

# خطای اندازه‌گیری دراز مدت رطوبت خاک با استفاده از TDR در عرصه پخش سیلاب استان زنجان

علی رضائی<sup>۱</sup>، استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی زنجان

پذیرش مقاله: ۱۳۸۸/۰۴/۱۱

دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۱۱/۰۵

## چکیده

توزیع زمانی و مکانی رطوبت خاک در محدوده توسعه ریشه گیاهان، یکی از عوامل اثر گذار در انتخاب نوع گونه‌های گیاهی و بررسی‌های توازن آبی است. یکی از روش‌های جدید در اندازه‌گیری رطوبت روش انعکاس سنجی حوضه زمانی است که اصطلاحاً روش TDR نام گرفته است. در راستای این موضوع، دقت اندازه‌گیری و منشاء خطاهای حاصل از نصب دراز مدت حس‌گرها در عرصه پخش سیلاب زنجان، مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. به این منظور، شش پروفیل در عرصه پخش سیلاب و دو پروفیل در عرصه غیر پخش سیلاب (شاهد) تا عمق ۱/۵ متری حفر شده و جمعاً ۳۶ عدد حس‌گر تدفینی در عمق‌های مختلف جای‌گذاری و به مدت دو سال با فواصل زمانی یک هفته، اندازه‌گیری رطوبت انجام شده است. تجزیه و تحلیل سری داده‌ها، از نظر زمانی و مکانی حاکی از افزایش تعداد داده‌های گم شده از سال اول به دوم به دلیل شستشوی املاح و از ضلع غربی به طرف ضلع شرقی، به دلیل تمرکز زیاد آب در آن قسمت بوده است. دسته‌بندی داده‌ها در سه دوره زمانی تقریباً ۷۰ روز در هر لایه و برای هر سال، نشان می‌دهد که درصد داده‌های گم‌شده با گذشت زمان و کاهش توام رطوبت خاک، در سال دوم نسبت به سال اول، روند افزایشی داشته است. عامل اصلی پیدایش خطا، شستشوی خاک از اطراف میله‌های هادی موج الکترومغناطیس حس‌گرها و افزایش تعداد حفره‌ها و فاصله در سطح مشترک میله‌ها و خاک بوده است.

واژه‌های کلیدی: پروفیل خاک، حس‌گر، دقت اندازه‌گیری، زمانی و مکانی، صحت

## مقدمه

اندازه‌گیری رطوبت خاک یکی از اقدامات ضروری برای انجام تحقیقات مربوط به تبیین روابط آب، خاک و گیاه و پایش هیدرولوژیکی و خاک در ایستگاه‌های تحقیقاتی پخش سیلاب است. اندازه‌گیری دقیق‌تر این عامل منجر به تجزیه و تحلیل بهتر روابط فیزیکی و تغییرات به‌وجود آمده، خواهد شد. اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی توده خاک به وسیله TDR یک روش جدید برای اندازه‌گیری سریع رطوبت و شوری خاک است (Dalton, ۱۹۹۲). در حال حاضر از این فن‌آوری برای اندازه‌گیری رطوبت در محیط متخلخل نظیر خاک در سطح وسیع استفاده می‌شود (Ferre و Topp, ۲۰۰۰). استفاده از این روش، جمع‌آوری داده‌های رطوبت از عرصه‌های پخش سیلاب را آسان‌تر می‌نماید. هر چند که در بعضی از ایستگاه‌های پخش سیلاب، شرایط رطوبتی اشباع طولانی مدت، افزایش شوری با گذشت زمان، تمرکز سنگ‌ریزه در لایه‌های زیرین و نیاز به جمع‌آوری چندساله داده‌های رطوبت خاک، عمل کرد دستگاه را دچار اختلال می‌سازد. عموماً صحت سنجی دستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت در شرایط آزمایشگاهی و به‌روش خشک و توزین نمودن، انجام گرفته و کارکرد دستگاه‌ها در شرایط مزرعه و برای طولانی مدت کمتر مورد بررسی قرار گرفته است (Walker و همکاران، ۲۰۰۴).

برای صحت‌سنجی عمل کرد TDR، تحقیقاتی در داخل و خارج کشور انجام گرفته است. از جمله برای آگاهی از کارکرد دستگاه TDR، پاک‌پرور و منصور (۱۳۸۲) در شرایط اندازه‌گیری طولانی مدت رطوبت خاک با بافت‌های

<sup>۱</sup> rezaei\_ali2000@yahoo.com

لوم، لوم شنی و شنی لوم سنگ‌ریزه‌دار، با استفاده از حس‌گر تدفینی<sup>۱</sup>، اندازه‌گیری رطوبت به‌مدت سه ماه و به‌صورت روزانه را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که رابطه همبستگی بین میزان درصد رطوبت اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR و مقادیر واقعی رطوبت اندازه‌گیری شده، از نظر آماری ضعیف است. در صورتی که با دخالت وزن مخصوص ظاهری خاک و کارگذاری صحیح حس‌گرها نتایج حاصله بهبود یافته است. در بررسی دیگری تغییرات ثابت دی‌الکتریک را نسبت به تغییرات رطوبت، برای ۱۱ نوع خاک با مقدار رس متفاوت و سه نوع پودر کانی خالص بررسی کرده و نشان داده‌اند که ضرایب معادله محاسبه‌کننده مقدار رطوبت، در خاک‌های با کانی‌های آب‌دوست (نظیر پالی گورسکایت) با خاک‌های با کانی‌های غیرآب‌دوست متفاوت است. اما تغییر مقدار رس تاثیر چشم‌گیری بر ضرائب معادله ندارد (Dirksen و Desberg، ۱۹۹۳).

در کشور ایتالیا پروفیل رطوبتی در سه منطقه جداگانه با استفاده از دستگاه TDR به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شده و دریافته‌اند که نوسانات رطوبتی روزانه اندازه‌گیری شده، دارای دامنه تغییرات زیادی است و این اتفاق ناشی از تغییر در اندازه رطوبت نبوده بلکه متأثر از نوسانات درجه حرارت است (Menziari و همکاران، ۲۰۰۲). هر چند Huisman و همکاران (۲۰۰۱) در ارتباط با همین موضوع اعلام می‌کنند که رابطه همبستگی قوی بین مقدار درصد رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری شده با روش وزنی (آزمایشگاهی) و با دستگاه TDR وجود دارد. Sparks و همکاران (۲۰۰۱) برای بررسی امکان اندازه‌گیری مقدار رطوبت ساقه یک نوع درخت سوزنی برگ، از دستگاه TDR استفاده نموده و با مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده به‌صورت وزنی مقایسه کرده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که درصد رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR در سطح خطای ۵٪، حدود ۳٪ کم‌تر از مقدار واقعی است که این ایراد هم به‌دلیل عدم جای‌گذاری حس‌گرها در همه درختان است.

با توجه به مشکل بودن جای‌گذاری حس‌گرها برای اندازه‌گیری رطوبت سطحی خاک در یک سطح وسیع، تلاش‌هایی برای تغییر نوع حس‌گر به‌عمل آمده است. از جمله آن‌ها می‌توان به حس‌گرهای جدیدی اشاره کرد که با قرار دادن در تماس با سطح خاک، مقدار رطوبت را اندازه‌گیری می‌نمایند. در تحقیقی که به‌وسیله Inou و همکاران (۲۰۰۱) در رابطه با مقایسه دقت این حس‌گرهای جدید با حس‌گرهای اصلی (نوع میله‌ای) در چهار نوع خاک متفاوت انجام گرفته، نشان داده است که حس‌گرهای اصلی دارای ضریب همبستگی ۰/۹۲۱ و ریشه میانگین مربع خطای ۵/۰۸ در مقایسه با مقدار واقعی رطوبت بوده و در سطح یک درصد خطا معنی‌دار هستند. ضمناً وجود پراکندگی (واریانس) در داده‌های مربوط به TDR، شاید ناشی از تغییرات بافت خاک (ذرات ماسه)، شوری خاک، معادله واسنجی و نحوه کارگذاری حس‌گرها باشد. سه نوع حس‌گرهای سطحی جدید نیز برای اندازه‌گیری رطوبت در عمق‌های ۱۰-۲۰، ۱۰-۳۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متر آزمایش شده و دقت آن‌ها نیز در سطح یک درصد خطا مورد ارزیابی قرار گرفته است. نظر به راه کار اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از دستگاه TDR و مشابهت آن با روش استفاده از امواج راداری دریافته‌اند که با استفاده از معادله ریاضی واسنجی شده برای دستگاه TDR میزان رطوبت به‌وسیله امواج راداری نیز قابل تعیین است (Huisman و همکاران، ۲۰۰۱). یکی از موارد مورد بحث در دقت اندازه‌گیری به‌روش TDR، تعیین نقطه شروع اندازه‌گیری زمان بر روی منحنی مربوطه است. از جمله در پژوهش‌های Robinson و همکاران (۲۰۰۳) این نقطه شروع را کمی جلوتر از نقطه اوج منحنی می‌دانند و معتقدند که در صورت در نظر گرفتن نقطه اوج منحنی، مدت زمان حرکت موج در طول میله هدایت‌کننده موج الکترومغناطیس بیش‌تر شده و در نهایت میزان اندازه‌گیری دی‌الکتریک محیط افزایش خواهد یافت. مقایسه‌ای بین دقت اندازه‌گیری دستگاه‌های رطوبت‌سنج از نظر کمی و کیفی در مدت دو سال و در شرایط مزرعه شامل دستگاه‌های Virribe، انعکاس سنج کمپیل CS615 و رطوبت خاک TRASE با حس‌گرهای از نوع تدفینی و اتصالی<sup>۲</sup> به انجام رسیده است. در این مقایسه، نتیجه اندازه‌گیری با دستگاه‌های رطوبت سنج مختلف با نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل ساده توازن آبی و مدل مبتنی بر معادله ریچارد

<sup>۱</sup> Burable

<sup>۲</sup> Connector

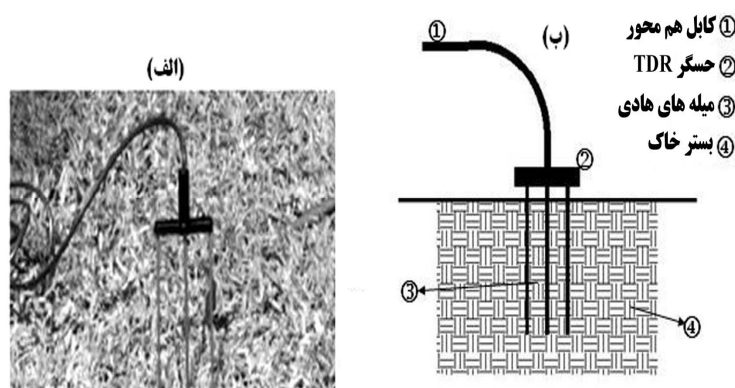
مقایسه شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد حس‌گر از نوع اتصالی دارای خطای رطوبت درصد حجمی به‌علاوه یا منهای ۲/۵ درصد در مقایسه با روش آزمایشگاهی خشک کردن و با استفاده از معادله استاندارد دستگاه است. در مقایسه با مدل توازن آبی، روش‌های Virribe و حس‌گر تدفینی تغییرات رطوبت خاک را بیش‌تر از مقدار باران نفوذ یافته به خاک نشان می‌دهند. همچنین معلوم شده است که اندازه‌گیری با انعکاس سنج CS615 در دوره اشباع خاک از نظر فیزیکی به‌دلیل نشان دادن حجم بیش‌تر از حجم خلل و فرج خاک غیر ممکن است و حس‌گر تدفینی به‌طور مرتب حدود ۱۰٪ رطوبت حجمی را کم‌تر از نوع Virribe نشان می‌دهد. نتیجه نهائی آن‌که دقت اندازه‌گیری حس‌گر اتصالی از همه آن‌ها بهتر است (Walker و همکاران، ۲۰۰۴).

هدف این تحقیق بررسی کارآیی روش اندازه‌گیری رطوبت با دستگاه TDR (نوع TRASE مدل 6050X1) و با حس‌گر تدفینی در شرایط رطوبتی اشباع و غیر اشباع در مدت زمان طولانی در عرصه پخش سیلاب زنجان است. لذا انجام این تحقیق می‌تواند در به‌کارگیری صحیح TDR و پی بردن به منشأ خطاها، مؤثر واقع شود.

**دستگاه TDR:** اساس کارکرد دستگاه TDR استفاده از سرعت حرکت امواج الکترومغناطیس در طول خطوط موازی و هادی جریان برق است. سرعت حرکت موج (پالس)، تابعی از نوع موادی است که خطوط (میله) هادی را احاطه کرده و در تماس با آن است. در صورت وجود ناپیوستگی (قطعی) در میله هادی و یا مواد احاطه‌کننده آن، بخشی از انرژی ارسالی برگشت داده می‌شود. در واقع میله‌های هادی به‌مانند چاهی هستند که در انتهای آن یک آئینه‌ای قرار گرفته است و پس از تابیدن موج انرژی به آن انعکاس داده می‌شود. با توجه به ثابت دی‌الکتریک هر ماده (احاطه‌کننده و در تماس)، به‌نظر Soil Moisture Equipment Corp (۱۹۸۹) سرعت حرکت موج در طول میله هادی متفاوت خواهد بود. هر قدر ثابت دی‌الکتریک محیط زیاد باشد، باعث کندشدن سرعت حرکت موج الکترومغناطیس در میله شده و زمان رسیدن موج از ابتدای میله تا انتها را افزایش خواهد داد و همین پدیده معیاری برای اندازه‌گیری رطوبت در خاک است (شکل ۱ و معادله ۱).

$$k_a = \left( \frac{tC}{L} \right)^2 \quad (1)$$

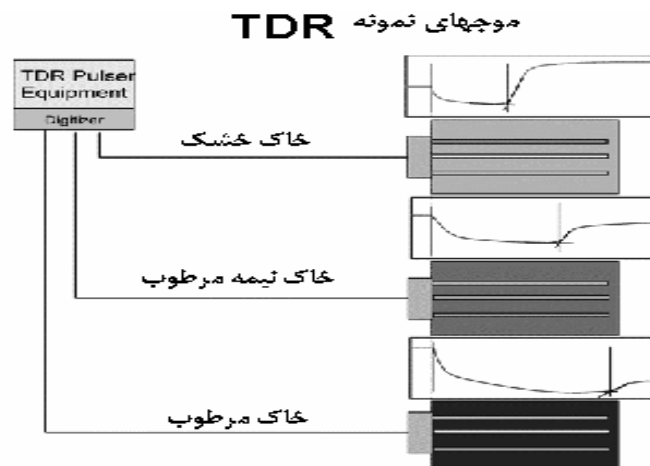
که در آن،  $k_a$  ثابت دی‌الکتریک ظاهری (مخلوط خاک و رطوبت)،  $t$  زمان حرکت موج الکترومغناطیس از ابتدا تا انتهای میله هادی (نانو ثانیه)،  $C$  سرعت حرکت نور (سانتی‌متر بر نانو ثانیه) و  $L$  طول میله‌های (سانتی‌متر) است.



شکل ۱- (الف) حس‌گر تدفینی، (ب) حس‌گر اتصالی

از آنجا که میزان ثابت دی‌الکتریک برای خاک خشک (مواد معدنی) در حدود ۲-۴، برای هوا یک و برای آب برابر با ۸۰ است، لذا تغییرات ثابت دی‌الکتریک محیط خاک تابعی از تغییرات رطوبت خواهد بود. هر چند که همیشه این فرض صحیح نبوده و میزان دی‌الکتریک ظاهری محیط مورد اندازه‌گیری می‌تواند متأثر از وضعیت شیمیائی محیط از جمله هدایت یونی باشد (White و همکاران، ۱۹۹۴). ضمناً در صورت وجود عدم پیوستگی در محیط اطراف و

میله‌های هادی، بخشی از انرژی موج الکترومغناطیس قبل از رسیدن به انتها انعکاس داده می‌شود. نوع حس‌گر مورد استفاده در این تحقیق عبارت از یک چنگال سه شاخه با میله‌های به قطر سه میلی‌متر و طول ۲۰ سانتی‌متر است که به فاصله ۲۵ میلی‌متر از دیگری قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است در صورتی که طول میله از حد معینی (حدود ۱۰۰ سانتی‌متر) افزایش یابد، ممکن است به دلیل استهلاک موج در طول میله و به صفر رسیدن آن، امکان اندازه‌گیری وجود نداشته باشد (Van Ghenuchten و Dalton, ۱۹۸۶). شعاع تاثیر یک موج الکترومغناطیس در طول میله هدایت کننده موج در حدود ۳-۵ سانتی‌متر است (شکل ۲).



شکل ۲- نمونه شکل موج انعکاسی ثبت شده به وسیله دستگاه TDR

## مواد و روش‌ها

**منطقه مورد تحقیق:** ایستگاه پخش سیلاب قره‌چریان در ۳۵ کیلومتری غرب شهر زنجان (منطقه قره‌پشتلو) با طول جغرافیایی  $20^{\circ} 48'$  و عرض جغرافیایی  $55^{\circ} 36'$  واقع شده است. اقلیم این منطقه نیمه‌خشک سرد بوده و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا در حدود ۱۸۰۰ متر است. میانگین دمای سالانه این منطقه ۱۰ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است. میانگین بارندگی سالانه دشت قره‌چریان در حدود ۳۲۰ میلی‌متر بوده که تقریباً ۳۴ درصد آن در بهار، ۳۱ درصد در زمستان، ۳۱ درصد در پاییز و تنها حدود چهار درصد در تابستان نازل می‌شود. سیلاب ورودی به عرصه پخش سیلاب از طریق نهر آبرسان-گسترشی، از طرف ضلع غربی به طرف ضلع شرقی است و بخش زیادی از حجم آب در ضلع شرقی وارد عرصه پخش می‌شود. بر اساس مشاهدات انجام شده در فصل بهار ۱۳۸۱، تنها به دلیل نفوذ آب از کانال آبرسان - گسترشی سطح آب زیرزمینی در منطقه پخش به‌ویژه در ماه فروردین در نزدیکی سطح زمین در نوسان بوده که این شرایط برای هر دو سال آمار برداری (بهار ۸۲ و بهار ۸۳) حاکم بوده است.

**خاک شناسی منطقه مورد تحقیق:** برای آشنائی با شرایط فیزیکوشیمیائی لایه‌ها در هر پروفیل خاک، پس از حفر پروفیل‌ها، لایه‌های خاک تعیین شده و قبل از جای‌گذاری حس‌گرها در محل‌های پیش‌بینی شده، نمونه‌برداری انجام و به آزمایشگاه ارسال شده است (جدول ۱). پروفیل‌های شماره یک تا چهار در ضلع غربی و پنج تا هشت در ضلع شرقی عرصه پخش سیلاب واقع شده‌اند.

## روش تحقیق

روش تحقیق به‌کار گرفته شده به‌طور اجمال به این شرح است که با توجه به وجود تنها یک عدد حس‌گر تدفینی به‌همراه ساخت شرکت سازنده دستگاه، تعداد ۳۶ عدد حس‌گر مشابه به‌وسیله پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری ساخته شده و مورد واسنجی قرار گرفته‌اند. واسنجی در دو محدوده زمانی انجام شده است. مرحله اول عبارت از

اندازه‌گیری حجمی رطوبت در فاصله زمانی حدود یک ساعت در شرایط آب معمولی و گل اشباع در آزمایشگاه بوده است (خاک آن از منطقه آزمایش و از عمق صفر الی ۳۰ سانتی‌متر تهیه شده است).

در مرحله دوم اندازه‌گیری‌های رطوبت برای شرایط گل اشباع، تا مرحله خشک شدن (حدود ۴۵ روز) انجام گرفته است. روش آزمایش مرحله دوم عبارت از جای‌گذاری یک عدد حس‌گر اصلی و یک عدد حس‌گر ساخت داخل در داخل گل اشباع در یک سطل ۱۲ لیتری و اندازه‌گیری روزانه رطوبت حجمی با استفاده از دستگاه و اندازه‌گیری وزن سطل با ترازو بوده است. همچنین با توجه به حجم گل، وزن مخصوص ظاهری محاسبه شده و درصد وزنی رطوبت نیز تعیین شده است. برای بررسی اولیه صحرایی اثر میزان تماس خاک با میله‌های حس‌گر، تعداد ۱۵ عدد از حس‌گرهای ساخته شده به همراه حس‌گر اصلی با برداشتن خاک یک کرت یک متر مربعی به عمق پنج سانتی‌متر جای‌گذاری شده و پس از پوشاندن مجدد آن‌ها با خاک در حدود ۵۰ لیتر آب اضافه شده و بعد از ۲۴ ساعت با استفاده از دستگاه TDR رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده است. پس از اندازه‌گیری رطوبت بلافاصله با پای انسان سطح کرت فشرده شده و مجدداً به همان روش اندازه‌گیری رطوبت انجام یافته است. سپس به تعداد شش عدد پروفیل در عرصه پخش سیلاب و دو عدد در عرصه غیر پخش سیلاب (شاهد) هر یک به عمق ۱/۵ متر حفر شده است. در پروفیل‌های حفر شده، لایه‌های خاک تعیین و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن‌ها مشخص شده است (جدول ۱).

در وسط هر لایه خاک، یک عدد حس‌گر ساخت داخل تعبیه شده است. نحوه جای‌گذاری حس‌گرها با فرو کردن با دست انسان در داخل لایه‌ها صورت گرفت. اما به دلیل سخت بودن لایه‌ها و وجود سنگ‌ریزه زیاد، بنا بر توصیه شرکت سازنده دستگاه، ابتدا خاک محل تعیین شده برای نصب حس‌گرها بیرون آورده شده و پس از الک نمودن آن، گل درست کرده و با برگرداندن آن به محل قبلی، حس‌گرها در موقعیت‌های مورد نظر نصب شده‌اند. حدود سه ماه قبل از شروع اندازه‌گیری رطوبت (بهمن ماه ۱۳۸۱)، حس‌گرها در موقعیت خود نصب شده و برای اطمینان از کارکرد آن‌ها در لحظه نصب، تمام آن‌ها با استفاده از دستگاه TDR آزمایش شدند. به مدت دو سال و با فواصل زمانی یک هفته می‌توان رطوبت خاک با استفاده از دستگاه TDR با اندازه پنجره زمانی ۱۰ نانو ثانیه اندازه‌گیری شده و تمام داده‌ها و پیغام خطای دستگاه (Time measurement failed) ثبت شده است. مدت زمان برداشت داده‌ها از اواسط اردیبهشت لغایت آخر مهر ماه هر سال بوده است. بعد از اتمام سال اول اندازه‌گیری تا حدود عمق ۷۰ سانتی‌متر از اطراف پروفیل‌ها، نمونه برداری خاک به صورت دست خورده انجام گرفته و هم‌زمان در عمق مورد نظر، درصد رطوبت حجمی نیز با استفاده از دستگاه TDR قرائت شده است. در پایان زمان اندازه‌گیری (آخر مهرماه ۱۳۸۳) حس‌گرها به همراه کلوخ بیرون آورده شده و میزان رطوبت (به روش خشک نمودن) و وزن مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شده است.

## نتایج و بحث

بر اساس مشاهده تغییرات سطح آب زیرزمینی در طول دو سال اجرای طرح در عرصه پخش سیلاب، همه‌ساله لایه‌های خاک از پائین به بالا اشباع می‌شوند. مدت اشباع کل لایه‌ها از اسفند ماه تا حدود اواسط خرداد ماه بوده و بعد از آن به تدریج از حالت اشباع خارج می‌شوند. در واسنجی حس‌گرهای تدفینی ساخت داخل برای شرایط مختلف داخل آب معمولی، گل اشباع و گل اشباع تا مرحله خشک شدن در هوای آزاد، مشخص شد که درصد رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با استفاده از حس‌گر تدفینی اصلی در داخل آب معمولی و گل اشباع به ترتیب برابر با ۹۹/۹ و ۳۶ درصد و متوسط ۳۶ حس‌گر داخلی برابر ۹۸/۰۶ و ۳۵/۸ درصد بوده است (جدول ۲). ضمناً با ایجاد تراکم (کوبیدگی) برای تماس بیشتر میله‌های حس‌گر با خاک (اطراف میله) و اندازه‌گیری مجدد رطوبت، درصد ضریب تغییرات (CV) از ۲۹ به شش کاهش یافته است (جدول ۳).

جدول ۱- عمق و ویژگی‌های فیزیکی و شوری لایه‌ها در هر یک از پروفیل‌ها در ضلع غربی ایستگاه قره‌چریان

شماره پروفیل	ضخامت لایه (mm)	عمق حسگرها (cm)	بافت خاک	رطوبت اشباع (درصد وزنی)	وزن مخصوص ظاهری کلوخ ( $g\text{cm}^{-3}$ )	رطوبت اشباع (درصد حجمی)	هدایت الکتریکی ( $EC \times 10^3$ )
۱	۰-۱۵	۸	Loam	۳۴/۳	۱/۵۷	۵۳/۸۵	۰/۹۵
	۱۵-۴۰	۲۸	Clay	۴۵/۴	۱/۶۲	۷۳/۵۵	۰/۶۳
	۴۰-۹۳	۶۷	Clay Loam	۴۲/۱	۱/۴۳	۶۰/۲۰	۰/۷۱
	۹۳-۱۲۳	۱۰۸	Clay Loam	۴۱/۴	۱/۷۶	۷۲/۸۶	۱/۳
	۱۲۳-۱۵۰	۱۴۸	Sandy Loam	۳۵/۱	۱/۴۸	۵۱/۹۵	۲/۷
۲	۰-۱۵	۸	Clay Loam	۳۶/۴	۱/۸	۶۵/۵۲	۲/۵۴
	۱۵-۳۰	۲۸	Clay	۴۲/۲	۱/۶۲	۶۸/۳۶	۲/۳۷
	۳۰-۸۵	۵۸	Clay Loam	۴۳	۱/۶۳	۷۰/۱۰	۲/۸
	۸۵-۱۵۰	۱۵۰	Silty Loam	۵۱/۱	۱/۶۱	۸۲/۲۷	۴/۲۲
۳	۰-۱۵	۸	Clay Loam	۳۷/۲	۲/۰۴	۷۵/۸۹	۲/۰۶
	۱۵-۴۰	۲۱	Clay	۴۵/۲	۱/۷	۷۶/۸۴	۱/۵۸
	۴۰-۱۰۰	۷۰	Clay Loam	۳۱/۴	۱/۵	۴۷/۱۰	۲/۹۱
	۱۰۰-۱۵۰	۱۵۰	Silty Loam	۲۵/۴	۱/۶۸	۴۲/۶۷	۲/۵۸
۴	۰-۱۵	۸	Clay Loam	۳۸/۳	۱/۷۴	۶۶/۶۴	۲/۷۲
	۱۵-۴۵	۲۸	Clay	۵۴/۴	۱/۸۱	۹۸/۴۶	۲/۰۶
	۴۵-۷۵	۶۰	Clay Loam	۴۷/۷	۱/۷۸	۸۴/۹۰	۱/۹۴
	۷۵-۱۵۰	۱۵۰	Silty Loam	۳۱/۴	۱/۸۴	۵۷/۷۷	۲/۸۴
	۱۵-۳۵	۲۵	Clay	۴۵/۴	۱/۶۴	۷۴/۴۵	۱/۲۶
	۳۵-۵۵	۳۵	Clay	۴۷/۵	۱/۶۶	۷۸/۸۵	۰/۶۲
	۵۵-۸۵	۷۰	Loam	۳۶/۷	۱/۵۶	۵۷/۲۵	۰/۸۹
	۸۵-۱۵۰	۱۵۰	Sandy Loam	۲۷/۵	۱/۶۴	۴۵/۱۰	۲/۷۹
۵	۰-۱۰	۵	Clay Loam	۳۷/۹	۱/۶	۶۰/۶۴	۱/۲۳
	۱۰-۴۰	۲۵	Clay	۴۵/۳	۱/۷۵	۷۹/۲۷	۰/۹۳
	۴۰-۶۰	۵۰	Clay	۵۱/۸	۱/۵۹	۸۲/۳۶	۰/۶۲
	۶۰-۱۰۵	۸۸	Clay Loam	۴۳/۴	۱/۵۸	۶۸/۵۷	۲/۵۱
	۱۰۵-۱۵۰	۱۵۰	Sandy Loam	۲۹/۶	۱/۵	۴۴/۴۰	۲/۳۱
۶	۰-۱۵	۸	Clay Loam	۳۹/۹	۱/۹۵	۷۷/۸۰	۱/۰۹
	۱۵-۵۰	۳۳	Clay	۴۶/۹	۱/۷۹	۸۳/۹۵	۱/۲۴
	۵۰-۸۰	۶۵	Loam	۳۷/۱	۱/۶۳	۶۰/۴۷	۲/۰۷
	۸۰-۱۵۰	۱۵۰	Sandy Loam	۲۶/۱	۱/۵	۵۴/۱۵	۲/۴۲
۷	۰-۱۵	۸	Clay Loam	۴۰/۷	۱/۸۱	۷۳/۶۷	۰/۸۴
	۱۵-۴۵	۳۰	Clay	۴۹/۹	۱/۸۶	۹۲/۸۱	۰/۵۱
	۴۵-۷۵	۶۰	Clay Loam	۴۵/۴	۱/۸۳	۹۲/۸۱	۰/۸۰
	۷۵-۱۱۰	۹۳	Sandy Loam	۲۷/۶	۱/۷۹	۴۸/۳۳	۲/۵۷
	۱۱۰-۱۵۰	۱۵۰	Sandy Loam	۲۵/۹	۱/۵۲	۳۹/۳۷	۲/۳۷

نتیجه آزمایش شرایط گل اشباع تا مرحله خشک شدن در هوای آزاد، بیان‌گر این است که با وجود ناچیز بودن رطوبت واقعی، حس‌گر اصلی میزان آن را حدود ۱۰ درصد نشان می‌دهد. همچنین حس‌گر داخلی با وجود دو درصد رطوبت حجمی واقعی، مقدار آن را صفر درصد نشان داد. به عبارت دیگر اختلاف درصد رطوبت حجمی دو حس‌گر با یک‌دیگر در مقایسه با شرایط رطوبت واقعی یک‌سان، در حدود ۱۲ درصد است به طوری که مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده به وسیله حس‌گر اصلی بیش‌تر از مقدار رطوبت واقعی است. داده‌های حس‌گر ساخت داخل دارای ضریب تعیین

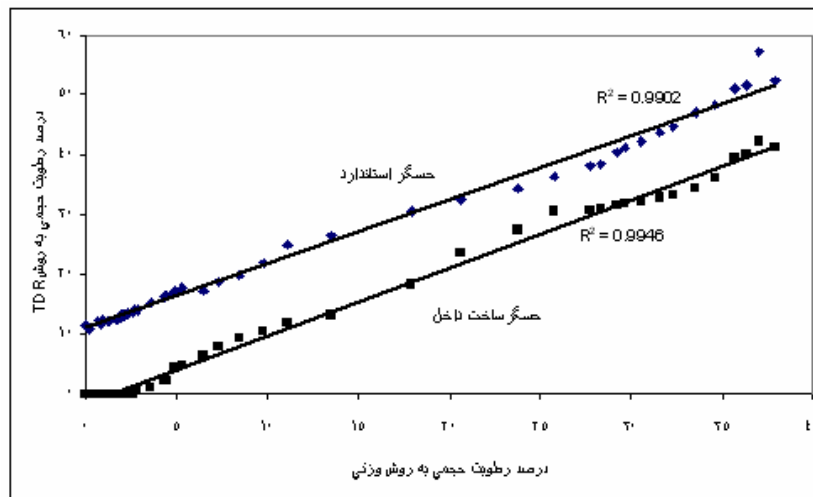
بزرگ‌تری نسبت به حس‌گر اصلی است و در مدت انجام آزمایش، هرگز پیغام خطای "اندازه‌گیری زمان مقدور نشد"<sup>۱</sup>، ملاحظه نشده است (شکل ۳).

جدول ۲- آزمون حس‌گرها در داخل آب معمولی و گل اشباع

حس‌گر اصلی		حس‌گر ساخت داخل					
درصد حجمی رطوبت در گل اشباع		درصد حجمی رطوبت در آب	درصد حجمی رطوبت در گل اشباع		درصد حجمی رطوبت در آب		
-	-	درصد ضریب تغییرات	تعداد	میانگین	درصد ضریب تغییرات	میانگین	تعداد
۳۶	۹۹/۹	۲/۴۶	۳۶	۳۵/۸	۱/۹	۹۸/۰۶	۳۶

جدول ۳- آزمون حس‌گرها در شرایط بدون کوبیدگی و با کوبیدگی

حس‌گر اصلی		حس‌گر ساخت داخل					
درصد رطوبت حجمی بعد از کوبیدگی		درصد رطوبت حجمی قبل از کوبیدگی	درصد رطوبت حجمی بعد از کوبیدگی		درصد رطوبت حجمی قبل از کوبیدگی		
-	-	درصد ضریب تغییرات	تعداد	میانگین	درصد ضریب تغییرات	میانگین	تعداد
۳۰	۹	۶	۱۵	۲۸/۸	۲۹	۹	۱۵



شکل ۳- رابطه درصد رطوبت حجمی به روش وزنی و اندازه‌گیری شده با دستگاه TDR

در اندازه‌گیری رطوبت خاک در صحرا با استفاده از دستگاه TDR و حس‌گرهای ساخت داخل، در مواقعی دستگاه پیغامی مبنی بر "اندازه‌گیری زمان مقدور نشد" ارسال می‌دارد. در چنین مواقعی دستگاه قادر به اندازه‌گیری رطوبت نبوده و این پیغام‌ها تحت عنوان داده‌های گم‌شده ثبت شده و در رابطه با انواع بافت خاک لایه‌ها (جدول ۴) و میزان شوری لایه‌ها در کل پروفیل‌ها (جدول ۵)، دسته‌بندی شده است. برای درک روشن از روند زمانی تغییرات در فراوانی تعداد داده‌های گم‌شده در کل لایه‌ها و ملاحظه اثر کاهش رطوبت در خاک، مدت زمان اندازه‌گیری رطوبت در هر سال

<sup>1</sup> Time measurement failed

به سه دوره زمانی ۱۰ هفته اول، ۱۰ هفته دوم و نه هفته سوم به صورت توالی تقسیم شده و درصد داده‌های گم‌شده استخراج شد. سپس وضعیت تغییرات فراوانی داده‌های گم‌شده در هر سری زمانی نسبت به سری زمانی ما قبل خود به صورت کیفی و به حالت‌های افزایشی، کاهش، ثابت و نامشخص تقسیم شده است. در حالت روند افزایشی در طول سال و در لایه مورد نظر، تعداد درصد داده‌های گم‌شده از سری زمانی ۱۰ هفته اول به سری‌های زمانی ۱۰ هفته دوم و ۹ هفته سوم افزایش پیدا می‌کند. در حالت کاهش بر عکس حالت افزایشی، در حالت ثابت بدون تغییر و در حالت نامشخص، فراوانی داده‌های گم‌شده از سری زمانی اول به سری‌های زمانی بعدی بعضاً افزایش و بعضاً کاهش پیدا می‌کند (جدول ۴)

جدول ۴- فراوانی افزایش و یا کاهش داده‌های گم‌شده در سال ۱۳۸۳ نسبت به ۱۳۸۲ در بافت‌های مختلف خاک

بافت خاک	ضلع غربی			ضلع شرقی			کل		
	افزایش	برابر	کاهش	افزایش	برابر	کاهش	افزایش	برابر	کاهش
رسی	صفر	صفر	۴	۶	صفر	صفر	۶	صفر	۴
رسی لومی	۶	۱	۱	۴	صفر	۲	۱۰	(.۲۱)	(.۸)
لوم	صفر	صفر	۱	۱	صفر	۱	۱	صفر	(.۷۷)
لای لومی	۱	صفر	صفر	صفر	صفر	صفر	۱	صفر	صفر
ماسه‌ای لومی	۲	۱	صفر	۴	صفر	۱	۶	(.۷)	(.۷)
جمع	۹	۲	۶	۱۵	صفر	۴	۲۴	۴	۸

جدول ۵- فراوانی داده‌های گم‌شده سال ۱۳۸۳ نسبت به ۱۳۸۲ برای شوری‌های متفاوت لایه‌ها (دسی‌زیمنس بر متر)

وضعیت شوری خاک	۰-۱	۱-۲	۲-۳	بیش‌تر از ۳
حالت کاهش	(.۵۰)	(.۲۹)	(.۱۷)	-
حالت ثابت	صفر	(.۱۴)	(.۵)	صفر
حالت افزایشی	(.۵۰)	(.۵۷)	(.۷۸)	(.۱۰۰)
کل	(.۱۰۰)	(.۱۰۰)	(.۱۰۰)	(.۱۰۰)

جدول ۶- وضعیت روند زمانی درصد داده‌های گم‌شده در سری‌های زمانی سال‌های مختلف در کل پروفیل‌ها

۱۳۸۳				۱۳۸۲			
نامشخص	ثابت	کاهش	افزایشی	نامشخص	ثابت	کاهش	افزایشی
۱۴	۵	صفر	۸۱	۲۸	۵	۵۶	۱۱

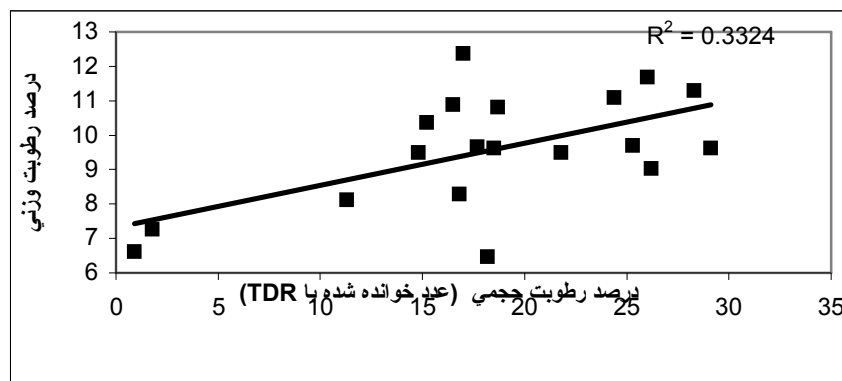
اندازه‌گیری رطوبت در پایان دوره اندازه‌گیری سال اول (آذرماه ۱۳۸۲) به صورت تهیه نمونه‌های دست‌خورده تا عمق حدود ۸۰ سانتی‌متر و تعیین رطوبت آن‌ها در آزمایشگاه به روش خشک کردن و همچنین تکرار آن در آذر ماه ۱۳۸۳ برای کلوخه‌های حاوی حس‌گرها انجام گرفته و مقادیر آزمایشگاهی با مقادیر صحرائی مقایسه شده است



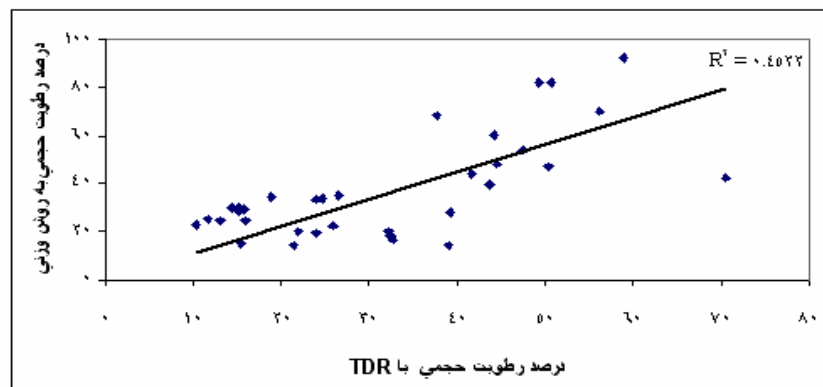
(شکل ۵). میزان ضریب همبستگی برای سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ به ترتیب ۰/۵۷۶، ۰/۶۷۲ بوده و در سطح یک درصد خطا معنی‌دار هستند (شکل‌های ۴، ۵ و ۶).



شکل ۴- نمونه‌ای از کلوخ به‌همراه حس‌گر ساخت داخل



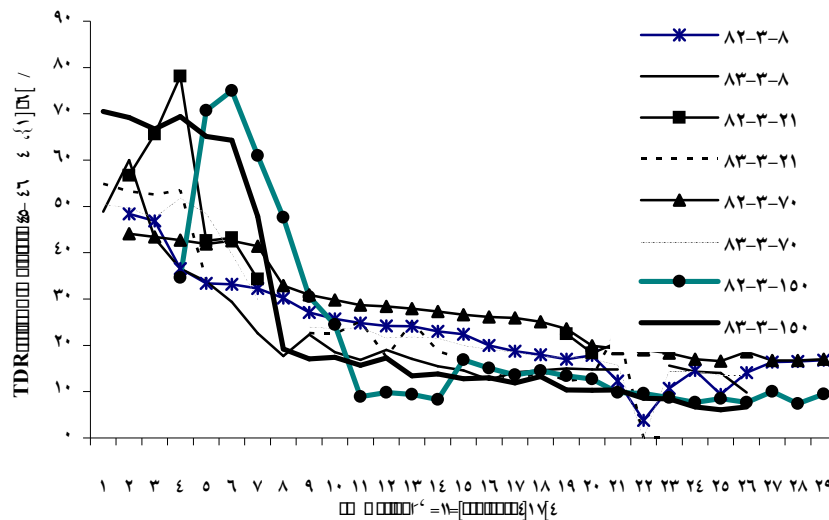
شکل ۵- رابطه رطوبت اندازه‌گیری شده به‌روش وزنی و TDR (سال ۱۳۸۲)



شکل ۶- رابطه رطوبت اندازه‌گیری شده به‌روش وزنی و TDR (سال ۱۳۸۳)

داده‌های اندازه‌گیری شده در هر لایه در بعضی مواقع در توالی زمانی خود، تغییرات شدیدی را در مقایسه با سایر لایه‌ها در همان پروفیل نشان می‌دهند (شکل ۶). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، منحنی تغییرات رطوبتی در عمق

هشت سانتی‌متر، یک‌نواخت‌تر از منحنی تغییرات رطوبتی در عمق ۱۵۰ سانتی‌متر است. در صورتی که قاعدتاً به دلیل اثر پذیری زیاد لایه سطحی از عوامل جوی، باید عکس آن اتفاق می‌افتاد.



شکل ۷- منحنی تغییرات رطوبتی در پروفیل شماره ۳

نتایج آزمون حس‌گرهای ساخت داخل بیان‌گر قابل قبول بودن دقت اندازه‌گیری آن‌ها در مقایسه با نوع استاندارد است. هم‌چنان که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، حس‌گرهای ساخت داخل در مقایسه با نوع اصلی از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و در زمان آزمایش در داخل آب و گل، پیغام "اندازه‌گیری زمان مقدور نشد" اعلام نشده است. لذا به نظر می‌رسد خطاهای اندازه‌گیری‌های صحرائی یعنی داده‌های گم‌شده و نوسان شدید در بعضی از فواصل زمانی، نمی‌تواند ناشی از اشکال فنی در خود حس‌گرهای داخلی باشد. لذا باید علل دریافت پیغام خطای "عدم امکان اندازه‌گیری زمان" و همچنین نوسان شدید در اندازه‌گیری‌ها را (با توجه به عدم تغییر در تنظیمات دستگاه)، تنها ناشی از تغییر شرایط محیطی میله‌های هادی موج الکترومغناطیس دانست. کارخانه سازنده علل خطای مذکور را وجود املاح محلول زیاد یا فشردگی کانی‌های ریز رس مرطوب<sup>۱</sup> در محیط دانسته و برای این شرایط استفاده از حس‌گرهای پوشش‌دار و یا کوتاه را توصیه می‌نماید. شواهد مبنی بر تاثیر شرایط محیطی و همچنین تغییر در آن را می‌توان از جداول ۴ و ۶ استنباط نمود. بر مبنای جدول ۴ درصد داده‌های گم‌شده در ضلع شرقی بیش‌تر از ضلع غربی است. پیدایش چنین اتفاقی ناشی از تمرکز بیش‌تر آب ورودی در این ناحیه است.

برای پی بردن به دلیل تاثیر آب ورودی در افزایش تعداد داده‌های گم‌شده، میزان شوری لایه‌های مختلف مورد توجه قرار داده شد. هم‌چنان‌که از جدول ۵ برمی‌آید، با افزوده شدن مقدار شوری لایه‌ها، درصد داده‌های گم‌شده در آن لایه‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند. به دلیل آن‌که با زیاد شدن میزان شوری در لایه‌ها مقدار بیش‌تری از املاح به خاطر غلظت بالا از خاک شسته شده (بیات‌موحد، ۱۳۷۹) و رابطه چسبندگی میله‌های هادی موج با خاک ضعیف‌تر شده، مسیر ارتباطی میله با خاک اطراف خود به مجموعه‌ای از فضای خالی و مواد جامد تقسیم می‌شود. ضمناً برای اثبات بیش‌تر این موضوع، اطلاعات جدول ۶ قابل توجه است. هم‌چنان‌که از جدول مزبور بر می‌آید، با گذشت زمان میزان داده‌های گم‌شده افزایش پیدا می‌کند. به طوری که درصد داده‌های گم‌شده در سال ۱۳۸۲ (سال اول اندازه‌گیری) برابر با ۱۱ درصد بوده ولی در سال دوم به ۸۱ درصد افزایش پیدا کرده است. برای توجه و توجیه بیش‌تر این یافته، لایه‌های سوم و چهارم پروفیل شماره ۲ که دارای درجه بالای شوری در مقایسه با سایر لایه‌ها هستند، مورد توجه قرار می‌گیرد

<sup>۱</sup> Wet dense fine clays

(جدول ۱). همچنان که از جداول مزبور برمی آید میزان شوری لایه سوم برابر با  $2/8$  و لایه چهارم  $4/22$  دسی‌زیمنس بر متر و تعداد داده‌های گم‌شده در لایه سوم از  $3/4$  درصد در سال اول اندازه‌گیری به  $37/9$  درصد و در لایه چهارم از  $24/1$  درصد به  $75/9$  درصد در سال دوم اندازه‌گیری رسیده است. ضمناً بررسی‌های چشمی هم بیان‌گر پیدایش غیر عادی حفره‌های کوچک در داخل کلوخ حاصل از لایه سوم پروفیل دو (کلوخ لایه چهارم هنگام بیرون آوردن به دلیل پوک بودن خرد شده است) و در نتیجه خالی شدن اطراف میله‌های موج الکترومغناطیس از ذرات جامد شده است (شکل ۸).



شکل ۸- وضعیت پیدایش حفره در داخل کلوخ پس از دو سال

همچنان ذکر شد، شرکت سازنده دستگاه، عدم امکان اندازه‌گیری زمان را تنها در ارتباط با شرایط غیر معمول شامل شوری بسیار زیاد و وجود رس‌های ریز فشرده به دلیل ایجاد اختلال در شکل موج انعکاسی اعلام نموده و به این دلیل نوع پوشش‌دار حس‌گرها را برای این شرایط ساخته است. هر چند که افزایش شوری خاک تنها از حد چهار دسی‌زیمنس بر متر منجر به اضمحلال شدید موج الکترومغناطیس در محیط شده و تعیین نقطه برگشت آن را برای اندازه‌گیری زمان حرکت در طول میله هادی حس‌گر مشکل و یا غیر ممکن می‌سازد (Aringhieri, 2002). با توجه به اینکه چنین شرایطی برای عرصه مورد تحقیق حاکم نبوده ولی پیام‌های دریافتی بیان‌گر چنین حالتی است، لذا عدم چسبندگی کامل مواد اطراف میله هادی موج نیز باید به‌عنوان یکی از عوامل تولید خطا محسوب شود. این عدم چسبندگی کامل خاک با میله‌های هادی موج علاوه بر شست‌شوی املاح، ناشی از نحوه جای‌گذاری میله‌ها برای خاک‌های سنگ‌ریزه‌دار (به‌روش الک کردن و درست کردن گِل) نیز است. در صورتی که میزان رطوبت گِل درست شده زیاد باشد، پس از جای‌گذاری حس‌گرها و پر کردن چاله‌ها (پروفیل‌ها)، بخشی از رطوبت گِل به‌وسیله دیواره‌های کم رطوبت اطراف حفره جای‌گذاری حس‌گرها جذب شده و با کاهش رطوبت عمل انقباض در گِل اتفاق افتاده و با فاصله گرفتن از میله حفرات خالی و با قطر بیش‌تر در اطراف میله‌ها تشکیل می‌شود. همچنین به دلیل تماس گِل اشباع با دیواره‌های عایق رطوبت (سطل پلاستیکی) انقباض آن از اطراف به‌طرف داخل بوده و در نتیجه جدا شدگی میله‌های حس‌گرها از خاک به‌وجود نیامده و در طول دوره زمانی اندازه‌گیری رطوبت، دستگاه هرگز پیغام "اندازه‌گیری زمان مقدور نشد" را اعلام نکرده است (شکل ۳).

نتیجه نهائی آن‌که، پیدایش حفره‌های خالی در اطراف میله‌های حس‌گر تدفینی (به‌هر دلیلی) منجر به عدم امکان تجزیه و تحلیل شکل موج انعکاسی و در نتیجه اندازه‌گیری درست رطوبت به‌وسیله دستگاه TDR خواهد شد. ضمناً لازم است در درست کردن گِل برای جای‌گذاری حس‌گرها در لایه‌های سنگ‌ریزه‌دار، میزان رطوبت گِل در حد ظرفیت نگهداری و یا کم‌تر از آن بوده و دیواره حفره‌ها قبل از پر کردن گِل، مرطوب شود.

## منابع مورد استفاده

۱. بیات‌موحد، ف. ۱۳۷۹. تاثیر پخش سیلاب بر آب قنات‌ها، مطالعه موردی: قنات ایستگاه تحقیقاتی پخش سیلاب بر آبخوان سهرین - قره‌چریان زنجان. دومین همایش دستاوردهای ایستگاه‌های پخش سیلاب، صفحه ۲۰۴-۲۱۰.
۲. پاک‌پرور، م. و ز. منصور. ۱۳۸۲. بررسی همبستگی ویژگی‌های رطوبتی برخی از خاک‌های عرصه پخش سیلاب با اندازه‌گیری‌های دستگاه TDR. سومین همایش آبخوانداری، صفحه ۲-۱۴.
3. Aringhieri, R. 2002. A simple empirical method to evaluate the electrical conductivity of soils and waters by TDR. 17<sup>th</sup> WCSS, Thailand, 821:1-8.
4. Dalton, F.N. and M.Th. Van Genuchten. 1986. The Time Domain Reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, 38:237-250.
5. Dalton, F.N. 1992. Development of Time Domain Reflectometry for measuring soil water content, and bulk soil electrical conductivity. *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*, SSSA Spatial Publication No. 30. Soil Science Society of America, p. 153-159.
6. Dirksen, C. and S. Dasberg. 1993. Improved calibration of Time Domain Reflectometry for soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:660-667.
7. Ferre, P.A. and G.C. Topp. 2000. Time Domain Reflectometry techniques for soil and water content and electrical conductivity measurements. In Baltes, H., W. Goepel and J., Hesse, (Eds.), *Sensors Update 7: Wiley-VCH*, 277-300.
8. Huisman, J.A., C. Sperl, W. Bouten and J.M. Verstraten. 2001. Soil water content measurements at different scales: Accuracy of Time Domain Reflectometry and ground-penetrating radar. *J. Hydrol. (Amsterdam)*, 245:48-58.
9. Inoue, Y., T. Watanabe and K. Kitamura. 2001. Prototype Time Domain Reflectometry probes for measurement of moisture content near the soil surface for application to "on-the-move" measurements. *Agricultural Water Management*, 50:41-52.
10. Menziani<sup>1</sup>, M., S. Pugnaghi and R. Santangelo. 2002. TDR soil moisture data measured in different soils. *Hydrology Days*, 157-167.
11. Robinson, D.A., M. Schaap, S.B. Jones, S.P. Friedman and C.M.K. Gardner. 2003. Considerations for improving the accuracy of permittivity measurement using Time Domain Reflectometry: Air-Water Calibration, Effects of Cable Length. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67:62-70.
12. Soil Moisture Equipment Corp. 1989. Trase System Operating Instructions. Soil Moisture Equipment Corp., 54p.
13. Sparks, J.P., G.S. Campbell and R.A. Black. 2001. Water content, hydraulic conductivity and ice formation in winter stems of *Pinus contorta*: a TDR case study. *Oecologia*, 127:468-475.
14. Walker, J.P., G.R. Willgoose and J.D. Kalma. 2004. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *Journal of Hydrology*, 293:85-99.
15. White, I., J.H. Knight, S.J. Zegelin and G.C. Topp. 1994. Comments on considerations on the use of Time Domain Reflectometry (TDR) for measuring soil water content. *Eur. J. Soil Sci.*, 45:503-508.

## Soil moisture measurement error by TDR in Zanjan's flood spreading station

Ali Rezaei<sup>1</sup>, Assistant Professor, Agricultural and Natural Resources Research Center, Zanjan, Iran

Received: 24 January 2009

Accepted: 01 July 2009

### Abstract

The TDR device is implicating to monitor soil and hydrology of flood spreading stations all over the country. Along this concept, the surveying of errors that caused by long-term installation of sensors, have been realized in Zanjan flood spreading station. For this purpose, six profiles in flood spreading and two others in non flood spreading area have been dug with 1.5 m depth and totally 36 bury able sensors installed in different layers. The soil moisture was determined along two years with time interval of one week. The results show some interruptions in the data time series that caused by the device's message of "time measurement failed". The temporal and spatial analyses of data series, state increasing of missed data from primary to second year because of leaching and from west to east zone for the reason of high volumetric concentration of water in that area. With dividing the data collection period to three nearly 70 days periods at every layer indicated that, the percent of missed data increased twin along with time and declination of moisture. The main source of error is leaching the particles around the electromagnetic guide rods of sensors and adding to the pores and interfacial distance of rods and soil particles.

**Key words:** Accuracy, Measurement accuracy, Sensor, Soil profile, Temporal and spatial

---

<sup>1</sup> rezaei\_ali2000@yahoo.com