

Evaluation of the Hooshab Smart Irrigation Management System on Water Use Efficiency and Wheat Yield under Field Conditions in Aligudarz County

Mustafa Goodarzi^{1*}, Mohammad Mehdi Nakhjavanimoghaddam², Bahman Yargholi²

1- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Arak, Iran.

2- Assistant Professor, Irrigation and Drainage Engineering Department, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

*Corresponding Author E-mail: goodarzimustafa@gmail.com

Extended Abstract

Introduction

With the continuous growth of the global population, the occurrence of climate change, and the intensification of drought events, ensuring food security while conserving environmental resources and water is expected to become one of the major and most challenging issues facing humanity. Agriculture accounts for approximately 70–90% of global freshwater withdrawals and is recognized as the largest water-consuming sector. Therefore, the adoption of appropriate irrigation methods can not only reduce water consumption but also contribute to the conservation of surface water resources and aquifers. Given the climatic conditions of Iran, the occurrence of climate change, the accelerating depletion of groundwater resources, and rising production costs, the adoption of appropriate and smart irrigation management approaches aimed at optimizing water use and improving water productivity is essential. Accordingly, considering the increasing limitations on water resources and the need to improve agricultural water-use efficiency, evaluating the performance of smart irrigation management systems under real farm conditions is of particular importance. This study aimed to evaluate the performance of the “Hooshab” smart irrigation management system in reducing water consumption, increasing wheat yield, and improving water productivity of Mihan wheat cultivar in Aligoodarz County, Iran.

Materials and Methods

The study was conducted during the 2023–2024 and 2024–2025 growing seasons as a field-scale comparative experiment involving two irrigation management treatments: smart irrigation management using the Hooshab system and conventional farmer irrigation management as the control treatment. The experiment was conducted under conventional sprinkler irrigation in Aligoodarz County. For each treatment, four independent experimental units, each approximately 10 ha in area, were selected, and each field was independently managed, irrigated, and evaluated as an experimental unit. The Hooshab smart irrigation system was used as a decision-support system for irrigation management to optimize irrigation timing and amount based on actual field conditions. The system calculates crop water requirements using meteorological data, soil characteristics, irrigation water quality, crop characteristics, planting date, growth stage, irrigation system characteristics, and other required information, and subsequently provides the farmer with an appropriate irrigation schedule. The system outputs include the recommended irrigation time, required irrigation volume or duration, and other relevant management information, which are made available to the user through the software or mobile application. This irrigation schedule was used as the basis for irrigation management in the Hooshab treatment, and its performance was compared with conventional farmer management. Irrigation water consumption, grain yield, and water productivity were measured. Following preliminary data screening and quality control, the assumptions required for analysis of variance were evaluated, including normality of residuals and homogeneity of variances. The Shapiro–Wilk and Levene’s tests were used to assess data normality and homogeneity of variances, respectively. After confirming the assumptions, the means of the two treatments were compared using an independent-samples *t*-test at the 5% significance level. All statistical analyses were performed using SPSS version 24.

Results and Discussion

The results showed that irrigation water consumption under Hooshab management decreased by 22.9% in the first year, 11.4% in the second year, and 17.15% on average compared with the control treatment. Grain yield increased by 5.6% in the first year, 10.7% in the second year, and 8.15% on average. Water productivity also increased by 36.3% in the first year, 24.3% in the second year, and 30.3% on average. These changes were primarily attributed to differences in irrigation scheduling between the two management approaches. In the conventional farmer-managed fields, irrigation was applied at longer intervals than under the Hooshab management strategy, resulting in greater periods of soil-water depletion and exposure of the crop to drought stress during the growing season. In contrast, the Hooshab system provided more timely irrigation management, thereby reducing the duration and

Conclusion

Keywords: Smart irrigation, water management, Precision agriculture, Aligoodarz; Water productivity.

ارزیابی اثربخشی سامانه هوشمند هوشاب بر بهره‌وری فیزیکی آب و عملکرد گندم در شرایط

مزرعه

مصطفی گودرزی*^{id}، محمدمهدی نخجوانی مقدم^{id}، بهمن یارقلی^{id}

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.

* نویسنده مسئول: goodarzimustafa@gmail.com

چکیده

با توجه به محدودیت منابع آب و ضرورت افزایش بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی، ارزیابی عملکرد سامانه‌های هوشمند مدیریت آبیاری در شرایط واقعی مزرعه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد سامانه هوشمند مدیریت آبیاری «هوشاب» در کاهش مصرف آب، افزایش عملکرد گندم و بهبود بهره‌وری مصرف آب گندم رقم میهن در شهرستان الیگودرز انجام شد. این پژوهش طی دو سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ و ۱۴۰۳-۱۴۰۴ در قالب مطالعه مقایسه مزرعه‌ای با دو تیمار مدیریت آبیاری هوشمند و تیمار مدیریت متداول کشاورز (شاهد) در روش آبیاری بارانی کلاسیک اجرا شد. برای هر تیمار، چهار تکرار مستقل به مساحت تقریبی ۱۰ هکتار انتخاب شد و هر قطعه به عنوان یک واحد آزمایشی مستقل مدیریت، آبیاری و ارزیابی شد. حجم آب مصرفی، عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب اندازه‌گیری شد. داده‌ها با استفاده از آزمون t مستقل در سطح احتمال ۵ درصد تجزیه و تحلیل شدند. نتایج نشان داد اثر تیمار بر حجم آب مصرفی، عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب معنی‌دار بود ($P < 0.05$). به طور میانگین در دو سال مورد آزمایش حجم آب مصرفی در تیمار هوشاب با در مقایسه با مدیریت متداول به میزان ۱۷/۱۵ درصد کاهش یافت. همچنین عملکرد دانه ۸/۱۵ درصد افزایش یافت. بهره‌وری آب نیز به طور میانگین ۳۰/۳ درصد افزایش نشان داد. همچنین، پایش رطوبت خاک نشان داد که برنامه آبیاری ارائه‌شده توسط سامانه توانسته است رطوبت ناحیه توسعه ریشه را در محدوده مناسب‌تری حفظ کند و امکان پایش برخط و اصلاح تصمیمات مدیریتی فراهم می‌شود. سامانه هوشمند هوشاب با بهینه‌سازی زمان و مقدار آبیاری، ضمن کاهش مصرف آب، موجب افزایش عملکرد و بهره‌وری فیزیکی آب گندم شد. استفاده از این سامانه به عنوان یک راهکار مؤثر برای مدیریت پایدار منابع آب در مناطق نیمه‌خشک کشور پیشنهاد می‌گردد.

واژگان کلیدی: آبیاری هوشمند، مدیریت آب، کشاورزی دقیق، الیگودرز، بهره‌وری آب

مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت جهانی، وقوع تغییر اقلیم و تشدید خشکسالی‌ها انتظار می‌رود که مسئله تأمین غذا، حفظ محیط زیست و آب از عمده‌ترین و چالش‌برانگیزترین مسائل بشر باشد (Ramezani Etedali & Koochi, 2025; Hosseini Seddigh & Jalali, 2024). از آنجایی که بخش کشاورزی ۷۰ تا ۹۰ درصد از منابع آب استحصال را به خود اختصاص می‌دهد و به عنوان بزرگترین مصرف کننده آب شناخته می‌شود، به کارگیری روش مناسب آبیاری علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب می‌تواند در حفظ منابع آب سطحی و آبخوان‌ها مؤثر باشد. نتایج یک فراتحلیل بر پایه ۹۵ مطالعه نشان داد که مدیریت مناسب آبیاری علاوه بر افزایش عملکرد محصول، موجب بهبود بهره‌وری آب شده و اثر آن به شرایط اقلیمی، خاک و زمان‌بندی آبیاری وابسته است. این نتایج بر ضرورت استفاده از برنامه‌های آبیاری متناسب با شرایط مزرعه تأکید می‌کند (Yang et al., 2025). همچنین، با توجه به شرایط اقلیمی کشور، وقوع پدیده تغییر اقلیم، تشدید فرایند 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 (Sharifnasab, 2022; Arvandi, 2024). محدودیت منابع آب و الزام استفاده بهینه از آب موجود، با بکارگیری فناوری‌های نوین در راستای افزایش بهره‌وری، مدت‌هاست که مورد توجه متخصصین بخش آب و کشاورزی قرار گرفته است. در این ارتباط، در دهه‌های اخیر قدم‌های بزرگ و مؤثری برداشته شده است. در راستای بهبود بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی، توسعه و به کارگیری سامانه‌های هوشمند مدیریت آبیاری به عنوان یکی از فناوری‌های نوین مورد توجه قرار گرفته است. این سامانه‌ها با بهره‌گیری از اطلاعات هواشناسی، ویژگی‌های خاک، نیاز آبی گیاه و شرایط مزرعه، برنامه آبیاری را به صورت پویا و متناسب با شرایط واقعی مزرعه تنظیم کرده و زمینه مدیریت بهینه مصرف آب را فراهم می‌کنند. بهبود کیفیت تولید، صرفه‌جویی در مصرف آب و انرژی،

صرفه جویی در نیروی کارگری، کاهش مصرف کود و سم، افزایش میزان برگشت سرمایه، آبیاری موفقیت آمیز، سامانه تولید بهینه و پایدار از جمله مزایای هوشمندسازی آبیاری است (Sojoodi et al., 2019). سامانه های هوشمند آبیاری با تلفیق داده های هواشناسی، حسگرهای رطوبت خاک، اینترنت اشیا و سامانه های تصمیم یار، امکان مدیریت دقیق زمان و مقدار آبیاری را فراهم کرده و در بسیاری از مطالعات موجب افزایش بهره وری آب و کاهش مصرف آب شده اند (Kumar et al., 2024).

در پژوهشی که با هدف بررسی تأثیر دو روش متفاوت آبیاری بر تغییرات تراز سطح ایستابی انجام شد، دو مدل آزمایشگاهی با ارتفاع دو متر و سطح مقطع ۴۰۰۰ سانتی متر مربع ساخته شد. پس از انتخاب گیاه (کاهو) در یک مدل از روش غرقابی و در مدل دیگر از روش قطره ای هوشمند برای آبیاری استفاده شد. آبیاری قطره ای هوشمند در این پژوهش به کمک شیر برقی و دستگاه قرائت گر انجام شد، بدین طریق که با قرار گرفتن خاک در شرایط کمتر از ۳۵ درصد اشباع، آبیاری شروع و بیشتر از ۸۰ درصد به صورت خودکار قطع شد. میزان نفوذ آب در این مدل ها نیز با استفاده از حسگرهای رطوبت پایش شد و در نرم افزار HYDRUS/2D شبیه سازی شد. در طول یک دوره چهارماهه تراز سطح آب زیرزمینی در مدل دارای سامانه آبیاری قطره ای هوشمند ۱۰ سانتی متر بالاتر و میزان مصرف آب ۶۸ درصد کمتر از سامانه غرقابی، اندازه گیری شد. این نتایج نشان داد که با جایگزین کردن آبیاری قطره ای هوشمند به جای غرقابی می توان محصولات با همان کیفیت قبلی ولی استفاده بسیار کمتر آب تولید کرد که از نزولی شدن شیب هیدروگراف آبخوان ها نیز جلوگیری می کند (Naseri et al., 2020).

یکی از چالش های پیش رو در استفاده از اینترنت اشیا در کشاورزی، نیاز به رسیدن داده هایی نظیر میزان رطوبت خاک، دما و غیره با تأخیر کم و سرعت زیاد به مرکز اصلی داده برای تجزیه و تحلیل می باشد که در یک پژوهش، برای رفع این چالش روشی مبتنی بر پروتکل SCTP-CMT¹ ارائه شده است که نیاز به ارسال داده های آنی را در بحث کشاورزی هوشمند مرتفع می نماید (Zanjanizadeh Esfahani et al., 2021).

در یکی از مطالعات پیشین، به منظور مدیریت هوشمند سامانه های آبیاری و بهینه سازی مصرف آب، از فناوری های نوین اندازه گیری رطوبت و مکش ماتریک خاک در ناحیه ریشه گیاه استفاده شد. در این پژوهش، داده های حاصل از پایش پیوسته وضعیت رطوبتی خاک، با بهره گیری از روابط حاکم بر جریان آب در ناحیه ریشه، برای مدیریت و برنامه ریزی آبیاری به کار گرفته شد. این تحقیق در باغ های سعیدآباد تبریز در دو سال متوالی ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ انجام شد. با استفاده از دستگاه ثبت داده ۲۰ کاناله، محدوده ریشه از طریق حسگرهای رطوبتی ایزاربندی گردیده و داده های لحظه ای رطوبت خاک محدوده ریشه از طریق اینترنت به سرور انتقال و با این روش امکان مشاهده برخط داده ها تحت وب و ذخیره اطلاعات مهیا شد. بر این اساس نتایج تطابق الگوی خیس شدگی با محدوده ریشه گیاه برای مدیریت سامانه استفاده و نهایتاً صرفه جویی در مصرف آب مشخص گردید. بیشترین مقدار جذب آب در عمق ۴۰ سانتی متر انجام شده است که این مقدار ۷۴ درصد کل جذب می باشد که با کنترل این پروفیل از خاک می توان سامانه آبیاری هوشمند را مدیریت نمود (Bahojb Khoshnoudi et al., 2020).

در تحقیق دیگری در چین، یک سامانه پشتیبانی تصمیم گیری آبیاری تحت وب برای مدیریت آبیاری کانال در مناطق بزرگ آبیاری طراحی شده است. این سامانه دارای توابع زیادی از جمله جمع آوری و شناسایی داده ها، پیش بینی آبیاری در زمان واقعی تصمیم گیری برای تخصیص آب پویا و مدیریت ساعات آبیاری است. برای کاهش نیاز به دانش تخصصی کاربران، از روش های فنی استفاده می کند و همچنین می تواند تجربه مدیریتی کاربران را در نظر بگیرد. از آن جاکه این سامانه توسط مدل مرورگر/سرور توسعه یافته است، می توان از منابع اینترنت به طور کامل استفاده کرد. کاربرد دوساله در سامانه آبیاری چین مرکزی نشان می دهد که سامانه پیشنهادی می تواند عملکرد امیدوارکننده ای را برای آبیاری کانال به دست آورد (Wang et al., 2019).

در تحقیقی در ایتالیا، برنامه ریزی آبیاری گیاهان مختلف با استفاده از ابزارهای مختلف از قبیل تانسیمتر، رطوبت سنج و برآورد تبخیر- تعرق و با سامانه آبیاری قطره ای انجام شد. نتایج نشان داد با استفاده از این ابزارها بین ۲۱ تا ۴۰ درصد در مصرف آب نسبت به آبیاری معمول صرفه جویی می شود. میزان استفاده از مواد مغذی خاک نیز ۳۹ تا ۷۴ درصد کاهش می یابد و کاهش معنی داری بر رشد گیاه و کیفیت محصول ندارد (Incrocci et al., 2014).

والجو و همکاران (Vallejo-Gómez et al., 2023)، کاربرد سامانه‌های هوشمند آبیاری در کشاورزی را بررسی نمودند. در این تحقیق با مرور فناوری‌هایی مانند حسگرهای بی‌سیم، سامانه‌های تصمیم‌یار و الگوریتم‌های داده‌کاوی، مزایا و معایب این سامانه‌ها را در مقیاس‌های مختلف بررسی و تأکید کرد که بهره‌گیری از این فناوری‌ها می‌تواند مصرف آب را تا حدود ۳۰ درصد کاهش دهد. تودوروویچ و همکاران (Todorovic et al., 2016) معتقدند که با استفاده از سامانه‌های آبیاری هوشمند می‌توان به تولید اقتصادی‌تری از غذا دست یافت. به نظر آنها استفاده از روش‌های سنتی آبیاری و یا حتی آبیاری‌های مدرن غیرهوشمند، میزان مصرف آب را افزایش می‌دهد که باعث ایجاد رواناب در انتهای مزرعه و یا نفوذ عمقی آب می‌گردد. این امر باعث می‌شود علاوه بر از دست رفتن آب، میزان مصرف کود نیز افزایش یافته و هزینه‌های تولید محصول بیشتر شود.

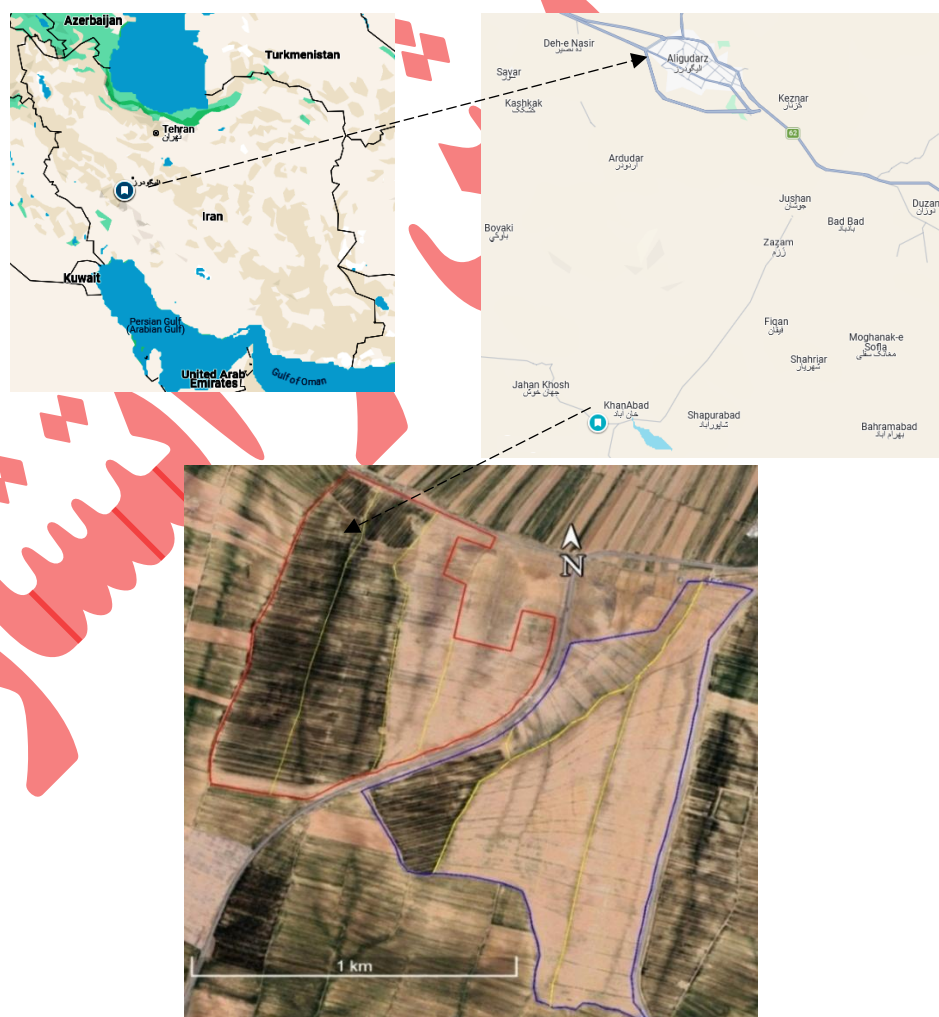
ماسرونی و همکاران (Masseroni et al., 2018)، مطالعه‌ای با هدف کنترل خودکار آبیاری مزرعه برنج در ایتالیا انجام دادند. نتایج نشان داد با وجود اثبات‌نشدن کاهش مصرف آب (۲۰۰۰ تا ۳۷۰۰ میلی‌متر) و افزایش نیافتن قابل توجه عملکرد محصول (حدود ۸ تن در هکتار)، هیچ‌گونه نقص مکانیکی در طول فصل آبیاری مشاهده نشد. استفاده از سامانه هوشمند آبیاری این امکان را می‌دهد که به طور چشمگیری زمان صرف شده توسط کارگران برای کنترل سطح آب و تنظیم جریان آبیاری کاهش یابد. با توجه به تمایل کشاورزان برای نوآوری، به نظر می‌رسد که قیمت سامانه آبیاری خودکار (از ۶۳۸ تا ۶۸۹ یورو در هکتار) مطابقت خوبی برای توسعه دارد. همچنین، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تلفیق سامانه‌های هوشمند آبیاری با فناوری‌های اینترنت اشیا، داده‌های هواشناسی و مدل‌های پیش‌بینی نیاز آبی گیاه می‌تواند نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری مصرف آب و کاهش مصرف انرژی در بخش کشاورزی داشته باشد (Zhang et al., 2019). ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2019)، در تحقیقی نتیجه گرفتند که استفاده از فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیا و هوش مصنوعی می‌تواند دقت برآورد نیاز آبی را افزایش و مصرف آب را کاهش دهند. این سامانه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته، نیاز آبی گیاهان را به طور خودکار محاسبه و آبیاری را بهینه می‌کنند. در یک آزمایش مزرعه‌ای دوساله بر روی گندم، کوماری و همکاران (Kumari et al., 2024)، نشان دادند که استفاده از شاخص تنش آبی گیاه و رطوبت خاک در برنامه‌ریزی آبیاری می‌تواند موجب بهبود زمان‌بندی آبیاری و افزایش بهره‌وری مصرف آب شود. این پژوهش بر اهمیت استفاده از سامانه‌های تصمیم‌یار در مدیریت دقیق آبیاری گندم تأکید دارد. لی و همکاران (Li et al., 2024)، در تحقیقی نشان دادند که استفاده از راهبردهای آبیاری هوشمند و مبتنی بر شرایط اقلیمی می‌تواند ضمن حفظ عملکرد محصول، مصرف آب آبیاری را کاهش داده و بهره‌وری آب را افزایش دهد. این رویکرد به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک به‌عنوان یکی از راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم معرفی شده است. فو و همکاران (Fu et al., 2025) با استفاده از مدل AquaCrop و داده‌های مزرعه‌ای، برنامه‌های آبیاری بهینه برای گندم را در شرایط اقلیمی مختلف تدوین کردند. نتایج نشان داد که زمان‌بندی آبیاری مبتنی بر مدل و وضعیت رطوبت خاک، علاوه بر کاهش مصرف آب، موجب افزایش بهره‌وری آب و حفظ عملکرد محصول می‌شود و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌یار در مدیریت آبیاری مورد استفاده قرار گیرد. پژوهش انجام‌شده توسط فنگ و همکاران (Feng et al., 2025) در کشور چین، نشان داد که استفاده از حسگرهای رطوبت خاک در برنامه‌ریزی آبیاری، زمانی بیشترین کارایی را دارد که محل استقرار حسگرها و آستانه‌های رطوبتی متناسب با عمق توسعه ریشه تعیین شوند. نتایج این مطالعه بیانگر آن بود که تصمیم‌گیری مبتنی بر داده‌های لحظه‌ای رطوبت خاک می‌تواند موجب بهبود زمان‌بندی آبیاری و افزایش بهره‌وری مصرف آب در گندم شود.

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. از این رو هدف از پژوهش حاضر ارزیابی سامانه آبیاری هوشمند اجرا شده در مزرعه کشاورز در مقایسه با شاهد و میزان تأثیر آن بر مصرف آب و بهره‌وری آب می‌باشد. اگرچه مطالعات متعددی به توسعه و ارزیابی سامانه‌های هوشمند مدیریت آبیاری پرداخته‌اند، اما بیشتر این پژوهش‌ها در شرایط کنترل‌شده، برای یک فصل زراعی یا با تمرکز بر جنبه‌های خاص سامانه انجام شده‌اند. در این پژوهش، عملکرد سامانه هوشمند تحت شرایط واقعی بهره‌برداری کشاورز و طی دو سال زراعی، با تأکید بر شاخص‌های مصرف آب، عملکرد محصول و بهره‌وری آب، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پروژه می‌تواند کمک شایانی به سیاست‌گذاران و متولیان کشاورزی در کشور در راستای تغییرات فناورانه و به‌روزرسانی فناوری‌های کاربردی در بخش کشاورزی باشد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در روستای خان‌آباد، در دوازده کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز در استان لرستان، در موقعیت جغرافیایی سی و سه درجه و چهارده دقیقه و پنجاه و پنج ثانیه شمالی و چهل و نه درجه و سی و هشت دقیقه و چهل و پنج ثانیه شرقی، در ارتفاع دو هزار و صد و سی و پنج 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 مردادماه با میانگین حداکثر دمای مثبت ۳۱ درجه سانتی‌گراد و بهمن‌ماه 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 (Lorestan Meteorological Department, 2023). با توجه به شرایط اقلیمی اراضی مورد نظر برای کشت غلات و چغندر قند و صیفی‌جات مناسب می‌باشد. در الگوی زراعی مزرعه‌گندم، 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 آبیاش متحرک می‌باشد که منبع آب آن از ایستگاه پمپاژ ثانویه سد خان‌آباد تأمین می‌گردد.



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه، خان آباد الیگودرز، تیمار شاهد (ناحیه آبی) و تیمار تحت مدیریت آبیاری هوشاب (ناحیه قرمز)
Figure 1. The study area, Khan Abad Aligoodarz, control (The blue area) and Hooshab irrigation-managed (The red area) treatments

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 مدت‌زمان 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.

در این تحقیق کارایی سامانه هوشمند مدیریت آبیاری «هوشاب» در یک مزرعه منتخب در شهرستان الیگودرز در ۲ سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ و ۱۴۰۴-۱۴۰۳ ارزیابی و پایش شد. این پژوهش در شرایط واقعی مزرعه کشاورز اجرا شد. برای هر تیمار، چهار تکرار مستقل به مساحت تقریبی ۱۰ هکتار انتخاب شد. با توجه به اینکه، قطعات مورد مطالعه از پیش وجود داشتند و به دلیل محدودیت‌های اجرایی و لزوم حفظ مدیریت معمول مزارع، امکان تخصیص تصادفی تیمارها به قطعات وجود نداشت. با این حال، قطعات انتخاب‌شده از نظر ویژگی‌های مؤثر بر رشد گیاه شامل نوع خاک، شیب، منبع آب، سامانه آبیاری، رقم (گندم میهن)، تاریخ کشت (در سال اول ۵ آبان ۱۴۰۲ و در سال دوم ۱۰ آبان ۱۴۰۳) و مدیریت زراعی یکنواخت انتخاب شدند. همچنین هر قطعه به‌عنوان یک واحد آزمایشی مستقل مدیریت، آبیاری و ارزیابی شد. آزمایش در قالب مطالعه مقایسه مزرعه‌ای با دو تیمار مدیریت آبیاری هوشمند و تیمار مدیریت متداول کشاورز (شاهد) اجرا شد. داده‌های پژوهش پس از بررسی و کنترل اولیه، از نظر برقراری مفروضه‌های تحلیل واریانس شامل نرمال بودن باقیمانده‌ها و همگنی واریانس‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس‌ها با آزمون‌های Shapiro-Wilk و Levene، مقایسه میانگین دو تیمار با استفاده از آزمون t برای نمونه‌های مستقل^۱ در سطح احتمال ۵ درصد تحلیل شدند. تمامی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۴ انجام گرفت.

در مرحله نخست، اطلاعات موردنیاز برای راه‌اندازی سامانه هوشمند مدیریت آبیاری جمع‌آوری و پرونده اختصاصی هر مزرعه تهیه شد. این فرایند با حضور کارشناسان اجرایی و بهره‌بردار انجام گرفت. در بازدیدهای میدانی، مختصات جغرافیایی، مساحت دقیق و پلیگون مزرعه تعیین و اطلاعات پایه شامل کیفیت آب، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، تناوب زراعی، نوع و مشخصات سامانه آبیاری و همچنین مشخصات گیاه زراعی جمع‌آوری شد. پس از تکمیل اطلاعات، پرونده اختصاصی هوشمند هر مزرعه در حضور بهره‌بردار ایجاد و توسط سامانه هوشمند پردازش و ارزیابی شد. در صورت مشاهده هرگونه نقص یا مغایرت، بازدیدهای تکمیلی از مزرعه انجام و اطلاعات اصلاح گردید. در نهایت، پس از پردازش نهایی، سامانه مدیریت هوشمند آبیاری در اختیار بهره‌بردار قرار گرفت و آموزش‌های لازم در خصوص نحوه استفاده از برنامه کاربردی و بهره‌برداری از سامانه ارائه شد. در مرحله بعد، بخشی از مزرعه که به سامانه هوشمند مدیریت آبیاری مجهز شد به‌عنوان تیمار آبیاری هوشمند و بخشی دیگر از مزرعه با شرایط مشابه از نظر نوع محصول، ویژگی‌های خاک، سامانه آبیاری و مدیریت زراعی، به‌عنوان تیمار شاهد انتخاب شد. در تیمار شاهد، آبیاری مطابق روش متداول بهره‌بردار انجام شد. در این روش، زمان آبیاری بر اساس دور آبیاری ثابت و با اتکا به تجربه کشاورز تعیین می‌شد و تغییرات شرایط اقلیمی، نیاز آبی گیاه یا وضعیت رطوبت خاک در طول فصل رشد در تعیین زمان آبیاری لحاظ نمی‌شد. مدت‌زمان آبیاری هر نوبت نیز بر اساس رویه معمول بهره‌بردار و با هدف تأمین آب مورد نیاز مزرعه تعیین گردید. در مقابل، در تیمار هوشاب، زمان و مقدار آبیاری بر اساس برنامه پیشنهادی سامانه و با استفاده از اطلاعات هواشناسی، ویژگی‌های خاک، مرحله رشد گیاه و محاسبه نیاز آبی تنظیم و اجرا شد. سپس عملکرد سامانه هوشمند مدیریت آبیاری طی دو سال زراعی با مقایسه شاخص‌های فنی و زراعی در مزارع تیمار و شاهد مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی کارایی سامانه، شاخص‌های حجم آب آبیاری، برنامه آبیاری، عملکرد محصول و بهره‌وری فیزیکی آب در هر دو تیمار اندازه‌گیری و مقایسه شدند.

حجم آب آبیاری: نیاز آبی گیاهان با استفاده از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به مزرعه مورد مطالعه محاسبه شد. سپس حجم آب آبیاری پیشنهادی سامانه هوشمند با حجم آب مصرفی تیمار شاهد و نیاز آبی گیاه مقایسه و ارزیابی گردید.

به منظور تعیین حجم آب مصرفی، دبی جریان آب در هر نوبت آبیاری با استفاده از دبی سنج التراسونیک^۱، نصب شده بر روی خط اصلی ورودی آب هر قطعه زراعی اندازه گیری و ثبت شد. سپس با ثبت مدت زمان هر نوبت آبیاری، حجم آب مصرفی از حاصل ضرب دبی متوسط در زمان آبیاری محاسبه گردید. حجم آب مصرفی در هر نوبت آبیاری ثبت و در پایان فصل زراعی، با جمع مقادیر ثبت شده، حجم کل آب مصرفی هر مزرعه محاسبه و در محاسبه شاخص بهره‌وری آب مورد استفاده قرار گرفت.

برنامه آبیاری: در این تحقیق، برنامه آبیاری شامل تعیین زمان آبیاری، دور آبیاری و حجم آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری بود. در تیمار هوشاب، زمان شروع آبیاری، دور آبیاری و مدت زمان هر نوبت آبیاری بر اساس توصیه‌های سامانه هوشمند مدیریت آبیاری هوشاب تعیین و اجرا شد. این سامانه با بهره‌گیری از داده‌های هواشناسی، نیاز آبی گیاه، مرحله رشد و شرایط مزرعه، زمان مناسب آبیاری را تعیین می‌کرد. در این سامانه تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) بر اساس داده‌های هواشناسی نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی و با استفاده از روش استاندارد فائو پنمن-مانتیت^۲ محاسبه می‌شود (Allen et al., 1998). سپس با اعمال ضرایب گیاهی (K_c)، تبخیر-تعرق گیاه (ET_c) تعیین و مبنای تهیه برنامه آبیاری در سامانه هوشمند هوشاب قرار گرفت. در ادامه، با در نظر گرفتن بارندگی مؤثر، ویژگی‌های فیزیکی خاک (ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم)، عمق مؤثر ریشه، درصد مجاز تخلیه رطوبت خاک و راندمان سامانه آبیاری، زمان آبیاری، فاصله بین دو آبیاری (دور آبیاری) و حجم آب مورد نیاز هر نوبت توسط سامانه هوشمند هوشاب تعیین و به صورت برخط به بهره‌بردار اعلام شد. علاوه بر این، نیاز خالص آبیاری بر اساس سند ملی و روش فائو پنمن مانیتیت با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT 8.0، نیز محاسبه شد. در تیمار شاهد، مدیریت آبیاری مطابق روش متداول کشاورزان منطقه انجام شد؛ به گونه‌ای که زمان و فاصله بین دو آبیاری بر اساس تجربه بهره‌بردار، وضعیت ظاهری مزرعه و رویه معمول آبیاری تعیین گردید و از توصیه‌های سامانه هوشاب استفاده نشد. صحت و کفایت برنامه آبیاری ارائه شده توسط سامانه از طریق پایش رطوبت خاک در محدوده توسعه ریشه بررسی شد. نمونه برداری‌های میدانی در مراحل فنولوژیک کلیدی و منطبق با زمان بندی 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 حسگر رطوبت خاک^۳ انجام شد. حسگر در محدوده عمق مؤثر توسعه ریشه گیاه (عمق ۳۰ سانتی متر) که بخش عمده ناحیه فعال ریشه گندم را پوشش می‌دهد، نصب شد و درصد رطوبت حجمی خاک در فواصل زمانی مشخص اندازه گیری و ثبت گردید. سپس مقادیر اندازه گیری شده با محدوده رطوبتی هدف که بر اساس ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و درصد مجاز تخلیه رطوبت قابل دسترس تعیین شده بود، مقایسه شد. در صورتی که رطوبت خاک پس از آبیاری در محدوده مطلوب قرار می‌گرفت، برنامه آبیاری از نظر کفایت، مناسب ارزیابی می‌شد و خروج از این محدوده به ترتیب نشان دهنده کم آبی یا آبیاری بیش از نیاز گیاه بود. نتایج این پایش با وضعیت رطوبت خاک در مزرعه شاهد مقایسه و کفایت برنامه آبیاری در هر دو تیمار ارزیابی گردید.

عملکرد محصول: عملکرد نهایی محصول در مزارع تیمار و شاهد اندازه گیری و به منظور ارزیابی اثر سامانه هوشمند بر تولید محصول با یکدیگر مقایسه شد. در زمان رسیدگی کامل محصول، پس از حذف اثر حاشیه، از بخش مرکزی هر قطعه با استفاده از یک کادر با سطح (یک مترمربع) به صورت تصادفی برداشت شد. پس از برداشت، بوته‌ها کوبیده شده و دانه‌ها تمیز و توزین شدند. عملکرد دانه بر اساس وزن دانه برداشت شده از سطح نمونه برداری و با تبدیل به واحد سطح، به صورت کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. لازم به ذکر است که نمونه برداری یک مترمربعی صرفاً برای انطباق با روش‌های استاندارد گزارش عملکرد انجام شد، در حالی که عملکرد نهایی هر قطعه بر اساس برداشت و توزین کل سطح قطعه نیز کنترل و تأیید گردید.

بهره‌وری فیزیکی آب: بهره‌وری فیزیکی آب در هر دو تیمار بر اساس نسبت عملکرد محصول به حجم کل آب مصرفی محاسبه و برای ارزیابی تأثیر سامانه هوشمند بر بهبود بهره‌وری آب مورد مقایسه قرار گرفت. بهره‌وری فیزیکی آب به عنوان نسبت عملکرد دانه به حجم کل آب مصرفی در طول فصل رشد محاسبه شد. این شاخص از رابطه (۱) به دست آمد:

$$WP = \frac{CY}{I} \quad (1)$$

1. FMU830 Ultrasonic Flowmeter

2. FAO Penman-Monteith

3. PMS-714

که در این رابطه WP بهره‌وری آب (kg/m^3)، CY عملکرد دانه محصول (kg/ha) و I حجم آب آبیاری (m^3/ha) می‌باشد (Howell, 2001). به‌منظور تعیین غلظت املاح، در طول اجرای آزمایش نمونه‌برداری خاک از عمق مؤثر توسعه ریشه (۶۰-۰ سانتی‌متر) در مزرعه انجام شد. نمونه‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، بر اساس روش‌های استاندارد مورد تجزیه قرار گرفتند و هدایت الکتریکی (ECe) عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری‌ها برای ارزیابی وضعیت شوری و تفسیر نتایج پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. در طول دوره اجرای پژوهش، هیچ‌گونه کودآبیاری از طریق سامانه آبیاری انجام نشد و کودهای مصرفی مطابق برنامه تغذیه مزرعه و مستقل از آب آبیاری در ابتدای فصل استفاده شدند؛ بنابراین، تغییرات شوری خاک تحت تأثیر تزریق کود از طریق آب آبیاری قرار نداشت. به‌منظور ارزیابی عملکرد سامانه هوشمند هوشاب، مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط سامانه با داده‌های اندازه‌گیری‌شده در مزرعه مقایسه شد. بدین منظور با استفاده از چند شاخص آماری متفاوت، اعتبار و درستی خروجی‌های نرم‌افزار سامانه هوشمند آبیاری با داده‌های اندازه‌گیری‌شده (رطوبت و شوری خاک)، مورد ارزیابی قرار گرفت. شاخص‌های آماری مورد استفاده شامل شاخص میانگین خطا (ME)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) بودند (Montgomery & Runger, 2018). در این پژوهش، سامانه هوشاب به‌عنوان یک سامانه از پیش توسعه‌یافته مورد استفاده قرار گرفت و هیچ‌گونه بازکالیبراسیون یا تنظیم پارامترهای مدل بر اساس داده‌های این مطالعه انجام نشد؛ بنابراین، شاخص‌های گزارش‌شده بیانگر توانایی سامانه در بازتولید داده‌های مشاهده‌شده در شرایط واقعی مزرعه هستند.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m)}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m) \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)} \right]^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (3)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (5)$$

که در آن O_i مقادیر اندازه‌گیری‌شده، O_m میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده، P_i مقادیر برآورد شده توسط مدل، P_m میانگین مقادیر برآورد شده توسط مدل و n تعداد کل مشاهدات که در این تحقیق برابر با ۸ بود، می‌باشند. عملیات آماده‌سازی زمین برای کشت گندم در آبان‌ماه شامل شخم‌زدن، دیسک زدن و تسطیح انجام شد. کودهای اصلی (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) بر اساس توصیه کارشناسی قبل از کاشت در زمین پخش شدند. سامانه آبیاری مورد استفاده در مزرعه مورد مطالعه برای هر دو تیمار روش آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک بود. فاصله آبپاش‌ها 22×22 متر بود و در سامانه آبیاری از آبپاش پروت مدل ZK30 استفاده شد. پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز مزرعه و ورود آن‌ها به سامانه، هوشاب برای شرایط مزرعه مورد مطالعه پیکربندی شد. سپس با ایجاد حساب کاربری برای بهره‌بردار، برنامه آبیاری اختصاصی هر قطعه از طریق سامانه در اختیار وی قرار گرفت. 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

Table 1. Water and soil characteristics of the experimental site

شوری عصاره اشباع خاک (ds/m)	کربن آلی (%)	شن (%)	رس (%)	سیلت (%)	بافت خاک	شوری آب (ds/m)
Soil saturated extract salinity	Organic carbon	Sand	Clay	Silt	Soil texture	Water Salinity
1.4	0.6	53	7	40	لوم شنی Sandy Loam	0.57

نتایج و بحث

برنامه آبیاری ارائه شده توسط سامانه هوشاب نشان دهنده تغییرپذیری منطقی در مدت زمان آبیاری (از ۲:۳۸ تا ۶:۲۴ ساعت) متناسب با شرایط اقلیمی، مرحله فنولوژیک گیاه و نیاز آبی است. این تغییرپذیری نشان داد که سامانه بر اساس مدل تبخیر-تعرق و رطوبت خاک، آبیاری را پویا و متناسب با نیاز واقعی تنظیم نموده است؛ برخلاف روش سنتی که با دور ثابت انجام می شد. در سامانه هوشمند، قابلیت پیش بینی هواشناسی ۴۸ ساعته و ۸ روزه نیز امکان تصمیم گیری پیش نگر را فراهم کرده و می تواند از آبیاری غیرضروری قبل از بارش جلوگیری نماید.

مقادیر آماره های مورد استفاده در ارزیابی عملکرد سامانه هوشاب در شبیه سازی رطوبت و غلظت املاح آب خاک در ناحیه توسعه ریشه در جدول ۱ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود بر اساس شاخص ME سامانه هوشاب مقدار رطوبت خاک را کمتر برآورد کرده است. همچنین، در خصوص غلظت املاح خاک سامانه هوشاب مقادیر غلظت املاح را کمتر برآورد کرده است. بر اساس شاخص های ارزیابی مدل، سامانه هوشاب دقت قابل قبولی در برآورد غلظت املاح خاک نشان داد. مقادیر $RMSE$ ، R^2 و ME بیانگر انطباق مناسب بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر برآورد شده توسط سامانه بود. در شکل ۲ و ۳ تغییرات رطوبت خاک در مزرعه تحت مدیریت هوشاب، مزرعه شاهد و مقادیر محاسباتی توسط سامانه هوشاب نشان داده شده است. مقایسه مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده نشان داد که سامانه هوشاب روند تغییرات رطوبت خاک را با دقت قابل قبولی بازتولید کرده است. همچنین، تغییرات رطوبت شبیه سازی شده با زمان وقوع آبیاری ها همخوانی مناسبی داشت. در تیمار شاهد، به دلیل اجرای آبیاری با دور و مقدار ثابت، مقادیر رطوبت خاک در بخش قابل توجهی از فصل رشد کمتر از تیمار تحت مدیریت هوشاب بود. این نتایج بیانگر تفاوت در الگوی مدیریت رطوبت خاک بین دو روش آبیاری است. در شکل ۴ تغییرات شوری خاک در مزرعه تحت مدیریت هوشاب، مزرعه شاهد و مقادیر محاسباتی توسط سامانه هوشاب نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود مقادیر محاسبه شده و اندازه گیری شده انطباق خوبی دارند و تغییرات شوری شبیه سازی شده متناسب با بارش ها و آبیاری ها می باشد. به گونه ای که انجام آبیاری باعث افزایش شوری خاک و بارش باعث کاهش شوری خاک شده است. از آن جا که در طول اجرای آزمایش کودآبیاری انجام نشد، تغییرات مشاهده شده در شوری خاک را نمی توان به تزریق کود از طریق آب آبیاری نسبت داد. نتایج نشان داد غلظت املاح خاک در برخی مراحل فصل رشد نسبت به مقادیر اولیه افزایش یافت. این تغییرات می تواند ناشی از تغلیظ املاح در اثر تبخیر و تعرق، جذب آب توسط گیاه و سایر فرایندهای طبیعی حاکم بر ناحیه ریشه باشد. با این حال، مقادیر اندازه گیری شده شوری خاک (حدود ۱/۷ دسی زیمنس بر متر) در محدوده ای قرار داشت که برای کشت گندم به عنوان محیط شور محسوب نمی شود؛ بنابراین، بر اساس نتایج این پژوهش، نمی توان ضرورت اجرای آبشویی را صرفاً بر مبنای این مقادیر نتیجه گیری کرد، اما ادامه این روند در نظر گرفتن آبشویی را ضروری می نماید.

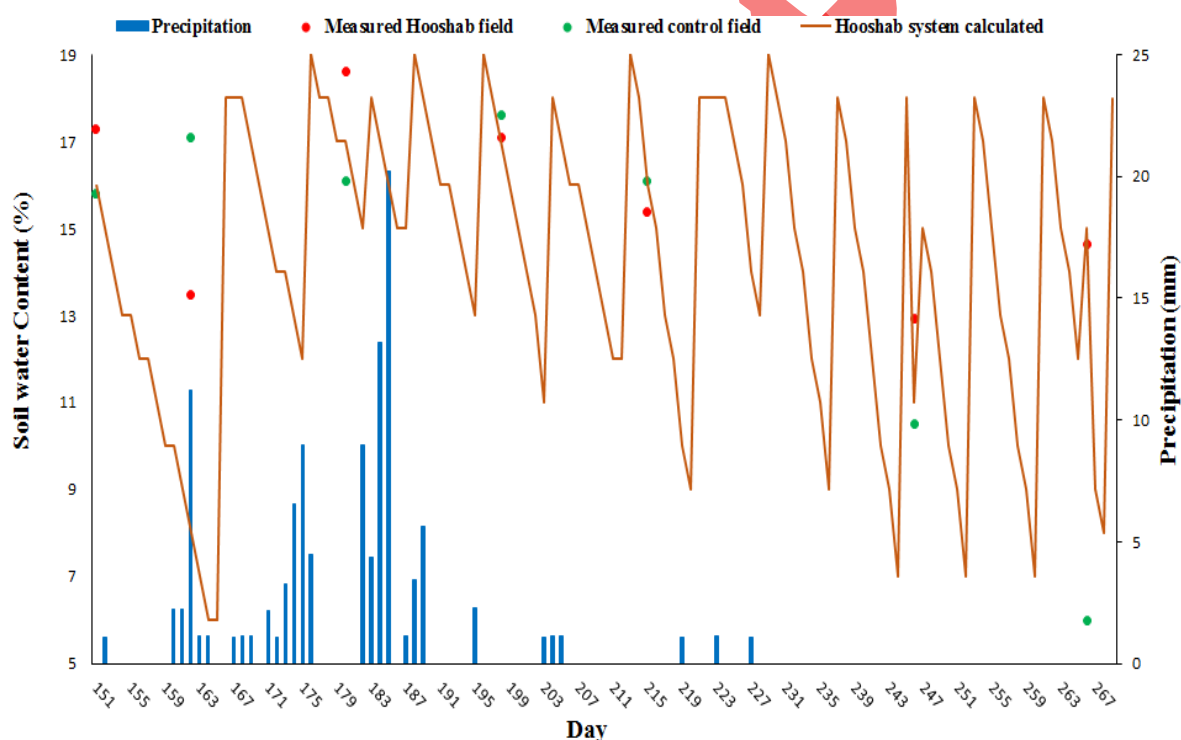
جدول ۲. ارزیابی عملکرد سامانه هوشاب در شبیه سازی رطوبت و غلظت املاح آب خاک در ناحیه توسعه ریشه

Table 2. Evaluation of Hooshab system's performance in simulating soil water and solute concentration in the root development area

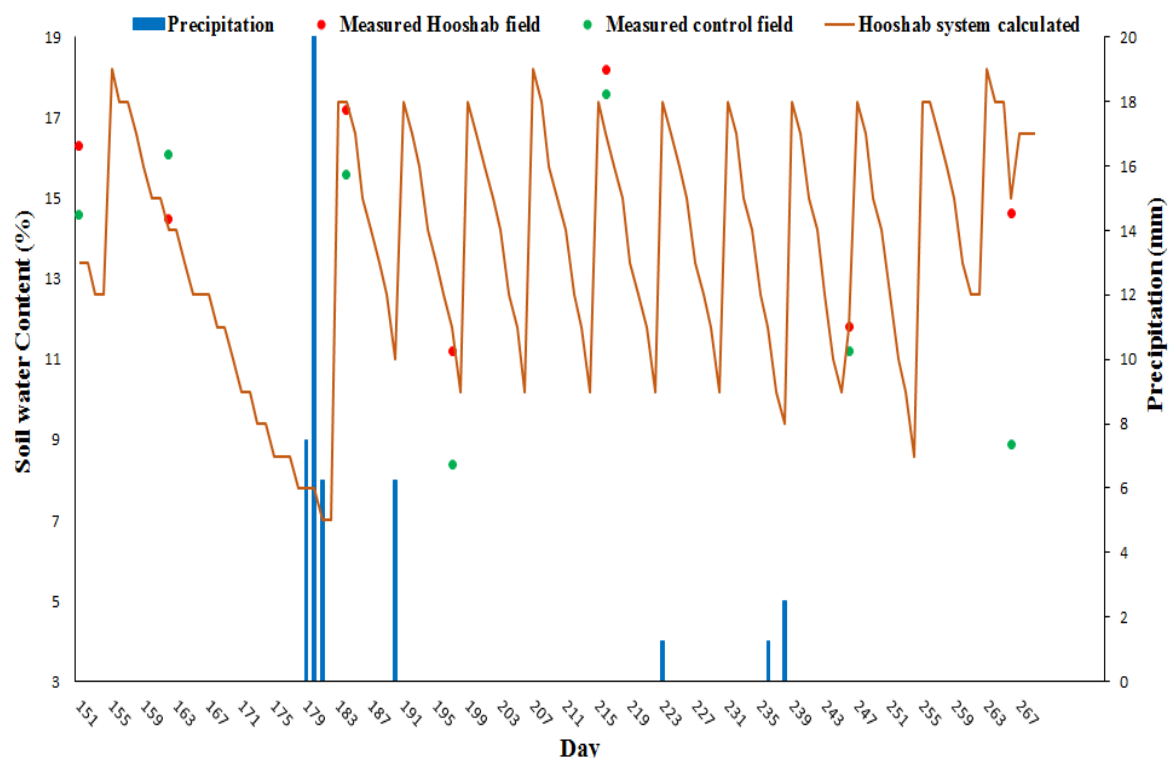
اماره ارزیابی	صفت
Evaluation Statistics	Parameter
-0.04	ME
0.03	MAE
0.05	RMSE
0.71	R^2
-1.4	ME
0.2	MAE
1.2	RMSE
0.98	R^2

بر اساس شاخص های آماری مقدار R^2 برابر ۰/۷۱ برای رطوبت خاک بیانگر همبستگی قابل قبول بین مقادیر شبیه سازی و اندازه گیری شده است. $RMSE$ برابر ۰/۰۴ نشان دهنده خطای کم مدل در برآورد رطوبت حجمی است. مقدار ME منفی (۰/۰۴-) نشان می دهد که سامانه تمایل به کم برآوردی جزئی رطوبت خاک دارد. این موضوع از دید مدیریتی اهمیت دارد، زیرا کم برآوردی جزئی رطوبت ممکن است منجر به پیشنهاد آبیاری زودتر از موعد شود که در شرایط کم آبی می تواند قابل تأمل باشد.

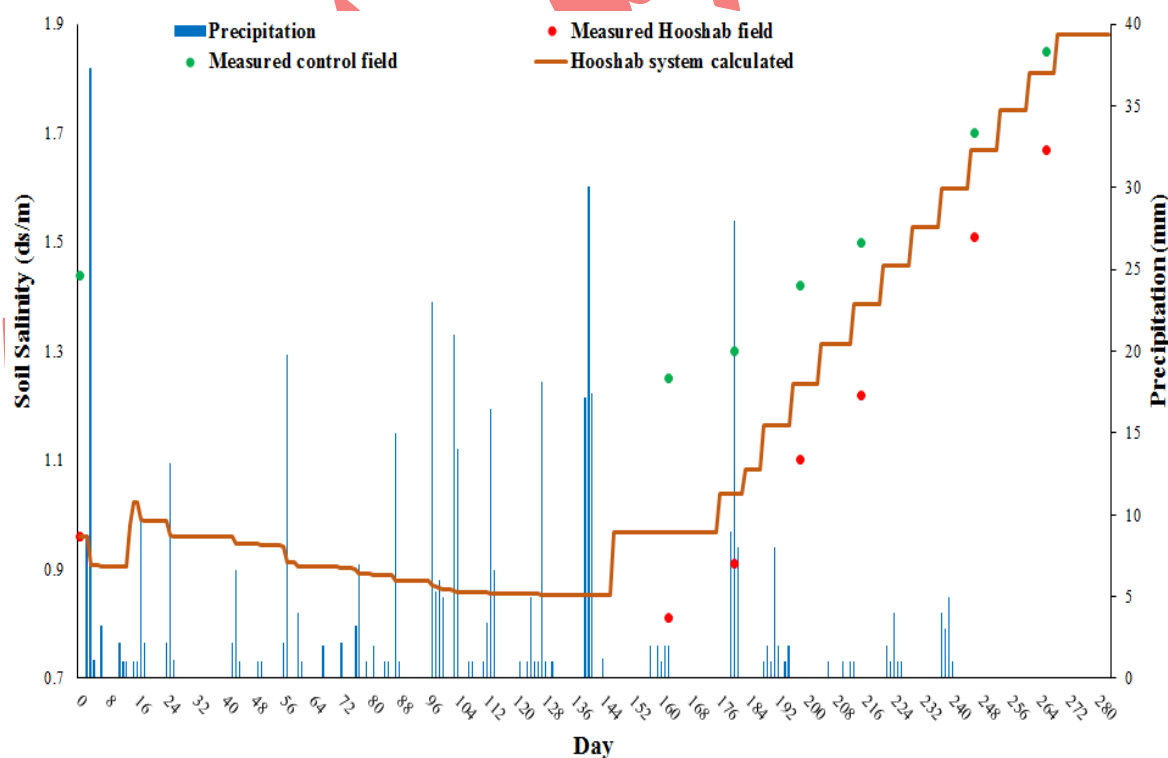
با این حال انطباق مناسب منحنی‌ها در شکل‌های ارائه‌شده نشان می‌دهد مدل عملکرد قابل قبولی داشته است و توانایی سامانه در بازتولید روند تغییرات رطوبت متناسب با آبیاری‌ها را نشان می‌دهد. برای غلظت املاح خاک نیز مقدار R^2 برابر ۰/۹۸ نشان‌دهنده دقت بسیار بالا در شبیه‌سازی روند تغییرات شوری است. مقادیر MAE و RMSE پایین بیانگر تطابق مناسب داده‌های مدل و مشاهدات میدانی است. ME منفی نشان‌دهنده کم‌برآوردی جزئی شوری توسط سامانه است. این مقادیر، بیانگر آن است که سامانه در بازنمایی الگوی زمانی تغییرات شوری (افزایش پس از آبیاری، کاهش پس از بارش) عملکرد بسیار خوبی دارد، اگرچه برای بهبود دقت مقادیر مطلق شوری نیاز به اصلاح و واسنجی وجود دارد. با مقایسه روند تغییرات شوری خاک و زمان وقوع بارندگی‌ها، کاهش نسبی شوری پس از برخی رخدادهای بارندگی مشاهده شد؛ با این حال، با توجه به اینکه فرآیند آبشویی املاح در این پژوهش به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشده است، این مشاهده صرفاً بیانگر یک هم‌زمانی بوده و برای اثبات نقش بارندگی در کاهش شوری به بررسی‌های تکمیلی نیاز است. در هیچ‌یک از تیمارها برنامه آبشویی مستقل در نظر گرفته نشده و در صورت افزایش تدریجی شوری خاک در سال‌های متوالی و عبور آن از حدود بحرانی متناسب با گیاه، ممکن است اجرای اقدامات مدیریتی از جمله آبشویی ضرورت پیدا کند. همخوانی الگوی شبیه‌سازی‌شده با داده‌های میدانی برای هر دو پارامتر رطوبت و شوری، نشان می‌دهد که می‌توان از سامانه هوشاب به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌یار مطمئن برای برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت شوری استفاده کرد.



شکل ۲. مقایسه تغییرات رطوبت حجمی خاک محاسبه شده توسط سامانه هوشاب و اندازه‌گیری مزرعه‌ای (سال اول)
Figure 2. Comparison of volumetric soil moisture changes calculated by Hooshab system and field measurements (first year)



شکل ۳. مقایسه تغییرات رطوبت حجمی خاک محاسبه شده توسط سامانه هوشاب و اندازه‌گیری مزرعه‌ای (سال دوم)
Figure 3. Comparison of volumetric soil moisture changes calculated by the Hooshab system and field measurements (second year)



شکل ۴. مقایسه تغییرات شوری خاک محاسبه شده توسط سامانه هوشاب و اندازه‌گیری مزرعه‌ای
Figure 4. Comparison of soil salinity changes calculated by Hooshab system and field measurements

نتایج ثبت‌شده رطوبت خاک نشان داد که رطوبت خاک در مزرعه شاهد در بخش قابل توجهی از فصل رشد کمتر از مزرعه تحت مدیریت هوشاب بود. به طور میانگین، رطوبت خاک در تیمار هوشاب ۱۴/۹ درصد و در تیمار شاهد ۱۳/۱ درصد اندازه‌گیری شد.

با وجود آن که هر دو مقدار در محدوده قابل قبول رطوبت ظرفیت زراعی خاک (۱۸/۱٪) قرار داشتند، اما بررسی روند تغییرات زمانی رطوبت نشان داد که در تیمار شاهد، رطوبت خاک در فاصله بین دو نوبت آبیاری دفعات بیشتری به کمتر از محدوده مطلوب برای رشد گندم کاهش یافته و گیاه برای مدت بیشتری در معرض تنش رطوبتی قرار داشته است. در مقابل، سامانه هوشاب با زمان بندی مناسب آبیاری، نوسانات رطوبت خاک را کاهش داده و رطوبت ناحیه ریشه را برای مدت بیشتری در محدوده مطلوب نگه داشته است (شکل ۲ و ۳). دامنه تغییرات رطوبت خاک در طول فصل برای تیمار شاهد بین ۶ تا ۱۸ درصد و در تیمار آبیاری هوشمند بین ۱۰ تا ۱۸ درصد بود. این اختلاف نشان می‌دهد که گیاه در مزرعه شاهد در بخش بیشتری از فصل رشد با کمبود رطوبت و تنش خشکی مواجه بوده است، در حالی که در مزرعه هوشاب تغییرات رطوبت هماهنگ‌تر با نیاز آبی گیاه تنظیم شده است.

به منظور تفسیر صحیح تغییرات رطوبت و شوری خاک، زمان وقوع و مقدار بارندگی‌های ثبت شده در طول دوره اجرای پژوهش در شکل‌های ۲ تا ۴ مشخص شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، تغییرات رطوبت خاک علاوه بر برنامه آبیاری، تحت تأثیر بارندگی‌های رخ داده در طول فصل رشد نیز قرار داشته است. الگوی تغییرات شوری خاک نشان داد که در هر دو مزرعه، آبیاری بدون در نظر گرفتن آبشویی موجب تجمع تدریجی املاح در ناحیه ریشه شده است، به طوری که آبیاری باعث افزایش و بارش باعث کاهش شوری شده است. بنابراین، علیرغم پایش روند تغییرات شوری خاک در طول فصل رشد، مقادیر اندازه‌گیری شده در محدوده قابل تحمل برای گندم قرار داشت و شواهدی مبنی بر ایجاد تنش شوری مشاهده نشد.

پیش از انجام تجزیه مرکب، نرمال بودن و همگنی واریانس داده‌های دو سال با استفاده از آزمون‌های Shapiro-Wilk و Levene بررسی شد. همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، نتایج آزمون Shapiro-Wilk نشان داد که باقی مانده‌های هر سه صفت از توزیع نرمال پیروی می‌کنند ($P > 0.05$). همچنین آزمون‌های Levene بیانگر همگنی واریانس خطاها بود ($P > 0.05$). در جدول ۴ نتایج آزمون مقایسه دو تیمار آبیاری با استفاده از آزمون مقایسه‌ای t بر حجم آب مصرفی، عملکرد گندم و بهره‌وری آب نشان داده شده است. نتایج نشان داد که اثر روش مدیریت آبیاری بر حجم آب آبیاری، عملکرد محصول و بهره‌وری فیزیکی آب در هر دو سال آزمایش معنی‌دار بود. سامانه هوشمند هوشاب در مقایسه با مدیریت متداول کشاورز موجب کاهش معنی‌دار مصرف آب و افزایش عملکرد و بهره‌وری آب گردید. اگرچه مقادیر مطلق شاخص‌ها بین دو سال متفاوت بود، اما روند پاسخ تیمارها در هر دو سال مشابه بود که نشان‌دهنده پایداری عملکرد سامانه در شرایط متفاوت اقلیمی دو سال مورد آزمایش است.

جدول ۳. نتایج آزمون همگنی و نرمال بودن داده‌ها

Table 3. Results of the homogeneity and normality test of data

آزمون نرمال بودن باقیمانده‌ها (Shapiro-Wilk)		آزمون همگنی واریانس‌ها Levene's Test		صفت Parameter
Normality test of residuals		Homogeneity of variances test		
P-value	آماره W	P-value	آماره F	
0.067	0.859	0.474	0.893	آب مصرفی Irrigation volume
0.136	0.914	0.813	0.317	عملکرد Yield
0.836	0.970	0.134	2.143	بهره‌وری آب Water productivity

ویژگی‌های مدیریت آبیاری اعمال شده شامل تعداد دفعات آبیاری، حجم کل آب مصرفی، عملکرد محصول و بهره‌وری مصرف آب در زمین زارعی مورد مطالعه در جدول ۵ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، میزان مصرف آب در مزرعه تحت مدیریت هوشاب نسبت به مزرعه شاهد در سال اول ۲۲/۹ درصد، در سال دوم ۱۱/۴ درصد و به طور میانگین ۱۷/۱۵ درصد کاهش یافته است. همچنین میزان عملکرد محصول در سال اول ۵/۶ درصد، در سال دوم ۱۰/۷ و به طور میانگین ۸/۱۵ درصد افزایش داشته است. بهره‌وری آب نیز در سال اول ۳۶/۳ درصد، در سال دوم ۲۴/۳ درصد و به طور میانگین ۳۰/۳ درصد افزایش داشته است. دلیل این تغییرات نحوه مدیریت برنامه‌ریزی آبیاری در دو مزرعه بود. به گونه‌ای که در مزرعه شاهد آبیاری با مدار

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 ۴. نتایج آزمون مقایسه دو روش مدیریت آبیاری با استفاده از آزمون مقایسه‌ای t

Table 4. Results of the the t-test comparison between two irrigation treatments management methods

P-value	df	t	شاهد Control	مدیریت هوشاب Hooshab system	شاخص Parameter
0.001**	6	-9.91	3670 ± 129	2830 ± 109	حجم آبیاری کاربردی Applied irrigation volume
0.05*	6	2.38	4149 ± 153	4380 ± 118	عملکرد محصول yield
0.02*	6	3.170	1.13 ± 0.09	1.54 ± 0.24	بهره‌وری آب Water productivity
0.001**	6	-6.18	5672 ± 140.5	5024 ± 155.8	حجم آبیاری کاربردی Applied irrigation volume
0.002**	6	5.39	6270 ± 183.1	6940 ± 167.5	عملکرد محصول yield
0.05*	6	2.43	1.11 ± 0.12	1.38 ± 0.18	بهره‌وری آب Water productivity

ns غیرمعنی‌دار، * و ** به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۵ و ۱ درصد

ns non-significant, * and ** significant at 5 and 1% probability levels, respectively

نتایج جدول ۴ و ۵ بیانگر آن است که تصمیم‌گیری مبتنی بر داده‌های رطوبت خاک، اطلاعات هواشناسی و نیاز آبی گیاه، از انجام آبیاری‌های غیرضروری جلوگیری کرده و تلفات ناشی از نفوذ عمقی و تبخیر را کاهش داده است. در مقابل، افزایش عملکرد را می‌توان به تأمین مناسب‌تر نیاز آبی گیاه در مراحل حساس رشد، کاهش تنش خشکی و حفظ رطوبت مطلوب در ناحیه توسعه ریشه نسبت داد. در سامانه هوشاب، زمان و مقدار آبیاری بر اساس شرایط واقعی مزرعه تعیین می‌شود؛ بنابراین گیاه در دوره‌های بحرانی رشد با کمبود یا مازاد آب مواجه نشده و شرایط مناسب‌تری برای فتوسنتز، جذب عناصر غذایی و تشکیل دانه فراهم می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که سامانه هوشاب علاوه بر کاهش مصرف آب، توانسته است مقدار بیشتری محصول به ازای هر واحد آب مصرفی تولید کند. از آنجا که در شرایط اقلیم نیمه‌خشک، افزایش بهره‌وری آب یکی از مهم‌ترین اهداف مدیریت آبیاری محسوب می‌شود، این یافته بیانگر کارایی مناسب سامانه هوشاب در ارتقای بهره‌وری منابع آب کشاورزی است. از سوی دیگر، نتایج نشان داد که میزان پاسخ گیاه به مدیریت هوشمند آبیاری تحت تأثیر شرایط اقلیمی سال قرار گرفته است. احتمالاً تفاوت در الگوی بارندگی، دما، تقاضای تبخیر – تعرق و متعاقباً نحوه مدیریت آبیاری در دو سال زراعی موجب شده است که میزان افزایش بهره‌وری آب ناشی از سامانه هوشاب در سال دوم بیش از سال اول باشد. این موضوع بیانگر آن است که مزیت سامانه‌های هوشمند آبیاری در سال‌هایی که تنش آبی شدیدتر است، بیشتر نمایان می‌شود.

جدول ۵. ویژگی‌های مدیریت آبیاری اعمال شده در مزرعه مورد مطالعه

Table 5. Characteristics of irrigation management applied in the study farm

مدیریت هوشاب Hooshab system	شاهد Control	شاخص Parameter	مدیریت هوشاب Hooshab system	شاهد Control	شاخص Parameter
2830	3670	حجم آبیاری سال اول (m ³) Irrigation volume in the first year (m ³)	3600	3600	نیاز خالص آبیاری (سند ملی) (mm) Net irrigation requirement (National Document) (mm)

5024	5672	حجم آبیاری سال دوم (m^3) Irrigation volume in the second year (m^3)	432	432	نیاز خالص آبیاری (پنمن مانتیت) (mm) Net irrigation requirement (Penman Monteith) (mm)
4380	4149	عملکرد محصول سال اول (kg/ha) Yield in the first year (kg/ha)	7	5	تعداد دفعات آبیاری سال اول Number of irrigations in the first year
6940	6270	عملکرد محصول سال دوم (kg/ha) Yield in the second year (kg/ha)	10	7	تعداد دفعات آبیاری سال دوم Number of irrigations in the second year
1.54	1.13	بهره‌وری مصرف آب سال اول (kg/m^3) First year Water productivity (kg/m^3)	6	9	متوسط دور آبیاری (روز) Average irrigation period (Day)
1.38	1.11	بهره‌وری مصرف آب سال دوم (kg/m^3) Second year Water productivity (kg/m^3)	4.5	8	میانگین مدت آبیاری (ساعت) Average irrigation duration (hours)

این نتایج نشان داد که سامانه هوشاب با کاهش تنش خشکی، شرایط بهینه‌تری برای رشد گیاه فراهم کرده است، در مزرعه شاهد به دلیل دور آبیاری ثابت، گیاه در برخی مقاطع دچار تنش شده که موجب کاهش عملکرد گردیده است و افزایش بهره‌وری مصرف آب ناشی از ترکیب کاهش مصرف و افزایش عملکرد بوده است. کاهش درصد صرفه‌جویی آب در سال دوم نسبت به سال اول با معنی‌دار بودن اثر سال در تجزیه آماری همخوانی دارد و نشان‌دهنده تأثیر شرایط متفاوت بین سال‌های زراعی بر نتایج پژوهش است. کاهش درصد صرفه‌جویی آب در سال دوم نسبت به سال اول می‌تواند ناشی از تفاوت شرایط اقلیمی، افزایش دقت بهره‌بردار در مدیریت سنتی، یا تغییر در الگوی بارش باشد. با این حال، تعیین سهم هر یک از عوامل مؤثر نیازمند بررسی‌های تکمیلی است. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از سامانه هوشمند مدیریت آبیاری موجب کاهش مصرف آب و بهبود بهره‌وری آب نسبت به مدیریت متداول کشاورز شد. با این حال، با توجه به اینکه تحلیل اقتصادی جامع شامل هزینه‌های اجرا، بهره‌برداری، نگهداری، درآمد و سود خالص در این مطالعه انجام نشد، نمی‌توان درباره برتری اقتصادی این سامانه به‌طور قطعی اظهار نظر کرد. انجام تحلیل اقتصادی جامع در مطالعات آتی می‌تواند مبنای مناسب‌تری برای ارزیابی اقتصادی این فناوری فراهم سازد.

به‌طور کلی، سامانه هوشاب به عنوان یک ابزار تصمیم‌یار مبتنی بر هوش مصنوعی و بدون نیاز به نصب حسگرهای گران‌قیمت در مزرعه، پتانسیل بالایی برای کمک به مقابله با بحران کم‌آبی، افزایش امنیت غذایی و ارتقای پایداری تولید در شرایط اقلیمی لرستان و مناطق مشابه دارد. کاربرد سامانه‌های هوشمند در مدیریت آبیاری موجب انتقال از مدیریت تجربی به مدیریت داده‌محور می‌شود. نتایج این مطالعه با یافته‌های پژوهش‌های مشابه در زمینه کشاورزی دقیق و آبیاری هوشمند همخوانی دارد (Naseri et al., 2020; Vallejo-Gómez et al., 2023; Haghayeghi Moghaddam et al., 2025). میزان صرفه‌جویی آب مشاهده‌شده در این پژوهش (۱۵/۹ درصد) با نتایج مطالعات اخیر در زمینه سامانه‌های هوشمند آبیاری همخوانی دارد. والجو و همکاران (Vallejo-Gómez et al., 2023)، گزارش کردند که استفاده از سامانه‌های تصمیم‌یار و حسگرهای هوشمند می‌تواند مصرف آب را تا حدود ۳۰ درصد کاهش دهد. همچنین کوماری و همکاران (Kumari et al., 2024) 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. افزایش بهره‌وری مصرف آب در این تحقیق با یافته‌های امامی و همکاران (Emami et al., 2026) نیز مطابقت دارد. این پژوهشگران بیان کردند که مهم‌ترین مزیت سامانه‌های هوشمند آبیاری، تنظیم زمان و مقدار آبیاری متناسب با نیاز واقعی گیاه است که ضمن کاهش تلفات ناشی از نفوذ عمقی و رواناب، شرایط رطوبتی

مناسب‌تری را در ناحیه ریشه فراهم می‌کند. در پژوهش حاضر نیز مقادیر بالاتر رطوبت خاک در مزرعه تحت مدیریت هوشاب نسبت به شاهد، مؤید کاهش تنش خشکی و افزایش کارایی مصرف آب است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد سامانه هوشمند مدیریت آبیاری هوشاب در مقایسه با مدیریت متداول کشاورز، در شرایط مزرعه و طی دو سال زراعی انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از سامانه هوشاب به طور متوسط موجب کاهش حجم آب مصرفی به میزان ۱۷/۱۵ درصد، افزایش عملکرد گندم به میزان ۸/۱ درصد و افزایش بهره‌وری فیزیکی آب به میزان ۳۰/۳ درصد نسبت به مدیریت متداول شد. همچنین، نتایج مقایسه آماری نشان داد که اثر روش مدیریت آبیاری بر حجم آب مصرفی، عملکرد محصول و بهره‌وری فیزیکی آب در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. این نتایج بیانگر آن است که استفاده از سامانه‌های هوشمند مدیریت آبیاری می‌تواند راهکاری مؤثر برای افزایش کارایی مصرف آب در شرایط کمبود منابع آب باشد. پایش رطوبت خاک نیز نشان داد که در تیمار تحت مدیریت هوشاب، رطوبت ناحیه توسعه ریشه در بخش عمده فصل رشد در محدوده مطلوب‌تری نسبت به تیمار شاهد حفظ شد که بیانگر مناسب بودن برنامه آبیاری ارائه‌شده توسط سامانه برای تأمین نیاز آبی گیاه است. علاوه بر این، ارزیابی سامانه در برآورد رطوبت و غلظت املاح خاک بر اساس شاخص‌های آماری به‌کاررفته در این پژوهش، بیانگر دقت قابل قبول آن در شبیه‌سازی این متغیرها بود. این قابلیت، امکان برآورد مناسب وضعیت رطوبتی خاک و ارائه برنامه آبیاری دقیق‌تر را فراهم کرده و نقش مهمی در پشتیبانی از تصمیم‌گیری بهره‌برداران در مدیریت آبیاری ایفا می‌کند. با وجود این، به‌کارگیری این سامانه دارای کاستی‌ها و چالش‌هایی از جمله ترغیب کشاورز به استفاده از سامانه و واردکردن بازخوردها در زمان مناسب، بهبود دقت سامانه در برآورد پارامترهای رطوبت و شوری خاک، فراهم نمودن امکان دریافت بازخوردها به‌صورت برخط از سطح مزرعه و فراهم نمودن امکان اعلام برنامه آبیاری به بهره‌بردار از طریق پیامک و یا روش‌های دیگر، می‌باشد؛ لذا، بر اساس نتایج این تحقیق پیشنهاداتی شامل آموزش مستمر و پشتیبانی فنی بهره‌برداران و کارشناسان ترویجی برای افزایش پذیرش و اجرای دقیق توصیه‌های سامانه و کاهش تغییرات خودسرانه در برنامه، یکپارچه‌سازی سامانه هوشاب با سایر ابزارهای کشاورزی دقیق مانند پایش شاخص تفاوت نرمال‌شده گیاهی^۱ ماهواره‌ای یا حسگرهای ارزان‌قیمت برای افزایش دقت پیش‌بینی و تصمیم‌گیری، توسعه زیرساخت ارتباطی (اینترنت پایدار در مناطق روستایی) به عنوان پیش‌نیاز گسترش سامانه‌های هوشمند در سطح وسیع، می‌تواند اثرگذاری سامانه هوشاب را به طور قابل‌توجهی افزایش دهد. با توجه به کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری، استفاده از سامانه هوشاب می‌تواند به‌عنوان یکی از گزینه‌های مناسب مدیریت آبیاری در مناطق نیمه‌خشک کشور مورد توجه سازمان‌های اجرایی و بهره‌برداران قرار گیرد. با این حال، با توجه به این‌که این مطالعه در یک منطقه جغرافیایی، طی دو سال زراعی و در مقیاس یک مزرعه اجرا شده است، تعمیم نتایج به سایر شرایط اقلیمی، خاکی، محصولات زراعی یا نظام‌های مدیریتی نیازمند انجام مطالعات تکمیلی در مناطق مختلف و با طراحی‌های آزمایشی گسترده‌تر است. همچنین، ارزیابی عملکرد سامانه در مدیریت شوری خاک، پایش برخط و سایر قابلیت‌های پیشرفته آن، مستلزم انجام پژوهش‌های اختصاصی در این زمینه‌ها است.

منابع

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- Arvandi, S. (2024). The Effect of Climate Change on the Way of Investing in Modern Irrigation Systems. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(3), 97-110. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7834.1071>
- Bahojb Khoshnoudi, A., Besharat, S., & Zeinalzadeh, K. (2020). Measurement and simulation of water flow and root water uptake in smart irrigation management. *Journal of Water and Soil Science*, 30(3), 133-146. [In Persian]. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20085133.1399.30.3.10.0>
- Emami, S., Dehghanisani, H. & Emami, H. (2026). Intelligent irrigation management system for arid and semi-arid regions under climate change. *Sci Rep* 16, 16401. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-46523-9>

1 . Normalized difference vegetation index

- Feng, X., Yan, Z., Liu, N., Liu, Q., Shao, L., & Liu, X. (2025). Optimizing soil water sensor placement and irrigation thresholds for winter wheat: a data-driven approach to efficient water management. *Agricultural Water Management*, 320, 109861. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109861>
- Fu, Q., Liu, X., Hong, M., Ai, P., Ma, L., Zhao, J., & Wang, Q. (2025). Optimizing irrigation scheduling for winter wheat using the AquaCrop model in Xinjiang, China. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1680820. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1680820>
- Haghighayeghi Moghaddam, S. A., Karamati, M., & Zolfaghari, A. (2025). Evaluation of a smart irrigation system for irrigation management of wheat in the Mashhad region. *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering*, 26(Summer), 37–54. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/idser.2025.369010.1613>
- Hosseini Seddigh, S. M., and Jalali, M. (2024). Analysis of Iran's Drought Changes with Palmer's Self-Adjustment Index. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(1), 93-106. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.6149.1016>
- Howell, T. A. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal*, 93(2), 281-289. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932281x>
- Incrocci, L., Marzalettib, P., Incroccia, G., Di Vita, A., Balendonck, J., Bibbiani, C., Spagnole, S., & Pardossia, A. (2014). Substrate water status and evapotranspiration irrigation scheduling in heterogeneous container nursery crops. *Agricultural Water Management*, (131), 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.09.004>
- Kumar, K. A., Chaitanya, K., Neelima, T. L., & Madhukar, B. (2024). Advances in Smart Irrigation Technologies for Enhancing Water Use Efficiency and Crop Productivity under Changing Climate Conditions. *Agriculture Reviews*, 3(1), 1-5. <https://doi.org/10.51470/AR.2024.3.1.01>
- Kumari, A., Singh, D. K., Sarangi, A., Hasan, M., & Sehgal, V. K. (2024). Optimizing wheat supplementary irrigation: Integrating soil stress and crop water stress index for smart scheduling. *Agricultural Water Management*, 305, 109104. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109104>
- Li, M., Zhou, S., Shen, S., Wang, J., Yang, Y., Wu, Y., Chen, F., & Lei, Y. (2024). Climate-smart irrigation strategy can mitigate agricultural water consumption while ensuring food security under a changing climate. *Agricultural Water Management*, 292, 108663. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108663>
- Lorestan Meteorological Department. (2023). Annual statistical report of the climatic conditions of Lorestan province. Khorramabad: Iran Meteorological Organization. [In Persian]
- Masseroni, D., Moller, P., Tyrell, R., Romani, R., Lasagna, A., Sali, G., Facchi, A., Gandolfi, C. (2018). Evaluating performances of the first automatic system for paddy irrigation in Europe. *Agricultural Water Management*, 201, 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.019>
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2018). Applied Statistics and Probability for Engineers. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1080/03043799408928312>
- Naseri, H., Asgari, F., Khodaei, K., & Alijani, F. (2020). Evaluation of flooding and smart drip irrigation methods on groundwater fluctuations in a physical model. *Iranian Journal of Geology*, 14(53), 75-86. [In Persian]. <https://doi.org/10.17357/128.1399.14.53.1.8>
- Ramezani Etedali, H and Koohi, S. (2025). Investigating the Impact of Climate Change on Aridity in Iran with Population Exposure Approach. *Journal of Drought and Climate change Research*, 3(1), 17-38. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079>
- Sharifnasab, H. (2022). Evaluating the Use of IOT in Agricultural Irrigation Intelligence (Case Study: Irrigation Grain Maize Farming Intelligence). Final report of research project, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization. [In Persian]
- Sojoodi, Z., Mirzaei, F. and Sojoodi, H. (2019). Application of the Internet of Things in Smart Irrigation. *Water Management in Agriculture*, 5(2), 19-28. [In Persian] <https://doi.org/10.24764/531.1397.5.2.3.8>
- Todorovic, M., Mehmeti, A. & Scardigno, A. (2016). Eco-efficiency of agricultural water systems: Methodological approach and assessment at meso-level scale. *Journal of Environmental Management*, 165 (1), 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.09.011>
- Vallejo-Gómez, D., Osorio, M., & Hincapié, C. A. (2023). Smart irrigation systems in agriculture: A systematic review. *Agronomy*, 13(2), 342. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020342>
- Wang, W., Cui, Y., Luo, Y., Li, Z., & Tan, J. (2019). Web-based decision support system for canal irrigation management. *Computers and Electronics in Agriculture*, (161), 312-321. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.018>
- Yang, Y., Wang, Z., Ma, Y., Wang, Y., Bai, J., & Zhang, R. (2025). Balancing yield and water productivity in wheat: A meta-analysis of irrigation, soil, and climate interactions. *Agricultural Water Management*, 322, 109999. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109999>
- Zanjanizadeh Esfahani, Z. S., Cheraghi Takhteh Choubi, M., & Sharifi Herestani, Z. (2021). A method based on the SCTP-CMT protocol for optimizing water consumption in IoT-based smart agriculture. In *Proceedings of the 6th International Conference on Electrical Engineering, Computer Engineering and Mechanics*. [In Persian]
- Zhang, X., Lin, X., & Luo, Y. (2019). Smart irrigation systems: A review of the latest technologies and their applications. *Agricultural Water Management*, 215, 48–62. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.001>

نسخه پیش از انتشار