

واسنجی حسگر رطوبتی تدفینی ساخت داخل کشور برای دستگاه TDR در بافت‌های مختلف خاک

داود نیک‌نژاد^{۱*}، علی کلانتری^۲ و کوروش کمالی^۳

چکیده

اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش بازتاب زمانی امواج^۴ (TDR) یک روش غیرمستقیم، بی‌خطر و سریع است که بر اساس ثابت دی‌الکتریک خاک عمل می‌نماید. این روش برای اکثر خاک‌های دارای شرایط معمولی و متعارف نتایج قابل قبولی می‌دهد، اما نتایج این روش برای خاک‌های با شرایط نامتعارف از جمله شوری و ماده آلی زیاد با خطا همراه می‌باشد. راه‌حل این مشکل، واسنجی نتایج است تا بتوان با دقت بالا، رطوبت خاک‌های با شرایط نامتعارف را برآورد نمود. هدف از این پژوهش واسنجی حسگر تدفینی مورد استفاده در روش TDR می‌باشد که به منظور افزایش دقت برآورد رطوبت بافت‌های مختلف خاک متفاوت صورت می‌گیرد. در این پژوهش سه نوع خاک با بافت‌های سنگین، متوسط و سبک آزمایش گردیده که به ترتیب از اراضی جنگلی، زراعی و مرتعی استان آذربایجان شرقی تهیه شدند. تغییرات رطوبت خاک‌ها از حالت اشباع تا هواخشک به روش TDR و وزنی به‌طور همزمان اندازه‌گیری شد. از رطوبت وزنی به‌عنوان رطوبت واقعی استفاده شد. سپس معادلات واسنجی خطی و چندجمله‌ای مناسب که رطوبت واقعی را بر اساس ثابت دی‌الکتریک و رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR محاسبه می‌نماید، برای بافت‌های مختلف خاک ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی: بازتاب زمانی امواج، ثابت دی‌الکتریک، حسگر تدفینی، رطوبت خاک، معادله.

مقدمه

گیری آب موجود به حداکثر تولید دست‌یافت. روش‌های زیادی برای تعیین رطوبت خاک وجود دارد که به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شود. روش‌های مستقیم مانند روش وزنی و حجمی و روش‌های غیرمستقیم مانند نوترون‌متر، اشعه ایکس، اشعه گاما، بلوک گچی و فایبرگلاس، تانسومتر، صفحات فشاری، تئاپروپ^۵، انعکاس‌سنج حوزه فرکانسی^۶ (FDR) و بازتاب زمانی امواج (TDR) می‌باشند. اکثر روش‌های مذکور یا زمان‌بر بوده و یا اینکه دست‌خوردگی خاک را در پی داشته و یا اینکه همراه با خطرات تشعشع مواد رادیواکتیو می‌باشد؛ اما روش‌هایی مانند تئاپروپ، FDR و TDR روش‌های سریع و بی‌خطر بوده و رطوبت حجمی خاک را بدون دست‌خوردگی خاک بر اساس خصوصیات غیرعادی آب از جمله ثابت دی‌الکتریک آن در کوتاه‌ترین زمان ممکن با دقت قابل قبولی تعیین می‌نمایند.

از آنجایی که اندازه‌گیری رطوبت به روش TDR نیز یک روش سریع و بی‌خطر می‌باشد و نتایج حاصل از آن در شرایط متعارف قابل قبول می‌باشد استفاده از این روش را مورد توجه قرار داده است از طرفی

روند افزایش جمعیت و بحران خشکسالی‌های اخیر موجب کاهش مصرف سرانه آب گردیده و بشر را با بحران آب مواجه ساخته است. جهت رفع این بحران بایستی راهکارهایی ارائه شود تا با مدیریت صحیح بتوان از آب موجود در حد بهینه استفاده کرد. از آنجایی که بیشترین میزان مصرف آب در کشاورزی، فضای سبز و باغداری می‌باشد و خاک منبع ذخیره آب و بستر تولید است بنابراین باید اطلاعات دقیق‌تری از میزان رطوبت موجود در خاک وجود داشته باشد تا بتوان نیاز آبی گیاهان و درختان را به‌طور دقیق‌تر تعیین نمود و از اتلاف آب اضافی جلوگیری کرد تا بتوان با مدیریت صحیح بکار

۱. مربی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران. (*نویسنده مسئول: Niknezhad2005@yahoo.com)

۲. استادیار مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران.

۳. مربی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گیلان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۳

تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۴

4. Time Domain Reflectometry

5. Theta probe

6. Frequency Domain Reflectometry

تغییرات آن بین ۱ (میله‌های حسگر موزی با لایه‌های خاک) و ۱- (میله‌های حسگر عمود بر لایه‌های خاک) است. مقدار این پارامتر را می‌توان برای یک محیط دوفازی برابر ۰/۵ در نظر گرفت. با مرتب کردن معادله ۲ می‌توان رطوبت حجمی را به صورت معادله ۳ محاسبه نمود.

$$\theta_v = \frac{k^\beta - (1-n)k_s^\beta - nk_a^\beta}{k_w^\beta - k_a^\beta} \quad (3)$$

کایزر و همکاران (۲۰۱۰) در رابطه با رطوبت خاک بدست آمده از روش TDR و روش وزنی، معادلاتی را برای چهار نوع خاک ارائه نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مدل‌های جهانی نظیر تاپ و همکاران و لیدیو و همکاران برای خاک‌های مورد مطالعه از دقت کافی برخوردار نیستند و برای داده‌های بدست آمده در هر کدام از خاک‌ها مدل‌های خطی و چندجمله‌ای درجه سه ارائه نمودند. علاوه بر آن یک مدل کلی سه‌جمله‌ای برای چهار نوع خاک پیشنهاد کردند (Kaiser et al., 2010; Topp et al., 1980; Lidieu et al., 1986). سوزا و همکاران (۲۰۰۱) از روش TDR برای تعیین رطوبت خاک‌های استوایی استفاده کردند (Souza et al., 2001). لین و همکاران (۲۰۰۱) یک معادله واسنجی برای چهار نوع خاک ارائه نمودند و نسبت به مدل‌های نادلر و همکاران (۱۹۹۱)، جکوبسن و اسپچنینق (۱۹۹۳) و مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) مورد مقایسه قرار دادند (Nadler et al., 1991; Jacobsen and Schjonning, 1993; Topp et al., 1980; Lane et al., 2001). منحنی حاصل از مدل آن‌ها نزدیک منحنی حاصل از مدل تاپ و همکاران (۱۹۸۰) بود و در رطوبت کمتر از ۲۰ درصد منحنی حاصل از مدل‌های مذکور تقریباً به صورت یکسان عمل می‌کردند. ژاکی‌یانگ و همکاران (۲۰۱۰)، یک معادله کلی برای ۱۳ نوع بافت خاک ارائه نمودند که در آن علاوه بر ثابت دی‌الکتریک، وزن مخصوص ظاهری خاک نیز اعمال شده بود (Topp et al., 1980; Zhaoqiang et al., 2010).

ارزیابی حسگر دستگاه TDR برای اولین بار در ایران توسط کمالی و مهدیان (۲۰۰۹) در پژوهشکده حفاظت خاک و آب‌خیزداری صورت گرفت. برقراری روابط همبستگی نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد بین نتایج حسگرهای ساخته شده و حسگر استاندارد وجود نداشته و بین آن‌ها درصد همبستگی بالایی وجود دارد که بالاترین همبستگی در پنجره ۱۰ نانوتایه و در بافت لوم شنی مشاهده گردید (کمالی و مهدیان، ۱۳۸۸).

دیگر تجربیات بدست آمده نشان داده‌اند که در خاک‌های غیرمتعارف، دارای ماده آلی زیاد، سنگین و شور، مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه TDR با مقدار واقعی آن که به روش وزنی تعیین می‌شود متفاوت می‌باشد (نامدار خجسته و همکاران، ۱۳۹۰؛ مزیدی و معروف‌پور، ۱۳۹۲؛ Sun and Yaung, 2000; Gong and Sun, 2003; Liagahat et al., 1998). این مسئله مربوط به محدودیت منحنی‌ها یا معادلات تبدیل ثابت دی‌الکتریک به رطوبت حجمی بوده که توسط شرکت سازنده در ساختار نرم‌افزاری دستگاه گنجانده شده است و تغییر در این منحنی‌ها یا معادلات توسط کاربران غیرممکن می‌باشد. بنابراین خاک‌هایی که دارای شرایط مذکور باشد بایستی نسبت به مقدار واقعی رطوبت که به روش وزنی تعیین می‌شود واسنجی شود و معادلات یا مدل‌های مربوط به هر کدام از شرایط استخراج شود تا بر اساس آن‌ها بتوان مقدار واقعی رطوبت خاک را محاسبه نمود.

استفاده از روش TDR اولین بار در سال ۱۹۸۰ توسط تاپ و همکاران صورت گرفت. آن‌ها از میزان ضریب دی‌الکتریک برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده کردند و برای این منظور از یک معادله تجربی درجه سه برای ارتباط بین ضریب دی‌الکتریک و میزان رطوبت حجمی استفاده نمودند که بر اساس رابطه ریاضی ساده بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش داده شده است. این رابطه که به مدل تاپ و همکاران معروف است به صورت معادله ۱ بیان شده است (Topp et al., 1980).

$$\theta_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \times k - 5.5 \times 10^{-4} \times k^2 + 4.3 \times 10^{-6} \times k^3 \quad (1)$$

که در آن θ_v رطوبت حجمی خاک برحسب $(m^3 m^{-3})$ ، k ثابت دی‌الکتریک خاک می‌باشد.

رابطه دیگر که پایه فیزیکی دارد بر اساس ترکیبی از ثابت دی‌الکتریک سه فاز تشکیل‌دهنده خاک استوار است. این مدل تحت عنوان مدل ترکیبی (Mixing Model) شناخته شده و توسط دابسون و همکاران (۱۹۸۵) و راس و همکاران (۱۹۹۰) ارائه گردیده است. بر اساس این روش ثابت دی‌الکتریک خاک به صورت معادله شماره ۲ محاسبه می‌شود (Dabson et al., 1985; Roth et al., 1990).

$$k = (\theta_v k_w^\beta + (1-n)k_s^\beta - (n - \theta_v)k_a^\beta)^{1/\beta} \quad (2)$$

که در آن n تخلخل خاک $(m^3 m^{-3})$ ، k_w ، k_s ، k_a به ترتیب ثابت دی‌الکتریک هوا، خاک خشک و آب می‌باشد. β پارامتر هندسی است که به نحوه قرارگیری حسگر دستگاه در خاک بستگی دارد و محدوده

عامل باعث برگشت سریع تر موج و کوتاه تر شدن زمان عبور امواج یا زمان تأخیر می شود. بنابراین اثر آب پیوندی منجر به تخمین کمتر مقدار آب در خاک می شود. در خاک های شنی و لومی سطح ویژه و نیروی پیونددهنده خیلی کم می باشند بنابراین در خاک های رسی با سطح ویژه زیاد، جذب شدن مولکول های آب بیشتر و قوی تر شده و اثر آب پیوندی در این نوع خاک ها قابل توجه می شود (Jacobsen and Schjonning, 1993). از طرف دیگر مقدار شوری کل کم خاک نمی تواند باعث تخمین بیش از حد مقدار رطوبت شود و مقدار آب پیوندی در دامنه رطوبت بالا نمی تواند باعث تخمین کمتر مقدار رطوبت خاک شود. از طرف دیگر اگر مقدار رطوبت خاک کم باشد بیشتر مولکول های آب پیوندی نزدیک سطح ذرات خاک شده و در نتیجه باعث کم شدن جریان یون ها می شود (نامدار خجسته و همکاران، ۱۳۹۰). هیل هورست و همکاران (۲۰۰۱) در تحقیقات خود دریافتند که فاز مایع در داخل خاک می تواند به دو بخش آب آزاد و آب پیوندی تقسیم شود. ضریب دی الکتریک آب آزاد در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد در حدود ۸۰ می باشد که این مقدار به علت قطبیت زیاد مولکول های آب است و آب پیوندی شامل مولکول های آبی است که در سطح ذرات خاک به وسیله نیروهای دگردوستی، همدوستی و نیروی اسمزی چسبیده اند. در این حالت حرکت چرخشی مولکول های آب حول نیروی الکتریکی در خاک محدود می شود در نتیجه قطبی نشدن کم مولکول های آب در مقایسه با مولکول های آب آزاد سبب کاهش ضریب دی الکتریک خاک می شود (Hilhorst et al., 2001).

مواد و روش ها

معرفی روش TDR و حسگر رطوبتی

اندازه گیری رطوبت با این دستگاه که به روش بازتاب زمانی امواج مشهور است بر پایه ارسال امواج الکترومغناطیس در طول میله حسگر و دریافت امواج برگشتی استوار می باشد. لذا سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس در امتداد یک میله به طول L بر اساس زمان رفت و برگشت موج توسط گیرنده میله حسگر دستگاه تعیین می شود و بر اساس عوامل مذکور پارامتری تحت عنوان ثابت دی الکتریک توسط دستگاه طبق معادله ۴ محاسبه می گردد.

$$k = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{ct}{2l}\right)^2 \quad (4)$$

که در آن:

c : سرعت نور یا سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس در خلأ بر حسب متر بر ثانیه $(3 \times 10^8 \text{ m/s})$ ، v : سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس در

در ادامه این تحقیق روغنی و همکاران (۱۳۹۰) نیز تحقیقات مشابهی انجام دادند. آن ها انواع مختلفی از میله های استیل را برای دسترسی به مناسب ترین نوع آلیاژ مشابه با نمونه خارجی تهیه نمودند. نمونه حسگرهای ساخته شده در این مرحله، از طریق اندازه گیری رطوبت خاک و مقایسه نتایج داده ها با نمونه خارجی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه آماری داده ها نشان داد که مقادیر داده های نمونه ساخته شده با نمونه خارجی در سطح ۹۹ درصد معنی دار می باشد (روغنی و همکاران، ۱۳۹۰).

کشاورز و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که دقت مقادیر رطوبت حجمی به دست آمده از دستگاه TDR با سنگین شدن بافت خاک کاهش می یابد. سی و سه مرده و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که رطوبت حجمی اندازه گیری شده به روش TDR، ۳ درصد کمتر از روش وزنی برای خاک با بافت رسی و در خاک های با بافت لومی و شنی مقدار رطوبت به ترتیب ۰/۳ و ۲/۵ درصد بیشتر از روش وزنی بود (Siosemardh et al., 2014). مطالعات آن ها نشان داد که مدل درجه سه بهترین و مدل راس و همکاران (۱۹۹۲)، ضعیف ترین مدل برای خاک با بافت های رسی، لومی و شنی بود. آن ها نتیجه گرفتند که با افزایش میزان رس خاک، دقت اندازه گیری دستگاه TDR کاهش می یابد که بیشترین و کمترین دقت به ترتیب مربوط به بافت شنی و رسی بود. همچنین نتیجه گرفتند که دقت اندازه گیری به روش TDR از مدل های تاپ و همکاران (۱۹۸۰)، راس و همکاران (۱۹۹۰) و جکوبسن و اسپچونینق (۱۹۹۳) بیشتر و نسبت به معادلات ریاضی خطی، درجه دو و سه کمتر بود (Roth et al., 1992).

نتایج دیگری که محققان به آن دست یافتند این بود که در خاک های با بافت سنگین مقدار رطوبت حجمی نشان داده شده به روش TDR پایین تر از مقدار واقعی بوده که علت آن وجود آب پیوندی در سطح ذرات رس می باشد. این امر باعث کاهش ضریب دی الکتریک شده و کاهش ضریب دی الکتریک ناشی از تغییر قطبیت مولکول های آب می باشد.

آب پیوندی مانع از قطبی شدن مولکول های آب به وسیله جذب الکترواستاتیک بالا از بارهای منفی در سطح ذرات می شود (Shang, 1994). قطبی بودن مولکول های آب عامل اصلی ضریب دی الکتریک این ماده است و هر عاملی که باعث تغییر در میزان قطبی شدن آب باشد باعث تغییر در ضریب دی الکتریک آب نیز می شود. کاهش قطبی شدن باعث کاهش ضریب دی الکتریک آب می شود. برای آب پیوندی که به طور مستقیم به سطح ذرات چسبیده است، ضریب دی الکتریک تنها ۳/۲ بدست می آید (Or and Wraith, 1999). این

طول میله حسگر برحسب متر بر ثانیه، t : زمان رفت و برگشت پالس عبوری در طول میله برحسب ثانیه، l : طول میله حسگر برحسب متر حال با توجه به منحنی‌های تبدیل که بر اساس نوع حسگر در نرم‌افزار داخلی دستگاه توسط شرکت سازنده قرار داده شده است ثابت دی‌الکتریک به رطوبت حجمی تبدیل می‌شود و یا بر اساس مدل‌های مختلفی که توسط محققین ارائه شده‌اند می‌توان ثابت دی‌الکتریک قرائت شده با دستگاه TDR را به رطوبت حجمی تبدیل نمود.

دستگاه TDR دارای حسگر تدفینی سه شاخه‌ای به طول میله‌های ۲۰ سانتیمتر و حسگرهای اتصالی دوشاخه‌ای به طول میله‌های ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۰ سانتیمتر می‌باشد. این دستگاه دارای سه پنجره زمانی اندازه‌گیری ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانوثانیه می‌باشد که پنجره ۱۰ نانوثانیه برای حسگرهای با طول میله‌های ۱۵ الی ۳۰ سانتیمتر از طرف کارخانه سازنده پیشنهاد شده است و برای حسگرهای با طول میله‌های بیشتر از ۳۰ سانتیمتر بهتر است از پنجره زمانی بزرگ‌تر استفاده شود. دستگاه دارای هشت منحنی تبدیل ثابت دی‌الکتریک به رطوبت حجمی به نام‌های SUN، BCT، BUN، CCT، CUN،

FUN و FCT است که با توجه به نوع حسگر می‌توان یکی از آن‌ها را انتخاب نمود. به‌عنوان مثال برای حسگر تدفینی ساده، BUN و برای حسگر دفنی که میله وسطی آن با مواد پلیمری پوشش داده شده باشد BCT انتخاب می‌شود و یا برای حسگر اتصالی دوشاخه‌ای ساده از CUN و پوشش داده شده CCT انتخاب می‌شود. دستگاه TDR مورد استفاده در این پژوهش از نوع Trase مدل 6050X1 ساخت شرکت Soil Moisture می‌باشد و حسگر رطوبتی که مورد استفاده قرار گرفت حسگر تدفینی ساده مدل L۶۰۰۵ ساخت داخل کشور بود که دارای سه میله می‌باشد میله وسطی حسگر به‌عنوان فرستنده امواج و دو تا میله کناری به‌عنوان گیرنده امواج عمل می‌نمایند. اجزای این حسگر عبارت‌اند از: فیش BNC، کابل هم‌محور یا Coaxial، کلاهک نگه‌دارنده میله‌ها و میله‌ها، این حسگر به تعداد لازم توسط محققین پژوهشگرده حفاظت خاک و آبخیزداری در داخل کشور شبیه‌سازی شده است. شکل ۱ دستگاه TDR و حسگر مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- دستگاه TDR و حسگر رطوبتی مورد استفاده



تهیه نمونه‌های خاک

بافت متوسط از مزرعه مرکز تحقیقات (خاک زراعی) و خاک بافت سنگین از منطقه جنگلی ارسباران (خاک جنگلی) تهیه گردید. خاک‌ها از الک شماره ۵ عبور داده شد و در داخل سوله پهن گردید تا به حالت رطوبت هوا خشک برسد.

در این پژوهش از سه نوع بافت خاک استفاده شد این خاک‌ها از مناطق مختلف استان آذربایجان شرقی تهیه و به محل آزمایش در مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان انتقال یافت. خاک بافت سبک از ایستگاه آبخوان‌داری تسوج (خاک مرتعی)، خاک

آماده‌سازی ظرف خاک

برای این منظور از ظروف پلاستیکی استوانه‌ای با قطر داخلی ۲۱ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر استفاده گردید علت انتخاب قطر مذکور این بود که با توجه به دفترچه راهنمای دستگاه TDR حداقل فاصله حسگر از دیواره‌ها ۵ سانتیمتر باشد. به‌منظور امکان اشباع نمودن خاک در داخل استوانه نیاز به ایجاد سوراخ‌های زهکش در قسمت تحتانی ظرف بود به همین منظور تعدادی سوراخ در کف ظروف ایجاد شد و برای ایجاد تراکم نسبتاً یکنواخت و طبیعی خاک قرار بر این شد که خاک در پنج لایه جداگانه به داخل ظرف ریخته و به حالت طبیعی متراکم شود به همین دلیل محل لایه‌های بر روی ظرف علامت‌گذاری گردید تا در موقع ریختن خاک و حفظ وزن مخصوص ظاهری طبیعی خاک دقت لازم اعمال گردد. در کل مجموع پنج لایه خاک ۲۰/۵ سانتیمتر می‌شود که قرار بود حسگر با طول میله‌های ۲۰ سانتیمتر در آن نصب شود. از طرفی دیگر به‌منظور ورود راحت‌تر آب به داخل استوانه‌ها و زهکشی ظروف، عمقی به ارتفاع دو سانتیمتر از قسمت تحتانی برای فیلتر سنی در نظر گرفته شد.

پرکردن خاک داخل ظروف طوری باید صورت می‌گرفت که تراکم خاک داخل آن‌ها تقریباً به تراکم خاک در شرایط طبیعی نزدیک‌تر باشد تا بتوان از نتایج به‌دست‌آمده در شرایط آزمایشگاهی را برای شرایط صحرائی استفاده نمود. با آماده شدن خاک‌های مربوط به هر لایه و در نظر گرفتن وزن مخصوص ظاهری طبیعی، خاک مرطوب مربوط به هر لایه را در داخل ظرف ریخته و با چکش مخصوصی متراکم گردید. به همین ترتیب لایه‌های بعدی، پشت سر هم داخل ظرف ریخته شده و متراکم می‌شد تا به لایه آخر یا لایه پنجم برسد. با توجه به اینکه این آزمایش برای سه نوع بافت خاک و در سه تکرار صورت گرفت در مجموع ۹ عدد ظرف با شرایط مذکور از خاک پر شد. برای اشباع نمودن خاک داخل ظروف هرکدام از آن‌ها را در داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار داده و کم‌کم به داخل کیسه‌ها (مایین جدار ظرف و کیسه‌ها) آب اضافه کرده تا خاک داخل ظروف به‌تدریج از پایین به بالا اشباع شوند. بعداً اینکه خاک داخل کلیه ظروف به حالت اشباع رسیدند آن‌ها را از داخل کیسه‌های پلاستیک خارج ساخته تا آب مازاد زهکشی شود شکل ۲ ظروف پرشده از خاک به همراه حسگر نصب‌شده و نمونه‌ای از نحوه اشباع آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲- ظروف پرشده از خاک به همراه حسگر نصب‌شده و نحوه اشباع خاک داخل آن‌ها

نصب حسگر دفنی در خاک

چند ساعت بعد از زهکشی ظروف خاک حسگرها از سمت نوک میله‌ها به‌طور عمودی به آرامی در داخل خاک و در مرکز آن‌ها فروبرده شد. در این مرحله با توجه به اینکه خاک حالت گلی داشته حسگر

به راحتی قابل نصب می‌باشد شکل ۳ نمونه‌ای از نصب حسگر دفنی و نحوه قرار گرفتن در داخل خاک را نشان می‌دهد. بدین ترتیب کلیه حسگرها در ظروف خاک متناظر با خود که قبلاً شماره‌گذاری و مشخص گردیده بود نصب گردیدند.



شکل ۳- مراحل نصب حسگر دفنی در خاک

توزین خاک داخل ظرف

جهت مقایسه رطوبت حجمی قرائت شده توسط دستگاه TDR از روش رطوبت وزنی استفاده شد که در مقایسه با سایر روش‌ها از دقت قابل قبولی برخوردار است. بدین ترتیب بعد از هر قرائت رطوبت حجمی با دستگاه TDR، بلافاصله رطوبت وزنی خاک داخل ظروف از روش وزنی تعیین و سپس با معلوم بودن وزن مخصوص ظاهری خاک، رطوبت حجمی واقعی محاسبه گردید تا با مقدار رطوبت قرائت شده از روش TDR مورد مقایسه قرار گیرد. شکل ۴ اندازه‌گیری همزمان رطوبت به روش TDR و وزنی را نشان می‌دهد.

قرائت رطوبت حجمی و ثابت دی‌الکتریک خاک

بعد از اینکه کلیه حسگرها در داخل خاک ظروف نصب شدند روز بعد قرائت رطوبت حجمی و ثابت دی‌الکتریک خاک‌ها توسط دستگاه TDR شروع گردید. برای این منظور ابتدا دستگاه TDR را روشن نموده و آن را برحسب نوع حسگر و طول میله‌های آن تنظیم می‌نمایند. بعد از تنظیمات لازم می‌توان با وصل کردن فیش BNC حسگر به سوکت واقع بر روی دستگاه TDR، رطوبت حجمی و ثابت دی‌الکتریک ستون خاک واقع در ظروف را قرائت نمود. قرائت داده‌ها ۲۵۰ روز طول کشید که در این فاصله زمانی ۵۳ بار قرائت صورت گرفت.



شکل ۴- اندازه‌گیری همزمان رطوبت خاک به روش TDR و وزنی

نتایج و بحث

مشخصات خاک

جهت تعیین مشخصات خاک‌ها، قسمتی از نمونه‌ها به آزمایشگاه ارسال و برخی از خصوصیات آن‌ها مشخص گردید که نتایج آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

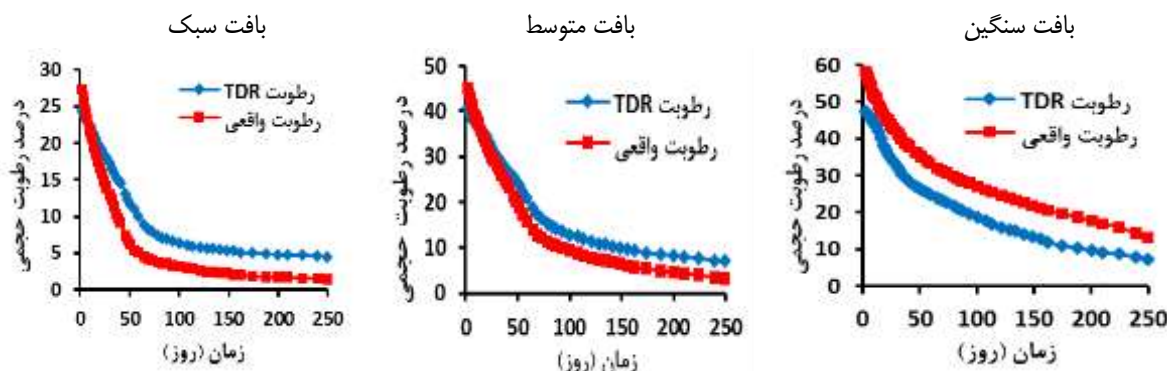
جدول ۱- برخی از مشخصات نمونه‌های خاک

بافت	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	PWP (%)	FC (%)	ρ_s (gr/cm ³)	ρ_b (gr/cm ³)	کربن آلی (%) O.C	PH	EC (dS/m)	عمق (cm)	مختصات محل (UTM)		محل
												X	Y	
Loam	۱۸	۳۸	۴۴	۱۵/۶۴	۲۴/۰۵	۲/۵۴	۱/۳	۰/۶۴	۷/۹۴	۳/۰۶	۰-۳۰	۵۹۱۷۰۲	۴۲۰۳۷۰۳	مزرعه مرکز
Clay loam	۲۸	۳۴	۳۸	۳۱/۶۳	۴۰/۷۸	۲/۲۱	۰/۹۵	۱/۰۶	۷/۴۷	۱/۰۶	۰-۳۰	۶۴۹۸۰۵	۴۳۱۳۴۸۹	جنگل ارسباران
sand	۸	۷	۸۵	۴/۵۴	۷/۲۲	۲/۷۲	۱/۶	۰/۶۶	۸/۱	۰/۶۶	۰-۳۰	۵۳۰۰۸۴	۴۲۴۵۰۹۴	ایستگاه تسوج

روش TDR صورت گرفت در طول آزمایش ۵۳ بار قرائت از مرحله اشباع تا هواخشک به عمل آمد که این تعداد قرائت ۲۵۰ روز طول کشید. سپس رطوبت‌های اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR و روش واقعی که به روش وزنی و همزمان با روش TDR صورت گرفته بود مطابق شکل ۵ نسب به زمان ترسیم شد.

مقایسه رطوبت اندازه‌گیری شده خاک به روش TDR با رطوبت واقعی

برای این منظور رطوبت بافت‌های مختلف خاک در سه تکرار با دستگاه TDR نسبت به زمان اندازه‌گیری شده و برای مقایسه آن با مقدار واقعی از روش وزنی استفاده شد که این عمل به‌طور همزمان با



شکل ۵- مقایسه رطوبت واقعی و اندازه‌گیری شده به روش TDR در بافت‌های مختلف خاک نسبت به زمان

از تحقیقات کشاورز و همکاران (۱۳۹۲) و سی و سه مرده و همکاران (۲۰۱۴) این موضوع را تأیید می‌نمایند. علت آن را می‌توان به وجود ذرات رس و سطح ویژه آن در خاک نسبت داد که دارای سطح ویژه زیاد می‌باشد. سطح ذرات رس به دلیل دارا بودن بار منفی زیاد دارای قدرت جذب قوی برای مولکول‌های آب بوده و مولکول‌های آبی که مستقیماً به سطح ذرات رس می‌چسبند از حالت قطبی بودن خارج

با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌شود که در هر سه نوع بافت خاک، رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR نسبت به رطوبت واقعی متفاوت می‌باشد؛ بنابراین بایستی عمل واسنجی بر روی این روش صورت گیرد. در بافت سنگین مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR کمتر از مقدار واقعی بوده در صورتی که برای خاک‌های با بافت متوسط و سبک این قضیه برعکس می‌باشد. نتایج بدست آمده

برای اندازه‌گیری رطوبت واقعی از روش وزنی استفاده شد و با ضرب آن در وزن مخصوص ظاهری خاک، رطوبت حجمی خاک بدست آمد. جهت اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک به روش TDR از دستگاه TDR استفاده گردید. اندازه‌گیری رطوبت واقعی و روش TDR به‌طور همزمان صورت می‌گرفت تا بتوان آن‌ها را نسبت به یکدیگر مقایسه نمود. عمل قرائت داده‌ها در سه تکرار برای ۳ نوع بافت خاک در سه سطح شوری صورت گرفت. سپس داده‌های قرائت‌شده وارد نرم‌افزار اکسل (Excel) گردید و از تکرارها متوسط‌گیری شد بعد مدل واسنجی مناسب بین رطوبت واقعی و اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR به‌همراه برخی از شاخص‌های ارزیابی آماری (دقت و صحت) برای هرکدام از خاک‌ها در شوری‌های مختلف مطابق جدول ۲ ارائه گردید.

شده که آب پیوندی به آن اطلاق می‌شود بنابراین هرچه ذرات رس در خاک بیشتر باشد آب پیوندی نیز در خاک افزایش می‌یابد و باعث کاهش ثابت دی‌الکتریک خاک می‌شود زیرا که ثابت دی‌الکتریک آب پیوندی ۳/۲ و آب آزاد را که دارای مولکول‌های قطبی است در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد دارای ثابت دی‌الکتریک ۸۰ می‌باشد به همین دلیل دستگاه TDR رطوبت حجمی را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد و حسگرهای رطوبتی دستگاه بایستی نسبت به رطوبت واقعی واسنجی شوند. در خاک با بافت متوسط اختلاف رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR و واقعی نسبت به خاک‌های با بافت سنگین و سبک کمتر می‌باشد و با قبول ۲ تا ۳ درصد خطا می‌توان بدون واسنجی اقدام به اندازه‌گیری رطوبت با این روش نمود (Siosemarth et al., 2014).

رابطه بین رطوبت واقعی و رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR

جدول ۲- رابطه واسنجی بین رطوبت واقعی و اندازه‌گیری شده به روش TDR برای خاک‌های مختلف

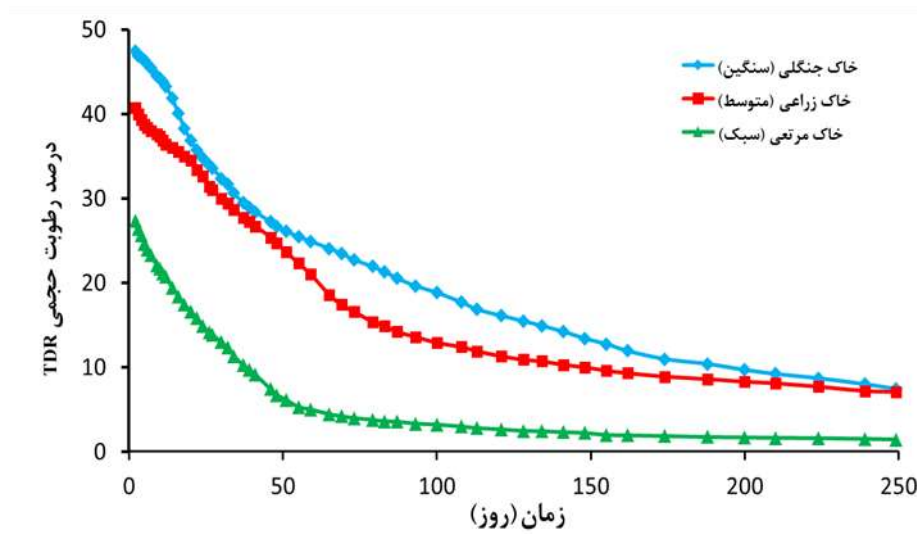
مدل واسنجی	مقایسه نتایج مدل با مقدار واقعی			مقایسه نتایج TDR با مقدار واقعی			نوع خاک
	R ²	RE	RMSE	R ²	RE	RMSE	
$\theta_v = 1.0277\theta_{TDR} + 7.7618$	۱	۰/۰۱۸	۰/۸۱	۰/۹۹۶	۲/۹۲	۸/۵۶	جنگلی (سنگین)
$\theta_v = 0.0018\theta_{TDR}^3 - 0.0279\theta_{TDR}^2 + 0.7564\theta_{TDR} - 1.3203$	۱	۰/۰۲۷	۰/۳۲	۰/۹۹۸۸	۱/۸	۳/۵۲	مرتعی (سبک)
$\theta_v = 0.0006\theta_{TDR}^3 - 0.0243\theta_{TDR}^2 + 1.2649\theta_{TDR} - 4.4438$	۱	۰/۰۳۴	۱/۰۳	۰/۹۹۸۵	۱/۷۸	۳/۵۶	زراعی (متوسط)

θ_v : درصد رطوبت حجمی واقعی، θ_{TDR} : درصد رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش TDR

برای این منظور رطوبت بافت‌های مختلف خاک نسبت به زمان با دستگاه TDR اندازه‌گیری شد و نمودارهای مربوطه مطابق شکل ۶ با نرم‌افزار اکسل (Excel) ترسیم گردید. بر اساس شکل ۶ ملاحظه می‌شود که با سنگین‌تر شدن بافت خاک مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR بیشتر است. علت آن ناشی از قدرت جذب بالای آب توسط ذرات رس می‌باشد.

با توجه به شاخص‌های ارزیابی آماری محاسبه‌شده در جدول ۲ ملاحظه می‌شود که دقت رطوبت حاصل مدل‌ها به‌مراتب بیشتر از رطوبت حاصل از روش TDR نسبت به مقدار رطوبت واقعی می‌باشد.

تأثیر بافت خاک بر میزان رطوبت اندازه‌گیری شده به روش TDR



شکل ۶- تغییرات رطوبت اندازه‌گیری شده در بافت‌های مختلف خاک به روش TDR نسبت به زمان

رابطه بین ثابت دی‌الکتریک و رطوبت واقعی خاک

بر اساس برخی از خصوصیات فیزیکی خاک می‌توان پارامتری را تحت عنوان ثابت دی‌الکتریک یا گذردهی الکتریکی نسبی محاسبه و برحسب آن توسط منحنی‌های تبدیل که در نرم‌افزار داخلی دستگاه TDR گنجانده شده است درصد رطوبت حجمی خاک را محاسبه نمود. مدل‌های متعددی توسط محققین در این خصوص ارائه گردیده است که هرکدام از آن‌ها با توجه به بافت خاک و دیگر شرایط خاک از جمله میزان ماده آلی، شوری، تراکم، مینرالوژی و درجه حرارت با یکدیگر متفاوت است. در این پژوهش نیز برای ارائه مدل‌های مناسب، ثابت دی‌الکتریک بافت‌های مختلف خاک در طول مدت آزمایش (از حالت اشباع تا هوا خشک) در فواصل زمانی مختلف توسط دستگاه TDR اندازه‌گیری شده و رطوبت‌های حجمی واقعی متناظر با آن‌ها به روش وزنی (با ضرب در وزن مخصوص ظاهری) تعیین گردیدند سپس

داده‌ها وارد برنامه اکسل شده و روش‌های رگرسیون نمایی، خطی، لگاریتمی، چندجمله‌ای و توانی بر روی نقاط پیاده گردید. از میان روش‌های مذکور روش چندجمله‌ای درجه سه از برازش خوبی نسبت به نقاط برخوردار بودند که معادلات به‌دست‌آمده از تحقیقات تاپ و همکاران (۱۹۸۰)، کورتیس (۲۰۰۱) و کایزر و همکاران (۲۰۱۰) و چندین محقق دیگر، نیز از نوع چندجمله‌ای درجه سه می‌باشند. جدول ۳ معادلات واسنجی را برای بافت‌های مختلف خاک نشان می‌دهد. معادلات واسنجی ارائه‌شده در جدول مذکور که برای محاسبه درصد رطوبت حجمی واقعی بکار می‌روند تابعی از ثابت دی‌الکتریک خاک می‌باشند یعنی با معلوم بودن ثابت دی‌الکتریک خاک می‌توان رطوبت واقعی آن را محاسبه نمود (Cortis, 2001).

جدول ۳- معادلات واسنجی بین رطوبت واقعی و ثابت دی‌الکتریک برای خاک‌های مختلف

معادله واسنجی	R ²	نوع خاک
$\theta_v = 0.0041k^3 - 0.2399k^2 + 5.6705k - 8.459$	۰/۹۹۷۹	جنگلی (سنگین)
$\theta_v = -0.0033k^3 + 0.2663k^2 - 0.7468k + 1.1624$	۰/۹۹۸۹	مرتعی (سبک)
$\theta_v = 0.0031k^3 - 0.1513k^2 + 4.024k - 12.847$	۰/۹۹۹۱	زراعی (متوسط)

θ_v : درصد رطوبت حجمی واقعی، k: ثابت دی‌الکتریک خاک (اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR)

رهیافت ترویجی

نتایج حاصل این پژوهش نشان می‌دهد که در خاک با بافت سنگین رطوبت به‌دست‌آمده از روش TDR بیشتر از مقدار واقعی و در بافت‌های سبک و متوسط این قضیه برعکس می‌باشد منتها در بافت متوسط تفاوت رطوبت بدست آمده از روش TDR با مقدار واقعی کمتر و نزدیک به آن است بنابراین در خاک‌های با بافت متوسط مانند خاک‌های لومی می‌توان رطوبت حجمی خاک را در صورت قبول درصد کمی خطا بدون نیا به واسنجی به روش TDR تعیین نمود. در این خصوص تعدادی معادله یا مدل واسنجی ارائه گردید که توسط آن‌ها رطوبت خاک را می‌توان با دقت بالاتری تعیین نمود. این معادلات یا مدل‌ها تابعی از رطوبت و یا ثابت دی‌الکتریک خاک است که به روش TDR در عرض کمتر از یک دقیقه قابل اندازه‌گیری می‌باشد؛ بنابراین با معلوم بودن رطوبت و یا ثابت دی‌الکتریک خاک که به روش مذکور قابل اندازه‌گیری می‌باشد با استفاده از معادلات یا مدل‌های واسنجی بلافاصله می‌توان به مقدار رطوبت واقعی خاک دست‌یافت و کمبود رطوبتی خاک را که برای رسیدن به اهداف مختلف از جمله مقدار آب آبیاری، در همان لحظه به دست آورد.

تشکر و قدردانی

از بخش تحقیقات فنی مهندسی کشاورزی و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی که در فراهم نمودن امکانات و فضای آزمایشگاهی در این پژوهش همکاری نمودند تقدیر و تشکر به‌عمل می‌آید.

مراجع

روغنی، م.، امام‌جمعه، س. ر.، و کمالی، ک. ۱۳۹۰. امکان‌سنجی ساخت حسگرهای تدفینی دستگاه TDR و ارزیابی عملکرد آن‌ها در اندازه‌گیری رطوبت خاک. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال پنجم، شماره ۱۷.

کشاورز، م.، ناظمی، ا. م.، صدرالدینی، س. ع. ا.، نیشابوری، م. ر.، ناصری، ا.، و فاخری‌فرد، ا. ۱۳۹۲. تأثیر بافت خاک بر دقت روش انعکاس سنجی حوزه زمانی در برآورد رطوبت خاک. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. سال سوم. شماره ۱۱.

Liaghat, A.M., Bonnel, R.B., and Broughton, S. 1998. Effect of Clay Content and Bulk Electrical Conductivity on TDR Measurement of Water Content in the Soil. Journal of ICIID, 47: 37-44.

کمالی، ک.، و مهدیان، م. ح. ۱۳۸۸. بررسی ساخت حساسه‌های تدفینی دستگاه رطوبت‌سنج TDR و ارزیابی عملکرد آن‌ها در برآورد رطوبت خاک. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز. جلد ۱. شماره ۲.

نامدار خجسته، د.، شرفا، م.، اسکندری، ذ.، و فاضلی سنگانی، م. ۱۳۹۰. تأثیر میزان رس و شوری خاک در رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با انعکاس سنج زمانی. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). الف. جلد ۲۵. شماره ۲.

مزیدی، م.، معروف پور، ع. ۱۳۹۲. بررسی اثر ماده آلی خاک بر روی کالیبراسیون TDR برای اندازه‌گیری رطوبت. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ب. جلد ۲۷. شماره ۴.

Curtis, J.O. 2001. Moisture effects on the dielectric properties of soils. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1): 125-128.

Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Hallikainen, M.T., and El-Rayes M.A. 1985. Microwave dielectric behaviour of wet soil. Part II: Dielectric mixing models. Institution of Electrical and Electronic Engineers Transactions on Geosciexce and Remote Sensing, 23: 35-46.

Gong, Y.Q., and sun, Z. 2003. The effects of soil bulk density, clay content and temperature on soil water content measurement using time-domain reflectometry. Hydrol.Process, 17: 3601-3614.

Hilhorst, M.A., Dirksen, C., Kampers, F.W.H., and Feddes, R.A., 2001. Dielectric relaxation of bound water versus soil matric pressure. Soil Sci. Soc. Am. J., 65: 311-314.

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

Kaiser, D.R.D., Reinert, J., Reichert J.M., and Minella, J.P.G. 2010. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. R. Bras. Ci. Solo., 34: 649-658.

Lane, P.N.J., Mackenzie, D.H., Nadler, A.D. 2001. Field and laboratory calibration and test of TDR and capacitance techniques for indirect measurement of soil water content. Australian Journal of Soil Research, 39: 1371-1386

Ledieu, L., De Ridder, P., De Clerck, P., and Dautrebande, S. 1986. A Method of Measuring Soil Moisture by Time-Domain Reflectometry. J. Hydrology, 88: 319-328.

Nadler, W., 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: 938-943.

- Oleszczuk, R., Brandyk, T., Gnatowski, T., and Szatyłowicz, J., 2004. Calibration of TDR for moisture determination in peat deposits. *International Agrophysics Journal*, 18:145-151.
- Or, D., and Wraith, J.M. 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: a physical model. *Resources Research*, 35: 371-833.
- Roth, C., Malicki, M., and Plagge, R. 1992. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Journal of Soil Science*, 43: 1-13.
- Roth, K., Schulin, R., Fluhler, H., and Attinger, W. 1990. Calibration of TDR for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resour Res.*, 26(10): 2267-2273.
- Shang, J.Q. 1994. Quantitative determination of Potential Distribution in Stern-Gouy Double layer Model. *Can. Geotech. J.*, 31: 624-636.
- Siosemarth, M., Byzedi, M., and Siosemarth, A. 2014. The studding of Accuracy of Soil Moisture Measurement by Time Domain Reflectometry (TDR). *Journal of Applied Science and Agriculture*, 9(2): 519-523.
- Souza, C.F., Matsura, E.E., Testezlaf, R. 2001. Application of the TDR Technique Tropical Soil, Second International Symosium Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Application. 273-280.
- Sun, Z.J., Young, G.D., McFarlane, R., Chambers, B.M. 2000. The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time domain- reflectometry in sandy soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 80(1): 13-22.
- Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil watercontent: Measurment in coaxial transmission lines. *Water Resources Research Journal*, 16: 574-582.
- Zhaoqiang, J., Xiaona L., Tusheng, R., and Chunsheng, H. 2010. Measuring Soil Water Content With Time Domain Reflectometry: An Improved Calibration Considering Soil Bulk Density. *Soil Science*, 175(10): 469-473.

Calibration of Buriable Soil Moisture Sensors Made Inside the Country for TDR System in Different Soil Textures

D. Niknezhad^{1*}, A. Kalantari² and K. Kammali³

Abstract

Measuring soil moisture by time domain reflectometry (TDR) is an indirect, safe and fast method, which is on the basis of the dielectric constant of the soil. Applying TDR has an adequate result for most soil conditions, but for atypical conditions such as salinity and high organic matter soils associated with the error. The solution is to perform high-precision calibration to be all situations to estimate the soil moisture. The aim of this study was calibrated burial sensor used in order to increase the accuracy of TDR soil moisture of different textures, which is simulated in the IRAN. In this study, three types of soil texture viz. heavy, medium and light soil were tested in the order of forest lands, crops and rangeland at east Azarbaijan, IRAN. The soil moisture variations were measured by TDR and gravitational methods. Several linear and nonlinear models were developed to model of soil moisture as a function of dielectric constant and measured moisture. Then, a few calibrated appropriate linear and polynomial equations were presented for different soil texture that calculate the actual moisture based on the dielectric constant and the measured moisture measured by the TDR method.

Keywords: Buriable sensors, Dielectric constant, Equation, Soil moisture, Time domain reflectometry.

¹. Instructor, Research and Education Center for Agricultural and Natural Resources of East Azarbaijan, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Iran. (* Corresponding Author, niknezhad2005@yahoo.com)

². Assistant professor, Research and Education Center for Agricultural and Natural Resources of East Azarbaijan, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Iran.

³. Instructor, Research and Education Center for Agricultural and Natural Resources of Gilan, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Iran.

Received: 22 Feb 2018

Accepted: 25 June 2018