بررسی اثر اندازه ذرات خاک بر دقت انعکاس‌سنجی حوزه زمانی جهت اندازه‌گیری رطوبت

عیسی معروف‌پور*[1] و مینا بهزادی نسب[2]

1) استادیار، دانشگاه کردستان، گروه مهندسی آب، کردستان، ایران.

2) کارشناس ارشد، شرکت آب منطقه‌ای کردستان،کردستان، ایران.

* نویسنده مسئول مکاتبات: isamarofpoor@yahoo.com

تاریخ دریافت:91/1/7 تاریخ پذیرش:91/3/28

چکیده

این تحقیق در شرایط آزمایشگاهی روی بافت‌های دست‌خورده که درون گلدان‌هایی از جنس پی وی سی به ارتفاع و قطر متوسط 300 ×250 میلی‌متر انجام گرفت. خاک‌های مورد استفاده، شن‌لومی، لوم‌شنی، لوم رسی‌شنی، لوم‌رسی و رسی با سه تکرار بودند. پس از حدود 24 ساعت از اشباع شدن هر بافت، اندازه‌گیری رطوبت به روش وزنی و با استفاده از TDR انجام شد. در این تحقیق تعیین رطوبت و ثابت دی‌الکتریک درسه پنجره برداشت و در سه تکرار برای هر بافت در هر نوبت اندازه‌گیری، صورت گرفت. عمل اندازه‌گیری رطوبت با این دو روش هر روز انجام گرفت تا اینکه یک محدوده رطوبتی برای هر بافت تعیین شد. نتایج این تحقیق نشان داد که: 1- در تمامی بافت‌های مورد مطالعه مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده در پنجره اندازه‌گیری 20 نانو ثانیه از دقت بالاتری برخوردار بودند و دستگاه TDR قابلیت اندازه‌گیری رطوبت در پنجره 40 نانو ثانیه را نداشت. 2- دستگاه TDR در دو بافت شن‌لومی و لوم شنی در رطوبت کمتر از 20 درصد و در مابقی بافت‌ها در کل دامنه اندازه‌گیری، میزان رطوبت را کمتر از روش وزنی اندازه‌گیری می‌کند که با سنگین‌تر شدن بافت این تفاوت بیشتر شده است. 3- از نظر آماری در سطح یک درصد بین مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده توسط TDR و روش وزنی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشده است. 4- خطوط رگرسیونی برازش یافته بر مقادیر رطوبتی در تمام بافت‌ها دارای ضریب همبستگی بالایی بود.

واژه‌های کلیدی: TDR، کالیبراسیون، بافت خاک.

مقدمه

تشخیص دقیق رطوبت خاک و اندازه‌گیری آن بخشی از مدیریت مصرف آب در مزرعه می‌باشد که از زیان‌های اقتصادی و زیست محیطی ناشی از مصرف کم یا زیاد آن جلوگیری به عمل می‌آورد. روش‌ها و ابزار مختلفی برای نمایش یا تعیین مستقیم رطوبت خاک استفاده می‌شوند که می‌توانند رطوبت را به صورت وزنی، حجمی و پتانسیل مشخص نمایند. امروزه بیشتر روش‌هایی که در آنها با اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک خاک، رطوبت خاک تخمین زده می‌شود استفاده می‌شوند. از نمونه روش‌ها می‌توان به:TDR ،FDRو اندازه‌گیری ظرفیت الکتریکی خاک اشاره نمود.

از معایب روش وزنی برهم زدن ساختمان خاک در اثر نمونه‌برداری و وقت‌گیر بودن اندازه‌گیری می‌باشد. از این رو، روش‌های دیگر اندازه‌گیری رطوبت که مکان تکرار اندازه‌گیری در آنها وجود دارد ترجیح داده می‌شوند. با این حال، همواره از این روش به عنوان یک روش مبنا برای کالیبره و واسنجی روش‌های دیگر استفاده می‌شود و همکاران (Chandra et al., 2004). روش انعکاس‌سنجی زمانی (TDR) بر اساس تولید و ارسال موج الکترومغناطیس از طریق یک موجبر در خاک می‌باشد. زمان حرکت موج در طول پروب اندازه‌گیری شده و ε یا ثابت دی‌الکتریک خاک محاسبه می‌گردد. رابطه بین ε و رطوبت به صورت تجربی بدست آمده است (Walker,et al 2004).

Topp و همکاران (1980) وTopp و Davis (1985) در زمینه استفاده از TDR پیشقدم بوده‌اند. موج الکترومغناطیس تولید شده در طول پروب مدفون در خاک حرکت می‌کند و سپس از انتهای پروب برگشت داده می‌شود. چند نوع سیستم TDR برای اندازه‌گیری رطوبت، هدایت الکتریکی و انتقال محلول در خاک به کار می‌روند که به طور کلی می‌توان آن ها را در دو بخش سیستم‌های پالس پلکانی و سیستم‌های پالس ناگهانی تقسیم‌بندی نمود:

برای توسعه رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و رطوبت، پارامترهای زیادی لازم است و به دست آوردن و در نظرگرفتن این پارامترها در شرایط مزرعه مشکل است(Nadler , 1991)

یکی از عوامل مؤثر بر کالیبراسیون دستگاه TDR، عاملی به نام آب مرزی است که George (2000)در کار تحقیقی خود در خاک‌های استرالیا به آن اشاره کرده و دلیل تفاوت در اندازه‌گیری‌های رطوبتی خود و معادله تاپ را همین عامل دانسته است. آب مرزی روی ثابت دی‌الکتریک تأثیر دارد. تأثیر آب مرزی هنوز به طور کامل مطالعه و درک نشده است.

تأثیر اندازه ذرات روی کالیبراسیون دستگاه TDR توسط محققان مختلفی بررسی شده و بعضی از آنها نتیجه گرفته‌اند که این عوامل تأثیر معنی‌داری روی کالیبراسیون دستگاه TDR ندارند (Liaghat,etal.,1993; Topp,etal., 1985).

Quanghee و همکاران (2001) با مطالعه شکل و اندازه ذرات خاک، مؤثر بودن این پارامترها را روی کالیبراسیون TDR بیان کرده‌اند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داده که TDR می‌تواند برای به دست آوردن نتیجه قابل قبول در خاک‌های با ذرات بزرگ که درصد ذرات بزرگ آن کمتر از نصف نمونه بوده و اندازه بزرگترین ذره خاک هم کمتر از 19 میلیمتر باشد، مفید واقع گردد.

دهقانی‌سانیج و همکاران (2004) در تحقیق خود تحت عنوان کاربرد TDR در اندازه‌گیری هم زمان رطوبت و شوری در خاک ماسه بادی، رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و رطوبت و همچنین رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی محلول خاک (ECw) و هدایت

الکتریکی حجمی‌خاک (ECb) را تعیین و با مقایسه رطوبت به دست آمده از TDR و روش وزنی، همبستگی بالایی مشاهده نموده‌اند. آنها مقدار خطای نسبی در تعیین رطوبت را در نمونه‌های بدون اعمال اثر شوری 4/97 درصد تعیین کردند اما در نمونه‌هایی که هدایت الکتریکی بالایی داشته‌اند مقدار آن را 10/67 درصد گزارش کرده و نتیجه گرفته‌اند که شوری خاک، باعث اندازه‌گیری نادرست رطوبت می‌شود. آنها اندازه‌گیری رطوبت را با استفاده از TDR در شوری کمتر از 15 دسی‌زیمنس بر متر و در محدوده رطوبتی بین ظرفیت زراعی تا شروع نقطه پژمردگی در خاک‌های ماسه بادی امکان‌پذیر دانسته‌اند.

Dasberg و Hapmans (1992)، Dalton (1992) و Nadler و همکاران (1991) همبستگی قوی بین رطوبت TDR و روش وزنی در خاک لوم‌شنی (R2 = 0/842) و در خاک لوم‌سیلتی (R2=0/982) گزارش کرده‌اند.

Walker و همکاران (2004) درتحقیقی روش TDR مدل تریز (با پروب دفنی و کانکتور)، مدل کمبل و ویرریب را با یکدیگر و همچنین با روش وزنی مقایسه نموده‌اند. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق طی دو سال در خاک‌های کشور استرالیا جمع‌آوری شده بود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داده که سنسور کانکتور با استفاده ازمعادله کالیبراسیونی خود دستگاه با اختلافی برابر $\pm$2/5 درصد در مقایسه با روش وزنی رطوبت را نشان می‌دهد. همچنین مشخص شده که پروب‌های سیستم کمبل مقدار رطوبت را در زمان اشباع بودن، بیشتر از مقدار واقعی و پروب‌های دفنی هم رطوبت را کمتر از سنسورهای ویرریب تخمین می‌زنند (تقریباً 10 درصد). ضمنا در این تحقیق همبستگی بالایی بین اندازه‌گیری‌های روش وزنی و پروب کانکتور مشاهده و دقت پروب‌های کانکتور را بیشتر از دیگر سنسورهای مورد استفاده در آزمایش دانسته‌اند.

در گزارشی که از سازمان خوار و بار جهانی و آژانس بین‌المللی انرژی هسته‌ای در سال 2003 منتشر شده، مقایسه بین روش‌های مختلف اندازه‌گیری رطوبت بیان شده است که یکی از این روش‌ها، روش TDR مدل تریز می‌باشد. در این گزارش داده‌های بیش از سه سال اندازه‌گیری رطوبت در انواع خاک‌ها در شرایط تحت کشت و آزمایشگاهی، همچنین در شرایط تحت آبیاری و بارندگی مورد استفاده قرار گرفته است. در بعضی مطالعات هم، تأثیر دما و شوری خاک بررسی شده است. آنها در نتایج خود بیان کرده‌اند که تمام وسایل مورد استفاده در این تحقیق به جز سیستم تریز نیازی به کالیبراسیون ندارند و می‌توانند بدون کالیبراسیون هم نتایج منطقی و قابل قبولی داشته باشند.

Liaghat و Broughton (1993) اثر نوع خاک رس و مقدار رس را بر کالیبراسیون دستگاه مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیق از نه نوع خاک (ترکیبی از سه نوع خاک رس بنتونیت، هیدریت و رس روسالی و شن درشت در سه سطح 8، 16و30 درصد وزن رس استفاده کردند و سپس به روش وزنی رطوبت و با استفاده از روش TDR رطوبت و هدایت الکتریکی را اندازه‌گیری نمودند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مقدار رطوبت تعیین شده توسط TDR در رس هیدریت و روسالی از مقدار اندازه‌گیری شده به روش وزنی بیشتر است اما برای رس بنتونیت مقادیر اندازه‌گیری شده توسط هر دو روش یکسان هستند. همچنین نتایج آنها نشان داد که نوع رس و مقدار آن، تأثیر یکسانی روی هدایت الکتریکی تعیین شده با TDR دارند و هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده با TDR برای بافت‌های حاوی بنتونیت، کمتر از بافت‌های حاوی هیدریت و رس روسالی در مقدار رطوبت و هدایت الکتریکی یکسان است.

Souza و همکاران (2001) با به کاربردن TDR درخاک‌های مناطق گرمسیری در شرایط آزمایشگاهی و شرایط صحرایی مقدار رطوبت را تعیین و بیان کردند که مشکلات موجود در مراحل انجام کار هم در شرایط آزمایشگاهی و هم شرایط صحرایی، بیانگر وجود مشکلات فراوان در مراحل تعیین معادله کالیبراسیونی است که منجر به نتایج نادرست شده و از ترکیب کردن اطلاعات حاصل از کار صحرایی و آزمایشگاهی می‌توان معادله کالیبراسیونی دقیق‌تری به دست آورد. ضمنا نتایج آنها بیانگر این موضوع است که مواد معدنی خاک اثر بر روی ثابت دی‌الکتریک دارند به طوری‌که وجود اکسید آهن و رس زیاد در خاک، سطح ویژه را افزایش داده، درنتیجه ظرفیت نگهداری آب در خاک افزایش و مقدار آب آزاد موجود در خاک کاهش می‌یابد که به دنبال آن ثابت دی‌الکتریک کمتر می‌شود. آنها در این تحقیق از روش وزنی برای مقایسه نتایج و کالیبره‌کردن دستگاه استفاده کرده اند. آنها با مقایسه نتایج روش TDR با روش وزنی و نتایج به‌دست آمده از مدل Topp و همکاران(1980) مشاهده نمودند که TDR، رطوبت را 20 درصد کمتر از مدل تاپ و 10 درصد بیشتر از روش وزنی اندازه‌گیری کرده است. Quanghee و همکاران (2001) مطالعاتی روی اثر اندازه ذرات خاک و نحوه قرارگرفتن پروب‌های TDR در خاک انجام داده‌اند. در این تحقیق اندازه بزرگترین ذره خاک 19 میلیمتر گزارش شده است. آزمایش‌های آنها نشان داده که نتایج حاصل برای وزن مخصوص ظاهری و رطوبت قابل قبول اما در محدوده‌ای از رطوبت بین 50 تا 80 درصد، اشتباه سیستماتیک وجود داشته است. علاوه براین بیان کرده‌اند که مقادیر تعیین شده در موردی که پروب‌ها درون خاک فرو برده شده‌اند با وقتی که نمونه خاک در اطراف پروب‌ها قرار گرفته است، با هم متفاوت بوده‌اند.

Birangو Maule در سال 2003 در کانادا با استفاده ازTDR (مدل MP917) در یک خاک شنی، به صورت همزمان رطوبت و هدایت‌الکتریکی را اندازه‌گیری نموده‌اند. در این تحقیق، حداکثر مقدار هدایت الکتریکی که می‌تواند اندازه‌گیری شود و همچنین تأثیر آن روی دقت دستگاه بررسی شده است و مشاهده شد که این دستگاه می‌تواند در موقعی که هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک کمتر از 8 دسی‌زیمنس بر متر باشد نتیجه دقیق‌تری بدهد و در مقادیر بیش از 8 دسی‌زیمنس بر متر تعیین نقطه انتهایی حرکت موج با مشکل روبه‌رو خواهد شد.

مواد و روش‌ها

عملیات آزمایشگاهی این تحقیق در آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان انجام شد. این تحقیق در شرایط آزمایشگاهی روی بافت‌های دست‌خورده که درون گلدان‌هایی از جنس پی وی سی به ارتفاع و قطر 300 x 250 میلی‌متر ریخته شده بودند، انجام گرفت. دستگاه TDR موجود در گروه سیستم‌های پالس پلکانی و به نام Trase System I و مدل 6050 X1 می‌باشد. این سیستم ساخت شرکت سویل مویسچر ایالات متحده امریکا (Soil Misture Equipment Croporation Inc.;Santa Barbara CA,USA) می‌باشد.

برای انجام این تحقیق در شرایط آزمایشگاهی لازم بود از ترکیب کردن خاک‌های رسی و شن‌ریز بافت‌های مورد نظر تهیه گردند. به همین منظور، با الک کردن ماسه، خاک شنی‌ریز (عبوری ار الک شماره 80) تهیه گردید. همچنین از یک نمونه خاک رسی موجود استفاده شد. این نمونه خاک رسی، بر اساس آزمایش هیدرومتری دارای 49 درصد رس و 30 درصد سیلت بود. لازم به ذکر است که خاک رسی مذکور از مناطق کشاورزی حوالی شهرستان سنندج تهیه شده بود که قبل از استفاده از آن، از میزان شوری کم آن

می‌بایست مطمئن شد. سپس این خاک در سه سطح 8، 16 و 30 درصد با شن‌ریز ترکیب گردید. به منظور همگنی بیشتر، عملیات مخلوط کردن با دست انجام گرفت. همچنین از خاک لوم رسی موجود در آزمایشگاه و خاک رس مورد استفاده در ایجاد بافت‌ها به عنوان بافت‌های مورد آزمایش استفاده گردید. در نهایت پنج بافت و از هر بافت سه تکرار تهیه شد. بافت خاک‌های تهیه شده با استفاده از روش هیدرومتری و مثلث بافت خاک تعیین‌گردید. جدول 1نوع بافت و درصد ذرات تشکیل دهنده هر بافت و جدول2 خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول 1: بافت و درصد ذرات تشکیل دهنده خاک‌های مورد مطالعه

بافت خاک	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس
شن لومی	83	6	11
لوم‌شنی	65	14	21
لوم‌رسی‌شنی	57	16	27
لوم‌رسی	39	22	39
رسی	21	30	49

جدول 2: مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

شرح	شن لومی	لوم‌شنی	لوم‌رسی‌شنی	لوم‌رسی	رسی
ظرفیت زراعی(درصد وزنی)	8/95	11/6	15/2	16/98	20/93
نقطه پژمردگی(درصد وزنی)	4/9	5/43	7/84	11/26	16/66
تخلخل	0/41	0/41	0/46	0/52	0/59
وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	1/47	1/47	1/50	1/43	1/29
مواد آلی(درصد)	0/017	0/017	0/016	0/26	0/62
اسیدیته اشباع	7/3	7/2	7/3	7/1	7/2
هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)	0/79	0/57	0/42	0/48	0/67

در کف هر کدام از گلدان‌ها یک توری ریز پارچه‌ای قرار داده شد. بعد از ریختن خاک درون گلدان‌ها، ضرباتی به آنها وارد می‌گردید تا هوای درون گلدان‌ها خارج و خاک در درون گلدان‌ها به صورت متراکم قرار گیرد. سپس گلدان‌ها به مدت 24 ساعت داخل حمام آبی قرار گرفتند تا خاک درون آنها به تدریج از طریق منافذ کف گلدان‌ها اشباع گردد. حدود 24 ساعت پس از اشباع شدن هر بافت، اندازه‌گیری رطوبت به روش وزنی و با استفاده از TDR انجام شد. سعی شد که پروب به صورت مورب درون خاک فرو رود. در این تحقیق تعیین رطوبت و ثابت دی‌الکتریک به وسیله پروب دفنی درسه پنجره برداشت (Capture window) و در سه تکرار برای هر بافت صورت گرفت. همچنین در هر روز همزمان با اندازه‌گیری رطوبت به وسیله TDR، وزن دقیق گلدان‌ها بر اساس روش ارائه شده

توسط Roth و همکاران (1990) اندازه‌گیری می‌شد. عمل اندازه‌گیری رطوبت با این دو روش هر روز انجام می‌گرفت تا اینکه یک محدوده رطوبتی برای هر بافت تعیین شد. در انتهای دوره، وزن خاک خشک گلدان‌ها و همچنین حجم آنها اندازه‌گیری گردید.

برای بررسی دقت مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده از پارامترهای آماری RMSE و ER که به وسیله فرمول‌های (1) و (2) محاسبه می‌شوند استفاده شد. هرچه مقدار RMSE و ER کمتر باشد دقت اندازه‌گیری داده‌ها بیشتر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMSE=(\sum_{i=1}^{n} d_i^{\,2}/n)^{1/2} \quad (1)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |\theta_V - \theta_{TDR}| / n}{\overline{\theta_V}} \times 100 \quad (2)$$

$$RE=((\sum^{n}_{i=1} |\theta_v-\theta_{TDR}|/n)/\theta_v^{-}))*100 \quad (2)$$

RMSE وRE : ریشه متوسط مربعات خطا و خطای نسبی، d_i: اختلاف بین رطوبت حجمی‌اندازه‌گیری شده و روش TDR در هر رطوبت، i و n: بیانگر شماره رطوبت و تعداد کل نمونه‌ها، θ_v و θ_{TDR} : رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و رطوبت TDR، θv^{-} : متوسط رطوبت حجمی‌اندازه‌گیری شده

نتایج و بحث

نتایج بدست آمده نشان داد که در تمامی بافت‌ها، مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده در پنجره اندازه‌گیری 20 نانوثانیه از دقت بالاتری برخوردار است. پنجره اندازه‌گیری 40 نانوثانیه در تمامی‌گروه‌های بافتی، غیر قابل استفاده و یا به عبارتی دستگاه TDR در طی دوره اندازه‌گیری رطوبت به دفعات متعدد پیغام خطا می‌داد. لذا امکان رسم منحنی رطوبتی برای پنجره 40 نانو ثانیه در بافت‌های اندازه‌گیری شده وجود نداشت. بنابراین در محاسبات بعدی خود از داده‌های رطوبت به دست آمده از پنجره 20 نانوثانیه برای تمامی گروه‌های بافتی خاک استفاده گردید. نتایج این بررسی در جدول 3 نشان داده شده است.

در کاتالوگ دستگاه، استفاده از پنجره 10 نانوثانیه برای پروب‌های دفنی (طول میله موج‌بر 20 سانتیمتر) و کانکتور (طول میله موج‌بر 15 سانتیمتر) توصیه شده‌است که با نتایج طرح حاضر مغایرت دارد که شاید علت آن نوع رس این بافت‌ها باشد. عدم امکان اندازه‌گیری رطوبت در پنجره 40 نانوثانیه احتمالاً مربوط به عدم توانایی نرم‌افزار دستگاه در تعیین نقطه انتهایی حرکت پالس در موج‌بر می‌باشد.

جدول 3: مقادیر RMSE وER محاسبه شده برای پنجره‌های اندازه‌گیری در بافت‌های مختلف

بافت خاک	20		10	
	RE(%)	RMSE (Cm^3/Cm^3)	RE(%)	RMSE (Cm^3/Cm^3)
شن‌لومی	11/30	0/020	13/56	0/023
لوم‌شنی	13/81	0/025	16/34	0/029
لوم‌رسی‌شنی	17/70	0/038	20/75	0/045
لوم‌رسی	22/83	0/043	26/48	0/049
رسی	22/98	0/055	26/01	0/061

در کاتالوگ دستگاه، برای استفاده از پروب‌های دفنی و کانکتور بزرگ‌تر از 20 و 15 سانتی‌متر، خاک‌های شور و همچنین رطوبت‌های خیلی بالا و شرایط بحرانی، استفاده از پنجره‌های با عرض بزرگ‌تر توصیه شده است. فاکتورهایی مثل مقدار و نوع رس موجود در خاک، مواد آلی، شوری و حتی مقدار رطوبت خاک باعث تغییر شکل موج حاصل از حرکت پالس در پروب مدفون در خاک و درنتیجه ایجاد خطا در تفسیر و تعیین زمان حرکت پالس در پروب مدفون درخاک توسط نرم‌افزار موجود در دستگاه TDR می‌شوند.

برای مقایسه رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با استفاده از TDR و روش وزنی در بافت‌های مختلف از میانگین مقادیر رطوبتی استفاده شد. با استفاده از آزمون T-test و در سطح احتمال 1 درصد، مشخص گردید که بین مقادیر رطوبتی دو روش وزنی و TDR در هیچ یک از خاک‌های مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. با برازش خط رگرسیونی بین داده‌ها، ضریب رگرسیونی برای هر یک از بافت‌ها به دست آمد که در جدول 4 آورده شده است و نتایج بدست آمده، نشان دهنده همبستگی بالا بین داده‌های این دو روش است.

اگر چه از لحاظ آماری در سطح 1 درصد بین مقادیر رطوبت حجمی‌اندازه‌گیری شده و رطوبت حجمی TDR در بافت‌های مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد اما با توجه به معادلات خطوط برازش یافته مشخص شد که بین شیب و عرض از مبدا آنها در بافت‌های مختلف تفاوتی وجود دارد که نشان دهنده متفاوت بودن مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه TDR و روش وزنی در محدوده رطوبتی مورد مطالعه است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که روش TDR در بافت‌های شن‌لومی و لوم‌شنی در رطوبت‌های پایین (کمتر از 20 درصد)، و در بافت‌های لوم‌رسی‌شنی، لوم‌رسی و رسی در تمامی دامنه رطوبتی مورد آزمایش میزان رطوبت را کمتر از روش وزنی تخمین می‌زند و تفاوت بین آنها در حدود 2 درصد است که با سنگین‌تر شدن بافت خاک مقدار آن افزایش می‌یابد به طوری که در خاک رسی این

اختلاف به بیش از 4 درصد می‌رسد. ضمناً نتایج مندرج در جدول 3 نشانگر آن است که با افزایش رس بافت‌ها، شیب خطوط برازش یافته تقریباً کاهش یافته و مقدار RE و RMSE روند صعودی پیدا کرده است.

جدول 4: مقادیر خطای نسبی، مجذور میانگین خطا، ضریب همبستگی و معادله خط برازش درهر بافت

بافت خاک	معادله خط	R^2	RMSE(Cm^3/Cm^3)	RE(%)
شن لومی	$\theta_{TDR} = 1/13\ \theta_v - 0/027$	0/98	0/015	9/28
لوم شنی	$\theta_{TDR} = 1/23\ \theta_v - 0/053$	0/98	0/022	11/76
لوم‌رسی‌شنی شنی	$\theta_{TDR} = 1/11\ \theta_v - 0/054$	0/97	0/035	16/33
لوم‌رسی	$\theta_{TDR} = 1/02\ \theta_v - 0/043$	0/98	0/041	22/75
رسی	$\theta_{TDR} = \theta_v - 0/050$	0/92	0/054	24/4

مقادیر RMSE محاسبه شده برای بافت‌های مختلف در محدوده 0/015 تا 0/054 سانتیمترمکعب بر سانتیمترمکعب می‌باشد. با توجه به اینکه در کاتالوگ دستگاه، مقدار خطا $\pm$0/02 ذکر شده است، بنابراین به خاطر زیاد بودن تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده (بیش از2 درصد) و همچنین بالا بودن مقادیر RMSE و خطای استاندارد، برای تعیین رطوبت پنج بافت مورد نظر ارائه معادلات کالیبراسیونی تعیین دقیق رطوبت لازم است.

با برازش خطوط رگرسیونی برای تمام بافت‌ها درمحدوده اندازه‌گیری شده، معادلات کالیبراسیونی با ضرایب همبستگی در محدوده 0/98 تا 0/92 به دست آمده که نشان دهنده همبستگی بالا بین داده‌های رطوبتی TDR و روش وزنی است. Dasberg و Hapmans (1992)، Nadler و همکاران (1991) هم در تحقیق خود همبستگی بالایی بین داده‌های وزنی و TDR در بافت شنی و لوم‌شنی (0/842) و در خاک لوم‌سیلتی (0/982) به دست آورده‌اند. Chandlar و همکاران (2004) همبستگی خطی و بالایی بین رطوبت حجمی خاک و مقدار تعیین شده با دستگاه TDR مشاهده کرده و بیان نموده‌اند که منحنی کالیبراسیون دستگاه با نوع خاک تغییر می‌کند و کالیبراسیون هر بازتاب سنج (Reflectometer) به طور جداگانه باعث می‌شود نتایج به دست آمده از دقت بالاتری برخوردار باشند.

Ponizovsky و همکاران (1999) و George (2000) هم با بررسی جداول تجزیه واریانس تحقیق خود، بین مقادیر رطوبتی روش وزنی و TDR اختلاف معنی‌داری مشاهده نکرده‌اند.

در بحث عوامل موثر بر کاهش دقت دستگاه در تعیین رطوبت می‌توان به عامل مهم مقدار رس خاک و نوع آن اشاره کرد. با افزایش رس در بافت‌ها، میزان دقت دستگاه با کاهش چشمگیری همراه بوده است. تاثیر 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 درنوع کانی

رس، بافت خاک، مقدار و نوع رس و مقدار ماده آلی آن می‌باشد. بعضی از خصوصیات مهم خاک‌ها مثل ظرفیت نگهداری و ظرفیت تبادل کاتیونی، با سطح ویژه خاک‌ها مرتبط هستند. بعضی از مولکول‌های آب ممکن است از طریق پیوند هیدروژنی جذب سطح ذرات رس شوند و مقداری هم ممکن است توسط یون‌های قابل‌تبادل به صورت هیدراته درآیند. تاثیر کاتیون روی مولکول‌های آب وقتی بار بیشتری یا اندازه کمتری دارند بیشتر است (Liaghat and Broughton, 1993).

با افزایش مقدار رس، دستگاه تمایل به تخمین کمتر رطوبت داشت. که این به علت افزایش سطح ویژه نگهداری رطوبت و در نتیجه محصور شدن آب آزاد موجود در خاک است. به طور الکترواستاتیکی آب محصور شده ثابت دی الکتریک کمتری (3-5) نسبت به آب آزاد (70-80) دارد.

Souza و همکاران (2001) مواد معدنی خاک را اساسی‌ترین فاکتور مؤثر بر ثابت دی‌الکتریک آن دانسته و بیان نموده‌اند که اکسید آهن و رس زیاد در خاک باعث افزایش سطح ویژه، ظرفیت نگهداری آب در خاک و کاهش مقدار آب آزاد موجود در خاک و در نتیجه ثابت دی‌الکتریک می‌شود. Ponizovsky و همکاران (1999) مشاهده کردند که با افزایش مقدار رس در خاک، مقدار رطوبت افزایش پیدا می‌کند ودر Dirksen وDasberg (1992) نتیجه‌گرفتند که خاک‌های با بافت ریز، ثابت دی‌الکتریک کمتری نسبت به خاک‌های با بافت درشت در رطوبت یکسان دارند و این اختلاف با افزایش رطوبت بیشتر می‌شود.

به هنگام نصب پروب‌ها در خاک هم ممکن است هوا در اطراف میله‌های پروب قرار گیرد. به علت حساسیت ثابت دی‌الکتریک به خصوصیات دی‌الکتریکی محیط اطراف میله‌های پروب و متفاوت بودن ثابت دی‌الکتریک هوا و خاک، قرارگیری هوا در اطراف میله‌های پروب تاثیر معنی‌داری روی دقت اندازه‌گیری دارد و این تاثیر با افزایش فاصله بین میله‌های پروب و افزایش رطوبت بیشتر می‌شود (Siddiqui et al , 2000).

در طول مدت آزمایش، دمای آزمایشگاه در محدوده 28 تا 32 درجه قرار داشت که طبق نتایج تحقیقات قبلی، دما در ایجاد خطا و کالیبراسیون دستگاه موثر نبوده است (دمای کمتر از 40 درجه سانتیگراد، آن چنان تأثیر محسوسی روی کالیبراسیون دستگاه نمی‌گذارد و در این موارد نیاز به ضریب اصلاحی نیست (Perrson and Berndtsson, 1998).

تغییرات دانسیته خاک حین نصب پروب و برهم‌خوردگی خاک اطراف میله‌های پروب، باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری رطوبت می‌شود. خاک جانشین شده توسط میله‌ها احتمالاً باعث تغییر دانسیته خاک اطراف میله‌ها شده که روی ثابت دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده مؤثر است. میزان تغییرات دانسیته، به دانسیته اولیه خاک، فشار وارده، نوع خاک و درجه اشباع خاک بستگی دارد (Siddiqui et al, 2000). بر اساس مشخصات کابل مورد استفاده (کابل هم‌محور) که در کاتالوگ دستگاه بیان شده می‌توان اثر طول کابل در کاهش انرژی سیگنال و در نتیجه ایجاد خطا در اندازه‌گیری رطوبت را نادیده گرفت (با کابل‌های هم محور تلفات انرژی سیگنال‌ها کمتراست). در مراحل مختلف تعیین رطوبت وزنی و تبدیل آن به رطوبت حجمی، احتمال وجود خطا وجود دارد که می‌توان به خطای توزین نمونه‌ها برای تعیین وزن خشک و تر نمونه و همچنین خطای محاسبه وزن مخصوص ظاهری برای هر بافت اشاره کرد به طوریکه وزن مخصوص خاک درون استوانه‌ها در طول مدت آزمایش از زمان اشباع بودن تا دوره خشک شدن مرتباً در حال تغییر است و در نظرگرفتن متوسطی

از شرایط ابتدا وانتهای آزمایش احتمالاً در نتایج تاثیرخواهد داشت. علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، می‌توان فاکتورهای زیر را هم جـزء منابع خطا به شمار آورد:

کم بودن حجم نمونه، نحوه قرارگرفتن پروب در داخل خاک درون گلدان، تغییرات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها در اثر قرارگرفتن پروب در داخل خاک، شکاف و فضاهای خالی ایجاد شده در اطراف پروب در طول آزمایش، خطا دراندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری نمونه‌ها و تبدیل رطوبت وزنی به حجمی، فشردگی خاک که باعث طولانی شدن زمان حرکت سیگنال در خاک می‌شود، اختلاف در برخی خصوصیات خاک از قبیل درصد ذرات شن هر بافت، نحوه شبیه‌سازی ستون خاک و عدم وجود فواصل زمانی مساوی بین قرائت‌ها و عدم یکنواختی بافت و وضعیت تراکم خاک را نیز می‌توان نام برد.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که در تمامی بافت‌های مورد مطالعه (شن‌لومی، لوم‌شنی، لوم‌رسی‌شنی، لوم‌رسی و رسی) مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده در پنجره اندازه‌گیری20 نانوثانیه از دقت بالاتری برخوردار بودند و دستگاه TDR قابلیت اندازه‌گیری رطوبت در پنجره 40 نانوثانیه را نداشت. و دستگاه TDR در دو بافت شن‌لومی و لوم شنی در رطوبت کمتر از 20 درصد و در مابقی بافت‌ها در کل دامنه اندازه‌گیری، مقدار رطوبت را کمتر از روش وزنی اندازه‌گیری می‌کند که با سنگین‌تر شدن بافت این تفاوت بیشتر شده است.

همچنین از نظر آماری در سطح یک درصد بین مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده توسط TDR و روش وزنی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشده است. و از مقایسه بافت‌های مورد مطالعه مشخص شد که تقریباً با افزایش رس در خاک، شیب خطوط برازش یافته کاهش یافته اما مقدار RMSE روند صعودی دارد که این نشان دهنده تاثیر مقدار رس موجود در خاک روی دقت دستگاه می‌باشد.

در این تحقیق نشان داد که خطوط رگرسیونی برازش یافته بر مقادیر رطوبتی در تمام بافت‌ها دارای ضریب همبستگی بالایی بود.

منابع

Birang, N. E. and Maule, C. (2003). Calibration of a Instrument for Simultaneous Measurements of Soil Water and Soil Electrical Conductivity.Written for Presentation at the 2003 CSAE/ASAE Annual Intersectional Meetting Sponsored by Red River Section of ASAE Quality Inn and Suites 301 3rd Avenue North Fargo ,North Dakota,USA.

Chandler, D.G., Sayfried, M., Murdock, M. and Mcnamara, J.P. (2004). Field Calibration of Water Content Reflectometers. Soil Sci. Soc. Am. J., 68: pp.1501-1507.

Dalton, F.N. (1992). Development of time-domain reflectometry for measuring soil water content and bulk soil electrical conductivity. Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice. pp143-168.

Dasberg, S. and Hopmans, J.W. (1992). Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 56:pp. 1341-1345 .

Dehghanisanij, H., Yamahato, T. and Inoue, M. (2004). Practical Aspects of TDR for Simultaneous Measurements of Water and Solute in a Dune Sand Field. J. Jpn. Soil Phys., 98:pp. 21-30.

Dirksen, C. and Dasberg, S. (1992). Improved calibration of time-domain reflectometry soil water content measurements. Sci. Soc. Am. J., 57:pp. 660-667.

George, B. H.(2000). Comparison of techniques for measuring the Water content of soil and other porous media. Theses (M.SC). Sydney University, Department of Agricultural Chemistry and Soil Science, Sydney, Australia.

Jacobsen, O .H. and Schjonning, P. (1993b). Field evaluation of time-domain reflectometry for soil water measurements. Journal of Hydrology, 151:pp. 159-172.

Liaghat, A. and Broughton, R.S.(1993). Effect of clay type and clay content on moisture content and bulk soil electrical conductivity as measured using time domain reflectometry. THESES (M.SC) Mcgill university , Dept. of agricultural engineering, Montreal, Quebec, Canada.

Nadler, A., Dasberg, S. and Lapid, I.(1991). Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. Soil Sci. Soc. Am. J., 55:pp.938–943.

Persson, M. and Berndtsson, R. (1998). Texture and electrical conductivity effects on temperature dependency in time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 62:pp 887-893.

Ponizovsky, A. A., Chumdinova, S.M. and Pachepsky,Y.A.(1999). Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. Journal of Hydrology, 218:pp. 35-43

Quanghee, Y., Drnevich, V. P., Siddiqui, S. I. and Lovell, J.(2001). Effects of Testing Large Particle-Sized Materials. Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications. pp470 – 482.

Roth, K., Schulin, R., Fluhler, H. and Attinger, W. (1990). Calibration of time-domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. Water Resources Research, 26:pp. 2267-2273.

Siddiqui, S. I., Drnevich, V.P. and Deschamps, R.J. (2000). Time Domain Reflectometry Development for Use in Geotechnical Engineering. Geotechnical Testing Journal, 23(1): 9-20.

Souza, C.F., Matsura, E.E. and Testezlaf, R. (2001). Aplication of time domain reflectometry technique in tropical soil. Second International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications. pp.273-280 .

Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. Water Resources Research, 16: pp.574–582.

Topp, G.C. and Davis, J.L. (1985). Time domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation. In "Advances in Irrigation". Academic Press, NewYork, PP.107-127

Walker, J.P., Willgoose, G.R. and Kalma, J.D. (2004). Insitu measurement of soil moisture: a comparison of techniques. Journal of Hydrology, 293:pp. 85-99