ارزیابی عملکرد حسگرهای تدفینی ساخته شده برای دستگاه رطوبت سنج TDR

کورش کمالی و محمد حسین مهدیان

به ترتیب کارشناس ارشد و استادیار پژوهشی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری

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 فناوری دستگاه بازتاب زمانی امواج، روشی نسبتاً جدید، ساده و کاربردی در اندازه گیری رطوبت خاک است. تکرارپذیری، سرعت و دقت نسبتاً زیاد، اندازه گیری رطوبت در اعماق مختلف خاک، بی ضرر بودن کاربرد آن در مقایسه با روش نوترون متر و امکان اندازه‌گیری شوری خاک از جمله مهمترین مزایای کاربرد این روش است.

اساس روش TDR تغییرات ملموس در ثابت دی‌الکتریک خاک بر اثر تغییر میزان آب موجود در آن است. اصول کار دستگاه نیز مبتنی بر اندازه گیری 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 در خاک 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 توسط ستوده نیا و همکاران (۱۳۸۰) در رابطه با مقایسه لوله های PVC و TECHANAT در رطوبت‌سنجی توسط دستگاه TDR با هدف جایگزینی آنها و تأثیر این جایگزینی بر میزان دقت رطوبت سنجی توسط 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 عمق های 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.

پاک پرور (۱۳۸۲) همبستگی ویژگی‌های رطوبتی برخی از خاک‌های عرصه پخش سیلاب را با اندازه گیری توسط دستگاه TDR بررسی نموده است.

در این تحقیق، نتایج بررسی معادلات برازش یافته بین رطوبت واقعی با رطوبت قرائت شده بوسیله دستگاه نشان داد که بهترین همبستگی مربوط به منحنی FUN از پنجره دریافت ۲۰ برای خاک اول، منحنیBCT از پنجره دریافت ۲۰ و ۱۰ برای خاک دوم و منحنی SUN از پنجره دریافت ۲۰ برای خاک سوم می‌باشد. همچنین انواع منحنی‌ها برداده‌ها برازش یافت که بهترین همبستگی با استفاده از معادله چند جمله‌ای با مرتبه ۳ بدست 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، می باشد. کمتر شدن تراکم خاک و کاهش وزن مخصوص ظاهری در خاک اول تا حد کمتر از ۱/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب خطا ایجاد می‌کند.

Inoue و همکاران [۲۰۰۱] به منظور اندازه‌گیری مقدار رطوبت حجمی در نزدیک سطح خاک، با ساخت دو مدل حسگر چاقویی (Knife-Shaped Probe) و سورتمه ای شکل (Sled-Shaped Surface Probe)، مقادیر رطوبت حجمی اندازه گیری شده به وسیله 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 (θ_{Tc}) و حسگر چاقویی شکل (θ_{Tk}) وجود دارد (۱).

$$\theta_{Tk} = -12.300+1.060\ \theta_{Tc},\quad R^2=0.989,\quad RMSE=1.630 \qquad (۱)$$

همچنین مقایسه بین رطوبت حجمی حسگر استاندارد (θ_{Tc}) و حسگر سورتمه ای شکل (θ_{Ts}) نشان از وجود همبستگی خوب بین آنها داشت (۲).

$$\theta_{Ts} = 1.620 + 1.082\ \theta_{Tc} \qquad (۲)$$

$$R^2=0.962\ (n=20),\quad RMSE=3.110$$

Frueh و Hopmans [۱۹۹۷] به منظور شناسایی دقت حسگرهای چندسطحی در ستون خاک آزمایشگاه و خاک سنگریزه‌ای در مزرعه با کاربست دو روش، حسگرهای TDR را واسنجی نمودند. بدین منظور دو روش برای واسنجی حسگرها طرح‌ریزی شد. نتایج این تحقیق نشان داد خطای ابزاری برآورد رطوبت حجمی توسط دستگاه TDR کمتر از ۰/۰۱ است. در هر دو مورد اندازه‌گیری آزمایشگاهی و

مزرعه‌ای اگر حسگرها به طور مجزا واسنجی شوند، نتایج مناسبی به‌دست خواهد آمد. همچنین اگر حسگرهای TDR مربوط به هر عمق به طور 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.

با توجه به مطالب فوق، به علت 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 به نظر رسید. تعیین دقت حسگر تدفینی ساخته شده و اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از آن در خاک‌هایی با بافت مختلف، بررسی راه حل‌های عملی به منظور افزایش دقت در کاربرد حسگرهای تدفینی و دستیابی به ویژگیهای حسگر و شیوه ساخت آن با استاندارد قابل قبول از جمله اهداف ارائه این مقاله می باشد.

مواد و روش‌ها

دستگاه TDR مورد استفاده با مارک TRASE، مدل 6050X1، ساخت شرکت Soil Moisture و دارای حسگر تدفینی ۳ شاخه ای با طول ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. این دستگاه دارای سه پنجره دریافت ۱۰، ۲۰ و ۴۰ نانوثانیه بوده و ۸ منحنی تبدیل ثابت دی الکتریک به رطوبت حجمی توسط 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.

در مرحله طراحی و ساخت حسگر، 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 میله ها معین گردید. استیل استفاده شده به منظور شناسایی نوع ترکیبات و آلیاژ آن به آزمایشگاه متالورژی رازی ارسال شد. با توجه به نتایج آنالیز و تعیین استاندارد میله‌ها، مبادرت به خرید استیل گردید. 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.

برای واسنجی حسگرهای ساخته شده در مقایسه با حسگر استاندارد مراحل کار به شرح زیر انجام شد. 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 نمونه ها 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 لای و ۱۲ درصد رس با وزن مخصوص ظاهری ۱/۶۶ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشند. گروه بافتی متوسط متشکل از ۳۴ درصد شن، ۴۸ درصد لای و ۱۸ درصد رس و وزن مخصوص ظاهری ۱/۴۷ گرم بر سانتیمتر مکعب بود. درصد شن، لای و رس نیز در گروه بافتی سنگین به ترتیب ۱۰، ۴۶ و ۴۴ درصد با وزن مخصوص ظاهری ۱/۳۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. این خاک‌ها به ترتیب در کلاسهای بافتی لوم شنی، لوم و رس لایی قرار گرفتند.

به منظور ایجاد ماده آزمایشی یکنواخت و افزایش دقت در انجام طرح، ظروف مخصوص مکعب مستطیل به ابعاد ۱۰۰ × ۳۰ × ۴۰ سانتی‌متر از جنس پلکسی گلاس طراحی و ساخته شد. به منظور اعمال رطوبت‌های مختلف (از حد اشباع تا هوا خشک) در ابتدا نمونه‌های خاک خوب اشباع شدند. بدین منظور در کف ظروف مکعبی شکل سوراخ‌هایی تعبیه شد تا نمونه‌های خاک به خوبی از زیر اشباع شوند. همچنین به منظور ایجاد محیط یکنواخت اشباع، لایه نازک گراول در کف ظروف ریخته شد. به منظور قرارگیری مناسب حسگرها و تهیه نمونه های خاک جهت تعیین رطوبت وزنی نیز، محل‌هایی در دو طرف جدار ظرف ایجاد گردید. سپس نمونه های خاک به ظروف ساخته شده منتقل و به طور یکنواخت و با تراکم یکسان آماده سازی و مبادرت به کارگذاری حسگرها شد. پس از کارگذاری حسگرها، روزانه قرائت دستگاه شامل زمان اندازه‌گیری، ثابت دی‌الکتریک و رطوبت محاسبه شده دستگاه تا رسیدن به رطوبت پایین (نزدیک نقطه پژمردگی) اندازه گیری و یادداشت شد. به منظور افزایش دقت آزمایش نیز در هر پلات از سه حسگر ساخته شده و یک حسگر استاندارد استفاده گردید.

نمونه خاک از ژرفای معادل طول هر یک از حسگرها به گونه‌ای 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 تعداد اندازه‌گیری‌ها به بیش از ۴۰ مورد رسید. در هر بار اندازه‌گیری، اعداد قرائت شده برای پنجره دریافت‌های ۱۰،۲۰ و۴۰ نانوثانیه و هر یک در منحنی تبدیل BUN یادداشت گردید. وزن مخصوص ظاهری هر یک از نمونه‌های خاک، بعد از پایان این مرحله هر یک با ۳ تکرار اندازه‌گیری شد تا برای تبدیل رطوبت وزنی به رطوبت حجمی مورد استفاده قرار گیرد. با برقراری رابطه بین رطوبت وزنی خاک و رطوبت حجمی اندازه گیری شده به وسیله 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 می‌گردد. در بخش طراحی و ساخت حسگر، به منظور 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 توسط عایق از یکدیگر جدا شده‌اند. همچنین مغزی کابل Coaxial در وسط میله میانی قرار داشته و شیلد از طریق یک لوله مسی به میله‌های کناری ارتباط دارد و مجموعه اتصالات فوق‌الذکر در یک نگهدارنده با کمک رزین جای دارند. 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 به دلیل 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 گردید.

با توجه به اهمیت جنس استیل در ایجاد مقاومت در مسیر عبور جریان و همچنین ایجاد مقاومت متالورژیکی در برابر خوردگی، تغییر جنس و در نتیجه مقاومت تشعشعی، آنالیز آن‌ها ضروری به نظر 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 به ترتیب دارای کد ۳۰۳ و ۳۰۴ می‌باشند.

بررسی جداول تجزیه واریانس و مقایسه ضرایب همبستگی و معادلات موجود بین میانگین درصد رطوبت حجمی حسگرهای دست‌ساز (x) و حسگر استاندارد (y) نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری بین نتایج حسگرهای ساخته شده و حسگر استاندارد وجود نداشته و از درجه همبستگی بالایی برخوردار می‌باشد. روابط مربوط در بافتهای لوم شنی، لوم و رس سیلتی در پنجره برداشت ۱۰ نانوثانیه به ترتیب $y = 1.1013x - 0.3661$، $y = 0.9761x + 1.0193$ و $y = 0.9961x - 0.0933$ با درجه همبستگی ۰/۹۹۹۱، ۰/۹۹۸۱ و ۰/۹۸۷۵ می‌باشد.

بررسی نتایج آزمایشگاهی نیز نشان داد که بافت لوم شنی به دلیل توزیع اندازه ذرات 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 یکسان تری می‌باشند.

به طور 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 پارامتر در واقع تعیین کننده وضعیت دقیق تخلخل (شکل خلل و فرج، توزیع و اندازه خلل و فرج و پیوستگی آنها) می‌باشد. اصولاً وضعیت رطوبتی خاک نیز تابعی از پتانسیل 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 می‌باشد. این موضوع به عنوان یک نکته قابل توجه در کاربرد حسگرهای تدفینی باید مورد توجه قرار گیرد. به طوری که بررسی داده‌های رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در پنجره برداشت ۴۰ نانوثانیه نشان داد که در این پنجره برداشت در تمامی گروه های بافتی خطای استاندارد بالا و نتایج حاصله غیر قابل اطمینان است. به عنوان نمونه در کلاس بافتی لوم شنی، درصد رطوبت حجمی کمتر از ۱۵ درصد توسط حسگرهای دست ساز در این پنجره برداشت قابل قرائت نبود.

بررسی جداول تجزیه واریانس و مقایسه ضرایب همبستگی میانگین درصد رطوبت حجمی حسگرهای دست ساز (x) و درصد رطوبت حجمی واقعی (y) نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری بین آنها وجود نداشته و از درجه همبستگی نزدیکی برخوردار می‌باشد. درجه همبستگی در بافتهای لوم شنی، لوم و رس سیلتی در پنجره برداشت ۱۰ نانوثانیه به ترتیب 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 به رغم همبستگی بالا، بین داده‌های مبتنی بر اندازه‌گیری توسط 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 به دلیل 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 نمونه برداری جهت اندازه‌گیری رطوبت وزنی، اثر ورود هوا و نقش آن در کشش سطحی آب همگی ممکن است از جمله منابع خطا باشند. بنابراین برای تعیین داده های مناسبتر در این نوع خاک‌ها، واسنجی دقیقتری لازم است. موضوع اختلاف بین داده های رطوبت حجمی واقعی و داده های حاصل از حسگرهای ساخته شده توسط Inoue و همکاران (۲۰۰۱) نیز گزارش شده است. به طوری که حتی ممکن است یک فرمول جهانی هم از چنین خطاهای قابل ملاحظه‌ای مصون نباشد (Inoue و همکاران، ۲۰۰۱ به نقل از Zegelin و همکاران، ۱۹۹۲). مطابق نتایج این تحقیق، روابط همبستگی بین میانگین درصد رطوبت حجمی حسگرهای دست ساز و حسگر استاندارد، برای واسنجی حسگرهای ساخته شده توصیه می‌شود.

نکته قابل توجه در این تحقیق آن است که دقت اندازه گیری به وسیله دستگاه TDR با جاگذاری صحیح حسگرها افزایش می‌یابد. به ویژه 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 می دهد. به عبارت 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- پاک‌پرور، م. و ز. منصوری. ۱۳۸۲. بررسی همبستگی ویژگیهای رطوبتی برخی ازخاک‌های عرصه پخش سیلاب با اندازه‌گیری‌های دستگاه TDR. مجموعه مقالات سومین همایش آبخوانداری.ص: ۲۶-۱۵.

۲- ستوده نیا، ع.، ی.م. میرلطفی، م.ح. مهدیان و ج. رزاقی. ۱۳۸۰. مقایسه لوله های PVC و TECHANAT در رطوبت سنجی

توسط دستگاه TDR. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۲، شماره ۷،ص۸۷-۷۹.

3- Davis, J. L. and A. P. Annan. 1977. Electromagnetic detection of soil moisture progress report I. Can. J. Remote Sensing, 376-86.

4- 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.

5- Frueh, W.T. and J.W. Hopmans. 1977. Soil moisture calibration of a TDR multilevel probe in gravely soils. Soil Science, 162: 554-565.

6- Inoue, Y., T. Watanabe, and K. Kitamura. 2001. Prototype time-damain reflectometry probes for measurement of moisture content near the soil surface for applications to " on-the-move" measurements. Agriculture Water Management, 50: 41-52.

7- 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 Sci. Soc. Am. J., 46: 678-684.