

تأثیر آب مغناطیسی بر صحت اندازه‌گیری میزان رطوبت به وسیله‌ی دستگاه TDR در بافت‌های مختلف خاک

عباس صفری‌زاده ثانی^۱، حسین بانژاد^{۲*}، صابر جمالی^۳

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۷/۲۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۳- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

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

چکیده

رطوبت خاک یکی از عوامل مهم و تعیین کننده رفتار خاک در طرح‌های آب و خاک است. اصولاً روش‌های متداول اندازه‌گیری رطوبت خاک بسیار وقت گیر و هزینه بر هستند. این تحقیق در شرایط گلخانه‌ای در سه نوع خاک با بافت (رس سیلتی، لوم رسی و لوم شنی) و در ۳ میدان مغناطیسی (صفر، ۰/۳ و ۰/۶ تسلا) و در سه تکرار انجام شد. در این پژوهش رطوبت خاک را با استفاده از دستگاه TDR اندازه‌گیری کرده و با مقادیر روش حجمی مقایسه گردید. نتایج 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 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.

واژه‌های کلیدی: برآورد رطوبت خاک، دستگاه TDR مدل PMS-714، روش حجمی، شرایط گلخانه‌ای، میدان مغناطیسی.

The effects of magnetic water on the measurement accuracy of water content by TDR device under different soil textures

A Safarizadeh Sani¹, H Banejad^{2*}, S Jamali³

Received: 21 May 2019

Accepted: 12 October 2020

¹ MSc. student, Department of water engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran.

^{2*} Associate Professor, Department of water engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran.

³ PhD. candidate, Department of water engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran.

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

Abstract

Soil moisture is one of the important determinants of soil behavior in water and soil investigation. The usual methods of measuring soil moisture are very time consuming and costly. The aim of this study is the effect of magnetic irrigation water on measurement accuracy of water content of the soil by TDR device. In this study three soil texture (silty clay, sandy loam and clay loam) were on different levels of magnetic field (0, 0.3 and 0.6 T). In this study, soil moisture was estimated using a TDR and compared with volumetric values of soil moisture. The results showed that the device has the highest accuracy in the sandy loam soils under different levels of magnetic irrigation water (RMSE in well water, magnetic water 0.3 tesla, and magnetic water 0.6 tesla were 15.2, 3.3, and 2.5, respectively) and by increasing the clay content, the accuracy of the device is reduced. The drawing of the coherence chart between the results of the TDR method and the volumetric method showed that the highest and the least coincidence between the two methods were in sandy loam + irrigation with magnetic water of 0.6 T ($R^2 = 0.92$) and clay loam soils + well water ($R^2 = 0.42$). The results showed that increased device accuracy underused magnetic water in the irrigation.

Keywords: Estimate soil moisture, Greenhouse conditions, magnetic field, TDR models PMS-714, Volumetric method.

مقدمه

مناسب برای پیشینه کردن محصول تولیدی به ازای مصرف هر چه کمتر آب ضروری است، از این رو و با توجه به اهمیت رطوبت خاک که از جمله مهم‌ترین مسائل و موضوعات مرتبط با رابطه آب و خاک است، نیاز به تشخیص دقیق رطوبت خاک و اندازه‌گیری آن می‌باشد، که بخشی از مدیریت آب در مزرعه بوده و عدم توجه به آن منجر به ضررهای اقتصادی و زیست محیطی می‌شود (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۴؛ واکر، ۱۹۹۹). روش‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری آب در خاک وجود دارد که دارای دو تقسیم بندی مستقیم (روش وزنی که دارای دقت بسیار بوده ولی وقت گیر است) و غیر

یکی از تنگناهای اساسی دنیای امروز، کافی نبودن آب برای مصارف گوناگون اعم از شرب، صنعت، کشاورزی و محیط‌های طبیعی است. بررسی وضع موجود کشاورزی بیانگر آن است که با وجود پتانسیل افزایش تولید محصولات کشاورزی، به دلیل فقدان سیستم مدیریتی صحیح، امکان استفاده صحیح از منابع آب موجود میسر نشده و با وجود خشکسالی‌های مکرر و افزایش جمعیت، کاهش سهم آب در بخش کشاورزی را به دنبال داشته است. در این زمینه انتخاب روش‌های

برآورد شده با استفاده از دستگاه TDR از نظر آماری معنی‌دار نبود. افزایش رس موجود در خاک در رطوبت‌های کم منجر به برآورد کم رطوبت با استفاده از TDR نسبت به روش حجمی و بیش برآورد در رطوبت‌های زیاد می‌شود. در پژوهشی دیگر کمالی و مهدیان (۲۰۰۹) حسگرهای TDR را طراحی و ساخته و مورد آزمایش قرار دادند. ایشان نشان دادند که ضرایب همبستگی و معادلات موجود بین میانگین درصد رطوبت حجمی حسگرهای دست ساز و درصد رطوبت حجمی واقعی نیز نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین دو روش در بافت‌های مختلف خاک بوده است. همچنین ایشان اظهار داشتند که داده‌های برآورد شده با استفاده از حسگرهای دست ساز و حسگر استاندارد نیز دارای همبستگی بالایی است. قاضی و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به منظور بررسی اثر کدورت آب آبیاری بر دقت اندازه‌گیری رطوبت در بافت‌های مختلف خاک نشان دادند که کدورت آب آبیاری در بافت‌های مختلف خاک منجر به کاهش دقت اندازه‌گیری رطوبت با استفاده از دستگاه تتا پروب شده است، همچنین ایشان اظهار داشتند که افزایش کدورت در آب آبیاری در بافت‌های ریزتر منجر به افزایش خطای نسبی بین رطوبت اندازه‌گیری شده با روش وزنی و تتا پروب شده است. در پژوهشی دیگر نتایج نشان داد که افزایش ماده آلی در خاک منجر به کاهش دقت اندازه‌گیری با استفاده از TDR شده و این کاهش دارای اختلاف معنی‌دار آماری در سطح احتمال ۵ درصد بود (مزیدی و معروف‌پور، ۲۰۱۳). معروف‌پور و همکاران (۲۰۰۹) 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 میزان درصد خطای نسبی مربوط به بافت لوم شنی بوده که برابر با ۹/۲۸ درصد بود. کشاورزی و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که افزایش میزان رس در خاک (به عبارتی

مستقیم (بلوک گچی، تانسیومتر، ¹TDR، اشعه گاما، نوترون متر و تتا پروب) می‌باشد که هر یک ملزم به رعایت نکات ایمنی می‌باشند (علیزاده، ۲۰۱۴). در پژوهش‌های بسیاری به اثر عوامل محیطی بر روی دقت اندازه‌گیری رطوبت با استفاده از دستگاه‌های ذکر شده در بالا پرداخته شده که به اختصار به برخی از این پژوهش‌ها اشاره می‌گردد. سرارنس و همکاران (۲۰۰۰) در پژوهشی نشان دادند که فشردگی خاک و تماس حسگر با خاک در دقت اندازه‌گیری رطوبت با استفاده از TDR مؤثر است. در پژوهشی دیگر نتایج نشان داد که بین اندازه‌گیری رطوبت به روش وزنی و TDR همبستگی بالایی در بافت‌های مختلف خاک وجود دارد (چاندلر و همکاران، ۲۰۰۴). روغنی و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی بیان کردند که جاگذاری صحیح حسگر، فشردگی خاک و بافت خاک از عوامل تأثیرگذار بر روی دقت اندازه‌گیری رطوبت با استفاده از TDR می‌باشد. در پژوهشی دیگر نتایج نشان داد که در خاک‌های با سطح ویژه، دارای ماده آلی زیاد و در خاک‌های شور رطوبت اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه TDR بیش از مقدار رطوبت واقعی خاک بوده و دمای خاک بر روی برآورد و دقت اندازه‌گیری تأثیری نداشت (پیرسون و برندستون، ۱۹۹۸). در پژوهشی که به منظور بررسی اثر شوری خاک‌های رسی و شنی توسط فراستی و رحمانی (۲۰۱۶) اجرا شد، پژوهشگران مذکور نشان دادند که در شرایط شوری زیاد رطوبت اندازه‌گیری شده با استفاده از TDR کمتر از روش حجمی و در شوری کم، میزان رطوبت اندازه‌گیری شده بیشتر از روش حجمی اندازه‌گیری شده است. در شوری کم، عاملی که منجر به بیش برآورد شدن رطوبت شده میزان شوری می‌باشد، ولی در شوری زیاد در خاک‌های رسی یا به عبارتی میزان رس منجر به کم برآورد شدن این میزان شده است. گنگ و همکاران (۲۰۰۳) در پژوهشی نشان دادند که میزان رس بر روی رطوبت

¹ Time Domain Reflectometry

دیگر 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 با ۱۱/۴ درصد بیشترین مقدار را برخوردار بود. لوگاندر مدسن (۲۰۰۴) در پژوهش خود نشان دادند که استفاده از آب‌های مغناطیسی به دلیل کاهش نیروهای واندروالسی و پیوندهای هیدروژنی در مولکول‌های آب، سبب روانی آب و افزایش تر کنندگی آب شده که خود باعث بیشتر شدن چسبندگی آب به ذرات خاک و کلوئیدها شده و از نفوذ عمقی آب در خاک می‌کاهد. در پژوهشی خوش‌روش و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که استفاده از آب مغناطیسی در آبیاری منجر به کاهش رطوبت خاک می‌شود. در پژوهشی دیگر مصطفی‌زاده‌فرد و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که استفاده از آب مغناطیسی در آبیاری منجر به افزایش رطوبت خاک در لایه‌های مختلف خاک می‌شود. از این رو پژوهشی در این رابطه که اثر متقابل میدان مغناطیسی و بافت مختلف خاک در شرایط آزمایشگاهی جهت برآورد دقت اندازه‌گیری دستگاه TDR ساخت شرکت Lutron اجرا شد.

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی دقت اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از دستگاه TDR مدل PMS-714 که دارای یک سنسور بوده (شکل ۱) آزمایشی در زمستان ۱۳۹۷ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد در شرایط کشت گیاه دارویی گل همیشه بهار در ۳ تکرار و به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا گردید. در پژوهش حاضر تیمارهای مورد بررسی

شامل ۳ میدان مغناطیسی (شاهد، ۰/۳ و ۰/۶ تسلا)^۲ سه بافت خاک (رس سیلتی، لوم رسی و لوم شنی) بود. ترکیبات شیمیایی و فیزیکی هر یک از بافت‌های خاک مورد بررسی در جدول (۱) ارائه شده است. برای این پژوهش ۲۷ گلدان پلاستیکی به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر تهیه گردید. پس از تهیه محیط کشت مربوطه، آن را به گلدان‌های پلاستیکی انتقال داده و با توجه به چگالی ظاهری هر بافت، مقدار مشخصی خاک درون گلدان‌ها ریخته شد، لازم به ذکر است که ابتدا در کف گلدان‌ها به صورت یکسان لایه‌ای از سنگ‌ریزه به عنوان فیلتر جهت بهبود زهکشی و تهویه قرار داده شد و ۵ سانتی‌متر بالایی گلدان‌ها به منظور اعمال آبیاری خالی در نظر گرفته شد و بقیه حجم خالی گلدان‌ها از خاک پر شدند (لازم به ذکر است که قبل از انجام آزمایش کل خاک مورد استفاده در آزمایش در آون و در دمای ۱۰۵ درجه و به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید). جهت جلوگیری از نشست خاک در گلدان و رسیدن به وزن مخصوص ظاهری خاک مزرعه، پر کردن خاک گلدان به صورت تدریجی و در لایه‌های پنج سانتی‌متری همراه با کوبش انجام شد. به منظور از بین بردن شوری، محیط کشت گلدان‌ها را با آب شهری اشباع کرده و اجازه داده شد که آب از زهکش‌های آن خارج شود. آزمایش مذکور با توجه به اینکه در شرایط حضور گیاه درون گلدان‌ها و با توجه به دور آبیاری آن مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش به مدت یک ماه از ۳ نقطه در هر تکرار داده برداری با استفاده از دستگاه TDR مذکور انجام شد. در انتها میانگین ۳ برداشت به عنوان داده هر یک از گلدان‌ها در هر بار

^۲ فشرده و یک ریل جهت جا به جایی آهنربا در داخل یک جعبه چوبی نصب گردید.

جهت ساخت دستگاه مغناطیس کننده سیالات از دو قطعه آهنربای مکعبی با ابعاد ۱۰۰*۵۰*۴۰ میلی‌متر با قدرت ۱/۴ تسلا استفاده شد. بدین صورت که دو قطعه آهنربا به کمک دو پایه نگهدارنده از جنس پلاستیک

مغناطیسی مورد استفاده در این سیستم دارای ضامن بوده و برای شدت میدان‌های مختلف قابل تنظیم می‌باشد. در این پژوهش ۲ میدان مغناطیسی ۰/۳ و ۰/۶ تسلا که حد وسط و نهایی آن می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۲) شماتیک این سیستم ارائه شده است. جهت 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 از پارامترهای آماری ریشه متوسط مربعات (RMSE) (رابطه ۱) و همچنین ضریب تبیین (R^2) استفاده شد (علیزاده و همکاران، ۲۰۰۹؛ قانعی و همکاران، ۲۰۱۸). میزان خطای نسبی نیز با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد (فراستی و رحمانی، ۲۰۱۶).



شکل ۱- TDR مورد استفاده ساخت شرکت Lutron تایوان

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\theta_{TDR} - \theta_v)^2}{n}} \quad (1)$$

$$RE = \frac{\sum_1^n |\theta_v - \theta_{TDR}|}{n \bar{\theta}_v} \quad (2)$$

داده‌برداری یادداشت شد. برای کنترل دقت دستگاه مذکور در بافت‌های مختلف از روش وزنی استفاده کرده و برای اندازه‌گیری رطوبت وزنی نمونه‌ها در هر روز، گلدان‌ها توزین و تغییرات میزان آب خاک گلدان‌ها، اندازه گرفته شد؛ برای این منظور با توجه به کاهش رطوبت گلدان‌ها به صورت هوا خشک و تا زمان رسیدن وزن گلدان به میزانی که آب در حد تخلیه مجاز رطوبتی (MAD^3) در آن وجود داشت (که از قبل این عدد برابر با ۳/۳، ۳/۲۲ و ۳/۱ کیلوگرم در بافت‌های مختلف به‌دست آمده بود)، گلدان‌های حاوی گیاهان توزین شدند (زرین‌آبادی و همکاران، ۲۰۱۹). بر اساس پژوهش مرادی مرجانه و گلدانی (۲۰۱۱) دور آبیاری در این پژوهش ۲ روز در میان گرفته شد. هر ۱۰۰ گرم خاک مورد استفاده رس سیلتی، لوم رسی و لوم شنی به‌ترتیب در این آزمایش در وضعیت ظرفیت زراعی محتوای ۲۶، ۲۱ و ۲۲ گرم آب بود. بنابراین تیمار آبیاری گلدان‌ها به صورت هر دو روز یک بار با حجم ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی انجام شد، به‌طوری‌که در گلدان‌های ۳ کیلویی برای هر یک از خاک‌های مذکور به‌ترتیب و به‌میزان ۳۰۰، ۳۲۰ و ۳۵۰ گرم آب برای رسیدن تا حد MAD نیاز بود. خاک گلدان‌ها در طول آزمایش دست نخورده باقی ماند. برای تهیه آب مغناطیسی از سیستمی که در دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد بود، استفاده شد. سیستم مذکور دارای دو منبع بوده که یکی برای آب ورودی و دیگری برای آب پس از عبور از میدان مغناطیسی می‌باشد که با پمپ آب عبوری از دستگاه به درون این منبع منتقل شده و با شیر خروجی که در این منبع تعبیه شده است، آب مغناطیسی مرتبط با هر یک از تیمارهای مورد بررسی قابل برداشت بود. منبع تولید میدان

³ Maximum allowable depletion

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

در رابطه فوق ρ_b چگالی ظاهری خاک و θ_m رطوبت وزنی اندازه‌گیری شده ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) می‌باشد.

در رابطه فوق θ_v رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده

از رابطه (۳) ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)، θ_{TDR} رطوبت اندازه‌گیری شده با TDR ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)، $\bar{\theta}_v$ متوسط رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

pH	هدایت الکتریکی عصاره اشباع dSm^{-1}	درصد حجمی ظرفیت زراعی %	چگالی ظاهری gcm^{-3}	سیلت رس		شن	بافت خاک
				%	%		
۷/۸۵	۱/۲۵	۲۸/۲	۱/۴۷	۴۲	۵۰	۸	رس سیلتی
۷/۵۸	۱/۴۶	۲۸/۳	۱/۳۴	۳۰	۳۳	۳۷	لوم رسی
۷/۶۴	۱/۳۵	۲۴/۲	۱/۱	۱۶	۳۰	۵۴	لوم شنی



شکل ۲- شماتیک سیستم مورد استفاده جهت مغناطیسی کردن آب (متانت و همکاران، ۲۰۱۸)

نتایج و بحث

شده با TDR و روش حجمی می‌گردد، به طوری که در خاک‌های مختلف استفاده از آب مغناطیسی با شدت ۰/۶ تسلا باعث کاهش بیشتر میزان انحراف (بین مقادیر روش TDR و حجمی) می‌شود؛ که دلیل بهتر بودن نتایج در شرایط استفاده از آب مغناطیسی می‌تواند، بهبود در خاصیت ترکنندگی آب مغناطیسی در مقایسه با آب معمولی باشد و به همین دلیل آب به سهولت به ذرات کلوئیدی و میکرونی خاک چسبیده و از نفوذ عمقی کاسته شده که خود منجر به بهبود در صحت نتایج اندازه‌گیری شده با این دستگاه می‌شود (لونگارد مدسن، ۲۰۰۴)، به طوری که در پژوهش حیدرپور و همکاران (۲۰۱۵) نیز این مهم مشاهده شده است. با درشت‌تر شدن بافت خاک این میزان انحراف کاهش بیشتری

با توجه به جدول (۲) و بر اساس مقادیر RMSE در خاک رس سیلتی در شرایط استفاده از آب مغناطیسی با میدان ۰/۳ تسلا بهترین برآزش 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 آبیاری با آب مغناطیسی عبوری از میدان با شدت ۰/۶ تسلا و در خاک لوم شنی و آبیاری گیاهان گل همیشه بهار با آب مغناطیسی ۰/۶ تسلا نیز بهترین برآزش مشاهده شد. جدول (۲) نشان می‌دهد که استفاده از آب مغناطیسی در آبیاری منجر به کاهش اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری

می یابد و این میزان انحراف هر چه خاک درشت تر شده (در خاک لوم شنی میزان RMSE برابر با ۲/۵) از آن به میزان بیشتری کاسته می شود؛ که دلیل آن می تواند افزایش میزان رس و به تبع آن افزایش سطح ویژه ذرات

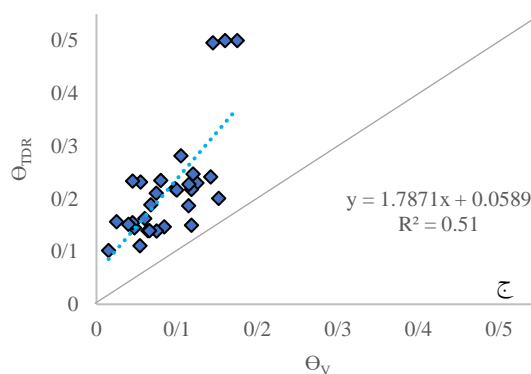
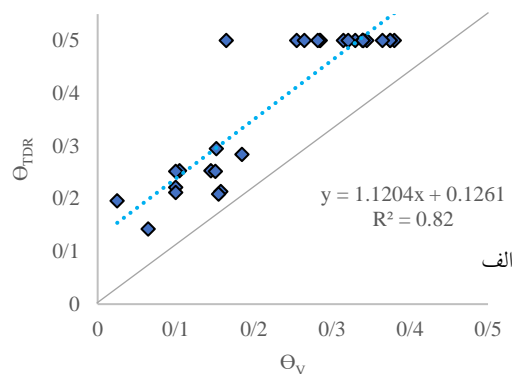
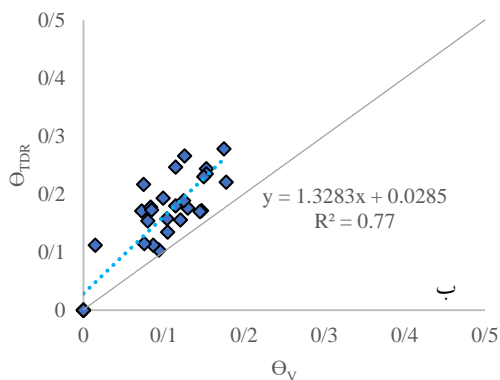
موجود در خاک در بافت های ریز خاک باشد که منجر به بیشتر بودن عدد رطوبت اندازه گیری شده توسط دستگاه باشد (کشاورزی و همکاران، ۲۰۱۳).

جدول ۲- مقادیر RMSE برای میدان های مختلف و بافت های مختلف خاک

RMSE			میدان مغناطیسی
لوم شنی	لوم رسی	رس سیلتی	
۱۵/۲	۱۷/۵	۲۵/۶	شاهد
۳/۳	۵/۷	۱۶/۸	۰/۳ تسلا
۲/۵	۲/۸	۲۲/۸	۰/۶ تسلا

در شکل های ۳ تا ۵ مقادیر رطوبت حجمی به روش حجمی و دستگاه TDR اندازه گیری شده برای سه بافت خاک در شرایط آبیاری با آب عبوری از میدان های مغناطیسی مختلف نشان داده شده است. برای تعیین همسانی بین روش حجمی و استفاده از TDR مطابق

شکل (۳) مقادیر رطوبت حجمی در مقابل رطوبت اندازه گیری شده با استفاده از دستگاه مذکور ترسیم شده و برای بیان تغییرات واریانس مقادیر محاسبه شده با دستگاه و روش حجمی از ضریب تبیین (R^2) استفاده شد.



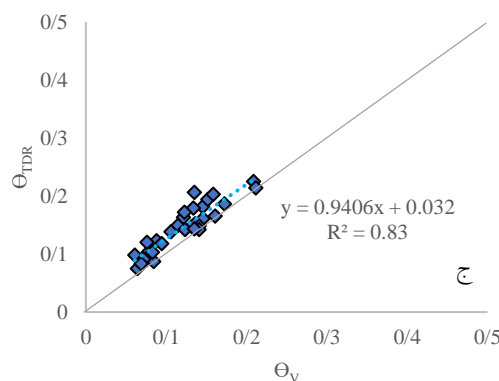
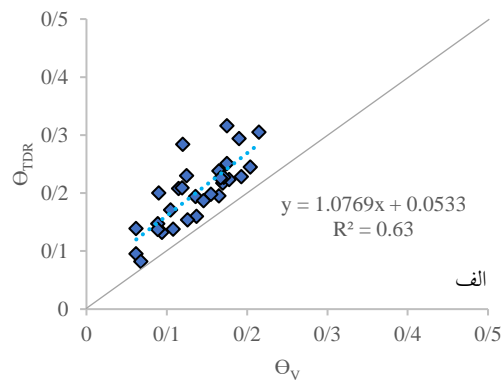
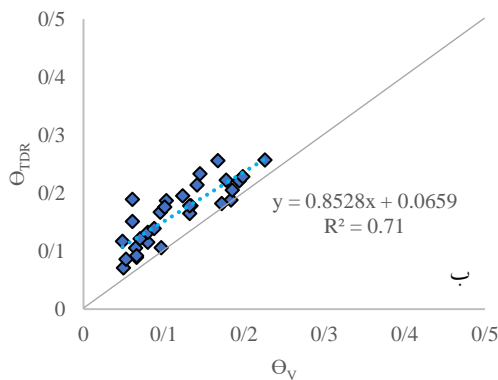
شکل ۳- مقایسه بین رطوبت با استفاده از TDR در مقابل روش حجمی برای بافت الف) رس سیلتی، ب) لوم رسی و ج) لوم شنی در شرایط آبیاری با آب چاه

در بافت‌های ریزتر دستگاه TDR رطوبت را بیشتر از روش مستقیم اندازه می‌گیرد. مطابق با شکل (۴) استفاده از آب مغناطیسی عبوری از میدان $0/3$ تسلا جهت آبیاری گیاه دارویی گل همیشه بهار منجر به کاهش میزان انحراف از خط $1:1$ در بین دو روش اندازه‌گیری رطوبت خاک شده است. این میزان انحراف هرچه بافت خاک درشت‌تر شده است کاهش یافته به طوری که در خاک‌های با بافت لوم رسی و لوم شنی به ترتیب ضریب تبیین برابر با $0/71$ و $0/83$ مشاهده شده است. این شکل گویای این موضوع است که استفاده از آب‌های مغناطیسی منجر به بهبود دقت استفاده از این دستگاه در اندازه‌گیری میزان رطوبت در خاک‌های درشت شده و میزان دقت در این شرایط نسبت به استفاده از آب چاه بیشتر است. در شرایط آبیاری با آب عبوری از میدان مغناطیسی $0/3$ تسلا 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 $1:1$ بیشتر از روش حجمی بوده و دارای روند نامنظمی است. مطابق با شکل (۵) هرچه شدت میدان مغناطیسی افزایش یافته است، انحراف از خط $1:1$ بین دو روش اندازه‌گیری ذکر شده نسبت به آبیاری با آب چاه کاهش یافته است، این میزان انحراف با درشت‌تر شدن بافت خاک کاهش یافته، به طوری که در خاک‌های با بافت لوم رسی و لوم شنی به ترتیب مقدار ضریب تبیین برابر با $0/90$ و $0/92$ مشاهده شده است. مطابق با شکل (۵) در شرایط آبیاری با استفاده از آب عبوری از میدان مغناطیسی $0/6$ تسلا در بافت خاک رس سیلتی میزان رطوبت اندازه‌گیری شده با استفاده از TDR با روند نامنظمی از مقادیر محاسبه شده به روش حجمی بیشتر است. در بافت خاک لوم شنی و لوم رسی نیز شرایط مشابه خاک سیلت رسی در شرایط آبیاری مشابه وجود دارد و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با روش

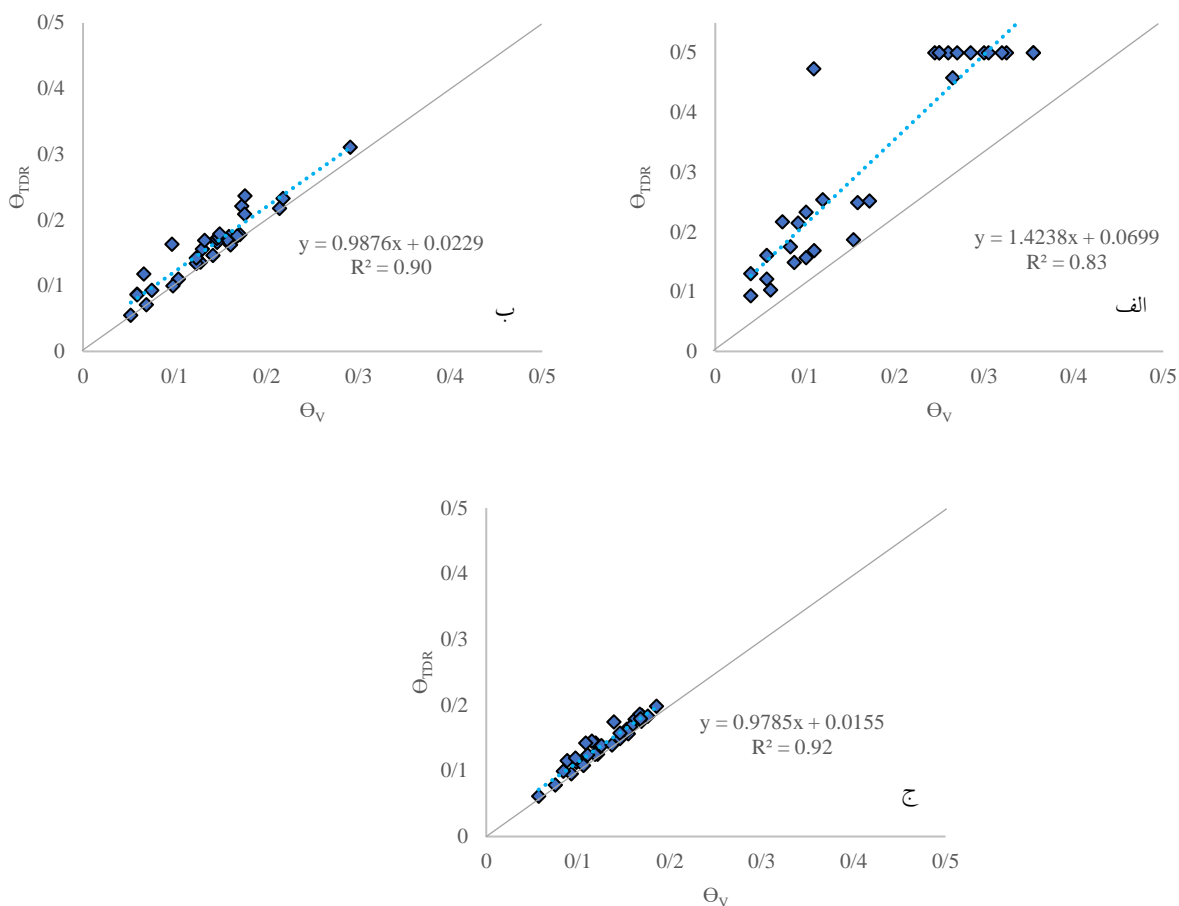
شکل (۳) نشان می‌دهد که بیشترین میزان انحراف از خط $1:1$ و مقادیر اندازه‌گیری شده بین دو روش در خاک لوم شنی (با ضریب تبیین برابر با $0/51$) و کمترین میزان در شرایط آبیاری با آب چاه در خاک با بافت رس سیلتی (با ضریب تبیین $0/82$) مشاهده شده است. ملاحظه می‌گردد که با ریز شدن بافت (افزایش درصد رس) اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از روش حجمی افزایش می‌یابد. بطور کلی می‌توان گفت که با ریزتر شدن بافت خاک دقت اندازه‌گیری با دستگاه TDR-PMS714 در تخمین رطوبت حجمی در رطوبت‌های بالا کاهش می‌یابد. مطابق با شکل (۳) در بافت رس سیلتی رطوبت اندازه‌گیری شده با استفاده از TDR در تمامی محدوده رطوبتی اندازه‌گیری شده نسبت به روش حجمی دارای میزان بیشتری در شرایط آبیاری با آب چاه می‌باشد. در این بافت خاک و در شرایط آبیاری با آب چاه در برخی از نقاط مقادیر اندازه‌گیری شده توسط دستگاه رطوبت 50 درصدی را نشان می‌دهد، که دلیل آن می‌تواند اندازه‌گیری پس از زمان آبیاری و در روز آبیاری باشد و دلیل دیگر آن نیز می‌تواند نگهداشت بیشتر این بافت در مقایسه با سایر بافت‌ها باشد. در خاک لوم رسی نیز در تمامی محدوده مورد بررسی رطوبت اندازه‌گیری شده با TDR بیشتر از رطوبت اندازه‌گیری شده با روش حجمی است (بجز در یک مشاهده که ممکن است به دلیل بازگشت آب از زیر گلدانی به داخل گلدان برای استفاده گیاه باشد). در بافت خاک لوم شنی نیز شرایط مشابه با خاک رس سیلتی در اندازه‌گیری رطوبت با TDR در مقایسه با روش حجمی مشاهده می‌شود. با توجه به شکل (۳) مقادیر در سه بافت بالای خط $1:1$ قرار گرفته که نشان دهنده بیش‌برآورد رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه است. نتایج این پژوهش با نتایج مزیدی و همکاران (۲۰۱۰) مطابقت دارد، به طوری که ایشان نیز اظهار داشتند که

مهم می‌تواند عدم توسعه رشدی گیاه در مقایسه با دو بافت دیگر باشد. در جدول (۳) معادله خط برازش یافته در سه بافت لوم شنی، لوم رسی و رس سیلتی در شرایط آبیاری با آب مغناطیسی ارائه شده است. نتایج این پژوهش با نتایج مزیدی و معروفپور (۲۰۱۳) و علیزاده و همکاران (۲۰۰۹) بر روی بافت‌های مختلف خاک مطابقت دارد. همچنین نتایج مشابهی با پژوهش حاضر در پژوهش جکوبسن و شانینگ (۱۹۹۳) مشاهده شد. نتایج این پژوهش با نتایج سارانی و افراسیاب (۲۰۱۲) مطابقت دارد بطوری‌که در پژوهش ایشان نیز به دقت بیشتر اندازه‌گیری رطوبت در خاک‌های با بافت درشت‌تر اشاره شده است. نتایج این پژوهش با نتایج سلطانی محمدی (۲۰۰۵) مطابقت داشت.

حجمی و TDR به‌ترتیب برابر با ۱۲/۶ و ۱۳/۷ درصد می‌باشد. با توجه به خط ۱:۱ در این شرایط نیز کماکان در بافت‌های مختلف رطوبت اندازه‌گیری شده با TDR بیشتر از روش مستقیم است. دلیل کم بودن میزان ضریب تبیین در بافت رس سیلتی می‌تواند بخاطر نگهداشت بهتر آب در خاک نسبت به دو بافت دیگر که درشت‌تر است، باشد و از این رو دستگاه برآورد بیشتری در رطوبت داشته و از دقت آن کاسته شده است. در بافت رس سیلتی در شرایط استفاده از آب مغناطیسی عبوری از ۰/۶ تسلا نیز مشابه با آب چاه در برخی مواقع دستگاه مقدار رطوبت را ۵۰ درصد اندازه‌گیری کرده است که ممکن است دلیل آن آبیاری یا نگهداشت بیشتر آب در خاک بوده و یا دلیل دیگر راین



شکل ۴- مقایسه بین رطوبت با استفاده از TDR در مقابل روش حجمی برای بافت الف) رس سیلتی، ب) لوم رسی و ج) لوم شنی در شرایط آبیاری با آب مغناطیسی ۰/۳ تسلا



شکل ۵- مقایسه بین رطوبت با استفاده از TDR در مقابل روش حجمی برای بافت الف) رس سیلتی، ب) لوم رسی و ج) لوم شنی در شرایط آبیاری با آب مغناطیسی ۰/۶ تسلا

جدول ۳- معادله خط برازش یافته بین Θ_{TDR} و Θ_v در تیمارهای مورد بررسی

بافت	میدان مغناطیسی (تسلا)	معادله
	۰/۰	$\Theta_{TDR} = 1.1204 \Theta_v + 12.61$
SC	۰/۳	$\Theta_{TDR} = 1.077 \Theta_v + 5.331$
	۰/۶	$\Theta_{TDR} = 1.424 \Theta_v + 6.985$
	۰/۰	$\Theta_{TDR} = 0.852 \Theta_v + 8.764$
CL	۰/۳	$\Theta_{TDR} = 0.853 \Theta_v + 6.594$
	۰/۶	$\Theta_{TDR} = 0.988 \Theta_v + 2.291$
	۰/۰	$\Theta_{TDR} = 1.787 \Theta_v + 5.888$
SL	۰/۳	$\Theta_{TDR} = 0.941 \Theta_v + 3.196$
	۰/۶	$\Theta_{TDR} = 0.979 \Theta_v + 1.553$

CL، SC و SL به ترتیب بیانگر بافت رس سیلتی، لوم رسی و لوم شنی می باشد.

نتیجه گیری کلی

(که گاهی بالای دقت این دستگاه بوده)، کاسته شده است. بر اساس نمودار همسانی ترسیم شده برای نتایج روش TDR و 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 شنی و استفاده از آب چاه (با ضریب تبیین ۰/۵۱) مشاهده شد. نتایج نشان داد که استفاده از آب مغناطیسی در آبیاری منجر به افزایش دقت دستگاه در بافت‌های مورد بررسی شده است که دلیل آن می‌تواند، کاهش نفوذ عمقی در اثر نفوذ عمقی سهولت چسبیدن آب مغناطیسی به ذرات کلوئیدی و میکرونی خاک به دلیل بهبود در خاصیت ترکنندگی آب مغناطیسی باشد که خود منجر به بهبود در صحت نتایج اندازه‌گیری شده با این دستگاه است. بیشترین دقت در اندازه‌گیری رطوبت با استفاده از این دستگاه در بافت لوم شنی و استفاده از آب مغناطیسی ۰/۶ تسلا در آبیاری بود.

در بافت خاک رس سیلتی اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با روش حجمی و TDR در شرایط آبیاری با آب‌های مغناطیسی و معمولی به مراتب از دو بافت دیگر بیشتر است. در بافت خاک لوم شنی و لوم رسی در شرایط آبیاری با آب مغناطیسی ۰/۳ تسلا اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با روش حجمی و TDR به ترتیب برابر با ۱۹/۰ و ۴۰/۰ درصد می‌باشد و در شرایط آبیاری با آب مغناطیسی ۰/۶ تسلا اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با روش حجمی و TDR به ترتیب برابر با ۱۲/۶ و ۱۳/۷ درصد می‌باشد، که از دقت دستگاه که ۵ درصد بوده بیشتر است. نتایج 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 برابر با ۱۵/۲، ۳/۳ و ۲/۵) و با افزایش میزان رس در خاک از دقت دستگاه به دلیل افزایش نگهداشت آب و به تبع آن میزان رطوبت

منابع مورد استفاده

- Alizadeh A, 2014. Soil, Water and Plant Relationship. Press in Sajad university of technology. 876 pp (in Persian).
- Alizadeh H, Nouri-mohamadi M and 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)
- Chandler DG, Seyfried M, Murdock M and McNamara JP, 2004. Field calibration of water content reflectometers. Soil Science Society of America Journal. 68(5): 1501-1507.
- Ferasati M and 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)
- Ghaedi S, Afrasiab P and Delbari M, 2018. The effect of irrigation water turbidity on measurement accuracy of water content by Theta prob device. Iranian journal of soil and water research. 49(4): 729-737. (in Persian)
- Gong Y, Cao Q and Sun Z, 2003. The effects of soil bulk density, clay content and temperature on soil water content measurement using time-domain reflectometry. Hydrological Processes. 17(18): 3601-3614.
- Heidarpour M, Khoshravesh M and Moshaveri Y, 2016. Effect of magnetized saline water on soil and water amendment in trickle irrigation. Journal of Water and Soil Conservation. 23(2): 179-193. (in Persian)
- Huang Q, Akinremi OO, Sri Rajan R and Bullock P, 2004. Laboratory and field evaluation of five soil water sensors. Canadian Journal of Soil Science. 84: 431-438.
- Jacobsen OH and Schjonning P, 1993. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. Hydrology Journal. 151: 147-157.

- Kamali K and Mahdian MH, 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.
- Keshavarzi M, Nazemi AH, Sadradini. SAA, Neyshabori MR and 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)
- Khoshravesh M, Mostafazadeh-Fard B, Mousavi SF and Kiani AR, 2011. Effects of magnetized water on the distribution pattern of soil water with respect to time in trickle irrigation. *Soil Use and Management*. 27(4): 515-522.
- Lungader Madsen HE, 2004. Crystallization of calcium carbonate in magnetic field ordinary and heavy water. *Journal of Crystal Growth*. 267: 251-255.
- Mazidi M and 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)
- Mazidi M, Maroufpoor E and Bahramnejad B, 2010. Investigation of Time Domain Reflectometry models accuracy for estimation of soil water content. *Iranian Water Research Journal*. 3(5): 41-52.
- Maroufpoor I, Emamgholizadeh S, Torabi H and Behzadinasab M, 2009. Impact of soil texture on the calibration of TDR for water content measurement. *Journal of Applied Science*. 9(16): 2933-2940.
- Metanat M, Banejad H, Gholizadeh M and Goldani M, 2018. Investigation the effect of different magnetized water intensities on quantitative and qualitative yield of radish. *Iranian journal of irrigation and drainage*. 12(2): 472-480.
- Moradi Marjane E and Goldani M, 2011. Evaluation of different salicylic acid levels on some growth characteristics of pot marigold (*Calendula officinalis* L.) under limited irrigation. *Environmental stress in crop science*. 4(1): 33-45. (in Persian)
- Mostafazadeh-Fard B, Khoshravesh M, Mousavi SF and Kiani AR, 2011. Effects of magnetized water and irrigation water salinity on soil moisture distribution in trickle irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 137(6): 398-402.
- Persson M and Berndtsson R, 1998. Texture and electrical conductivity effects on temperature dependency in time domain reflectometry. *Soil Science Society American Journal*. 62: 887-893.
- Roghani M, Emam jomee SR and Kamali K, 2012. The feasibility of making the burial sensors of the TDR machine and evaluating their performance in measuring soil moisture. *Iranian journal of watershed management science*. 17: 53-62. (in Persian)
- Sarani N and Afrasiab P, 2012. Effect of soil texture on moisture measurement accuracy with Theta probe ML2 in Sistan region. pp. 17-18. In *International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Sciences (ICEES'2012) march*.
- Serrarens D, MacIntyre JL, Hopmans JW and Basso LH, 2000. Soil moisture calibration of TDR multilevel probes, *Scientia. Agricola*. 57(2):349-357.
- Soltani mohammadi A, 2005. The effects of soil texture on calibration of TDR for measurement of soil moisture under Khouzestan soil condition. MSc thesis. Department of irrigation and drainage. Faculty of Water engineering. Shahid Chamran University. (in Persian)
- Walker JP, 1999. Estimating soil moisture profile dynamics from near-surface soil moisture measurements and standard meteorological data. Ph.D thesis. The University of Newcastle: New South Wales, Australia.
- Zarrinabadi IG, Razmjoo J, Mashhadi AA and Boroomand A, 2019. Physiological response and productivity of pot marigold (*Calendula officinalis*) genotypes under water deficit. *Industrial Crops and Products*. 139: 111488.