFERENCES

- Bisdorn, E. B. A., Dekker, L. W., and Schoube J. F. (1993). Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure, *Geoderma*, 56, 105–18.
- Bukzko, U., Bens, O., and Huttl, R. F. (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.
- Dekker, L. W. and Ritsema, C. J. (2000). Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils, *Journal of Hydrology*, 231–232, 148–164.
- Doerr, S. H. (1998). On standardizing the Water Drop Penetration Time and Molarity of an Ethanol Droplet techniques to classify soil hydrophobicity: A case study using medium textured soils, *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 663–668.
- Doerr, S. H., Shakesby R. A., and Walsh R. P. D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance, *Earth-Science Reviews*, 51, 33–65
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Dekker, L. W., and Ritsema, C. J. (2006). Occurrence, prediction and hydrological effects of water repellency amongst major soil and land-use types in a humid temperate climate, *European Journal of Soil Science*, 57, 741–754.
- Doerr, S. H., Woods, S. W., Martin, D. A., and Casimiro, M. (2009). Natural background' soil water repellency in conifer forests of the north-western USA: Its prediction and relationship to wildfire occurrence, *Journal of Hydrology*, 231–232, 126–133 .
- Gee, G. W. and Or, D. (2002). Particle-size analysis, In Dane, J. H. and Topp, G. C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 4- Physical Methods, Agronomy Monograph* (vol. 9), ASA and SSA, Madison, WI, 255–293.
- Good, R. J. and Girifalco, L. A. (1960). A theory for the estimation of surface and interfacial energies. I. Derivation and application to interfacial tension, *Journal of Physical Chemistry*, 61, 904–909.
- Harper, R. J., McKissock, I., Gilkes, R. J., Carter, D. J., and Blackwell, P. S. (2000). A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and land use on water repellency, *Journal of Hydrology*, 231–232, 371–383.
- Huffman, E. L., MacDonald, L. H., and Stednick, J. D. (2001). Strength and persistence of fire-induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodge pole pine, Colorado Front Range, Hydrol. Proc. derosa and lodge pole pine, Colorado Front Range, *Hydrological Processes*, 15, 2877–2892.
- Hurrass, J. and Schaumann, G. E. (2006). Properties of soil organic matter and aqueousextracts of actually water repellent and wetttable soil samples, *Geoderma*, 132, 222–239.
- Jordan, A., Martinez-Zavala, L., Nava, A. L., and 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.
- Kirkham, M. B. (2005). Principles of Soil and Plant Water Relations, *Elsevier*, NewYork, US.
- Krammes, J. S and DeBano, L. F. (1965). Soil wettability: a neglected factor in watershed management, *Water Resources Research*, 1, 283–286.
- Lebron, I., Robinson, D. A., Oatham, M., and Wuddivira, M. N. (2012). Soil water repellency and pH soil change under tropical pine plantations compared with native tropical forest, *Journal of Hydrology*, 414–415, 194–200.
- Letey, J., Carrillo, M. L. K., and Pang, X. P. (2000). Approaches to characterize the degree of water repellency, *Journal of Hydrology*, 231–232, 61–65.
- Martinez-Zavala, L. and Jordan-Lopez, A. (2009). Influence of different plant species onwater repellency in Mediterranean heathland soils, *Catena*, 76, 215–223.
- Martinez-Zavala, L., Gonzalez, F. A., and Jordan, A. (2009a). Fire-induced soil water repellency under different vegetation types along the Atlantic dune coast-line in SW Spain, *Catena*, 79, 153–162.
- Martinez-Zavala, L., Gonzalez, F. A., and Jordan, A. (2009b). Intensity and persistence of water repellency in relation to vegetation types and soil parameters in Mediterranean SW Spain, *Geoderma*, 152, 361–374.
- Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Guerrero, C., Mayoral A. M., Morales, J., Gonzalez, J., Garcia, O., and Gomez, I. (2007). Water repellency under different plant species in a calcareous forest soil in a semiarid mediterranean environment, *Hydrological Processes*, 21 (17), 2300–2309.
- Muller, K. and Deurer, M. (2011). Review of the remediation strategies for soil water repellency, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144, 208–221.
- Nelson, D. W. and Sommers, L. E. (1996). Total carbone (organic carbone) and organic matter In D. L. Sparks (Eds), *Methods of Soil Analysis, Part 3- Chemical Methods, Agronomy Monograph* (vol. 9), ASA and SSSA, Madison, WI, 961–1010.
- Rodriguez-Alleres, M., Benito, I., and Blas, E. (2007). Extent and persistence of water repellency in north-western Spanish soils, *Hydrological Processes*, 21, 2291–2299.
- Thomas, G. W. (1996). soil pH and soil activity, In D. L. Sparks (Eds), *Methods of soil analysis, Part 3- Chemical Methods. Agronomy Monograph* (vol. 9), ASA and SSSA, Madison, WI, 475–490.
- Tschapek, M. (1984). Criteria for determining the hydrophilicity–hydropobicity of soils, *Zeitschrift fur Pflanzenernaehrung undBodenkunde*, 147, 137–149.

- Vazquez, G., Alvarez, E., and Navaza, J. M. (1995). Surface Tension of Alcohol + Water from 20 to 50 ° C. *Journal of Chemical Engineering*, 40, 611-614.
- Vogelmann, E. S., Reichert, J. M., Reinert, D. J., Mentges, M. I., Vieira, D. A., Barros C. A.P., and Fasinmirin, J. T. (2010). Water repellency in soils of humid subtropical climate of Rio Grande do Sul, Brazil, *Soil & Tillage Research*, 110, 126–133.
- Watson, C. L. and Letey, J. (1970). Indices for characterizing soil-water repellency based upon contact angle-surface tension relationships, *Soil Science Society of America Proceedings*, 34, 841-844.
- Woche, S. K., Goebel, M. O., Kirkham, M. B., Horton, R., van der Ploeg, R. R., and Bachmann, J. (2005). Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management, *European Journal of Soil Science*, 56, 239–251.
- Young, T. (1805). On the cohesion of fluids, *Philos. Trans. R. Soc. London*, A 84.
- Zisman, W. A. (1964) Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution, In: Gould, R. F (Ed.), *American Chemical Society, Advances in Chemistry Series*, Vol. 43, 1-51.