



## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۲

صفحه‌های ۱۴۶-۱۳۵

# اثر شوری بر کاربرد حسگرهای هوشمند در تعیین رطوبت خاک

جواد رحمانی ثقیه<sup>۱</sup>، علی اصغر قائمی<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناس ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز - ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز - ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۰۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۱/۰۶/۲۵

### چکیده

دقت و اثربخشی کشاورزی دقیق، تا حد زیادی به تحلیل دقیق و به موقع شرایط رطوبتی خاک وابسته است. نمایش وضعیت آب خاک به صورت پیوسته، روشی مناسب برای بهینه کردن آبیاری در کشاورزی است. سیستم‌های هوشمند آبیاری مبتنی بر کاربرد حسگرهای رطوبتی خاک می‌توانند بیشترین کارایی مصرف آب در مزرعه را با حفظ رطوبت خاک در سطح بهینه فراهم کنند. شوری محلول خاک بر مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای هوشمند اثر می‌گذارد. به همین منظور در این تحقیق، عملکرد چهار حسگر هوشمند با چند روش متداول، برای تعیین مقدار رطوبت خاک در شرایط کاربرد آب شور در عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری از سطح خاک ارزیابی شد. حسگرهای هوشمند استفاده شده در این تحقیق، شامل Watermark 200ss، Watermark 200ss-v، ICS 9101 و ICS 9001 و روش‌های متداول تعیین رطوبت خاک، شامل تانسومتر، بلوک‌های گچی، نوترون‌متر و روش وزنی هستند. بنابر نتایج بین حسگرهای هوشمند، حسگر Watermark 200ss-v در اندازه‌گیری رطوبت خاک در شرایط کاربرد آب شور دقت مناسبی داشت و بین روش‌های متداول تعیین رطوبت خاک، نوترون‌متر دارای دقت مناسب و بلوک‌های گچی و تانسومتر فاقد دقت مناسب بودند. نتایج نشان داد در شرایط کاربرد آب شور، حسگر Watermark 200ss-v و تانسومتر در مکش‌های ضعیف نسبت به مکش‌های قوی، داده‌های دقیق‌تری از مقدار رطوبت خاک را اندازه‌گیری می‌کنند.

**کلیدواژه‌ها:** تانسومتر، حسگر، کارایی مصرف آب، مکش خاک، نوترون‌متر.

## مقدمه

خاک سبب رقیق شدن میدان مغناطیسی تولیدشده در اطراف میله‌های حسگر می‌شود که بر مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر اثر می‌گذارد (۶). شوری زیاد در خاک موجب تفسیر نادرست و تخمین زیاد داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده توسط حسگرهایی که بر اساس ظرفیت خازنی راه‌اندازی شده‌اند، می‌شود (۱). بنابراین می‌توان گفت شوری آب آبیاری بر مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای مختلف مؤثر است (۱). در سال‌های اخیر، حسگرهای هوشمند به دلیل سرعت زیاد برآورد رطوبت خاک و به‌منظور استفاده در سیستم آبیاری هوشمند کانون توجه قرار گرفته و ارزیابی شده‌اند. در تحقیقی، به ارزیابی و مقایسه حسگر Watermark و تانسیموتر پرداخته شد (۴). نتایج این تحقیق نشان داد حسگر Watermark نسبت به تانسیموتر مکش‌های بزرگ‌تری را اندازه‌گیری می‌کند. در تحقیقی روی ۹ حسگر در خاک لوم شنی، داده‌های به‌دست آمده از این حسگرها را با روش وزنی مقایسه کردند (۳). نتایج نشان داد بین حسگرها از نظر دقت اختلاف معناداری وجود دارد. در مطالعه‌ای دیگر، یک سیستم آبیاری هوشمند با روش آبیاری دستی مقایسه شد (۲). نتایج این تحقیق نشان داد اختلاف معناداری بین شاخص‌های رشد گیاه در دو روش آبیاری وجود ندارد. با استفاده از یک شبکه بی‌سیم و به‌طور هوشمند مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای Watermark و MPS-1 از راه دور جمع‌آوری شد (۱۲). با استفاده از معادله واسنجی به‌دست آمده از هر دو حسگر در محل آزمایش، مقدار رطوبت خاک، مناسب گزارش شد. تحقیق حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه چهار حسگر هوشمند و چند روش متداول تعیین رطوبت خاک و تعیین بهترین حسگر هوشمند برای استفاده در سیستم آبیاری قطره‌ای با کاربرد آب شور اجرا شد.

افزایش جمعیت، نیاز بشر و افزایش سطح کشت، استفاده از آب‌های کم‌کیفیت را ضرورت بخشیده است. با توجه به کاهش آب کشاورزی، بهره‌گیری از منابع آب کم‌کیفیت‌تر افزایش یافته است (۱۰). یکی از مشکلات استفاده از آب شور، تعیین مقدار دقیق رطوبت خاک بعد از آبیاری و در نهایت زمان‌بندی دقیق آبیاری است.

تعیین دقیق مقدار رطوبت خاک در بسیاری از علوم، نظیر کشاورزی، علوم زیست‌محیطی، مهندسی و هیدرولوژی اهمیت فراوانی دارد (۷). برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک و زمان‌بندی آبیاری از حسگرهای مختلف اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده می‌شود. شوری آب آبیاری بر مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای رطوبتی مختلف اثر می‌گذارد، به‌طوری‌که شوری، هدایت الکتریکی خاک را افزایش می‌دهد. بنابراین حسگرهایی که با اندازه‌گیری مقاومت خاک، مقدار رطوبت خاک را اندازه‌گیری می‌کنند، تحت تأثیر شوری آب و خاک قرار می‌گیرند.

اثر شوری آب آبیاری بر عملکرد دو حسگر ECH2O-10 و Theta Probe بررسی شد (۹). نتایج این تحقیق نشان داد زمانی که شوری خاک، کمتر از یک دسی‌زیمنس بر متر باشد، حسگر ECH2O-10 برآورد صحیحی از مقدار رطوبت خاک خواهد داشت. نتایج این تحقیق برای حسگر Theta Probe نشان داد که شوری تأثیر ناچیزی بر داده‌های خروجی این حسگر دارد (۹). هر چه شوری خاک بیشتر باشد، مقاومتی که به‌وسیله بلوک‌های گچی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک قرائت می‌شود کاهش می‌یابد (۵). در غلظت‌های زیاد این تأثیر به حدی می‌رسد که بین نقطه پژمردگی و رطوبت مزرعه هیچ اختلاف مقاومتی مشاهده نمی‌شود. شوری زیاد خاک به برآورد زیاد مقدار رطوبت خاک منجر می‌شود (۱۵، ۱۱). وجود نمک در

## مدیریت آب و آبیاری

## مواد و روش‌ها

این تحقیق در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در عرض جغرافیایی  $36^{\circ} 29'$  و طول جغرافیایی  $52^{\circ} 33'$  و ارتفاع ۱۸۱۰ متر از سطح دریا انجام گرفت. میانگین دما و رطوبت گلخانه به ترتیب  $25/4$  درجه سانتی‌گراد و  $25/2$  درصد بود. داخل گلخانه سه کرت با ابعاد  $1/5$  در  $1/5$  متر انتخاب شد. کرت‌های مورد نظر با روش آبیاری نواری (Tape) آبیاری شدند. برای افزایش یکنواختی توزیع آب در کرت‌ها، در هر کرت شش خط لوله نواری با دبی چهار لیتر در ساعت در هر متر (سه روزنه در هر متر)، با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از هم انتخاب شدند.

برای تأمین آب شور از یک مخزن به حجم یک متر مکعب استفاده شد و فشار مورد نیاز سیستم (یک بار) توسط پمپ تأمین شد. بافت خاک (توزیع اندازه ذرات) در آزمایشگاه زهکشی بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز به روش هیدرومتری تعیین و خصوصیات فیزیکی خاک نیز مشخص شد. مشخصات بافت و خصوصیات فیزیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. این تحقیق دارای هشت تیمار مختلف شامل چهار حسگر هوشمند رطوبت خاک با نام‌های: ICS، Watermark 200ss، Watermark 200ss-v، ICS 9101 و 9001 و چهار روش متداول تعیین رطوبت خاک شامل روش وزنی، تانسیمتری (ساخت ELE)، نوترون‌متر (ساخت CPN مدل 503DR Hydroprobe) و بلوک‌های گچی است. روش وزنی به عنوان روشی دقیق در تعیین رطوبت خاک به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. آبیاری با آب شور با شوری پنج دسی‌زیمنس بر متر با فاصله‌های هشت‌روزه انجام گرفت و در این فاصله در زمان‌های مختلف (هر دو روز) مقدار رطوبت خاک توسط حسگرها و روش‌های متداول تعیین رطوبت خاک تعیین شد. از مخلوط نمک کلروسدیم و کلروکلسیم برای شور کردن آب آبیاری تا رسیدن به حد پنج دسی‌زیمنس بر متر استفاده شد. فاصله زمانی دو روز برای محاسبه مقدار

رطوبت خاک با روش وزنی انتخاب شد. در روز هشتم قبل و بعد (۱۲ ساعت) از آبیاری داده‌برداری انجام گرفت. معادلات واسنجی حسگرها و روش‌های متداول تعیین رطوبت خاک در شرایط خاک منطقه طی دو بار خشک و تر شدن خاک به دست آمد. با استفاده از روش وزنی، مقدار آب خاک نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. با وزن کردن نمونه‌ها در ابتدا و خشک کردن آن‌ها در آون، درصد وزنی نمونه‌ها به دست آمد و با اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری خاک، رطوبت حجمی خاک نیز محاسبه شد. در نهایت رطوبت وزنی یا حجمی نمونه‌های خاک برای واسنجی حسگرها و دیگر روش‌های متداول برآزش داده شد.

حسگرهای هوشمند، تانسیمتر، نوترون‌متر و بلوک‌های گچی در عمق‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر داخل خاک در داخل کرت قرار داده شد و رطوبت خاک در زمان‌های مختلف بین دو آبیاری توسط تیمارهای مختلف اندازه‌گیری شد. همزمان، نمونه خاک از دو عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری خاک برای به دست آوردن درصد وزنی رطوبت برداشت شد و با توجه به چگالی ظاهری خاک، درصد رطوبت حجمی خاک تعیین شد. رطوبت خاک، توسط حسگرهای هوشمند با استفاده از سیستم داده‌برداری از راه دور و سیستم مخابراتی پیام کوتاه اندازه‌گیری شد. با ارسال پیام کوتاه به حسگر و به کارگیری یک سیستم مخابراتی در حسگرهای گلخانه، همه حسگرها با تشخیص دستور فرستاده شده، رطوبت خاک را قرائت می‌کردند و با ارسال به دستگاه میکروکنترلر، داده‌برداری صورت می‌گرفت. سیستم میکروکنترلر نیز در یک ارتباط رفت و برگشتی، داده‌های رطوبتی خاک را برای کاربر ارسال می‌کرد. داده‌های نوترون‌متر با قرائت دستگاه نوترون‌متر از لوله‌های آلومینیومی واقع در عمق یک متری خاک، داده‌های تانسیمتر با قرائت مکش‌سنج به کاررفته در ساختمان تانسیمتر و داده‌های بلوک گچی با استفاده از دستگاه مقاومت‌سنج ویتسون بریج از عمق‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری در کرت برداشت شد. قرائت حسگر بسته به

۲ - Watermark sensor مدل ۲۰۰ss-v:

ساختمان این حسگر همانند حسگر Watermark sensor مدل ۲۰۰ss است، با این تفاوت که خروجی داده‌های این حسگر به صورت ولتاژ خطی در محدوده صفر تا ۲/۸ است و به صورت مستقیم به پتانسیل ماتریک خاک تبدیل می‌شود (۸).

۳ - حسگر ICS 9101:

این حسگر ساخت ایران و با خروجی ولتاژ است. محدوده تغییرات این حسگر، از دو تا هفت ولت است و متناسب با آن مکش صفر تا ۱۵۰ سانتی بار را اندازه‌گیری می‌کند.

۴ - حسگر ICS 9001:

این حسگر نیز که ساخت ایران است، با سنجش مقاومت، مقدار رطوبت خاک را اندازه‌گیری می‌کند. محدوده تغییرات این حسگر از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم است و متناسب با آن به صورت خطی مقدار مکش صفر تا ۲۰۰ سانتی‌بار را اندازه‌گیری می‌کند.

علاوه بر حسگرهای یادشده از سه وسیله متداول دیگر اندازه‌گیری رطوبت خاک شامل تانسومتر، بلوک گچی و نوترون‌متر استفاده شد. تانسومتر استفاده‌شده در این تحقیق از نوع فلزی ساخت شرکت ELE، با طول‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری با محدوده اندازه‌گیری مکش صفر تا ۸۰ سانتی‌بار است. بلوک‌های گچی استفاده‌شده در این تحقیق در بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، ساخته شد و پس از کالیبراسیون در این تحقیق به کار گرفته شد. نوترون‌متر استفاده‌شده در این تحقیق مدل بود.

نوع مدل آن به صورت مقاومت و ولت اجرایی شد و پس از کالیبره کردن حسگرها با ارتباط دادن قرائت به دست‌آمده از حسگر، درصد رطوبت خاک تعیین می‌شد. داده‌های همه حسگرها طی ۱۰ بار آبیاری (۱۰ تکرار) و تا مرحله خشک شدن خاک در هر بار آبیاری برداشت می‌شد. برای ارزیابی حسگرها نسبت به شوری، مقدار شوری پنج دسی‌زیمنس برای آب آبیاری به کار برده شد. به این منظور، معادله‌ای برای تعیین مقدار نمک لازم در هر لیتر آب (میلی‌گرم در لیتر) به دست آمد (رابطه ۱). مقادیر رطوبت به دست‌آمده توسط حسگرهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار SAS (۱۴) به صورت طرح کرت‌های خردشده در زمان با فاکتور اصلی حسگر و فاکتور فرعی زمان در ۱۰ تکرار تحلیل شد. همچنین آزمون آماری F-test برای مقایسه تک‌تک حسگرها با روش وزنی (شاهد) و مقادیر Md، متوسط اختلاف و RRMSE، جذر میانگین توان دوم خطای نسبی برای ارزیابی حسگرها تعیین شد. در زیر به حسگرهای استفاده‌شده در این تحقیق اشاره می‌شود:

۱ - Watermark sensor مدل ۲۰۰ss:

این حسگر که در سال ۱۹۷۸ در کانادا ثبت اختراع شد، بر مبنای مقاومت الکتریکی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده می‌شود. با تغییر مقدار رطوبت خاک، مقاومت الکتریکی تغییر می‌کند و بر مبنای آن، رطوبت خاک اندازه‌گیری می‌شود. حسگر شامل یک جفت الکتروود است که در یک ماده متخلخل با مقاومت زیاد در برابر خوردگی قرار گرفته است. با برقراری جریان، مقاومت دو سر الکتروود اندازه‌گیری می‌شود. این حسگر برای قرار گرفتن دائمی در خاک و برداشت داده‌های پیوسته از رطوبت خاک طراحی شده است (۸).

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک منطقه تحقیق

بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	چگالی ظاهری خاک (g/cm <sup>3</sup> )	تخلخل (%)	انحراف معیار اندازه ذرات (mm)	میانگین قطر ذرات خاک (mm)	رطوبت حجمی (%) FC	رطوبت حجمی PWP (%)
Caly Loam	۳۵	۳۵	۳۰	۱/۱	۵۹/۳۰	۱۶/۳۷۰۲	۰/۰۳۵۴	۳۱	۱۴

مدیریت آب و آبیاری

## بحث و نتایج

بر مبنای معادله ریچاردز (۱۳)، معادله‌ای برای تعیین مقدار نمک لازم در هر لیتر آب (گرم در لیتر) تعیین شد.

$$Y = 0.663x - 0.637 \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه،  $Y$  مقدار مجموع نمک (گرم در لیتر) (مجموع  $\text{NaCl}$  و  $\text{CaCl}_2$ ) و  $x$  هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر) و  $0.637/0.663$  شوری آب معمولی است. معادلات واسنجی حسگرها در جدول ۲ ارائه شده است.

در این رابطه‌ها،  $\theta$  رطوبت حجمی خاک (درصد)،  $y$  مقدار مکش خاک برای حسگر Watermark 200ss-v (سانتی‌متر)، مقدار مقاومت (کیلو اهم) برای حسگر Watermark 200ss، مقدار مقاومت (اهم) برای حسگر ICS9001، مقدار مکش خاک (سانتی‌متر) برای حسگر ICS9101، مقدار مقاومت (اهم) برای بلوک گچی و مقدار مکش خاک (سانتی‌متر) برای تانسیموتر،  $x$  در معادله نوترون‌متر نسبت شمارش و  $\ln$  در همه معادلات لگاریتم نپری است.

داده‌های حسگرهای رطوبتی و شیوه‌های متداول تعیین رطوبت خاک با روش وزنی (شاهد) به صورت طرح کرت‌های خردشده در زمان با دو فاکتور حسگر (فاکتور اصلی) و زمان (فاکتور فرعی) در ۱۰ تکرار مقایسه شدند. منظور از فاکتور حسگر، حسگرهای هوشمند و روش‌های متداول تعیین رطوبت خاک است. نتایج مقایسه میانگین حسگرهای مختلف و زمان‌های مختلف اندازه‌گیری رطوبت خاک توسط تیمارهای مختلف (زمان‌های متوالی اندازه‌گیری رطوبت خاک بین دو آبیاری) در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. در این جدول‌ها، تیمارهای مختلف همان حسگرها است. فاکتور زمان برای نشان دادن واکنش‌پذیری حسگرها به کاهش رطوبت خاک لحاظ شده است. اختلاف معناداری بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگرها در زمان‌های مختلف با

کاهش رطوبت خاک وجود دارد که معرف واکنش‌پذیری حسگرها نسبت به تغییرات رطوبت خاک مطلوب است (جدول ۳). مقایسه میانگین حسگرهای مختلف در عمق ۳۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای Watermark 200ss-v، تانسیموتر و نوترون‌متر با روش وزنی (شاهد) اختلاف معناداری ندارد (جدول ۴). مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط Watermark 200ss، ICS 9001، ICS 9101 و بلوک گچی اختلاف معناداری با روش وزنی (شاهد) نشان داد. با توجه به نتایج حاصل از حسگرهای هوشمند (Watermark 200ss-v، Watermark 200ss، ICS 9001 و ICS 9101)، تنها حسگر Watermark 200ss-v در شرایط کاربرد آب شور قابل استفاده است. بیشترین و کمترین اختلاف نسبت به روش وزنی (شاهد) به ترتیب مربوط به بلوک گچی و نوترون‌متر است. نتایج جدول ۳ برای عمق ۶۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد اختلاف معناداری بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف وجود دارد. تنها در زمان‌های چهارم و پنجم اختلاف معناداری وجود ندارد که دلیل آن، تغییرات کم رطوبت خاک در عمق ۶۰ سانتی‌متر است. بنابراین واکنش‌پذیری حسگرها نسبت به تغییرات رطوبت خاک در عمق ۶۰ سانتی‌متر نیز مطلوب است.

نتایج مقایسه میانگین حسگرهای مختلف در عمق ۶۰ سانتی‌متر در جدول ۴ نشان می‌دهد رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر Watermark 200ss-v، تانسیموتر و نوترون‌متر با روش وزنی (شاهد) اختلاف معناداری ندارد. مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای Watermark 200ss، ICS 9001، ICS 9101 و بلوک گچی اختلاف معناداری با روش وزنی (شاهد) نشان دادند. بیشترین و کمترین اختلاف نسبت به روش وزنی (شاهد) به ترتیب مربوط به بلوک گچی و نوترون‌متر است. با توجه به نتایج به دست آمده برای حسگرهای هوشمند

مقایسه رابطه خطی داده‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگرها و روش شاهد برای همه حسگرها در عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر خاک انجام گرفت. نتایج آزمون آماری F-test، مقادیر RRMSE و Md در جدول ۵ ارائه شده است. کمترین مقدار RRMSE برابر صفر است. هر چه این مقدار کمتر باشد، دقت اندازه‌گیری بیشتر است. مقدار Md برای ارزیابی حسگرها نسبت به بیشتر یا کمتر تخمین زدن رطوبت خاک توسط حسگرها در طول دوره اندازه‌گیری است که با علامت منفی (-) یا مثبت (+) نشان داده می‌شود. علامت +، تخمین بیشتر از مقدار واقعی و علامت -، تخمین کمتر از مقدار واقعی را نشان می‌دهد.

(Watermark 200ss, Watermark 200ss-v, ICS 9001 و ICS 9101) کمترین و بیشترین اختلاف به ترتیب مربوط به حسگر Watermark 200ss-v و حسگر ICS 9101 است. مقایسه حسگرهای هوشمند Watermark 200ss-v و نوترون‌متر نشان می‌دهد اختلاف معناداری بین این حسگر با نوترون‌متر وجود ندارد. با اینکه دستگاه نوترون‌متر وسیله‌ای دقیق برای برآورد رطوبت خاک به‌شمار می‌رود، از معایب آن قیمت زیاد و اثر زیانبار تشعشعات آن هنگام کار با دستگاه است، از این رو می‌توان گفت حسگر مذکور را که به لحاظ قیمت، بسیار ارزان‌تر و فاقد هر گونه تشعشع مضر است، می‌توان در عمق مخصوصی برای زمان‌بندی آبیاری جایگزین نوترون‌متر کرد. برای مقایسه بیشتر تیمارهای مختلف، آزمون آماری F-test به‌منظور

جدول ۲. معادلات واسنجی مربوط به حسگرهای استفاده‌شده در خاک

نام حسگر	معادله	R <sup>2</sup>
Watermark 200ss-v	$Lny = - 11/44 \text{ } \theta + 9/67$	۰/۹۸
Watermark 200ss	$Lny = - 9/044 \text{ } \theta + 4/334$	۰/۹۸
ICS 9001	$Lny = - 7/288 \text{ } \theta + 8/396$	۰/۹۵
ICS 9101	$Lny = - 7/13 \text{ } \theta + 8/530$	۰/۸۳
بلوک گچی	$Lny = - 14/24 \text{ } \theta + 12/322$	۰/۹۵
تانسیومتر	$Lny = - 10/28 \text{ } \theta + 8/902$	۰/۹۵
نوترون‌متر	$\theta = 16/209 x - 2/074$	۰/۷۶

جدول ۳. مقایسه میانگین تأثیر زمان‌های مختلف اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک (زمان‌های متوالی بین دو آبیاری به فاصله هر دو روز) بر عملکرد حسگرهای مختلف در عمق‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری

زمان‌های متوالی اندازه‌گیری رطوبت خاک	زمان اول	زمان دوم	زمان سوم	زمان چهارم	زمان پنجم
رطوبت حجمی در عمق ۳۰ cm	۰/۴۷۶۸ <sup>a</sup>	۰/۴۱۱۲ <sup>b</sup>	۰/۳۲۸۹ <sup>c</sup>	۰/۲۹۲۳ <sup>d</sup>	۰/۲۵۲۰ <sup>e</sup>
رطوبت حجمی در عمق ۶۰ cm	۰/۴۴۵۳ <sup>a</sup>	۰/۴۰۰۷ <sup>b</sup>	۰/۲۹۹۳ <sup>c</sup>	۰/۲۷۴۳ <sup>d</sup>	۰/۲۷۲۰ <sup>d</sup>

اعداد با حروف مشابه در سطح ۱ درصد اختلاف معناداری ندارند.

اثر شوری بر کاربرد حسگرهای هوشمند در تعیین رطوبت خاک

جدول ۴. مقایسه میانگین مقدار رطوبت آب در خاک اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای مختلف حسب  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  در خاک لومی رسی در شرایط کاربرد آب شور با شوری ۵ دسی‌زیمنس بر متر در عمق‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر

نام حسگر	روش وزنی	Watermark 200ss-v	Watermark 200ss	ICS9001	ICS9101	بلوک گچی	تانسیومتر	نوترون‌متر
رطوبت حجمی در عمق ۳۰ cm	۰/۳۴۲ <sup>dc</sup>	۰/۳۵۰ <sup>bdc</sup>	۰/۳۷۱ <sup>a</sup>	۰/۳۶۷ <sup>ab</sup>	۰/۳۱۱ <sup>e</sup>	۰/۳۷۵ <sup>a</sup>	۰/۳۵۹ <sup>abc</sup>	۰/۳۳۸ <sup>d</sup>
رطوبت حجمی در عمق ۶۰ cm	۰/۳۱۱ <sup>de</sup>	۰/۳۲۲ <sup>d</sup>	۰/۳۴۴ <sup>bc</sup>	۰/۳۶۱ <sup>b</sup>	۰/۳۴۳ <sup>c</sup>	۰/۳۹۱ <sup>a</sup>	۰/۳۲۸ <sup>cd</sup>	۰/۳۰۱ <sup>e</sup>

اعدادی که دارای حروف مشابه نیستند در سطح ۱ درصد معنادارند

جدول ۵. پارامترهای آماری مقایسه مقدار رطوبت به دست آمده از برازش خط بین روش وزنی و مقدار رطوبت به دست آمده از حسگرهای مختلف با خط یک‌به‌یک توسط آزمون آماری (F-test) و مقادیر Md و RRMSE در خاک لومی رسی در عمق‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر

نام حسگر	عمق (cm)	شیب خط	عرض از مبدأ	Md	RRMSE	R <sup>2</sup>	F (Slope)	F (Intercept)
Watermark 200ss-v	۳۰	۰/۸۸	۰/۰۳	۰/۰۰۸	۱۴	۰/۷۸	۳/۸۴ <sup>ns</sup>	۱/۲۹ <sup>ns</sup>
	۶۰	۰/۹۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۱۳	۰/۸۰	۱/۴۴ <sup>ns</sup>	۴/۵۶ <sup>s</sup>
Watermark 200ss	۳۰	۰/۷۷	۰/۰۵	۰/۰۲	۱۹	۰/۷۶	۱۳/۱۱ <sup>s</sup>	۱۴/۱۵ <sup>s</sup>
	۶۰	۰/۷۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۱۷	۰/۸۶	۲۹/۱۴ <sup>s</sup>	۳۴/۴۸ <sup>s</sup>
ICS 9001	۳۰	۱/۲۳	-۰/۱۱	۰/۰۲	۱۸	۰/۷۰	۴/۰۹ <sup>s</sup>	۹/۱۰ <sup>s</sup>
	۶۰	۰/۷۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۲۵	۰/۶۰	۹/۴۰ <sup>s</sup>	۳۱/۲۰ <sup>s</sup>
ICS9101	۳۰	۰/۷۹	۰/۰۴	۰/۰۱	۲۲	۰/۵۵	۴/۱۵ <sup>s</sup>	۵/۸۱ <sup>s</sup>
	۶۰	۱/۲۶	-۰/۱۲	۰/۰۳	۱۹	۰/۶۰	۹/۴۰ <sup>s</sup>	۳۱/۲۰ <sup>s</sup>
بلوک گچی	۳۰	۰/۷۸	۰/۰۴	۰/۰۳	۲۱	۰/۶۷	۷/۵۸ <sup>s</sup>	۱۳/۹۰ <sup>s</sup>
	۶۰	۰/۷۴	۰/۰۲	۰/۰۸	۳۲	۰/۶۰	۸/۵۷ <sup>s</sup>	۱۰۵/۵۰ <sup>s</sup>
تانسیومتر	۳۰	۱/۲۱	-۰/۰۹	۰/۰۱	۱۸	۰/۷۲	۴/۰۲ <sup>s</sup>	۵/۴۹ <sup>s</sup>
	۶۰	۰/۸۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۱۸	۰/۶۳	۴/۰۲ <sup>s</sup>	۵/۳۷ <sup>s</sup>
نوترون‌متر	۳۰	۰/۹۲	۰/۰۲	۰/۰۰۰۱	۱۴	۰/۷۸	۱/۱۳ <sup>ns</sup>	۰/۰۰۵ <sup>ns</sup>
	۶۰	۰/۹۴	۰/۰۲	۰/۰۰۹	۱۳	۰/۷۷	۰/۶۱ <sup>ns</sup>	۳/۱۴ <sup>ns</sup>

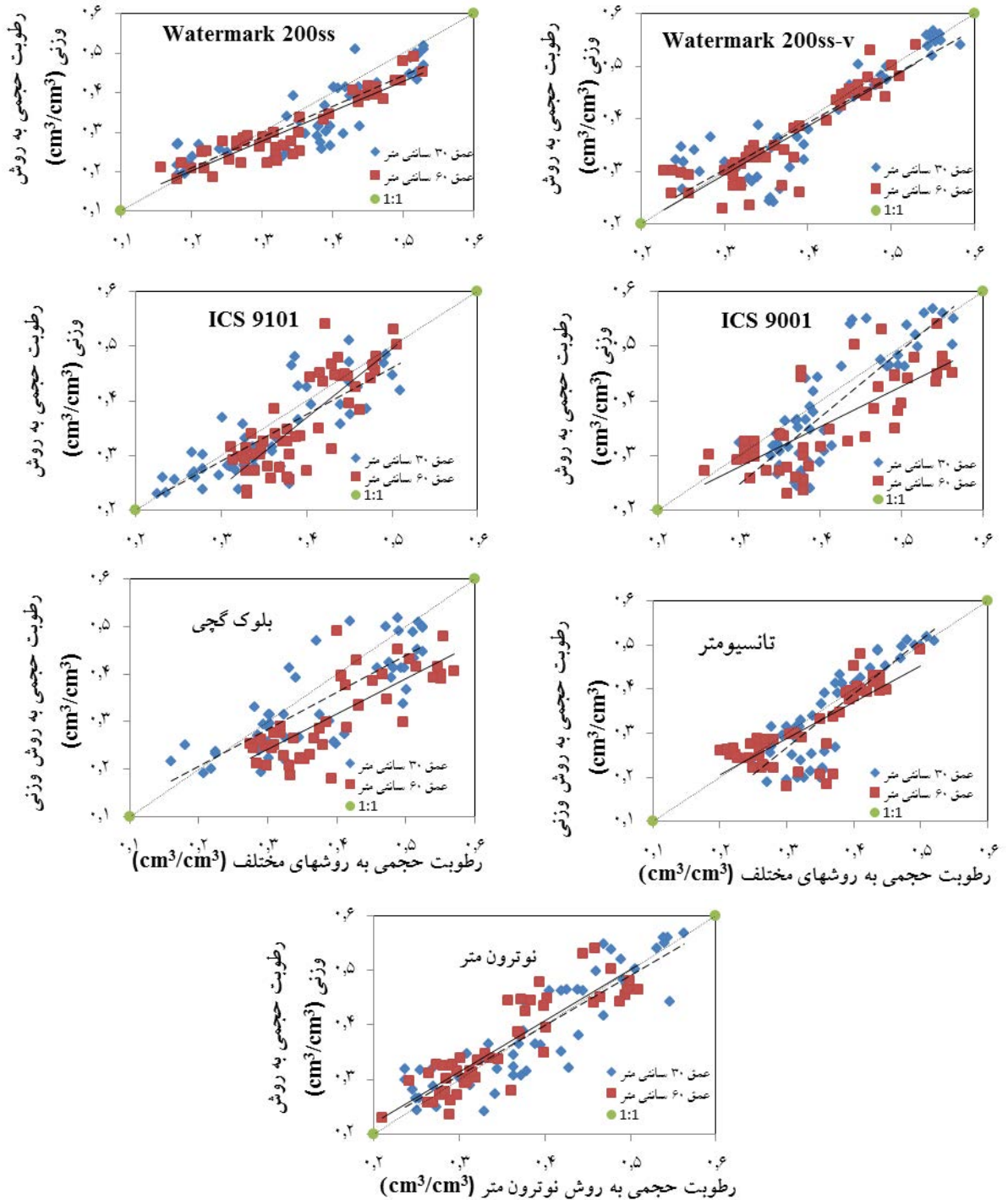
ns و s به ترتیب: عدم تفاوت معنادار و تفاوت معنادار در سطح ۵ درصد

نتایج نشان می‌دهد بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر Watermark 200ss-v و نوترون‌متر در عمق‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر تفاوت معناداری با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط روش وزنی (شاهد) وجود ندارد (شاهد). آزمون آماری F-test مقدار شیب و عرض از مبدأ برازش خط بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر و مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط روش وزنی (شاهد) را به ترتیب با مقدار یک و صفر مقایسه می‌کند (شکل ۱).

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۲





شکل ۱. مقایسه برآزش خط بین مقادیر رطوبت به دست آمده از حسگر Water mark 200ss, Water mark 200ssv, ICS 9101, تانسومتر، بلوک گچی و نوترون متر در مقابل رطوبت به دست آمده از روش وزنی با خط یک به یک در عمق های ۳۰ (خط منقطع) و ۶۰ (خط ممتد) سانتی متر

### مدیریت آب و آبیاری

دوره ۳ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۲



واقع آزمون آماری F-test مقادیر رطوبت به دست آمده از دو روش را به صورت نقطه به نقطه مقایسه می کند، در صورتی که مقایسه میانگین، میانگین داده های به دست آمده را بین دو روش مقایسه می کند.

مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگر Watermark 200ss-v و تانسومتر در رطوبت های زیاد (مکش های ضعیف)، داده های نزدیک تری به خط یک به یک دارند (شکل ۱). بنابراین می توان گفت در رطوبت های زیاد، داده های دقیق تری از مقدار رطوبت خاک اندازه گیری می کنند. برای بررسی این موضوع، آزمون آماری F-test برای مقایسه مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگر Watermark 200ss-v و تانسومتر در مکش های ضعیف و قوی انجام گرفت (رطوبت بیش از ۲۵ درصد حجمی، مبنای مکش ضعیف و رطوبت کمتر از ۲۵ درصد حجمی، مبنای مکش قوی در نظر گرفته شد). نتایج آزمون آماری F-test برای مقایسه مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگر Watermark 200ss-v و تانسومتر در مکش های ضعیف و قوی در جدول ۶ ارائه شده است.

نتایج نشان می دهد بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگر Watermark 200ss-v و تانسومتر در مکش های ضعیف با روش وزنی اختلاف معناداری وجود ندارد، در حالی که بین رطوبت به دست آمده از حسگر Watermark 200ss-v و تانسومتر در مکش های قوی اختلاف معناداری ایجاد شده است (جدول ۶). بنابراین با توجه به مقدار  $R^2$  بالا به دست آمده در مکش های ضعیف نسبت به مکش های قوی، نتایج نشان می دهد حسگر Watermark 200ss-v و تانسومتر در مکش های ضعیف نسبت به مکش های قوی رطوبت خاک را دقیق تر اندازه گیری می کند.

هنگامی که برازش خط بین مقادیر به دست آمده از دو روش (رطوبت به دست آمده از حسگر و رطوبت به دست آمده از روش وزنی) بر خط یک به یک به طور کامل منطبق شود، در واقع مقادیر  $R^2$  و شیب به سمت یک و مقدار عرض از مبدأ صفر خواهد بود. بنابراین با توجه به عدم تفاوت معنادار بین مقادیر رطوبت خاک به دست آمده از دو روش با خط یک به یک و مقدار  $R^2$  بالا برای حسگر Watermark 200ss-v و نوترون متر می توان گفت استفاده از آنها برای تعیین رطوبت خاک در عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی متر در شرایط کاربرد آب شور تا حد پنج دسی زیمنس بر متر می تواند مناسب باشد. نتایج آزمون آماری F-test برای بلوک گچی، تانسومتر و حسگرهای Watermark 200ss و ICS 9101 نشان می دهد بین مقادیر اندازه گیری رطوبت خاک توسط این روش ها و مقادیر اندازه گیری شده با روش وزنی (شاهد)، اختلاف معناداری از لحاظ شیب و عرض از مبدأ وجود دارد. بنابراین می توان گفت استفاده از این روش ها برای شرایط کاربرد آب شور مناسب نیست. در عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی متر، کمترین بیشترین مقدار RRMSE به ترتیب برای حسگر Watermark 200ss-v و بلوک گچی است (جدول ۵). مقدار Md برای همه حسگرها، مثبت است. بنابراین، مقدار رطوبت به دست آمده از حسگرهای مختلف بیشتر از مقدار رطوبت اندازه گیری شده توسط روش وزنی است و شرایط کاربرد آب شور، به تخمین بیشتر مقدار رطوبت خاک توسط حسگرها منجر شده است. نتایج مقایسه میانگین حسگرهای مختلف نشان داد بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط تانسومتر و روش وزنی اختلاف معناداری وجود ندارد، ولی نتایج F-test نشان داد این اختلاف معنادار است. این موضوع به این دلیل است که در

جدول ۶. پارامترهای آماری مقایسهٔ مقادیر رطوبت به دست آمده از حسگرهای Watermark 200ss-v و تانسومتر و روش وزنی در رطوبت‌های زیاد و کم (مکش‌های ضعیف و قوی) در اعماق ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر در خاک لومی رسی

نام حسگر	عمق (cm)	مکش	شیب خط	عرض از مبدأ	R <sup>2</sup>	F (Slope)	F (Intercept)
Watermark 200ss-v	۳۰	ضعیف	۰/۷۷	۰/۰۸	۰/۸۵	۱۵/۲۴ <sup>S</sup>	۰/۶۲ <sup>NS</sup>
		قوی	۰/۶	۰/۰۹	۰/۵۱	۱۱/۶۱ <sup>S</sup>	۶/۱۷ <sup>S</sup>
	۶۰	ضعیف	۰/۹۵	۰/۰۰۷	۰/۹۳	۰/۰۳۹ <sup>NS</sup>	۳/۰۹ <sup>NS</sup>
		قوی	۰/۴۳	۰/۱۱	۰/۳۹	۵۴/۴۲ <sup>S</sup>	۵۶/۳۸ <sup>S</sup>
تانسیومتر	۳۰	ضعیف	۱/۰۳	-۰/۰۰۳	۰/۸۸	۰/۲۱ <sup>NS</sup>	۲/۸۷ <sup>NS</sup>
		قوی	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۲۳	۱۳۸/۹۳ <sup>S</sup>	۱۰۰/۳۵ <sup>S</sup>
	۶۰	ضعیف	۰/۸۷	۰/۰۴	۰/۸۵	۱/۵۵ <sup>NS</sup>	۰/۷۶ <sup>NS</sup>
		قوی	۰/۳۷	۰/۱۳	۰/۲۷	۵۴/۴۳ <sup>S</sup>	۶۰/۰ <sup>S</sup>

ns و S به ترتیب: عدم تفاوت معنادار و معناداری در سطح ۵ درصد

### نتیجه گیری

در رطوبت‌های ضعیف (مکش‌های قوی) اختلاف معناداری بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر Watermark 200ss-v و تانسومتر با روش وزنی دیده شد. بنابراین استفاده از حسگر Watermark 200ss-v و تانسومتر در رطوبت‌های زیاد (رطوبت‌های بیشتر از ۲۵ درصد حجمی) در خاک لومی رسی توصیه می‌شود. کمترین و بیشترین اختلاف برای حسگرهای هوشمند نسبت به روش وزنی (شاهد) به ترتیب برای حسگرهای Watermark 200ss-v و ICS9101 بود. نتایج برای بلوک گچی نشان داد مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط بلوک گچی اختلاف معناداری با روش وزنی (شاهد) دارد. داده‌های اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف توسط روش‌های مختلف نشان داد واکنش‌پذیری حسگرها به تغییرات رطوبت خاک در زمان‌های مختلف مناسب است، به طوری که در زمان‌های مختلف داده‌های اندازه‌گیری شده توسط حسگرها اختلاف معناداری داشتند. به‌طور کلی، می‌توان گفت حسگر Watermark 200ss-v با توجه به عدم تفاوت معنادار با روش وزنی در برآورد آب خاک و

بر پایهٔ نتایج این تحقیق در عملکرد هفت روش مختلف اندازه‌گیری رطوبت خاک متأثر از کاربرد آب شور و تحت روش آبیاری میکرو، برای اعماق ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری کمترین و بیشترین اختلاف مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده بین روش‌های مختلف با روش وزنی (شاهد) مربوط به نوترون‌متر و بلوک گچی بود. نتایج برای حسگرهای هوشمند نشان داد که تنها حسگر Watermark 200ss-v در شرایط کاربرد آب با شوری پنج دسی‌زیمنس مناسب است. سایر حسگرها اختلاف معناداری با روش وزنی (شاهد) نشان دادند. بین روش‌های متداول تعیین رطوبت خاک و حسگرهای هوشمند نتایج نشان داد حسگر Watermark 200ss-v و تانسومتر داده‌های دقیقی در مقادیر رطوبت زیاد (مکش‌های ضعیف) دارند، به طوری که در مکش‌های ضعیف دقت مناسبی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک نشان می‌دهند. مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط حسگر Watermark 200ss-v و تانسومتر در مکش‌های ضعیف اختلاف معناداری با روش وزنی (شاهد) نشان نداد، ولی

### مدیریت آب و آبیاری

evaluation of instruments designed to measure volumetric water content of soilless container med designed to measure volumetric water content of soilless container mediums. ASAE/CSAE meeting paper no. 04-4022. ASAE, St. Joseph, MI.

7. Huang Q, Akinremi OO, Sri Rajan R and Bullock P (2004) Laboratory and field evaluation of five soil water sensors. Canadian Journal of Soil Science. 84: 431-438.
8. Irrrometer (2010) Watermark Soil Moisture Sensor – Model 200SS. Specification Document. Irrrometer company, Inc. P. O. Box: 2424, Riverside, CA 92516. <http://www.irrometer.com>
9. Mahmut C and Cevat K (2003) Spatial and temporal changes of soil salinity in a cotton field irrigated with low-quality water. Hydrology. 272: 238-249.
10. Nemali SK, Montesano F, Dove SK and Iersel MWV (2007) Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH2O and Theta probes. Scientia Horticulturae. 112: 227-234.
11. Noborio K, McInnes KJ and Heilman JL (1994) Field measurements of soil electrical conductivity and water content by time-domain reflectometry. Computers and Electronics in Agriculture. 11: 131-142.
12. Nolz R, Kammerer G and Cepuder P (2012) Calibrating soil water potential sensors integrated into a wireless monitoring network. Agricultural Water Management. 116: 12-20.

کمترین مقدار RRMSE و بیشترین مقدار  $R^2$  نسبت به دیگر حسگرهای هوشمند، دقیقترین حسگر هوشمند در شرایط کاربرد آب شور با شوری پنج دسی‌زیمنس بر متر در عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر است. بین روش‌های متداول تعیین رطوبت خاک نوترون‌متر دارای بیشترین دقت است.

## منابع

1. Baumhardt RL, Lascano RJ and Evett SR (2000) Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. Soil Science Society of America. 64: 1940-1946.
2. Boutraa T, Akhkha A, Alshoabi A and Atta R (2011) Evaluation of the effectiveness of an automated irrigation system using wheat crops. Agriculture and Biology Journal of North America. 2: 80-88.
3. Chow L, Xing Z, Rees HW, Meng F and Monteith J (2009) Field performance of nine soil water content sensors on a sandy loam soil in new brunswick, maritime region, Canada. Sensors. 9: 9398-9413.
4. El-Marazky MSA, Mohammad FS and Al-Ghobari HM (2011) Evaluation of Soil Moisture Sensors under Intelligent Irrigation Systems for Economical Crops in Arid Regions. American Journal of Agricultural and Biological Sciences. 6: 287-300.
5. Ewart GY and Baver LD (1951) Salinity effect on soil moisture electrical resistance relationship. Soil Science Society of America Proceedings. 15: 56-63.
6. Hansen RC and Christman JC (2004) Statistical

13. Richards LA (1954) Diagnosis and improvement of saline and Alkali soils U.S.D.A. Agriculture Handook No. 60. Pp. 16-17.
14. SAS Institute (2002) SAS/STAT User's Guide for the Personal Computer, Version 8. 01. SAS Institute, Inc., Cary, NC.
15. White I, Knight JH, Zegelin SJ and Topp GC (1994) Comments on 'Considerations on the use of Time-Domain Reflectometry (TDR) for measuring soil Water content' by W.R. Whalley. European Journal of Soil Science. 45: 503-508.