

اثر توأم کدورت آب آبیاری و بافت خاک بر صحت اندازه‌گیری رطوبت خاک با روش انعکاس سنجی زمانی

صابر جمالی^۱، حسین انصاری^{۱*} و فرشته رحیمی آغ چشمه^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۱۳)

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی اثر سطوح مختلف کدورت آب آبیاری و بافت خاک بر دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از دستگاه انعکاس‌سنج زمانی (TDR) بود. این پژوهش در شرایط گلخانه‌ای در سه خاک با بافت (رس سیلتی، لوم رسی و لوم شنی) و در ۳ کدورت آب (صفر، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ NTU) با سه تکرار انجام شد. در این پژوهش رطوبت حجمی خاک (θ_v) با استفاده از دستگاه TDR اندازه‌گیری شد و با مقادیر اندازه‌گیری شده به روش وزنی مقایسه شد. نتایج نشان داد که دستگاه TDR در خاک لوم شنی در تمامی سطوح کدورت آب آبیاری دارای بیش‌ترین دقت بوده (به ترتیب در کدورت آب صفر، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ NTU دارای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۰/۰۲۴، ۰/۰۲۷ و ۰/۰۳۸) و با افزایش میزان رس خاک از دقت دستگاه کاسته شده است. بر اساس نمودار همسانی ترسیم شده برای نتایج روش TDR و روش وزنی، بیش‌ترین و کم‌ترین همسانی بین دو روش به ترتیب در تیمارهای لوم رسی + آب چاه ($R^2=0/94$) و رس سیلتی + کدورت ۱۵۰۰ NTU ($R^2=0/84$) مشاهده شد. نتایج نشان داد که افزایش کدورت آب منجر به کاهش دقت دستگاه در بافت‌های خاک مورد بررسی شده است. بیش‌ترین دقت در اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از این دستگاه در بافت لوم شنی + استفاده از آب چاه در آبیاری بود.

واژه‌های کلیدی: برآورد رطوبت خاک، دستگاه TDR، روش وزنی، کدورت آب، میزان رس.

مقدمه

مدیریت سیستم‌های آبیاری از اهمیت بسیاری برخوردار است. پیشرفت و توسعه فناوری به صورت چشمگیری در حوزه آبیاری و فیزیک خاک در عصر حاضر اتفاق افتاده است که در این زمینه می‌توان به توسعه روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک، مانند استفاده از دستگاه TDR (Time Domain Reflectometry) اشاره کرد (۴). باتوجه به اینکه اندازه‌گیری

از جمله مهم‌ترین موضوعات مورد بحث در روابط آب، خاک و گیاه، آگاهی از مقدار رطوبت خاک و آب قابل استفاده گیاه است. برای تعیین رطوبت خاک روش‌های متعددی توسط دانشمندان ارائه شده است که دقیق‌ترین و پرکاربردترین روش، روش وزنی است. اندازه‌گیری رطوبت خاک در طراحی و

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Ansary@um.ac.ir

استفاده از دستگاه تتاپروب مدل ML2 بررسی شد و نتایج نشان داد که افزایش کدورت در بافت‌های لوم سیلتی، لوم و لوم شنی منجر به کاهش دقت اندازه‌گیری رطوبت در مقایسه با روش وزنی شده است (۹). نتایج پژوهش صفری‌زاده ثانی و همکاران (۲۳) نشان داد که دستگاه در خاک لوم شنی در تمامی سطوح آب مغناطیسی دارای بیش‌ترین دقت بوده (به ترتیب در آب چاه، ۰/۳ و ۰/۶ تسلا دارای RMSE^۱ برابر با ۱۵/۲، ۳/۳ و ۲/۵) و با افزایش میزان رس در خاک از دقت دستگاه کاسته شده است. بر اساس نمودار همسانی ترسیم شده برای نتایج روش TDR و روش حجمی، بیشترین و کمترین همسانی بین دو روش به ترتیب در تیمارهای خاک با بافت لوم شنی و استفاده از آب مغناطیسی ۰/۶ تسلا (با ضریب تبیین ۰/۹۲) و خاک با بافت لوم رسی و استفاده از آب چاه (با ضریب تبیین ۰/۴۲) مشاهده شد. نتایج نشان داد که استفاده از آب مغناطیسی در آبیاری منجر به افزایش دقت دستگاه در بافت‌های مورد بررسی شده است.

در پژوهشی بر روی بافت‌های مختلف خاک نشان داد که دستگاه TDR در برآورد رطوبت خاک نسبت به روش وزنی مقادیر کمتری ارائه می‌کند (۲۵). عبدالله و همکاران (۲) در پژوهشی نشان دادند که استفاده از دستگاه TDR برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در بافت‌های ریزتر، دارای دقت کمتری است. لازم به ذکر است آنها نشان دادند که در رطوبت‌های زیاد از دقت اندازه‌گیری در بافت‌هایی که دارای رس کمتری است کاسته شده است. عرفانی آگاه و همکاران (۷) نشان دادند که اندازه‌گیری رطوبت با دستگاه TDR از دقت زیادی برخوردار بود. نتایج ایشان نشان داد که رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR با نتایج روش وزنی دارای ضریب تبیین زیادی ($R^2 = 0/98$) است. در پژوهشی که در کشور اسلواکی انجام شد، نتایج نشان داد که افزودن مواد آلی و معدنی به خاک منجر به بهبود در دقت اندازه‌گیری رطوبت با استفاده از TDR در مقایسه با روش وزنی می‌شود (۲۶). در پژوهشی که در ایالت‌های مختلف آمریکا برای تعیین

رطوبت با TDR سریع بوده و برای سلامت انسان ضرری ندارد و نتایج به‌دست‌آمده از این روش قابل قبول است، استفاده از این روش در بین پژوهشگران رواج یافته است (۱۹). از طرفی بر اساس تجربیات سایر دانشمندان در این زمینه، مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت با TDR در مقایسه با مقدار واقعی رطوبت که با روش وزنی اندازه گرفته شده است در خاک‌ها و شرایط مختلف، متفاوت است که می‌تواند به دلیل تغییر در ثابت دی الکتریک خاک باشد (۶، ۱۵ و ۲۸) که در ادامه به برخی از این پژوهش‌ها پرداخته شده است.

معروف‌پور و همکاران (۱۷) نشان دادند که دقت اندازه‌گیری رطوبت با استفاده از دستگاه TDR در بافت‌های مختلف خاک از بافت درشت به ریز، کاهش یافته و درصد خطای نسبی در بافت رسی به ۲۴/۴ درصد رسید و کم‌ترین درصد خطای نسبی مربوط به بافت لوم شنی بوده که برابر با ۹/۲۸ درصد بود. نامدار خجسته و همکاران (۱۸) در پژوهشی نشان دادند که دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از روش TDR در مقایسه با روش وزنی در بافت‌های ریزتر (بافت‌های دارای میزان رس بیشتر) کمتر از بافت‌های درشت‌تر است. کشاورزی و همکاران (۱۳) نشان دادند که افزایش میزان رس در خاک (ریز شدن بافت خاک) منجر به کاهش دقت اندازه‌گیری رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR شده است، به طوری که میزان درصد خطای نسبی در بافت شنی کم‌ترین مقدار (۴/۰۷ درصد) و در بافت لوم رسی (۱۱/۴ درصد) بیش‌ترین مقدار را برخوردار بود. نتایج حاصل از پژوهش نیک‌نژاد و همکاران (۱۹) نشان می‌دهد که رطوبت اندازه‌گیری شده با استفاده از TDR در خاک با بافت ریز بیش‌تر از مقدار واقعی بوده و این مهم در بافت‌های درشت و میانه برعکس است. اختلاف بین رطوبت اندازه‌گیری شده با TDR و مقدار واقعی در بافت میانه ناچیز بوده و گاهی به هم نزدیک است ولی در بافت‌های درشت اختلاف بیش‌تر است. در پژوهشی دیگر اثر کدورت آب و بافت خاک بر دقت و صحت اندازه‌گیری رطوبت خاک با

1. Root mean square error

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی.

Table 1. Some physical and chemical properties of the studied soil.

θ_v		EC	pH	Sand	Silt	Clay	BD	ST
PWP	FC							
%		dS m ⁻¹			%		g cm ⁻³	
11.6	32.8	1.25	7.85	8	50	42	1.10	Silty Clay
13.4	28.3	1.46	7.58	37	33	30	1.34	Clay Loam
15.9	24.2	1.35	7.64	54	30	16	1.47	Sandy Loam

ST: بافت خاک (Soil texture)، BD: چگالی ظاهری (Bulk density)، Clay: رس، Silt: سیلت، Sand: شن،

EC: رسانایی الکتریکی (Electrical conductivity)، θ_v : رطوبت حجمی خاک (Volumetric soil moisture content)،

FC: گنجایش مزرعه (Field capacity)، PWP: حد پژمردگی دائم (Permanent wilting point)

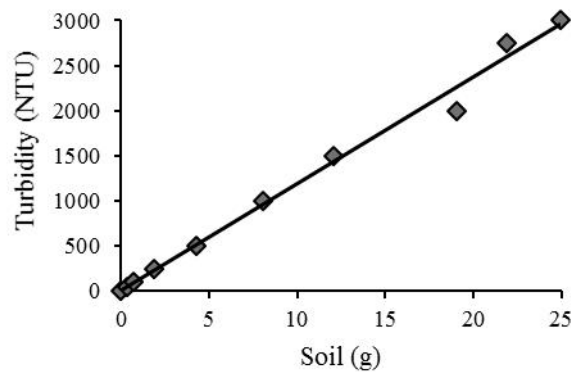
مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از دستگاه TDR مدل PMS-714 ساخت شرکت لوترون^۳ که دارای یک سنسور بوده، آزمایشی در زمستان ۱۳۹۷ و بهار ۱۳۹۸ در گلخانه پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و در ۳ تکرار اجرا شد. در پژوهش حاضر تیمارهای مورد بررسی شامل ۳ کدورت آب آبیاری (شاهد، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ NTU) و سه بافت خاک (رس سیلتی، لوم رسی و لوم شنی) بود. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی هر یک از خاک‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. برای تهیه کدورت‌های مختلف آب آبیاری، از خاک رس سیلتی استفاده شده که از قبل از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده بود. نمونه‌های خاک با وزن‌های متفاوت با یک لیتر آب مخلوط شده و به‌مدت سه دقیقه در حالت سکون قرار داده شد. در این مدت، ذرات درشت (از جمله شن) ته‌نشین شده و سپس از سوسپانسیون تهیه شده، نمونه آب گرفته شد و با دستگاه کدورت‌سنج، کدورت محلول قرائت شد (۹). در شکل (۱)، میزان خاک مورد استفاده برای رسیدن به کدورت‌های مختلف ارائه شده است. با توجه به نتایج شکل (۱)، برای دستیابی به کدورت ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ NTU از ۱۲/۱ و ۲۴/۹ گرم خاک استفاده شد.

دقت اندازه‌گیری رطوبت با دستگاه TDR انجام شد نتایج نشان داد که با افزایش میزان رس خاک (یا به‌عبارت‌دیگر در بافت‌های ریزتر)، از دقت اندازه‌گیری دستگاه کاسته شده است، به طوری که در ایالت آلاباما با خاکی که دارای ۵۷/۵ درصد رس بود، میزان ضریب تبیین و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۲ و ۰/۱۳ بود. در ایالت کارولینای جنوبی با خاکی درشت‌بافت‌تر که دارای ۵/۰ درصد رس بود، مقادیر ضریب تبیین و RMSE به ترتیب برابر ۰/۹۸ و ۰/۰۴ بود (۳۰). پژوهش‌های دیگری نیز به بررسی دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک با روش‌های مختلف پرداخته‌اند که می‌توان به پژوهش اسکیرچا (۲۴) از روش TDR، هوک و همکاران (۱۰) از روش TDR، وانیراچیچی و همکاران (۲۹) از روش TDR، اسکابل و همکاران (۲۳) و کوموده و همکاران (۱۴) از روش TDR و GPR^۱ اشاره کرد؛ همچنین عباسی و همکاران (۱) برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک در شرایط آبیاری و زهکشی از دستگاه TDR و تانسیمتر استفاده کردند. از این رو پژوهشی در رابطه با برهم‌کنش کدورت آب (شاهد، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ NTU^۲) و بافت مختلف خاک (رس سیلتی، لوم رسی و لوم شنی) در شرایط آزمایشگاهی برای برآورد دقت اندازه‌گیری دستگاه TDR ساخت شرکت Lutron اجرا شد.

1. Ground penetrating radar
2. Nephelometric turbidity unit

3. Lutron



شکل ۱. مقدار خاک مورد نیاز برای ایجاد سطوح مختلف کدورت.

Fig. 1. The amount of soil required for creating different turbidity levels.

میانگین این سه نقطه به عنوان رطوبت خاک آن تکرار گزارش شد. در بافت‌های مختلف از روش وزنی برای کنترل دقت دستگاه استفاده شد. برای اندازه‌گیری رطوبت وزنی نمونه‌ها در هر روز، گلدان‌ها توزین شده و تغییرات میزان آب خاک گلدان‌ها، بررسی شد. این کار تا زمان رسیدن رطوبت آن به نقطه پژمردگی دائم (PWP)^(۱)، انجام شد، لازم به ذکر است که رطوبت گلدان‌ها به حالت هوا-خشک کاهش یافت (۹). خاک گلدان‌ها در طول آزمایش دست‌نخورده باقی ماند. برای ترسیم نمودارهای مرتبط با هر یک از تیمارهای مورد بررسی از نرم‌افزار Excel استفاده شد. در این پژوهش، برای بررسی میزان همسانی روش اندازه‌گیری رطوبت با TDR و روش مستقیم اندازه‌گیری و میزان خطا، یا به عبارتی دیگر تغییرات رطوبت اندازه‌گیری شده با TDR نسبت به روش وزنی نسبت به خط ۱:۱ از پارامترهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۱) و همچنین ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. میزان خطای نسبی (RE) نیز با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (۴):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{TDR} - \theta_v)^2}{n}} \quad [1]$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_v - \theta_{TDR}|}{n \theta_v} \quad [2]$$

1. Permanent wilting point

برای این پژوهش ۲۷ گلدان پلاستیکی به قطر ۲۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر تهیه شد. پس از تهیه بافت خاک مربوطه، آن را به گلدان‌های پلاستیکی که دارای زهکش انتهایی بود، انتقال داده و با توجه به چگالی ظاهری هر بافت، مقدار مشخصی خاک درون گلدان‌ها ریخته شد. لازم به ذکر است که در این پژوهش از یک لایه به ضخامت ۳ سانتی‌متری سنگریزه در انتهای گلدان‌ها برای بهبود زهکشی و تهویه استفاده شد و ۵ سانتی‌متر بالایی به منظور اعمال آبیاری خالی در نظر گرفته شد و بقیه حجم خالی از خاک پر شدند. برای جلوگیری از نشست خاک در گلدان و رسیدن به چگالی ظاهری خاک مورد استفاده، پرکردن خاک گلدان‌ها به صورت تدریجی و در لایه‌های پنج سانتی‌متری با کوبیدن خاک انجام شد. با توجه به اینکه خاک مورد استفاده دارای رسانایی الکتریکی زیادی نبود و برای اینکه شوری نیز بر نتایج اثر نداشته باشد، بدین منظور گلدان‌ها را در ۳ نوبت با آب شهری اشباع شده و اجازه داده شد که آب از زهکش‌های آن خارج شود. همچنین برای جلوگیری از تشکیل هوای محبوس در خاک این عمل انجام شد (۳). لازم به ذکر است که برای جلوگیری از جریان ترجیحی در بدنه گلدان‌ها از ماسه و چسب استفاده شد، بدین صورت که در ابتدا بدنه گلدان‌ها چسب کاری شده و سپس بر روی آن ماسه ریخته شد. در این پژوهش به مدت یک ماه در هر تکرار از ۳ نقطه و به صورت مثلثی داده‌برداری رطوبت خاک انجام شده و

جدول ۲. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در نتایج رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با TDR نسبت به روش وزنی.

Table 2. Root mean square error (RMSE) values for soil water content measured by the TDR device with that determined by the gravimetric method.

RMSE (cm ³ cm ⁻³)			T
SC	CL	SL	(NTU)
0.065	0.048	0.024	0 (Control)
0.080	0.057	0.027	1500
0.090	0.047	0.038	3000

T: کدورت (Turbidity)، RMSE: میانگین مربعات خطا (Root mean square error)،

SL: لوم شنی (Sandy loam)، CL: لوم رسی (Clay loam)، SC: رس سیلتی (Silty clay)

سیلتی > لوم رسی > لوم شنی)، به طوری که میزان RMSE در خاک رس سیلتی، لوم رسی و لوم شنی برابر با ۰/۰۶۵، ۰/۰۴۸ و ۰/۰۲۴ است؛ نتایج نشان می‌دهد که افزایش کدورت آب در بافت شن لومی بر دقت اندازه‌گیری رطوبت با دستگاه TDR اثر کم‌تری نسبت به دو بافت خاک دیگر دارد که دلیل آن می‌تواند افزایش میزان رس و به تبع آن افزایش سطح ویژه ذرات در بافت‌های ریز خاک باشد که خود عاملی است تا دستگاه اندازه‌گیری برای رطوبت خاک را بیش‌تر قرائت کند (۳ و ۱۳). نتایج این پژوهش با نتایج کارگاس و کرکیداس (۱۲) و قانندی و همکاران (۹) هم‌خوانی دارد. در شکل‌های (۲) تا (۴) مقادیر رطوبت حجمی به روش حجمی و دستگاه TDR اندازه‌گیری شده برای سه بافت خاک در شرایط آبیاری با آب‌های با کدورت‌های متفاوت ارائه شده است. برای تعیین همسانی بین روش حجمی و استفاده از TDR بر اساس شکل (۲) مقادیر رطوبت حجمی در برابر رطوبت اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه مذکور ترسیم شده و برای بیان تغییرات واریانس مقادیر محاسبه شده با دستگاه و روش حجمی از ضریب تبیین (R²) استفاده شد. شکل (۲) نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان انحراف از خط ۱:۱ و مقادیر اندازه‌گیری شده بین دو روش در خاک لوم شنی (با R² برابر ۰/۸۹) و کم‌ترین میزان در بافت لوم رسی (با R² برابر ۰/۹۲) در شرایط استفاده از آب چاه (تیمار شاهد آب آبیاری) مشاهده شده است. ملاحظه می‌شود که با ریز شدن بافت (افزایش درصد رس) اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از روش حجمی افزایش می‌یابد. به طور کلی می‌توان گفت که با ریزتر

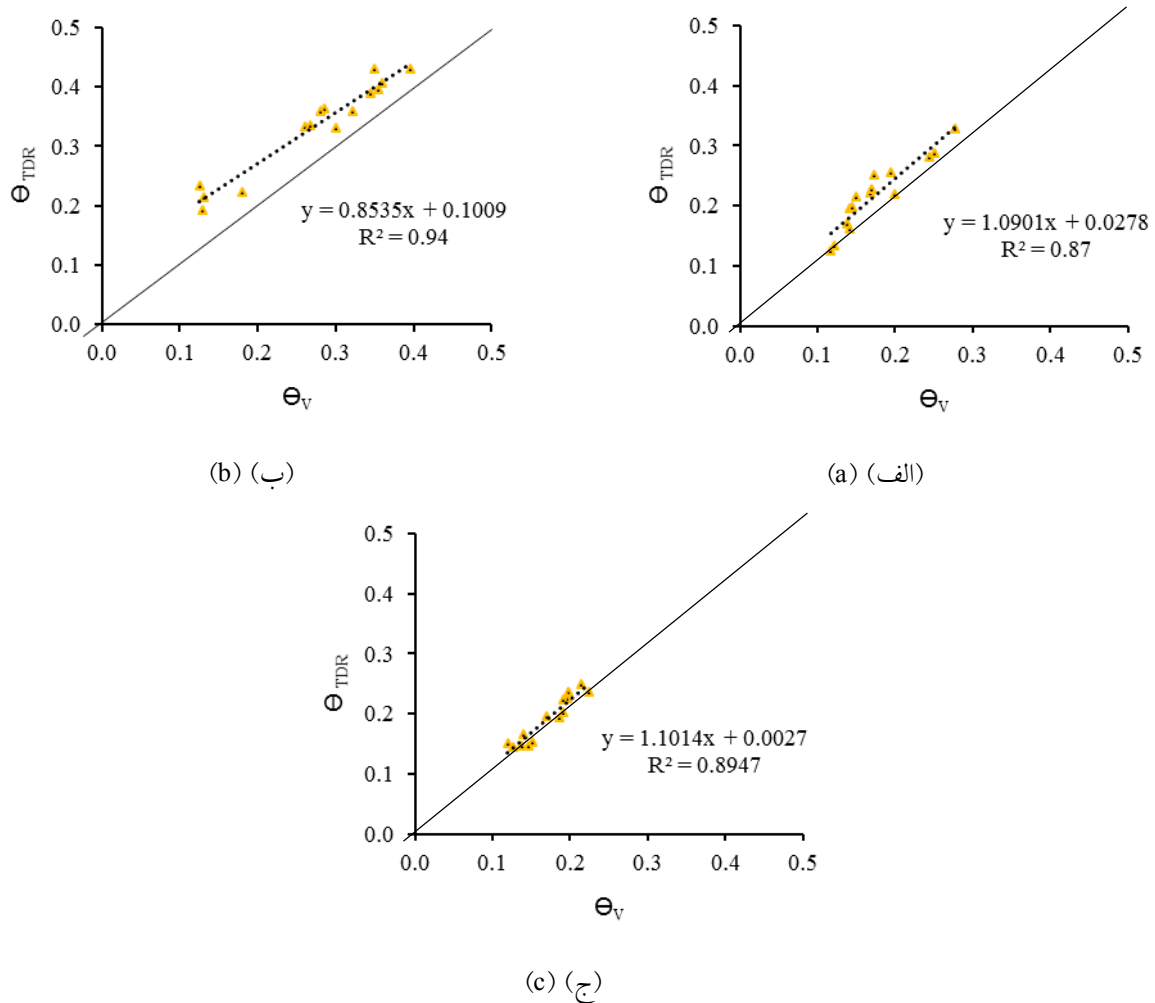
در روابط (۱) و (۲)، θ_v رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده از رابطه (۳) (cm³ cm⁻³)، θ_{TDR} رطوبت اندازه‌گیری شده با TDR (cm³ cm⁻³)، $\bar{\theta}_v$ میانگین رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده (cm³ cm⁻³) و n تعداد مشاهدات است:

$$\theta_v = \rho_b \times \theta_m \quad (3)$$

در رابطه فوق ρ_b چگالی ظاهری خاک و θ_m رطوبت وزنی اندازه‌گیری شده (cm³ cm⁻³) است.

نتایج و بحث

با توجه به جدول (۲) و بر اساس مقادیر RMSE در خاک رس سیلتی در شرایط استفاده از آب شاهد و با کدورتی صفر بهترین برازش را بین مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش مستقیم و رطوبت اندازه‌گیری شده با استفاده از TDR مشاهده شد؛ همچنین در خاک لوم رسی و کدورت آب صفر و در خاک لوم شنی و کدورت صفر نیز بهترین برازش مشاهده شد. دلیل کاهش صحت رطوبت اندازه‌گیری شده، می‌تواند میزان رس موجود در کدورت‌های مختلف باشد. جدول (۲) نشان می‌دهد که استفاده از آب کدر در آبیاری منجر به کاهش اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با TDR و روش حجمی می‌شود، به طوری که در خاک‌های مختلف استفاده از کدورتی به میزان صفر باعث کاهش بیش‌تر میزان انحراف (بین مقادیر روش TDR و حجمی) می‌شود. با درشت‌تر شدن بافت خاک میزان انحراف کاهش یافته و دقت نتایج اندازه‌گیری رطوبت خاک با این دستگاه نسبت به اندازه‌گیری در بافت ریز بیش‌تر است (دقت دستگاه: رس

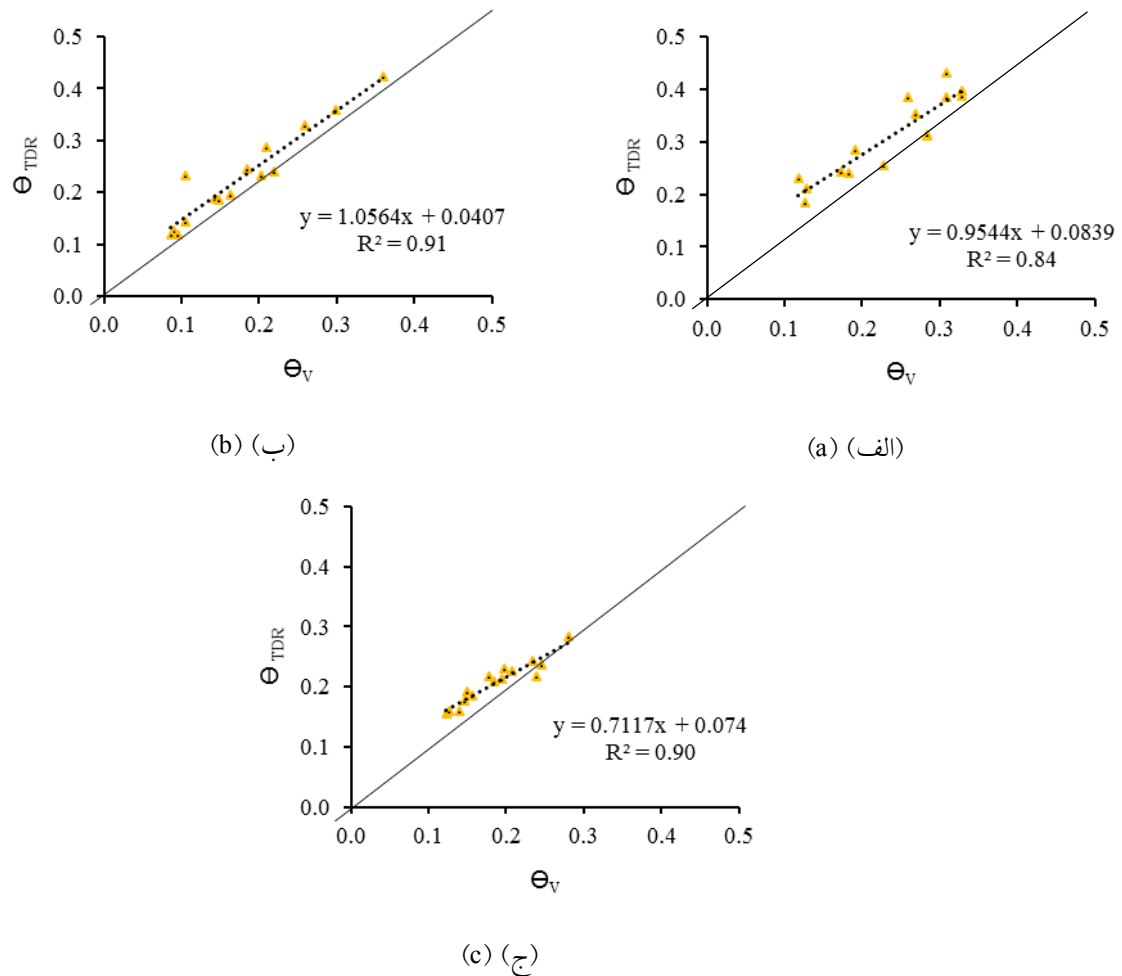


شکل ۲. مقایسه مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با روش وزنی با مقادیر اندازه‌گیری شده با TDR در بافت‌های خاک: (الف) رس سیلتی، (ب) لوم رسی، و (ج) لوم شنی در کدورت آب آبیاری شاهد (0 NTU).

Fig. 2. Comparison of volumetric water contents determined by the gravimetric method with those measured by the TDR device in soil textures: a) silty clay, b) clay loam, and c) sandy loam under control (0 NTU) water irrigation turbidity.

دلیل آن می‌تواند نگهداشت بیش‌تر این بافت خاک در مقایسه با سایر بافت‌ها باشد. با توجه به شکل (۲) مقادیر رطوبت در سه بافت بالای خط ۱:۱ قرار گرفته که نشان‌دهنده بیش‌برآورد رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه است. مزیدی و همکاران (۱۶) و پاپرو و همکاران (۲۱) اظهار داشتند که در بافت‌های ریزتر مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR بیش‌تر از روش مستقیم است، نتایج این پژوهش با نتایج ایشان همخوانی داشت. اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با روش حجمی و TDR در شرایط استفاده از تیمار شاهد به‌ترتیب

شدن بافت خاک دقت اندازه‌گیری با دستگاه TDR-PMS714 در تخمین رطوبت حجمی در رطوبت‌های بالا کاهش می‌یابد. بر اساس شکل (۲) در هر سه بافت رس سیلتی، لوم رسی و لوم شنی رطوبت اندازه‌گیری شده با استفاده از TDR در تمامی محدوده رطوبتی اندازه‌گیری شده نسبت به روش حجمی دارای میزان بیش‌تری در شرایط استفاده از آب با کدوری صفر است. در بافت رس سیلتی و در شرایط استفاده از آب با کدوری صفر در برخی موارد مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه رطوبت حدود ۵۰ درصدی را نشان می‌دهد، که

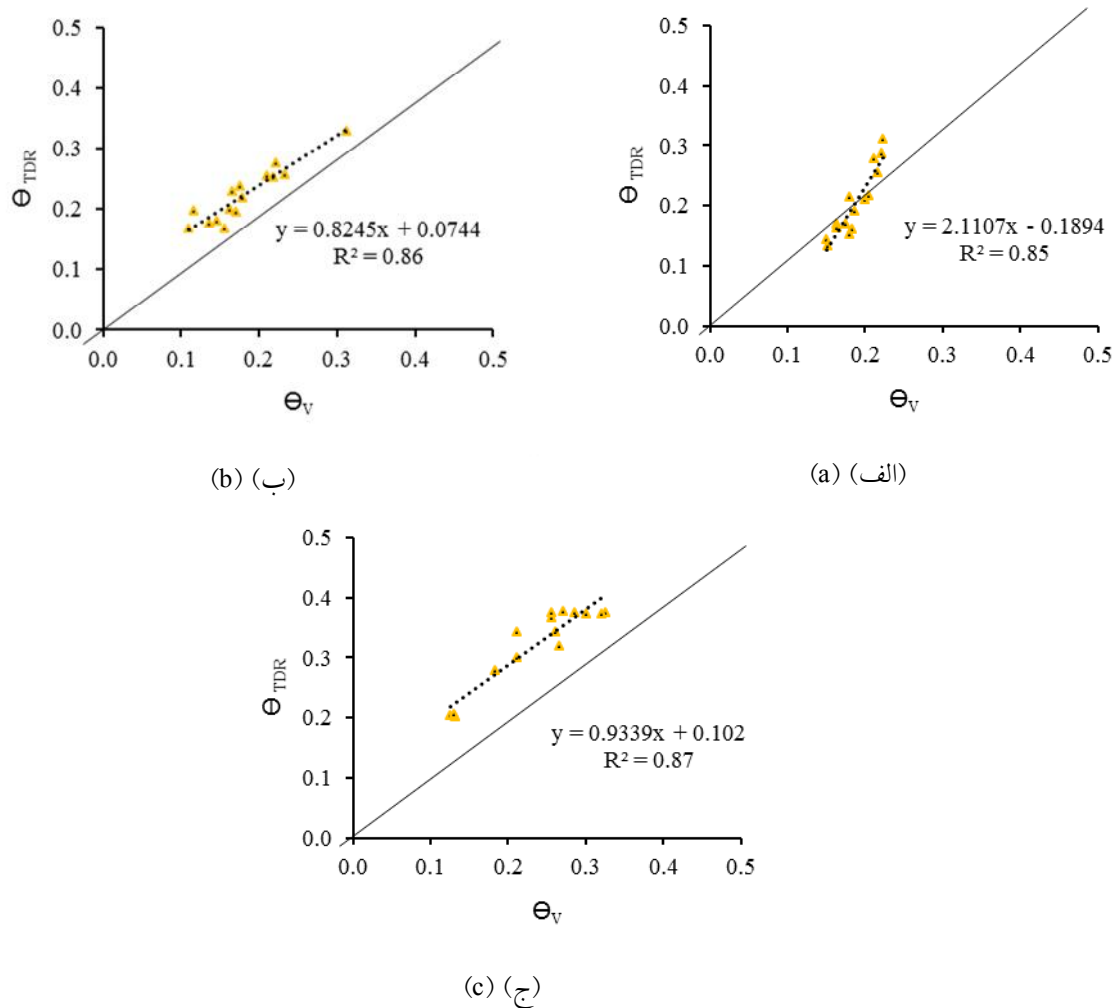


شکل ۳. مقایسه مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با روش وزنی با مقادیر اندازه‌گیری شده با TDR در بافت‌های خاک: الف) رس سیلتی، ب) لوم رسی، و ج) لوم شنی در کدورت آب آبیاری ۱۵۰۰ NTU.

Fig. 3. Comparison of volumetric water contents determined by the gravimetric method with those measured by the TDR device in soil textures: a) silty clay, b) clay loam, and c) sandy loam under 1500 NTU water irrigation turbidity.

دقت استفاده از این دستگاه در اندازه‌گیری میزان رطوبت در خاک‌های ریز بافت (بافت رس سیلتی) شده و میزان دقت در این شرایط نسبت به استفاده از آب چاه در این بافت کم‌تر است. در شرایط آبیاری با آب با کدورت ۱۵۰۰ NTU در هر ۳ بافت میزان رطوبت اندازه‌گیری شده با استفاده از TDR در کل محدوده رطوبتی محاسبه شده در طول دوره آزمایش با توجه به خط ۱:۱ بیش‌تر از روش حجمی بود (به‌جز در چند اندازه‌گیری در بافت لوم شنی که دلیل آن افزایش وزن گلدان و به‌تبع آن افزایش رطوبت خاک در اثر بالا آمدن آب موجود در زیر گلدانی در اثر صعود موئینگی بود). نتایج این پژوهش

برابر با ۳۴/۸ درصد (رس سیلتی)، ۱۶/۰ درصد (لوم رسی) و ۱۱/۸ درصد (لوم شنی) است. بر اساس شکل (۳) استفاده از آب با کدورت ۱۵۰۰ NTU برای آبیاری در بافت خاک رس سیلتی ($R^2 = ۰/۸۴$) منجر به افزایش میزان انحراف از خط ۱:۱ در بین دو روش اندازه‌گیری رطوبت خاک شده است. کاهش میزان رس خاک یا به عبارتی بافت خاک درشت‌تر این میزان انحراف کاهش یافته است، لازم به ذکر است که بر اساس شکل (۳) ضریب تبیین در خاک‌های با بافت رس لومی و شن لومی به ترتیب برابر با ۰/۹۱ و ۰/۸۹ بود. استفاده از آب کدر در آبیاری بر اساس شکل (۳) منجر به کاهش



شکل ۴. مقایسه مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با روش وزنی با مقادیر اندازه‌گیری شده با TDR در بافت‌های خاک: الف) رس سیلتی، ب) لوم رسی، و ج) لوم شنی در کدورت آب آبیاری ۳۰۰۰ NTU.

Fig. 4. Comparison of volumetric water contents determined by the gravimetric method with those measured by the TDR device in soil textures: a) silty clay, b) clay loam, and c) sandy loam under 3000 NTU water irrigation turbidity.

بر اساس شکل (۴) هرچه کدورتی آب آبیاری افزایش یافته است، انحراف از خط ۱:۱ بین دو روش اندازه‌گیری ذکر شده نسبت به آبیاری با آب با کدورتی صفر افزایش یافته است، به طوری که در شرایط استفاده از آب با کدورتی ۳۰۰۰ NTU منجر به افزایش میزان انحراف در بافت‌های خاک مورد استفاده نسبت به تیمار شاهد شده است و در این شرایط در خاک‌های با بافت رس سیلتی، لوم رسی و لوم شنی مقدار ضریب تبیین به ترتیب برابر با ۰/۸۵، ۰/۸۶ و ۰/۸۷ بود. بر اساس شکل (۴) در شرایط استفاده از آب با کدورتی ۳۰۰۰ NTU در بافت خاک رس سیلتی

با نتایج توکوا و همکاران (۲۷) هم‌خوانی داشت. اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با روش حجمی و TDR در شرایط استفاده از آب با کدورتی ۱۵۰۰ NTU در آبیاری به ترتیب برابر با ۳۱/۳ درصد (رس سیلتی)، ۲۸/۵ درصد (لوم رسی) و ۱۳/۰ درصد (لوم شنی) است، که بیانگر اثر منفی کدورت آب بر صحت نتایج در بافت‌های خاک مورد بررسی است.

بر اساس شکل (۳) در بافت لوم شنی نسبت به دو بافت دیگر مقادیر اندازه‌گیری شده با TDR در مقایسه با روش مستقیم دارای خطای کمتری بوده و به خط ۱:۱ نزدیک‌تر است.

جدول ۳. معادله‌های خطی رگرسیونی برازش یافته بین رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR (θ_{TDR}) و روش وزنی (θ_v).

Table 3. The regression line equations between soil volumetric water contents measured by the TDR device (θ_{TDR}) and the gravimetric method (θ_v).

Eq.	T (NTU)	ST
$\theta_{TDR} = 1.09 \theta_v + 0.028$	0	
$\theta_{TDR} = 0.954 \theta_v + 0.084$	1500	SC
$\theta_{TDR} = 2.111 \theta_v - 0.19$	3000	
$\theta_{TDR} = 0.854 \theta_v + 0.101$	0	
$\theta_{TDR} = 1.056 \theta_v + 0.041$	1500	CL
$\theta_{TDR} = 0.825 \theta_v + 0.074$	3000	
$\theta_{TDR} = 1.101 \theta_v + 0.003$	0	
$\theta_{TDR} = 0.712 \theta_v + 0.074$	1500	SL
$\theta_{TDR} = 0.934 \theta_v + 0.102$	3000	

Eq. معادله (Equation).

همبستگی بین مقادیر رطوبت به روش‌های وزنی و TDR کاسته شده است، به طوری که دلیل این کاهش دقت دستگاه در تعیین رطوبت می‌تواند، میزان رس خاک و نوع رس و میزان کدورت آب آبیاری باشد (۱۵). تأثیر رس بر واسنجی دستگاه به علت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن مانند سطح ویژه، نوع کانی-های رسی، بافت خاک، و میزان رس است. نتایج این پژوهش با نتایج معروف پور و همکاران (۱۷) و پایوالثو و همکاران (۲۰) هم‌خوانی داشت، ولی با نتایج کوموده و همکاران (۱۴) هم‌خوانی نداشت که دلیل آن می‌تواند استفاده از بافت‌های متفاوتی باشد که در این پژوهش استفاده شده است.

بر اساس نظر کمالی و مهدیان (۱۱) توزیع اندازه ذرات یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک است که بر منحنی مشخصه رطوبتی خاک موثر است. در خاک‌های ریزبافت، ابعاد و شکل ذرات تغییرات زیادی داشته و در ضمن، خاک غالباً دارای ساختمان و خاکدانه است؛ بنابراین در این گونه خاک‌ها فضای کل منافذ شامل فضای بین-خاکدانه‌ای و فضای بین-ذرات (درون-خاکدانه‌ای) است. شکل و توزیع اندازه منافذ و پیوستگی آن‌ها و پتانسیل آب در خاک از جمله دلایلی است که برای بیش‌تر بودن دقت و صحت نتایج اندازه‌گیری رطوبت خاک با دستگاه TDR در بافت‌های درشت‌تر، می‌توان بیان کرد. از طرفی در این پژوهش با توجه به اینکه این دستگاه در

میزان رطوبت اندازه‌گیری شده با استفاده از TDR با روند نامنظمی از مقادیر محاسبه شده به روش وزنی بیش‌تر است، به جزء در چند مورد اندازه‌گیری مقادیر حجمی بیش‌تر از TDR است که دلیل آن می‌تواند اندازه‌گیری در زمان آبیاری گلدان‌ها باشد.

در بافت خاک لوم شنی و لوم رسی نیز شرایط مشابه خاک سیلت رسی در شرایط آبیاری مشابه وجود دارد. اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با روش حجمی و TDR در شرایط استفاده از آب با کدوری ۳۰۰۰ NTU در آبیاری به ترتیب برابر با ۳۶/۸ درصد (رس سیلتی)، ۲۳/۷ درصد (لوم رسی) و ۱۴/۹ درصد (لوم شنی) است. با توجه به خط ۱:۱ در این شرایط نیز کماکان در بافت‌های مختلف، رطوبت اندازه‌گیری شده با TDR بیش‌تر از روش مستقیم است، ولی در بافت لوم رسی نسبت به دو بافت دیگر مقادیر به خط ۱:۱ نزدیک‌تر است که بیانگر دقت بیش‌تر برآورد رطوبت در این است. در جدول (۳) معادله خط برازش یافته در سه بافت لوم شنی، لوم رسی و رس سیلتی در شرایط استفاده از آب‌های با کدوری متفاوت در آبیاری ارائه شده است. با برازش خطوط رگرسیونی بر بافت‌های خاک مورد بررسی در محدوده اندازه‌گیری رطوبت، معادله‌های واسنجی با ضرایب تبیین در محدوده ۰/۸۴ تا ۰/۹۵ به دست آمد. در هر سه بافت با افزایش رس خاک و میزان کدورت آب، از میزان

اندازه‌گیری رطوبت بیش‌تر از سیمان سفید و سیاه است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که کدورت آب آبیاری در تمامی بافت‌ها بر صحت اندازه‌گیری رطوبت خاک با دستگاه TDR مورد استفاده اثر منفی داشته و از دقت آن کاسته است. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش میزان رس در خاک از دقت دستگاه کاسته است. در شرایط استفاده از آب معمولی (بدون کدورت)، ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ NTU، دقت مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت با TDR در بافت خاک لوم شنی (بیش‌ترین دقت) < لوم رسی < رس سیلتی (کم‌ترین دقت) بود. بر اساس نتایج بیش‌ترین و کم‌ترین همسانی بین دو روش وزنی و TDR به ترتیب در تیمارهای خاک با بافت لوم رسی و استفاده از آب چاه (با ضریب تبیین ۰/۹۴) و خاک با بافت رس سیلتی و استفاده از آب با کدورتی ۱۵۰۰ NTU (با ضریب تبیین ۰/۸۴) مشاهده شد. نتایج نشان داد که استفاده از آب کدر در آبیاری منجر به کاهش دقت دستگاه در بافت‌های خاک مورد بررسی شده است. بیش‌ترین دقت در اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از این دستگاه در بافت لوم شنی و استفاده از آب چاه در آبیاری مشاهده شد.

رطوبت بیش از ۵۰ درصد حجمی قابلیت استفاده نداشته و نتایج آن دارای خطاست، در بافت‌های ریز به دلیل نگهداشت زیاد آب نسبت به بافت‌های درشت می‌تواند عاملی برای کاهش صحت نتایج در این بافت‌ها باشد. از طرفی کدورت آب آبیاری نیز در این بافت‌ها با توجه به اشغال شدن برخی از منافذ با رس موجود در آب کدر خود مزید بر علت شده تا رطوبت اندازه‌گیری شده در این شرایط دارای صحت کمی باشد.

نتایج این پژوهش با نتایج قائدی و همکاران (۹)، بلابادی و همکاران (۴) و فراستی و رحمانی (۸) بر روی بافت‌های مختلف خاک هم‌خوانی دارد. همچنین نتایج مشابهی در پژوهش قائدی و همکاران (۹) در شرایط اعمال کدورت‌های مختلف آب در آبیاری در بافت‌های مختلف خاک مشاهده شد، به‌طوری که در پژوهش ایشان نیز به دقت بیش‌تر اندازه‌گیری رطوبت در خاک‌های درشت‌بافت اشاره شده است. همچنین ایشان اظهار داشتند که افزایش کدورت آب منجر به کاهش صحت نتایج اندازه‌گیری رطوبت خاک شده است. کشاورزی و همکاران (۱۳) و صفری‌زاده ثانی و همکاران (۲۲) نیز اظهار داشتند که صحت اندازه‌گیری رطوبت خاک با دستگاه TDR در بافت‌های درشت نسبت به بافت‌های ریز بیش‌تر است، به‌طوری که نتایج این پژوهش و ایشان همسو بود. کاتالدو و همکاران (۶) نیز اظهار داشتند که در شن دقت دستگاه TDR

منابع مورد استفاده

1. Abbasi, F., Javaux, M., Vanclooster, M., Feyen, J., 2012. Estimating hysteresis in the soil water retention curve from monolith experiments. *Geoderma* 189: 480–490.
2. Abdullah, N.H.H., Kuan, N.W., Ibrahim, A., Ismail, B.N., Majid, M.R.A., Ramli, R., Mansor, N.S., 2018. Determination of soil water content using time domain reflectometer (TDR) for clayey soil. *In: Advances in Civil Engineering and Science Technology*, Penang, Malaysia, September 5-6, pp. 1–6.
3. Alizadeh, H., Nouri-mohamadi, M., Liaghat, A., 2009. Evaluation of the effect of soil texture and compaction on the precision of water content measurement by Theta Probe (model ML2). *Iranian Water Researches Journal* 3(2): 19–29. (in Persian with English abstract)
4. Balabadi, H., Afrasiab, P., Delbari, M., Ghaedi, S., 2018. Effect of soil texture, irrigation water salinity, and sodium adsorption ratio on the soil moisture measurements accuracy by Theta Probe device. *Irrigation Sciences and Engineering* 40(4): 17–30. (in Persian with English abstract)
5. Cataldo, A., De Benedetto, E., Huebner, C., Trebbels, D., 2017. TDR application for moisture content estimation in agri-food materials. *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine* 20(3): 26–31.
6. Cataldo, A., Piuze, E., 2018. TDR-based measurements of water content in construction materials for in-the-field use and calibration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 67(5): 1230–1237.

7. Erfani-Agah, A., Meire, P., De Deckere, E., 2019. Laboratory calibration of TDR probes for simultaneous measurements of soil water content and electrical conductivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 50(13): 1525–1540.
8. Farasati, M., Rahmani, M., 2016. Evaluation of time domain reflectometry device in saline clay and sandy soils. *Water and Soil Science* 26(2-2): 43–52. (in Persian with English abstract)
9. Ghaedi, S., Afrasiab, P., Delbari, M., 2018. The effect of irrigation water turbidity on measurement accuracy of water content by Theta Probe device. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 49(4): 729–737. (in Persian with English abstract)
10. Hook, W.R., Ferré, T.P.A., Livingston, N.J., 2004. The effects of salinity on the accuracy and uncertainty of water content measurement. *Soil Science Society of America Journal* 68(1): 47–56.
11. Kamali, K., Mahdian, M.H., 2009. Investigating the manufacture of TDR burials waveguides and evaluation of their application in soil moisture estimation. *Watershed Engineering and Management* 1(2): 111–118. (in Persian with English abstract)
12. Kargas, G., Kerkides, P., 2008. Water content determination in mineral and organic porous media by ML2 theta probe. *Journal of Irrigation and Drainage* 57(4): 435–449.
13. Keshavarzi, M., Nazemi, A.H., Sadradini, S.A.A., Neyshabori, M.R., Nazeri, A., 2013. Effect of soil texture on accuracy of time domain reflectometry methods for measurement of soil moisture content. *Irrigation and Water Engineering* 11: 14–23. (in Persian with English abstract)
14. Kummode, S., Thitimakorn, T., Kupongsak, S., 2020. Determination of the volumetric soil water content of two soil types using ground penetrating radar: a case study in Thailand. *EnvironmentAsia* 13(2): 78–87.
15. Mazidi, M., Maroufpoor, E., 2013. Investigating the effect of soil organic matter on TDR calibration for moisture measurement. *Journal of Water Research in Agriculture* 27(4): 513–522. (in Persian with English abstract)
16. Mazidi, M., Maroufpoor, E., Bahramnejad, B., 2010. Investigation of time domain reflectometry models accuracy for estimation of soil water content. *Iranian Water Research Journal* 3(5): 41–52. (in Persian with English abstract)
17. Maroufpoor, E., Emamgholizadeh, S., Torabi, H., Behzadinasab, M., 2009. Impact of soil texture on the calibration of TDR for water content measurement. *Journal of Applied Science* 9(16): 2933–2940.
18. Namdar-Khojasteh, D., Shorafa, M., Eskandari, Z., Fazeli, M., 2011. Effects of clay content and salinity on volumetric water content using time domain reflectometry. *Iranian Journal of Soil Research* 25(2): 103–112. (in Persian with English abstract)
19. Niknezhad, D., Kalantari, A., Kammali, K., 2018. Calibration of buriable soil moisture sensors made inside the Country for TDR system in different soil textures. *Water Management in Agriculture* 5(1): 47–58. (in Persian with English abstract)
20. Paiva Leão, T., da Costa, B.F.D., Bufon, V.B., Aragón, F.F.H. (2020). Using time domain reflectometry to estimate water content of three soil orders under Savanna in Brazil. *Geoderma Regional* 21: 1–38.
21. Payero, J.O., Qiao, X., Khalilian, A., Mirzakhani-Nafchi, A., Davis, R. 2017. Evaluating the effect of soil texture on the response of three types of sensors used to monitor soil water status. *Journal of Water Resource and Protection* 9(6): 566–577.
22. Safarizadeh-sani, A., Banejad, H., Jamali, S., 2020. The effects of magnetic water on the measurement accuracy of water content by TDR device under different soil textures. *Water and Soil Science- University of Tabriz* Article in press: 1–12. (in Persian with English abstract)
23. Scheberl, L., Scharenbroch, B.C., Werner, L.P., Prater, J.R., Fite, K.L. 2019. Evaluation of soil pH and soil moisture with different field sensors: case study urban soil. *Urban Forestry and Urban Greening* 38: 267–279.
24. Skierucha, W., 2000. Accuracy of soil moisture measurement by TDR technique. *International Agrophysics* 14(4): 417–426.
25. Steven, E., Brice, R., Sheen, K., Terry, H., Arland, S., Judy, T., 2002. Accuracy and precision of soil water measurements by neutron, capacitance, and TDR methods. In: 17th World congress of soil science, Bangkok, Thailand, August 14–21.
26. Toková, L., Igaz, D., Aydin, E., 2019. Measurement of volumetric water content by gravimetric and time domain reflectometry methods at field experiment with biochar and N fertilizer. *Acta Horticulturae et Regiotecturae* 22(2): 61–64.
27. Toková, L., Igaz, D., Aydin, E., Čimo, J., Horák, J., 2020. The effect of fertilization on time domain reflectometry probe measurement accuracy in the field experiment in Slovakia. *Acta Technologica Agriculturae* 23(3): 144–149.
28. Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Researches* 16: 574–582.

29. Wanniarachchi, D., Cheema, M., Thomas, R., Galagedara, L., 2019. Effect of biochar on TDR-based volumetric soil moisture measurements in a loamy sand podzolic soil. *Soil Systems* 49(3): 1–12.
30. Wilson, T.B., Diamond, H.J., Kochendorfer, J., Meyers, T.P., Hall, M., Casey, N.W., Baker, B.C., Leeper, R., Palecki, M.A., 2020. Evaluating time domain reflectometry and coaxial impedance sensors for soil observations by the US climate reference network. *Vadose Zone Journal* 19(1): 1–15.



The Effects of Irrigation Water Turbidity and Soil Texture on Measurement Accuracy of Soil Water Content by TDR

S. Jamali¹, H. Ansari^{1*} and F. Rahimi²

(Received: 22 January 2021; Accepted: 3 May 2021)

Abstract

This study was aimed to investigate the effect of irrigation water turbidity and soil texture on the measurement accuracy of soil water content using time domain reflectometry (TDR) device. Treatments consisted of three soil textures (silty clay, sandy loam, and clay loam) and three levels of irrigation water turbidity (0, 1500, and 3000 NTU). Volumetric soil moisture content (θ_v) was measured using a TDR device and compared with the gravimetric method measurements. Results showed that TDR has the highest accuracy in the sandy loam soil under different levels of water turbidity and by increasing the clay content, the accuracy of the device is reduced as confirmed by root mean square error (RMSE) values of 0.024, 0.027, and 0.038 in 0, 1500, and 3000 NTU turbidity, respectively, in this texture. Drawing of the coherence chart between the results obtained from TDR method and the gravimetric one showed that the highest and the least correlations between the two methods were observed in clay loam + well water treatment ($R^2 = 0.94$) and silty clay + 1500 NTU ($R^2 = 0.84$), respectively. Thus, increasing turbidity decreased the accuracy of the TDR device in all of the studied soil textures. Results also showed that the highest accuracy of TDR device was obtained in sandy loam + control treatment (0.0 NTU) conditions.

Keywords: Clay content, Gravimetric method, Soil water content estimation, TDR device, Water turbidity.

Background and Objective: Determination of soil volumetric water content (θ_v) is important in many areas such as agriculture, horticulture, ecology, forestry, hydrology, civil engineering, waste management and other environmental fields. This study was aimed to investigate the effect of irrigation water turbidity and soil texture on the measurement accuracy of the soil water content using TDR device.

Methods: The experiment was conducted at Ferdowsi University of Mashhad in pots (25 cm diameter and 30 cm height), during 2019–2020. Three levels of irrigation water turbidity, 0 (well water), 1500 and 3000 NTU, plus three soil texture classes (silty clay, SiC, sandy loam, SL, and clay loam, CL) were used. Measurements by TDR (PMS-714 model) sensors were assessed in three soil texture classes, and soil samples which were irrigated with different water turbidities. The soil samples were weighted rapidly after TDR measurements to determine gravimetric water contents. TDR measurements were replicated three times for each soil sample and compared with gravimetric method values. The accuracy of θ_v measurement

1- Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

* Corresponding Author, Email: ansary@um.ac.ir

using TDR was assessed by coefficients of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and relative error (RE). All statistical analyses were performed with Minitab software and figures were drawn using Excel software.

Results: The calibration of TDR probes is sensitive to variations in soil and water properties, such as soil texture and water turbidity. The gravimetric measurement is a standard method that can be applied for the calibration of all indirect methods (3). In the case presented, the PMS-714 sensor used was calibrated for 9 different treatments: SC + T0; SC + T1500; SC + T3000; CL + T0; CL + T1500; CL + T3000; SL + T0; SL + T1500; and SL + T3000. Results showed that TDR had the highest accuracy in the SL soil under different levels of water turbidity as the RMSE at 0, 1500, and 3000 NTU were 0.024, 0.027, and 0.038, respectively. By increasing the clay content, the accuracy of the TDR device was reduced. The drawing of the coherence chart between the results obtained from TDR method and the gravimetric one showed that the highest and the least coincidences between the two methods were observed in CL + 0 NTU ($R^2 = 0.94$) and SiC + 1500 NTU ($R^2 = 0.84$) respectively. Safarizadeh Sani et al. (2) compared values obtained from the standard gravimetric method with the values measured by soil moisture sensors using linear regression equations for each soil type. They showed that the laboratory comparison of gravimetric and TDR water content measurements gave a good confidence in the TDR calibration relationships. Wanniarachchi et al. (4) also reported that TDR calibration data fitted the gravimetrically determined θ_v data very well (with $R^2 = 0.91$ – 0.99). Another report (1) showed that using Theta Probe (ML2 model), an increase in the irrigation water turbidity in each of three soil textures reduced the accuracy of device measurement and most errors were observed in loam with the highest percentage of clay.

Conclusions: In this study, increasing irrigation water turbidity decreased the accuracy of the device in all of the studied soil textures. In other words, increasing irrigation water turbidity and soil clay content decreased the accuracy of the TDR device. The results showed that the highest accuracy of TDR was observed in sandy loam soil + control (irrigation water turbidity = 0.0 NTU) treatment.

References:

1. Ghaedi, S., Afrasiab, P., Delbari, M., 2018. The effect of irrigation water turbidity on measurement accuracy of water content by Theta Probe device. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 49(4): 729–737. (in Persian with English abstract)
2. Safarizadeh-sani, A., Banejad, H., Jamali, S., 2020. The effects of magnetic water on the measurement accuracy of water content by TDR device under different soil textures. *Water and Soil Science-University of Tabriz* Article in press: 1–12. (in Persian with English abstract)
3. Toková, L., Igaz, D., Aydin, E., Čimo, J., Horák, J., 2020. The effect of fertilization on time domain reflectometry probe measurement accuracy in the field experiment in Slovakia. *Acta Technologica Agriculturae* 23(3): 144–149.
4. Wanniarachchi, D., Cheema, M., Thomas, R., Galagedara, L., 2019. Effect of biochar on TDR-based volumetric soil moisture measurements in a loamy sand podzolic soil. *Soil Systems* 49(3): 1–12.