

مقایسه روش‌های تعیین شدت آبگریزی بر پایه اندازه‌گیری زاویه تماس آب- خاک

ریحانه السادات موسوی‌زاده مجرد^{۱*}، سید حسن طباطبائی^۱ و نگار نورمهنداد^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۶)

چکیده

زاویه تماس آب- خاک معیار کمی تمایز خاک آبدوست و آبگریز است. اهداف این پژوهش شامل: (۱) بررسی روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس شامل روش مولاریته الکلی، صعود موئینگی، شاخص جذب‌پذیری و روش قطره چسبان و (۲) تعیین مناسب‌ترین روش در یک نمونه خاک با بافت لوم شنی است. در این پژوهش سطوح مختلف آبگریزی به‌طور مصنوعی با استفاده از اسید استناریک و با آزمون نفوذ قطره آب تهیه شد. زاویه تماس خاک آبدوست در روش‌های مولاریته الکلی، صعود موئینگی، شاخص جذب‌پذیری (دو شیوه محاسبه) و قطره چسبان به‌ترتیب ۸۹/۹، ۷۵/۴۱، ۵۷/۸۱ (۵۶/۲۸ و ۵۸/۹۱) درجه محاسبه شده است. روش قطره چسبان با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس بررسی شد. با این روش زاویه تماس در پنج سطح آبگریزی به‌ترتیب ۵۸/۹۱، ۱۰۴/۹۲، ۱۲۰/۴۸، ۱۲۹/۹۶ و ۱۷۳/۰۷ درجه تعیین شد. روش قطره چسبان به‌دلیل عدم محدودیت کاربرد در خاک‌های آبگریز و دقت ناشی از ترکیب توأم مشاهده عینی برخورد قطره آب به خاک و نرم‌افزار در تعیین زاویه تماس، مناسب‌ترین روش اندازه‌گیری زاویه تماس در خاک‌های آبگریز است. ارتباط زاویه تماس به‌عنوان شاخص کمی آبگریزی و زمان نفوذ قطره به عنوان شاخص کیفی، بررسی شد و همبستگی مثبت ($R^2=0.975$) ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی: آزمون نفوذ قطره آب، روش صعود موئینگی، روش مولاریته الکلی، شاخص جذب‌پذیری، قطره چسبان، دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس

۱. گروه مهندسی آب، گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۲. دانشکده کشاورزی، دانشگاه پیام نور، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Rey.mousavi@gmail.com

مقدمه

آبگریزی خاک (soil water repellency) یکی از ویژگی‌های مهم خاک است. خاک سطحی کشاورزی، آبدوست و به‌سادگی تحت آبیاری خیس می‌شود، اما در شرایطی خاک به‌سختی خیس می‌شود که این پدیده به‌عنوان آبگریزی خاک شناخته می‌شود. آبگریزی برای اولین بار در مطالعات اشیرینر و شوری (۲۴) شناسایی و تعریف شد. مشخص کردن قابلیت خیس شدگی خاک با استفاده از تعیین زاویه تماس هوا-خاک-آب انجام می‌شود (۱۲). زاویه تماس (θ) معیار کمی خیس‌شدگی خاک بوده و زاویه‌ای است که قطره کوچک مایع هنگام تماس با فاز جامد خاک تشکیل می‌دهد. زاویه تماس صفر درجه، خیس‌شدگی کامل را نشان می‌دهد (۱۳). مولر و دورر (۲۰)، بیان کردند زاویه تماس خاک‌هایی که به‌کندی خیس می‌شوند صفر تا نود درجه است. این خاک‌ها، آبگریزی زیر بحرانی (Subcritical hydrophobicity) دارند. زاویه تماس خاک‌های آبگریز واقعی، بیش از نود درجه است. اندازه‌گیری زاویه تماس نه تنها در پژوهش‌های علمی، بلکه در طیف گسترده‌ای از کاربردهای صنعتی مورد نیاز است (۲).

مهم‌ترین کاربرد اندازه‌گیری زاویه تماس مشخص کردن کشش سطحی خاک است (۲۷). زاویه تماس پایین نشان می‌دهد که خاک، انرژی سطحی بالایی داشته لذا قابلیت خیس شوندگی خوبی دارد و آبدوست است، و به‌طور عکس، زاویه تماس بالا نشان می‌دهد که خاک انرژی سطحی پایینی دارد، خاصیت خیس‌شوندگی ضعیف و آبگریز است (۲۷).

روش‌های تعیین زاویه تماس شامل دو دسته اساسی اندازه‌گیری است: ۱) بر اساس نیروهای کششی که غیرمستقیم است و ۲) بر اساس تکنیک‌های نوری که مستقیم اندازه‌گیری می‌شود (۲۷). شیوه‌های معمول اندازه‌گیری زاویه تماس شامل، روش صعود موئینگی (Capillary Rise Method (CRM))، مولاریته الکل (Molarity of Ethanol Droplet (MED))، شاخص دفع آب خاک (Repellency Index (RI)) (جذب پذیری الکل ۹۵ درصد و آب) و روش قطره چسبان

(Sessile Drop Method (SDM)) (۲۱). است. نتایج این روش‌ها به‌طور مؤثر تعیین می‌کند که آب با چه شدت دفع می‌شود و در واقع بیانگر شدت آبگریزی خواهد بود (۱۸).

علاوه بر بررسی کمی آبگریزی از طریق محاسبه زاویه تماس با روش‌های مذکور، پایداری آبگریزی با اندازه‌گیری زمان نفوذ قطره آب در خاک (Water Drop Penetration Time (WDPT)) نیز انجام شده است. این روش شامل قرار دادن قطره آب در خاک و اندازه‌گیری زمان نفوذ یا تعیین زمان جذب قطره آب به نمونه خاک است (۱۰). اگر خاک آبگریز باشد، قطره آب در خاک نفوذ نمی‌کند اما تمایل به سردرگمی دارد و در دوره زمانی مشخص روی سطح خاک می‌ماند. این دوره زمانی متفاوت که قطره آب روی سطح خاک می‌ماند، زمان نفوذ قطره آب در خاک نامیده می‌شود. این روش برای تمایز کیفی سطوح آبگریزی استفاده می‌شود. جدول ۱ سطوح آبگریزی براساس زمان نفوذ قطره آب (WDPT) را نشان می‌دهد (۸).

روش‌های گفته شده تاکنون در یک پژوهش مقایسه و بررسی نشده‌اند. در مطالعات پژوهشگران ایرانی، فقط دو شاخص WDPT و MED خاک‌های آبگریز جنگل‌های رشت بررسی شده‌اند (۱۹). سه روش اندازه‌گیری صعود موئینگی، نفوذ قطره آب و جذب‌پذیری ذاتی در شرایط آبگریزی زیربحرانی در مطالعات کوستینو و همکاران (۶) بررسی و بیان شده که هر چند این روش‌ها روند یکسانی در توصیف شرایط آبگریزی نشان می‌دهند اما، از لحاظ تکنیکی و کاربردی متفاوت هستند. لذا، هر روش را باید با توجه به مزایا و معایب آن بررسی کرد.

هدف از این پژوهش، بررسی روش‌های مختلف تعیین زاویه تماس آب-خاک (توصیف کمی شرایط آبگریزی) شامل روش صعود موئینه (CRM)، مولاریته الکل (DEM)، جذب پذیری ذاتی (IR) و قطره چسبان (SED) در سطوح مختلف آبگریزی ایجاد شده بر اساس پایداری آبگریزی (آزمون WDPT) با توجه به امکانات آزمایشگاهی ایران و ارائه یک پژوهش کاربردی است، که در میان پژوهش‌های داخلی خلأ آن

جدول ۱. سطوح آبگریزی براساس زمان WDPT

سطح آبگریزی	بدون آبگریزی	آبگریزی جزئی	آبگریزی زیاد	آبگریزی شدید	آبگریزی خیلی شدید
WDPT (s)	< ۵	۵-۶۰	۶۰-۶۰۰	۶۰۰-۳۶۰۰	> ۳۶۰۰

جدول ۲. ویژگی‌های خاک مورد آزمایش

ویژگی خاک	شن	رس	سیلت	جرم مخصوص ظاهری	جرم مخصوص حقیقی	PH	EC	ماده آلی
	%	%	%	g cm ^{-۳}	g cm ^{-۳}		dS m ^{-۱}	
مقدار	۵۸	۱۳	۲۹	۱/۴۹	۲/۶۳	۶/۷	۴/۸	۰/۵۸۶

مقدار pH و EC در عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شده است.

جدول ۳. ویژگی‌های کیفیت آب مورد استفاده

EC	pH	Ca ^{۲+}	Mg ⁺	HCO ₃ ⁻	So ₄ ²⁻
(dS m ^{-۱})		(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)
۰/۳۵۶	۷/۵	۱/۵	۰/۵	۲/۲	۰/۱۵

برای تعیین زمان نفوذ قطره آب، سه قطره آب مقطر با استفاده از قطره چکان استاندارد پزشکی، روی سطح صاف خاک قرار داده شد و مدت زمان جذب آب توسط خاک ثبت شد (۹). با توجه به حلالیت ناچیز اسید استتاریک در آب، از استون به عنوان حلال اسید استتاریک استفاده شد. پنج تیمار خاک با سطوح مختلف آبگریزی با تکیه بر نتایج این آزمون تهیه شد و شدت آبگریزی در هر یک با تعیین زاویه تماس آب- خاک به منظور توصیف کمی آبگریزی بررسی شد. روش‌های مختلف تعیین زاویه تماس آب- خاک به‌عنوان شاخص کمی در تعیین شدت آبگریزی به‌شرحی که در ادامه آمده است بررسی شد.

الف) روش مولاریته (MED)

در این روش از تعدادی محلول آب و الکل اتانول با مولاریته‌ها و کشش سطحی متفاوت، استفاده شد (۳). مولاریته‌های مختلف آب و الکل با استفاده از معادله (۱) تهیه شد:

$$C_m = \frac{n * m}{d * \rho_e} \quad (1)$$

ملموس است. نتایج این تحقیق برای پژوهشگران حوزه آبگریزی خاک قابل استفاده خواهد بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از خاک لوم شنی آبدوست رده آریدوسول با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ استفاده شد. خاک مورد مطالعه از دانشگاه آزاد خوراسگان، برداشت شده است. کیفیت آب مورد استفاده در پژوهش به شرح جدول ۳ بوده است.

سطوح مختلف آبگریزی بر اساس آزمون پایداری آبگریزی (WDPT) در خاک لوم شنی با استفاده از اسید استتاریک به‌صورت مصنوعی ایجاد شد. اسید استتاریک پودری سفید رنگ، غیرقطبی و با فرمول C₁₈H₃₆O₂ یا CH₃(CH₂)₁₆COOH معرفی می‌شود که اسیدی آلی است که در خاک طبیعی یافت می‌شود (۱۱). افزودن این اسید آلی به خاک، سبب افزایش ماده آلی خاک می‌شود. در مطالعات پیشین، کاربرد اسید استتاریک در آب‌گریز کردن خاک، برای بررسی اثرات آب‌گریزی خاک بر مشخصات نفوذ خاک بررسی شده است (۴). در این آزمون

با استفاده از معادله (۶) محاسبه شد:

$$r = \frac{2\gamma_e}{h_e \rho_e g} \quad (5)$$

$$\cos \alpha = \frac{h_w \rho_w \gamma_e}{h_e \rho_e \gamma_w} \quad (6)$$

این روش در خاک‌هایی که زاویه تماس بزرگ‌تر از نود درجه دارند (خاک‌های آبگریز) قابل استفاده نیست (۱، ۱۶ و ۱۷). محدودیت روش موئینگی برآورد زاویه تماس بیشتر از ۹۰ درجه در خاک‌های آبگریز است (۱۲).

ج) جذب‌پذیری ذاتی یا شاخص RI

جذب‌پذیری در خاک ابتدا با آب و سپس با الکل اتانول برآورد شد. این آزمایش با استفاده از دستگاه جذب‌پذیری ذاتی که در آزمایشگاه فیزیک خاک گروه خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان موجود است (شکل ۱) انجام شد. نمونه خاک زیر دستگاه قرار گرفت و مایع مورد آزمون (آب یا الکل اتانول) به صورت قطره‌ای از لوله‌های فوقانی نمونه بر اساس اصل ماریوت حرکت کرده و از خروجی بر خاک چکید. جرم قطره و خاک توسط ترازوی دیجیتال به کامپیوتر ارسال شد. این آزمون هر ۵ ثانیه تکرار شد و تا ۱۸۰ ثانیه (۳ دقیقه) ادامه یافت. سپس نمونه خاک آن خشک شد. با توجه به چگالی آب و الکل اتانول (چگالی آب در دمای اتاق ۰/۹۹۸ و الکل اتانول ۹۵ معادل ۰/۷۸۹ گرم بر سانتی متر مکعب)، مقدار جرم (گرم) به حجم نفوذ یافته (سانتی متر مکعب) تبدیل شد. با توجه به شعاع قطره آب یا الکل اتانول (۰/۲ سانتی متر) و محاسبه سطح کره قطره (۰/۱۲۶ سانتی متر مکعب) نمودار نفوذ (سانتی متر مکعب) نسبت به زمان (ثانیه) و نسبت به ریشه زمان (ثانیه) به توان ۱/۲ ترسیم شد. در خاک آبدوست جذب‌پذیری الکل اتانول هیچگاه بزرگ‌تر از جذب‌پذیری آب نخواهد شد (۲۵). این روش به دو شیوه بررسی شد:

الف: مقدار جذب‌پذیری برای آب و الکل اتانول با استفاده از معادله (۷) به دست آمد:

در معادله فوق، n مولاریته مورد نظر، m جرم مولی الکل، d درجه خلوص الکل و ρ_e چگالی الکل است. C_m حجم مورد نیاز الکل است که طبق تعریف مولاریته این حجم باید به همراه حجم آب به یک لیتر برسد.

$$\gamma_{ND} = 58.49 - (6.846 * M_e) + (0.512 * M_e^2) + (13.88 * e^{-M_e}) - (0.0139 * M_e^3) \quad (2)$$

در معادله (۲)، λ_{ND} (دین بر سانتی متر مربع) کشش سطحی محلولی است که در مدت زمان کمتر از ۵ ثانیه در خاک نفوذ می‌کند (۱۴). γ_w کشش سطحی آب در دمای ۲۵ درجه و برابر با ۷۲/۰۱ (دین بر سانتی متر مربع) است (۲۳). M_e در معادله مذکور، مولاریته محلولی است که در زمانی کمتر از ۵ ثانیه جذب خاک می‌شود. زاویه تماس با استفاده از معادله (۳) محاسبه شد:

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{\lambda_{ND}}{\gamma_w}} - 1 \quad (3)$$

ب) روش موئینگی (CRM)

در این روش از دو لوله موئین به ارتفاع تقریبی ۲۰ سانتی متر، استفاده شد. لوله‌ها با خاک هر یک از تیمارها پر شد و درون دو ظرف یکی حاوی آب مقطر و دیگری الکل قرار گرفت. مقدار صعود سیال در زمان‌های مختلف ثبت شد و آزمایش تا توقف صعود در یکی از سیال‌ها، انجام شد. با فرض منافذ خاک به صورت لوله‌های موئین، ارتفاع موئینگی با استفاده از معادله (۴) قابل محاسبه است:

$$h = \frac{2\gamma_l \cos \alpha}{\rho g r} \quad (4)$$

در معادله (۴) h ارتفاع موئینگی، γ کشش سطحی، r شعاع موئینگی، ρ چگالی آب و g ثابت گرانش است. زمانی که α بزرگ‌تر از ۹۰ درجه است $\cos \alpha$ منفی است و آب به لوله وارد نخواهد شد. در معادله (۴)، شعاع موئینگی (r) مجهول است که برای برآورد آن از الکل استفاده شد که زاویه تماس آن صفر و در نتیجه مقدار کسینوس زاویه یک است (۱۷). لذا طبق معادله (۵) مقدار شعاع موئینگی قابل محاسبه است. مقدار زاویه تماس



شکل ۱. تجهیزات اندازه‌گیری جذب‌پذیری خاک

زمان (ثانیه به توان ۱/۲) به‌دست آمده است. در معادله (۸)، ضریب ۱/۹۵ ناشی از تفاوت در کشش سطحی و لزجت آب و الکل اتانول است. الکل اتانول ساختار قطبی ندارد، به‌سرعت در خاک آبگریز وارد می‌شود و جذب‌پذیری آن در خاک نشان دهنده ظرفیت نفوذ واقعی آب در خاک است. با توجه به این خصوصیات، شاخص آبگریزی با مقایسه جذب‌پذیری الکل اتانول و آب ارزیابی شد. زاویه تماس آب- خاک با توجه به شاخص دفع آب از معادله (۹) محاسبه شد (۷):

$$\theta = \arccos\left(\frac{1}{R}\right) \quad (9)$$

د) اندازه‌گیری با کمک دستگاه اندازه‌گیری زاویه (روش قطره چسبان (SDM)

روش قطره چسبان اندازه‌گیری مستقیم زاویه تماس با استفاده از زاویه‌سنج است. که کاربر می‌تواند زاویه تماس را به‌صورت بصری اندازه‌گیری کند (۲۱ و ۲۷). تکنیک به‌کار رفته در دستگاه‌های اندازه‌گیری زاویه تماس، روش قطره چسبان است که بر اساس مشاهده شکل قطره روی سطح و اندازه‌گیری زاویه تماس است و برای تعیین خصوصیات ترشوندگی و انرژی سطحی یک ناحیه مشخص روی سطح جامد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس مدل CA-500A کنترل سیستم قطره‌انداز به‌صورت اتوماتیک با دقت ۰/۵ میکرولیتر

$$S = \sqrt{\frac{Q \times n}{4b \times r}} \quad (7)$$

در معادله فوق، Q جریان سیال (mm^3/s)، r شعاع نوک میکرونفوذسنج (۲ میلی‌متر)، n تخلخل کل (mm^3/mm^3) و b پارامتری وابسته از تابع پخشیدگی آب در خاک است که معادل ۰/۵۵ در نظر گرفته می‌شود (۲۶). مقدار Q با استفاده از نرخ نفوذ سیال در محدوده‌ای استوانه‌ای از سطح خاک به‌دست آمد. در این روش مقدار Q شیب معادله به‌دست آمده از ترسیم گرافیکی نفوذ (سانتی‌متر مکعب) نسبت به زمان (ثانیه) به‌دست آمد. همچنین می‌توان برای تمام قرائت‌های دستگاه، مقدار حجم نفوذ نسبت به زمان را محاسبه و متوسط این مقادیر را معادل Q (جریان سیال) قرار داد.

ب: شاخص دفع آب (RI) با توجه به پیشنهاد تیلمن و همکاران، ۱۹۸۹ به‌طور ساده محاسبه شد (۲۵):

طبق معادله (۸) شاخص دفع آب مرتبط با جذب‌پذیری الکل اتانول و آب است (۱۵).

$$RI = 1.95 \frac{S_e}{S_w} \quad (8)$$

مقدار RI، برابر یک، بیش از ۱/۹۵ و بیش از ۵۰ به‌ترتیب بیانگر شرایط آبدوستی، آبگریزی زیر بحرانی و آبگریزی شدید است (۲۵).

جذب‌پذیری الکل اتانول و آب از شیب معادله به‌دست آمده در ترسیم گرافیکی نفوذ (سانتی‌متر مکعب) و نسبت به ریشه



شکل ۴. دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس

صد درصد حجم سیال الکل باشد، قادر به تخمین زاویه تماس (زاویه 150° درجه) است. نتایج این روش در تعیین کیفی شدت آبگریزی مناسب است و نتایج کمی مناسبی حاصل نمی‌شود. کوستینو و همکاران (۶)، ضمن مقایسه نتایج برخی روش‌های تعیین زاویه تماس آب-خاک به اهمیت مفهومی هر روش و محدودیت‌ها و مزایای هر روش اذعان داشته و با این وصف ارتباط میان روش‌های مطالعاتی را به‌طور کیفی بیان کردند.

۲-۲- روش صعود موئینگی

صعود آب و الکل در یک لوله موئین محتوی خاک مورد آزمایش، قرائت شد. شکل ۵ نحوه بالا رفتن سیال آب و الکل در خاک را نشان می‌دهد. صعود الکل در خاک با سرعت بیشتری انجام شده است و در نتیجه زودتر به انتهای ستون خاک رسیده است.

با توجه به معادله ۲ و قرار دادن وزن مخصوص آب و الکل به ترتیب معادل ۱ و 0.789 گرم بر سانتی‌متر مکعب و کشش سطحی آب و الکل به ترتیب معادل 0.072 و 0.022 نیوتن بر مترمربع زاویه تماس آب-خاک در خاک آبدوست (تیمار شاهد) معادل $75/411$ درجه به دست می‌آید. با توجه به معادله ۵ و دانسته‌های مسئله، شعاع موئینگی خاک معادل 0.00695 سانتی‌متر به دست می‌آید. به صراحت بیان شده است که در

است و دارای سیستم نوری با مشخصات $1/3$ مگاپیکسل و بزرگنمایی اپتیکی تا 140 برابر است. سیستم اندازه‌گیری دارای نرم‌افزاری است که امکان آنالیز قطره تشکیل شده روی سطح را فراهم می‌آورد. در مدل CA-500A بررسی دینامیکی رفتار قطره و زاویه تماس ایجاد شده روی سطوح به شدت آبدوست با گذشت زمان از طریق فیلمبرداری وجود دارد (شکل ۴).

نتایج و بحث

۱- بررسی درجات آبگریزی بر اساس آزمون نفوذ قطره آب یا **WDPT** یا غلظت‌های مختلف اسید استئاریک برای ایجاد درجات مختلف آبگریزی با سعی و خطا به دست آمده و در جدول ۴ گزارش شده است.

۲- تعیین زاویه تماس

۱-۲- روش مولاریته الکل یا **MED**

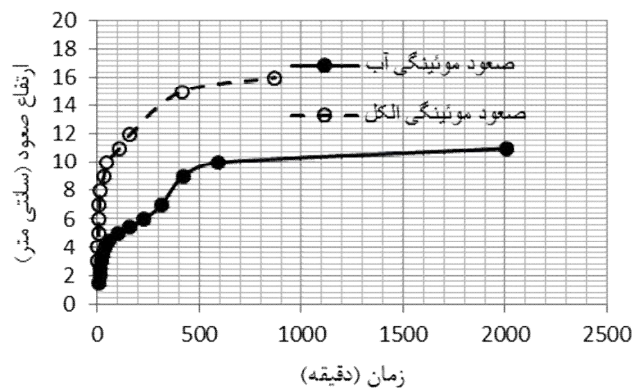
با قرار دادن مولاریته‌های مختلف از آب و الکل اتانول روی ۵ تیمار خاک (۵ درجه آبگریزی) و ثبت زمان نفوذ، کشش سطحی مولاریته‌ای که در زمان کمتر از ۵ ثانیه ($7ND$)، جذب خاک شد تعیین شد و طبق معادله ۲، مقدار زاویه تماس محاسبه و در جدول ۵ گزارش شده است. روش مولاریته الکل تا جایی که

جدول ۴. مقدار اسید استتاریک مورد نیاز جهت ایجاد درجه‌های مشخص آبگریزی بر اساس آزمون WDPT

درجه آبگریزی	۱	۲	۳	۴	۵
(آبدوست)	(آبگریز جزئی)	(آبگریز زیاد)	(آبگریز شدید)	(آبگریز خیلی شدید)	
۰	۱۲	۱۳	۱۶	۲۲	
۱	۳۰	۳۰۰	۲۰۰۰	۷۲۰۰	
اسید استتاریک (g Kg ⁻¹ soil)					
زمان نفوذ قطره (ثانیه)					

جدول ۵. نتایج روش مولاریته الکل

درجه آبگریزی	۱	۲	۳	۴	۵
(آبدوست)	(آبگریز جزئی)	(آبگریز زیاد)	(آبگریز شدید)	(آبگریز خیلی شدید)	
۰	۲	۳/۰۸	۵/۷	۷/۶	
مولاریته محلولی که در کمتر از ۵ ثانیه نفوذ کرده است					
۷۲/۳۸	۴۸/۶۲	۴۱/۵	۳۳/۶۱	۲۹/۹۲	
کشش سطحی محلول γ ND (دین بر سانتی متر)					
۸۹/۹	۱۰۰/۳	۱۰۳/۵	۱۰۹	۱۱۰/۸	
زاویه تماس					



شکل ۵. صعود آب و الکل در خاک لوم شنی آبدوست

گزارش شده است. مقدار حجم نفوذ یافته سیال نسبت به زمان در شکل ۶ نشان داده شده است. این روش برای خاک‌های آبدوست که شاخص آبگریزی معادل یک باشد و یا آبگریزی زیر بحرانی ($R < 1/95$) نتایج مناسبی ارائه می‌دهد (۲۵). مقدار جریان آب و الکل در خاک به ترتیب شیب دو نمودار فوق است. مقدار حجم نفوذ یافته در آب یا الکل با توجه به وزن نفوذ کرده در خاک به دست می‌آید. علاوه بر استفاده از شیب نمودار، می‌توان متوسط جریان نفوذ کرده در مدت زمان آزمایش (سه دقیقه) را، در معادله (۷) قرار داد. جریان نفوذ یافته سیال نسبت به ریشه زمان در شکل ۷ نشان داده شده است.

شرایطی که زاویه تماس بیش از نود درجه باشد (خاک آبگریز)، روش صعود موئینگی نتایج قابل قبولی ارائه نمی‌دهد. چرا که در این شرایط آب تحت تأثیر فشار هیدرولیکی و نه موئینگی وارد خاک می‌شود. لذا صعود موئینه اتفاق نمی‌افتد (۱۸). نتایج به دست آمده از این روش برای خاک آبگریز در واقع نتایجی غیرمنطقی هستند.

۲-۳- روش جذب پذیری ذاتی با تعیین شاخص RI

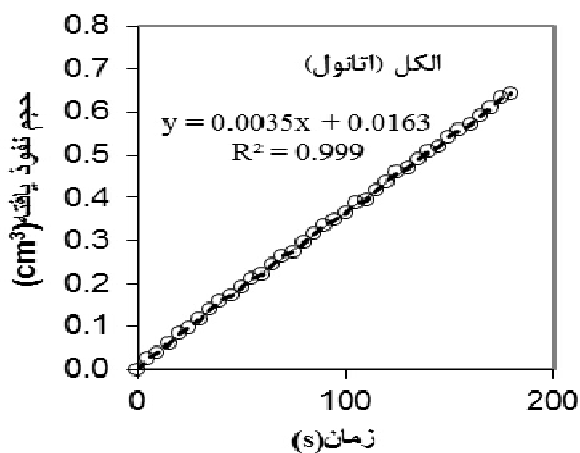
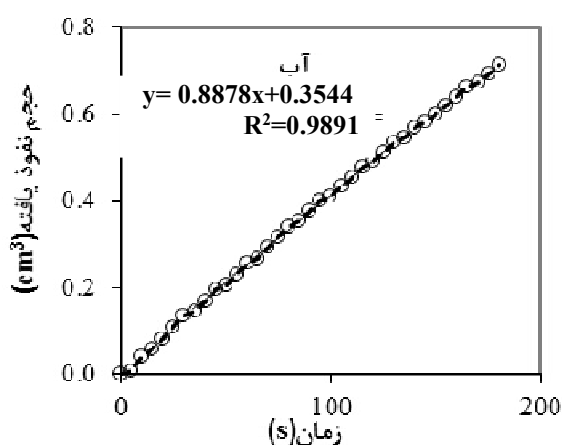
نتایج به دست آمده برای خاک آبدوست (تیمار شاهد) با توجه به روش ۱ در جدول ۶ و با توجه به روش ۲ در جدول ۷

جدول ۶. نتایج روش ۱ تعیین شاخص R

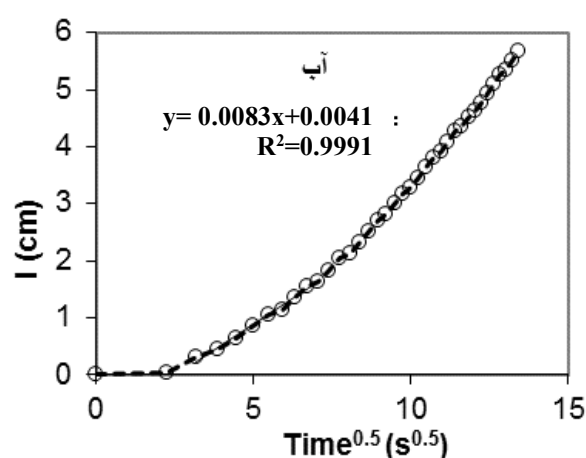
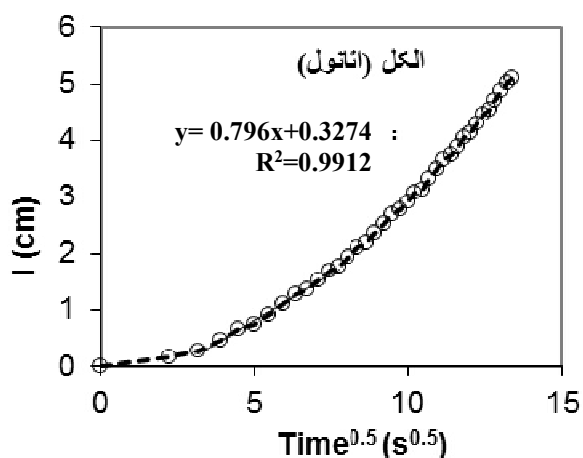
پارامترهای معادله (۷)	شعاع قطره (cm)	چگالی ظاهری خاک (gr/cm ³)	تخلخل	جریان الکلی (mm ³ /s)	جریان آب (mm ³ /s)	شاخص (R)	زاویه تماس (درجه)
مقدار	۰/۲	۱/۴۹	۰/۴۳۸	۰/۰۰۳۵	۰/۰۴۱	۱/۸۷۷	۵۷/۸۱

جدول ۷. نتایج روش ۲ تعیین شاخص R

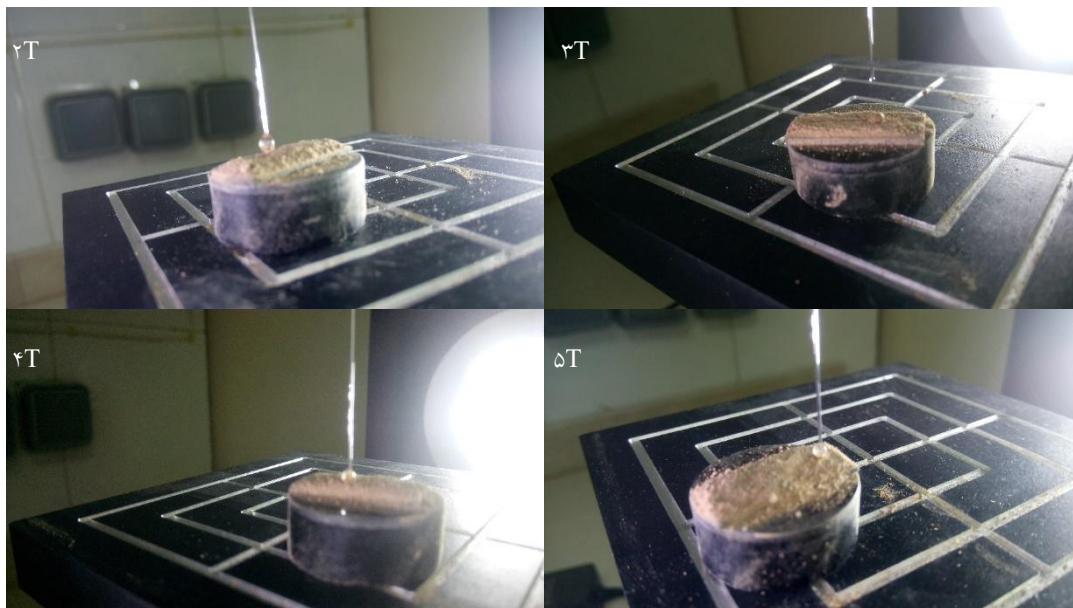
پارامترهای معادله (۸)	جذب پذیری آب cm/0.5 s	جذب پذیری الکلی cm/0.5 s	شاخص R	زاویه تماس درجه
مقدار	۰/۳۵۴۴	۰/۳۲۷۴	۱/۸۰۱	۵۶/۲۸



شکل ۶. حجم نفوذ یافته سیال در زمان



شکل ۷. جریان نفوذ یافته سیال نسبت به ریشه زمان



شکل ۸. تصویر برخورد قطره آب با تیمارهای مختلف خاک آبگریز در زمان اندازه‌گیری زاویه تماس

جدول ۸. زاویه اندازه‌گیری شده با روش قطره چسبان

آبگریزی خیلی شدید	آبگریزی شدید	آبگریزی زیاد	آبگریزی جزئی	آبدوست	تیمار خاک
۱۷۳/۰۷	۱۲۹/۹۶	۱۲۰/۴۸	۱۰۴/۹۲	۵۸/۹۷	زاویه تماس (درجه)

گزارش شده است.

۲-۴- اندازه‌گیری زاویه تماس با روش قطره چسبان یا SDM

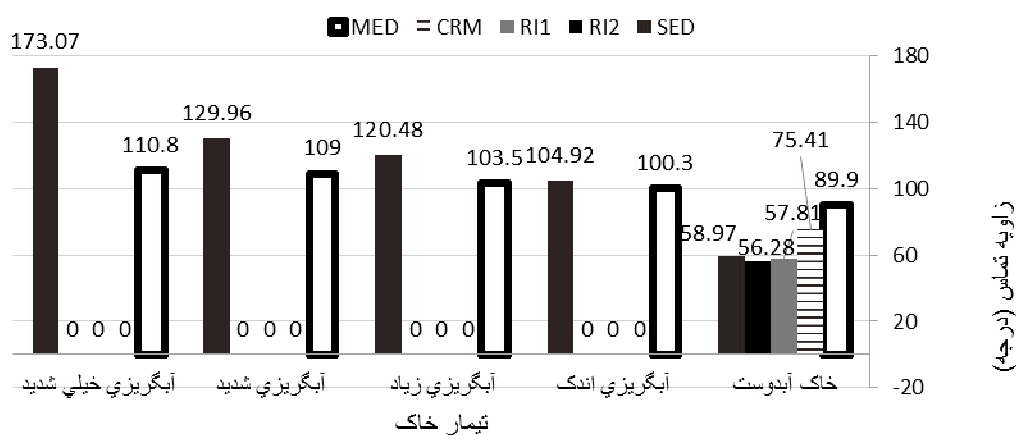
کاربرد دستگاه میکروسکوپ نفوذسنج (۵) در خاک آبگریز نتایج قابل قبولی ارائه خواهد داد (۱۸). این روش نسبت به روش‌های دیگر خطای کمتر دارد و در حین اندازه‌گیری زاویه، می‌توان با سعی و خطا، هر گونه اشتباهی را تصحیح کرد. اندازه‌گیری زاویه تماس با دستگاه بلافاصله هنگام برخورد قطره با خاک انجام شده است. تصویر برخورد قطره آب با تیمارهای مختلف خاک آبگریز در زمان اندازه‌گیری زاویه تماس در شکل ۸ نشان داده شده است. در تصویر برخورد قطره آب با تیمارهای مختلف خاک در زمان اندازه‌گیری زاویه تماس، نحوه جذب قطره آب رها شده از قطره‌انداز تعبیه شده در بالای سطح خاک، با ذرات خاک مشخص است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش درجه آبگریزی خاک، قطره آب به‌صورت کروی بر سطح خاک قرار گرفته است.

مقدار زاویه تماس برآورد شده با این روش در جدول ۸

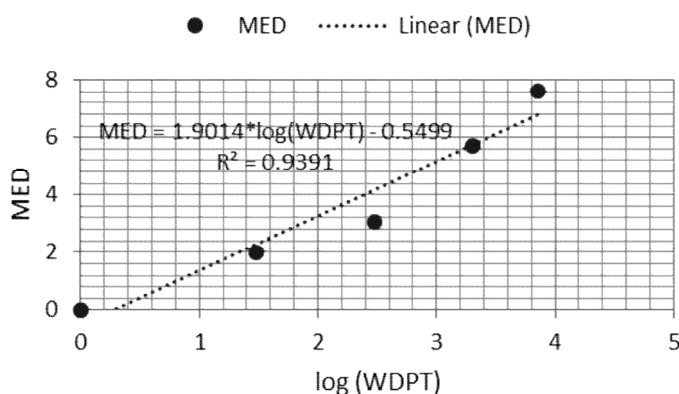
۲-۵- مقایسه روش‌های مختلف تعیین زاویه تماس

زاویه تماس برآورد شده با هر یک از روش‌های مورد بررسی در شکل ۹ مشخص شده است.

با توجه به محدودیت دو روش صعود موئینگی (۱۸) و جذب‌پذیری ذاتی (۲۵)، نتایج این دو روش تنها برای تعیین زاویه تماس خاک آبدوست قابل کاربرد است. زاویه تماس خاک آبدوست در روش صعود موئینگی ۷۵/۴۱ درجه و در روش جذب‌پذیری ذاتی (بر اساس دو شیوه اندازه‌گیری) ۵۷/۸۱ و ۵۶/۲۸ درجه تعیین شده است. با توجه به اینکه زاویه تماس خاک لوم شنی مورد مطالعه، کمتر از نود درجه برآورد شده است، طبق تعریف مولر و دورر، دارای آبگریزی زیر بحرانی است (۲۰). حال آنکه، طبقه‌بندی دکر و ریتسما، خاک آبدوست تعریف شده است (۸).



شکل ۹. زاویه تماس با روش‌های مورد بررسی

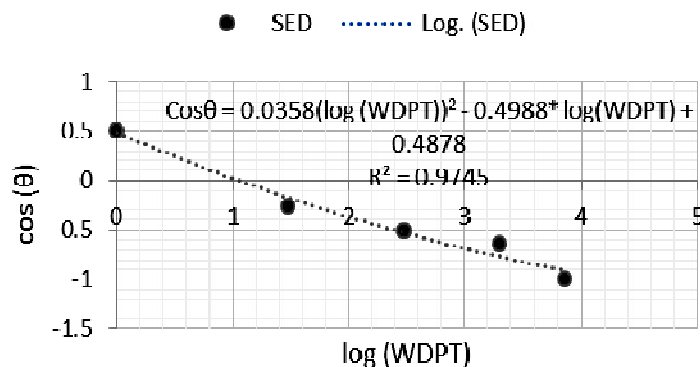


شکل ۱۰. همبستگی مولاریته الکل با زمان نفوذ قطره

درجات آبگریزی به صورت کیفی به کار برد. همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، آزمون WDPT و مولاریته الکل دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری هستند و ضریب همبستگی رابطه ۰/۹۳۹ است. طبق نتایج به دست آمده بیشترین مقدار MED متناظر با بیشترین مقدار WDPT است. این نتیجه با یافته‌های مطالعات دیگر مطابقت دارد (۱۹). از میان روش‌های مورد بررسی، روش مولاریته الکل روشی ساده و سریع است که با توجه به تخمین مناسب کیفی، ساده‌ترین روش برای تمایز درجات مختلف آبگریزی است.

برای برآورد زاویه تماس، با توجه به دقت روش قطره چسبان با استفاده از دستگاه زاویه‌سنج و اندازه‌گیری آنی زاویه

برای اندازه‌گیری زاویه تماس در خاک‌های آبگریز دو روش قطره چسبان و مولاریته الکل قابل کاربرد هستند. نتایج به دست آمده از روش مولاریته الکل، از نظر کمی محدودیت دارد. برآورد زاویه تماس با این روش حداکثر ۱۵۰ درجه است که صد درصد حجم سیال الکل باشد. همانگونه که انتظار می‌رود با افزایش درجه آبگریزی و کاهش انرژی سطحی زاویه تماس بالاتر برآورده شده است. لذا روند تخمین زاویه تماس با روش مولاریته الکل منطقی است و نتایج این روش برای تعیین وضعیت کیفی آبگریزی مناسب است. مقدار مولاریته به دست آمده از این روش با نتایج آزمون WDPT قابل مقایسه خواهد بود چرا که هر یک از این دو روش را می‌توان در طبقه‌بندی



شکل ۱۱. همبستگی مقادیر زاویه تماس و زمان نفوذ قطره WDPT

ذاتی، در برآورد زاویه تماس در خاک‌های آبگریز که مقدار زاویه تماس مورد انتظار بیشتر از ۹۰ درجه است، نتایج این دو روش تنها برای تعیین زاویه تماس خاک آبدوست قابل کاربرد است. زاویه تماس خاک آبدوست در روش صعود موئینگی ۸۹/۸ درجه و در روش جذب‌پذیری ذاتی (بر اساس دو شیوه اندازه‌گیری) ۵۷/۸۱ و ۵۶/۲۸ درجه تعیین شده است.

نتایج به‌دست آمده از روش مولاریته الکل تا زاویه تماس حداکثر ۱۵۰ درجه قابل استفاده خواهد بود. نتایج این روش برای تعیین وضعیت کیفی آبگریزی و متمایز کردن درجات آبگریزی مناسب است. همبستگی نتایج این روش با روش نفوذ قطره مثبت و ضریب همبستگی ۰/۹۳۹ به‌دست آمد.

با توجه به دقت روش قطره چسبان و اندازه‌گیری آنی زاویه تماس، نتایج این روش در مطالعات حوزه آبگریزی پیشنهاد می‌شود. نتایج به‌دست آمده از این روش حداکثر زاویه ۱۷۳/۰۷ درجه برای وضعیت آبگریزی خیلی شدید و ۵۸/۹۷ درجه برای خاک آبدوست را ارائه کرده است. ارتباط زاویه تماس به‌عنوان شاخص کمی آبگریزی و زمان نفوذ قطره به‌عنوان شاخص کیفی، بررسی شد و همبستگی مثبت ارزیابی شد.

نتایج این روش در مطالعات حوزه آبگریزی پیشنهاد می‌شود. نتایج به‌دست آمده از این روش حداکثر زاویه ۱۷۳/۰۷ درجه برای وضعیت آبگریزی خیلی شدید و برای خاک آبدوست ۵۸/۹۷ درجه را ارائه کرده است.

همبستگی مقادیر زمان نفوذ قطره آب (WDPT) و زاویه تماس انتخابی برای تیمارها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همبستگی بین این مقادیر نیز مثبت است و با نتایج گزارش شده توسط کوستینو و همکاران مطابقت دارد (۶). افزایش زمان نفوذ قطره آب در خاک که نشان‌دهنده افزایش درجه آبگریزی خاک است، متناظر با افزایش زاویه تماس خاک (منفی‌تر شدن کسینوس زاویه) شده است.

با توجه به اهمیت مفهومی هر روش و محدودیت‌ها و مزایای هر روش و ارتباط کیفی روش‌های مطالعاتی (۶)، همبستگی روش‌های توصیف کمی و کیفی همبستگی نیز مثبت به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری

با توجه به محدودیت دو روش صعود موئینگی و جذب‌پذیری

منابع مورد استفاده

1. Bachmann, J., S. K. Woche and M. O. Goebel. 2003. Extended methodology for determining wetting properties of porous media. *Water Resources Research* 39: 1353-1366.
2. Biolo, D., M. Wang and V. Bertola. 2016. Assessment of direct image processing methods to measure the apparent contact angle of liquid drops. *Experimental Thermal and Fluid Science* 76: 296-305.

3. Bukzko, U., O. Bens and R. F. Huttl. 2005. Variability of soil water repellency in sandy forest soils with different stand structure under Scots pine and beech. *Geoderma* 126: 317-336.
4. H Beyrami, H., M. R. Neyshabouri, A. H. Nazemi and F. Abbasi. 2015. Effect of soil water repellency on infiltration characteristic on two sandy loam and clay loam soils. *Journal of Water and Soil Science* 25(2): 181-192. (in Farsi).
5. Carrillo, M. L. K., J. Letey and S. R. Yates. 1999. Measurement of initial soil-water contact angle of water repellent soils. *Soil Science Society of America Journal* 63: 433-436.
6. Cosentino, D., P. D. Hallett, J. C. Michel and C. Chenu. 2010. Do different methods for measuring the hydrophobicity of soil aggregates give the same trends in soil amended with residue? *Geoderma* 159: 221-227.
7. De Gryze, S., L. Jassogne, J. Six, H. Bossuyt, M. Wevers and R. Merckx. 2006. Pore structure changes during decomposition of fresh residue: X-ray tomography analyses. *Geoderma* 134: 82-96.
8. Dekker, L. W. and C. J. Ritsema. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. I. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research* 30: 2507-2517.
9. Dekker, L. W., C. J. Ritsema, K. Oostindie and D. Moore. 2009. Methods for determining soil water repellency of field-moist samples. *Water Resources Research* 45: 33.
10. Dekker, L. W., K. Oostindie and C. J. Ritsema. 2005. Exponential increase of publications related to soil water repellency. *Australian Journal of Soil Research* 43: 403-441.
11. Deng, Y., and J. B. Dixon. 2002. Soil organic matter and organic mineral interactions. PP. 69-107. In: Dixon, J. B. and D. G. Schulze (Eds.), *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. SSSA Book Series No 7. Soil Science Society of America. Madison.
12. Goebel, M. O., J. Bachmann, S. K. Woche, W. R. Fischer and R. Horton. 2004. Water potential and aggregate size effects on contact angle and surface energy. *Soil Science Society of America Journal* 68: 383-393.
13. Hoffman, A. S. 2005. Lectures on contact angles. Presentation; 2005.92. Surface Electro Optics 366 (SEO). What is Contact Angle? Contact Angle Catalog. 946, kosekdong, Suwon City, 367Kyunggido, Korea. Available: www.seo.com
14. Kermanpour, M., M. R. Mosaddeghi, M. Afyuni and M. A. Hajabassi. 2015. Effect of petroleum pollution on soil water repellency and structural stability in Bakhtiardasht Plain, Isfahan. *Journal of Water and Soil Science* 19(73): 139-149. (in Farsi).
15. Leeds-Harrison, P., B. Youngs and E. G. Uddin. 1994. A device for determining the sorptivity of soil aggregates. *European Journal of Soil Science* 45: 269-272.
16. Leelamanie, D. A. L., J. Karube and A. Yoshida. 2008. Characterizing water repellency indices: Contact angle and water drop penetration time of hydrophobized sand. *Soil Science and Plant Nutrition* 54: 179-187.
17. Letey, J. 1969. Measurement of contact angle, water drop penetration time and critical surface tension. Proceeding Symposium on Water Repellent Soils 1968. University of California.
18. Letey, J., M. L. K. Carrillo and X. P. Pang. 2000. Approaches to characterize the degree of water repellency. *Journal of Hydrology* 231-232.
19. Mirbabaee, S. M., M. Sh. Shahrestani, A. Zolfaghari and K. M. Abkenar. 2013. Relationship between soil water repellency and some of soil properties in northern Iran. *Catena* 108(1): 26-35
20. Muller, K. and M. Deurer. 2011. Review of the remediation strategies for soil water repellency. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 144: 208-221.
21. Olorunfemi, I. E., T. A. Ogunrinde and J. T. Fasinmirin. 2014. Soil hydrophobicity: an overview. *Journal of Scientific Research & Reports* 3(8): 1003-1037.
22. Ramirez-Flores, J. C., S. K. Woche, J. Bachmann, M. O. Goebel and P. D. Hallett. 2008. Comparing capillary rise contact angles of soil aggregates and homogenized soil. *Geoderma* 146: 336-343.
23. Roy, J. L. and W. B. McGill. 2002. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (MED) test. *Soil Science* 167(2): 83-97
24. Schreiner, O. and E. C. Shorey. 1910. Chemical nature of soil organic matter. *USDA Bureau of Soils Bulletin* 74: 2-48.
25. Tillman, R. W., D. R. Scotter, M. G. Wallis and B. E. Clothier. 1989. Water-repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Australian Journal of Soil Research* 27: 631-644.
26. White, I., and M. J. Sully. 1987. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. *Water Resources Research* 23: 1514-1522.
27. Yuan Y. and T. R. Lee. 2013. Contact angle and wetting properties. In: *Surface science techniques*. ed: Springer.

Comparison Methods of Determining the Degree of Hydrophobicity Based on the Measurement of Soil-Water Contact Angle

R. Mousavi Zadeh Mojarad^{1*}, S. H. Tabatabaei¹ and N. Nourmahnad²

(Received: April 27-2019; Accepted: September 27-2020)

Abstract

The contact angle is a numerical index of differentiation between hydrophilic and hydrophobic soils. The objectives of this research are: 1) assessing different methods such as capillary rise, the molarity of ethanol droplet, repellency index, and sessile drop, and 2) Determining the most efficient method in a typical soil with sandy loam texture. In this study, hydrophobic soil was hydrophobized artificially using stearic acid and according to the water drop penetration time classification method. Calculated contact angles of hydrophilic soil with capillary rise method, the molarity of ethanol droplet method, repellency index (two methods of calculation), and sessile drop method were 89.9, 75.41, (57.81), 56.28, and 58.91, respectively. Using the contact angle measuring device, the contact angle of five hydrophobic levels were 58.91, 104.92, 120.48, 129.96, and 173.07, respectively. According to the precession of the device where the operator is capable to control data and processes and there is no limitation in usage, therefore, the sessile drop method is the most suitable method to measure contact angle. The contact angle of the late method and water drop penetration data are positively correlated ($R^2 = 0.975$).

Keywords: Water drop penetration test, Capillarity rise method, Ethanol molarity method, Sorptivity index, Sessile drop method, Contact angle measuring device

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Chaharmahal-Va-Bakhtiari, Iran.
2. College of Agriculture, Payam Noor University, Iran.
Corresponding author, Email: Rey.mousavi@gmail.com