

مدیریت هوشمند آبیاری گندم؛ راهکاری برای صرفه جویی در مصرف آب و افزایش عملکرد

مصطفی گودرزی^{۱*}، محمدمهدی نخجوانی مقدم^۲، بهمن یارقلی^۲،
مصطفی دارابی مطلق^۳



۱- استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران

۲- استادیار پژوهشی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، کرج، ایران

۳- کارشناس سازمان جهاد کشاورزی استان لرستان

E-mail: goodarzimustafa@gmail.com

چکیده

کاهش منابع آب و افزایش فشار بر بخش کشاورزی، ضرورت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین برای مدیریت بهینه آبیاری را بیش از پیش آشکار ساخته است. آبیاری هوشمند با استفاده از اطلاعات هواشناسی، ویژگی‌های خاک، مرحله رشد گیاه و مدل‌های تصمیم‌یار، امکان تعیین دقیق زمان و مقدار آبیاری را فراهم می‌کند و نقش مهمی در افزایش بهره‌وری مصرف آب دارد. این تحقیق با هدف ارزیابی عملکرد سامانه هوشمند «هوشاب» در شرایط واقعی مزارع گندم شهرستان الیگودرز و مقایسه آن با روش متداول آبیاری کشاورزان انجام شد. اطلاعات ارائه‌شده بر پایه نتایج یک پژوهش میدانی دو ساله تدوین شده است که در آن عملکرد سامانه هوشمند با مدیریت متداول آبیاری مقایسه گردیده است. نتایج نشان داد که استفاده از سامانه هوشمند، ضمن کاهش حدود ۱۵/۹ درصدی مصرف آب آبیاری، موجب افزایش ۸/۶ درصدی عملکرد دانه و حدود ۳۰ درصدی بهره‌وری مصرف آب شده است. این دستاوردها بیانگر آن است که مدیریت آبیاری بر پایه داده‌های واقعی مزرعه، علاوه بر جلوگیری از آبیاری‌های غیرضروری، شرایط مناسب‌تری برای رشد گیاه فراهم کرده و موجب کاهش تنش خشکی، افزایش عملکرد و کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، توسعه سامانه‌های هوشمند آبیاری می‌تواند به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در مدیریت منابع آب، افزایش بهره‌وری، ارتقای درآمد کشاورزان و تحقق کشاورزی پایدار، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، مورد توجه برنامه‌ریزان، کارشناسان و بهره‌برداران بخش کشاورزی قرار گیرد.

واژه های کلیدی: آبیاری هوشمند، هوشاب، مدیریت آبیاری، بهره‌وری مصرف آب، گندم، کشاورزی هوشمند

بیان مسئله

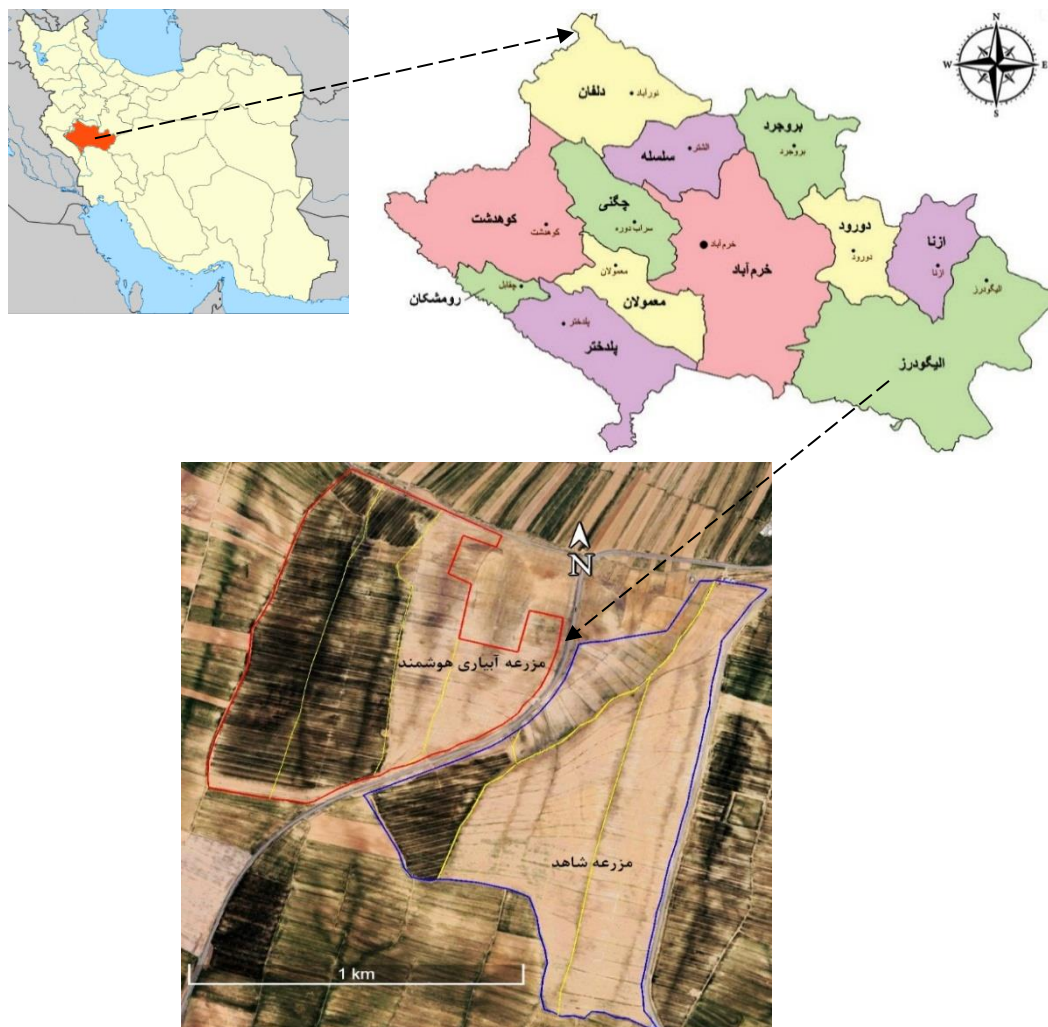
با توجه به افزایش جمعیت جهانی انتظار می‌رود که مسئله تأمین غذا، حفظ محیط زیست و آب از عمده‌ترین و چالش برانگیزترین مسائل بشر باشد. بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب در کشور است و در بسیاری از مناطق، محدودیت منابع آبی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های تولید محصولات کشاورزی، به‌ویژه گندم، تبدیل شده است. از آنجایی که بخش کشاورزی ۷۰ تا ۹۰ درصد از منابع آب استحصال را به خود اختصاص می‌دهد و به عنوان بزرگترین مصرف‌کننده آب شناخته می‌شود، به کارگیری روش‌های مناسب آبیاری علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب می‌تواند از در حفظ منابع آب سطحی و آبخوان‌ها مؤثر باشد. همچنین، با توجه به شرایط اقلیمی کشور، وقوع تغییر اقلیم، تشدید قرائند تخلیه آبخوان‌ها و افزایش هزینه‌های تولید، به کارگیری روش‌های مناسب و هوشمند با هدف استفاده بهینه از منابع آب و افزایش بهره‌وری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. یکی از این فناوری‌ها، سامانه‌های هوشمند مدیریت آبیاری است که با بهره‌گیری از اطلاعات هواشناسی، نیاز آبی گیاه و وضعیت رطوبت خاک، زمان و مقدار آبیاری را به‌صورت دقیق تعیین می‌کنند. (۳ و ۴).

در روش‌های سنتی آبیاری، زمان و مقدار آب مورد نیاز گیاه عمدتاً بر اساس تجربه کشاورز تعیین می‌شود. این موضوع در بسیاری از موارد باعث آبیاری زود هنگام یا دیر هنگام و مصرف بیش از نیاز آب می‌شود که علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید، بهره‌وری مصرف آب را نیز کاهش می‌دهد. سامانه هوشمند مدیریت آبیاری «هوشاب» با بهره‌گیری از اطلاعات هواشناسی، ویژگی‌های خاک، مرحله رشد گیاه و نیاز آبی محصول، زمان و مقدار مناسب آبیاری را تعیین می‌کند و به کشاورزان کمک می‌کند تا با مصرف آب کمتر، عملکرد بیشتری به دست آورند.

با توجه به اهمیت هوشمندسازی مدیریت آبیاری در کشور، اجرای سامانه‌های آبیاری هوشمند می‌تواند نقشی اثرگذار در بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی داشته باشد. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد سامانه هوشمند «هوشاب» در شرایط واقعی مزارع گندم شهرستان الیگودرز و مقایسه آن با روش متداول آبیاری کشاورزان انجام شد.

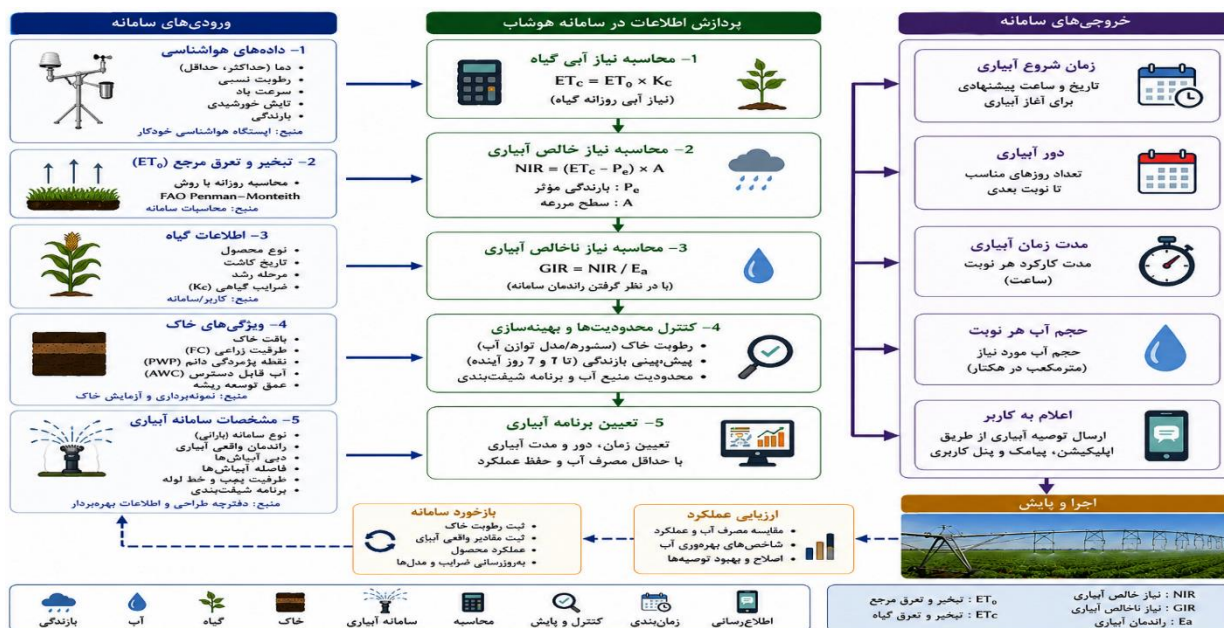
معرفی دستاورد

محدوده مورد مطالعه در روستای خان‌آباد در ۱۲ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز در استان لرستان در موقعیت جغرافیایی ۳۳°۱۴'۵۵" شمالی و ۴۹°۳۸'۴۵" در ارتفاع ۲۱۳۵ متر از سطح دریا، واقع شده است (شکل ۱). بر اساس آمار بلندمدت ایستگاه هواشناسی شهرستان الیگودرز (دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰)، اقلیم این منطقه اقلیم کوهستانی با متوسط درجه حرارت سالانه ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و مرداد ماه با میانگین حداکثر دمای مثبت ۳۱ درجه سانتی‌گراد و بهمن ماه با میانگین حداقل دمای منفی ۱۲ درجه سانتی‌گراد به ترتیب گرم‌ترین و سردترین ماه سال در این محدوده می‌باشد. نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل اجرای طرح ایستگاه هواشناسی الیگودرز می‌باشد که در این ایستگاه متوسط بارندگی ۳۹۴ میلی‌متر، متوسط رطوبت نسبی ۵۰ درصد، تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه اوج ۲۶۳ میلی‌متر و متوسط سرعت باد ۱۲ کیلومتر در ساعت است (۱). با توجه به شرایط اقلیمی اراضی مورد نظر برای کشت غلات و چغندر قند و صیفی‌جات مناسب می‌باشد. در الگوی زراعی مزرعه گندم، لوبیا سیب‌زمینی و یونجه به عنوان محصولات متداول در منطقه پیشنهاد شده است که محصول مورد کشت توسط بهره‌بردار شامل گندم و سیب‌زمینی می‌باشد. سامانه آبیاری مورد استفاده آبیاری بارانی کلاسیک با آبپاش متحرک می‌باشد که منبع آب آن از ایستگاه پمپاژ ثانویه سد خان‌آباد تأمین می‌گردد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محل اجرای پژوهش و استقرار مزارع تحت مدیریت سامانه هوشمند «هوشاب» و مدیریت متداول بهره‌بردار (شاهد)، به ترتیب با رنگ قرمز و آبی

سامانه هوشمند آبیاری «هوشاب» یک سامانه تصمیم‌یار مدیریت آبیاری است که با هدف بهینه‌سازی زمان و مقدار آبیاری بر اساس شرایط واقعی مزرعه توسعه یافته است. این سامانه با استفاده از اطلاعات هواشناسی، ویژگی‌های خاک، کیفیت آب آبیاری، مشخصات گیاه، تاریخ کاشت، مرحله رشد، ویژگی‌های سامانه آبیاری و سایر اطلاعات مورد نیاز، نیاز آبی گیاه را محاسبه کرده و برنامه آبیاری مناسب را در اختیار بهره‌بردار قرار می‌دهد. خروجی سامانه شامل زمان مناسب آبیاری، حجم یا مدت زمان آبیاری مورد نیاز و سایر اطلاعات مدیریتی است که از طریق نرم‌افزار یا برنامه کاربردی در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. این برنامه مبنای مدیریت آبیاری در تیمار هوشاب قرار گرفت و عملکرد آن با مدیریت متداول کشاورز مقایسه شد. لازم به ذکر است هدف پژوهش حاضر توسعه یا اعتبارسنجی الگوریتم سامانه نبوده، بلکه ارزیابی عملکرد آن در شرایط واقعی مزرعه بوده است.



شکل ۲- فرآیند مدیریت آبیاری هوشمند در تعیین زمان و مقدار آبیاری

مساحت مزرعه مورد مطالعه در دو بخش ۷۰ هکتاری که به ترتیب با روش هوشاب و روش متداول کشاورز آبیاری شدند. دو روش مدیریت آبیاری شامل مدیریت آبیاری مبتنی بر سامانه هوشمند «هوشاب» و مدیریت متداول آبیاری توسط کشاورز مورد مقایسه قرار گرفت. اگرچه طراحی سامانه آبیاری بارانی بر اساس دفترچه طراحی و با در نظر گرفتن نیاز آبی گیاه، ظرفیت سامانه و راندمان آبیاری انجام شده بود، اما مدیریت بهره‌برداری از سامانه در دو تیمار متفاوت بود. در مزرعه شاهد، زمان و دور آبیاری بر اساس مدیریت متداول بهره‌بردار و با اتکا به تجربه عملی با دور آبیاری ثابت تعیین می‌شد، در حالی که در تیمار هوشاب، برنامه آبیاری به صورت پویا و بر اساس برآورد روزانه نیاز آبی گیاه (با استفاده از روش پنمن-مونتیث)، مرحله رشد، ویژگی‌های خاک، داده‌های هواشناسی و پیش‌بینی بارندگی به‌روزرسانی و در صورت لزوم نسبت به برنامه اولیه اصلاح می‌شد. کارایی سامانه هوشمند مدیریت آبیاری «هوشاب» در ۲ سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ و ۱۴۰۴-۱۴۰۳ ارزیابی و پایش شد. روش آبیاری مورد استفاده در مزرعه مورد مطالعه سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک بود. فاصله آبپاش‌ها ۲۲×۲۲ متر و از آبپاش پروت مدل Zk^{30} استفاده شد. به منظور ارزیابی کارایی سامانه هوشمند اجرا شده شاخص‌های حجم آب آبیاری، عملکرد محصول و بهره‌وری فیزیکی آب در مزرعه اندازه‌گیری و مقایسه شدند. در شکل ۲ به طور شماتیک فرآیند مدیریت هوشمند با تلفیق اطلاعات هواشناسی، وضعیت خاک و گیاه و تعیین زمان و مقدار مناسب آبیاری که در نهایت منجر به کاهش مصرف آب و افزایش عملکرد محصول می‌شود نشان داده شده است. به‌منظور تعیین ویژگی‌های آب و خاک مزرعه مورد مطالعه، پیش از شروع اجرای آزمایش از خاک مزرعه و منبع تأمین آب نمونه‌برداری انجام شد. نتایج این اندازه‌گیری‌ها به‌عنوان مشخصات اولیه مزارع در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات آب و خاک محل اجرای آزمایش

شوری خاک (ds/m)	کربن آلی (%)	شن (%)	رس (%)	سیلت (%)	بافت خاک	شوری آب (ds/m)	رطوبت ظرفیت مزرعه (%)	رطوبت نقطه پژمردگی (%)
۱/۴	۰/۶	۵۳	۷	۴۰	لوم شنی	۰/۵۷	۱۸/۳	۷/۸

براساس اطلاعات و داده‌های جمع‌آوری شده سامانه هوشاب برای مزرعه مورد مطالعه طراحی گردید و با تهیه حساب دسترسی به سامانه برای بهره‌بردار، برنامه آبیاری هر قطعه از مزرعه در اختیار بهره‌بردار قرار گرفت. پس از انجام عملیات کاشت، یک نوبت آبیاری استقرار در هر دو تیمار انجام شد تا شرایط مناسب برای جوانه‌زنی و استقرار یکنواخت گیاه فراهم شود. پس از آن، برنامه آبیاری هر تیمار بر اساس روش مدیریت مربوطه اجرا گردید؛ به‌طوری‌که در تیمار شاهد، آبیاری بر اساس مدیریت متداول بهره‌بردار و در تیمار هوشاب، زمان و مقدار آبیاری بر اساس توصیه سامانه هوشمند تعیین شد. در جدول ۲ برنامه آبیاری ارائه شده توسط سامانه هوشاب و آبیاری متداول بهره‌بردار به عنوان نمونه ارائه شده است. مقایسه برنامه‌های آبیاری نشان داد که در مدیریت متداول کشاورز، دور آبیاری عمدتاً به‌صورت ثابت و بر اساس تجربه بهره‌بردار تعیین می‌شد، در حالی که در سامانه هوشمند «هوشاب»، زمان شروع آبیاری و فاصله بین دو آبیاری بر اساس نیاز واقعی گیاه، وضعیت رطوبت خاک و پیش‌بینی شرایط هواشناسی به‌صورت پویا اصلاح می‌شد.

جدول ۲- مقایسه برنامه آبیاری تیمار هوشاب و مدیریت متداول کشاورز

آبیاری هوشمند هوشاب			آبیاری متداول بهره‌بردار		
تاریخ آبیاری	مدت آبیاری	پیشنهادی حجم آبیاری (m ^۳ /ha)	تاریخ آبیاری	مدت آبیاری	حجم آبیاری (m ^۳ /ha)
۱۴۰۳/۰۳/۲۱	۴:۱۵	۳۸۳	۱۴۰۳/۰۳/۲۴	۸	—
۱۴۰۳/۰۳/۳۰	۴:۳۰	۴۰۵	۱۴۰۳/۰۴/۰۱	۸	—
۱۴۰۳/۰۴/۰۶	۵:۳۰	۴۹۵	۱۴۰۳/۰۴/۰۹	۸	—
۱۴۰۳/۰۴/۱۲	۶:۳۰	۵۸۵	۱۴۰۳/۰۴/۱۷	۸	—

صحت و کفایت برنامه آبیاری ارائه شده توسط سامانه از طریق پایش رطوبت خاک در محدوده توسعه ریشه بررسی شد. نمونه‌برداری‌های میدانی در مراحل فنولوژیک کلیدی و منطبق با زمان‌بندی آبیاری انجام گرفت. دوره آبیاری در سال اول از ۵ آبان ۱۴۰۲ تا ۳۰ تیر ۱۴۰۳ و در سال دوم از ۱۰ آبان ۱۴۰۳ تا ۳۰ تیر ۱۴۰۴ به اجرا درآمد. پایش رطوبت خاک به با استفاده از حس گر رطوبت خاک (PMS-۷۱۴) انجام شد. حس گر در عمق مؤثر توسعه ریشه گیاه (۶۰-۷۰ سانتیمتر) نصب شد و درصد رطوبت حجمی خاک در فواصل زمانی مشخص اندازه‌گیری و ثبت گردید.

- نتایج کاربردی

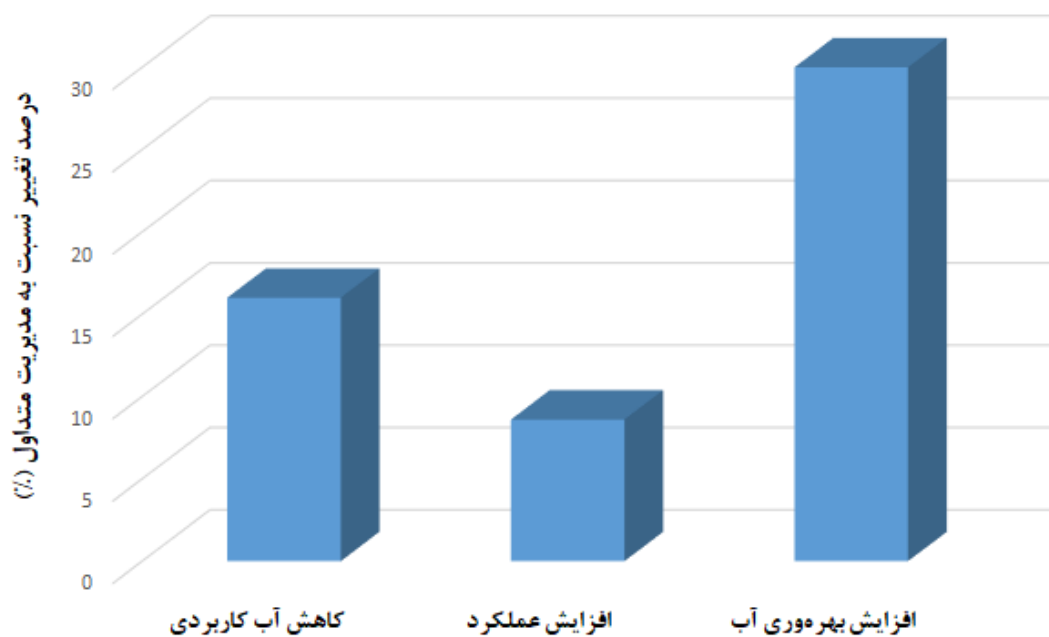
نتایج نشان داد سامانه هوشاب با تحلیل دقیق نیاز گیاه، مرحله رشد و شرایط آب‌وهوایی، برنامه آبیاری را کاملاً پویا تنظیم می‌کند. در حالی که در روش سنتی آبیاری در مزرعه شاهد، آبیاری در طول فصل با دور ثابت انجام می‌شد، هوشاب بسته به شرایط، زمان آبیاری را از ۳ ساعت تا بیش از ۶ ساعت بهینه می‌کرد. همچنین، قابلیت پیش بینی هواشناسی ۴۸ ساعته و ۸ روزه نیز امکان تصمیم‌گیری پیش‌نگر را فراهم کرده و می‌تواند از آبیاری غیر ضروری قبل از بارش جلوگیری نماید. در مدیریت متداول، دور آبیاری عمدتاً بر اساس تجربه بهره‌بردار و با تغییرات محدود در طول فصل رشد تعیین می‌شد، در حالی که در سامانه هوشمند «هوشاب»، دور آبیاری متناسب با تغییرات نیاز آبی گیاه، شرایط اقلیمی، رطوبت خاک و پیش‌بینی بارندگی به‌صورت مستمر بازنگری می‌شد. این تفاوت در مدیریت آبیاری موجب توزیع مناسب‌تر آب در طول فصل رشد، کاهش تنش رطوبتی و در نهایت کاهش مصرف آب و بهبود عملکرد محصول شد. نتایج ثبت‌شده رطوبت خاک نشان داد که در روش سنتی، خاک در بازه‌های طولانی دچار افت رطوبت می‌شود که گیاه را تحت فشار قرار می‌دهد. اما با سامانه «هوشاب»، رطوبت خاک با دقت مدیریت شده و هماهنگی کاملی بین نیاز گیاه و وضعیت خاک برقرار است. این یعنی جلوگیری از تنش‌های بیولوژیک و حفظ پتانسیل عملکرد لویا که در روش‌های آبیاری ثابت مغفول می‌ماند.

ویژگی‌های مدیریت آبیاری اعمال شده شامل تعداد دفعات آبیاری، حجم کل آب مصرفی، عملکرد محصول و بهره‌وری مصرف آب در سایت زارعی مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. آبیاری استقرار در ابتدای فصل رشد برای هر دو تیمار به‌صورت یکسان انجام شد؛ بنابراین، تفاوت‌های مشاهده شده در مصرف آب، عملکرد و بهره‌وری آب ناشی از تفاوت در مدیریت آبیاری طی ادامه فصل رشد بوده است. حجم آب آبیاری ثبت شده در سال اول کمتر از نیاز آبی محاسباتی بود که این موضوع ناشی از شرایط خاص اجرای آزمایش در سال اول مربوط به بروز نقص فنی در سامانه پمپاژ و حذف ۲ تا ۳ نوبت آبیاری در طول فصل رشد بود. هرچند بارندگی‌های مناسب بهاره بخشی از کمبود آب را جبران کرد، اما این شرایط موجب شد عملکرد محصول در سال اول نسبت به سال دوم کمتر باشد. بنابراین، کاهش حجم آب مصرفی در سال اول نباید به عنوان مدیریت برنامه‌ریزی شده کم‌آبیاری تفسیر شود، بلکه نتیجه محدودیت‌های اجرایی آزمایش بوده است. با وجود این شرایط، مقایسه بین تیمارهای هوشاب و مدیریت متداول در هر سال زراعی همچنان نشان داد که مدیریت هوشمند آبیاری موجب استفاده بهینه‌تر از آب و بهبود بهره‌وری مصرف آب شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان مصرف آب در مزرعه تحت مدیریت هوشاب نسبت به مزرعه شاهد در سال اول ۲۲/۹ درصد و در سال دوم ۱۱/۴ کاهش یافته است. همچنین میزان عملکرد محصول نسبت به مزرعه شاهد در سال اول ۵/۵ درصد و در سال دوم ۱۰/۷ افزایش داشته است. بهره‌وری مصرف آب نیز در سال اول ۳۶/۳ درصد و در سال دوم ۲۴/۳ درصد افزایش داشته است. دلیل این تغییرات نحوه مدیریت برنامه‌ریزی آبیاری در دو مزرعه بود. به گونه‌ای که در مزرعه شاهد آبیاری با دور بیشتر نسبت به روش هوشاب انجام می‌شد و گیاه در طول فصل با تنش خشکی مواجه می‌شد در حالی که در روش هوشاب تنش خشکی کمتر و در نتیجه عملکرد افزایش نشان داد.

جدول ۳- ویژگی‌های مدیریت آبیاری اعمال شده در مزرعه مورد مطالعه

پارامتر	شاهد	مدیریت هوشاب	پارامتر	شاهد	مدیریت هوشاب
نیاز خالص آبیاری (سند ملی)	۳۶۰۰	۳۶۰۰	حجم آبیاری سال دوم	۵۶۷۲	۵۰۲۴
نیاز خالص آبیاری (پنمن مانیت)	۴۳۲	۴۳۲	عملکرد محصول سال اول	۴۱۵۰	۴۳۸۰
تعداد دفعات آبیاری سال اول	۵	۷	عملکرد محصول سال دوم	۶۲۷۰	۶۹۴۰
تعداد دفعات آبیاری سال دوم	۷	۱۰	بهره‌وری مصرف آب سال اول	۱/۱۳	۱/۵۴
حجم آبیاری سال اول	۳۶۷۰	۲۸۳۰	بهره‌وری مصرف آب سال دوم	۱/۱۱	۱/۳۸

نتایج نشان داد میانگین مصرف آب در تیمار هوشاب به ۳۹۲۷ مترمکعب در هکتار رسید، در حالی که در مدیریت متداول کشاورز این مقدار ۴۶۷۱ مترمکعب در هکتار بود. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، استفاده از سامانه هوشمند مدیریت آبیاری «هوشاب» نسبت به روش متداول آبیاری، موجب بهبود هم‌زمان سه شاخص مهم مدیریت آب در مزرعه گندم شده است. این سامانه با تعیین دقیق زمان و مقدار آبیاری بر اساس شرایط آب‌وهوایی، ویژگی‌های خاک و مرحله رشد گیاه، توانسته است حدود ۱۶ درصد مصرف آب را کاهش دهد. از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهد که متوسط عملکرد دانه گندم در تیمار هوشاب به ۵۶۵۹ کیلوگرم در هکتار رسید، در حالی که در مدیریت متداول ۵۲۱۰ کیلوگرم در هکتار بود که نشان دهنده ۸/۶ درصد افزایش در عملکرد دانه می‌باشد. کاهش مصرف آب بدون افت عملکرد، نشان‌دهنده افزایش کارایی مدیریت آبیاری و جلوگیری از آبیاری‌های غیرضروری است. این موضوع بیانگر آن است که تأمین آب مورد نیاز گیاه در زمان مناسب، ضمن کاهش تنش خشکی، شرایط مطلوب‌تری برای رشد و تشکیل دانه فراهم می‌کند. در نتیجه، مدیریت صحیح آبیاری نه تنها موجب صرفه‌جویی در مصرف آب می‌شود، بلکه می‌تواند تولید محصول را نیز افزایش دهد. بیشترین تغییر مربوط به بهره‌وری مصرف آب است که حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است. بهره‌وری مصرف آب از ۱/۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب در روش متداول به ۱/۴۶ کیلوگرم بر مترمکعب در سامانه هوشاب افزایش یافت. این شاخص نشان می‌دهد که به ازای هر مترمکعب آب مصرفی، مقدار بیشتری محصول تولید شده است. بنابراین، استفاده از سامانه‌های هوشمند آبیاری علاوه بر کاهش هزینه‌های ناشی از مصرف آب، نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری منابع، ارتقای درآمد کشاورزان و توسعه کشاورزی پایدار دارد. به طور کلی، نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که آبیاری هوشمند یک راهکار عملی و قابل اجرا برای مقابله با کمبود منابع آب و افزایش بهره‌وری تولید در مزارع گندم است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت بهینه آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور مورد استفاده قرار گیرد. به‌منظور مستندسازی شرایط اجرای پژوهش، تصویر مقایسه‌ای از دو مزرعه در انتهای مرحله پر شدن دانه و رسیدن محصول در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که در مشاهده می‌شود، مزرعه تحت مدیریت سامانه هوشمند «هوشاب» از نظر یکنواختی استقرار و پوشش گیاهی وضعیت مطلوب‌تری نسبت به مزرعه شاهد داشت. این مشاهدات کیفی با نتایج کمی پژوهش در خصوص عملکرد و بهره‌وری مصرف آب همسو است، هرچند مبنای قضاوت نهایی، داده‌های اندازه‌گیری‌شده و تحلیل‌های آماری بود.



شکل ۳- اثر سامانه هوشمند هوشاب بر مصرف آب و عملکرد گندم

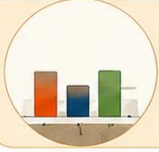


شکل ۴- تصویر مقایسه‌ای از مزرعه تحت مدیریت سامانه هوشمند و شاهد در انتهای مرحله پر شدن دانه و رسیدن محصول

نتایج این مطالعه با یافته‌های پژوهش‌های مشابه در زمینه کشاورزی دقیق و آبیاری هوشمند همخوانی دارد (۵، ۸ و ۲). داده‌های مطالعه حاضر نشان داد استفاده از سامانه هوشاب، کاهش مصرف آب را بین ۱۱ تا ۲۳ درصد محقق کرده است. نتایج به‌دست‌آمده با گزارش‌های جهانی اخیر مطابقت دارد؛ از جمله با پژوهش‌های الجو و همکاران (۲۰۲۳) (۸) که اثربخشی حسگرهای هوشمند در بهبود بهره‌وری آب و کاهش ۳۰ درصدی مصرف آن را تأیید کرده است. همچنین کوماری و همکاران (۲۰۲۴) (۷) نشان دادند که استفاده از شاخص‌های تنش آبی و رطوبت خاک در مدیریت آبیاری گندم موجب بهبود بهره‌وری مصرف آب و افزایش کارایی برنامه‌ریزی آبیاری می‌شود. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان داد که استفاده از سامانه هوشاب با تنظیم دقیق‌تر زمان و مقدار آبیاری، امکان کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری را فراهم کرده است. با تنظیم دقیق آبیاری، تلفات ناشی از نفوذ عمقی و رواناب به حداقل رسیده و شرایط رطوبتی ایده‌آلی در ناحیه ریشه فراهم می‌شود. این موضوع که با نتایج امامی و

همکاران (۲۰۲۶) (۶) مطابقت دارد، به معنای کاهش محسوس تنش خشکی در مزرعه و در نتیجه، افزایش کارایی و عملکرد محصول است.

همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می شود، تفاوت اصلی بین مدیریت سنتی و مدیریت هوشمند آبیاری در نحوه تصمیم گیری برای زمان و مقدار آبیاری است. در روش سنتی، آبیاری معمولاً بر اساس تجربه کشاورز، تقویم آبیاری یا مشاهده ظاهری مزرعه انجام می شود؛ در نتیجه، ممکن است آبیاری زودتر یا دیرتر از زمان مورد نیاز گیاه انجام شود و آب بیش از نیاز یا کمتر از نیاز در اختیار گیاه قرار گیرد. در مقابل، در مدیریت هوشمند، تصمیم گیری بر پایه اطلاعات واقعی مزرعه از جمله شرایط آب و هوایی، رطوبت خاک و مرحله رشد گیاه انجام می شود. این رویکرد باعث می شود آبیاری تنها در زمان مورد نیاز و به مقدار مناسب انجام شود. در نتیجه، مصرف آب کاهش یافته، تنش خشکی در گیاه کمتر شده و شرایط مطلوب تری برای رشد و تولید محصول فراهم می شود.

مدیریت سنتی		مدیریت هوشمند	
	دور آبیاری ثابت بر اساس تجربه و حدس آبیاری در زمان های مشخص		دور آبیاری متغیر بر اساس نیاز واقعی گیاه، شرایط هوا و رطوبت خاک
	مصرف آب بیشتر احتمال آبیاری بیش از نیاز گیاه و اتلاف آب		مصرف آب کمتر آبیاری دقیق و بهینه کاهش اتلاف آب
	احتمال تنش خشکی به دلیل آبیاری دیر هنگام یا بیش از حد		کاهش تنش خشکی تأمین آب در زمان مناسب و در مقدار مورد نیاز
	تصمیم گیری تجربی بر اساس تجربه و مشاهده مزرعه		تصمیم گیری داده محور بر اساس داده های هواشناسی، خاک و گیاه
	بهره وری کمتر عملکرد پایین تر به ازای هر مترمکعب آب مصرفی		بهره وری بیشتر عملکرد بالاتر به ازای هر مترمکعب آب مصرفی



آبیاری هوشمند؛ آب کمتر، محصول بیشتر، سود بیشتر



شکل ۵- مقایسه ساده مدیریت سنتی و آبیاری هوشمند

توصیه ترویجی

مدیریت هوشمند آبیاری با تبدیل تصمیم‌گیری مبتنی بر تجربه به تصمیم‌گیری مبتنی بر داده، موجب افزایش بهره‌وری مصرف آب، کاهش هزینه‌های تولید و بهبود عملکرد محصول می‌شود. این فناوری یکی از ابزارهای مهم کشاورزی هوشمند و راهکاری مؤثر برای سازگاری با کمبود منابع آب و تغییرات اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور به شمار می‌رود. با توجه به نتایج این پژوهش:

- استفاده از سامانه‌های هوشمند مدیریت آبیاری از جمله سامانه هوشاب، در مزارع گندم مناطق نیمه‌خشک کشور، به‌ویژه در مناطقی با محدودیت منابع آب، توصیه می‌شود. این سامانه می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌یار مؤثر، ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، عملکرد و بهره‌وری تولید گندم را افزایش داده و گامی مهم در جهت کشاورزی هوشمند و مدیریت پایدار منابع آب کشور باشد. استفاده از سامانه هوشمند هوشاب در مزارع گندم می‌تواند مزایای زیر را به همراه داشته باشد:

✓ کاهش مصرف آب و هزینه پمپاژ

✓ افزایش عملکرد دانه

✓ افزایش بهره‌وری مصرف آب

✓ کاهش تلفات ناشی از آبیاری بیش از حد

✓ مدیریت بهتر مزرعه در شرایط خشکسالی

✓ کمک به پایداری تولید و حفاظت از منابع آب زیرزمینی

فهرست منابع

۱. اداره کل هواشناسی استان لرستان. ۱۴۰۲. گزارش آماری سالانه از وضعیت اقلیمی استان لرستان. خرم‌آباد: سازمان هواشناسی کشور.
۲. حقایقی مقدم، سید ابوالقاسم، وکرامتی، مجید و ذوالفقاران، اردلان. (۱۴۰۴). ارزیابی یک سامانه هوشمند آبیاری برای مدیریت آبیاری گندم در منطقه مشهد تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی ۲۶ (تابستان)، ۳۷-۵۴. doi: ۱۰.۲۲۰۹۲/idser.۲۰۲۵.۳۶۹۰۱۰.۱۶۱۳.
۳. شریف نسب، ه. ۱۴۰۱. ارزیابی استفاده از اینترنت اشیاء، در هوشمند سازی آبیاری کشاورزی. گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.
۴. سجودی، ز. میرزایی، و سجودی. ۱۳۹۷. کاربرد اینترنت اشیا در آبیاری هوشمند. نشریه مدیریت آب در کشاورزی، ۵(۲): ۱۹-۲۸.
۵. ناصری، و.ر. عسگری، . خدایی، ک. و علیجانی. ۱۳۹۹. تاثیر آبیاری غرقابی قطره‌ای هوشمند بر نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل فیزیکی. فصلنامه زمین شناسی ایران، ۱۴(۵۳): ۷۵-۸۶.
۶. Emami, S., Dehghanisanij, H. & Emami, H. Intelligent irrigation management system for arid and semi-arid regions under climate change. Sci Rep ۱۶, ۱۶۴۰۱ (۲۰۲۶).
۷. Kumari, A., Singh, D. K., Sarangi, A., et al. (۲۰۲۴). Optimizing wheat supplementary irrigation: Integrating soil stress and crop water stress index for smart scheduling. Agricultural Water Management, ۳۰۵, ۱۰۹۱۰۴.
۸. Vallejo-Gomez, D., Osorio, M., & Hincapié, C. A. (۲۰۲۳). Smart irrigation systems in agriculture: A systematic review. Agronomy, ۱۳(۲), ۳۴۲.