



مقایسه‌ی روش‌های انعکاس‌سنجی زمانی و ظرفیت‌سنجی با روش پراکندگی نوترون در اندازه‌گیری رطوبت خاک

علی خراسانی*، میراحمد موسوی شلمانی، نجات پیرولی بیرانوند

پژوهشکده تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۴۹۸-۳۱۴۸۵، کرج - ایران

چکیده: از مشخصات مطلوب روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک، دقت، صحت، سرعت، سهولت و توانایی سنجش در عمق آن می‌باشد. به منظور مقایسه‌ی روش‌های انعکاس‌سنجی زمانی و ظرفیت‌سنجی با روش پراکندگی نوترون در اندازه‌گیری رطوبت خاک، آزمایش مزرعه‌ای در قالب طرح بلوک کامل تصادفی، به صورت کرت دو بار خرد شده، در سه تکرار (مجموعاً دوازده کرت)، در مزرعه‌ی تحقیقاتی مرکز آزمایشگاه‌های آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در سایبرزدورف اتریش بر روی گیاه گوجه فرنگی به اجرا درآمد. دستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک شامل نوترون‌سنج، انعکاس‌سنج زمانی و ظرفیت‌سنج‌های Diviner2000 و EnviroScan به عنوان عامل اصلی، سیستم‌های مختلف آبیاری شامل آبیاری شیاری و قطره‌ای (عامل فرعی اول) و اعماق مختلف خاک شامل ۲۰، ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر (عامل فرعی دوم) بودند. نتایج نشان داد که رطوبت اندازه‌گیری شده با نوترون‌سنج و انعکاس‌سنج زمانی در دو تیمار آبیاری شیاری و قطره‌ای یکسان است. این در حالی است که اختلاف معنی‌داری در میزان رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه‌های Diviner2000 و EnviroScan ملاحظه شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که نوترون‌سنج یک وسیله‌ی قابل قبول و مورد اعتماد با فن‌آوری جدید، و دقت ± 2 میلی‌متر در ۴۵۰ میلی‌متر آب خاک تا عمق ۱٫۵ متری و روش پراکندگی نوترون، کاربردی‌ترین روش برای اندازه‌گیری پروفیل رطوبتی خاک و برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد. انعکاس‌سنج زمانی در اغلب خاک‌های معدنی بدون نیاز به کالیبراسیون با دقت $\pm 0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ عملکرد خوبی داشته و هم‌زمان رطوبت و هدایت الکتریکی خاک را اندازه‌گیری می‌کند. در شرایط بالا، دستگاه‌های Diviner2000 و EnviroScan چندان مناسب نبودند که این امر می‌تواند به دلایلی مانند مقادیر اندازه‌گیری بیش‌تر رطوبت خاک، خطای بالای اندازه‌گیری این دو دستگاه و هم‌چنین حساسیت آن‌ها به درز و شکاف خاک و تغییرات کم رطوبت خاک در مقایسه با دو دستگاه نوترون‌سنج و انعکاس‌سنج زمانی باشد.

کلید واژه‌ها: آبیاری، رطوبت خاک، نوترون‌سنج، انعکاس‌سنج زمانی، Diviner2000 EnviroScan

Comparison of Time Domain Reflectometry, Capacitance Methods and Neutron Scattering in Soil Moisture Measurements

A. Khorasani*, M.A. Mousavi Shalmani, N. Piervali Bieranvand

Agriculture Medicine and Industrial Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 31485-498, Karaj – Iran

Abstract: An accurate, precise, fast and ease as well as the ability for measurements in depth are the characteristics that are desirable in measuring soil moisture methods. To compare methods (time domain reflectometry and capacitance) with neutron scattering for soil water monitoring, an experiment was carried out in a randomized complete block (RCB) design (Split Split plot) on tomato with three replications on the experimental field of IAEA (Seibersdorf-Austria). The treatment instruments for the soil moisture monitoring (main factor) consist of neutron gauge, Diviner2000, time domain reflectometer (TDR) and an EnviroScan and different irrigation systems (first sub factor) consist of trickle and furrow irrigations and different depths of soil (second sub factor) consist of 0-20, 20-40 and 40-60cm. The results showed that for the neutron gauge and TDR the amount of soil moisture in both of trickle and furrow irrigations were the same, but the significant differences were recorded in Diviner2000 and EnviroScan measurements. The results of this study showed that the neutron gauge is an acceptable and reliable means with the modern technology, with a precision of ± 2 mm in 450mm soil water to a depth of 1.5 meter and can be considered as the most practical method for measuring soil moisture profiles and irrigation planning program. The TDR method in most mineral soils, without the need for calibration, with an accuracy $\pm 0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ has a good performance in soil moisture and electrical conductivity measurements. The Diviner2000 and EnviroScan are not well suitable for the above conditions for several reasons such as much higher soil moisture and a large error measurement and also its sensitivity to the soil gap and to the small change in the soil moisture in comparison with the neutron gauge and the TDR methods.

Keywords: Irrigation, Soil Moisture, Neutron Gauge, TDR, Diviner2000, EnviroScan

*email: akhorasani@nrcam.org

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۹/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۴/۱۴



۱. مقدمه

رطوبت خاک برای جای‌گزینی روش پخش نوترون معرفی شد که از آن جمله می‌توان به روش‌های انعکاس‌سنجی زمانی^(۲) (TDR) و ظرفیت‌سنجی^(۳) با بهره‌گیری از دستگاه‌های Diviner2000 و EnviroScan اشاره نمود.

روش انعکاس‌سنجی زمانی از روش‌های نسبتاً جدید در اندازه‌گیری رطوبت خاک است. این روش بر مبنای خصوصیات ثابت دی‌الکتریک آب استوار است. ثابت دی‌الکتریک هر ماده عبارت است از ضریب افزایش ظرفیت خازن در حضور دی‌الکتریک نسبت به ظرفیت آن در نبود دی‌الکتریک، ثابت دی‌الکتریک هوا تقریباً ۱، خاک خشک بین ۴ تا ۸ و آب حدود ۸۱ است. بدین ترتیب ثابت دی‌الکتریک یک خاک مرطوب (که از سه جزء آب، هوا و ذرات جامد تشکیل شده است) عمدتاً توسط مقدار رطوبت آن کنترل می‌شود. به عبارت دیگر ثابت دی‌الکتریک خاک مرطوب، بستگی به مقدار رطوبت حجمی (Θ) داشته و با افزایش آن، ثابت دی‌الکتریک نیز افزایش می‌یابد. داس و همکارانش (۲۰۰۲) گزارش نمودند که داده‌های رطوبت به دست آمده با نوترون‌سنج، همبستگی خوبی با روش نمونه‌برداری حجمی و روش TDR دارند [۳]. هم‌چنین مورنو و همکارانش (۲۰۰۰) گزارش دارند که TDR روشی مناسب برای اندازه‌گیری تغییرات رطوبت در لایه‌های فوقانی خاک است [۴]. روش ظرفیت‌سنجی با استفاده از دستگاه‌های Diviner2000 و EnviroScan یکی دیگر از روش‌های جدید است که در چند سال اخیر برای اندازه‌گیری رطوبت خاک مورد استفاده قرار گرفته است. براساس اظهارات ایوت و همکارانش (۲۰۰۲) ظرفیت‌سنج EnviroScan در مقایسه با نوترون‌سنج مقدار رطوبت خاک را در نقاط اشباع و پژمردگی به ترتیب، بیش‌تر و کم‌تر برآورد می‌کند. هم‌چنین رطوبت اندازه‌گیری شده توسط ظرفیت‌سنج EnviroScan دو برابر میزان رطوبتی است که توسط روش‌های آزمایشگاهی و نوترون‌سنج اندازه‌گیری می‌شود [۵]. در این روش از خواص الکتریکی آب (مانند مقاومت و خاصیت دی‌الکتریک) برای سنجش میزان رطوبت خاک استفاده می‌شود [۶]. تمامی روش‌های مذکور از نقاط قوت و ضعف مخصوص به خود برخوردار هستند. لذا مقاله‌ی حاضر روش‌های فوق را با روش پخش نوترون (به عنوان معتبرترین روش اندازه‌گیری رطوبت خاک) مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد.

اندازه‌گیری و تفسیر مقدار رطوبت خاک در محدوده‌ی منطقه‌ی فعال ریشه‌ی گیاه در سیستم آب، خاک و گیاه و در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی اهمیت زیادی دارد. اصولی‌ترین روش اندازه‌گیری رطوبت خاک، روش وزنی است که در آن نمونه‌ی خاک از مزرعه برداشت شده و در دو حالت مرطوب و خشک ($g\ g^{-1}$) توزین و به صورت وزن آب بر وزن خاک خشک (مثلاً $g\ g^{-1}$) بیان می‌شود. نیاز به داده‌های رطوبت خاک در طول فصل رشد گیاه برای برنامه‌ریزی آبیاری، استفاده از روش وزنی را به دلیل مشخص شدن مقدار رطوبت در روز بعد، تغییر در ساختمان اولیه‌ی خاک و محیط کشت گیاه محدود کرده است. لذا نیاز به روش‌هایی با دقت بالا، تکرارپذیر در نقاط ثابت شده و بدون به‌هم‌خوردگی خاک ضروری است. بدیهی است در این روش‌ها، منحنی کالیبراسیون (رابطه بین رطوبت خاک و اندازه‌گیری‌های دستگاه) مورد نیاز می‌باشد. در سال ۱۹۵۰ روش اندازه‌گیری رطوبت خاک مبتنی بر پخش نوترون^(۱)، معرفی و به سرعت و به طور گسترده پذیرفته شد. در حال حاضر بیش‌تر دست‌آوردها در علم آب و خاک با این روش به دست می‌آید. روش فوق، کاربرد گسترده‌ای در تحقیقات کشاورزی داشته و پس از کالیبراسیون دستگاه، می‌توان رطوبت خاک را اندازه‌گیری نمود. در دستگاه نوترون‌سنج، نوترون‌ها معمولاً از طریق واکنش‌های (α, n) ، (β, n) ، (γ, n) حاصل می‌شوند. نوترون‌های حاصل از واکنش $^{11}C\ Be(\alpha, n)$ دارای انرژی از صفر تا ۱۰ MeV هستند. چون جرم و اندازه‌ی هسته‌ی اتم هیدروژن تقریباً مساوی جرم و اندازه‌ی نوترون است، این اتم در کاهش سرعت نوترون‌ها مؤثرتر از دیگر اتم‌ها عمل خواهد کرد. در این روش نوترون‌های تند از چشمه‌ی پرتوزای (آمرسیم ۲۴۱-بریلیم) گسیل می‌شوند. برخورد کشسان نوترون‌های تند، با هسته‌ی اتم هیدروژن تولید نوترون‌های کند می‌نماید. لذا با توجه به حضور گسترده‌ی اتم‌های هیدروژن در مولکول آب، شمارش نوترون‌های کند (گرمایی) معیاری از میزان رطوبت خاک است. کسواکر و همکارانش (۱۹۹۶) اظهار نمودند که نوترون‌سنج دستگاه مناسبی برای بررسی وضعیت رطوبت خاک است [۱]. دین و همکارانش (۱۹۸۷) از نوترون‌سنج برای اندازه‌گیری رطوبت خاک و اعمال مدیریت آبیاری برای گیاهان گوجه‌فرنگی، پنبه، سیر، خیار، سیب‌زمینی و فلفل استفاده کردند [۲]. در دهه‌ی ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ چند روش پیشرفته‌ی اندازه‌گیری



۲. روش کار

آزمایش‌ها در قالب طرح بلوک کامل تصادفی، به صورت کرت دو بار خرد شده و در سه تکرار (مجموعاً دوازده کرت) در مزرعه‌ی تحقیقاتی مرکز آزمایشگاه‌های آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در سایبیرزدورف^(۴) اتریش (واقع در ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر وین) بر روی گیاه گوجه فرنگی (گونه‌ی *Lycopersicon lycopersicum L. Karsten ex Faewell*) انجام شدند. دستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک شامل نوترون‌سنج، انعکاس‌سنج زمانی، و ظرفیت‌سنج‌های Diviner2000 و EnviroScan به‌عنوان عامل اصلی، سیستم‌های مختلف آبیاری شامل شیاری و قطره‌ای (عامل فرعی اول) و اعماق خاک شامل ۲۰ تا ۴۰، ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر (عامل فرعی دوم) بودند. هر کرت شامل ۵ ردیف کاشت به فاصله‌ی ۷۰ سانتی‌متر و ۹ گیاه در هر ردیف به فاصله‌ی ۵۰ سانتی‌متر به اندازه‌ی ۳٫۴×۵ مترمربع در نظر گرفته شده و آبیاری با دو روش شیاری (۹ مترمکعب) و قطره‌ای (۳٫۵ مترمکعب) و با تناوب ۶ روزه در هر کرت انجام شد. در هر کرت از هر چهار دستگاه مذکور برای سنجش رطوبت خاک استفاده شد. خاک مزرعه در رده‌ی Typic Eutrocrepts قرار داشته و بافت آن لوم رسی به همراه مقدار قابل توجهی سنگریزه (به ویژه در عمق پایین‌تر از ۵۰ سانتی‌متر) بود. متوسط بارندگی در منطقه ۶۰۰ میلی‌متر گزارش شده بود. دستگاه نوترون‌سنج مورد استفاده (Troxler 4301) شامل مجموعه‌ی چشمه‌ی نوترون تند (۰٫۳۷ گیگا بکرل یا ۱۰ میلی‌کوری با بازده $10^4 \times 0.7$ نوترون تند بر ثانیه) و یک آشکارساز قرار گرفته در یک لوله‌ی استوانه‌ای بود که از طریق لوله‌ی دسترسی^(۵) و به صورت عمودی در نیم‌رخ خاک جابه‌جا می‌شد [۷]. در این تحقیق یک لوله‌ی آلومینیومی، برای شمارش نوترون تا عمق ۶۰ سانتی‌متر در هر کرت نصب و عمل خواندن نوترون‌سنج با انتقال مجموعه‌ی چشمه‌ی نوترون تند به همراه آشکارساز به عمق‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر انجام می‌شد. دستگاه ظرفیت‌سنج EnviroScan (Sentek Environmental Technologies, Australia) مدل با منبع تغذیه‌ی خورشیدی مورد استفاده قرار گرفت. در این سیستم شش حس‌گر به فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متر در یک لوله‌ی PVC قرار گرفته و لوله در هر کرت در فاصله‌ی ۳۰ سانتی‌متری گیاه نصب گردید. یک کابل از هر لوله به دستگاه مرکزی متصل و داده‌های رطوبت خاک به طور متوالی (خودکار) هر ۳۰ دقیقه دریافت شد. دستگاه ظرفیت‌سنج Diviner2000 مدل

(Sentek Environmental Technologies, Australia) یک سیستم سنجش رطوبت خاک (قابل حمل)، شامل نمایش‌گر داده‌ها، حس‌گر و لوله‌ی PVC است. با افزایش تعداد مولکول‌های آزاد آب موجود در خاک، ظرفیت خاک افزایش یافته و جریان یا واجهش الکتریکی به حس‌گرهای موجود در لوله‌ی PVC ارسال می‌شود. برای پردازش خوانده‌های متوالی ابتدا دستگاه در شرایط ۱۰۰٪ هوا و ۱۰۰٪ آب و سپس در لوله‌ی PVC به صورت عمودی در خاک نصب می‌شود. بدین ترتیب پس از قرار گرفتن حس‌گر در داخل لوله‌ی محوری، به طرف پایین هدایت می‌گردید. پس از رسم منحنی کالیبراسیون (با استفاده از نمونه برداری از خاک و محاسبه‌ی رطوبت حجمی) خوانده‌های دستگاه در فواصل متوالی ۱۰ سانتی‌متر تا عمق ۶۰ سانتی‌متر توسط نمایش‌گر دریافت می‌گردید. برای رطوبت‌سنجی از طریق انعکاس‌سنجی زمانی، دو میله‌ی فلزی موازی (معمولاً از جنس مس یا فولاد و به طول ۲۰ سانتی‌متر) به طور عمودی در عمق‌های ۲۰ تا ۴۰، ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر قرار داده شده و از طریق کابل به یک دستگاه گیرنده‌ی علائم مدل ۸۰۱ متصل گردید. میله‌ها (به قطر حدود ۵ میلی‌متر) به عنوان هادی عمل نموده و خاک مابین و اطراف آن، نقش محیط دی‌الکتریک را ایفا می‌نمود. در صورت ایجاد و انتشار واجهش‌های الکتریکی در طول میله‌های موازی، علائم از انتهای این میله‌ها منعکس شده و به گیرنده‌ی دستگاه TDR برگشت می‌کرد. بدین ترتیب دستگاه TDR فاصله‌ی زمانی بین ارسال و برگشت علائم را اندازه‌گیری می‌کرد. باید توجه نمود که بین فاصله‌ی زمانی رفت و برگشت واجهش و سرعت انتشار آن در خاک (به ازای طول ثابت میله) نسبت عکس وجود دارد. از طرف دیگر سرعت انتشار علائم نیز نسبت معکوس با مقدار ثابت دی‌الکتریک خاک دارد. بدین ترتیب هر اندازه رطوبت خاک افزایش یابد، مقدار ثابت دی‌الکتریک نیز به همان اندازه افزایش یافته و سرعت انتشار واجهش کاهش می‌یابد. با کاهش سرعت انتشار، فاصله‌ی زمانی بین رفت و برگشت علائم افزایش پیدا می‌کند. برای ظرفیت‌سنجی با استفاده از Diviner2000، انعکاس‌سنجی زمانی و رطوبت‌سنجی نوترونی، اندازه‌گیری‌ها دوبار در هفته از خرداد الی شهریور انجام شدند. برای کنترل پتانسیل آب خاک و برنامه‌ی آبیاری ۱۲ پتانسیل‌سنج (در اعماق ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر) در تمامی کرت‌ها نصب گردید. در مدت انجام آزمایش، کالیبراسیون نوترون‌سنج و ظرفیت‌سنج Diviner2000 بر اساس روش هیگنت و همکاران (۲۰۰۲) انجام پذیرفت [۸].

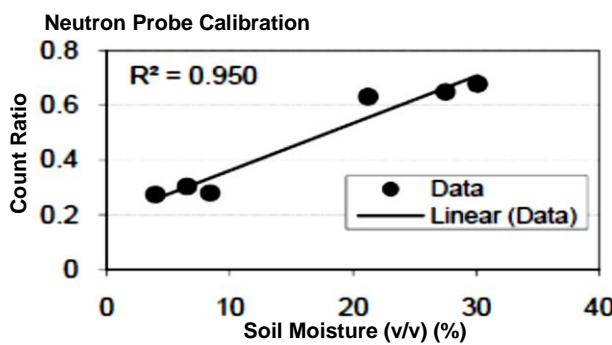
**۳. نتایج**

متقابل سیستم‌های آبیاری و دستگاه‌های رطوبت‌سنجی، میانگین مقدار رطوبت خاک توسط دستگاه نوترون‌سنج در سیستم آبیاری شیاری و قطره‌ای به ترتیب ۲۶/۵ و ۲۴/۴ میلی‌متر تعیین شده است. در صورتی که با دستگاه‌های Diviner2000، TDR و EnviroScan میانگین میزان رطوبت خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای بیش‌تر از شیاری بوده است. در مقایسه‌ی رطوبت در اعماق مختلف خاک، عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر (عمق فعال ریشه‌ی گیاه) بیش‌ترین مقدار (۴۴/۴۲) را به خود اختصاص داده است و سپس اعماق ۰ تا ۲۰ و ۴۰ تا ۶۰ با مقادیر به ترتیب، ۴۱/۶۳ و ۳۹/۱۹ میلی‌متر در مرتبه‌ی دوم قرار دارند. در مقایسه‌ی اثرات متقابل رطوبت خاک و اعماق مختلف خاک با دستگاه‌های مختلف، بیش‌ترین میزان رطوبت در عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر و به میزان ۶۱/۸۳ با دستگاه EnviroScan و کم‌ترین آن در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر به میزان ۲۲/۴۲ میلی‌متر و با دستگاه نوترون‌سنج

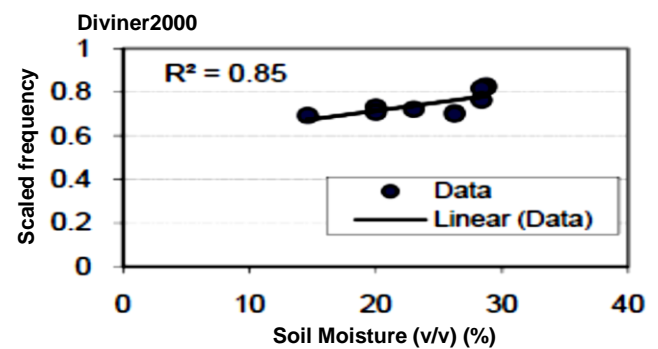
نتایج تجزیه‌ی فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی مزرعه در جدول ۱ داده شده است. منحنی کالیبراسیون نوترون‌سنج و ظرفیت‌سنج Diviner2000 در خاک سایبرزدورف در شکل ۱ نشان داده شده است. در جدول‌های ۲ و ۳ مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط دستگاه‌های نوترون‌سنج، انعکاس‌سنج زمانی، و ظرفیت‌سنج‌های Diviner2000 و EnviroScan در سطوح کودی مختلف (۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) در سیستم‌های مختلف آبیاری (قطره‌ای و شیاری) داده شده است. در رابطه با دستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک، میانگین میزان خوانده‌ی دستگاه ظرفیت‌سنج EnviroScan در عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک بیش‌ترین مقدار ۶۰/۱۷ میلی‌متر را به خود اختصاص داده است. سپس دستگاه‌های Diviner2000 و TDR و نوترون‌سنج با میانگین به ترتیب، برابر ۴۲/۷۲، ۳۸/۶۱ و ۲۵/۴۷ در سه گروه متمایز بعدی قرار گرفته‌اند. در مقایسه‌ی اثرات

جدول ۱. نتایج تجزیه‌ی فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی مزرعه قبل از انجام آزمایش

pH	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol kg ⁻¹)	مواد آلی (%)	چگالی ظاهری (g cm ⁻³)	رطوبت حجمی پزمردگی دائم (%)	رطوبت حجمی ظرفیت زراعی (%)	شن درشت (%)	شن ریز (%)	سیلت درشت (%)	سیلت (%)	رس (%)
۷٫۹	۲۵٫۴	۵٫۵	۱٫۴۴	۱۷٫۵	۲۳	۲۳٫۱	۱۷٫۹	۱۰٫۶	۱۵٫۱	۳۳٫۳



(a)



(b)

شکل ۱. منحنی‌های کالیبراسیون؛ (a) نوترون‌سنج و (b) Diviner2000.**جدول ۲. مقدار رطوبت خاک بر حسب میلی‌متر (روابط متقابل دستگاه‌های اندازه‌گیری، رطوبت خاک در سطح کود)**

سطح کود (Kg N/ha)						دستگاه اندازه‌گیری رطوبت خاک
۲۰۰			۱۰۰			
عمق خاک (cm)			عمق خاک (cm)			
۶۰ تا ۴۰	۴۰ تا ۲۰	۲۰ تا ۰	۶۰ تا ۴۰	۴۰ تا ۲۰	۲۰ تا ۰	Neutron probe
۲۸٫۱۷ (۱٫۵) IJ	۲۹٫۸۳ (۱٫۵) I	۲۲٫۵۰ (۱٫۵) K	۲۲٫۸۳ (۲) K	۲۷٫۱۷ (۲٫۵) IJ	۲۲٫۳۳ (۲٫۱) K	Diviner2000
۴۵٫۶۷ (۱٫۵) E	۵۷٫۱۷ (۱٫۷) C	۴۰٫۸۳ (۴٫۰) F	۳۷٫۳۳ (۱٫۷) GH	۳۵٫۰۰ (۲٫۵) H	۴۰٫۳۳ (۲٫۰) FG	TDR
۳۵٫۶۷ (۱٫۶) H	۵۱٫۸۳ (۲٫۱) D	۳۷٫۵۰ (۱٫۵) GH	۲۶٫۱۷ (۱٫۵) J	۳۴٫۶۷ (۲٫۰) H	۴۵٫۸۳ (۱٫۲) E	EnviroScan
۵۹٫۵۰ (۱٫۵) BC	۶۱٫۱۷ (۱٫۲) AB	۶۳٫۶۷ (۱٫۷) A	۵۸٫۱۷ (۲٫۱) BC	۵۸٫۵۰ (۳٫۱) BC	۶۰٫۰۰ (۱٫۵) BC	

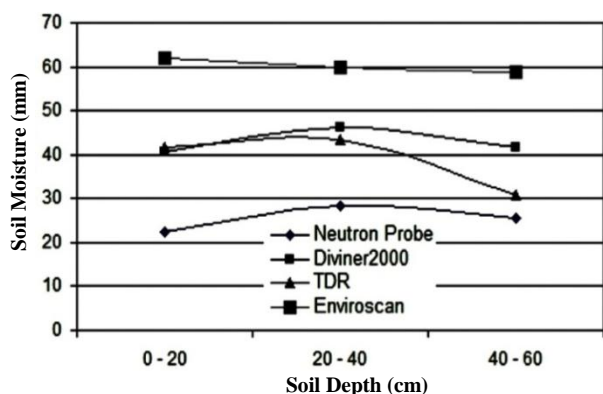
حروف مشابه نشان‌گر عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (از طریق آزمون دانکن) است. خطای استاندارد (SE) داخل پراکنش می‌باشد.

جدول ۳. مقدار رطوبت خاک برحسب میلی‌متر (روابط متقابل دستگاه‌های اندازه‌گیری، رطوبت خاک در سیستم‌های آبیاری)

سیستم آبیاری						دستگاه اندازه‌گیری رطوبت خاک
قطره‌ای			شیاری			
عمق خاک (cm)			عمق خاک (cm)			
۶۰ تا ۴۰	۴۰ تا ۲۰	۲۰ تا ۰	۶۰ تا ۴۰	۴۰ تا ۲۰	۲۰ تا ۰	Neutron probe
۲۵,۳۳ (۱,۰) I	۲۸,۰۰ (۳,۲) HI	۲۰,۰۰ (۱,۵) J	۲۵,۶۷ (۰,۶) I	۲۹,۰۰ (۳,۲) H	۲۴,۸۳ (۱,۰) I	Diviner2000
۵۳,۱۷ (۲,۱) C	۵۴,۵۰ (۲,۵) C	۴۱,۳۳ (۲,۰) E	۲۹,۸۳ (۱,۰) GH	۳۷,۶۷ (۱,۷) F	۳۹,۸۳ (۲,۱) EF	TDR
۳۲,۶۷ (۲,۵) G	۴۵,۱۷ (۱,۲) D	۳۹,۰۰ (۱,۰) EF	۲۹,۱۷ (۱,۰) H	۴۱,۳۳ (۳,۵) E	۴۴,۳۳ (۱,۵) D	EnviroScan
۵۸,۵۰ (۱,۵) B	۶۰,۵۰ (۰,۶) AB	۶۲,۳۳ (۲,۵) A	۵۹,۱۷ (۱,۰) AB	۵۹,۱۷ (۳,۰) AB	۶۱,۳۳ (۱,۰) AB	

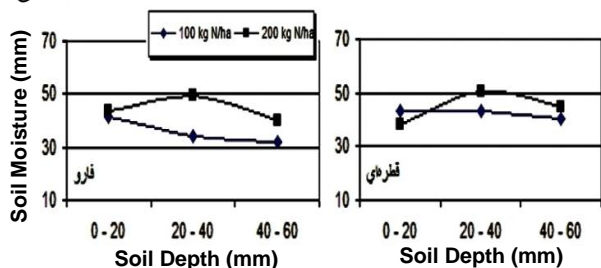
حروف مشابه نشان‌گر عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ (از طریق آزمون دانکن) است. خطای استاندارد (SE) داخل پرانتز می‌باشد.

می‌یابد (شکل ۴). در مورد اثرات متقابل سیستم‌های آبیاری و سطح کود، نتایج نشان داد که افزایش سطح کود باعث افزایش رطوبت خاک می‌گردد. در این راستا سطح ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن در سیستم‌های شیاری و قطره‌ای با میانگین ۴۴/۴۶ میلی‌متر در رده‌ی اول قرار گرفته و سطح ۱۰۰ کیلوگرم کود نیتروژن در سیستم‌های قطره‌ای و شیاری به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ۴۲/۲۵ و ۳۵/۸۱ میلی‌متر آب بود که در درجه‌ی دوم و سوم آماری قرار می‌گیرند (شکل ۵). بیش‌ترین میزان رطوبت برای سطح کود ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر با دستگاه EnviroScan به میزان ۶۳/۶۷ میلی‌متر ملاحظه شد و کم‌ترین مقدار آن با دستگاه نوترون‌سنج و در لایه‌ی سطحی، به میزان ۲۲/۴۱ میلی‌متر تعیین گردید. به طور کلی در سیستم شیاری تأثیر سطح کود بر رطوبت خاک ناچیز بود (۴۲/۵۹ میلی‌متر) و با افزایش عمق بر مقدار آن افزوده می‌شود. این امر در مورد سیستم آبیاری قطره‌ای برعکس عمل می‌کند به طوری که در لایه‌ی سطحی خاک، سطح کود ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار رطوبت بیش‌تری را به دست داده و با افزایش عمق، سطح ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار از رطوبت بیش‌تری برخوردار بوده است (شکل ۶).



شکل ۲. مقادیر رطوبت در اعماق مختلف خاک (مقایسه‌ی دستگاه‌های نوترون‌سنج، Diviner2000، TDR، و EnviroScan).

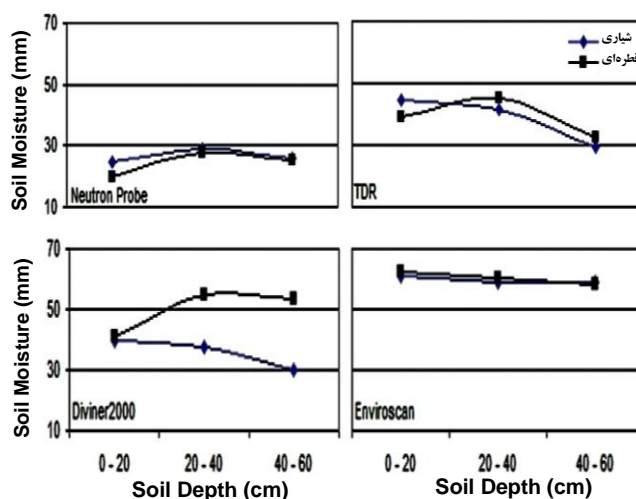
اندازه‌گیری شده است (شکل ۲). در مورد اثرات متقابل سیستم‌های آبیاری و اعماق مختلف خاک، داده‌ها نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار رطوبت در سیستم آبیاری قطره‌ای و در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر (منطقه‌ی فعال ریشه‌ی گیاه) به میزان ۴۷/۰۴ میلی‌متر است و اعماق ۲۰ تا ۴۰ و ۴۰ تا ۶۰ به ترتیب، ۴۰/۶۷ و ۴۲/۴۲ میلی‌متر در مرتبه‌ی دوم قرار دارند. در سیستم آبیاری شیاری کم‌ترین مقدار رطوبت در عمق ۴۰ تا ۶۰ به میزان ۳۵/۹۶ میلی‌متر و سپس در اعماق ۲۰ تا ۴۰ و ۴۰ تا ۶۰ به ترتیب، ۴۱/۷۹ و ۴۲/۵۸ میلی‌متر ملاحظه شده است. در مجموع، در سیستم آبیاری قطره‌ای میزان رطوبت بیش‌تری (۱۳۰/۱۳ میلی‌متر) تا عمق ۶۰ سانتی‌متر ذخیره شده است ولی در آبیاری شیاری این مقدار به ۱۲۰/۳۳ تنزل پیدا کرده است. در خصوص اثرات متقابل سه‌گانه (دستگاه اندازه‌گیری رطوبت، سیستم آبیاری و عمق اندازه‌گیری) بیش‌ترین میزان رطوبت توسط دستگاه نوترون‌سنج، در سیستم آبیاری شیاری و قطره‌ای در عمق‌های ۲۰ تا ۴۰ و برابر ۲۹/۰۰ و ۲۸/۰۰ میلی‌متر و کم‌ترین آن در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر و برابر ۲۴/۸۳ و ۲۰/۰۰ میلی‌متر به دست آمده است. با دستگاه نوترون‌سنج میزان رطوبت خاک در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر متفاوت بود اما در سایر عمق‌ها، تفاوت معنی‌داری ملاحظه نگردید. این امر در مورد دستگاه Diviner2000 برعکس بوده است، به صورتی که داده‌های رطوبت خاک در لایه‌ی سطحی در دو سیستم شیاری و قطره‌ای برابر، اما در اعماق پایین‌تر نشان‌دهنده‌ی حضور رطوبت بیش‌تر در سیستم آبیاری قطره‌ای بوده است. با دستگاه TDR میزان رطوبت خاک با افزایش عمق کاهش یافته و با دستگاه EnviroScan تفاوت معنی‌داری در خصوص میزان رطوبت خاک در سیستم‌ها و اعماق مختلف خاک ملاحظه نگردید (شکل ۳). در خصوص تأثیر سطح کود در اندازه‌گیری رطوبت خاک (با دستگاه‌های مختلف) داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سطح کود، مقدار رطوبت نیز افزایش



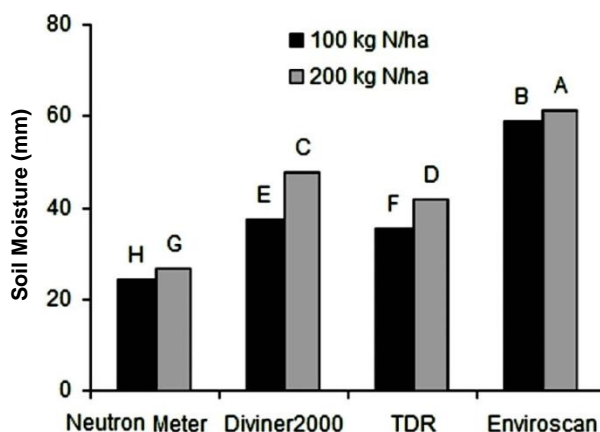
شکل ۶. رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با استفاده از دستگاه‌های مختلف نوترون‌سنج، TDR، Diviner2000 و EnviroScan در اعماق و برحسب سطح کود.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

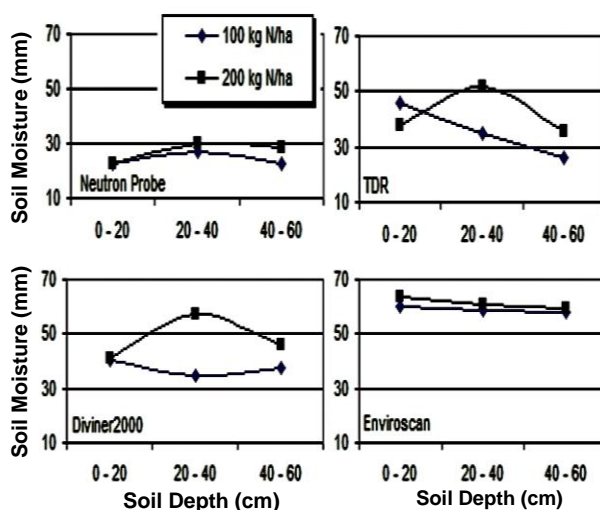
رطوبت اندازه‌گیری شده با دو دستگاه نوترون‌سنج و انعکاس‌سنج زمانی در دو تیمار آبیاری شیاری و قطره‌ای بسیار مشابه است. این در حالی است که نتایج اندازه‌گیری رطوبت به روش ظرفیت‌سنجی با دستگاه‌های Diviner2000 و EnviroScan اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد (شکل ۳). اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک تا عمق ۶۰ سانتی‌متر با استفاده از دستگاه‌های Diviner2000 و EnviroScan تغییرات رطوبت بالاتری را در تیمار آبیاری قطره‌ای (حدوداً ۶۰ میلی‌متر) نشان می‌دهد (جدول ۳). در تیمارهای قطره‌ای و شیاری روش پراکندگی نوترون و TDR از همگنی قابل‌قبولی برخوردار می‌باشند. علت این امر آن است که نوترون‌سنج و TDR در مقایسه با دستگاه‌های Diviner2000 و EnviroScan حجم وسیع‌تری از خاک را مورد واریسی قرار داده و ناهمگنی خاک را بیش‌تر مورد اغماض قرار می‌دهند [۹]. در تیمار آبیاری شیاری، همه‌ی روش‌ها می‌توانند شاخص مناسبی در خصوص تخمین رطوبت موجود در خاک باشند. اما در تیمار قطره‌ای، روش ظرفیت‌سنجی با تکیه بر دستگاه‌های Diviner2000 و EnviroScan مؤید حضور رطوبت بیش‌تر در خاک بوده است. این امر می‌تواند به دلیل حساسیت حس‌گرهای دستگاه‌های فوق‌نسبت به فضاهای ایجاد شده بین خاک و لوله در هنگام نصب لوله‌ها (به دلیل وجود سنگریزه در خاک منطقه‌ی مورد آزمایش) و هم‌چنین حجم کوچک خاک اندازه‌گیری شده (۱۰ سانتی‌متر) باشد. لذا به دلیل مشکلات نصب لوله‌های PVC توصیه می‌شود که از استفاده از دستگاه‌های Diviner2000 و EnviroScan در خاک‌های با بافت ناهمگن خودداری شود [۱۰]. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که دستگاه نوترون‌سنج یک وسیله‌ی قابل‌قبول و مورد اعتماد با فن‌آوری جدید، و دقت ± 2 میلی‌متر در ۴۵۰ میلی‌متر آب خاک تا عمق ۱/۵ متری، و کاربردی‌ترین



شکل ۳. اندازه‌گیری رطوبت خاک توسط دستگاه‌های نوترون‌سنج، Diviner2000، TDR و EnviroScan در اعماق ۲۰ تا ۴۰ و ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متری در دو سیستم آبیاری شیاری و قطره‌ای.



شکل ۴. تأثیر مقدار کود نیتروژنی بر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده با دستگاه‌های مختلف.



شکل ۵. تأثیر سطح کود بر رطوبت خاک در اعماق مختلف خاک.



References:

1. T. Kovacs, G. Kovacs, J. Szito, "Crop yield response to deficit irrigation imposed at different plant growth stages," IAEA-TECDOC-888, 89-114 (1996).
2. T.J. Dean, J.P. Bell, A.J.B. Baty, "Soil moisture measurement by an improved capacitance technique: Part 1. Sensor design and performance," J. Hydrol. 93, 67-78 (1987).
3. D.K. Das and Bandyopadhyay, s "Soil water management and crop water use studies using nuclear technique. 17th World Congress of Soil Science," Volume V Symposium, 59, 1778 (2002).
4. F. Moreno, F. Pelegrin, J.E. Fernandez, J.M. Murillo, "Measurement of soil water content using TDR and the neutron probe in tillage experiments in semi-arid SW Spain," IAEA-TECDOC-1137, 105-110 (2000).
5. S. Evett, J.P. Laurent, P. Cepuder, C. Hignett, "Neutron scattering, capacitance, and TDR soil water content measurements compared on four continents. 17th World Congress of Soil Science," Volume V Symposium, 59, 1021 (2002).
6. "Water balance and Fertigation for crop improvement in west Asia," IAEA-TECDOC, 1266 (2002).
7. O.O.S. Bacchi, K. Reichardt, M. Calvache, "Neutron probes and Their use in agronomy," IAEA Training course series, IAEA (2001).
8. C.S.R. Hignett, Evett, "Neutron thermalization. Accepted for publication. In Methods in Soil Analysis, Part 1," Physical and Mineralogical Methods, 3rd ed. Agronomy Monograph Number 9 (2002).
9. S.R. Evett and J.L. steiner, "Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration," Soil. Sc. Soc. Of Am. J. 59, 961-968 (1995).
10. G.C. Topp, J.L. Davis, A.P. Annan, "Electromagnetic determination of soil water content measurement in Coaxial transmission lines," Water Resour. Res. 16, 574-582 (1980).

وسيله برای اندازه‌گیری توزیع رطوبت خاک و برنامه‌ریزی آبیاری در مزرعه می‌باشد. اما به دلیل فقدان آیین‌نامه‌ی تابش در بسیاری از کشورها، استفاده‌ی ایمن از این وسیله و حمل و نقل آن، نیاز به مجوز دارد. براساس استاندارد آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و کاتالوگ دستگاه، حد پرتوگیری مجاز شغلی و دز دریافتی کاربر دستگاه به ترتیب، ۲۰ و ۲ میلی‌سیورت در سال است. دستگاه TDR نیز در اغلب خاک‌های معدنی بدون نیاز به کالیبراسیون با دقت $\pm 0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ عملکرد خوبی داشته و هم‌زمان رطوبت و هدایت الکتریکی خاک را اندازه‌گیری می‌کند. اما به قیمت نسبتاً بالای این دستگاه، محدودیت کاربرد در خاک‌های شور و سدیمی (با هدایت الکتریکی بالا) و نیاز به منحنی واسنجی ویژه در خاک‌های با مقدار ماده آلی بالا و یا در خاک‌های آتشفشانی نیز باید اشاره کرد. از مزایای دستگاه‌های EnviroScan و Diviner2000 می‌توان به خواندن‌های سریع همراه با تعداد داده‌های زیاد، قابلیت اتصال به کامپیوتر، امکان تفسیر نتایج در مزرعه (با استفاده از نمایش‌گر و نرم‌افزارهای موجود)، مشاهده‌ی گرافیکی داده‌ها و کارآیی آسان آن اشاره نمود. معایب آن نیز حساسیت زیاد هنگام نصب لوله‌ی PVC، نیاز به کالیبراسیون، حساسیت به مقادیر ناچیز تغییرات در چگالی خاک، مقدار شوری آب و خاک می‌باشد. در پایان لازم به ذکر است که انتخاب هر وسیله تابع از عملکرد آن در منطقه‌ی موردنظر برای اندازه‌گیری خاک منطقه و گیاهان کشت شده، است.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله بر خود لازم می‌دانیم مراتب تقدیر و تشکر خود از واحد علوم خاک مرکز آزمایشگاه‌های آژانس بین‌المللی انرژی اتمی را به خاطر انجام این پروژه اعلام نماییم.

پی‌نوشت‌ها:

۱. Neutron Scattering
۲. TDR: Time Domain Reflectometry
۳. Capacitance Method
۴. Seibersdorf
۵. Access Tube