

ساخت حسگر رطوبتی به منظور آبیاری هوشمند و تعیین محل مناسب نصب آن برای دستور توقف آبیاری با هدف جلوگیری از تلفات آب

مسعود پورغلام آمیجی^۱، عبدالمجید لیاقت^{۲*}، محمد حسین ولی^۳ و حمیدرضا پارسامهر^۴

چکیده

با توجه به مسئله کمبود آب و خشکسالی در کشور ایران، مدیریت آب کشاورزی بسیار ضروری و الزامی است. مدیریت آب کشاورزی نیازمند سیاست‌گذاری در راستای استفاده درست و بهینه از آب بوده که سامانه آبیاری هوشمند راهی مناسب و بهینه جهت استفاده درست از آب می‌باشد. بدین منظور، دستگاه حسگر رطوبتی در بهمن و اسفندماه ۱۳۹۷ طرح‌ریزی و ساخته شد تا زمان مناسب قطع آبیاری در آبیاری جویچه‌ای را تعیین کند. آزمون دستگاه در آزمایشگاه و کاربرد آن در مزرعه آموزشی پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در محمدشهر از فروردین تا پایان تیرماه ۱۳۹۸ به انجام رسید. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد حسگر هوشمند رطوبت خاک برای تعیین عمق بهینه نصب و ثبت رطوبت خاک در عمق‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متر و نسبت‌های مختلف طول در روش آبیاری جویچه‌ای انجام شد. ابتدا واسنجی دستگاه بر روی خاک مزرعه مطالعاتی انجام شده و بر اساس صحت‌سنجی حاصل شده، دستگاه موردنظر به مزرعه منتقل شد. در مزرعه مذکور نیز برای رسیدن به اهداف عمق نصب بهینه دستگاه و طول بهینه آن، جویچه‌های ۳۶ متری با فاصله ۰/۷۵ متری ایجاد شد. طول‌های حساس در جویچه با نسبت ۵۰، ۷۵ و ۸۵ درصد از طول مسیر به‌عنوان نقاط شاخص انتخاب شدند. نتایج نشان داد که در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مقدار R^2 (ضریب تبیین) به ترتیب برابر ۰/۹۳ و ۰/۹۵ و در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مقدار NRMSE (جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده) به ترتیب برابر ۸۰ و ۱۳/۸۱ درصد بوده که حاکی از آموزش خوب مدل در مرحله واسنجی به صحت‌سنجی می‌باشد. ضمن اینکه متوسط مقدار پارامتر RE (خطای نسبی) در برآورد رطوبت خاک برابر ۲/۷۴ درصد به‌دست آمد که بیانگر دقت بالای دستگاه در برآورد رطوبت خاک می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که اگر دستگاه در عمق ۳۰ سانتی‌متری از سطح خاک و در طول ۷۵ درصد از ابتدای مزرعه نصب گردد، تلفات عمقی و رواناب حداقل بوده و کفایت آبیاری بهترین مقدار خود را نسبت به دیگر اعماق و طول‌ها خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: آبیاری سطحی، نفوذ عمقی، حسگر، آبیاری هوشمند، واسنجی و صحت‌سنجی.

مقدمه

از مهم‌ترین راهکارهای ارائه‌شده در مدیریت بهینه مصرف آب و

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

^۲ استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران. (*نویسنده مسئول: Aliaghat@ut.ac.ir).

^۳ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق-کنترل، دانشگاه نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

^۴ دانش‌آموخته کارشناسی، گروه مهندسی برق-قدرت، دانشگاه صدرا و گروه مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۱۰

افزایش راندمان آبیاری در بخش کشاورزی، تغییر شیوه‌های سنتی آبیاری و استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری می‌باشد. استفاده از روش‌های جدید آبیاری علاوه بر تأثیر در به‌زراعی محصولات کشاورزی مخصوصاً امکان استفاده بیشتر و بهتر از آب موجود، از فرسایش خاک نیز جلوگیری خواهد کرد (پورکریمی و همکاران، ۱۳۹۳). رطوبت خاک مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده جوانه‌زنی، رشد ریشه و کارایی مصرف آب است. تأمین رطوبت کافی و جلوگیری از تلفات، منجر به کارایی بیشتر مصرف آب و جلوگیری از مصرف بیش‌ازحد آب در کشاورزی خواهد شد (واعظی و همکاران، ۱۳۹۸؛ El-Shater et al., 2017).

نتایج حاصل از بررسی‌های مزرعه‌ای در سامانه‌ها و شبکه‌های مختلف آبیاری (سنتی و پایین‌دست سدها) در سطح کشور طی سال‌های ۹۴-۱۳۷۰ نشان می‌دهد که راندمان کاربرد آب آبیاری در

بررسی امکان تشخیص رطوبت لایه خاک در رطوبت‌های متفاوت نیز نشان داد که قرارگیری حسگر در عمق‌های موردنظر می‌تواند مفید واقع شود. استفاده از این سامانه، رطوبت موردنظر خاک اطراف ریشه گیاه را اندازه‌گیری و با تشخیص این میزان اقدام به برنامه‌ریزی کاملاً هوشمند در آبیاری می‌کند که این مهم منجر به کنترل هوشمند مصرف آب در سامانه‌های آبیاری می‌گردد.

در پژوهشی بوترا و همکاران به ارزیابی یک سیستم آبیاری هوشمند و مقایسه آن با روش آبیاری دستی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد اختلاف معنی‌داری بین شاخص‌های رشد گیاه در دو روش آبیاری وجود ندارد در صورتی که آبیاری هوشمند مصرف آب بسیار کمتری داشته است (Boutraa et al., 2011). در تحقیق دیگری نیز نولز و همکاران به منظور جمع‌آوری داده‌ها از راه دور از یک شبکه بی-سیم و حسگرهای Watermark و MPS-1 استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد پیوستگی و جمع‌آوری داده‌ها در این شبکه دورسنجی به‌خوبی کار می‌کند (Nolz et al., 2013).

دهقانی سانج و همکاران (۱۳۹۳) مطالعه‌ای را به منظور بررسی نقش مدیریت بهره‌برداری در آبیاری دقیق بر بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی در یک باغ زردآلو در کرج طی سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ و در یک مزرعه ذرت در ساوه طی سال زراعی ۱۳۹۰ انجام دادند. نتایج نشان داد که با استفاده از آبیاری دقیق، در مزرعه ذرت ۱۷/۲ درصد کاهش مصرف آب و ۴۹/۷ درصد افزایش در کارایی مصرف آب نسبت به روش محاسباتی بر اساس آمار بلندمدت هواشناسی حاصل شد. همچنین با اعمال این شیوه‌ی مدیریتی در باغ زردآلو، آب مصرفی در آبیاری دقیق نسبت به روش آمار بلندمدت هواشناسی ۲۹ درصد کاهش و کارایی مصرف آب ۱۵ درصد افزایش یافت.

تالی و همکاران نیز با اجرای طرح خودکارسازی آبیاری قطره‌ای و آبیاری با حسگرهای هوشمند رطوبت خاک روی محصول پنبه توانستند ۶۰ درصد مصرف آب را کاهش دهند (Taley et al., 1998). کوچ و لانگت نیز به چنین نتایجی دست یافتند (Koech and Langat, 2018).

قائمی و رحمانی ثقیه (۱۳۹۳) با مقایسه عملکرد حسگرهای هوشمند رطوبت خاک با چند روش متداول تعیین رطوبت خاک در روش آبیاری میکرو به این نتیجه دست یافتند که حسگرهای Watermark 200ss و Watermark 200ss-v و تانسیومتر در مکش‌های پایین نسبت به مکش‌های بالا، اندازه‌گیری دقیق‌تری از

کشور از ۲۲/۵ تا ۸۵/۵ درصد متغیر بوده و میانگین آن ۵۶ درصد است. متوسط این راندمان در سامانه‌های کرتی، نواری و جویچه‌ای به ترتیب ۵۵/۳، ۵۲/۹ و ۵۲/۵ است. متوسط راندمان کاربرد آب آبیاری در سامانه‌های آبیاری تحت فشار و سطحی به ترتیب ۶۶/۶ و ۵۳/۶ درصد می‌باشد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۴). این بررسی، لزوم استفاده از سامانه‌های هوشمند آبیاری و کنترل تلفات به‌منظور حصول راندمان بالا و جلوگیری از سرعت رشد بحرانی مصرف آب در بخش کشاورزی را نشان می‌دهد.

زمان آبیاری در هر روش آبیاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بیش‌آبیاری از یک سمت و کم آبیاری از سوی دیگر که هر دو ناشی از غفلت کشاورزان و ناآگاهی آن‌ها از میزان رطوبت موردنیاز برای رشد گیاه است، باعث شده است که هر ساله بسیاری از محصولات از بین می‌روند (Biabi et al., 2019). دلیل عمده این مشکل، کاهش رطوبت خاک، نرسیدن به‌موقع آب به محصول و یا در مواقعی آبیاری بیش از نیاز گیاهان است. با پیاده‌سازی سامانه‌های هوشمند همراه با هشدار قطع-وصل آبیاری و استفاده صحیح از اطلاعات این سامانه‌ها می‌توان از مصرف بی‌رویه آب تا حد زیادی جلوگیری کرد (Azar et al., 2019).

رطوبت خاک، پدیده‌ای بسیار مهم است که بسیاری از فرآیندهای سطح خاک شامل آب، انرژی، جذب مواد غذایی، گسترش سیستم ریشه و تغییرات کربن را کنترل می‌کند (Ochsner et al., 2013)؛ فروغی و همکاران، (۱۳۹۸). حسگرهای هوشمند رطوبت خاک در دهه‌های اخیر به دلیل تعیین سریع رطوبت خاک، برای زمان‌بندی آبیاری بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند. حسگرهای هوشمند رطوبت خاک در کاربردهایی نظیر کشاورزی دقیق، نظارت محیط آب‌و‌خاک، تحقیقات تولید گیاه، بیلان بندی منابع آبی و زمان‌بندی آبیاری استفاده می‌شوند (Wu et al., 2017; Chaudhry and Garg, 2019).

در مطالعه‌ای دورسان و ازدن در کشور ترکیه، از سامانه بی‌سیم در کنترل اتو آبیاری قطره‌ای استفاده نمودند (Dursun and Ozden, 2011). آزمایش‌های آن‌ها با استفاده از چند حسگر و قرارگیری در چند منطقه مزرعه صورت گرفت و مصرف آب را با استفاده از خودکارسازی بهینه کردند. نتایج حاکی از آن بود که استفاده از این حسگر سبب کاهش هزینه‌ها و بهره‌وری مفید در مصرف آب می‌شود (Coolong, 2013).

نتایج پژوهش عبدالرحمانی رزکه و فرخی تیمورلو (۱۳۹۲) در

مورد بررسی به ترتیب ۴۲ و ۱۷- درجه سانتی‌گراد به ثبت رسیده است. دیگر پارامترهای هواشناسی منطقه شامل میانگین رطوبت نسبی سالانه ۵۳ درصد، تبخیر پتانسیل سالانه ۲۱۸۴ میلی‌متر، سرعت متوسط باد سالانه ۲/۴۸ متر بر ثانیه و جهت غالب آن شمال غرب به جنوب شرق می‌باشد. در حدود ۴۳ درصد از باران سالانه در فصل زمستان، ۲۸ درصد در فصل پاییز، ۲۸ درصد در فصل بهار و تنها یک درصد در فصل تابستان می‌بارد (پورغلام آمیچی و همکاران، ۱۳۹۷).

ویژگی‌های خاک و آب مورد آزمایش

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، قبل از مراحل آماده‌سازی زمین، نمونه‌برداری از خاک محل انجام تحقیق صورت گرفت. نمونه‌برداری از خاک مزرعه در سه عمق به منظور تعیین بافت خاک انجام شد. بافت خاک از طریق مثلث بافت خاک USDA^۱ تعیین گردید. جهت تعیین مشخصات خاک منطقه قبل از شروع آزمایش، نمونه‌برداری خاک توسط مته حفاری به دو صورت دست-خورده و دست‌نخورده در سه عمق ۲۰-۰، ۴۰-۲۰ و ۶۰-۴۰ برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک گرفته شد زیرا عمق خاک زراعی در این منطقه به دلیل وجود یک لایه سنگریزه در عمق ۶۰ سانتی‌متری بسیار محدود بود. سپس با رعایت ملاحظات لازم به آزمایشگاه زهکشی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران منتقل شد.

مشخصات فیزیکی خاک مزرعه شامل فراوانی نسبی ذرات با روش‌های هیدرومتری، جرم مخصوص ظاهری با روش سیلندر، رطوبت ظرفیت زراعی (FC^2) و رطوبت نقطه پژمردگی (PWP^3) با دستگاه صفحات فشاری در مکش ۰/۳ و ۱۵ بار و رطوبت اشباع با روش وزنی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری مشخصات شیمیایی خاک با استفاده از گل اشباع تهیه شده از نمونه‌های خاک، pH خاک به وسیله دستگاه pH متر و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) خاک به وسیله دستگاه هدایت سنج الکتریکی اندازه‌گیری شد. نتایج خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در اعماق مختلف در جدول (۱) آورده شده است.

مقدار رطوبت خاک نشان می‌دهند. تامپسون و همکاران نیز برای اندازه‌گیری 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 واسنجی انجام شده در محل آزمایش می‌تواند داده‌های دقیقی از پتانسیل ماتریک خاک فراهم کند (Thompson et al., 2006). برای اندازه‌گیری رطوبت خاک و کنترل هوشمند مصرف آب، استفاده از دستگاه‌های رطوبت‌سنج خاک ضروری می‌باشد. با توجه به وارداتی و گران بودن سامانه‌های کنترل هوشمند، استفاده کشاورزان از این فناوری در سیستم‌های آبیاری محدود بوده است. بدین منظور، دستگاه رطوبتی با هدف تخمین رطوبت خاک و برای اولین بار همزمان با سه حسگر ساخته شد.

اهداف دیگر پژوهش؛ تعیین عمق و طول بهینه نصب حسگر رطوبتی در طول جویچه برای هشدار قطع آبیاری به منظور حصول بیشترین راندمان و کمترین تلفات بر اساس دبی و مشخصات جویچه می‌باشد. در گیاهان بوته‌ای، گلدان‌ها و یا درختان فقط عمق بهینه نصب کفایت می‌کند اما از آنجاکه در آبیاری سطحی و به‌طور مخصوص آبیاری جویچه‌ای یک مسیر طولانی درگیر مسئله نفوذ است، لذا باید در نسبت‌های مختلف طولی از ابتدای مزرعه آزمایش‌ها انجام شود. با داشتن طول بهینه نصب دستگاه، عمق بهینه برای هشدار قطع آبیاری به دست خواهد آمد. ضمن اینکه تاکنون استفاده همزمان از سه حسگر که در نواحی مختلف عمق خاک نصب شوند، مطالعه‌ای صورت نگرفته است.

مواد و روش‌ها

موقعیت محل آزمایش

پژوهش حاضر در بهار سال ۱۳۹۸ در مزرعه آموزشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در جاده محمدشهر با مختصات ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه عرض جغرافیایی (°N) و ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه طول جغرافیایی (°E) در ارتفاع ۱۲۹۳ متر از سطح دریا انجام شد. طبق آمار بلندمدت، منطقه دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای بوده و بر اساس طبقه‌بندی کوپن با داشتن ۱۵۰ تا ۱۸۰ روز خشک، از نوع اقلیم نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های نسبتاً سرد و مرطوب است. مطابق آمار درازمدت ۳۰ ساله (۱۹۸۸-۲۰۱۸)، متوسط بارندگی سالانه منطقه ۲۴۷/۸ میلی‌متر و میانگین سالانه دمای هوا ۱۵/۹۳ درجه سانتی‌گراد است. بیشینه و کمینه دمای مطلق منطقه

¹ United States Department of Agriculture

² Field Capacity

³ Permanent Wilting Point

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی

θ_s (cm^3/cm^3)	θ_{PWP} (gr/gr)	θ_{PWP} (gr/gr)	P_b (gr/cm^3)	بافت خاک	ذرات تشکیل دهنده خاک (%)			عمق (cm)
					رس	سیلت	شن	
۴۶/۲۷	۱۴/۸۸	۲۷/۲۴	۱/۳۷	لومی	۳۲/۵۴	۴۶/۵۲	۲۰/۹۴	۰-۲۰
۴۶/۶۷	۱۴/۰۴	۲۵/۶۸	۱/۳۶	لومی	۳۲/۷۶	۴۲/۵۴	۲۴/۷۰	۲۰-۴۰
۴۶/۶۷	۱۲/۹۲	۲۳/۴۹	۱/۳۶	لومی	۳۳/۹۹	۴۲/۵۷	۲۳/۴۴	۴۰-۶۰

P_b جرم مخصوص ظاهری، θ_{Fc} رطوبت ظرفیت مزرعه، θ_{PWP} رطوبت نقطه پژمردگی و θ_s رطوبت اشباع می باشد.

پارامتر مهم در ابتدا جویچه‌های آبیاری یک کنتور حجمی نصب شده و دبی ورودی برای تمامی جویچه‌ها مقدار ثابت در نظر گرفته شد. ضمن اینکه قبل از شروع آزمایش، آبیاری اول و دوم برای یکسان شدن شرایط و خاک به‌طور مساوی بین جویچه‌ها انجام شد. نصب دستگاه در آبیاری‌های بعد انجام شد تا میزان خطا کاهش یابد (شکل ۱).



شکل ۱- آماده‌سازی جویچه‌ها و انجام پیش آبیاری قبل از آزمایش

مقدار متوسط اسیدیته خاک از عمق صفر تا ۶۰ سانتی‌متر برابر ۷/۶۸ بوده و متوسط شوری عصاره اشباع خاک در عمق مذکور نیز برابر ۲/۰۶ دسی‌زیمنس بر متر محاسبه شد. کیفیت آب آبیاری نیز بر اساس تقسیم‌بندی آزمایشگاه شوری خاک آمریکا در کلاس C1S1 قرار دارد. با تجزیه نمونه‌ای از آب در آزمایشگاه، مقدار هدایت الکتریکی (EC^1) معادل ۰/۶۸ دسی‌زیمنس بر متر و مقدار pH معادل ۷/۱۳ تعیین شد.

آماده‌سازی زمین و عملیات کاشت

زمین موردنظر به ابعاد ۳۶ در ۴ متر انتخاب گردید و پس از انتخاب قطعه موردنظر، ابتدا عملیات شخم و دیسک به‌منظور بهبود ساختمان خاک و حذف علف‌های هرز صورت پذیرفت. تعداد پنج جویچه با استفاده از شیارزن ایجاد گردید. طول جویچه‌ها ۳۶ متر و فاصله جویچه‌های V شکل از یکدیگر ۷۵ سانتی‌متر بود (فاصله بین وسط دو پشته از همدیگر).

شیب طولی مزرعه به‌وسیله دوربین نقشه‌برداری تئودولیت^۲ تعیین گردید و مقدار آن نزدیک به ۱ درصد (۰/۰۰۹۶ متر بر متر) بود که این مقدار شیب برای آبیاری جویچه‌ای نسبتاً زیاد می‌باشد. همچنین مزرعه دارای شیب عرضی نیز می‌باشد که با توجه به عرض کم قطعه زمین آزمایشی می‌توان از مقدار شیب عرضی چشم‌پوشی کرد. آبیاری مزرعه به‌صورت جویچه‌ای و با استفاده از لوله‌های پلی‌اتیلنی انجام شد. آب موردنیاز برای انجام آزمایش، از یک حلقه چاه عمیق و توسط شبکه‌ای که وظیفه آب‌رسانی بخشی از مزرعه پردیس را بر عهده دارد، تأمین شد. یک خط لوله فرعی در ابتدای جویچه مورد آزمایش اختصاص داده شد که آب موردنیاز برای این آزمایش را تأمین کرد. با توجه به این‌که یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی، دبی ورودی به جویچه‌ها و اندازه‌گیری حجم آب ورودی به جویچه‌ها می‌باشد، برای اندازه‌گیری این

دستگاه تشخیص رطوبت و هشدار قطع آبیاری (MRICAD^۳)

اجزای دستگاه ساخته‌شده

برای نمایش رطوبت خاکی که از طریق حسگرها به نمایشگر^۴ منتقل می‌شود، چهار کلید و چراغ هشدار وجود دارد. این دستگاه قابلیت ثبت رطوبت سه‌نقطه از اعماق خاک و یا سه‌نقطه در سطح خاک را دارا بوده و زمانی که چراغ مربوط به هرکدام از این حسگرها روشن شود، نمایانگر ثبت رطوبت مربوط به آن نقطه خواهد بود. رطوبت خاک به‌صورت مجزا و به‌صورت میانگین نمایش داده می‌شود و برای نمایش هرکدام از نقاط سه کلید با عنوان SH_1 ، SH_2 و SH_3 اختصاص داده

³ Moisture Record and Irrigation Cut off Alarm Device

⁴ Data logger

¹ Electrical Conductivity

² Theodolites

برابر خوردگی قرار گرفته است. با برقراری جریان، مقاومت دو سر الکتروود اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه برای قرار گرفتن به صورت دائم یا موقت در خاک و برداشت داده‌های پیوسته از رطوبت خاک و اعلام هشدار قطع آبیاری طراحی شده است. برای تشخیص رطوبت در اعماق مختلف، حسگرها داخل خاک قرار می‌گیرند و به صورت لحظه‌ای مقدار رطوبت خاک را قرائت می‌کنند. در این حسگرها با تغییرات رطوبت خاک تغییرات مقاومتی در خروجی دستگاه ظاهر می‌شود. قرائت دستگاه در محیط خاک کاملاً خشک، معادل صفر درصد رطوبت و در خاک اشباع شده معادل ۱۰۰ درصد رطوبت را نشان می‌دهد. می‌توان با دور و نزدیک کردن حسگرها در محل ریشه گیاه یا با افزایش و کاهش عمق قرارگیری در داخل خاک، مقدار رطوبت خاک را در یک یا چند نقطه از عمق خاک، به صورت هوشمند کنترل کرد.

از آنجایی که رطوبت اشباع در اکثر خاک‌ها حدود ۵۰ درصد است، بر این اساس دستگاه بر روی MAD برابر ۵۰ درصد تنظیم گردید. با این توضیح که وقتی چراغ هشدار میانگین سه حسگر یا هر کدام از حسگرها روشن شود، به این معنی است که جبهه رطوبتی به انتهای حسگر رسیده، رطوبت عمق موردنظر در حد اشباع بوده و آبیاری باید قطع شود. پس وقتی هشدار داده شد، آب از محل نصب حسگر رد شده و تا انتهای ریشه به حد FC و یا بیشتر رسیده و از رطوبت اشباع کمتر است. البته باید عمق بهینه برای تمامی خاک‌ها به دست آید و قبل از انتهای ریشه این حسگرها نصب گردد؛ زیرا جبهه رطوبتی از حسگرها رد شده و منطقه زیرین را نیز مرطوب می‌سازد. دبی جریان و نوع خاک، عوامل تأثیرگذار در این بخش می‌باشند.

اجزای سامانه آبیاری هوشمند

سامانه آبیاری هوشمند بر اساس جبهه رطوبتی رسیده شده به حسگرها، زمان قطع آبیاری را اعلام می‌کند. از آنجایی که حسگرها قبل از انتهای عمق ریشه نصب شده‌اند، لذا مقداری از جبهه رطوبتی از انتهای حسگرها گذشته و به منطقه ریشه زیر حسگرها می‌رسد. با این کار از تلفات عمقی آب جلوگیری شده، راندمان افزایش یافته و درصد یکنواختی توزیع آب بالا خواهد رفت؛ بنابراین با توجه به حسگرهای تعبیه شده، در صورت تشخیص می‌توان جریان آب را قطع کرده و یا می‌توان آبیاری را شروع کرد.

این سامانه از دو قسمت اصلی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری تشکیل شده است. مدار محافظتی، مدار ارتباطی، حسگرهای نصب شده

شده است. ضمن اینکه کلید SHM برای نشان دادن میانگین رطوبت سه حسگر است. این اطلاعات فقط جنبه نمایشی دارد و کلیدهای بالا و پایین برای این پارامتر عمل نخواهد کرد. تصویر دستگاه ساخته شده (MRICAD) در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- تصویر دستگاه (MRICAD) به همراه سه حسگر آن

پارامتر بعدی مربوط به واسنجی اطلاعات گرفته شده از حسگرها است که چون سه عدد حسگر وجود دارد، لذا سه دکمه برای واسنجی دستگاه وجود دارد. برای واسنجی حسگر اول کلید CA1، برای واسنجی حسگر دوم کلید CA2 و برای واسنجی حسگر سوم، کلید CA3 اختصاص داده شده است که با استفاده از کلید بالا و پایین می‌توان مقادیر این پارامترها را تغییر داد.

پارامتر بعدی مربوط به زمان است که با t_{12} و t_{23} نمایش داده می‌شوند. t_{12} مقدار زمانی است که حسگر اول مقدار رطوبت را ثبت کرده و چراغ هشدار دستگاه روشن شده است. در این مرحله تایمر شروع به شمارش می‌کند تا رطوبت به حسگر دوم برسد و بعد از رسیدن چراغ هشدار خاموش شده و فاصله زمانی بین این دو حالت ثبت می‌شود. به همین ترتیب کلید t_{23} برای حسگر دوم و سوم فعالیت می‌کند. پارامتر بعدی spd است که بیانگر سرعت زمانی گرفتن اطلاعات از حسگرها می‌باشد. به این صورت که اگر روی ۲ تنظیم شود، به این معنی است که هر دو ثانیه دستگاه اطلاعات را از حسگرها بخواند و اطلاعات به روز شوند.

نحوه کار با دستگاه MRICAD

دستگاه ساخته شده 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. دستگاه شامل یک جفت الکتروود است که در یک ماده متخلخل با مقاومت بالا در

در روابط فوق؛ O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، p_i مقادیر برآورد شده، n تعداد مشاهدات، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و \bar{p} میانگین مقادیر برآورد شده به‌وسیله دستگاه MRICAD است.

واسنجی دستگاه

تعداد هشت نمونه با جرم برابر از خاک مزرعه تهیه گردید و خاک مزرعه پس از خشک شدن، با مقداری آب به رطوبت مشخص رسید. رطوبت ۵٪ جرمی (۶/۸۵٪ حجمی) تا ۴۰ درصد جرمی (۵۴/۸٪ حجمی) نمونه‌های خاک برای آزمایش واسنجی را تشکیل می‌دادند. از آنجایی که رطوبت اشباع خاک مورد بررسی در حدود ۴۶٪ حجمی به ثبت رسید، لذا تهیه نمونه خاک مرطوب بیشتر از این رطوبت لزومی ندارد. بعد از اینکه به هر کدام از نمونه‌های خاک مقداری آب با جرم مشخص اضافه گردید، درب ظروف بسته شد تا رطوبت به‌طور کامل در کل ظرف توزیع گردد و ۲۴ ساعت بعد ثبت رطوبت توسط دستگاه انجام شد (همگی در دمای 25°C). رطوبت هر کدام از نمونه‌های خاک توسط دستگاه به ثبت رسید و مقایسه آن با ظروف نظیر به نظیر خود در جدول (۲) قابل مشاهده است. ضمن اینکه در هر کدام از نمونه‌های خاک، سه بار ثبت رطوبت انجام شد و میانگین آن گزارش شده است. لازم به توضیح است که تفاوت ناچیزی در بین تکرارها مشاهده گردید.

جدول ۲- ثبت رطوبت حجمی واقعی و قرائت دستگاه در مرحله

واسنجی	
رطوبت حجمی (%)	قرائت دستگاه (مقاومت)
۶/۸۵	۲۲
۱۳/۷	۳۲
۲۰/۵۵	۵۱
۲۷/۴	۶۳
۳۴/۲۵	۶۶
۴۱/۱	۶۶
۴۷/۹۵	۶۸
۵۴/۸	۶۸

بعد از ثبت رطوبت توسط دستگاه MRICAD، نمودار بین مقادیر واقعی و مقادیر برآورد شده در شکل (۳) رسم گردید. نمودار برازش داده‌شده حاکی از دقت بسیار خوب دستگاه با R^2 بیش از ۹۳٪ را نشان می‌دهد. دیگر محققین در دستگاه‌های تک حسگر، نیز به چنین نتیجه‌ای

در خاک و نمایش‌دهنده از اجزای سامانه آبیاری هوشمند است. حسگرها به دو نوع مقاومتی و خازنی دسته‌بندی می‌شوند که در این پژوهش از نوع مقاومتی آن استفاده شده است. حسگر خازنی حساسیت بیشتری داشته و رطوبت خاک را با دقت بالاتری اندازه‌گیری می‌کند اما حسگر مقاومتی بر اساس جبهه رطوبتی و عملاً رطوبت اشباع کارایی داشته و در رطوبت‌های پایین و رطوبت‌های بیشتر از حد اشباع کارایی لازم را ندارد.

پارامترهای ارزیابی

جهت مقایسه اعداد قرائت‌شده از دستگاه MRICAD با رطوبت واقعی اندازه‌گیری شده، از رابطه درصد خطای نسبی (RE^1)، جذر میانگین مربعات خطا ($NRMSE^2$) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شده است. رابطه (۱) کم برآورد یا بیش برآورد دستگاه در تخمین رطوبت خاک را نشان می‌دهد. رابطه (۲) جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده که نسبت اختلاف میان داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری را نشان می‌دهد و دارای واحد درصد است. اگر مقدار $NRMSE$ کمتر از ۱۰ درصد باشد، برآورد بسیار خوب، اگر بیشتر از ۱۰ درصد و کمتر از ۲۰ درصد باشد، برآورد خوب، اگر بیش از ۲۰ درصد و کمتر از ۳۰ درصد شود، برآورد نسبتاً خوب و بالای ۳۰ درصد برآورد ضعیف ارزیابی می‌شود (Savage, 1993). هنگامی که هدف اصلی ارزیابی دقت کل داده‌ها باشد، می‌توان از این عدد به‌عنوان یک شاخص مهم استفاده نمود. رابطه (۳) همبستگی یا عدم همبستگی داده‌ها را در بازه $\{0, 1\}$ نشان می‌دهد و بیانگر روند تغییرات بین داده‌ها است که بهترین مقدار آن یک می‌باشد. این روابط به‌صورت زیر ارائه شده است (Willmott and Matsuura, 2005; Nagelkerke, 1991; Zhu et al., 2019):

$$RE = \frac{p_i - o_i}{o_i} \times 100 \quad (1)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE \times 100}{\bar{o}} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(p_i - \bar{p})]^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \times \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \quad (3)$$

¹ Relative Error

² Normal Root Mean Square Error

³ Determination Coefficient

پژوهش از روش دوم استفاده گردید که نتایج آن در جدول (۳) بیان شده است.

به غیر از رطوبت‌های پایین (۶/۸۵ و ۱۳/۷٪ حجمی)، دقت دستگاه در بقیه رطوبت‌ها مناسب و قابل قبول می‌باشد. ضمن اینکه از دستگاه مذکور فقط انتظار ثبت رطوبت اشباع یا جبهه رطوبتی می‌رفت اما خطای کم دستگاه استفاده کاربردی‌تر از آن را برای قطع آبیاری و استفاده بهینه را نشان می‌دهد. پارامترهای ارزیابی مورد بررسی نیز خطای کم دستگاه در رطوبت‌های بالاتر از ۲۰٪ را نشان می‌دهد. در رطوبت‌های حجمی ۴۱ تا ۵۴٪ و ۲۰٪، دستگاه بهترین دقت را دارد (Wu et al., 2017)؛ قائمی و رحمانی ثقیه، ۱۳۹۳). کم برآورد دستگاه در رطوبت‌های پایین و بالا، نکته قابل توجهی است.

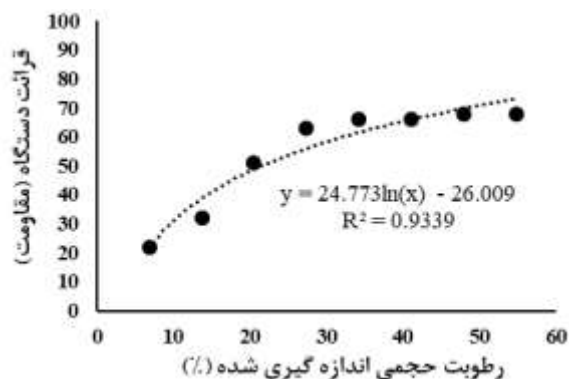
جدول ۳- خطای نسبی برآورد رطوبت توسط دستگاه در مرحله صحت-

سنجی		
قرائت دستگاه	تبدیل به واقعی	RE (%)
۱۹	۵/۶	-۱۸/۷۴
۳۸	۱۲/۳	-۱۰/۴۸
۵۱	۲۱/۱	۲/۴۶
۶۰	۳۰/۶	۱۱/۷۱
۶۶	۳۹/۳	۱۴/۶۹
۶۸	۴۲/۷	۳/۸۶
۷۰	۴۶/۴	-۳/۲۶
۷۳	۵۲/۶	-۴/۱۰

پارامترهای آماری درصد خطای نسبی (RE) حاکی از برآورد مناسب و قابل قبول قرائت دستگاه در رطوبت‌های بیش از ۲۰٪ می‌باشد. با این توضیح که در رطوبت‌های پایین، دستگاه MRICAD کم برآورد داشته و دقت تخمین مناسب نیست. از آنجایی که در مزرعه، این حد کم از رطوبت در عمل قطع آبیاری تأثیر چندانی ندارد، لذا قابل چشم‌پوشی است. مهم این است که دستگاه در رطوبت ظرفیت مزرعه و حد اشباع دقت بالایی دارا می‌باشد که RE در محدوده ۲۷/۴ تا ۵۴/۸٪ خطای کمی را نشان می‌دهد. مقدار پارامتر NRMSE نیز برابر ۱۳/۸۱٪ به دست آمد و از آنجایی که بین مقادیر ۲۰-۱۰ درصد قرار دارد، برآورد خوبی حاصل شده است. همچنین مقدار ضریب تبیین (R^2) در مرحله صحت‌سنجی برابر ۰/۹۵ محاسبه شد که نشان از تخمین قابل قبول دستگاه در برآورد رطوبت خاک داشته و واسنجی و صحت‌سنجی مناسب دستگاه را نشان می‌دهد. نتایج این بخش با مطالعه Nolz و همکاران

دست یافتند (Boutraa et al., 2011; Nolz et al., 2013; Wu et al., 2017; Chaudhry and Garg, 2019). در مجموع، دستگاه در کل بازه رطوبتی دقت قابل قبولی را از خود نشان داده است. در رطوبت بسیار کم و رطوبت بیش از حد اشباع، از برآورد مناسب رطوبت کاسته شده که این مشکل در اکثر دستگاه‌های رطوبتی وجود دارد (Nolz et al., 2019; Biabi et al, 2013).

معادله واسنجی شده نیز برای تبدیل رطوبت دستگاه به رطوبت واقعی در شکل (۳) نشان داده شده است. رابطه لگاریتمی برازش داده شده، رابطه تبدیل قرائت دستگاه به رطوبت واقعی می‌باشد که در مرحله صحت‌سنجی از آن استفاده شده است. Y قرائت دستگاه و X رطوبت حجمی برحسب درصد می‌باشد.



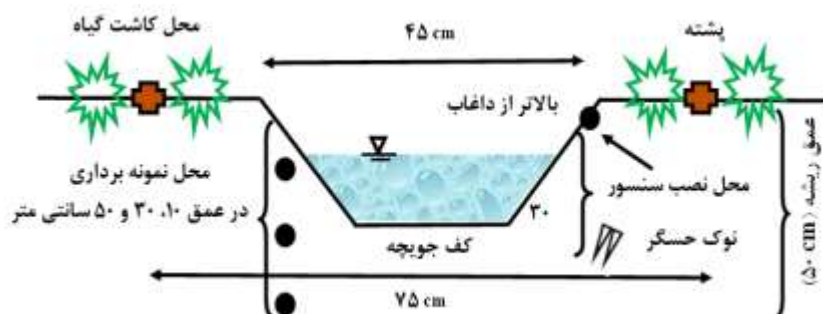
شکل ۳- نمودار واسنجی دستگاه بر اساس رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده

صحت‌سنجی دستگاه

دو روش برای صحت‌سنجی دستگاه وجود دارد. روش اول اینکه می‌توان در خاک واقعی هر مکانی دستگاه را نصب کرده و قرائت رطوبت را انجام داد. سپس قرائت دستگاه را تبدیل به واقعیت کرده و با رطوبت اندازه‌گیری شده خاک مدنظر، آن را مقایسه کرد و دقت دستگاه را در محل صحت‌سنجی بررسی نمود؛ اما از آنجایی که تنوع رطوبتی در خاک واقعی مزرعه یا زیر درختان وجود ندارد، عملاً کارایی این روش کمتر است. روش دوم بدین صورت است که از نمونه‌های تهیه شده در مرحله واسنجی که بازه رطوبت کم تا زیاد را شامل می‌شود، برای مرحله واسنجی استفاده کرد. همانند مرحله واسنجی، حسگرهای دستگاه درون خاک‌های با رطوبت معین قرار داده شده و قرائت رطوبت ثبت می‌گردد. سپس با استفاده از فرمول به رطوبت واقعی تبدیل می‌شود. در این

جویچه‌ای (۵۰٪، ۷۵٪ و ۸۵٪ از ابتدای مزرعه)، دستگاه MRICAD در نقاط مشخص شده بر لبه پشته و بالاتر از داغاب و در عمقی کمتر از عمق توسعه ریشه نصب شد. دلیل این امر جلوگیری از تلفات نفوذ عمقی بعد از قطع جریان است؛ زیرا بعد از قطع جریان، جبهه رطوبتی به حرکت خود ادامه داده و ممکن بود به سخت لایه ۶۰ سانتی‌متری موجود در مزرعه برسد.

بر اساس عمق توسعه ریشه گیاه (کشت غالب مزرعه ذرت است) فرض گردید که میزان عمق لازم برای خیس خوردگی خاک ۵۰ سانتی‌متر باشد. بر این اساس، حسگرهای دستگاه به‌طور پیش‌فرض در عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک نصب گردید تا عمق بهینه نصب بررسی گردد. نیاز آبی نیز حدود ۳۲ میلی‌متر در هر متر عمق خاک $(FC-PWP)*DRZ*MAD=32$ در هر دور آبیاری برآورد شد. به این معنی که در عمق ۵۰ سانتی‌متری خاک، این نیاز باید برطرف گردد. شکل (۴) محل قرارگیری دستگاه، حسگر رطوبتی، ابعاد جویچه و اعماق نمونه‌برداری از خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۴- محل قرارگیری دستگاه، حسگر و نمونه‌برداری از خاک

اندازه‌گیری شد. ۳ ساعت بعد از آبیاری نیز اقدام به برداشتن نمونه خاک از سه عمق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متری با استفاده از اگر شد. نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل شدند و پس از خشک شدن در دمای 110°C به مدت ۲۴ ساعت، رطوبت جرمی محاسبه شده و سپس به رطوبت حجمی تبدیل گردید.

در خاک‌ها و محصولات مختلف (به دلیل عمق توسعه ریشه)، عمق کارگذاری متفاوت می‌باشد و جبهه رطوبتی با سرعت نابرابری حرکت می‌کند. هدف یافتن عمق بهینه نصب در خاک مزرعه موردبررسی (لؤم)

Wu و همکاران (۲۰۱۷) و Biabi و همکاران (۲۰۱۹) تطابق دارد.

آزمایش مزرعه‌ای

بعد از مطالعات آزمایشگاهی و واسنجی و صحت‌سنجی، دستگاه مدنظر به مزرعه واقعی منتقل گردید تا در حضور یک سامانه آبیاری سطحی کارایی آن موردبررسی قرار گیرد. در مزرعه برای رسیدن به اهداف عمق نصب بهینه دستگاه و طول بهینه آن، جویچه‌های ۳۶ متری بافاصله ۰/۷۵ متری ایجاد شد. طول‌های حساس در جویچه با نسبت ۵۰٪، ۷۵٪ و ۸۵٪ از ابتدای مسیر به‌عنوان نقاط شاخص انتخاب شدند. تیمارهای موردبررسی شامل:

- جویچه شاهد و نصب دستگاه در انتهای جویچه یعنی ۳۶ متر (CF)،
 - نصب دستگاه در ۵۰٪ طول جویچه یعنی ۱۸ متر (F1)،
 - نصب دستگاه در ۷۵٪ طول جویچه یعنی ۲۷ متر (F2) و
 - نصب دستگاه در ۸۵٪ طول جویچه یعنی ۳۰/۶ متر (F3) بود.
- بعد از انتخاب طول‌های حساس (وطن‌خواه، ۱۳۹۴) در آبیاری

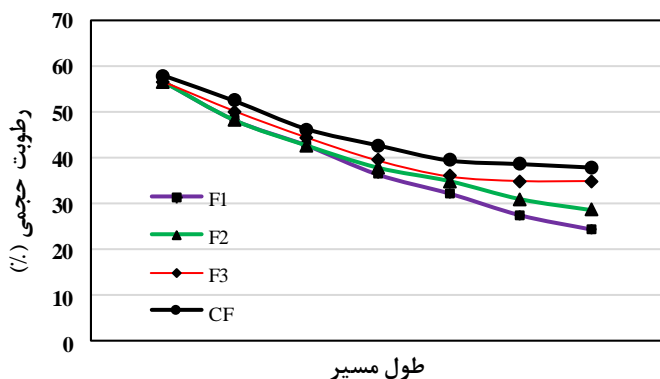
با توجه به واسنجی و صحت‌سنجی انجام شده، حد اعلام هشدار دستگاه بر روی MAD برابر با ۶۵٪ تنظیم گردید که معادل با رطوبت اشباع آبیاری با حجم ثابت آب برای همه جویچه‌ها انجام شد و بعد از روشن شدن چراغ هشدار دستگاه، آبیاری قطع گشته و زمان و حجم آب‌داده شده ثبت گردید. به‌طور میانگین بعد از گذشت یک دقیقه و ۴۰ ثانیه، دستگاه هشدار داده و آبیاری قطع می‌شد. ۲ ساعت بعد از آبیاری، در فواصل ۶ متری از ابتدا تا انتهای جویچه در تمامی حالت‌ها از عمق ده سانتی‌متری خاک، میزان رطوبت با استفاده از دستگاه MRICAD

می‌دهد. رطوبت انتهایی مسیر با مقدار ۲۴/۲۷ درصد کمترین میزان رطوبت عمق ۱۰ سانتی‌متری جویچه بوده که مربوط به حالت F1 می‌باشد و در طرف مقابل CF با مقدار ۳۷/۸۴ بیشترین رطوبت انتهایی مسیر را به خود اختصاص داده است.

جدول ۴- ثبت درصد رطوبت کف جویچه در عمق ۱۰ سانتی‌متری با دستگاه MRICAD

CF	F3	F2	F1
۵۷/۹۹	۵۶/۶۶	۵۶/۶۶	۵۶/۶۶
۵۲/۴۲	۵۰/۲۰	۴۸/۲۱	۴۸/۲۱
۴۶/۳۰	۴۴/۴۷	۴۲/۷۱	۴۲/۷۱
۴۲/۷۱	۳۹/۴۰	۳۷/۸۴	۳۶/۳۴
۳۹/۴۰	۳۵/۹۰	۳۴/۹۰	۳۲/۲۰
۳۸/۶۰	۳۴/۹۰	۳۰/۹۲	۲۷/۴۰
۳۷/۸۴	۳۴/۹۰	۲۸/۵۳	۲۴/۲۷

رطوبت ثبت شده با استفاده از حسگرهای دستگاه (شکل ۵) با رطوبت ثبت شده با استفاده از نمونه‌گیری در اعماق ۱۰ سانتی‌متری خاک در تمامی جویچه‌ها (شکل ۶ تا ۹) در تطابق بوده و این موضوع تخمین درست دستگاه MRICAD در برآورد رطوبت خاک در اعماق مختلف را نشان می‌دهد. به دلیل زمان‌بر بودن نمونه‌برداری خاک با آگر، می‌توان جهت سهولت کار نمونه‌برداری در تحقیقات آتی نیز از این روش استفاده کرد.



شکل ۵- توزیع رطوبت کف جویچه‌ها در عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک

ابتدای امر دستگاه در طول ۵۰٪ از ابتدای جویچه نصب شد و با دبی ۱/۰۹ لیتر در ثانیه جریان یافت. بعد از روشن شدن چراغ هشدار

و تعمیر رابطه آن به دیگر خاک‌ها (سبک و سنگین) می‌باشد. طبق رابطه (۴) عمق بهینه نصب حسگرهای دستگاه به دست خواهد آمد:

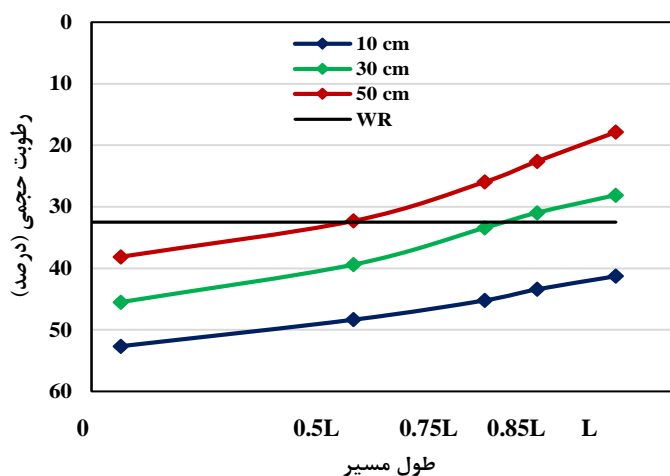
$$Y = DRZ - XS \quad (4)$$

که در آن؛ Y عمق نصب حسگرهای رطوبتی، DRZ عمق توسعه ریشه و XS میزان پیشروی مجدد جبهه رطوبتی بعد از قطع آبیاری (Soil Moisture Redistribution) می‌باشد که همگی برحسب سانتی‌متر می‌باشند. مقدار XS در خاک‌های مختلف متفاوت بوده و برای تعیین آن نیاز به انجام آزمایش پیشروی مجدد جبهه رطوبتی در پروفیل خاک می‌باشد. در صورتی که در طی آزمایش طول بهینه این مقدار به دست نیامد، باید در آزمایشی جداگانه در همان نسبت طول ولی عمق نصب متفاوت آن را محاسبه نمود. بدین صورت که بعد از قطع جریان، حفره‌ای در کنار حسگرها حفر نمود و به صورت مشاهده‌ای و نمونه‌برداری به همراه ثبت رطوبت، مقدار حرکت جبهه رطوبتی و آب نشت کرده از انتهای حسگرها را به دست آورد.

نتایج و بحث

طول بهینه نصب دستگاه

جدول (۴) اندازه‌گیری رطوبت کف جویچه‌ها در عمق ۱۰ سانتی‌متری از سطح خاک و ثبت به وسیله دستگاه MRICAD را نشان می‌دهد. رطوبت موجود در خاک در جویچه شاهد (CF) بیشتر از دیگر جویچه‌ها بوده و در طول مسیر نوسان کمتری دارد. بعد از آن، جویچه‌ای که رطوبت ۱۰ سانتی‌متری کف آن از بقیه بیشتر باشد، جویچه ۸۵٪ طول مسیر (F3) می‌باشد و علت آن زمان بیشتر آبیاری تا رسیدن جبهه پیشروی به محل نصب حسگر می‌باشد. جویچه ۵۰٪ طول مسیر (F1) و ۷۵٪ طول مسیر (F2) در رتبه‌های بعدی دریافت آب قرار دارند و ثبت رطوبت کف جویچه گواه آن است. آن چیزی که به طور کلی می‌توان بیان کرد، این است که حداقل تا نصف مسیر جویچه (۱۸ متر) رطوبت موجود در جویچه‌ها تقریباً یکسان بوده و بعد از آن، به دلیل تفاوت در مدت زمان آبیاری، میزان جذب آب نیز متفاوت است (رضا وردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵). البته نمی‌توان به طور قطعی بیان کرد که جویچه CF بهترین حالت است و آب بیشتری دریافت کرده، زیرا باید بین تلفات عمقی و رواناب و صرفه‌جویی در مصرف آب تعادل ایجاد کرد و بهترین حالت را برگزید. جدول (۴) رطوبت کف جویچه در عمق ۱۰ سانتی‌متری را نشان



شکل ۶- ثبت رطوبت در نسبت‌های مختلف از طول جویچه در عمق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متری خاک در جویچه F1

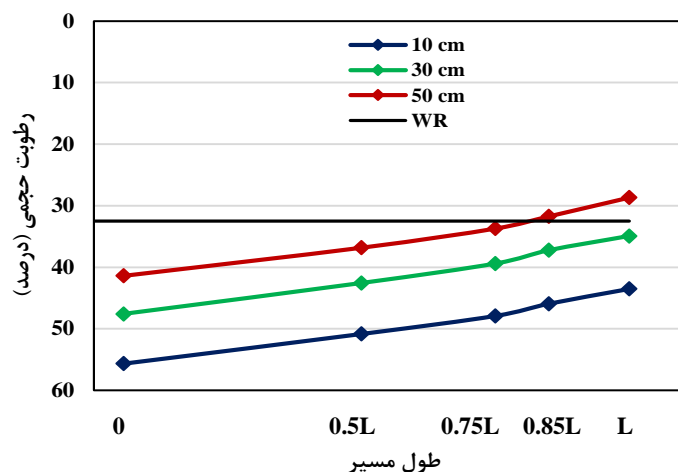
مقدار رطوبت بعد از قطع آبیاری در نسبت‌های مختلف از طول جویچه در عمق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متری خاک برای جویچه F2 در شکل (۷) نشان داده شده است. به دلیل مدت‌زمان بیشتر آبیاری و طبیعتاً حجم بیشتر آب داده‌شده نسبت به جویچه F1 (۷۰ لیتر)، از میزان کم آبیاری انتهای جویچه کاسته شده و آب اضافی بیشتر صرف نفوذ عمقی در ابتدای جویچه شده است، اما مقدار تلفات عمقی نسبت به جویچه‌های F3 و CF کمتر می‌باشد. نکته دیگر مقدار ناچیز کم آبیاری انجام‌شده در قسمت انتهایی جویچه می‌باشد که قابل چشم‌پوشی است (دهقانی سانچ و همکاران، ۱۳۹۳؛ کمالی و ابراهیمیان، ۱۳۹۶).

بنابراین با توجه به دو نکته گفته‌شده، تناسب میزان کم آبیاری و تلفات عمقی و همچنین میزان کفایت آبیاری بالای ۸۱٪، جویچه F2 یعنی نصب دستگاه در ۷۵٪ از طول مسیر (از ابتدای جویچه) و در عمق ۳۰ سانتی متر باعث می‌شود که تلفات آب و کم آبیاری کمترین میزان را داشته باشد و از همه مهم‌تر؛ نیاز آبی گیاه در محدوده عمق توسعه ریشه گیاه تأمین گردد. از طرفی در تمامی اعماق یادشده، نیاز آبی گیاه تأمین‌شده و ضمن اینکه تلفات رواناب نیز کمترین مقدار خود را دارد و لذا جویچه F2 بهترین حالت برای دستیابی به طول بهینه و عمق بهینه نصب حسگر رطوبتی می‌باشد (Thompson et al., 2006; Azar et al., 2019).

دستگاه، آبیاری قطع شد و نمونه‌گیری از اعماق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متر در ابتدای جویچه، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۸۵٪ از ابتدای جویچه و سپس انتهای جویچه انجام شد و رطوبت آن ثبت گردید. این کار برای تمامی نسبت‌های طول مذکور تکرار شد. ضمن اینکه دبی جویچه‌ها یکسان در نظر گرفته شد. این کار دو نتیجه را حاصل می‌کند؛ ابتدا اینکه با توجه به هشدار قطع آبیاری و ثبت رطوبت خاک می‌توان قرائت دستگاه در مزرعه را صحت سنجی کرد، عمق بهینه نصب را به دست آورد و به دیگر مزارع مشابه تعمیم داد. دوم اینکه طول بهینه نصب در آبیاری جویچه‌ای را مشخص کرد و پارامترهای راندمان، تلفات نفوذ عمقی، رواناب و کفایت آبیاری را محاسبه نمود.

شکل (۶) پروفیل رطوبتی خاک در سه عمق منتخب ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متر را نشان می‌دهد. خط افقی رسم شده (WR)، نیاز آبی گیاه فرضی ذرت در هر دور آبیاری را نشان می‌دهد با این توضیح که بر اساس نیاز آبی ۳۲ درصد حجمی، قضاوت‌ها باید بر اساس رطوبت در نقطه ۵۰ سانتی متری صورت گیرد زیرا تمرکز و گسترش سیستم ریشه گیاه در آن نقطه قرار دارد؛ یعنی اگر در عمق ۵۰ سانتی متری خاک میزان رطوبت به میزان ۳۲٪ حجمی باشد، مطلوب است و رطوبت بیشتر یا کمتر از این مقدار به ترتیب بیانگر تلفات آب و کم آبیاری می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۶) قابل مشاهده است، رطوبت نیم‌رخ ۱۰ سانتی متری خاک با الگوی رسم شده در شکل (۵) نیز در تطابق است و رطوبت عمق ۳۰ سانتی متری خاک، از حد اشباع در ابتدای مزرعه به کمتر از نیاز آبی در انتهای مزرعه رسیده است.

نکته اساسی این است که اگر دستگاه در ۵۰٪ از طول مسیر و در عمق ۳۰ سانتی متری از کف جویچه نصب شود؛ بعد از گذشت زمانی از قطع آبیاری، رطوبت ثبت‌شده در اعماق مختلف خاک نشان می‌دهد که بیش از ۵۰٪ از طول مسیر کم آبیاری شده و در حدود ۵۰٪ باقی‌مانده بیش از نیاز آبی آب دریافت کرده‌اند. باوجود مقدار کم نفوذ عمقی در ۱۸ متر ابتدایی جویچه؛ به دلیل پایین بودن کفایت آبیاری، نصب دستگاه در جویچه F1 و قطع آب بعد از طی نصف مسیر توصیه نمی‌شود. به دلیل مدت‌زمان کم آبیاری مقدار رواناب ناچیز بوده و در عمق ۳۰ و ۵۰ سانتی متری کم آبیاری اعمال شده است. نتیجه این بخش با مشاهدات قائمی و رحمانی ثقیه (۱۳۹۳)، لائی و همکاران (۱۳۹۵) و معروف پور و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد.

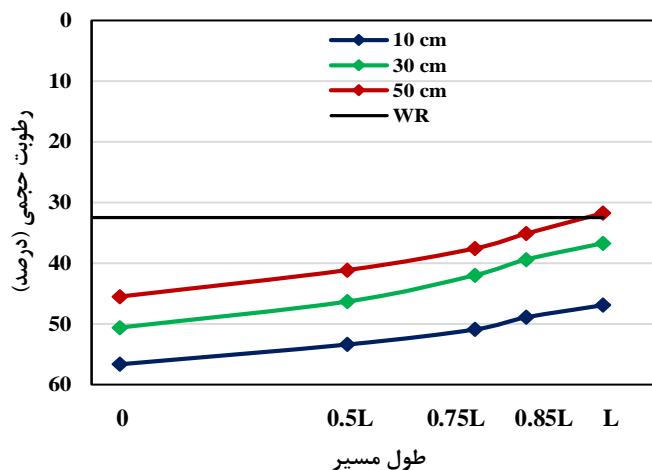


شکل ۷- ثبت رطوبت در نسبت‌های مختلف از طول جویچه در عمق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متری خاک در جویچه F2

بیشتر آب در آن جریان داشته، لذا حجم آب دریافتی آن بالاتر بوده و بنابراین میزان تلفات رواناب و به‌ویژه نفوذ عمقی تا اواسط مسیر در آن قابل توجه می‌باشد؛ زیرا ۸۵٪ از طول مسیر به انتهای مزرعه نزدیک‌تر بوده و به دلیل طی شدن مدت‌زمان لازم برای رسیدن آب به انتهای حسگر و روشن شدن چراغ‌های هشدار، آب از انتهای مزرعه به‌صورت رواناب خارج می‌شود که هدف این پژوهش هم کاهش میزان تلفات است. با توجه به نکات گفته‌شده این تیمار شرایط لازم را برای کاهش تلفات ابتدا و انتهای مسیر و کفایت آبیاری برقرار نکرده و موردتوجه نمی‌باشد (Dursun and Ozden, 2011).

شکل (۸) الگوی توزیع رطوبتی نسبت‌های مختلف از طول جویچه در عمق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متری خاک در جویچه F3 بعد از قطع آبیاری و نمونه‌برداری از خاک را نشان می‌دهد. اگرچه میزان کفایت آبیاری یا درصدی از طول مزرعه که به میزان نیاز آبی آب دریافت کرده است، زیاد می‌باشد (بیش از ۹۳٪)؛ اما با توجه به بالا بودن میزان تلفات عمقی و هدر رفت آب، این نسبت از طول جویچه جهت نصب دستگاه MRICAD و دستور قطع آبیاری با توجه به هشدار داده‌شده مناسب نیست (عبدالرحمانی رزکه و فرخی تیمورلو، ۱۳۹۲؛ فروغی و همکاران، ۱۳۹۸).

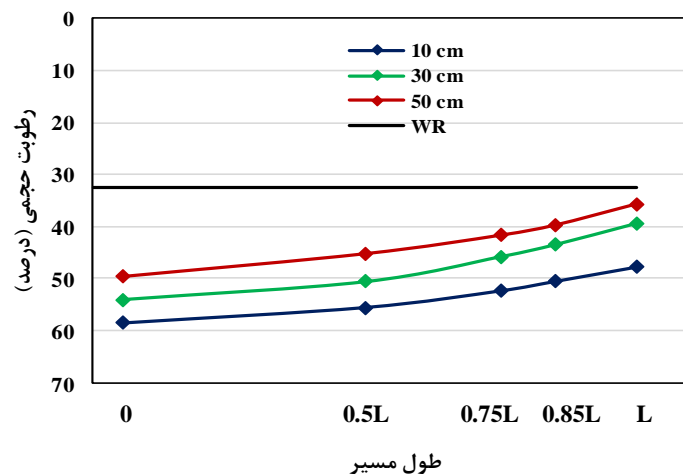
جویچه F3 نسبت به جویچه F2 و F1 به ترتیب ۳۰ و ۹۰ ثانیه



شکل ۸- ثبت رطوبت در نسبت‌های مختلف از طول جویچه در عمق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی متری خاک در جویچه F3

جویچه‌ها و ترسیم الگوی توزیع رطوبتی نیمرخ خاک برای قضاوت عادلانه بین آن‌ها بود. با توجه به مدت‌زمان بیشتر آبیاری، اختلاف بین رطوبت در عمق‌های مختلف کم شده و در تمامی سه عمق مذکور، میزان رطوبت بیش‌ازحد موردنیاز می‌باشد. هر چه نسبت طولی مزرعه برای قطع آبیاری بیشتر شود، هرچند که اختلاف بین زمان قطع آبیاری ناچیز است، اما با توجه به حجم بیشتر آب جریان یافته، مقدار نفوذ عمقی و به‌طورکلی تلفات نیز بیشتر خواهد شد (وطن‌خواه، ۱۳۹۴؛ رضا وردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵).

شکل (۹) ثبت رطوبت در نسبت‌های مختلف از طول جویچه در عمق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متری خاک در جویچه CF را نشان می‌دهد. به‌خوبی مشخص است که این جویچه و نصب دستگاه در انتهای مسیر، مناسب نمی‌باشد (حتی اگر کفایت آبیاری ۱۰۰٪ باشد)؛ زیرا با توجه به بیشتر بودن مدت‌زمان آبیاری و حجم بیشتر آب آبیاری، مقدار تلفات عمقی و رواناب بیشترین مقدار خود را داشته و قسمت اعظمی از آب داده‌شده از دسترس گیاه خارج شده است. حتی بدون آزمایش هم می‌توان به این نتیجه رسید اما هدف از انجام آزمایش در این جویچه، بررسی عمق و طول بهینه نصب دستگاه در شرایط مشابه برای تمامی



شکل ۹- ثبت رطوبت در نسبت‌های مختلف از طول جویچه در عمق ۱۰، ۳۰ و ۵۰ سانتی‌متری خاک در جویچه CF

مهم‌ترین آن زمان آبیاری، حجم، کفایت و میزان تلفات عمق است. لازم مدت‌زمان آبیاری است که حداقل زمان شروع آبیاری و زمان رسیدن آب به حسگر نصب‌شده در هر کدام از نسبت‌های طولی (جویچه‌های مختلف) است که در این زمان چراغ هشدار اعلام قطع آبیاری می‌کند. دبی نیز یکسان در نظر گرفته شد. دیگر پارامترهای موردبررسی شامل حجم آب مصرفی، تلفات نفوذ عمقی و کفایت آبیاری در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول (۵) پارامترهای موردبررسی در جویچه‌ها را نشان می‌دهد که به ذکر است که رواناب به‌صورت نشت بوده و نمی‌شد با نصب فلوم آن را اندازه گرفت. قبل و بعد از آبیاری، رطوبت عمق نصب حسگرها یعنی ۳۰ سانتی‌متر ثبت گردید و سپس به درصد حجمی تبدیل شد. دستگاه در عمق ۳۰ سانتی‌متری نصب شد و با هشدار رطوبت ۶۵٪، آبیاری قطع شد. پس از تبدیل رطوبت قرائت‌شده به رطوبت حجمی واقعی، رطوبت این نقطه حدود ۴۰ درصد حجمی برآورد گردید. در ردیف اول و دوم جدول (۵)، این پارامترها نشان داده شده است. پارامتر دیگر

جدول ۵- بررسی کفایت، حجم آب و زمان آبیاری در جویچه‌های مورد بررسی

CF	F3	F2	F1	پارامتر
۱۷/۵	۱۷/۵	۱۷/۵	۱۷/۵	رطوبت قبل آبیاری* (درصد حجمی)
۳۹/۵	۳۹/۵	۳۹/۵	۳۹/۵	رطوبت بعد آبیاری* (درصد حجمی)
۴۳۵	۴۱۲	۳۸۳	۳۱۹	مدت زمان آبیاری جویچه (ثانیه)
۱/۰۹	۱/۰۹	۱/۰۹	۱/۰۹	دبی (لیتر بر ثانیه)
۴۷۵	۴۵۰	۴۲۰	۳۵۰	حجم آب مصرفی (لیتر)
۱۰۰	۹۵	۸۴	۳۶	نفوذ عمقی (درصدی از حجم آبیاری)
۱۰۰	۹۳	۸۱	۵۰	کفایت آبیاری (درصد)

* رطوبت قبل و بعد از آبیاری در عمق نصب حسگرها (۳۰ سانتی‌متر) به وسیله دستگاه ثبت شد.

عمق بهینه نصب دستگاه

در خاک‌ها و محصولات مختلف (به دلیل عمق توسعه ریشه)، عمق کارگذاری حسگرها متفاوت بوده و جبهه رطوبتی با سرعت نابرابری حرکت می‌کند. هدف دیگر تحقیق؛ یافتن عمق بهینه نصب در خاک مزرعه مورد بررسی (لوم) و تعمیم رابطه آن به دیگر خاک‌ها (سبک و سنگین) بود. پارامترهای تأثیرگذار در یافتن عمق بهینه نصب دستگاه MRICAD، عمق توسعه ریشه و حرکت جبهه رطوبتی از انتهای حسگر تا انتهای ریشه بعد از زمان قطع آبیاری است؛ زیرا بعد از قطع آبیاری، جبهه رطوبتی به حرکت خود ادامه داده و به لایه‌های زیرین می‌رسد که این پیشروی بسته به شرایط مزرعه، دبی و خاک متغیر است. از آنجایی که جویچه F2 بهترین جویچه از نظر توزیع آب، تلفات عمقی و کفایت آبیاری شناخته شد، لذا برای بررسی عمق بهینه نصب از نتایج این جویچه استفاده می‌شود.

نتایج شکل (۷) و جدول (۵) نشان می‌دهد که اگر هدف آبیاری کردن برای نیاز آبی ۳۲ میلی‌متر در هر دور آبیاری و رساندن جبهه رطوبتی به عمق ۵۰ سانتی‌متری خاک مدنظر باشد، حسگرهای رطوبتی باید عمق ۳۰ سانتی‌متر نصب شوند تا بهترین الگوی توزیع رطوبتی خاک (با توجه به کم‌آبیاری، رواناب و نفوذ عمقی) رخ دهد. با توجه به رابطه (۴)، برای عمق توسعه ریشه گیاه بحث خاصی وجود ندارد زیرا مقدار مشخصی دارد. هدف یافتن مقدار XS در خاک، دبی و اندازه‌های مختلف جویچه می‌باشد که بر اساس نتایج این تحقیق، جدول (۶) را می‌توان تشکیل داد؛ بنابراین با توجه به دبی ۱/۰۹ لیتر در ثانیه، عمق ریشه ۵۰ سانتی‌متر، خاک لومی و جویچه‌های ۳۶ در ۰/۷۵ متری، می‌توان عمق بهینه نصب را در خاک‌های سبک و سنگین با توجه به شرایط این مزرعه به دست آورد. این نتایج برای مزارع مشابه با این تحقیق نیز قابل تعمیم است.

جدول ۶- عمق بهینه نصب دستگاه در خاک‌های مختلف با توجه به نتایج این پژوهش

نوع خاک	XS یا حداقل بین حسگر تا انتهای عمق ریشه (سانتی‌متر)	Y یا عمق نصب حسگرهای دستگاه با در نظر گرفتن عمق ریشه ۵۰ سانتی‌متر
سبک	۲۸-۳۴	$50 - (28-34) = (16-22)$ cm
متوسط	۱۷-۲۳	$50 - (17-23) = (27-33)$ cm
سنگین	۶-۱۲	$50 - (6-12) = (38-44)$ cm

رهیافت ترویجی

استفاده از روش‌های هوشمند آبیاری برای جلوگیری از تلفات نفوذ عمقی می‌تواند راه‌حلی مطلوب و مناسب برای مدیریت بحران و صرفه‌جویی آب باشد. سامانه آبیاری هوشمند در مصرف بهینه آب نقشی اساسی دارد و در شرایط گوناگون خاک، نوع سامانه آبیاری و میزان

قابل تغییر است. از این رو اندازه‌گیری مقدار دقیق رطوبت حجمی خاک در علوم کشاورزی، هیدرولوژی و خاکشناسی بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور، دستگاه حسگر رطوبتی با هدف تخمین رطوبت خاک و برای اولین بار هم‌زمان با سه حسگر ساخته شد. اهداف دیگر این پژوهش یافتن عمق بهینه نصب و نسبت‌های مختلف طول در روش آبیاری

ورودی. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۰ (۷۲): ۱۷۶-۱۶۱.

عباسی، ف.، سهراب، ف. و عباسی، ن. ۱۳۹۵. ارزیابی وضعیت راندمان آب آبیاری در ایران. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۷ (۶۷): ۱۱۳-۱۲۸.

عبدالرحمانی رزکه، ن. و فرخی تیمورلو، ر. ۱۳۹۲. کالیبراسیون یک رطوبت‌سنج خاک ارزان‌قیمت جهت استفاده در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای. هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون ایران. دانشگاه فردوسی مشهد، ۹-۱۱ بهمن.

فروغی، ح.، ناصری، ع. ع.، برومند نسب، س.، حمزه، س. و جونز، ا. ۱۳۹۸. ارائه یک روش نوین تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنجش‌ازدور نوری. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰ (۳): ۶۴۱-۶۵۲.

قائمی، ع. ا. و رحمانی ثقیه، ج. ۱۳۹۳. مقایسه عملکرد حسگرهای هوشمند رطوبت خاک با چند روش متداول تعیین رطوبت خاک در روش آبیاری میکرو. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۸ (۱): ۲۵-۱۶. کمالی، پ. و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۶. مقایسه و ارزیابی روش‌های مختلف برآورد معکوس ضرایب معادله نفوذ در شرایط کشت داخل جویچه. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۸ (۱): ۴۸-۳۹.

لائی، ک.، لائی، ج.، موسوی سیدی، س. ر. و طباطبایی کلور، س. ر. ۱۳۹۵. بررسی و طراحی سیستم آبیاری هوشمند. دهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون ایران. دانشگاه فردوسی مشهد، ۹ و ۱۰ شهریور. معروف‌پور، ع.، سیدزاده، ا. و بهزادی نسب، م. ۱۳۹۶. بررسی دقت روش‌های غیر نقطه‌ای اندازه‌گیری نفوذ در طراحی سامانه آبیاری جویچه‌ای. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲۴ (۲): ۵۷۱-۲۵۷.

واعظی، ع. ر.، مظلوم علی‌آباد، ی. و ذبیحی، آ. ۱۳۹۸. تعیین زمان آبیاری تکمیلی در گندم دیم با پایش تغییرات رطوبت خاک طی دوره رشد. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۳ (۱): ۱۲-۱. وطن‌خواه، ابراهیم. ۱۳۹۴. مطالعه میدانی شاخص‌های مدیریتی آبیاری بر اساس کم‌آبیاری در انتهای جویچه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

جویچه‌ای انجام بود. ابتدا واسنجی دستگاه بر روی خاک مزرعه مطالعاتی انجام شده و بر اساس صحت سنجی حاصل شده، دستگاه موردنظر به مزرعه منتقل گردید. طول‌های حساس در جویچه با نسبت ۵۰٪، ۷۵٪ و ۸۵٪ از ابتدای مسیر به‌عنوان نقاط شاخص انتخاب شدند. نتایج نشان داد که در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مقدار ضریب تبیین به ترتیب برابر ۰/۹۳ و ۰/۹۵ و در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده به ترتیب برابر ۸۰ و ۱۳/۸۱ درصد به دست آمد که حاکی از آموزش خوب مدل در مرحله واسنجی به صحت‌سنجی می‌باشد. ضمن اینکه متوسط مقدار پارامتر خطای نسبی در برآورد رطوبت خاک برابر ۲/۷۴ درصد به دست آمد که بیانگر دقت بالای دستگاه در برآورد رطوبت خاک می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که اگر دستگاه در عمق ۳۰ سانتی‌متری از سطح خاک در جویچه و در طول ۷۵٪ از ابتدای مزرعه نصب گردد، تلفات عمقی و رواناب برای این نوع خاک و دبی حداقل بوده و کفایت آبیاری بهترین مقدار خود را نسبت به دیگر اعماق و طول‌ها خواهد داشت. مشاهدات این پژوهش نیز ثابت کرد که با استفاده از دستگاه ساخته شده می‌توان رطوبت خاک را مستقیماً پایش کرد و با استفاده از سامانه آبیاری هوشمند می‌توان میزان تولید محصولات را نیز بالا برد و دقت آبیاری را افزایش داد.

مراجع

پورغلام آمیجی، م.، لیاقت، ع.، نازی قمشلو، آ. و خوش‌روش، م. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل Drainmod-S برای شبیه‌سازی نوسانات سطح ایستابی و غلظت نمک در نیمرخ خاک، در اراضی شالیزاری دارای سطح ایستابی کم‌عمق و شور. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۲ (۶): ۱۴۳۴-۱۴۱۸.

پورکریمی، ب.، نیک‌نامی، م. و جورابلو، م. ۱۳۹۳. نیازمندی‌های ترویجی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در استان تهران. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸ (۲): ۳۲۸-۳۱۵.

دهقانی سانج، ح.، خزائی، ا. و ذاکری نیا، م. ۱۳۹۳. نقش آبیاری دقیق در مصرف آب و کارایی مصرف آب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۸ (۱): ۱۸۶-۱۸۰.

رضا وردی نژاد، و.، احمدی، ح.، همتی، م. و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۵. ارزیابی و مقایسه روش‌های مختلف تخمین پارامترهای نفوذ در سیستم‌های مختلف آبیاری جویچه‌ای و رژیم‌های مختلف جریان

- Azar, A.T., Ammar, H.H., de Brito Silva, G. and Razali, M.S.A.B. 2019. Optimal Proportional Integral Derivative (PID) Controller Design for Smart Irrigation Mobile Robot with Soil Moisture Sensor. In International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications (pp. 349-359). Springer, Cham.
- Biabi, H., Mehdizadeh, S.A. and Salmi, M.S. 2019. Design and implementation of a smart system for water management of liliun flower using image processing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 160:131-143.
- Boutraa, T., Akhkha, A., Alshuaibi, 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 (1): 80-88.
- Chaudhry, S. and Garg, S. 2019. Smart Irrigation Techniques for Water Resource Management. In *Smart Farming Technologies for Sustainable Agricultural Development* (pp. 196-219). IGI Global.
- Coolong, T. 2013. Using irrigation to manage weeds: a focus on drip irrigation. In *Weed and Pest Control- Conventional and New Challenges*. IntechOpen.
- Dursun, M. and Ozden, S. 2011. A wireless application of drip irrigation automation supported by soil moisture sensors. *Scientific Research and Essays*. 6 (7): 1573-1582.
- El-Shater, T., Yigezu, Y.A., Shideed, K. and Aw-Hassan, A. 2017. Impacts of Improved Supplemental Irrigation on Farm Income, Productive Efficiency and Risk Management in Dry Areas. *Journal of Water Resource and Protection*. 9 (13): 1709-1720.
- Koech, R. and Langat, P. 2018. Improving Irrigation Water Use Efficiency: A Review of Advances, Challenges and Opportunities in the Australian Context. *Water*. 10 (12): 1771.
- Nagelkerke, N.J. 1991. A note on a general definition of the coefficient of determination. *Biometrika*. 78 (3): 691-692.
- Nolz, R., Kammerer, G. and Cepuder, P. 2013. Calibrating soil water potential sensors integrated into a wireless monitoring network. *Agricultural Water Management*. 116: 12-20.
- Ochsner, T.E., Cosh, M.H., Cuenca, R.H., Dorigo, W.A., Draper, C.S., Hagimoto, Y., ... and Larson, K.M. 2013 State of the art in large-scale soil moisture monitoring. *Soil Science Society of America Journal*. 77 (6):1888-1919.
- Savage, M.J. 1993. Statistical aspects of model validation. Presented at a workshop on the field water balance in the modeling of cropping systems, University of Pretoria, South Africa.
- Taley, S.M., Patode, R.S. and Mankar, A.N. 1998. Automation in drip irrigation system for cotton growing on large scale-a case study.
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Agüera, T., Valdez, L.C. and Fernández, M.D. 2006. Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrigation Science*. 24 (3): 185-202.
- Willmott, C.J. and Matsuura, K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research* 30 (1): 79-82.
- Wu, R.S., Liu, J.S., Chang, S.Y. and Hussain, F. 2017. Modeling of mixed crop field water demand and a smart irrigation system. *Water*. 9(11):885.
- Zhu, X.C., Cao, R.X. and Shao, M.A. 2019. Spatial simulation of soil- water content in dry and wet conditions in a hectometer- scale degraded alpine meadow. *Land Degradation and Development*. 30 (3): 278-289.

Construction of a Moisture Sensor for Smart Irrigation and Determining the Proper Location for Installation to Stop Irrigation to Prevent Water Loss

M. Pourgholam-Amiji¹, A. Liaghat^{2*}, M. H. Vali³ and H. R. Parsamehr⁴

Abstract

Due to the issue of water scarcity and drought in Iran, agriculture water management is essential. Agriculture water management requires a policy of correct and efficient use of water, and the smart irrigation system is a suitable and optimal way to use water properly. For this purpose, a moisture sensor device was designed and constructed in February and March 2019 to determine the appropriate time to stop irrigation in furrow irrigation. Testing the device in the laboratory and its application in the Farm of the Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, (Mohammad Shahr), Iran, from April to July 2019. The purpose of this study was to evaluate the performance of smart sensor of soil moisture to determine the optimum depth of installation and recording of soil moisture at 10, 30 and 50 cm depths and different length ratios in furrow irrigation. Initially, calibration of the device was carried out on field soil and based on the obtained validation, the device was transferred to the field. To achieve the goals of optimum depth of installation and optimum length, 36-meter furrows with a distance of 0.75 meters were created in the field. Sensitive lengths in furrows with 0.5L, 0.75L, and 0.85L ratios were selected as the starting points. The results showed that in the calibration and validation phase the R² value (coefficient of determination) were 0.93 and 0.95, respectively, and in the calibration and validation stage the value of NRMSE (Normal Root Mean Square Error) was 80 and 13.81%, that indicating good model training in the calibration stage. Also, the average RE (Relative Error) parameter in estimating soil moisture was 2.74%, indicating high accuracy of the device in estimating soil moisture. The results also showed that if the device was installed at a depth of 30 cm from the soil surface of the furrow and at 75% from the beginning of the field, the depth and runoff losses would be minimal and irrigation adequacy would be best compared to other depths and lengths. It is expected that with optimal water consumption and timely interruption of irrigation, deep losses and runoff will be avoided and with low water consumption, the productivity of crops will increase.

Keywords: Surface Irrigation, Deep Percolation, Sensor, Smart Irrigation, Calibration and Validation.

¹ Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

² Professor, Department of Irrigation and Reclamation, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. (*Corresponding Author, Aliaghat@ut.ac.ir)

³ M.Sc Graduate, Department of Electrical-Control Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

⁴ B.Sc Graduate, Department of Electrical-Power Engineering, Sadra University and B.Sc Graduate, Department of Mining Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: 29 September 2019

Accepted: 31 December 2019