مجله علمی- پژوهشی

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management Science & Engineering

سال پنجم- شماره ۱۷- زمستان ۱۳۹۰ Vol. 5, No. 17, Winter 2012

امکان‌سنجی ساخت حسگرهای تدفینی دستگاه TDR و ارزیابی عملکرد آنها در اندازه‌گیری رطوبت خاک

محمد روغنی[۱]، سیدرضا امام جمعه[۲] و کورش کمالی[۳]

تاریخ دریافت:۸۹/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش:۹۰/۱۱/۱۹

چکیده

یکی از مسائل مهم و اساسی در مبحث استحصال آب، آگاهی از بیلان آب و تغییرات رطوبت خاک می‌باشد. در حال حاضر، روش‌های مختلفی به منظور تعیین رطوبت خاک ابداع شده است. نظر به این‌که روش‌های متداول اندازه‌گیری رطوبت خاک بسیار وقت‌گیر می‌باشند، لذا، استفاده از دستگاه بازتاب زمانی امواج TDR[۴]، به طور گسترده‌ای در سطح دنیا رایج شده است. در حال حاضر با توجه به گران بودن حسگرهای تدفینی و نیاز به استفاده تعداد زیادی از آنها در طرح‌های پژوهشی، ساخت حسگرهایی که ضمن دارا بودن دقت بالا در مقایسه با نمونه خارجی، از قیمتی مناسب و نیز قابل خرید به وسیله سایر موسسات علمی کشور برخوردار باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین منظور، انواع مختلفی از میله‌های استیل برای دسترسی به مناسب‌ترین نوع آن از نظر آلیاژ مشابه با نمونه خارجی تهیه شد. نمونه‌های ساخته شده در این مرحله، از طریق اندازه‌گیری رطوبت خاک و مقایسه نتایج داده‌ها با نمونه خارجی مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه آماری داده‌ها با استفاده از برنامه SPSS بیانگر تشابه مقادیر داده‌های نمونه ساخته شده با نمونه خارجی در سطح ۹۹ درصد معنی‌داری می‌باشد. در مرحله بعد، نتایج حسگرهای دست ساز و همچنین نوع خارجی با رطوبت وزنی اندازه‌گیری شده، مقایسه شد. نتایج تحلیل‌ها بیانگر عملکرد بسیار مناسب حسگرهای ساخته شده است. مقایسه آماری داده‌ها با رطوبت وزنی نیز در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار می‌باشد. بر این اساس، با توجه با نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر، این امکان وجود دارد تا با تولید حسگرهای یاد شده، شرایط مطلوبی برای پژوهشگران کشور، در اجرای طرح‌های پژوهشی فراهم شود.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، حسگر تدفینی، دستگاه TDR، رطوبت خاک، متالورژی میله‌های حسگر.

مقدمه

روند رو به رشد تناوب خشکسالی‌ها و کاهش متوسط مقادیر بلند مدت مقادیر بارندگی در بیشتر مناطق، لزوم برنامه‌ریزی و استفاده بهینه از منابع محدود آب موجود را ضروری ساخته است. به همین منظور، آگاهی از بیلان آبی و شرایط رطوبتی خاک اراضی زراعی و منابع حوزه طبیعی، نقش مهمی در مدیریت حوزه‌های آبخیز ایفا می‌کند. به طور کلی، اندازه‌گیری رطوبت خاک در علوم مرتبط با کشاورزی و منابع طبیعی به منظور تعیین مقدار آب خاک و همچنین مشخص نمودن میزان آب مورد نیاز گیاه از نظر زمانی و مکانی ضروری می باشد.

علیزاده [۲]، استفاده از فناوری دستگاه بازتاب زمانی امواج (TDR) را در مقایسه با روش‌هایی نظیر وزنی، تانسیومتری، مقاومت با استفاده از مکعب‌های گچی و روش پخش نوترون، روشی تاحدودی جدید و کاربردی در اندازه‌گیری رطوبت خاک، مطالعه جذب آب به وسیله ریشه گیاه و سایر مطالعات آب و خاک عنوان می‌دارد. تکرارپذیری، سرعت و دقت زیاد، اندازه‌گیری رطوبت در اعماق تاحدودی مختلف خاک، بی‌ضرر بودن کاربرد آن در مقایسه با روش نوترون متر و امکان اندازه‌گیری شوری حاک از جمله مهمترین مزایای کاربرد این TDR است.

طیف وسیع تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک همراه با تغییرات عمقی لایه‌های مختلف آن، لزوم بکارگیری تعداد قابل توجهی از حسگرهای TDR را در طرح‌های پژوهشی ضروری ساخته است. از این‌رو، تعیین دقت حسگر تدفینی ساخته شده، بررسی راه‌های عملی به منظور افزایش دقت حسگرهای تدفینی دست‌ساز و دستیابی به ویژگی‌ها و شیوه ساخت آن‌ها با استاندارد قابل قبول از اهداف اجرای طرح حاضر به شمار می‌رود. کاهش هزینه‌های تولید نیز شرایط مناسبی را برای استفاده از TDR در سطح وسیع به وسیله موسسات علمی فراهم خواهد نمود.

۱- عضو هیئت علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
moroghani@gmail.com
۲- کارشناس پژوهشی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
emamjomeh @yahoo.com
۳- کارشناس پژوهشی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری
kamali_kourosh @yahoo.com

4 -Time Domain Reflectometry

درباره ساخت حسگرهای تدفینی و ارزیابی عملکرد آنها در برآورد رطوبت خاک،پژوهش‌های محدودی در داخل کشور انجام شده است. در مورد جایگزینی لوله‌های PVC با لوله‌های TECHANAT، Sotodenia [۱۲]، رطوبت سنجی با استفاده از دستگاه TDR را مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل حاکی از همبستگی بین داده‌های حاصل از دو روش بوده است.

Pakparvar [۱۰] همبستگی ویژگی‌های رطوبتی برخی از خاکهای عرصه پخش سیلاب را با اندازه‌گیری به وسیله دستگاه TDR بررسی نموده است. در این پژوهش آزمایشگاهی، سه نمونه از خاک یکی از شبکهٔ پخش سیلاب گربایگان فسا با اعماق ۱۰-۰، ۱۰۳-۱۰ و ۱۵۰-۱۰۳ سانتی‌متر برداشت شد. بررسی نتایج تغییرات قرائت دستگاه نسبت به تغییرتراکم خاک نشان داد که بیشترین تغییر در نمونه خاک لومی و کمترین تغییر در خاک شنی‌لوم رخ داده است. کمترشدن تراکم خاک و کاهش چگالی ظاهری خاک در خاک لوم تا حد کمتر از ۱/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب خطا ایجاد می‌کند.

Eskandari [۵] با اندازه‌گیری شوری بر روی هشت نمونه آب و چهار نمونه خاک با شوری مختلف از روش TDR، به مقایسه نتایج حاصله با روش متداول هدایت سنج الکتریکی (EC متر) پرداخت. نتایج نشان داد که اندازه‌گیری هدایت الکتریکی با استفاده از دستگاه TDR و EC سنج در نمونه‌های آب از همبستگی بالایی برخوردار است (R^2=۰/۹۶). اندازه‌گیری شوری در خاک‌هایی با EC بیش از پنج دسی‌زیمنس بر متر به وسیله دستگاه TDR به دلیل افت زیاد موج بازگشتی، باعث خطا در ارزیابی ضریب دی الکتریک شده و به دنبال آن درصد حجمی رطوبت اندازه‌گیری شده با خطا مواجه می شود. Kamalie [۹] با استفاده از حسگرهای استاندارد وتحلیل میله‌های آن اقدام به ساخت حسگرهای TDR نمود. نتایج داده‌های رطوبت خاک از حسگرهای ساخته شده با نمونه مشابه خارجی و همچنین مقادیر مشاهده‌ای، بیانگر موفقیت در این مرحله بود.

در حال حاضر کاربرد TDR برای تعیین میزان آب موجود در خاک بسیار رایج می‌باشد. اولین بار Davis [۳]؛ [٤] استفاده از TDR را برای اندازه‌گیری رطوبت در موارد زمین شناسی گزارش نموده‌اند. این روش براساس ویژگی استثنایی آب از نظر ثابت دی‌الکتریک (D) استوار است. Topp [۱۳] اندازه‌گیری تاحدودی ساده و قابل اعتماد ضریب D در محدوده فرکانس یک مگا هرتز تا یک گیگا هرتز را راه عملی و مؤثر در اندازه‌گیری مقدار آب خاک می‌دانند. به طورکلی، دی الکتریک به معنی نارسانا بودن جسم نسبت به الکتریسیته می‌باشد. یعنی اگر جسمی با D بالا بین دو سطح باردار قرار گیرد (یک خازن)، مانع از تشکیل شبکه جریان بار الکتریکی می شود. در همین ارتباط، قابلیت اندازه‌گیری دو ویژگی آب خاک و شوری برای نمونه‌های حجمی غیریکنواخت تاحدودی بزرگ با استفاده از یک حسگر با دستگاه TDR توسط Vanclooster [١٤] مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، با استفاده از دستگاه TDR و به شیوه واسنجی غیرمستقیم با استفاده از مدل‌های مفهومی، رابطه هدایت الکتریکی آب خاک (EC_w) و هدایت الکتریکی خاک (EC_s) با استفاده از دو مدل مختلف در محیط آزمایشگاهی و در ستونی از خاک شنی بررسی شده است.

در پژوهشی دیگر که توسط Western [۱۵] در ۲۵ نقطه از مناطق نیوزیلند و استرالیا انجام شد، مقادیر رطوبت حجمی خاک با نصب حسگرهای TDR و تجهیزات CS٦١٥[1]همچنین اندازه‌گیری از طریق نمونه‌برداری صحرایی، در سطح و عمق خاک مورد واسنجی قرار گرفت. رابطه بین اندازه‌گیری‌های صحرایی بوسیله دستگاه‌های TDR و CS٦١٥، نشان‌هنده انحراف معیار بین نتایج حاصله در سطوح بالای رطوبتی خاک بود. همچنین، نتایج حاصله بیانگر همبستگی خوب بین داده‌های رطوبت حجمی خاک بوسیله دستگاه TDR و برآوردهای مزرعه ای بوده است.

Hook [۷] یک حسگر مرکب سه میله‌ای طراحی کردند که با یک دیود کوتاه ترکیب شده بود تا بتواند حداکثر میزان انعکاس‌ها را در نقطه ورود میله‌ها به خاک و در نقاط داخل خاک تعریف نماید. این وسیله دارای خاصیت حذف انعکاس‌های اضافی بود و در آن امکان تفسیر قابل اطمینان شکل موج به‌وسیله کاربران غیرحرفه‌ای و یا به‌وسیله یک نرم‌افزار سامانه اتوماتیک وجود داشت.

Inoue [۸] به منظور اندازه‌گیری مقدار رطوبت حجمی در نزدیک سطح خاک، با ساخت دو مدل حسگر چاقویی و سورتمه‌ای شکل، مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به وسیله آنها را با حسگر خارجی دستگاه TDR مقایسه کردند. نتایج حاصله نشان داد که همبستگی بسیار خوبی بین درصد رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به وسیله حسگر استاندارد (θ_{Tc}) و حسگر چاقویی شکل (θ_{Tk}) وجود دارد.

Frueh [٦] به منظور شناسایی دقت حسگرهای چندسطحی در ستون خاک آزمایشگاه و خاک سنگریزه‌ای در مزرعه با بکارگیری دو روش، حسگرهای TDR را واسنجی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد خطای ابزاری برآورد رطوبت حجمی به وسیله دستگاه TDR کمتر از ۰/۰۱ cm^3/cm^3 است. در هر دو مورد اندازه‌گیری آزمایشگاهی و مزرعه‌ای اگر حسگرها به طور مجزا واسنجی شوند نتایج مناسبی بدست خواهد آمد. همچنین، اگر حسگرهای TDR مربوط به هر عمق بطور مجزا واسنجی شوند و با نتایج حاصله از نوترون متر مورد مقایسه قرار گیرند، خطای استاندارد cm^3/cm^3 ۰/۰۲ و یا کمتر و ضریب همبستگی بین ۰/٦٣ تا ۰/۹۲ متغیر است.

Serrarens [۱۱] مطالعه‌ای را درمورد ارزیابی دقت حسگرهای چندسطحی دستگاه TDR در شرایط مزرعه‌ای انجام دادند. آنان هشت حسگر TDR را در کرت‌های کوچک کشت شده با لوبیا و ذرت خوشه‌ای نصب کردند. جمع‌آوری و ثبت داده‌ها به صورت خودکار انجام شد. به منظور واسنجی حسگرها، رطوبت خاک به وسیله دستگاه نوترون متر نیز اندازه‌گیری می‌شد. نتایج این مطالعه

1- Compbell Scientific Inc

جدول۱- ترکیب شیمیایی (کوانتومتری) میله میانی حسگر تدفینی نوع خارجی برحسب درصد وزنی عناصر

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
۰/۱۲	۰/۴۲	۱/۶۹	۰/۰۰۴	۰/۱۶	۱۷/۳۷	۰/۲۳	۹/۹۳	۰/۰۱	۰/۱۹	۰/۲۲
Nb	Ti	V	W	Sn	B	As	Zr	Sb	Mg	Fe
۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۱	۰/۰۵	--	--	--	--	--	--	Base

جدول۲- ترکیب شیمیایی (کوانتومتری) میله‌های کناری حسگر تدفینی نوع خارجی برحسب درصد وزنی عناصر

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
۰/۰۵	۰/۴	۱/۳۶	۰/۰۱۱	۰/۰۰۳	۱۸/۷۱	۰/۲۳	۹/۸۷	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۳۴
Nb	Ti	V	W	Sn	B	As	Zr	Sb	Mg	Fe
۰,۰۱	۰,۰۰۱	۰,۰۶	۰,۰۶	--	--	--	--	--	--	Base

جدول ۳- ترکیب شیمیایی استیل خارجی ۳۰۳ AISI برحسب درصد وزنی عناصر

C	Si	Mn	P	S	Pb	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cr+Mo+Ni	
--	--	--	--	۰/۱۵۰	--	۱۷/۰	۸/۰۰	--	--	--	--	Min
۰/۱۵	۱/۰۰	۲/۰۰	۰/۲۰۰	--	--	۱۹/۰	۱۰/۰	--	--	--	--	Max

جدول ٤- ترکیب شیمیایی استیل خارجی ۳۰٤ AISI برحسب درصد وزنی عناصر

C	Si	Mn	P	S	Pb	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cr+Mo+Ni	
--	--	--	--	--	--	۱۸/۰	۸/۰۰	--	--	--	--	Min
۰/۰۸	۱/۰۰	۲/۰۰	۰/۰۴۵	۰/۰۳۰	--	۲۰/۰	۱۰/۵	--	--	--	--	Max

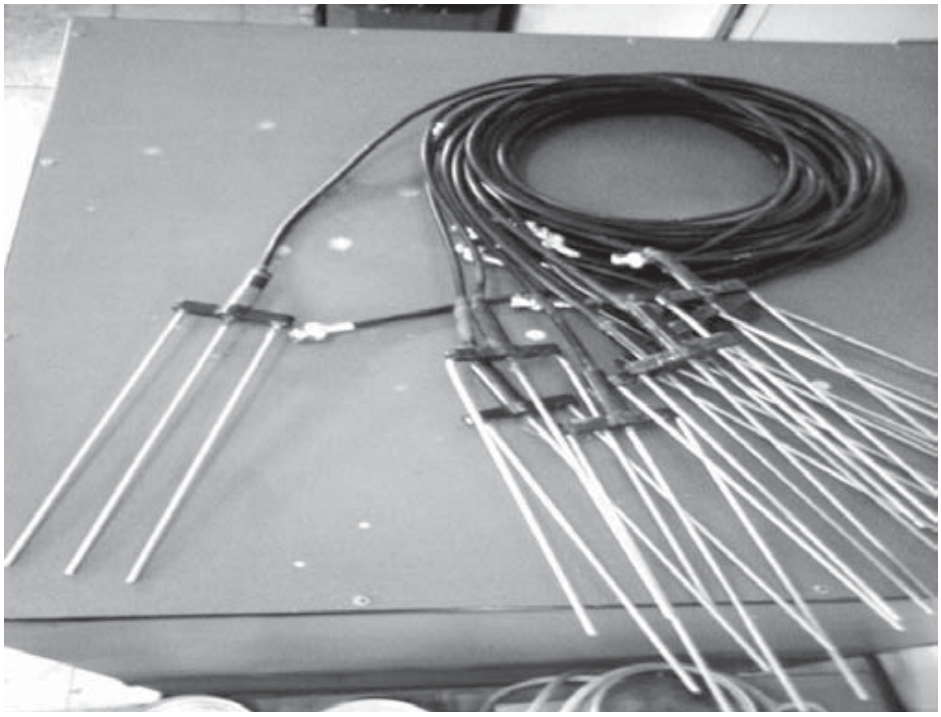
نشان داد، اگر هر حسگر به طور مجزا واسنجی شود، به طورتقریب خطای اندازه‌گیری بین m^3/m^3 ۰/۰۰۵ و m^3/m^3 ۰/۰۱۵ خواهد بود. چنانچه چند حسگر بر اساس عملکرد یک منحنی واسنجی شوند، خطای اندازه‌گیری دو برابر می‌شود. همچنین، فشردگی خاک و تماس حسگر با خاک در دقت اندازه‌گیری به وسیله دستگاه TDR مؤثر می‌باشد. به‌ویژه این موضوع وقتی که فقط یک حسگر برای تولید منحنی واسنجی مورد استفاده قرار گیرد ملموس‌تر است.

پژوهش حاضر که با هدف دست یابی به تکنیک و شیوه علمی ساخت حسگرهای رطوبت سنج TDR صورت گرفته است، در نظر دارد تا با راه اندازی خط تولید حسگرهای یاد شده، نیاز پروژه‌های پژوهشی خود را که از تعداد قابل توجهی نیز برخوردار می‌باشد تامین نماید. این موضوع با توجه به تفاوت قیمت حسگر ساخته شده با نمونه خارجی آن، صرفه جویی ارزی قابل ملاحظه‌ای را به همراه خواهد داشت.

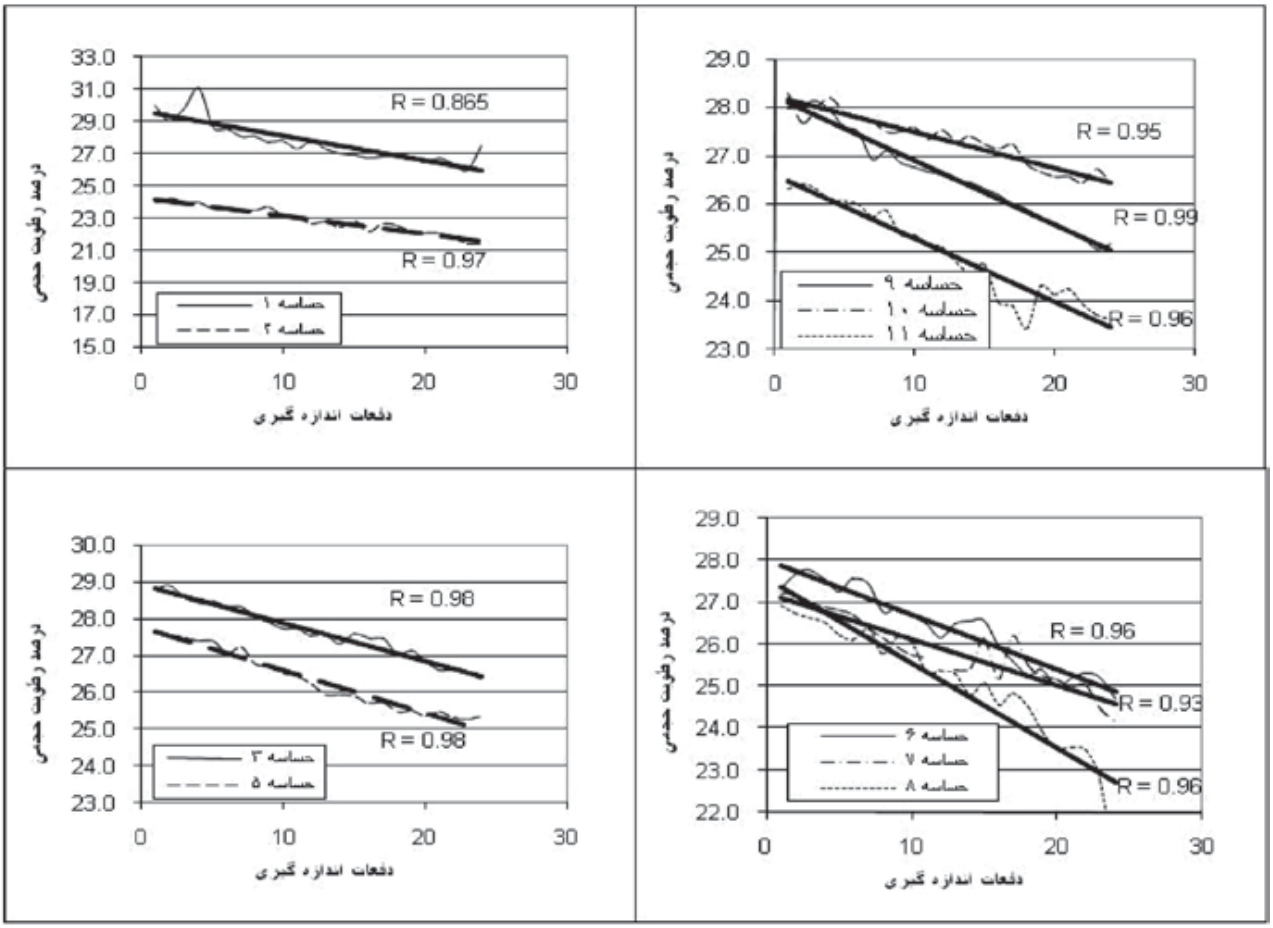
مواد و روش‌ها

مشخصات دستگاه TDR

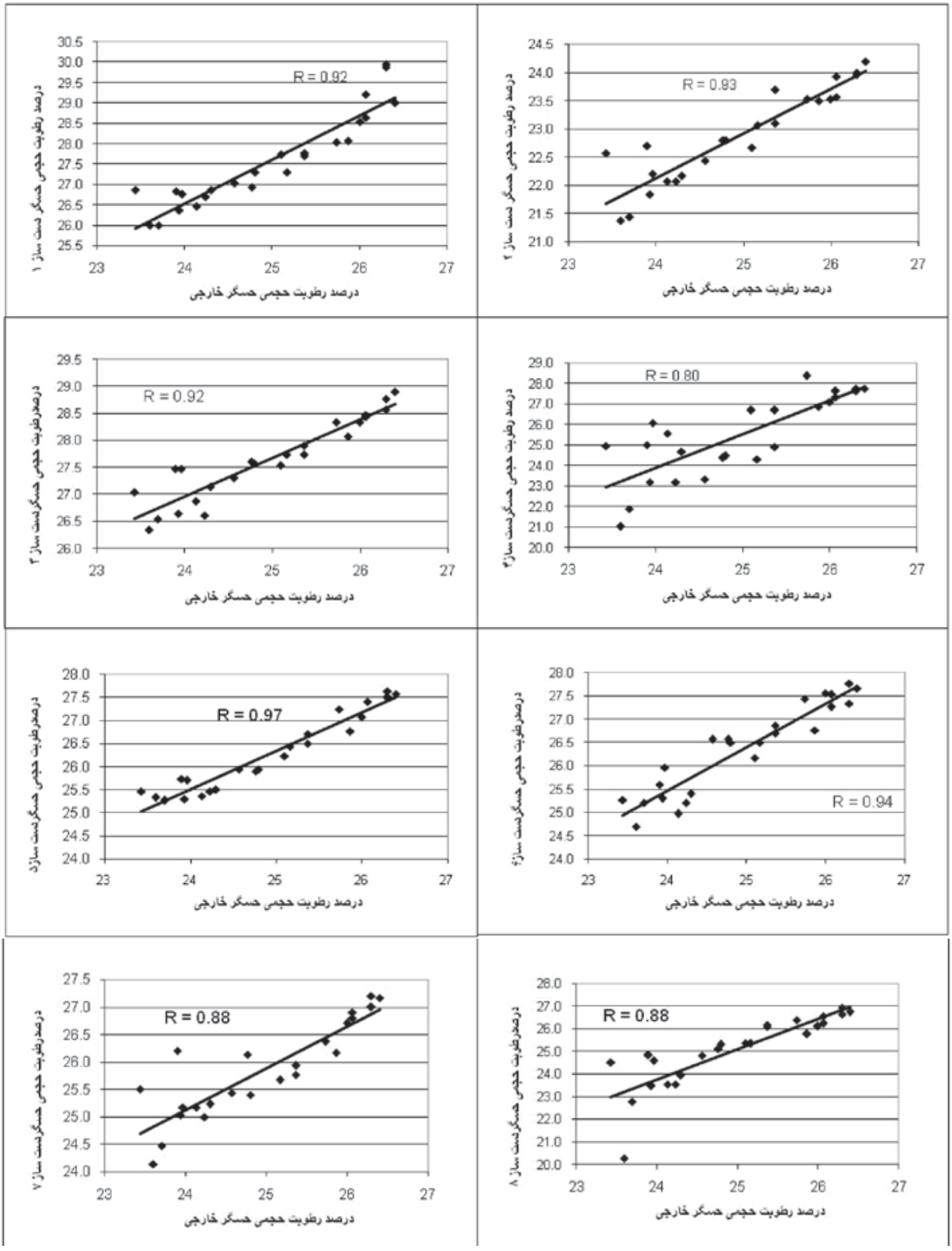
در این پژوهش از دستگاه TDR با مارک TRASE، مدل ٦٠٥٠X١ ، ساخت شرکت Soil Moisture و دارای حسگر تدفینی سه شاخه‌ای با طول ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است. این دستگاه دارای سه پنجره دریافت ۱۰، ۲۰ و ٤٠ نانوثانیه بوده و هشت منحنی تبدیل ثابت دی الکتریک به رطوبت حجمی به وسیله سازنده برای آن تعریف شده است



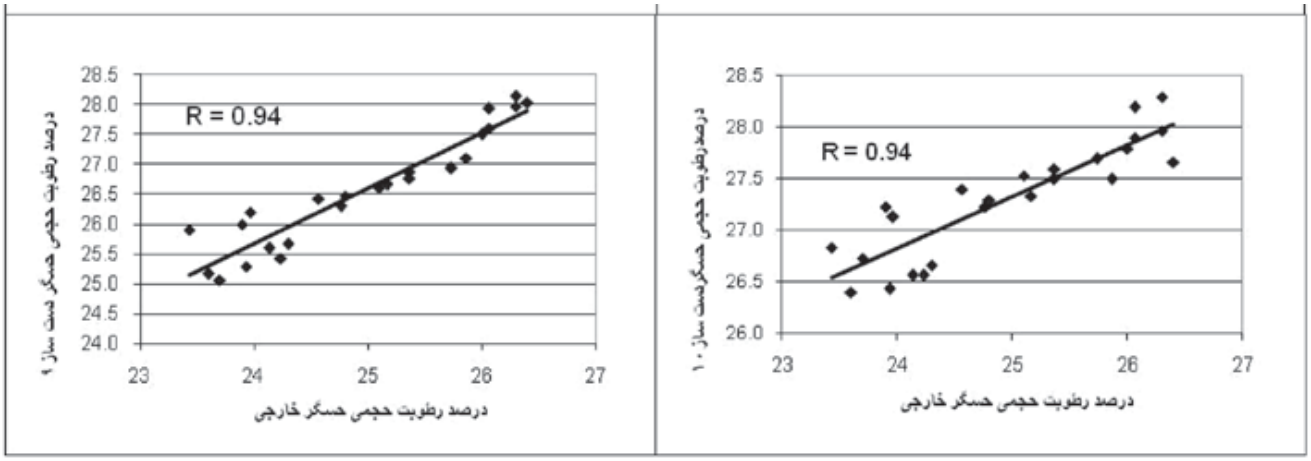
شکل ۱- نمونه حسگرهای TDR ساخته شده برای اندازه‌گیری رطوبت خاک



شکل ۲- نمودار همبستگی داده‌های رطوبت خاک حسگرهای دست ساز



شکل ۳- نمودار همبستگی داده‌های رطوبت خاک حسگرهای دست‌ساز و حسگر خارجی



شکل۳- نمودار همبستگی داده‌های رطوبت خاک حسگرهای دست‌ساز و حسگر خارجی

که مبتنی بر نتایج پژوهشها بر روی خاک‌های مختلف بوده و با نام‌های BUN،CUN، SUN، وFUN در دستگاه ذخیره شده است.

ساخت حسگرهای TDR

در اولین گام از مراحل پژوهش ضمن بکارگیری یک نمونه از حسگر خارجی و تفکیک قطعات آن، اقدام به تحلیل و شناسایی جزییات اتصالات و ترکیب آنها شد. در این مرحله، با ارسال میله‌های حسگر به آزمایشگاه فلزشناختی رازی، اقدام به شناسایی ترکیب و آلیاژ به کار رفته در میله‌ها شد. با توجه به اهمیت جنس استیل در ایجاد مقاومت در مسیر عبور جریان و همچنین ایجاد مقاومت فلزشناختی در برابر خوردگی، تغییر جنس و در نتیجه مقاومت تشعشعی،تحلیل آنها ضروری به نظر می‌رسید.

با آگاهی از ترکیب قطعات یاد شده و نحوه اتصال میله‌های میانی و کناری و ارتباط آنها با کابل دستگاه و همچنین نتایج تحلیل و تعیین استاندارد میله‌ها، خرید استیل و سایر ملحقات آن نظیر کابل Coaxial و فیش BNC انجام گرفت. جداول (۱) و (۲) نتایج تحلیل میله‌های حسگر خارجی را نشان می‌دهد.

با توجه به ترکیب شیمیایی، آلیاژ مورد استفاده در تولید قطعه میانی حسگر تدفینی با نوع آمریکایی AISI ۳۰۳ تعیین شد که با ترکیب شیمیایی طبق جدول (۳) مطابقت دارد.

در ادامه نیز با توجه به ترکیب شیمیایی، آلیاژ مورد استفاده در تولید قطعه کناری حسگر تدفینی با نوع آمریکایی AISI ۳۰٤ تعیین شد که با ترکیب شیمیایی جدول (٤) مطابقت دارد.

با آگاهی از نتایج تحلیل متالورژی میله‌های حسگرهای خارجی مطابق با جداول (۲) و (۳)، اقدام به تهیه میله‌های استیلی (از ترکیب فلزشناختی) مشابه با نمونه خارجی شد. در این مرحله، چند نمونه استیل تهیه و عملکرد آنها از طریق ثبت رطوبت خاک مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام بررسی‌های متعدد بر روی نمونه‌های مختلف، در نهایت نمونه‌ای که بتواند در ثبت داده‌های رطوبت خاک مشابه نمونه خارجی عمل نماید، شناسایی و تهیه شد. با اتمام این مرحله از بررسی‌ها، مقدمات ساخت چند نمونه حسگر برای انجام واسنجی و بررسی کارایی آن‌ها انجام گرفت شکل (۱).

نمونه‌های مورد بررسی حسگرهای TDR

در انجام این پژوهش تعداد ۱۰ نمونه حسگر TDR با استفاده از استیل‌هایی که از مشخصه‌های لازم در ثبت داده‌های رطوبت خاک برخوردار باشند، ساخته شد. بر این اساس، نمونه‌های یاد شده به عنوان تیمار شماره یک و نمونه خارجی آن به عنوان تیمار شماره دو، در یک نمونه خاک با شرایط طبیعی تحت آزمون قرار گرفت.

اندازه‌گیری رطوبت خاک با حسگر ساخته شده

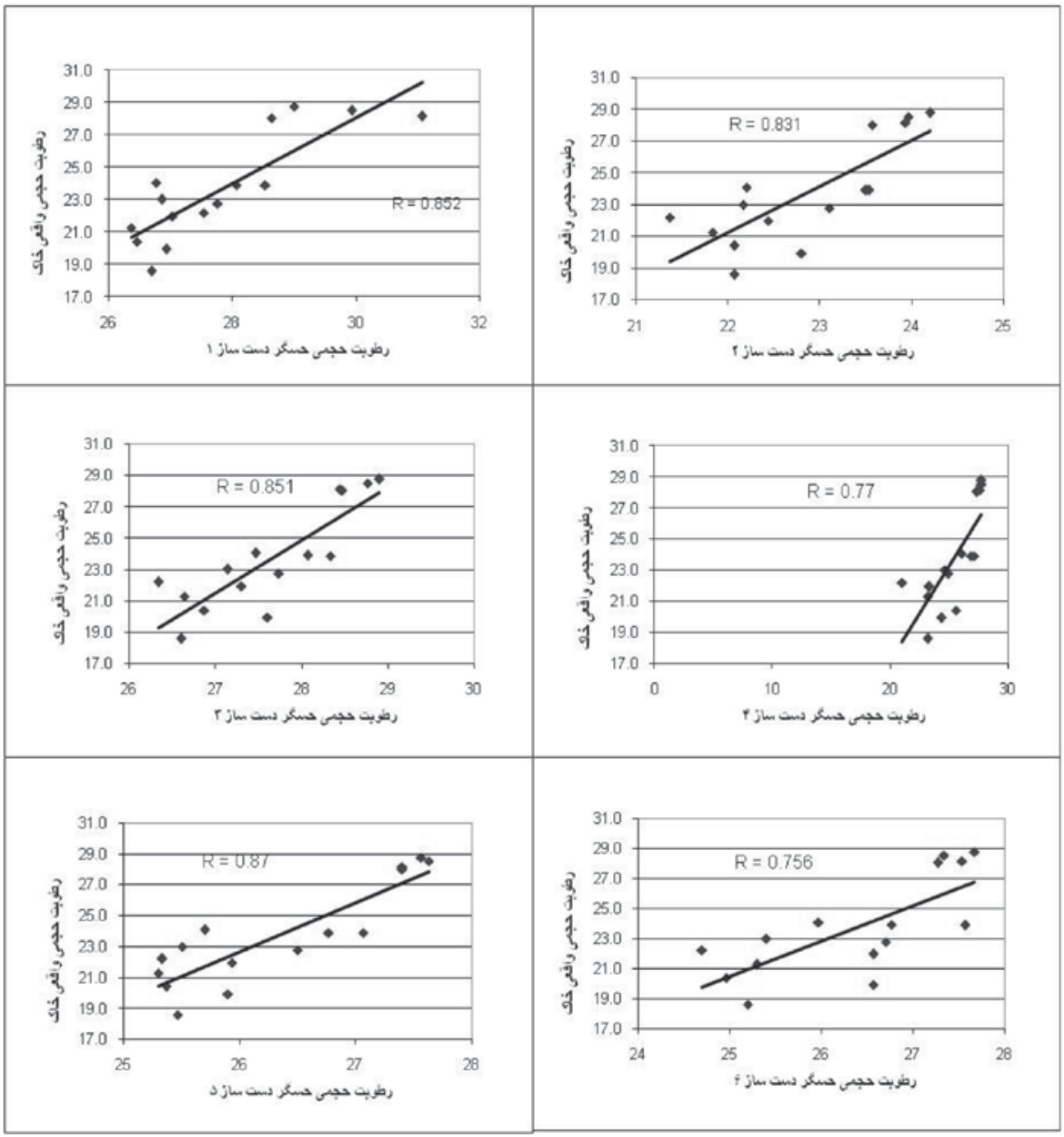
در این مرحله، کلیه حسگرها (ساخته شده و نوع خارجی آن) به طور یکسان در عمق نیم متری از سطح خاک واقع در اراضی مورد نظر نصب شد. با نصب تجهیزات مورد نیاز، عملیات داده‌برداری از حسگرها در طی مدت دو ماه انجام گرفت. در هر بار اندازه‌گیری، قرائت اعداد برای پنجره دریافت ۱۰ نانو ثانیه و در هر منحنی تبدیل (BUN)، برای حسگر تدفینی یادداشت شد.

تعیین رطوبت خاک با استفاده از روش وزنی

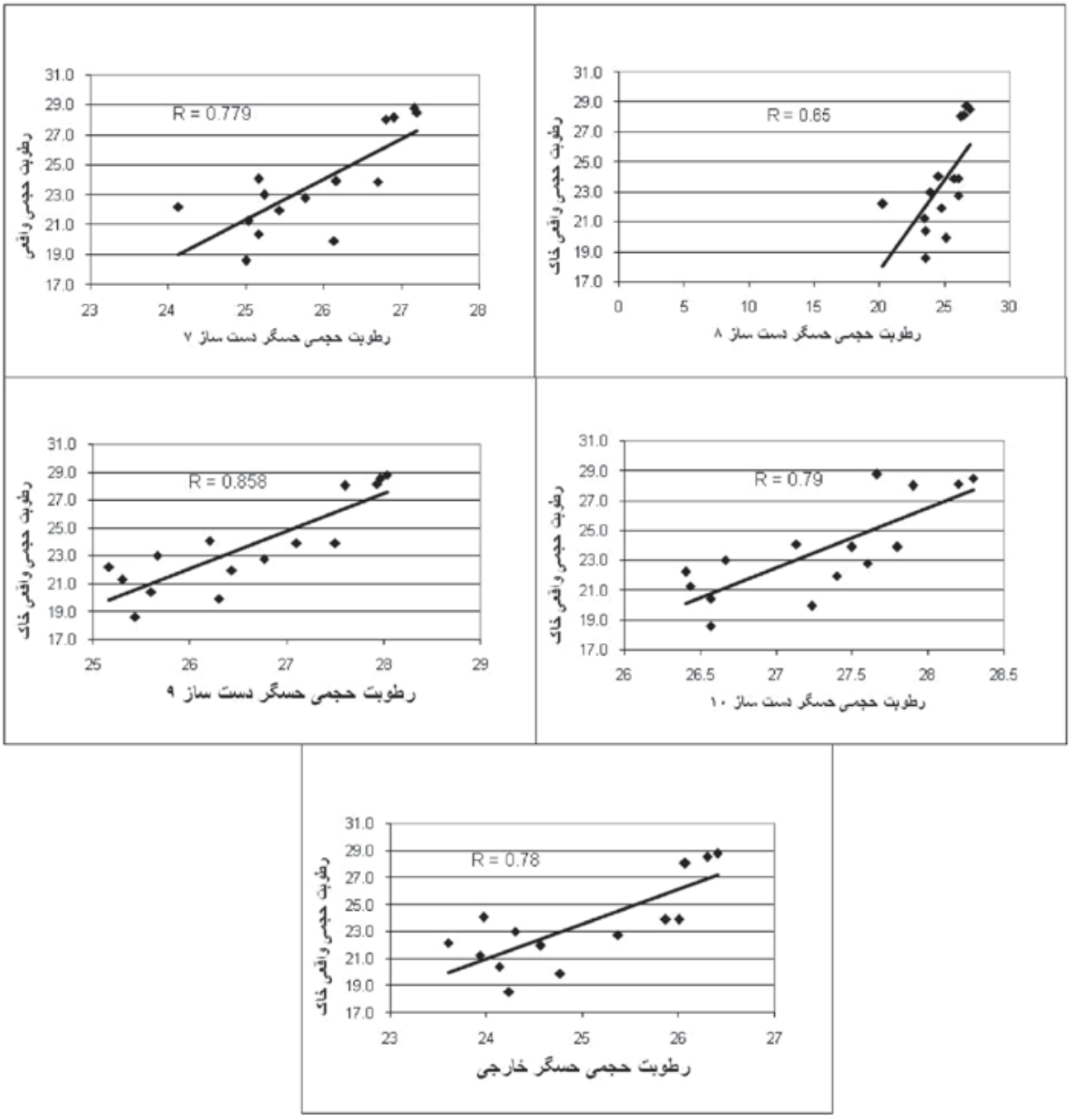
در این مرحله، برای ارزیابی دقت حسگرها، اقدام به نمونه‌برداری از خاک و تعیین رطوبت آن شد. این آزمایش در خاکی با بافت Sandy loam انجام گرفت. هم‌زمان با داده‌برداری از رطوبت خاک با استفاده از TDR، اقدام به ثبت داده‌ها گردید.

نمونه خاک از عمق معادل طول میله هر یک از حسگرها با استفاده از مته خاک صورت گرفت و مقدار رطوبت با روش توزین اندازه‌گیری شد. این کار با ۲۰ نوبت داده برداری ادامه یافت. چگالی ظاهری هر یک از نمونه‌های خاک، بعد از پایان این مرحله هر یک با سه تکرار از روش sand bottle [۱] و در همان عمق اندازه‌گیری شد تا برای تبدیل رطوبت وزنی به رطوبت حجمی مورد استفاده قرار گیرد.

از مقایسه رطوبت‌های اندازه‌گیری شده به وسیله حسگرها با روش نمونه برداری و توزین، اعتبار سنجی صورت گرفت.



شکل ٤- نمودار همبستگی داده‌های رطوبت خاک حسگرهای دست ساز و خارجی با درصد رطوبت حجمی



ادامه شکل ٤- نمودار همبستگی داده‌های رطوبت خاک حسگرهای دست ساز و خارجی با درصد رطوبت حجمی

تجزیه و تحلیل نتایج

نتایج حاصل از حسگرهای دست ساز

مقایسه درصد رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده حسگرهای دست ساز در پنجره برداشت ۱۰ نانوثانیه در شکل (۲) نشان داده شده است. بررسی آماری ضرایب همبستگی (R) و روند نزولی رطوبت حجمی حسگرهای دست‌ساز نشان می‌دهد که داده‌های حاصله، همزمان با کمتر شدن رطوبت خاک در طول زمان، از روند کاهشی برخوردار می‌باشند.

مقایسه نتایج حسگرهای دست‌ساز با حسگر خارجی

مقایسه ضرایب همبستگی و معادلات همبستگی بین میانگین درصد رطوبت حجمی حسگرهای دست‌ساز و خارجی بیانگر صحت اعتبار اکثر حسگرهای دست ساز می‌باشد. بررسی نتایج بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS و آزمون Paired Samples Test نشان می‌دهد که با ۹۹ درصد اطمینان بین داده‌های رطوبت برداشت شده به وسیله حسگرهای دست ساز و نمونه خارجی اختلاف معنی دار وجود ندارد. در این میان، حسگرهای شماره ٤ و ۸ اختلاف

معنی دار نشان دادند. بررسی‌های انجام شده بر روی داده‌های این دو حسگر نشان می دهد با حذف یکی از داده‌های پرت که می تواند ناشی از خطا در اندازه‌گیری باشد، این دو حسگر نیز فاقد اختلاف معنی دار می شوند. مقایسه درصد رطوبت حجمی حسگرهای دست ساز با حسگر خارجی در پنجره برداشت ۱۰ نانو ثانیه در شکل (۳) نشان داده شده است.

مقایسه نتایج حاصل از حسگرهای دست ساز با درصد رطوبت وزنی

مقایسه ضرایب همبستگی و معادلات همبستگی بین میانگین درصد رطوبت حجمی حسگرهای دست‌ساز و خارجی با رطوبت وزنی بیانگر صحت اعتبار اکثر حسگرهای دست‌ساز می‌باشد. بررسی نتایج بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS و بکارگیری آزمون t نشان می‌دهد که با ۹۹ درصد اطمینان بین داده‌های رطوبت اندازه‌گیری شده با حسگرهای دست‌ساز و نمونه‌های اندازه‌گیری شده به روش وزنی اختلافی وجود ندارد. مقایسه درصد رطوبت حجمی حسگرهای دست‌ساز و خارجی با رطوبت وزنی در پنجره برداشت ۱۰ نانوثانیه در شکل (٤) نشان داده شده است.

نتیجه گیری

در حال حاضر استفاده از حسگرهای خارجی TDR به لحاظ قیمت بسیار بالا و عدم توانایی خرید آن به وسیله سازمان‌ها و موسسات علمی، با مشکل مواجه است. این موضوع موجب شده تا علیرغم دقت بالا و سهولت داده برداری از رطوبت خاک به وسیله دستگاه یاد شده، امکان بهره‌گیری از آن بسیار محدود گردد. با این وجود نتایج پژوهش حاضر شرایط بسیار امیدوار کننده‌ای را برای پژوهشگران کشور فراهم نموده است.

بررسی روابط همبستگی بین رطوبت حجمی و حسگرهای دست‌ساز نشان داد که حساسه‌های دست ساز ٤، ٦ و ٨ همبستگی پایین‌تری با داده‌های حاصل از رطوبت وزنی داشته و بقیه دارای همبستگی تا حدود بالایی می‌باشند. تغییر محل نمونه‌برداری دستی در هر برداشت و برداشت نمونه خاک از عمق سطحی می‌تواند دلایل خطای اندازه‌گیری رطوبت وزنی باشد.

تحلیل نتایج حاصل از دو روش اندازه‌گیری رطوبت خاک بیانگر توانایی قابل توجه نمونه حسگر ساخته شده در مقایسه با نمونه خارجی آن می‌باشد. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد کلیه نمونه‌های دست ساز، در مقایسه با نمونه خارجی، نتایج بسیار مطلوبی در بر داشته است.

مطابق نتایج این پژوهش، روابط همبستگی بین میانگین درصد رطوبت حجمی حسگرهای دست ساز و حسگر خارجی، برای واسنجی حسگرهای ساخته شده توصیه می‌شود. نکته قابل توجه در این پژوهش آن است که دقت اندازه‌گیری 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 می‌دهد. به عبارت دیگر، حساسیت اندازه‌گیری بیش از آن که به بافت خاک و تراکم مربوط باشد، به نحوه صحیح کارگذاری حسگرها و دانستن رقم دقیق چگالی ظاهری ارتباط دارد.

منابع

1- Aflaki, A. 1995. Soil Mechanic Laboratory, Parhan Publication. Tehran, Iran. p.160.

2- Alizadeh, A. 2004. Water, Soil& Plant, Relationships, Emam Reza pub. Mashhad, Iran P. 470.

3- Davis, J.L. and Annan, A.P. 1977. Electromagnetic detection of soil moisture progress report I. Can. J. Remote Sensing, 3: 76-86.

4-Davis, J.L. and Chudobiak, W. J. 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- Eskandari, Z. and Bahmanpour, M. 2003. Determination of Electrical Conductivity soil and water by TDR, Proc. of the 3th national Conference on ABKHANDARI. Tehran, Iran. Pp:2-14.

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

7-Hook, W.R., Livingston, N.J., Sun, Z.J. and Hook, P.B. 1992. Remote diode shorting improves measurement of soil water time domain reflectometry. Soil Science Society of American Journal, 56: 1384-1391.

8-Inoue, Y., Watanabe, T. and Kitamura. K. 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.

9- Kamalie, K., Rahimzadeh, H., Mahdian, M.H., Jalali, N. and Safari, N. 2006. Investigation on Manufactory of the TDR Burials Waveguides and Evaluation of their Application in SoilMoisture

Estimation. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. Final report. 1-30.

10- Pakparvar, M. and Mansouri, Z. 2003. Assessment of Correlation of Soil moisture properties of Floodwater spreading's Soils by Using TDR, Proc. of the 3th national Conference on ABKHANDARI. Tehran, Iran. 15-26.

11-Serrarens, D., MacIntyre, J.L., Hopmans, J.W. and Bassoi, L.H. 2000. Soil moisture calibration of TDR multilevel probes , Scientia. Agricola, 57(2): 349-357.

12- Sotodenia, A., Mirlotfi, Y.M., Mahdian, M.H. and Rzzaghi, J. 2001. Comparison of PVC and TECHANAT Tubes for measuring by TDR, Journal of Agricultural Engineering Research, Iranian Agri. Eng. Res. Institute. vol.2, no.7, pp; 79-87.

13-Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. 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.

14-Vanclooster, M., Gonzalez, C., Vanderborgh, J., Mallants. D. and Diels, J. 1994. An indirect calibration procedure for using TDR in solute transport studies. Soil Science Society of American Journal, 3: 107-127

15-Western, A., Duncan, M., Olszak, C., Thompson, J., Anderson, T. and Young, R. 2002. Calibration of CS615 and TDR instrument For Marhurangi, Tarrawarra and Point Nepean Soils.