بررسی اثر ماده آلی خاک روی کالیبراسیون TDR برای اندازه‌گیری رطوبت

مریم مزیدی[۱] * و عیسی معروف‌پور

دانشجوی سابق کارشناسی ارشد دانشگاه کردستان، Maryam.Mazidi@gmail.com

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه کردستان، isamarofpoor@yahoo.om

چکیده

روش‌های مختلفی برای تخمین رطوبت خاک وجود دارد. روش TDR (Time domain Reflectometery) روشی نسبتاً جدید است که در آن بر اساس سرعت حرکت امواج الکترومغناطیسی، میزان رطوبت حجمی خاک تخمین زده می‌شود. تأثیر ترکیبات خاک روی منحنی دستگاه، منجر به کالیبراسیون مجدد دستگاه می‌شود. هدف از این تحقیق ارائه معادله کالیبراسیون برای خاک‌های حاوی ماده آلی می‌باشد. این تحقیق در شرایط آزمایشگاهی در سه نوع خاک با بافت سبک، متوسط و سنگین و در پنج تیمار شامل درصدهای مختلف ماده آلی (کود لاشبرگ) و در سه تکرار انجام شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که برای هر سه بافت، رطوبت اندازه‌گیری شده در پنجره ۱۰ نانوثانیه از دقت بالاتری برخوردار بود. همچنین TDR در رطوبت‌های پایین، مقدار رطوبت را بیشتر از روش وزنی تخمین می‌زد. این میزان تفاوت با افزایش درصد رس و ماده آلی افزایش می یافت. با افزایش درصد ماده آلی مقادیر RMSE نیز افزایش یافت که نشان دهنده تأثیر ماده آلی خاک روی دقت دستگاه TDR بود. بین مقادیر رطوبتی مشاهده شده به روش‌های وزنی و TDR، در درصدهای مختلف ماده آلی و در سطح احتمال ۵ درصد، تفاوت معنی‌داری وجود داشت. در نهایت برای هر بافت معادله کالیبراسیون با ضرایب رگرسیون بالا به دست آمد.

واژه های کلیدی: انعکاس‌سنجی حوزه زمانی، رطوبت حجمی

مقدمه

روش انعکاس‌سنجی حوزه زمانی برای تخمین رطوبت خاک، روشی نسبتاً جدید است. این روش اولین بار برای اندازه‌گیری رطوبت خاک توسط تاپ و همکاران (۱۹۸۰) گزارش شده است. از مزیت‌های آن می‌توان به دقت بالا، عدم نیاز به فرآیند کالیبراسیون برای اندازه‌گیری رطوبت در بعضی خاک‌ها (غیر از خاک‌های سنگین بافت، شور و دارای مواد آلی) و تکرارپذیری اشاره کرد. اصول کار دستگاه مبتنی بر اندازه‌گیری مدت زمانی است که طول می کشد تا یک پالس الکترومغناطیس از یک موج بر یا حسگر که در زمین وارد شده است عبور نماید. سرعت انتشار پالس با مقدار ثابت دی الکتریک خاک که تابعی از رطوبت است، نسبت عکس دارد. در روش TDR، دستگاه ثابت دی‌الکتریک خاک را اندازه گرفته و با استفاده از رابطه تعریف شده در حافظه خود (رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و رطوبت حجمی)، آن را به رطوبت حجمی تبدیل

---

[۱] نویسنده مسئول، آدرس: تهران، ابتدای سهرودی شمالی، کوچه مهاجر، شرکت مهندسین مشاور آب‌فن، واحد شبکه‌های آبیاری و زهکشی

* دریافت: شهریور ۱۳۹۱ و پذیرش:آبان ۱۳۹۲

می‌کند.رابطه تعریف شده به دستگاه برای تبدیل ثابت دی‌الکتریک به رطوبت حجمی نیاز به واسنجی دارد و متأسفانه تاکنون یک رابطه جامع و کامل که تأثیر همزمان تمامی پارامترهای مؤثر روی ثابت دی‌الکتریک را در نظر بگیرد ارائه نشده است. به استناد مطالعات به عمل‌آمده، در نقاط مختلف جهان برای کامل کردن این رابطه، تحقیقات فراوانی در حال انجام است که اصطلاحاً تحت عنوان "کالیبراسیون TDR نام گرفته است.

کالیبراسیون خاک‌های آلی از رابطه جهانی تاپ و همکاران (۱۹۸۰) به دست نمی‌آید. در این میان چگالی ظاهری خاک به طور اساسی بر رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و رطوبت حجمی تأثیر دارد. چگالی ظاهری پارامتری فیزیکی است که رطوبت حجمی خاک‌های دارای ماده آلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به دلیل تأثیر قابل توجه در کاهش چگالی ظاهری و سطح ویژه، این رابطه در خاک‌های آلی نسبت به خاک‌های معدنی متفاوت است (اولسزوک و همکاران، ۲۰۰۴).

پومپانن و الوسینمی (۲۰۰۵) اساس اندازه‌گیری‌های TDR را ثابت دی الکتریک ظاهری خاک دانستند که با رطوبت حجمی خاک تغییر می‌کند. در این تحقیق آنها کالیبراسیون‌هایی را برای لایه‌های هوموس دست‌نخورده و همگن ارائه دادند و سه مدل کالیبراسیون را با هم مقایسه کردند. در نهایت تأثیر تغییر در حجم چگالی ظاهری و حجم نمونه را بررسی کردند. در رطوبت‌های حجمی بالا، مقدار k_a برای نمونه هوموس دست‌نخورده بیشتر از نمونه‌های همگن در همان رطوبت حجمی بود. این به دلیل تفاوت در فضای خالی بین دو نمونه یا به عبارتی تخلخل می‌باشد. در مجموع حجم نمونه‌های دست‌نخورده اندازه گرفته شده در رطوبت اشباع، یکسان فرض شد که در همه نمونه‌ها یکسان بود. اگرچه انقباض قابل توجهی با کاهش مقدار آب مشاهده شده بود.

اولسزوک و همکاران (۲۰۰۴) معادلات کالیبراسیونی را برای انوع پیت در دره Biebrza واقع در هلند انجام دادند. در این تحقیق از نمونه‌های دست نخورده استفاده شد. هدف از این تحقیق تعیین سهم چگالی ظاهری برای توابعی است که ثابت دی‌الکتریک را به رطوبت حجمی برای انواع مختلف پیت با درصدهای مختلف ماده آلی ارتباط می‌دهد. آنها نشان دادند که چگالی ظاهری به طور اساسی بر رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و رطوبت حجمی در خاک‌های پیت تأثیر دارد.

اسچاپ و همکاران (۱۹۹۶) TDR را در خاک‌های مناطق جنگلی کالیبره نمودند. آنها در این تحقیق با استفاده از رگرسیون خطی بین رطوبت و شاخص انکساری، مشاهده نمودند که انقباض مواد آلی به طور معنی‌داری روی رطوبت حجمی و زمان‌های انعکاس‌یافته توسط TDR تأثیر دارد. پرسون و برندتسون (۱۹۹۸) با بررسی اثر دما و بافت خاک روی کالیبراسون TDR، در سه خاک رسی، آلی و شنی نتیجه گرفتند که در خاک‌هایی با سطح ویژه زیاد (خاک رس و خاک‌های آلی)، اگرچه اثر دما روی کالیبراسیون TDR حداقل است، اما زیاد بودن سطح ویژه و هدایت الکتریکی محلول خاک باعث ایجاد یک فاکتور مثبت و در نتیجه تخمین بیش از مقدار واقعی رطوبت می‌شود. سلطانی محمدی (۱۳۸۴) تأثیر بافت خاک را روی کالیبراسیون TDR در شرایط خاک‌های استان خوزستان بررسی کرد. همچنین معروف‌پور و همکاران (۲۰۰۹) نیز تأثیر بافت خاک را در شرایط خاک‌های استان کردستان مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیقات نشان داد که با افزایش مقدار رس و سنگین‌تر شدن بافت خاک دقت دستگاه در برآورد رطوبت حجمی خاک کاهش می‌یابد و لازم است معادله جهانی آن کالیبره شود.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در سه خاک با بافت سبک، متوسط و سنگین (لوم شنی، لوم و لومی شنی رسی) و در پنج تیمار با درصدهای ۰/۵، ۲، ۳/۵، ۵ و ۶/۵ از ماده آلی شامل کود لاشبرگ و سه تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. دستگاه TDR مورد استفاده با مارک TRASE مدل

6050X1 و ساخت شرکت Soil Moisture می‌باشد. به منظور ایجاد تیمارهای مختلف خاک با درصدهای مختلف ماده آلی، بعد از تعیین درصد ماده آلی (کود لاشبرگ) به روش آزمایشگاهی، به نسبت‌های وزنی در هر بافت، کود لاشبرگ به دپوی خاک با تیمار مشخص از ماده آلی اضافه شد. اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک به وسیله دستگاه TDR در هر سه پنجره ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانوثانیه انجام شد. همچنین برای اندازه‌گیری رطوبت وزنی نمونه‌ها در هر روز، گلدان‌ها و تغییرات میزان آب خاک گلدان‌ها، اندازه گرفته شد. اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک با این دو روش تا زمانی انجام شد که رطوبت وزنی اندازه گرفته شده تقریباً به یک مقدار ثابت رسیده باشد. داده‌ها پس از جمع‌آوری با استفاده از نرم‌افزارهای SAS و SPSS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ضمن تعیین معنی‌دار بودن اختلاف بین دو روش TDR و روش وزنی و جهت مقایسه بین این دو روش از آزمون $T-test$ استفاده شد. برای مقایسه بین تیمارها در هر بافت و معنی‌دار بودن اختلاف بین تیمارها در قالب طرح کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل داده‌ها صورت گرفت. همچنین تجزیه واریانس از طریق آزمون ANOVA به منظور مقایسه بین بافت‌ها در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی صورت گرفت. آزمون دانکن نیز به منظور تعیین همگن بودن اختلاف بین تیمارها انجام شد. جهت تعیین میزان خطا از پارامترهای آماری ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE) و خطای نسبی (RE) استفاده شد. این پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} di^2}{n}} \qquad (۱)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left|\theta_V - \theta_{\backslash P}\right| / n}{\overline{\theta_V}} \times 100 \qquad (۲)$$

که در آن di: تفاوت بین رطوبت حجمی اندازه‌گرفته شده به روش وزنی و روش TDR، n تعداد نمونه‌ها، θ_v و θ_{TDR} رطوبت حجمی اندازه‌گرفته شده به روش وزنی و TDR و $\overline{\theta v}$ میانگین رطوبت حجمی اندازه‌گرفته شده است.

نتایج و بحث

تعیین دقت TDR در پنجره های اندازه‌گیری ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانوثانیه

نتایج این تحقیق برای سه بافت با درصدهای مختلف ماده آلی نشان داد که در هر سه بافت پنجره ۱۰ نانوثانیه از دقت بالایی برخوردار است. پنجره ۴۰ نانوثانیه در کلیه بافت ها از دقت کمی برخوردار بود. در کاتالوگ دستگاه، استفاده از پنجره ۱۰ نانوثانیه برای پروب‌های دفنی (طول میله موج‌بر ۲۰ سانتی‌متر) توصیه شده است که با نتایج این تحقیق نیز هماهنگی دارد. در پنجره ۴۰ نانوثانیه، رطوبت کمتر از ۲۰ درصد در کلیه بافت‌ها قابل اندازه‌گیری نبود. عدم امکان اندازه‌گیری رطوبت و یا تفاوت زیاد بین مقادیر رطوبت روش TDR و روش وزنی در پنجره ۴۰ نانوثانیه می‌تواند به دلیل عدم توانایی نرم‌افزار دستگاه در تعیین نقطه انتهایی حرکت پالس در موج‌بر باشد. فشرده شدن خاک در حین نصب پروب که افزایش دانسیته خاک را به دنبال دارد و خشک بودن خاک از جمله عواملی هستند که روی نرم افزار دستگاه برای تعیین نقطه بازتاب تأثیر می‌گذارند، که در این شرایط استفاده از پنجره با عرض بیشتر توصیه می‌شود. سلطانی محمدی (۱۳۸۵) در تحقیق خود نتیجه گرفت که بهترین پنجره برداشت در بافت‌های لوم رسی و رس سیلتی پنجره ۲۰ نانوثانیه و برای بافت‌های شن ریز، شن لومی، لوم شنی و لوم سیلتی، پنجره ۱۰ نانوثانیه است. همچنین کمالی و مهدیان (۱۳۸۴) نتیجه گرفتند که بهترین پنجره پنجره ۱۰ نانوثانیه است.

مقایسه رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی و دستگاه TDR

برای مقایسه رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با استفاده از TDR و روش وزنی در درصدهای مختلف ماده آلی در سه بافت مورد نظر، از میانگین مقادیر رطوبتی استفاده شد. بدین ترتیب که از مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری

شده در سه تکرار میانگین گرفته شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار SPSS و با آزمون T-test در سطح احتمال ۵ درصد، تجزیه و تحلیل آنها انجام گردید. هدف از انجام این آزمون تعیین معنی‌دار بودن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با دستگاه و روش وزنی است. در جدول ۱ نتایج مقایسه بین پنجره‌های اندازه‌گیری آورده شده است. نتایج نشان داد که در بافت سبک و متوسط به غیر از تیمار ۰/۵ درصد ماده آلی و در بافت سنگین در تمامی تیمارها بین رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی با TDR اختلاف معنی‌دار وجود دارد.

مقایسه رطوبت حجمی به روش وزنی و دستگاه TDR در تیمارهای مختلف در هر بافت

در شکل‌های ۱ الی ۳ مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی و دستگاه TDR برای هر سه بافت نشان داده شده است. همانگونه که از روی شکل‌های مذکور ملاحظه می‌شود دستگاه TDR در محدوده رطوبتی اندازه‌گیری شده (۰/۱ تا ۰/۳ حجمی)، در تیمارهای ۳/۵، ۵، ۶/۵ درصد ماده آلی، رطوبت را کمتر از روش وزنی تخمین می‌زند که اختلاف بین این مقادیر بیشتر از ۲ درصد می‌باشد. در تیمار ۲ درصد میزان رطوبت اندازه‌گیری شده به وسیله دستگاه در حدود ۲ درصد بیشتر از روش وزنی می‌باشد. در تیمار ۰/۵ درصد ماده آلی در رطوبت‌های متوسط (۱۵ تا ۲۲ درصد) میزان رطوبت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه، تقریباً مطابق روش وزنی می‌باشد و در رطوبت‌های بالاتر یا کمتر، دستگاه TDR رطوبت را کمتر از روش وزنی تخمین می‌زند و تفاوت بین آنها به طور متوسط بیشتر از ۲ درصد می‌باشد. در بافت‌های متوسط و سنگین (شکل‌های ۲ و ۳) دستگاه TDR در محدوده رطوبتی اندازه‌گیری شده در کلیه تیمارها رطوبت را بیشتر از روش وزنی تخمین می‌زند که اختلاف بین این مقادیر بیشتر از ۲ درصد می‌باشد. همچنین در تمامی تیمارهای هر دو بافت در رطوبت‌های بیشتر از ۰/۳ حجمی، دستگاه TDR رطوبت را کمتر از روش وزنی تخمین می‌زند و روند آن نیز تقریباً نامنظم می‌باشد. اولسزوک و همکاران (۲۰۰۴) در تحقیقاتی که بر روی انواع پیت انجام دادند نشان دادند که در درصدهای بالای ماده آلی از انواع پیت، دستگاه TDR، رطوبت را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند که این نتیجه بیشتر در درصدهای بالای رطوبت مشاهده شده است. با توجه به اینکه در کاتالوگ دستگاه، مقدار خطا ۲٪± ذکر شده است، بنابراین به دلیل زیاد بودن تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده (بیش از ۲ درصد) و همچنین بالا بودن مقادیر RMSE و خطای استاندارد، معادلات کالیبراسیونی برای تعیین دقیق رطوبت لازم است (جدول ۲). با برازش خطوط رگرسیونی برای همه بافت‌ها در درصدهای مختلف ماده آلی، معادلات کالیبراسیونی با ضریب همبستگی ۰/۸۹ تا ۰/۹۶ در بافت سبک، ۰/۸۲ تا ۰/۹۷ در بافت متوسط و ۰/۸۷ تا ۰/۹۳ در بافت سنگین به دست آمد. که این نشان دهنده همبستگی بالا بین مقادیر رطوبتی TDR و روش وزنی است. از آنالیز واریانس (در نرم‌افزار SAS) در سطح ۵ درصد برا ی کلیه تیمارها مشخص شد که بین واریانس و میانگین تیمارهای مختلف در هر سه بافت، تفاوت معنی‌داری وجود دارد ($p < ۰/۰۵$). و با افزایش ماده آلی در هر سه بافت خطای استاندارد رو به افزایش است. با استفاده از مقایسه آماری میانگین تیمارها به روش دانکن، زیر گروه‌های همگن و متفاوت از هم تعیین گردیدند. نتایج آزمون دانکن به منظور مقایسه بین میانگین‌ها در جدول ۳ آورده شده است. به منظور اطمینان از نرمال بودن مانده‌ها، تست Shapiro-Wilk به کار گرفته‌شد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس و مقایسه بین میانگین‌ها، نشان‌دهنده متفاوت بودن مقادیر رطوبتی تیمارهای مختلف (درصدهای مختلف ماده آلی) در سطح ۵ درصد ($p < ۰/۰۵$) می‌باشد. با افزایش ماده آلی مقدار خطای استاندارد با افزایش روبرو بوده است. همچنین نتایج آزمون Shapiro-Wilk جهت اطمینان از نرمال‌بودن مانده‌ها نشان داد که در کلیه بافت‌ها داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند. پیرسون و برندتسون(۱۹۹۸) هم با بررسی اثر بافت خاک روی کالیبراسیون TDR در سه خاک رسی، آلی و شنی نتیجه

گرفتند که درخاک‌هایی با سطح ویژه زیاد یعنی رس و خاک‌های آلی، زیاد بودن سطح ویژه و هدایت الکتریکی محلول خاک با هم، باعث ایجاد فاکتور مثبت و در نتیجه تخمین رطوبت، بیشتر از مقدار واقعی می‌شود.

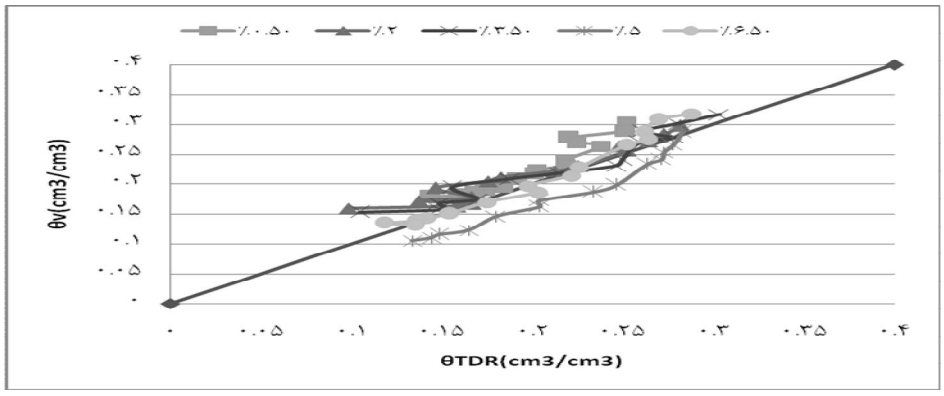
مقایسه رطوبت حجمی به روش وزنی و دستگاه TDR در هر سه بافت نسبت به هم

از آنالیز واریانس (در نرم‌افزار SAS) در سطح ۵ درصد برای کلیه تیمارها مشخص شد که بین واریانس و میانگین تیمارهای مختلف در هر سه بافت تفاوت معنی‌داری وجود دارد ($p < ۰/۰۵$) و با افزایش رس خطای استاندارد رو به افزایش است که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است. معادلات برازش یافته در جدول ۵ آورده شده است. به منظور اطمینان از نرمال بودن مانده‌ها، تست Shapiro-Wilk به کار گرفته شد. در کلیه بافت ها و در درصدهای مختلف ماده آلی، تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده به روش وزنی و TDR از دو درصد بیشتر است. با برازش خطوط رگرسیونی برای تمامی بافت‌ها در محدوده اندازه‌گیری، معادلات کالیبراسیونی با ضرایب همبستگی در محدوده‌های ۰/۸۰ تا ۰/۸۹ به دست آمد. نتایج، همبستگی نسبتاً بالایی را بین داده‌های رطوبتی TDR و روش وزنی نشان می‌دهد که این میزان همبستگی با افزایش ماده آلی و میزان رس کاهش یافته است. در تحقیقی که یرمی و همکاران (۱۳۸۷) در زمینه تخمین رطوبت خاک توسط دستگاه TDR و اثر بافت خاک روی کالیبراسیون دستگاه انجام دادند، یک سری معادلات کالیبراسیونی را برای تخمین رطوبت خاک بر اساس رطوبت قرائت شده از دستگاه TDR و رطوبت حجمی به دست آمده از روش وزنی در سه نوع بافت ارائه دادند که نشان داد با افزایش درصد رس ضرایب همبستگی کاهش یافته است و متناسب با آن با سنگین‌تر شدن بافت خاک، جذر متوسط مربع خطا نیز افزایش یافته است. داسبرگ و دالتون (۱۹۸۵)، نادلر و همکاران (۱۹۹۱) هم در تحقیق خود همبستگی بالایی بین داده‌های وزنی و TDR را در بافت شنی و لومی شنی (۰/۹۴۸) و در خاک لوم سیلتی (۰/۹۸۲) به دست آورده‌اند. چندلر و همکاران (۲۰۰۴) همبستگی بالایی بین رطوبت حجمی خاک و مقدار تعیین شده با دستگاه TDR مشاهده کردند و گزارش کرده‌اند که منحنی کالیبراسیون دستگاه با نوع خاک تغییر می‌کند.

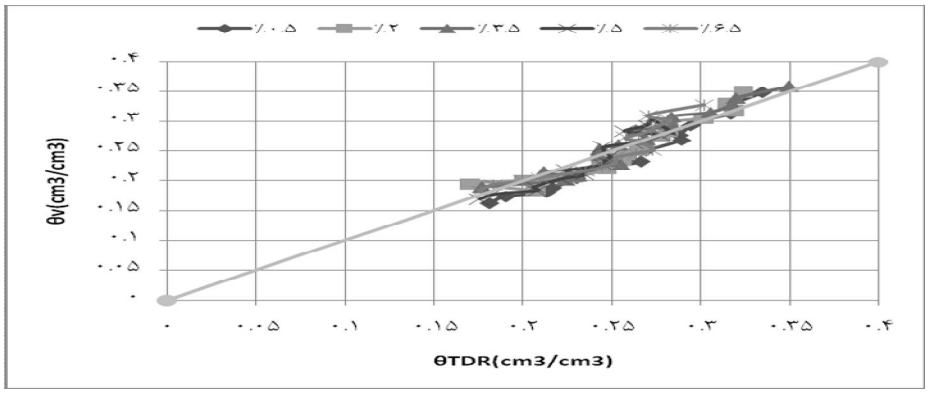
علی‌رغم همبستگی بالا بین رطوبت TDR و رطوبت روش وزنی، از بررسی خطای استاندارد و انحراف معیار محاسبه شده، وجود اختلاف بین داده‌های رطوبتی حاصله از دو روش مشهود است. در بحث عوامل مؤثر بر کاهش دقت دستگاه در تعیین رطوبت می توان به دو عامل میزان رس خاک و نوع رس و میزان مواد آلی خاک اشاره کرد. با افزایش رس و مواد آلی در بافت‌ها، میزان دقت دستگاه با کاهش چشمگیری همراه بوده است. تأثیر رس بر کالیبراسیون دستگاه به علت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این کانی به ویژه سطح مخصوص ویژه آن می‌باشد. خاک‌های مختلف سطوح ویژه مختلفی دارند که نتیجه اختلاف در نوع کانی رس، بافت خاک، میزان رس، نوع رس و میزان ماده آلی آن می‌باشد. بعضی از خصوصیات مهم خاک‌ها مثل ظرفیت نگهداری و ظرفیت تبادل کاتیونی، با سطح ویژه خاک‌ها مرتبط هستند (هرکلراس و همکاران، ۱۹۹۱).

با برازش مقادیر ثابت دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه TDR با درصدهای مختلف ماده آلی، معادله خط رگرسیونی برای این مقادیر به دست آمد که معادله چند جمله‌ای درجه سه کمترین میزان خطا و بیشترین همبستگی را داشته است. با توجه به مقالات بررسی شده بهترین رابطه‌ای که تاکنون تطابق بهتری با داده‌های به دست آمده با روش وزنی داشته، یک رابطه چندجمله‌ای درجه سه می‌باشد. همچنین برای هر بافت با برازش دادن کلیه داده‌ها می‌توان یک معادله کلی را ارائه داد. برای نمایش میزان همبستگی رطوبت TDR با ثابت دی‌الکتریک ارائه شده توسط دستگاه، در رابطه داده شده از θ_{TDR} استفاده شد. جدول ۶ معادله خطوط برازش یافته

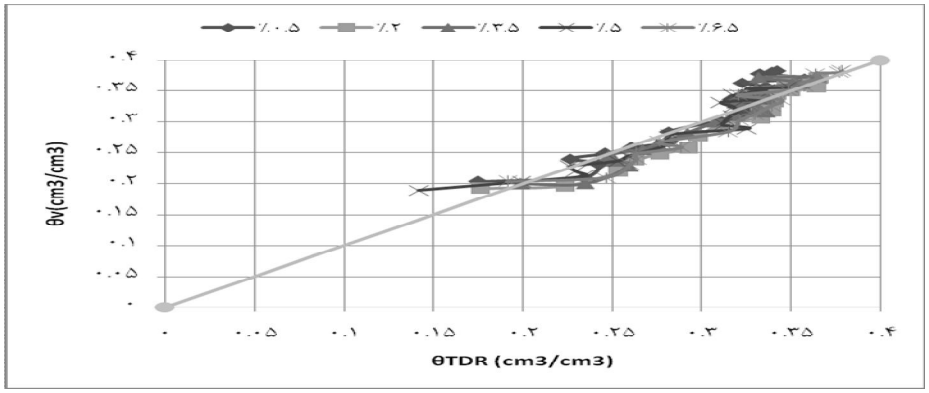
و ضرایب رگرسیونی را برای بافت‌های مختلف نشان می‌دهد. این معادلات، به صورت $\theta_{TDR} = A\times\varepsilon^3 + B\times\varepsilon^2 + C\times\varepsilon + D$ برای هر بافت در درصدهای مختلف ماده آلی ارائه شده است. از رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به وسیله دستگاه ضرایب رگرسیون بالایی به دست آمده است. رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و رطوبت حجمی در شرایط حاضر به صورت خطوط برازش یافته در جدول ۶ می‌باشند. اما با توجه به اینکه میزان خطای دستگاه در برآورد رطوبت حجمی، بیشتر از خطایی است که در کاتالوگ دستگاه ذکر شده است، لازم است رطوبت حجمی که توسط دستگاه ارائه می‌شود، به صورت معادلات پیشنهادی در جدول ۲ کالیبره شوند.



شکل ۱. مقایسه رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی θ_V و دستگاه TDR θ_{TDR} در بافت سبک



شکل ۲. مقایسه رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی θV و دستگاه TDR θTDR در بافت متوسط



شکل ۳. مقایسه رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش وزنی θ_V و دستگاه TDR θ_{TDR} در بافت سنگین

جدول ۱. مقادیر RMSE و RE پنجره‌های اندازه‌گیری در درصدهای مختلف ماده آلی در سه بافت

بافت خاک	درصد ماده آلی	پنجره اندازه‌گیری					
		۱۰		۲۰		۴۰	
		RMSE	RE	RMSE	RE	RMSE	RE
سبک (لوم شنی)	۰/۵	۰/۰۱۵	۴/۸۹۸	۰/۰۱۷	۶/۲۱۳	۰/۰۷۵	۳۰/۰۷
	۲	۰/۰۱۶	۵/۳۳۴	۰/۰۳۷	۱۹/۸۰۱	۰/۰۷۵	۳۲/۴۰۹
	۳/۵	۰/۰۱۶	۵/۹۹۵	۰/۰۲۱	۷/۹۱۵	۰/۰۶۲	۴۸/۴۷
	۵	۰/۰۱۸	۶/۲۱۵	۰/۰۳۲	۹/۶۶۴	۰/۱۱۱	۵۰/۷۵۴
	۶/۵	۰/۰۱۹	۶/۹۹۱	۰/۰۶۸	۲۴/۹۲۲	۰/۱۱۲	۵۸/۴۹۷
متوسط (لوم)	۰/۵	۰/۰۱۹	۵/۳۳	۰/۰۲۴	۸/۵۲۹	۰/۱۳۶	۱۹/۶۴۷
	۲	۰/۰۱۷	۴/۸۳	۰/۰۱۹	۷/۵۲۱	۰/۰۵۶	۲۷/۲۱۴
	۳/۵	۰/۰۱۸	۴/۸۸۸	۰/۰۱۹	۶/۲۰۷	۰/۰۷۳	۳۲/۶۶
	۵	۰/۰۲۰	۵/۸۹۸	۰/۰۲۱	۸/۰۹۵	۰/۱۰۳	۳۸/۸۸۳
	۶/۵	۰/۰۲۲	۶/۷۷۴	۰/۰۲۴	۷/۸۵۱	۰/۰۹۲	۳۷/۵
سنگین (لوم رسی شنی)	۰/۵	۰/۰۲۲	۶/۷۷۴	۰/۰۲۴	۷/۸۵۱	۰/۰۹۲	۳۷/۵
	۲	۰/۰۲۲	۵/۷۸	۰/۰۱۹	۷/۳۴۴	۰/۰۹۴	۱۱/۸۹۷
	۳/۵	۰/۰۱۹	۶/۱۱۴	۰/۰۲۴	۹/۴۸۲	۰/۰۴۸	۱۰/۶۹۷
	۵	۰/۰۲۶	۶/۸۰۱	۰/۰۳۰	۱۴/۸۵۶	۰/۰۳۳	۱۳/۲۰۶
	۶/۵	۰/۰۲۱	۵/۶۳۴	۰/۰۳۳	۱۷/۶	۰/۰۴۵	۱۲/۷۸۳

جدول ۲. معادلات و ضرایب رگرسیونی خطوط برازش یافته در درصدهای مختلف ماده آلی برای سه بافت

بافت خاک	درصد ماده آلی	معادله خط	ضریب همبستگی
سبک (لوم شنی)	۰/۵	$\theta_V = 1.141\ \theta_{TDR} - 0.021$	۰/۹۶
	۲	$\theta_V = 1.113\ \theta_{TDR} - 0.055$	۰/۹۶
	۳/۵	$\theta_V = 0.873\ \theta_{TDR} + 0.04$	۰/۹۲
	۵	$\theta_V = 0.796\ \theta_{TDR} + 0.059$	۰/۹۱
	۶/۵	$\theta_V = 1.121\ \theta_{TDR} + 0.015$	۰/۸۹
متوسط (لوم)	۰/۵	$\theta_V = 1.224\ \theta_{TDR} - 0.072$	۰/۹۷
	۲	$\theta_V = 1.108\ \theta_{TDR} - 0.032$	۰/۹۰
	۳/۵	$\theta_V = 1.131\ \theta_{TDR} - 0.031$	۰/۹۲
	۵	$\theta_V = 1.273\ \theta_{TDR} - 0.068$	۰/۸۸
	۶/۵	$\theta_V = 1.108\ \theta_{TDR} - 0.025$	۰/۸۲
سنگین (لوم رسی شنی)	۰/۵	$\theta_V = 1.124\ \theta_{TDR} - 0.027$	۰/۸۸
	۲	$\theta_V = 1.102\ \theta_{TDR} - 0.043$	۰/۹۲
	۳/۵	$\theta_V = 1.212\ \theta_{TDR} - 0.065$	۰/۹۲
	۵	$\theta_V = 0.95\ \theta_{TDR} - 0.014$	۰/۸۷
	۶/۵	$\theta_V = 1.129\ \theta_{TDR} - 0.049$	۰/۹۳

جدول ۳. نتایج آزمون دانکن جهت مقایسه بین میانگین‌ها در بافت‌های سبک،متوسط و سنگین

درصد ماده آلی	بافت سبک		بافت متوسط		بافت سنگین	
	RMSE	RE	RMSE	RE	RMSE	RE
۰/۵	۰/۰۱۶a	۵/۹۳۷۳a	۰/۰۱۷۹a	۵/۸۴۲a	۰/۰۱۷۶a	۴/۸۵۱a
۲	۰/۰۲۷۳a	۷/۷۹۷۶b	۰/۰۱۹۴a	۶/۶۵۴۹ab	۰/۰۲۴۱ab	۵/۷۳۵b
۳/۵	۰/۰۲۴ab	۸/۴۱۲۶b	۰/۰۲۴۹ab	۷/۵۴۰۲bc	۰/۰۲۳۱ab	۶/۳۹۷b
۵	۰/۳۱۴b	۱۱/۲۴۰۲c	۰/۰۲۴۶ab	۸/۲۷۱c	۰/۰۲۵b	۷/۳۹۳۳c
۶/۵	۰/۰۴۷c	۱۴/۶۴۹۷d	۰/۰۲۹۵b	۱۰/۱۰۰۱d	۰/۰۳۱۷c	۸/۵۸۰۵d

تیمارهایی که در یک ستون دارای حروف مشترک می‌باشند، اختلاف معنی‌داری ندارند. (α = ۰/۰۵)

جدول ۴. مقادیر خطای استاندارد در سه بافت سبک، متوسط و سنگین

بافت خاک	خطای استاندارد	
	RMSE	RE
سبک	۰/۰۰۳۱۳	۰/۲۰۸۷۷۹
متوسط	۰/۰۰۷۴	۰/۲۲۰۲۳
سنگین	۰/۰۰۰۷۹	۰/۳۶۲۰۶

جدول ۵. معادله خط برازش یافته در سه بافت سبک، متوسط و سنگین

بافت خاک	معادله خط	ضریب همبستگی
سبک	$\theta_V = 0.971\ \theta_{TDR} + 0.012$	۰/۸۹
متوسط	$\theta_V = 0.149\ \theta_{TDR} - 0.041$	۰/۸۴
سنگین	$\theta_V = 1.070\ \theta_{TDR} + 0.023$	۰/۸۰

جدول ۶. معادله و ضرایب رگرسیونی خطوط برازش یافته بر منحنی رطوبت TDR و ثابت دی‌الکتریک

بافت خاک	درصد ماده آلی	ضریب همبستگی	D	C	B	A
سبک (لوم شنی)	۰/۵	۰/۹۹۲	۰/۱۶۸	۰/۰۳۳	−۰/۰۰۵	۰/۰۰۰
	۲	۰/۹۹۹	۰/۰۶۶	۰/۰۲۸	−۰/۰۰۹	۰/۰۰۰
	۳/۵	۰/۹۷۶	۰/۰۱۳	۰/۰۱۸	−۰/۰۰۹	۰/۰۰۰
	۵	۰/۹۹۸	۰/۱۱۰	۰/۰۱۸	−۰/۰۰۴	۰/۰۰۰
	۶/۵	۰/۹۸۳	۰/۶۳۹	۰/۰۱۷	−۰/۰۱۸	۰/۰۰۰
	هر بافت	۰/۹۹۷	۰/۰۷۶	۰/۰۰۶	−۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۰۹
متوسط (لوم)	۰/۵	۰/۹۸۹	۰/۰۲۸	۰/۰۸۳	−۰/۰۰۴	۰/۰۰۰
	۲	۰/۹۸۹	۰/۳۹۷	۰/۱۰۸	−۰/۰۰۶	۰/۰۰۰
	۳/۵	۰/۹۸۵	۰/۲۱۲	۰/۰۶۷	−۰/۰۰۳	۰/۰۰۰
	۵	۰/۹۸۹	۰/۲۰۷	۰/۰۶۵	−۰/۰۰۳	۰/۰۰۰
	۶/۵	۰/۹۸۹	۰/۱۹۶	۰/۰۶۳	−۰/۰۰۲	۰/۰۰۰
	هر بافت	۰/۹۸۷	۰/۰۲۵۴	۰/۰۷۷	−۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۰۵
سنگین (لوم رسی شنی)	۰/۵	۰/۹۶۱	۰/۰۱۴	۰/۰۱۶	−۰/۰۰۹	۰/۰۰۰
	۲	۰/۹۶۸	۰/۰۱۴	۰/۰۵۲	−۰/۰۰۲	۰/۰۰۰
	۳/۵	۰/۹۶۹	۰/۰۱۳	۰/۰۴۹	−۰/۰۰۲	۰/۰۰۰
	۵	۰/۹۷۴	۰/۰۱۶	۰/۰۵۴	−۰/۰۰۲	۰/۰۰۰
	۶/۵	۰/۹۶۸	۰/۰۸۳	۰/۰۴۰	−۰/۰۰۱	۰/۰۰۰
	هر بافت	۰/۹۸۴	۰/۱۲۵	۰/۰۴۸	−۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۰۳

فهرست منابع

۱. سلطانی محمدی ا. ۱۳۸۴. تاثیر بافت خاک روی کالیبراسیون TDR برای اندازه‌گیری رطوبت در شرایط خاک‌های خوزستان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید چمران اهواز. دانشکده مهندسی علوم آب. گروه آبیاری و زهکشی. ۱۹۲ ص.

2. Dasberg., S and F. N. Dalton . 1985. Time Domain Reflectometry Field Measurements of Soil Water Content and Electrical Conductivity. Soil Science Society American Journal. 49:293-297.

3.Chandler, D.G. Sayfried, M. Murdock, M., and J.P. Mcnamara, 2004. Field Calibration of Water Content Reflectometers. Soil Science Society American Journal. 68: 1501-1507.

4.Herkelrath, W.N. Hamburg, S.P., and F. Murphy. 1991. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. Water Resource Research Journal. 27: 857-864.

5.Jacobsen, O.H., and P. Schjonning. 1993. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. Hydrology Journal. 151: 147-157.

6.Kamali, K., and M.H. Mahdian. 2005. Assessment of bnrial sensors options for TDR. Physics and Relations of water, Soil and Plant. (In Farsi).

7.Maroufpoor, E. Emamgholizadeh, S. Torabi, H., and M. Behzadinasab. 2009. Impact of soil texture on the calibration of TDR for water content measurement. Applied Science Journal. 28:105-115.

8.Nadler, A.. Dasberg, S., and I. Lapid. 1991. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. Soil Science Society American Journal. 55:938–943.

9.Oleszczuk, R. Brandyk, T. Gnatowski, T., and J. Szatylowicz. 2004. Calibration of TDR for moisture determination in peat deposits. International Agrophysics Journal. 18: 145-151.
10. Persson, M., and R. Berndtsson. 1998. Texture and electrical conductivity effects on temperature dependency in time domain reflectometry. Soil Science Society American Journal. 62: 887-893.
11. Pumpanen, L., and H. llvesniemi. 2005. Calibration of time domain reflectometry for forest soil humus layers. Boreal Environment Research. 10: 589-595.
12. Roth, K. Schulin, R. Fluhler, H., and W. Attinger. 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. Water Resources Research Journal. 26: 2267-2273.
13. Schaap, M.G. Lange, D. L., and T.J. Heimovaara. 1996. TDR calibration of organic forest floor media. Soil Technology Journal. 11: 205-217.
14. Soltani Mohammadi, A. 2005. Effect of soil texture on TDR calibration for measurement of water content in Khozestan soil condition. M.SC. Thesis. Shahid chamran University. Ahvaz, Iran.
15. Soilmoisture Equipment corporation, 1996. Trase system I operation instructions. Soilmoisture. Equipment Corporation Incorporated, Santa Barbara CA, USA.
16. Topp, G.C. Davis, J.L., and A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. Water Resources Research Journal. 16: 574-582.
17. Yarmi, N. Zand-E-Parsa, SH. Nehzati Paghale, A., and A.L. Kamkar Haghighi. 2008. Estimation of water content in different texture with TDR and comparison it with measured amount, The second Congress of drainage and irrigation network management. Ahvaz, Iran.