بررسی ساخت حساسه‌های تدفینی دستگاه رطوبت‌سنج TDR و ارزیابی عمل‌کرد آن‌ها در برآورد رطوبت خاک

کورش کمالی[1]، کارشناس ارشد، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
محمدحسین مهدیان، دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۰۹/۲۳ **پذیرش مقاله:** ۱۳۸۸/۰۳/۱۶

چکیده

رطوبت خاک یکی از عوامل مهم و تعیین کننده رفتار خاک در طرح‌های آب و خاک و منابع طبیعی است. اصولاً روش‌های متداول اندازه‌گیری رطوبت خاک بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر هستند. در حال حاضر با استفاده از دستگاه بازتاب زمانی امواج TDR[2]، می‌توان رطوبت خاک را در مدت کوتاهی اندازه‌گیری نمود. اما گرانی حس‌گرهای[3] تدفینی دستگاه فوق، استفاده از آن‌را در سطح گسترده از نظر اقتصادی توجیه‌ناپذیر می‌سازد. در بیش‌تر موارد برای تعیین رطوبت خاک با استفاده از دستگاه TDR، از حس‌گرهای تماسی[4] استفاده می‌شود. در این دستگاه رطوبت قرائت شده معرف میانگین رطوبت از سطح خاک تا عمق معادل طول حساسه است. لیکن به‌دلیل این‌که در عرصه‌های منابع طبیعی، بافت اکثر خاک‌ها سبک بوده و دارای قلوه سنگ هستند، امکان نصب آن‌ها مقدور نبوده و نتایج به‌دست آمده از این دسته از حس‌گرها دقیق نیست. لذا بهتر است از حس‌گرهای تدفینی[5] استفاده شود. به‌علت گران بودن حس‌گرهای تدفینی استاندارد، طراحی و ساخت آن‌ها در دستور کار قرار گرفت. به‌این منظور با آزمون‌های مکرر، با انتخاب کابل، فیش BNC مناسب و تجزیه فلزکاری میله‌های میانی و کناری و انتخاب فولادهای مناسب همچنین افزایش دقت در مراحل ساخت، حس‌گرهای تدفینی ساخته شدند. در این مرحله حس‌گرهای دست‌ساز در طیف وسیعی از دامنه رطوبتی در خاکی با بافت لوم سیلتی، مشابه حس‌گر استاندارد عمل نمودند. سپس به‌منظور واسنجی حس‌گرهای دست‌ساز در مقایسه با حس‌گر استاندارد، سه طبقه بافت خاک شامل بافت سبک (لوم شنی)، متوسط (لوم) و سنگین (رسی سیلتی) انتخاب شد و با اعمال رطوبت‌های مختلف (از حد اشباع تا هوا خشک)، مقادیر رطوبت حجمی خاک در سه پنجره برداشت[6] و در مدت سه ماه قرائت شد. برقراری روابط همبستگی نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد بین نتایج حس‌گرهای ساخته شده و نتایج حس گر استاندارد وجود نداشته و بین آن‌ها درجه همبستگی بالایی وجود دارد. بالاترین درجه همبستگی در پنجره برداشت ۱۰ نانوثانیه و در بافت لوم شنی مشاهده شد. روابط مربوط در بافت‌های لوم شنی، لوم و رسی سیلتی در پنجره برداشت ۱۰ نانوثانیه به‌ترتیب $y = 1.1013x - 0.3661$، $y = 0.9761x + 1.0193$ و $y = 0.9961x - 0.0933$ تعیین شد. مقایسه ضرایب همبستگی و معادلات موجود بین میانگین درصد رطوبت حجمی حس‌گرهای دست‌ساز و درصد رطوبت حجمی واقعی نیز نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین آن‌ها بوده است.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، حس‌گر تماسی، حس‌گر دست‌ساز، طراحی و ساخت، همبستگی

[1] Kamali_kourosh@yahoo.com
[2] Time Domain Reflectometry
[3] Sensors
[4] Connector Waveguid
[5] Buriable Waveguid
[6] Capture Window

مقدمه

در میان روش‌های متداول اندازه‌گیری رطوبت خاک از جمله روش وزنی، تانسیومتری، مقاومت با استفاده از مکعب‌های گچی و روش پخش نوترون، استفاده از فن‌آوری دستگاه بازتاب زمانی امواج، روشی نسبتاً جدید، ساده و کاربردی در اندازه‌گیری رطوبت خاک، مطالعه جذب آب به‌وسیله ریشه گیاه و سایر مطالعات آب و خاک است. تکرارپذیری، سرعت و دقت نسبتاً زیاد، اندازه‌گیری رطوبت در اعماق مختلف خاک، بی‌ضرر بودن کاربرد آن در مقایسه با روش نوترون‌متر و امکان اندازه‌گیری شوری خاک از جمله مهم‌ترین مزایای کاربرد این روش است.

اولین بار Davis و Chudobiak (۱۹۷۵)، Davis و Annan (۱۹۷۷) استفاده از TDR را برای اندازه‌گیری رطوبت در موارد زمین شناسی گزارش نموده اند. اندازه‌گیری نسبتاً ساده و قابل اعتماد ثابت دی‌الکتریک[1] در محدوده فرکانس یک مگاهرتز تا یک گیگاهرتز راه حل عملی و مؤثری در اندازه‌گیری مقدار آب خاک عنوان شده است (Topp و همکاران،۱۹۸۲).

اساس روش TDR تغییرات ملموس در ثابت دی الکتریک خاک بر اثر تغییر میزان آب موجود در آن است. اصول کار دستگاه نیز مبتنی بر اندازه‌گیری مدت زمانی است که طول می‌کشد تا یک پالس الکترومغناطیسی از یک موجبر یا حس‌گر که در زمین وارد شده است، عبور نماید. این دستگاه علائمی را ایجاد و آن را در طول میله‌های موازی منتشر می‌نماید. علائم از میان توده خاک واقع در بین میله‌های حس‌گر عبور کرده و از انتهای میله‌ها به گیرندهٔ دستگاه برگشت می‌کند. دستگاه فاصله زمانی بین ارسال و برگشت پالس را اندازه‌گیری می‌کند. به ازای طول ثابت میله، فاصلهٔ زمانی بین رفت و برگشت علائم با سرعت انتشار علائم درخاک نسبت عکس دارد. از طرف دیگر، سرعت انتشار علائم نیز با مقدار ثابت دی‌الکتریک خاک که تابعی از رطوبت است، نسبت عکس دارد.

در رابطه با ساخت حس‌گرها و ارزیابی عمل‌کرد آن‌ها در برآورد رطوبت خاک تحقیقات محدودی در داخل کشور انجام شده است. مطالعات انجام شده به‌وسیله ستوده‌نیا و همکاران (۱۳۸۰) در رابطه با مقایسه لوله‌های PVC و TECHANAT در رطوبت‌سنجی به‌وسیله دستگاه TDR با هدف جای‌گزینی آن‌ها و تاثیر این جای‌گزینی بر میزان دقت رطوبت سنجی به‌وسیله دستگاه TDR، حاکی از همبستگی بین داده‌های حاصل از دو روش بوده است. نتایج اندازه‌گیری رطوبت خاک در لوله‌های TECHANAT و PVC و نمونه‌گیری حجمی دست نخورده برای دو نوع خاک با بافت لوم رسی سیلتی و لوم سیلتی، هر کدام با دو تکرار در عمق‌های ۱۳۰ و ۹۰ سانتی‌متر در لایه‌های متوالی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر، ضریب تعیین را برای لوله‌های TECHANAT برابر ۰/۸ و برای لوله‌های PVC برابر ۰/۷۵ نشان داد.

پاک‌پرور و منصوری (۱۳۸۲) همبستگی ویژگی‌های رطوبتی برخی از خاک‌های عرصه پخش سیلاب را با اندازه‌گیری به‌وسیله دستگاه TDR بررسی نموده‌اند. در این تحقیق آزمایشگاهی، برای آگاهی از نحوه مطلوب کار با دستگاه TDR برای اندازه‌گیری طولانی مدت رطوبت خاک در اعماق مختلف درخاک‌هایی با بافت متفاوت، سه نمونه از خاک‌های یکی از نوارهای رسوب‌گیر شبکهٔ پخش سیلاب گربایگان فسا از عمق‌های ۱۰-۰، ۱۰۳-۱۰ و ۱۵۰-۱۰۳ سانتی‌متر برداشت و در ظروف بزرگ پلاستیکی به ارتفاع ۹۰ و قطر ۷۰ سانتی‌متر ریخته شد. بافت خاک‌ها به‌ترتیب لوم، لوم شنی، شنی لومی سنگ‌ریزه‌دار بود. خاک‌ها در ابتدا به حد اشباع خیس شده و در محیطی با دمای معمولی آزمایشگاه، درحالی که امکان زهکش از زیر نداشت، رها شد. آزمایش در سه مرحله انجام شد. درمرحلهٔ نخست در طول سه ماه به‌صورت روزانه، ضمن اندازه‌گیری رطوبت وزنی سطح خاک، قرائت دستگاه TDR برای حس‌گر تدفینی برای هشت منحنی موجود در دستگاه و دو پنجرهٔ دریافت ۱۰ و ۲۰ نانوثانیه انجام شد. همچنین برای حس‌گر تماسی دو برداشت برای ۱۰ و ۲۰ نانوثانیه، مجموعاً ۱۸ مورد برای هر نمونه خاک ثبت شد. سپس معادله واسنجی ثابت دی‌الکتریک دستگاه برای خاک‌های مورد بررسی به‌دست آمد.

نتایج بررسی معادلات برازش یافته بین رطوبت واقعی با رطوبت قرائت شده به‌وسیله دستگاه نشان داد که بهترین همبستگی مربوط به منحنی FUN از پنجره دریافت ۲۰ برای خاک اول، منحنی BCT از پنجره دریافت ۲۰ و ۱۰

[1] Dielectric constant

برای خاک دوم و منحنی SUN از پنجره دریافت ۲۰ برای خاک سوم است. همچنین انواع منحنی بر داده‌ها برازش یافت که بهترین همبستگی با استفاده از معادله چند جمله‌ای با درجه سه به‌دست آمد. بررسی نتایج تغییرات قرائت دستگاه نسبت به تغییر تراکم خاک نیز نشان داد که بیش‌ترین تغییر در نمونه خاک اول رخ داده که بافت آن لوم است و کم‌ترین تغییر مربوط به نمونه سوم که بافت آن شنی‌لومی است، است. کم‌تر شدن تراکم خاک و کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک در خاک اول تا حد کم‌تر از ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب خطا ایجاد می‌کند.

اسکندری و بهمن‌پور (۱۳۸۲) ضمن بررسی روند توسعه کاربرد TDR برای تعیین شوری، به ارائه نتایج اندازه‌گیری شوری بر روی هشت نمونه آب و چهار نمونه خاک با شوری مختلف با روش TDR و مقایسه نتایج حاصله با روش متداول هدایت سنج الکتریکی (EC متر) پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که اندازه‌گیری هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه TDR و روش متداول هدایت‌سنج الکتریکی برای نمونه‌های آب از همبستگی بالایی برخوردار است ($R2=0.96$). اندازه‌گیری شوری در خاک‌هایی با هدایت الکتریکی بیش از پنج دسی‌زیمنس بر متر به‌وسیله دستگاه TDR به‌دلیل افت زیاد موج بازگشتی، باعث خطا در ارزیابی ضریب دی‌الکتریک گردیده و به‌دنبال آن درصد حجمی رطوبت اندازه‌گیری شده با خطا مواجه می‌شود.

به‌منظور اندازه‌گیری مقدار رطوبت حجمی در نزدیک سطح خاک، Inoue و همکاران (۲۰۰۱)، با ساخت دو مدل حس‌گر چاقویی[1] و سورتمه‌ای شکل[2] مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به‌وسیله آن‌ها را با حس‌گر استاندارد دستگاه TDR مورد مقایسه قرار دادند. نتایج حاصله نشان داد که همبستگی بسیار خوبی بین درصد رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به‌وسیله حس‌گر استاندارد (θTc) و حس‌گر چاقویی شکل (θTk) وجود دارد. همچنین مقایسه بین رطوبت حجمی حس‌گر استاندارد (θTc) و حس‌گر سورتمه‌ای شکل (θTs) نشان از وجود همبستگی خوب بین آن‌ها داشت.

به‌منظور شناسایی دقت حس‌گرهای چندسطحی در ستون خاک آزمایشگاه و خاک سنگ‌ریزه‌ای در مزرعه با کاربست دو روش، حس‌گرهای TDR واسنجی شدند (Frueh و Hopmans، 1977) . به‌این منظور دو روش برای واسنجی حس‌گرها طرح‌ریزی شد. نتایج این تحقیق نشان داد خطای ابزاری برآورد رطوبت حجمی به‌وسیله دستگاه TDR کم‌تر از ۰/۰۱ است. در هر دو مورد اندازه‌گیری آزمایشگاهی و مزرعه‌ای اگر حس‌گرها به‌طور مجزا واسنجی شوند، نتایج مناسبی به‌دست خواهد آمد. همچنین اگر حس‌گرهای TDR مربوط به هر عمق به‌طور مجزا واسنجی شوند و با نتایج حاصله از نوترون متر مورد مقایسه قرار گیرند، خطای استاندارد ۰/۰۲ و یا کم‌تر و ضریب همبستگی بین ۰/۶۳ تا ۰/۹۲ متغیر است.

به‌منظور ارزیابی دقت حس‌گرهای چندسطحی دستگاه TDR درشرایط مزرعه‌ای تحقیقی به‌وسیله Serrarens و همکاران (۲۰۰۰) انجام شد. آن‌ها هشت حس‌گر TDR را در کرت‌های کوچک که در آن‌ها لوبیا و ذرت خوشه‌ای کاشته شده بود، نصب کردند. جمع‌آوری و ثبت داده‌ها به‌صورت خودکار انجام شد و به‌منظور واسنجی حس‌گرها، رطوبت خاک به‌وسیله دستگاه نوترون‌متر نیز اندازه‌گیری می‌شد. نتایج این تحقیق نشان داد، اگر هر حس‌گر به‌طور مجزا واسنجی شود، تقریباً خطای اندازه‌گیری بین ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱۵ خواهد بود. چنانچه چند حس‌گر بر اساس عمل‌کرد یک منحنی واسنجی شوند، خطای اندازه‌گیری دو برابر می‌شود. همچنین فشردگی خاک و تماس حس‌گر با خاک در دقت اندازه‌گیری به‌وسیله دستگاه TDR مؤثر بوده، به‌ویژه وقتی که فقط یک حس‌گر برای تولید منحنی واسنجی مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به مطالب فوق، به‌علت گران بودن حس‌گر استاندارد و نیاز به تعداد زیادی از آن در طرح‌های تحقیقاتی، لزوم جای‌گزینی حس‌گرهای استاندارد با حس‌گرهای داخلی با قیمت ارزان‌تر ضروری به‌نظر رسید. تعیین دقت حس‌گر تدفینی ساخته شده و اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از آن در خاک‌هایی با بافت مختلف، بررسی راه‌حل‌های

[1] Knife-shaped probe
[2] Sled-shaped surface probe

عملی به‌منظور افزایش دقت در کاربرد حس‌گرهای تدفینی و دست‌یابی به ویژگی‌های حس‌گر و شیوه ساخت آن با استاندارد قابل قبول از جمله اهداف اجرای این پژوهش بوده است.

مواد و روش‌ها

دستگاه TDR مورد استفاده با نشان TRASE، مدل 6050X1، ساخت شرکت Soil Moisture و دارای حس‌گر تدفینی سه شاخه‌ای با طول ۲۰ سانتی‌متر است. این دستگاه دارای سه پنجره دریافت ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانوثانیه است و هشت منحنی تبدیل ثابت دی الکتریک به رطوبت حجمی به‌وسیله سازنده برای آن تعریف شده است که مبتنی بر نتایج تحقیقات بر روی خاک‌های مختلف بوده و با نام‌های SUN، SCT، CUN، CCT، BUN، BCT، FUN و FCT در دستگاه ذخیره شده است. اجرای این طرح در دو بخش طراحی و ساخت حس‌گر همچنین کالیبره نمودن آن انجام شده است که در ادامه به‌صورت جداگانه اشاره می‌شود.

طراحی و ساخت حس‌گر: در این مرحله ابتدا مبادرت به جداسازی قطعات یک نمونه حس‌گر استاندارد شد. با جداسازی قطعه نگه‌دارنده، چگونگی ارتباط میله‌های کناری و میانی مشخص، همچنین نحوه اتصال کابل به میله‌ها معین شد. فولاد استفاده شده به‌منظور شناسایی نوع ترکیبات و آلیاژ آن به آزمایشگاه متالورژی رازی ارسال شد. با توجه به نتایج تجزیه و تعیین استاندارد میله‌ها، مبادرت به خرید فولاد شد. همچنین کابل Coaxial، فیش BNC و سایر ملحقات مربوطه پس از بررسی و آزمون انواع مختلفی از هریک و انتخاب مناسب‌ترین نوع آن‌ها خریداری شد. کار ساخت حس‌گر نیز با دقت قابل قبول صورت گرفت، به‌طوری‌که در طیف وسیعی از دامنه رطوبتی در خاکی با بافت لوم سیلتی مشابه حس‌گر استاندارد عمل نمودند.

واسنجی حس‌گرهای ساخته شده در مقایسه با حس‌گر استاندارد: برای واسنجی حس‌گرها مراحل کار به شرح زیر انجام شده است.

ابتدا سه نمونه خاک نسبتاً هم‌گن با بافت‌های سبک، متوسط و سنگین از خاک‌های یکی از نوارهای رسوب‌گیر شبکهٔ پخش سیلاب چنداب پاکدشت تهیه شد. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و دانه‌بندی شدند. بررسی نمودارهای دانه‌بندی خاک نشان داد که نمونه‌های خاک مورد استفاده در سه گروه بافتی سبک، متوسط و سنگین قرار دارند. گروه بافتی سبک دارای ۷۰ درصد شن، ۱۸ درصد سیلت و ۱۲ درصد رس با وزن مخصوص ظاهری ۱/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. گروه بافتی متوسط نیز متشکل از ۳۴ درصد شن، ۴۸ درصد سیلت و ۱۸ درصد رس و وزن مخصوص ظاهری ۱/۴۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. درصد شن، سیلت و رس نیز در گروه بافتی سنگین به‌ترتیب ۱۰، ۴۶ و ۴۴ درصد با وزن مخصوص ظاهری ۱/۳۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. این خاک‌ها به‌ترتیب در طبقات بافتی لوم شنی، لوم و رسی سیلتی قرار گرفتند.

سپس به‌منظور ایجاد ماده آزمایشی یک‌نواخت و افزایش دقت در انجام طرح، ظروف مخصوص مکعب مستطیل به ابعاد ۱۰۰×۳۰×۴۰ سانتی‌متر از جنس پلکسی‌گلاس طراحی و ساخته شد. به‌منظور اعمال رطوبت‌های مختلف (از حد اشباع[1] تا هوا خشک[2]) در ابتدا نمونه‌های خاک خوب اشباع شدند. به‌این منظور در کف ظروف مکعبی شکل سوراخ‌هایی تعبیه شد تا نمونه‌های خاک به‌خوبی از زیر اشباع شوند. همچنین به‌منظور ایجاد محیط یک‌نواخت اشباع، لایه نازک گراول در کف ظروف ریخته شد. به‌منظور قرارگیری مناسب حس‌گرها و تهیه نمونه‌های خاک به‌منظور تعیین رطوبت وزنی نیز، محل‌هایی در دو طرف جدار ظرف ایجاد شد (شکل ۱). سپس نمونه‌های خاک به ظروف ساخته شده منتقل و به‌طور یک‌نواخت و با تراکم یک‌سان آماده‌سازی و مبادرت به کارگذاری حس‌گرها شد. شکل ۲ کرت‌های آماده شده به‌منظور ثبت داده‌های رطوبت حجمی و موقعیت قرارگیری حس‌گرها را نشان می‌دهد. پس از کارگذاری حس‌گرها، روزانه قرائت دستگاه شامل زمان اندازه‌گیری، ثابت دی‌الکتریک و رطوبت محاسبه شده دستگاه تا رسیدن به

[1] Saturation
[2] Air dry

رطوبت پایین (نزدیک نقطه پژمردگی دائم) اندازه‌گیری و یادداشت شد. به‌منظور افزایش دقت آزمایش نیز در هر کرت از سه حس‌گر ساخته شده و یک حس‌گر استاندارد استفاده شد.

شکل ۱- استفاده از لایه نازک گراول در کف ظرف به‌منظور ایجاد محیط اشباع، سوراخ‌های تعبیه شده در کف و دو طرف جدار ظرف به‌منظور اشباع نمونه‌های خاک از پایین، قرار دادن حس‌گرها و نمونه‌برداری وزنی خاک

شکل ۲- کرت‌های آماده شده برای ثبت داده‌های رطوبت حجمی

نمونه خاک از ژرفای معادل طول هر یک از حس‌گرها به‌گونه‌ای برداشت شد که متوسطی از محیط مورد اندازه‌گیری باشد. مقدار رطوبت نمونه‌ها در آزمایشگاه با روش توزین قبل و بعد از خشک شدن در آون با حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. این کار به مدت ۹۰ روز ادامه یافت و تعـداد اندازه‌گیری‌ها به بیش از ۴۰ مورد رسید. در هر بار اندازه‌گیری، اعداد قرائت شده برای پنجره دریافت‌های ۲۰،۱۰ و۴۰ نانوثانیه و هر یک در منحنی تبدیل BUN یادداشت شد. وزن مخصوص ظاهری هر یک از نمونه‌های خاک، بعد از پایان این مرحله هر یک با سه تکرار اندازه‌گیری شد تا برای تبدیل رطوبت وزنی به رطوبت حجمی مورد استفاده قرار گیرد. سپس با برقراری رابطه بین رطوبت وزنی خاک و رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به‌وسیله حس‌گرها، از طریق برقراری روابط همبستگی دو متغیره مبادرت به مقایسه آن‌ها و یافتن معادلات لازم شد.

نتایج و بحث

نتایج اجرای طرح در دو بخش طراحی و ساخت حس‌گر و واسنجی آن‌ها ارائه شده است.

طراحی و ساخت حس‌گر: به‌منظور بررسی اتصالات درون نگه‌دارنده با ایجاد برش عرضی در یک نمونه حس‌گر استاندارد، کار جداسازی میله‌ها و کابل‌ها انجام شد. بررسی وضعیت میله‌های کناری و میانی حس‌گر استاندارد نشان

داد که میله‌های کناری از میله میانی به‌وسیله عایق از یک‌دیگر جدا شده‌اند. همچنین مغزی کابل Coaxial در وسط میله میانی قرار داشته و پوشش از طریق یک لوله مسی به میله‌های کناری ارتباط دارد و مجموعه اتصالات فوق‌الذکر در یک نگه‌دارنده با کمک رزین جای دارند (شکل۳). توجه به این موضوع و اتصالات درون نگه‌دارنده در ساخت حس‌گر حائز اهمیت بود. جنس کابل Coaxial مورد استفاده از نوع Belden-YR-40862 تشخیص داده شد. ولی به‌دلیل عدم وجود نوع مناسب آن در بازار، از کابلی با مدل Maruni و با مقاومت ۵۰ اهم استفاده شد. اتصال کابل به فیش BNC و میله میانی با خرید دستگاه پرس میسر شد.

با توجه به اهمیت جنس فولاد در ایجاد مقاومت در مسیر عبور جریان و همچنین ایجاد مقاومت ازلحاظ فلزکاری در برابر خوردگی، تغییر جنس و در نتیجه مقاومت تشعشعی، تجزیه آن‌ها ضروری به‌نظر می‌رسید. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با توجه به ترکیب شیمیایی میله‌های میانی و کناری حس‌گر تدفینی، آلیاژ مورد استفاده در تولید آن‌ها با استاندارد آمریکایی به‌ترتیب دارای کد ۳۰۳ و ۳۰۴ هستند.

شکل ۳- نمایی از قطعات حس‌گر تدفینی، قطعه نگه‌دارنده شیوه اتصال میله‌ها با یک‌دیگر و کابل مربوطه

واسنجی حس‌گرها: نتایج واسنجی و معادلات موجود بین میانگین درصد رطوبت حجمی حس‌گرهای دست‌ساز و درصد رطوبت حجمی حس‌گر استاندارد در سه گروه بافتی و در پنجره برداشت‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانوثانیه در جدول ۱ آمده است. همچنین جدول ۲ ضرایب همبستگی و معادلات موجود بین میانگین درصد رطوبت حجمی حس‌گرهای دست‌ساز و درصد رطوبت حجمی واقعی (روش رطوبت وزنی)[1] در سه گروه بافتی و در پنجره برداشت‌های ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانوثانیه را نشان می‌دهد.

بررسی جداول ۱ و ۲ و مقایسه ضرایب تعیین بین میانگین درصد رطوبت حجمی حس‌گرهای دست‌ساز و حس‌گر استاندارد نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری بین نتایج حس‌گرهای ساخته شده و حس‌گر استاندارد وجود نداشته و از درجه همبستگی بالایی برخوردار است. به‌طور کلی درجه همبستگی در بافت‌های لوم شنی، لوم و رسی سیلتی در پنجره برداشت ۱۰ نانوثانیه به‌ترتیب ۰/۹۹۹۱، ۰/۹۹۸۱ و ۰/۹۸۷۵ به‌دست آمد. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بافت لوم شنی به‌دلیل توزیع اندازه ذرات[1] یک‌نواخت‌تر از بالاترین درجه همبستگی بین گروه‌های بافتی برخوردار است. اگرچه ضریب یک‌نواختی خاک‌های رسی بیش‌تر از خاک‌های شنی است، ولی خاک‌های رسی دامنه بیش‌تری از توزیع اندازه ذرات را دارند، و خاک‌های شنی دارای توزیع اندازه ذرات یکسان‌تری هستند.

[1] Gravimetric method
[1] Particle size distribution

جدول ۱- ضرایب همبستگی و معادلات موجود بین میانگین درصد رطوبت حجمی حس‌گرهای دست ساز (x) و حس‌گر استاندارد (y)

بافت خاک	۱۰ نانوثانیه	۲۰ نانوثانیه	۴۰ نانوثانیه
لوم شنی	$y = 1.1013x - 0.3661$ $R^2 = 0.9991$ S.E.=0.2812 Sig.= 0.000	$y = 1.1097x - 0.2167$ $R^2 = 0.9986$ S.E.= 0.3506 Sig.= 0.000	$y = 0.82x + 10.422$ $R^2 = 0.9691$ S.E.= 2.1403 Sig.= 0.000
لوم	$y = 0.9761x + 1.0193$ $R^2 = 0.9981$ S.E.= 0.4950 Sig.= 0.000	$y = 0.9744x + 1.3109$ $R^2 = 0.9979$ S.E.= 0.5072 Sig.= 0.000	$y = 0.7119x + 11.109$ $R^2 = 0.9784$ S.E.= 1.6872 Sig.= 0.000
رسی سیلتی	$y = 0.9961x - 0.0933$ $R^2 = 0.9875$ S.E.= 1.0927 Sig.= 0.000	$y = 0.9853x + 0.8819$ $R^2 = 0.9852$ S.E.= 1.1754 Sig.= 0.000	$y = 0.7778x + 11.72$ $R^2 = 0.9591$ S.E.= 3.1964 Sig.= 0.000

جدول ۲- معادلات موجود بین میانگین درصد رطوبت حجمی حس‌گرهای دست‌ساز (x) و درصد رطوبت حجمی واقعی (y)

بافت خاک	۱۰ نانوثانیه	۲۰ نانوثانیه	۴۰ نانوثانیه
لوم شنی	$y = 0.8861x - 4.9063$ $R^2 = 0.9604$ S.E.= 1.7209 Sig.= 0.000	$y = 0.8716x - 5.1702$ $R^2 = 0.9545$ S.E.= 1.8308 Sig.= 0.000	$y = 0.6802x + 1.7953$ R2 = 0.9453 S.E.= 2.0203 Sig.= 0.000
لوم	$y = 0.8341x - 2.1651$ $R^2 = 0.9343$ S.E.= 2.8213 Sig.= 0.000	$y = 0.8408x - 2.6288$ $R^2 = 0.9341$ S.E.= 2.8342 Sig.= 0.000	$y = 0.6376x + 4.0968$ R2 = 0.9215 S.E.= 3.0928 Sig.= 0.000
رسی سیلتی	$y = 0.9706x - 7.4182$ $R^2 = 0.9557$ S.E.= 2.5977 Sig.= 0.000	$y = 0.9969x - 8.4659$ $R^2 = 0.9555$ S.E.= 2.5647 Sig.= 0.000	$y = 0.6575x - 5.4169$ $R^2 = 0.8838$ S.E.= 2.9412 Sig.= 0.000

به‌طور کلی در خاک‌های ریز بافت، ابعاد و اشکال ذرات تغییرات زیادی داشته و در ضمن، خاک غالباً دارای خاک‌دانه است. بنابراین در این‌گونه خاک‌ها فضای کل منافذ شامل فضای بین خاک‌دانه‌ها و فضای بین ذرات است. توزیع اندازه ذرات یکی از مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی خاک است که در رفتار رطوبتی خاک نقش مهمی دارد. این عامل در واقع تعیین کننده وضعیت دقیق تخلخل (شکل خلل و فرج، توزیع و اندازه خلل و فرج و پیوستگی آن‌ها) است. اصولاً وضعیت رطوبتی خاک نیز تابعی از قابلیت آب در خاک است. پتانسیل آب در خاک نیز تابع توزیع اندازه خلل و فرج و آن هم تابعی از اندازه ذرات خاک است.

در این تحقیق مشخص شد که بهترین پنجره برداشت برای حس‌گرهای تدفینی با طول میله ۲۰ سانتی‌متر، پنجره برداشت ۱۰ نانوثانیه است. این موضوع به‌عنوان یک نکته قابل توجه در کاربرد حس‌گرهای تدفینی باید مورد توجه قرار گیرد. به‌طوری‌که بررسی داده‌های رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در پنجره برداشت ۴۰ نانوثانیه نشان داد که در این پنجره برداشت در تمامی گروه‌های بافتی خطای استاندارد بالا و نتایج حاصله غیر قابل اطمینان است. به‌عنوان نمونه در طبقه بافتی لوم شنی، درصد رطوبت حجمی کم‌تر از ۱۵ درصد به‌وسیله حس‌گرهای دست‌ساز در این پنجره برداشت قابل قرائت نبود.

بررسی جداول تجزیه واریانس و مقایسه ضرایب همبستگی بین میانگین درصد رطوبت حجمی حس‌گرهای دست‌ساز و درصد رطوبت حجمی واقعی نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد بین آن‌ها وجود

نداشته و از درجه همبستگی نزدیکی برخوردار است. درجه همبستگی در بافت‌های لوم شنی، لوم و رس سیلتی در پنجره برداشت ۱۰ نانوثانیه به‌ترتیب ۰/۹۶۰۴، ۰/۹۳۴۳ و ۰/۹۵۵۷ به‌دست آمد که بالاترین درجه همبستگی در بافت لوم شنی مشاهده شد. اما بررسی خطای استاندارد و انحراف از معیار در روابط بسط داده شده نشان می‌دهد که برخلاف همبستگی بالا، بین داده‌های مبتنی بر اندازه‌گیری به‌وسیله دستگاه TDR و داده‌های رطوبت واقعی (رطوبت وزنی) تفاوت وجود دارد. این تفاوت احتمالاً ناشی از اختلاف در برخی خصوصیات خاک است. این قبیل اختلافات ممکن است به‌دلیل وجود نسبت درصد ذرات ماسه‌ای (درصد سنگ‌ریزه) باشد. همچنین نحوه شبیه‌سازی ستون خاک، عدم وجود فواصل زمانی مساوی بین قرائت‌ها، عدم یکنواختی بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری و وضعیت تراکم خاک، روش نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری رطوبت وزنی، اثر ورود هوا و نقش آن در کشش سطحی آب همگی ممکن است از جمله منابع خطا باشند. بنابراین برای تعیین داده‌های مناسب‌تر در این نوع خاک‌ها، واسنجی دقیق‌تری لازم است. موضوع اختلاف بین داده‌های رطوبت حجمی واقعی و داده‌های حاصل از حس‌گرهای ساخته شده به‌وسیله Inoue و همکاران (۲۰۰۱) نیز گزارش شده است. به‌طوری که حتی ممکن است یک معادله جهانی هم از چنین خطاهای قابل ملاحظه‌ای مصون نباشد (Zegelin و همکاران، ۱۹۹۲ به‌نقل ازInoue و همکاران، ۲۰۰۱). مطابق نتایج این پژوهش، روابط همبستگی بین میانگین درصد رطوبت حجمی حس‌گرهای دست‌ساز و حس‌گر استاندارد، برای واسنجی حس‌گرهای ساخته شده توصیه می‌شود.

نکته قابل توجه در این تحقیق آن است که دقت اندازه‌گیری به‌وسیله دستگاه TDR با جاگذاری صحیح حس‌گرها افزایش می‌یابد. به‌ویژه تماس فیزیکی بین حس‌گرهای TDR و خاک اطراف و همچنین فشردگی خاک نقش مؤثری در نتایج اندازه‌گیری‌ها دارد. تماس ناقص حس‌گر با خاک و وجود هوا در اطراف آن دقت قرائت TDR را کاهش می‌دهد. به‌عبارت دیگر حساسیت اندازه‌گیری بیش از آن‌که به بافت خاک و تراکم مربوط باشد، به نحوه صحیح کارگذاری حس‌گرها و دانستن رقم دقیق وزن مخصوص ظاهری ارتباط دارد.

منابع مورد استفاده

۱. اسکندری، ذ. و م. بهمن‌پور. ۱۳۸۲. تعیین هدایت الکتریکی آب و خاک با استفاده از TDR. مجموعه مقالات سومین همایش آبخوان‌داری. صفحه۱۴-۲.

۲. پاک‌پرور، م. و ز. منصوری. ۱۳۸۲. بررسی همبستگی ویژگی‌های رطوبتی برخی از خاک‌های عرصه پخش سیلاب با اندازه‌گیری‌های دستگاه TDR. مجموعه مقالات سومین همایش آبخوانداری، صفحه ۲۶-۱۵.

۳. ستوده‌نیا، ع.، ی.م. میرلطیفی، م.ح. مهدیان و ج. رزاقی. ۱۳۸۰. مقایسه لوله‌های PVC و TECHANAT در رطوبت‌سنجی توسط دستگاه TDR. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۲، شماره ۷، صفحه۸۷-۷۹.

4. Davis, J.L. and A. P. Annan. 1977. Electromagnetic detection of soil moisture progress report I. Can. J. Remote Sensing, 376-386.
5. Davis, J.L. and W. J. Chudobiak. 1975. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. Paper 75-1A75-79, Geol. Survey of Canada, Energy, Mines and Resources of Canada, Ottawa.
6. Frueh, W.T. and J.W. Hopmans. 1977. Soil moisture calibration of a TDR multilevel probe in gravely soils. Soil Science, 162:554-565.
7. Inoue, Y., T. Watanabe and K. Kitamura. 2001. Prototype time-domain reflectometry probes for measurement of moisture content near the soil surface for applications to "on-the-move" measurements. Agriculture Water Management, 50:41-52.
8. Serrarens, D., J.L. MacIntyre, J.W. Hopmans and L.H. Bassoi. 2000. Soil moisture calibration of TDR multilevel probes, Scientia. Agricola, 57(2):349-357.
9. Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan. 1982. Electromagnetic determination of soil water content using TDR II. Evaluation of installation and configuration of Parallel transmission lines. Soil Science Society of American Journal, 46:678-684.

Investigating the manufacture of TDR burials waveguides and evaluation of their application in soil moisture estimation

Kourosh Kamali[1], MSc, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran
Mohammad Hossein Mahdian, Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Iran

Received: 13 December 2008 **Accepted**: 05 June 2009

Abstract

Knowledge of the moisture content is important for making decision for seeding, irrigation, soil management and other soil, water and natural resource projects. Conventional methods such as gravimetric or neutronmetry methods for measuring soil moisture are time consuming and sensitive application, respectively. The Time Domain Reflectometry is commonly known as TDR, is a new method for determining volumetric water content. The probes of TDR are two types, connector and burial types. Use of connector probe for soil moisture measurement in the coarse sand and in the natural resource lands is disappointed, so use of burial probes are advised. But those are expensive. Therefore those must be manufactured. Manufactory and Calibration of burial probes is the main objectives of this study. After choosing cable testers, BNC port and suitable stainless steel for two parallel metallic rods, the burial probes were manufactured, and then those calibrated. To calibrate manufactured type of probes, measurements were made using the TRACE system (soil moisture equipment corp.) with the conventional rod-type probes (or standard type) and manufactured types of probes in three difference types of soil texture classes, these were sandy loam, loam and silty clay, respectively. The bulk densities for sandy loam, loam and silty clay texture were, 1.66, 1.47, 1.30 gr/cm^3, respectively. There was a good linear correlation between the two estimates. The highest relation determination was observed in sandy loam texture in 10 ns capture windows. Calibration equations for sandy loam, loam and silty clay texture were $y = 1.1013x - 0.3661$, $y = 0.9761x + 1.0193$ and $y = 0.9961x - 0.0933$, respectively.

Key words: Correlation, Designing and manufacturing, Manufactured probe, Reflectometry probe, Soil texture

[1] kamali_kourosh@yahoo.com