

مقایسه عملکرد حسگرهای هوشمند رطوبت خاک با چند روش متداول تعیین رطوبت خاک در روش آبیاری میکرو

علی اصغر قائمی^{۱*} و جواد رحمانی ثقیه^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۱۸

چکیده

تخمین دقیق از مقدار آب خاک برای برنامه‌بندی مؤثر آبیاری لازم می‌باشد. روش‌های متعددی برای تعیین رطوبت خاک به کار برده می‌شود که دقت و سرعت اندازه‌گیری رطوبت خاک در این روش‌ها دارای اهمیت ویژه‌ای است. حسگرهای هوشمند رطوبت خاک در سال‌های اخیر به عنوان روشی سریع در برآورد رطوبت خاک مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این تحقیق عملکرد ۴ حسگر هوشمند شامل Watermark 200ss-v، Watermark 200ss، ICS 9101 و ICS 9001 به عنوان یک روش سریع با چند روش متداول تعیین رطوبت خاک شامل روش وزنی، تانسیمتری، نوترون‌متر و بلوک‌های گچی در عمق‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری از سطح خاک در روش آبیاری میکرو مقایسه شدند. نتایج نشان داد در عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری از سطح خاک، تمام حسگرهای هوشمند بجز حسگر ICS 9101 تخمین مناسبی از رطوبت خاک دارند به طوری که حسگرهای Watermark 200ss-v، Watermark 200ss، ICS 9101 و ICS 9001 مقدار RMSE ۱۳، ۱۱، ۱۶ و ۲۳٪ و R^2 ۰/۷۹، ۰/۸۴، ۰/۷۳ و ۰/۵۵ را به ترتیب نشان دادند. بین روش‌های متداول تعیین رطوبت خاک نوترون‌متر دارای دقت مناسب نسبت به روش وزنی و تانسیمتر و بلوک‌های گچی دقت کم‌تری در تعیین مقدار رطوبت خاک نشان دادند. نتایج این تحقیق نشان داد حسگرهای Watermark 200ss-v و Watermark 200ss و تانسیمتر در مکش‌های پایین نسبت به مکش‌های بالا اندازه‌گیری دقیق‌تری از مقدار رطوبت خاک نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری هوشمند، حسگر، رطوبت خاک، عملکرد، کشاورزی دقیق

مقدمه

آبیاری می‌تواند تصمیم بگیرند که در چه زمانی، چه مقدار آب را برای رسیدن به بیش‌ترین حد تولید گیاه و کم‌ترین حد میزان مصرف آب به کار ببرند (Hanson et al, 2000). از این گذشته، میزان و زمان بندی دقیق آبیاری، حفظ کیفیت خاک در محیط پایین‌تر از عمق ریشه راه، از طریق جلوگیری از انتقال مواد شیمیایی کشاورزی باعث می‌گردد (Leib et al., 2003). روش‌های متداولی برای اندازه‌گیری رطوبت آب خاک شامل: روش پخش نوترونی (Charlesworth, 2005)، تانسیمتری (Prichard et al., 2004)، بلوک‌های گچی (McCann et al, 1992; Spaans and Leib, 1998; Baker, 1992)، حسگرهای با دانه بندی متخلخل (Leib, 1998; Campbell and Mulla, 1990; Leib et al, 2002) و روش وزنی (Gardner, 1986) در اعماق مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش‌ها روش‌هایی متداول و بسیار معمولی بوده که برای سالیان متمادی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد و در زمان بندی کردن آبیاری نقش به‌سزایی دارند. این روش‌ها و تجهیزات با در نظر گرفتن دقت، سهولت، زحمت انجام کار، خطر سلامتی و قیمت با یکدیگر متفاوت می‌باشند. بطور معمول تمام روش‌هایی که اشاره شد برای

اندازه‌گیری مقدار دقیق رطوبت حجمی خاک در علوم کشاورزی، هیدرولوژی و خاکشناسی بسیار حائز اهمیت است. لذا استفاده از روشی که بتوان رطوبت خاک را در شرایط طبیعی و بدون دست خوردگی با سرعت و دقت بالا به دست آورد، بسیار با اهمیت و اساسی است. بحران خشکسالی، محدودیت منابع آب و اتلاف آب از طریق عدم برنامه ریزی صحیح آبیاری با توجه به تنش‌های رطوبتی خاک و گیاه باعث گردیده است که، زمان و مقدار آبیاری بیش از پیش در مدیریت آبیاری در مزرعه مورد توجه قرار گیرد. حسگرهای رطوبتی خاک در کاربردهایی نظیر کشاورزی دقیق، پایش محیط آب خاک، نمایش پیوسته مقدار آب خاک، بودجه بندی کردن منابع آبی، و زمان بندی کردن آبیاری استفاده می‌شوند. با اندازه گرفتن مقدار رطوبت خاک،

۱- دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

(Email: ghaemi@shirazu.ac.ir)

*- نویسنده مسئول

حسگرها را با روش وزنی مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد بین حسگرها از نظر دقت اختلاف معنی داری وجود دارد (Chow et al, 2009). بنابراین این تحقیق با اهداف الف- اندازه گیری مقدار رطوبت خاک با استفاده از روش های متداول تعیین رطوبت خاک با استفاده از روش وزنی، تانسومتر، بلوک های مقاومت و نوترون متر و ۴ حسگر هوشمند رطوبت خاک قابل دسترس در ایران ب- ارزیابی عملکرد حسگرهای هوشمند و روش های متداول تعیین رطوبت خاک در شرایط کاربرد آب چاه در عمق های ۳۰ و ۶۰ سانتی متر در روش آبیاری میکرو و در نهایت معرفی یک حسگر هوشمند مناسب از میان حسگرهای مورد مطالعه برای اهداف برنامه بندی کردن آبیاری در سیستم آبیاری قطره ای در ایران می باشد.

مواد و روش ها

تحقیق در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در عرض جغرافیایی ۲۹°۳۶' و طول جغرافیایی ۳۳°۵۲' و ارتفاع ۱۸۱۰ متر از سطح دریا، با کشت گیاه گوجه فرنگی در سه کرت با ابعاد ۱/۵-۱/۵ متر در خاکی با بافت لوم رسی (Clay Loam) انجام شد. گیاه گوجه فرنگی ابتدا در اوایل اسفندماه سال ۱۳۹۰ به صورت بذر (رقم فالکاتو) درون سینی کشت و بعد از رشد لازم به صورت نشاء به داخل کرت ها انتقال پیدا کرد. فاصله بوته ها روی ردیف و بین ردیف ها به ترتیب ۴۰ و ۵۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. فاصله هر یک از کرت ها با دیگری نیم متر در نظر گرفته شد. کرت های مورد نظر با روش آبیاری نواری (Tape) آبیاری شدند. برای توزیع یکنواختی بیش تر آب در کرت ها در هر کرت شش خط لوله تیپ با دبی ۴ لیتر در ساعت در هر متر و به فاصله ۲۰ سانتی متر از هم انتخاب شد. بافت خاک (توزیع اندازه ذرات) در آزمایشگاه زهکشی بخش مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز به روش هیدرومتری تعیین و خصوصیات فیزیکی خاک نیز مشخص گردید. این تحقیق دارای ۸ تیمار مختلف شامل ۴ حسگر هوشمند رطوبت خاک با نام های: Watermark 200ss, 200ss-v, ICS 9101 و ICS 9001 و ۴ روش متداول تعیین رطوبت خاک شامل روش وزنی، تانسومتر، نوترون متر و بلوک های گچی می باشد. روش وزنی به عنوان روشی دقیق در تعیین رطوبت خاک به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. فاصله بین دو آبیاری ۸ روز و در این فاصله در زمان های مختلف (هر دو روز) مقدار رطوبت خاک توسط حسگرها و روش های متداول تعیین رطوبت خاک تعیین شد. در روز هشتم قبل و بعد از آبیاری داده برداری انجام می شد. حسگرهای هوشمند، تانسومتر، نوترون متر و بلوک های گچی در عمق های ۳۰ و ۶۰ سانتی متر داخل خاک در داخل کرت قرار گرفتند. اندازه گیری رطوبت خاک توسط این تیمارها به روش های مختلف در عمق های ۳۰ و ۶۰ سانتی متری انجام شد. به این صورت

اندازه گیری رطوبت خاک، در زمان های متناوب و نه پیوسته استفاده می شوند (به عنوان مثال یک یا چند بار در هفته). هر چند تانسومتر و بلوک های مقاومت و حسگرهای با دانه بندی متخلخل می توانند به طور پیوسته اندازه گیری رطوبت خاک را انجام دهند اما امکان عدم دقت کافی آن ها در زمان و یا در مکش های بالای رطوبتی از معایب آن ها است (Leib et al, 2003). در دهه های اخیر صنعت حسگر با تکنولوژی کامپیوتر همراه شده است و پیشرفت های زیادی داشته است. انواع زیادی از حسگرهای رطوبتی در دهه های اخیر ساخته شده است که اکثر این حسگرهای رطوبتی جدید برای نمایش پیوسته رطوبت خاک و به کارگیری در سیستم آبیاری هوشمند طراحی شده اند. مطالعات زیادی در زمینه عملکرد حسگرهای مختلف انجام شده است. بوترا و همکاران در تحقیقی به ارزیابی یک سیستم آبیاری هوشمند و مقایسه آن با روش آبیاری دستی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد اختلاف معنی داری بین شاخص های رشد گیاه در دو روش آبیاری وجود ندارد (Boutraa et al, 2011). یودر و همکاران در یک آزمایشگاه با انجام آزمایشاتی توانایی چند حسگر را از نظر دقت، با اندازه گیری های مکرر در طول زمان و با رژیم های رطوبتی مختلف بعد از کالیبراسیون اولیه مورد بررسی قرار دادند که نتایج به دست آمده تفاوت های معنی داری را در عملکرد حسگرها نشان داد (Yoder et al, 1998). یویدر و همکاران به منظور تعیین بهتر زمان بندی کردن آبیاری چند حسگر رطوبتی خاک مبتنی بر داده های نوترون متر واسنجی شده را مورد ارزیابی قرار دادند که نتایج حاصل دقت مناسب حسگرها را از نظر اندازه گیری مقدار رطوبت خاک به صورت پیوسته را نشان داد (Leib et al, 2003). کاردناس و دوکس چند حسگر رطوبتی خاک را از نظر دقت اندازه گیری تحت شرایط میدانی مورد ارزیابی قرار دادند و همزمان یک کاوشگر ECH_2O کالیبره شده در عمق های مشابه با حسگرهای رطوبتی خاک برای اهداف مقایسه استفاده کردند. نتایج حاصل از این مقایسه همبستگی معنی داری را بین داده های به دست آمده از حسگرهای رطوبتی خاک و ECH_2O کالیبره شده را نشان داد (Cardenas & Dukes, 2009). تامپسون و همکاران برای اندازه گیری پتانسیل ماتریک خاک حسگر Watermark مدل ۲۰۰ss و تانسومتر را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد حسگر Watermark با توجه به معادله کالیبراسیون انجام شده در محل آزمایش می تواند داده های دقیق از پتانسیل ماتریک خاک فراهم کند (Thompson et al, 2006). نوزل و همکاران به منظور جمع آوری داده ها از راه دور از یک شبکه وایرلس و حسگرهای Watermark و MPS-1 استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد پیوستگی و جمع آوری داده ها در این شبکه دورسنجی به خوبی کار می کند (Nolze et al, 2012). چاو و همکاران تحقیقی روی ۹ حسگر در یک خاک لوم شنی در مرکز تحقیقات گوجه فرنگی کانادا انجام دادند و داده های به دست آمده از این

داده‌های لحظه‌ای و پیوسته رطوبت خاک ساخته شده و با اندازه‌گیری پتانسیل آب خاک برای تصمیم‌گیری شروع و پایان آبیاری و برای خاک مربوطه تنظیم و کالیبره می‌شوند و به خاطر اینکه در طول فصل رشد نیاز به تعمیر پیدا نمی‌کنند، در محل مناسبی قرار می‌گیرند و به‌طور اتوماتیک داده‌های مربوط به رطوبت خاک را ارسال می‌کنند و بر مبنای این داده‌ها آبیاری هوشمند راه‌اندازی و تعریف می‌شود (Larson, 1998). در سال ۱۹۷۸ در آمریکا ثبت اختراع شد و بر مبنای مقاومت الکتریکی برای اندازه‌گیری رطوبت خاک استفاده می‌شود. با تغییر مقدار رطوبت خاک مقاومت الکتریکی تغییر، و بر مبنای آن رطوبت خاک اندازه‌گیری می‌شود. حسگر شامل یک جفت الکتروود است که در یک ماده متخلخل با مقاومت بالا در برابر خوردگی قرار گرفته است. با برقراری جریان مقاومت دو سر الکتروود اندازه‌گیری می‌شود. (Irrrometer, 2010).

Watermark sensor مدل ۲۰۰ss-v

ساختمان این حسگر همانند حسگر Watermark sensor مدل ۲۰۰ss می‌باشد با این تفاوت که خروجی داده‌های این حسگر به صورت ولتاژ خطی در محدوده صفر تا ۲/۸ می‌باشد و به صورت مستقیم به پتانسیل ماتریک خاک تبدیل می‌شود (Irrrometer, 2010).

حسگر ICS 9101

این حسگر ساخت ایران و با خروجی ولتاژ می‌باشد. محدوده تغییرات این حسگر از ۲ تا ۷ ولت تغییر می‌کند و متناسب با آن مکش ۰ تا ۱۵۰ سانتی‌بار را اندازه‌گیری می‌کند.

حسگر ICS 9001

این حسگر نیز که ساخت ایران است، با اندازه‌گیری مقاومت، مقدار رطوبت خاک را اندازه‌گیری می‌کند محدوده تغییرات این حسگر از ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم است و متناسب با آن بصورت خطی مقدار مکش ۰ تا ۲۰۰ سانتی‌بار را اندازه‌گیری می‌کند.

علاوه بر حسگرهای فوق‌الذکر از سه وسیله متداول دیگر اندازه‌گیری رطوبت خاک شامل تانسیموتر، بلوک گچی و نوترون‌متر استفاده گردید. تانسیموتر استفاده شده در این تحقیق از نوع فلزی ساخت شرکت ELE، با طول‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری با محدوده اندازه‌گیری مکش ۰ تا ۸۰ سانتی‌بار می‌باشد. بلوک‌های گچی استفاده شده در این تحقیق در آزمایشگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، بخش مهندسی آب ساخته شد و پس از کالیبراسیون در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. نوترون‌متر استفاده شده در این تحقیق مدل CPN, 503 DR Hydroprobe بود.

که اندازه‌گیری رطوبت خاک توسط حسگرهای هوشمند با استفاده از سیستم داده‌برداری از راه دور و توسط سیستم مخابراتی پیام کوتاه انجام شد. با ارسال پیام کوتاه به حسگر و با استفاده از یک سیستم مخابراتی استفاده شده در حسگرهای گلخانه، تمامی حسگرها با تشخیص دستور فرستاده شده، قرائت رطوبت خاک را انجام و با ارسال به دستگاه میکرو کنترل کار داده‌برداری را انجام دادند. سیستم میکرو کنترل نیز در یک ارتباط رفت و برگشتی داده‌های رطوبتی خاک را برای کاربر ارسال می‌کرد. داده‌های نوترون‌متر با استفاده از قرائت دستگاه نوترون‌متر از لوله‌های آلومینیومی واقع در عمق ۱ متری خاک، داده‌های تانسیموتر با قرائت مکش سنج به کار برده شده در ساختمان تانسیموتر و بلوک گچی با استفاده از دستگاه مقاومت سنج ویتسون بریج و از عمق‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری در کرت برداشته شد. روش واسنجی این حسگرها با استفاده از روش وزنی انجام گردید. به این صورت که نمونه‌های خاک با استفاده از مته خاکبرداری، از عمق ۳۰ و ۶۰ از جنب حسگر برداشته شد و بلافاصله بعد از این که نمونه‌های خاک جمع آوری گردید با استفاده از حسگر در عمق‌های مشابه جمع آوری نمونه‌ها، داده‌های حسگر نیز برداشته می‌شد و با توجه به چگالی ظاهری خاک درصد رطوبت حجمی خاک تعیین شد. لازم به توضیح است که قرائت حسگر بسته به نوع مدل آن به صورت مقاومت و ولت قرائت می‌شد و پس از واسنجی کردن حسگرها با ارتباط دادن قرائت حاصل از حسگر درصد رطوبت حجمی خاک تعیین می‌گردید. در این تحقیق کشت گیاه گوجه فرنگی صرفاً برای کمک به کاهش دادن مقدار رطوبت خاک از طریق جذب آب خاک و ایجاد شرایط مزرعه برای ارزیابی حسگرها انجام شد. داده‌های تمامی حسگرها در طول فصل کشت گیاه گوجه با دور آبیاری هشت روز با آب چاه در طی ۱۰ بار آبیاری (۱۰ تکرار) و تا مرحله خشک شدن خاک در هر بار آبیاری برداشت می‌شد. مقادیر رطوبت به‌دست آمده توسط حسگرهای مختلف با نرم افزار SAS (SAS Institute, 2002) به صورت طرح کرت‌های خرد شده در زمان با فاکتور اصلی حسگر و فاکتور فرعی زمان در ۱۰ تکرار تحلیل شد. همچنین آزمون آماری F-test برای مقایسه تک تک 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 حسگرهای مورد استفاده در این تحقیق اشاره می‌شود. این حسگرها به دلیل در دسترس بودن در داخل ایران و قیمت مناسب از لحاظ تعداد کاربرد در شرایط مزرعه انتخاب شد.

شرح حسگرها

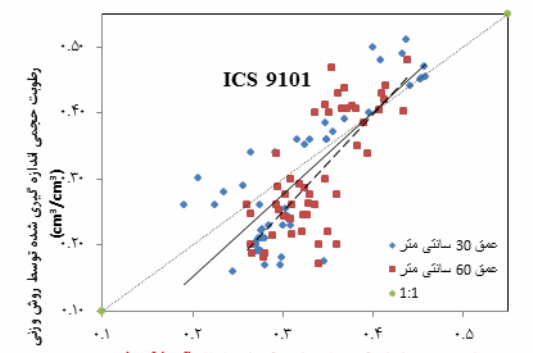
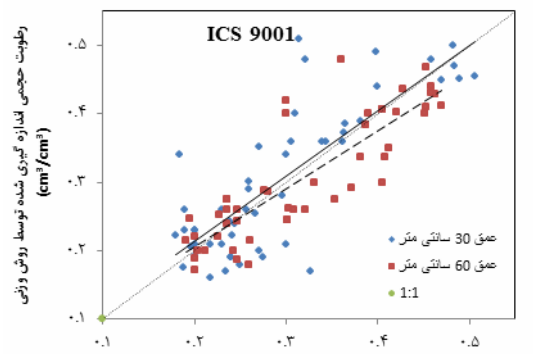
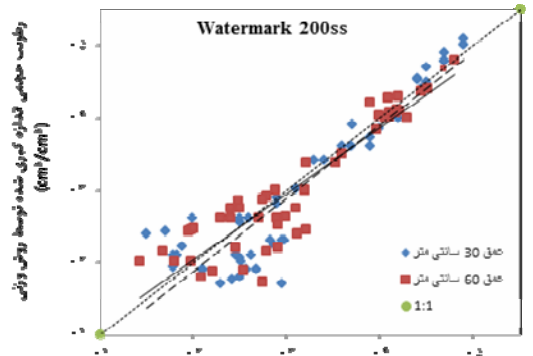
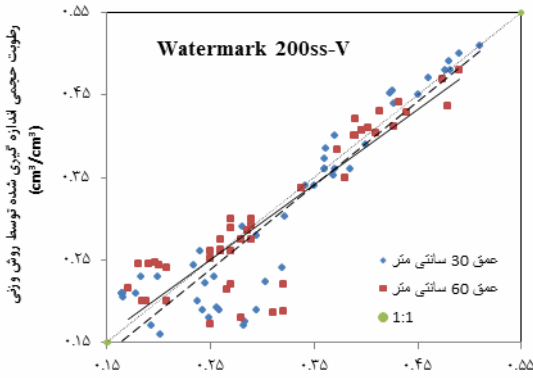
Watermark sensor مدل ۲۰۰ss

این حسگر با دانه‌بندی متخلخل، برای اندازه‌گیری و برداشت

نتایج و بحث

مختلف وجود دارد. بنابراین واکنش پذیری حسگرها نسبت به تغییرات رطوبت خاک در عمق ۶۰ سانتی متر نیز مطلوب می باشد به طوری که با کم شدن مقدار رطوبت خاک مقدار رطوبت خاک اندازه گیری شده توسط حسگرها کاهش پیدا کرده است. مقایسه مقادیر رطوبت اندازه گیری شده در دو عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی متر نشان می دهد رطوبت خاک در عمق ۶۰ سانتی متر نسبت به عمق ۳۰ سانتی متر تغییرات کمتری داشته است به طوری که مقدار رطوبت در عمق ۳۰ سانتی متر در روز پنجم نسبت به عمق ۶۰ سانتی متر کمتر می باشد و در این زمان تغییرپذیری داده های رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگر نسبت به رطوبت های پایین تر کم تر می باشد بنابراین تفاوت معنی داری بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگرها با روز چهارم اندازه گیری رطوبت خاک در عمق ۳۰ سانتی متر وجود ندارد ولی در عمق ۶۰ سانتی متر به دلیل بیش تر بودن مقدار رطوبت خاک در عمق ۶۰ سانتی متر نسبت به عمق ۳۰ سانتی متر تفاوت معنی داری بین داده های اندازه گیری شده توسط حسگرها در روز چهارم و پنجم وجود دارد. نتایج نشان می دهد کلیه حسگرها واکنش پذیری بهتری در رطوبت های بالا نسبت به رطوبت های پایین تر دارند. نتایج مقایسه میانگین حسگرهای مختلف در عمق ۶۰ سانتی متر در جدول ۴ نشان می دهد رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگرهای Watermark 200ss-v، Watermark 200ss، ICS 9001، نوترون متر، بلوک گچی و تانسومتر با روش وزنی (شاهد) اختلاف معنی داری ندارد. مقادیر اندازه گیری شده توسط حسگر ICS 9101 اختلاف معنی داری با روش وزنی (شاهد) نشان داد. بیش ترین و کم ترین اختلاف نسبت به روش وزنی (شاهد) به ترتیب مربوط به حسگر ICS 9101 و نوترون متر می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده برای حسگرهای هوشمند (Watermark 200ss-v، Watermark 200ss، ICS 9001 و ICS 9101) کم ترین و بیش ترین اختلاف به ترتیب مربوط به حسگر Watermark 200ss-v و حسگر ICS 9101 می باشد. مقایسه بین حسگرهای هوشمند Watermark 200ss-v، Watermark 200ss و نوترون متر نشان می دهد اختلاف معنی داری بین این حسگرها با نوترون متر وجود ندارد. با توجه به اینکه دستگاه نوترون متر وسیله ای دقیق برای برآورد رطوبت خاک به شمار می رود اما از معایب آن قیمت بالا و اثر سوء تشعشعات آن در هنگام کار با دستگاه است، لذا می توان گفت که حسگرهای مذکور که به لحاظ قیمت بسیار ارزان تر و فاقد هر گونه تشعشع مضر می باشند می توان جایگزین نوترون متر در عمق مخصوصی برای زمان بندی آبیاری نمود. آزمون آماری F-test برای مقایسه رابطه خطی بین داده های اندازه گیری شده توسط حسگرها و روش شاهد برای همه حسگرها در عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی متر خاک انجام شد. نتایج بدست آمده از آزمون آماری F-test، مقادیر RRMSE و Md در جدول ۵ ارائه شده است. کم ترین مقدار RRMSE برابر صفر می باشد هر چقدر این مقدار کم تر

مشخصات بافت و خصوصیات فیزیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. ابتدا تمامی حسگرها در شرایط خاک منطقه واسنجی و معادلات واسنجی آن ها طی دو بار خشک و تر شدن خاک به دست آمد. معادلات واسنجی حسگرها در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول θ ، رطوبت حجمی خاک حسب درصد، γ مقدار مکش خاک برای حسگر Watermark 200ss-v حسب سانتی متر، مقدار مقاومت حسب کیلو اهم برای حسگر Watermark 200ss، مقدار مکش خاک حسب سانتی متر برای حسگر ICS9101، مقدار مقاومت حسب اهم برای بلوک گچی و مقدار مکش خاک حسب سانتی متر برای تانسومتر را نشان می دهد، x در معادله نوترون متر نسبت شمارش و \ln در کلیه معادلات لگاریتم نپری می باشد. نتایج مقایسه میانگین با استفاده از طرح کورت های خرد شده در زمان بین حسگرهای مختلف و زمان های مختلف اندازه گیری رطوبت خاک (زمان های متوالی اندازه گیری رطوبت خاک بین دو آبیاری) توسط حسگرها در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. در این طرح فاکتور زمان برای نشان دادن تأثیر کاهش رطوبت خاک بر عملکرد حسگرها در زمان های متوالی اندازه گیری رطوبت خاک لحاظ شده است. نتایج مقایسه میانگین جدول ۳ برای عمق ۳۰ سانتی متر و زمان های مختلف اندازه گیری رطوبت خاک نشان می دهد اختلاف معنی داری بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده در زمان های اول، دوم، سوم و چهارم اندازه گیری رطوبت خاک توسط حسگرها وجود دارد ولی در زمان های چهارم و پنجم اندازه گیری رطوبت توسط حسگرها به دلیل تغییرات کم مقدار رطوبت خاک اختلاف معنی داری وجود ندارد. نتایج این جدول نشان می دهد واکنش پذیری حسگرها نسبت به تغییرات رطوبت خاک مطلوب می باشد به طوری که با کم شدن مقدار رطوبت خاک مقدار رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگرها کاهش پیدا کرده است. با توجه به جدول ۴ مقایسه میانگین بین حسگرهای مختلف در عمق ۳۰ سانتی متر نشان می دهد رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگرهای Watermark 200ss-v، Watermark 200ss، ICS 9001 و نوترون متر با روش وزنی (شاهد) اختلاف معنی داری ندارد. مقادیر اندازه گیری شده توسط بلوک گچی، تانسومتر و ICS 9101 اختلاف معنی داری با روش وزنی (شاهد) نشان داد. بیش ترین و کم ترین اختلاف نسبت به روش وزنی (شاهد) به ترتیب مربوط به تانسومتر و نوترون متر می باشد. با توجه به نتایج حاصل از حسگرهای هوشمند (Watermark 200ss-v، Watermark 200ss، ICS 9001 و ICS 9101)، کم ترین و بیش ترین اختلاف به ترتیب مربوط به ICS 9001 و ICS 9101 می باشد. نتایج جدول ۳ برای عمق ۶۰ سانتی متر نشان می دهد اختلاف معنی داری بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده در زمان های



رطوبت حجمی اندازه گیری شده با حسگرهای مختلف (cm³/cm³)

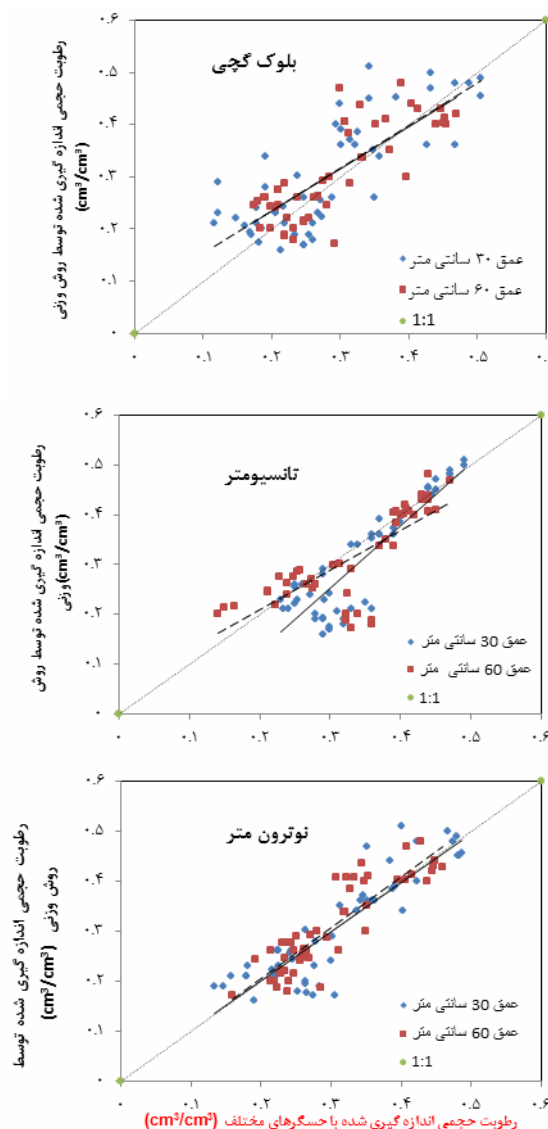
شکل ۱- مقایسه برازش خط بین مقادیر رطوبت بدست آمده از حسگرهای مختلف در مقابل رطوبت بدست آمده از روش وزنی با خط یک به یک در خاک لومرسی در عمق های ۳۰ و ۶۰ سانتی متر

باشد دقت اندازه گیری بیش تر می باشد. مقدار Md برای ارزیابی حسگرها نسبت به بیش تر یا کم تر تخمین زدن رطوبت خاک توسط حسگرها در طول دوره اندازه گیری می باشد که با علامت منفی (-) یا مثبت (+) نشان داده می شود. علامت + نشان دهنده تخمین بیش تر از مقدار واقعی و علامت - نشان دهنده تخمین کم تر از مقدار واقعی را نشان می دهد. نتایج جدول ۵ نشان می دهد بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگرهای Watermark 200ss-v، Watermark 200ss، ICS 9001 و نوترون متر در عمق های ۳۰ و ۶۰ سانتی متر تفاوت معنی داری با مقادیر حاصل از روش وزنی (شاهد) وجود ندارد. در واقع آزمون آماری F-test مقدار شیب و عرض از مبدأ برازش خط بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگر و مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط روش وزنی (شاهد) را به ترتیب با مقدار ۱ و صفر مقایسه می کند شکل ۱ و ۲. هنگامی که برازش خط بین مقادیر به دست آمده از دو روش (رطوبت حاصل از حسگر در مقابل روش وزنی) با 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 معنی دار بین مقادیر رطوبت خاک به دست آمده از دو روش با خط یک به یک و مقدار R^2 بالا برای هر کدام از حسگرها می توان گفت استفاده از حسگرهای مذکور برای تعیین رطوبت خاک در عمق ۳۰ سانتی متر می تواند مناسب باشد. نتایج به دست آمده از آزمون آماری F-test برای بلوک گچی، تانسومتر و حسگر ICS 9101 نشان می دهد بین مقادیر اندازه گیری رطوبت خاک توسط این سه روش و مقادیر اندازه گیری شده با روش وزنی (شاهد) اختلاف معنی داری از لحاظ شیب و عرض از مبدأ وجود دارد.

به طور کلی با توجه به آزمون های آماری انجام شده می توان گفت روند تغییرات رطوبت خاک توسط حسگرهای هوشمند با صرف نظر کردن از عمق کارگذاری آن ها مطلوب می باشد. تنها برای حسگر هوشمند ICS 9101 با توجه به پراکندگی داده ها نسبت به روش وزنی روند مطلوبی از تغییرات رطوبت خاک مشاهده نشد. برای روش های متداول تعیین رطوبت خاک تنها برای نوترون متر روند مطلوبی از تغییرات رطوبت خاک مشاهده شد هر چند با توجه به شکل ۲ برای تانسومتر این روند در رطوبت های بالا نسبت به رطوبت های پایین مناسب می باشد. با توجه به جدول ۵ در عمق ۳۰ سانتی متر کم ترین و بیش ترین مقدار RRMSE به ترتیب برای حسگرهای Watermark 200ss-v و بلوک گچی می باشد. مقدار Md برای تمامی حسگرها به جز حسگر ICS 9001 و بلوک گچی مقداری مثبت می باشد. بنابراین مقدار رطوبت به دست آمده از حسگر ICS 9001 و بلوک گچی کم تر از مقدار اندازه گیری شده توسط روش وزنی می باشد.

مقدار Md برای تمامی حسگرها به جز حسگر بلوک گچی مثبت می باشد بنابراین مقدار رطوبت خاک را بیش تر از مقدار واقعی برآورد می کنند. شکل های ۱ و ۲ نشان می دهند پراکندگی داده ها نسبت به خط یک به یک در رطوبت های بالاتر برای حسگرهای Watermark 200ss-v و Watermark 200ss و تانسومتر کم تر می باشد بنابراین می توان گفت که حسگرهای Watermark 200ss-v و Watermark 200ss و تانسومتر در مکش های پایین در عمق های ۳۰ و ۶۰ سانتی متر داده های دقیق تری از مقدار رطوبت خاک را اندازه گیری می کند. برای بررسی این موضوع رطوبت های بالاتر از مقدار ۲۵ درصد حجمی به عنوان مکش های بالا در نظر گرفته شد. مقایسه داده های اندازه گیری شده توسط حسگرها با روش وزنی (شاهد) با توجه به آزمون آماری F-test انجام شد. نتایج در جدول ۶ ارائه شده است. جدول ۶ نشان می دهد در مکش های پایین رطوبتی بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگرهای Watermark 200ss-v و Watermark 200ss و تانسومتر در عمق های ۳۰ و ۶۰ سانتی متر با مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط روش وزنی (شاهد) اختلاف معنی داری وجود ندارد. همچنین ضریب همبستگی (R^2) بالا نشان می دهد حسگرهای مذکور دقت اندازه گیری بالایی در مکش های پایین رطوبتی دارند. بررسی عملکرد این حسگرها در مکش های بالا با توجه به پارامترهای آماری جدول ۶ نشان می دهد ضریب همبستگی (R^2) پایین و اختلاف معنی داری بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگرهای Watermark 200ss-v و Watermark 200ss و تانسومتر در عمق های ۳۰ و ۶۰ سانتی متر با مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط روش وزنی (شاهد) وجود دارد. بنابراین نتایج نشان می دهد حسگرهای مذکور دقت اندازه گیری بالاتری در مکش های پایین رطوبتی نسبت به مکش های بالای رطوبت دارند.

در عمق ۶۰ سانتی متر کمترین و بیشترین مقدار RRMSE به ترتیب برای حسگرهای Watermark 200ss و ICS 9001 می باشد.



شکل ۲- مقایسه برازش خط بین مقادیر رطوبت بدست آمده از حسگرهای مختلف در مقابل رطوبت بدست آمده از روش وزنی با خط یک به یک در خاک لومرسی در عمق های ۳۰ و ۶۰ سانتی متر

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه

نام خاک	بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	چگالی ظاهری خاک (g/cm^3)	تخلخل (%)	انحراف معیار اندازه ذرات (mm)	میانگین قطر ذرات خاک (mm)	درصد رطوبت FC	درصد رطوبت PWP
سری دانشکده	Clay Loam	۳۵	۳۵	۳۰	۱/۱	۰/۵۹۳۰	۱۶/۳۷۰۲	۰/۰۳۵۴	۰/۳۱	۰/۱۴

جدول ۲- معادلات واسنجی مربوط به حسگرهای استفاده شده در خاک

R ²	معادله	حسگر
۰/۹۷	$Lny = - ۱۱/۲۶ \Theta + ۹/۴۵۰$	Watermark 200ss-v
۰/۹۸	$Lny = - ۸/۱۴۶ \Theta + ۴/۳۴۷$	Watermark 200ss
۰/۹۵	$Lny = - ۷/۷۴۴ \Theta + ۸/۴۸۴$	ICS 9001
۰/۸۷	$Lny = - ۸/۸۲۱ \Theta + ۹/۰۰۹$	ICS 9101
۰/۹۱	$Lny = - ۱۱/۹۴ \Theta + ۱۱/۹۶۳$	بلوک گچی
۰/۹۳	$Lny = - ۱۰/۳۶ \Theta + ۸/۸۲۶$	تانسیومتر
۰/۷۶	$\Theta = ۱۶/۲۰۹ x - ۲/۰۷۴$	نوترون متر

جدول ۳- مقایسه میانگین تأثیر زمان‌های مختلف اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک (زمان‌های متوالی بین دو آبیاری) 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 (%)	۰/۴۴۹۶a	۰/۳۵۸۱b	۰/۲۵۹۰c	۰/۲۴۲۴d	۰/۲۳۴۴d
رطوبت حجمی در عمق ۶۰ cm (%)	۰/۴۱۸۵a	۰/۳۸۰۳b	۰/۲۸۰۸c	۰/۲۵۹۹d	۰/۲۴۲۶e

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

جدول ۴- مقایسه میانگین مقدار رطوبت آب در خاک اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای مختلف حسب cm^3/cm^3 در یک خاک لومرسی در عمق‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری

نام حسگر	روش وزنی	Watermark 200ss-v	Watermark 200ss	ICS9001	ICS9101	بلوک گچی	تانسیومتر	نوترون متر
درصد رطوبت حجمی در عمق ۳۰ cm	۰/۳۰۲۶dc	۰/۳۱۲۵dc	۰/۳۱۴۳bc	۰/۲۹۳۸de	۰/۳۲۴۷ab	۰/۲۸۱۰e	۰/۳۴۰۳a	۰/۳۰۴۶dc
درصد رطوبت حجمی در عمق ۶۰ cm	۰/۳۰۸۳bcd	۰/۳۱۳۴bc	۰/۳۱۴۳bc	۰/۳۲۱۴ba	۰/۳۳۸۵a	۰/۲۹۱۹d	۰/۳۲۵۹ab	۰/۳۰۱۴cd

اعدادی که دارای حروف مشابه نیستند در سطح ۱ درصد معنی‌دار هستند

جدول ۵- پارامترهای آماری مقایسه مقدار رطوبت بدست آمده از برازش خط بین روش وزنی و مقدار رطوبت بدست آمده از حسگرهای مختلف با خط یک به یک توسط آزمون آماری (F-test) و مقادیر Md و RRMSE در خاک لومرسی در عمق‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری

نام حسگر	عمق	شیب خط	عرض از مبدأ	Md (cm^3/cm^3)	RRMSE (%)	R ²	F (Slope)	F (Intercept)
Watermark 200ss-v	۳۰Cm	۱/۰۱	-۰/۰۱	۰/۰۰۹	۱۳	۰/۸۵	۰/۰۵۴ ^{ns}	۲/۹ ^{ns}
	۶۰Cm	۰/۹۰	۰/۰۲	۰/۰۰۵	۱۳	۰/۷۹	۳/۸۱ ^{ns}	۰/۶۶ ^{ns}
Watermark 200ss	۳۰Cm	۱/۰۱	-۰/۰۱	۰/۰۱	۱۴	۰/۸۵	۰/۰۸۹ ^{ns}	۳/۳۳ ^{ns}
	۶۰Cm	۰/۹۱	۰/۰۲	۰/۰۰۶	۱۱	۰/۸۴	۱/۶۳ ^{ns}	۱/۵۹ ^{ns}
ICS 9001	۳۰Cm	۰/۹۶	۰/۰۲	-۰/۰۰۸	۲۱	۰/۶۵	۰/۱۵۷ ^{ns}	۰/۹۶۹ ^{ns}
	۶۰Cm	۰/۸۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۱۶	۰/۷۳	۳/۵۱ ^{ns}	۳/۲۳ ^{ns}
ICS9101	۳۰Cm	۱/۲۵	-۰/۰۹	۰/۰۱	۲۲	۰/۶۷	۳/۹۹ ^s	۳/۹۸ ^s
	۶۰Cm	۱/۴۶	-۰/۱۸	۰/۰۳	۲۳	۰/۵۵	۸/۱۵ ^s	۵/۸۱ ^s
بلوک گچی	۳۰Cm	۰/۸۱	۰/۰۷	-۰/۰۲	۲۴	۰/۶۱	۴/۰۳ ^s	۴/۹۸ ^s
	۶۰Cm	۰/۸۰	۰/۰۷	-۰/۰۱	۱۹	۰/۶۱	۴/۳۳ ^s	۴/۰۹ ^s
تانسیومتر	۳۰Cm	۱/۲۵	-۰/۱۲	۰/۰۳	۲۲	۰/۷۸	۷/۲۴ ^s	۲۵/۲۳ ^s
	۶۰Cm	۰/۷۹	۰/۰۵	۰/۰۱	۱۹	۰/۶۱	۵/۲۲ ^s	۴/۱۸ ^s
نوترون متر	۳۰Cm	۰/۹۷	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۱۶	۰/۷۸	۰/۱۰۴ ^{ns}	۰/۰۷۶ ^{ns}
	۶۰Cm	۱/۰۲	۰/۰۰۷	۰/۰۰۶	۱۳	۰/۷۹	۰/۰۷ ^{ns}	۱/۳۹ ^{ns}

ns و S به ترتیب عدم تفاوت معنی‌دار و تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد

نتیجه گیری

در این تحقیق عملکرد هفت دستگاه مختلف اندازه گیری رطوبت خاک شامل چهار حسگر هوشمند اندازه گیری رطوبت خاک با نام های Watermark 200ss، Watermark 200ss-v، ICS 9001 و ICS9101 و سه دستگاه نوترون متر، تانسومتر و بلوک گچی در دو عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی متر در روش آبیاری میکرو با کشت گیاه گوجه فرنگی در گلخانه ارزیابی شد. روش آبیاری میکرو با لوله های تیپ به دلیل توزیع بیش تر یکنواختی آب آبیاری انتخاب شد. برای ایجاد شرایط تغییرات رطوبتی در خاک، گیاه گوجه فرنگی با اهداف جذب آب خاک و کاهش سریع تر آب خاک کاشته شد. نتایج این تحقیق برای عمق ۳۰ سانتی متر نشان داد در بین دستگاه های اندازه گیری رطوبت خاک، دستگاه نوترون متر کمترین اختلاف را با روش وزنی به عنوان روشی دقیق، دارد.

تانسیومتر بیش ترین اختلاف مقادیر اندازه گیری شده رطوبت با روش وزنی (شاهد) را نشان داد. نتایج حاکی از آن بود که تانسومتر داده های دقیقی در مقادیر رطوبت بالا (مکش های پایین) دارد. نتایج برای حسگرهای هوشمند نشان داد که به جز حسگر ICS9101 سایر حسگرها اختلاف معنی داری با روش وزنی نداشتند و مقدار دقیقی از رطوبت خاک نسبت به روش وزنی نشان دادند. در مکش های پایین حسگرهای Watermark 200ss و Watermark 200ss-v داده های دقیق تری را نسبت به حالتی که مکش های بالاتر را شامل می شود اندازه گیری می کنند. بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگرهای Watermark 200ss، Watermark 200ss-v و تانسومتر در مکش های بالا اختلاف معنی داری با مقادیر به دست آمده

از روش وزنی وجود دارد. بنابراین استفاده از حسگرهای Watermark 200ss و Watermark 200ss-v و تانسومتر در رطوبت های بالا توصیه می شود. مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط بلوک گچی اختلاف معنی داری با روش وزنی (شاهد) دارد. نتایج نشان داد واکنش پذیری حسگرها نسبت به تغییرات رطوبت خاک در زمان های مختلف مناسب می باشد به طوریکه در زمان های مختلف داده های اندازه گیری شده توسط حسگرها اختلاف معنی داری با هم داشتند. بین حسگرهای هوشمند حسگر Watermark 200ss-v با توجه به عدم تفاوت معنی دار با روش وزنی و کمترین مقدار RRMSE و بیش ترین مقدار R^2 نسبت به سایر حسگرها دارای بیش ترین دقت و حسگر ICS 9101 دارای کمترین دقت در عمق کاربردی ۳۰ سانتی متر می باشند. نتایج این تحقیق در عمق ۶۰ سانتی متر نشان داد بین مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط تمام حسگرها به جز حسگر ICS9101 اختلاف معنی داری با روش وزنی (شاهد) وجود ندارد. نتایج برای حسگرهای هوشمند نشان داد دقیق ترین حسگرها برای اندازه گیری مقدار رطوبت خاک حسگر Watermark 200ss-v و حسگر Watermark 200ss می باشند به طوریکه کمترین اختلاف مقادیر رطوبت اندازه گیری شده نسبت به روش وزنی بین حسگرهای هوشمند، مربوط به حسگر Watermark 200ss-v، و کمترین مقدار RRMSE و بیش ترین مقدار R^2 مربوط به حسگر Watermark 200ss می باشد. مقادیر رطوبت اندازه گیری شده توسط حسگر ICS9101 اختلاف معنی داری با روش وزنی (شاهد) نشان داد به طوریکه بیش ترین اختلاف نسبت به روش وزنی مربوط به حسگر ICS9101 می باشد.

جدول ۶- پارامترهای آماری مقایسه بین مقادیر رطوبت بدست آمده از حسگرهای Watermark 200ss، Watermark 200ss-v و تانسومتر و روش وزنی در رطوبت های بالا و پایین (مکش های پایین و بالا) در عمق ۶۰ سانتی متر در خاک لومرسی

نام حسگر	عمق	مکش	شیب خط	عرض از مبدأ	R^2	F (Slope)	F (Intercept)
Watermark 200ss-v	۳۰ cm	پایین	۱/۰۲	-۰/۰۰۵	۰/۹۶	۰/۴۱ ^{ns}	۱/۴۸ ^{ns}
		بالا	۰/۷۱	۰/۰۵	۰/۵۹	۶/۷۹ ^s	۵ ^s
	۶۰ cm	پایین	۰/۹۹	-۰/۰۰۶	۰/۹۵	۲/۸۳ ^{ns}	۰/۷۱ ^{ns}
Watermark 200ss	۳۰ cm	بالا	۰/۷۹	۰/۰۴	۰/۶۳	۴/۴۴ ^s	۶/۴۹ ^s
		پایین	۰/۹۶	۰/۰۱	۰/۹۶	۰/۷۵ ^{ns}	۳/۳۱ ^{ns}
	۶۰ cm	بالا	۰/۶۸	۰/۰۶	۰/۵۰	۵/۹۹ ^s	۴/۵۳ ^s
تانسیومتر	۳۰ cm	پایین	۰/۸۶	۰/۰۴	۰/۸۹	۳/۲۵ ^{ns}	۰/۲۰ ^{ns}
		بالا	۰/۶۷	۰/۰۶	۰/۵۱	۸/۳۵ ^s	۱۱/۸۱ ^s
	۶۰ cm	پایین	۱/۰۴	-۰/۰۱	۰/۹۷	۱/۸۸ ^{ns}	۰/۱۵ ^{ns}
		بالا	۰/۶۴	۰/۰۸	۰/۴۲	۴/۶۱ ^s	۴/۳۸ ^s
		پایین	۰/۸۱	۰/۰۵	۰/۸۸	۳/۹۱ ^{ns}	۰/۷۵ ^{ns}
		بالا	۰/۵۱	۰/۱۰	۰/۳۷	۱۹/۲۳ ^s	۲۳/۳۴ ^s

ns و s به ترتیب عدم تفاوت معنی دار و معنی داری در سطح ۵ درصد

9: 493-544.

Hanson, R.B., Orloff, S., Pters, D. 2000. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *California Agriculture* 54, 38-42.

Irrrometer. 2010. Watermark Soil Moisture Sensor – Model 200SS. Specification Document. Irrrometer company, Inc. P. O. Box 2424, Riverside, CA 92516. <http://www.irrometer.com>

Larson, G.F. 1985. Electrical sensor for measuring moisture in landscape and agricultural soils. U. S. Patent 4,531,087. Date of Patent: July 23, 1995.

Leib, B.G., Jabro, J.D and Matthews, G.R. 2003. Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors. *Soil Science* 168, 396-408.

Leib, B.G. 1998. The 1998 survey of irrigation scheduling providers. The Washington Irrigator News letter, Washington State University, Prosser, WA.

Leib, B.G., Hattendorf, M., Elliott, T and Matthews, G. 2002. Adoption and of 1998. *Agric. Water Manage.* 55:105-120. Adaptation of Scientific Irrigation Scheduling: Trend from Washington, USA as of 1998. *Agric. Water Manage.* 55:105-120.

McCann, I.R., Kincaid, D.C and Wang, D. 1992. Operational characteristics of the Watermark model 200 soil water potential sensor for irrigation management. *Applied Engr. in Agriculture* 8(5):605-609. ASAE, 2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085

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.

Prichard, T., Hanson, B. Schwankl, L., Verdegaal, P and Smith, R. 2004. (Draft publication) Deficit irrigation of quality winegrapes using micro-irrigation techniques. University of California Cooperative Extension, p. 91 (Revised April 2004)

SAS Institute. 2002. SAS/STAT User's Guide for the Personal Computer, Version 8. 01. SAS Institute, Inc. , Cary, NC.

Spaans, E.J.A and Baker, J.M. 1992. Calibration of Watermark soil moisture sensors for soil matric potential and temperature. *Plant and Soil* 143: 213-217

Thompson, R.B., Gallardo, M., Aguera, T., Valdez, L.C., Fernandez, M D. (2006), Evaluation of the watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrigation Science Journal*. 24, 185-202.

Yoder, R.E., Johnson, D.L., Wilkerson, J.B and Yoder, D.C 1998. Soil water sensor performance. *Appl. Eng. Agric.* 14, 121-133.

برای عمق ۶۰ سانتی‌متر نیز واکنش پذیری حسگرها نسبت به زمان‌های مختلف اندازه‌گیری رطوبت خاک مناسب می‌باشد. برای عمق ۶۰ سانتی‌متر همانند عمق ۳۰ سانتی‌متر نتایج نشان داد حسگرهای Watermark 200ss، Watermark 200ss-v و تانسومتر در مکش پایین رطوبتی داده‌های دقیق‌تری از مقدار آب خاک را اندازه‌گیری می‌کنند به‌طوری‌که بررسی مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط این حسگرها در شرایط مکش‌های بالا نشان داد اختلاف معنی‌داری بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط این حسگرها در مکش‌های بالا با روش وزنی وجود دارد. بین حسگرهای هوشمند دقیق‌ترین و ضعیف‌ترین حسگر برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک در عمق ۶۰ سانتی‌متر به ترتیب حسگر Watermark 200ss-v و ICS9101 می‌باشد. به طور کلی نتایج نشان داد حسگرهای هوشمند Watermark 200ss، Watermark 200ss-v و ICS 9001 در عمق‌های ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متر ابزار مناسبی برای اندازه‌گیری مقدار رطوبت خاک می‌باشند. بین روش‌های متداول تعیین رطوبت خاک دقیق‌ترین روش اندازه‌گیری رطوبت خاک با نوترون می‌باشد. بلوک‌های گچی دارای دقت پایین نسبت به روش وزنی می‌باشند. تانسومتر نیز در مکش‌های پایین دارای دقت مناسب ولی در مکش‌های بالا دقت اندازه‌گیری مناسبی از محتوی رطوبت خاک ندارد.

منابع

- Boutraa, T., Akhka, 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.
- Cardenas-Lailhacar, B., Dukes, M.D. 2009. Precision of soil moisture sensor irrigation controllers under field conditions. *Agricultural Water Management* 97: 666-672.
- Campbell, G.S., Mulla, D.J. 1990. Measurement of soil water content and potential. Chapter 6 In Stewart B.A. and Nielsen D.R. (co-editors). *Irrigation of Agricultural Crops*. American Society of Agronomy. Madison, USA pp 127-142.
- Charlesworth, P. 2005. *Soil Water Monitoring, Irrigation Insights No. 1, Second Edition*. Coelho E.F. and D. Or. 1996. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. *Trans. ASAE* 39(6):2007-2016.
- Chow, L., Xing, Z., Rees, H.W. 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.
- Gardner, W.R (1986), *Water Content*. In A. Klute (ed.) *Method of Soil Analysis Part 1*. 2 nd ed Agronomy

Investigation the Performance of Smart Sensors as a New Approach to Determine Soil Moisture Content

A.A. Ghaemi¹,*J.Rahmani Soghayeh²
Received: Mar.6,2013 Accepted: Jan.8,2014

Abstract

Accurate estimation of soil water content is necessary for effective irrigation scheduling. Different methods are used to determine the soil water content in which the speed and accuracy of the measurement by these methods are important. In recent years, smart sensors has been introduced as a fast and accurate method in order to estimate soil moisture content. In this study, the performance of 4 smart sensors as the fast method were compared with several conventional methods in order to estimate soil moisture content at 30 and 60 cm depth from soil surface in a micro irrigation system. The smart sensors used in this study were Watermark 200ss-v, Watermark 200ss, ICS9001 and ICS 9101 and the conventional methods used were tensiometer, gypsum blocks, neutron meter and gravimetric method. Results indicated that all smart sensors used in this research except of ICS 9101 were acceptable device for estimating the soil moisture content at 30 and 60 cm depths from the soil surface. The relative root mean square error (RRMSE) for the sensors of Watermark 200ss-v, Watermark 200ss, ICS 9001 and ICS9101 were 13, 11, 16 and 23% and the coefficient of correlation R^2 values were 0.79, 0.84, 0.73 and 0.55, respectively. Furthermore, among the conventional methods, the neutron meter also showed a reasonable accuracy while the equitable accuracy were not observed in gypsum blocks and tensiometer. Results showed that the performance of Watermark 200ss-v, Watermark 200ss and tensiometer for measuring the soil moisture under low soil moisture tension is better than in high soil tension condition.

Key words: Performance, Precision agriculture, Sensor, Smart irrigation, Water content

1- Associate Professor, Water Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, I.R.Iran

2- Graduate Student, Water Engineering Department, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, I.R.Iran

(*Corresponding Author Email: ghaemi@shirazu.ac.ir)