

Research Article**Performance Evaluation of a Smart Irrigation System for Efficient Wheat Water Management in the Mashhad Region****Abolghasem Haghayeghi Moghaddam^{1✉}, Majid Keramati², Ardalan Zolfagharan³**

1,3. Assistant professor, Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran

2. Master's degree, Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Mashhad, Iran

(✉ Corresponding Author: sahm51@yahoo.com)

ARTICLE INFO**Received:** 7 April 2025**Revised:** 5 May 2025**Accepted:** 8 July 2025**Available Online:****HOW TO CITE THIS ARTICLE:**

Haghayeghi Moghaddam, A., Keramati, M., & Zolfagharan, A., (2025). Performance evaluation of a Smart Irrigation System for efficient wheat water management in the mashhad region. (In Persian with English abstract). Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research.V.26, No.99, P: 37-54

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.369010.1613>

Introduction

Water, as a vital and limited resource in agriculture, plays a decisive role in crop production. With the growing population and water resource constraints, optimizing water use in agriculture has become a major challenge. The use of modern technologies and real-time meteorological data can improve irrigation management and enhance water productivity. In recent years, efforts have been made to develop irrigation systems based on meteorological data. These systems use information such as temperature, humidity, precipitation, and evapotranspiration to estimate crop water requirements more accurately. However, many of these systems are still in the experimental and developmental stages, requiring field evaluations to assess their performance and efficiency. This study aimed to evaluate an intelligent irrigation planning system for wheat cultivation in the Mashhad region using real-time meteorological data.

Methodology

The study was conducted over two years in the Mashhad region, focusing on wheat cultivation. The irrigation treatments included: (1) irrigation based on real-time meteorological data from the intelligent system, (2) irrigation supplying 80% of the water volume used in the first treatment, and (3) irrigation supplying 120% of the water volume used in the first treatment. Water productivity was calculated based on irrigation volume and effective rainfall. A paired T-test was used to compare the treatments. Data on crop yield, water consumption, and water productivity were collected and analyzed.

Results and Discussion

The results showed that wheat yield in the treatment based on the intelligent system increased compared to the average yield in Mashhad farms. However, this treatment did not show an advantage in reducing water consumption, as it used more water than the regional average. Water productivity in this treatment was also not superior to the average wheat farms in the *region*. The intelligent system

estimated water requirements to be more than double those calculated using data from the Mashhad meteorological station. In terms of usability, the system was simple and user-friendly for experts but required further optimization for farmers with limited technical knowledge.

In the first year, surface irrigation showed that the 80% treatment had a significantly lower yield (4890 kg/ha) compared to the intelligent system (6600 kg/ha). The 120% treatment (6285 kg/ha) did not differ significantly from the intelligent system. In drip irrigation, the 120% treatment had the highest yield (6345 kg/ha), but it was not significantly different from the intelligent system (6170 kg/ha). In the second year, a 60% treatment was added. Surface irrigation showed that the 80% treatment (3550 kg/ha) had a significantly lower yield than the intelligent system (4680 kg/ha), while the 60% treatment (4600 kg/ha) did not differ significantly. The 120% treatment (6000 kg/ha) showed a significant difference compared to the intelligent system.

Water consumption in the first year for surface irrigation was highest in the intelligent system (100% treatment), while the 80% and 120% treatments used 67% and 90% of this volume, respectively. In drip irrigation, the 100% treatment used the most water (4560 m³/ha), while the 80% and 120% treatments used 2840 and 4180 m³/ha, respectively. Water productivity in surface irrigation was highest in the 120% treatment (0.723 kg/m³), while in drip irrigation, the 80% treatment had the highest productivity (1.63 kg/m³).

The intelligent system overestimated water requirements compared to data from the Mashhad meteorological station, primarily due to differences in minimum and maximum temperatures, relative humidity, and sunshine hours. The system's performance was rated as good for maximum temperature, moderate for relative humidity, and poor for minimum temperature and sunshine hours.

Conclusion

The intelligent irrigation scheduling system showed potential for improving wheat yield but did not reduce water consumption or enhance water productivity significantly. The system's overestimation of water requirements highlights the need for algorithmic improvements. While the system was user-friendly for experts, it requires further optimization for farmers with limited technical knowledge. This study serves as a preliminary step toward developing more efficient irrigation systems based on real-time meteorological data.

Keywords: Water productivity, Irrigation scheduling, Real-time meteorological data, Wheat, Mashhad region.



© 2023, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<https://doi.org/10.22092/idsr.2025.369010.1613>

نوع مقاله: پژوهشی

ارزیابی یک سامانه هوشمند آبیاری برای مدیریت آبیاری گندم در منطقه مشهد

سید ابوالقاسم حقایقی مقدم^۱، مجید کرامتی^۲، اردلان ذوالفقاران^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۷

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد سامانه هوشمند «هوشاب» در برنامه‌ریزی آبیاری گندم با استفاده از داده‌های بهنگام هواشناسی، طی دو سال زراعی در منطقه مشهد اجرا شد. تیمارهای آبی شامل: (۱) آبیاری بر اساس توصیه سامانه هوشاب (۱۰۰ درصد)، (۲) آبیاری با ۸۰ درصد و (۳) آبیاری با ۱۲۰ درصد حجم آب محاسبه شده توسط سامانه بودند. پس از برداشت محصول، حجم آب مصرفی، میزان بارش مؤثر، عملکرد گندم و بهره‌وری فیزیکی آب (بر اساس حجم آب آبیاری و مجموع آب آبیاری به همراه بارش مؤثر) اندازه‌گیری شد. داده‌ها با استفاده از آزمون آماری t تحلیل شدند. نتایج تحقیق نشان داد در سامانه آبیاری سطحی، عملکرد گندم در تیمار هوشاب به‌طور معنی‌داری از تیمار کاهش یافته (۸۰ درصد) بیشتر است اما مصرف آب در تیمار هوشاب تا ۴۵۶۰ مترمکعب در هکتار افزایش یافته است که بیش از میانگین استانی است. در آبیاری قطره‌ای، تفاوت آماری معناداری میان تیمارهای ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد مشاهده نشد. بیشترین بهره‌وری آب در آبیاری قطره‌ای و در تیمار ۸۰ درصد به میزان ۱/۶۳ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. برآورد نیاز آبی توسط سامانه هوشاب نیز حدود دو برابر مقدار محاسبه شده با داده‌های ایستگاه هواشناسی مشهد بود. اگرچه استفاده از داده‌های بهنگام سامانه موجب بهبود عملکرد محصول شد، اما بهره‌وری آب به شکل معنادار افزایش نیافت و مصرف آب بیشتر از حد انتظار بود. به‌طور کلی، سامانه هوشاب پتانسیل بالایی در به‌کارگیری داده‌های لحظه‌ای در مدیریت آبیاری دارد، اما برای دستیابی به هدف بهینه‌سازی مصرف آب، نیازمند بازنگری در الگوریتم تخمین نیاز آبی است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری هوشمند، برنامه‌ریزی آبیاری، بهره‌وری آب، گندم

مقدمه

(Abbasi, 1998). در سال‌های اخیر، برای توسعه سامانه‌های

آبیاری مبتنی بر به‌کارگیری داده‌های هواشناسی تلاش‌هایی شده است. این سامانه‌ها با استفاده از اطلاعاتی مانند دما، رطوبت، بارش و تبخیر-تعرق، سعی در برآورد دقیق‌تر نیاز آبی بهنگام گیاهان دارند. با این حال، بسیاری از این سامانه‌ها هنوز در مراحل آزمایشی و توسعه قرار دارند و نیاز به ارزیابی‌های میدانی برای بررسی عملکرد و کارایی آنها وجود دارد.

آب، یکی از منابع حیاتی و محدود در کشاورزی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تولید محصولات زراعی و باغی دارد. با توجه به افزایش جمعیت و محدودیت منابع آبی، بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی به یکی از چالش‌های اصلی تبدیل شده است. در این راستا، استفاده از فناوری‌های نوین و داده‌های بهنگام هواشناسی می‌تواند به بهبود مدیریت آبیاری و افزایش بهره‌وری آب کمک کند (Kiani & ...)

^۱ استادیار پژوهشی بخش فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران. (نویسنده مسئول: Email: sahm51@yahoo.com)

^۲ مربی پژوهشی بخش فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران.

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 (Zhang et al., 2019). مطالعات شخار و همکاران (Shekhar et al., 2015) به طراحی یک سامانه آبیاری هوشمند با بهره‌گیری از اینترنت اشیا و الگوریتم‌های یادگیری ماشین اختصاص دارد. در این مطالعات از انواع حسگرهای محیطی برای جمع‌آوری داده‌های زراعی استفاده و داده‌ها توسط مدل‌های یادگیری ماشین تحلیل شد و به تصمیم‌گیری خودکار در مورد زمان و میزان آبیاری انجامید. این سامانه ضمن کاهش مصرف آب، افزایش عملکرد محصول را نیز نشان می‌دهد.

آیدین و همکاران (Aydin et al., 2015) در مطالعه‌ای به طراحی سامانه آبیاری هوشمند بر پایه هوش مصنوعی و اینترنت اشیا پرداختند. در این سامانه، داده‌های محیطی مانند دما، رطوبت خاک و تابش خورشیدی توسط حسگرها جمع‌آوری و توسط الگوریتم‌های هوشمند تحلیل می‌شود. خروجی این تحلیل‌ها منجر به اجرای برنامه‌های آبیاری دقیق و مبتنی بر نیاز واقعی گیاه شده است. در تحلیل فرایندی توسط والجو و همکاران (Vallejo et al., 2015) سامانه‌های هوشمند آبیاری در کشاورزی به شکلی جامع بررسی شده است. این مقاله با مرور فناوری‌هایی مانند حسگرهای بی‌سیم، سامانه‌های تصمیم‌یار و الگوریتم‌های داده‌کاوی، مزایا و چالش‌های پیاده‌سازی این سیستم‌ها را در مقیاس‌های مختلف بررسی و تأکید می‌کند که بهره‌گیری از این فناوری‌ها می‌تواند مصرف آب را تا حدود ۳۰ درصد کاهش دهد. افزایش کمیت و کیفیت تولید، صرفه‌جویی در مصرف آب و انرژی، صرفه‌جویی در نیروی کارگری، کاهش مصرف کود و سم، افزایش میزان برگشت سرمایه، آبیاری کارآمد و پایداری تولید از جمله مزایای هوشمندسازی آبیاری است. با توجه به وضعیت بحرانی منابع آب کشور و مصرف بیش از ۷۰ درصد منابع آب در بخش کشاورزی (Abbasi & Abbasi, 2020)،

در تحقیقی روش‌های محاسبه نیاز آبی گیاهان مورد بررسی قرار گرفته و روش‌هایی مانند پنمن-مانتیت برای برآورد تبخیر-تعرق گیاهی (ET) معرفی و ارائه شده است. این روش‌ها به عنوان مرجع اصلی در مدیریت آبیاری استفاده می‌شوند. روش پنمن-مانتیت یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای محاسبه ET است که بر اساس داده‌های هواشناسی مانند دما، رطوبت، سرعت باد و تشعشع خورشیدی عمل می‌کند. این روش به طور گسترده‌ای در برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت منابع آب استفاده می‌شود (Allen et al., 1998). در پژوهشی دیگر، روش‌های پیشرفته‌تری برای محاسبه نیاز آبی گیاهان و مدیریت آبیاری ارائه شده است. محققان تأکید کردند که دقت در برآورد نیاز آبی به بهبود بهره‌وری آب منجر می‌شود. محققان روش‌هایی مانند استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های شبیه‌سازی رایانه‌ای را برای بهبود دقت برآورد ET پیشنهاد کردند. این روش‌ها به کشاورزان کمک می‌کنند تا مدیریت آب را به طور مؤثرتری ارتقا بخشند (Jensen and Allen, 2016). محققان دیگر به بررسی مزایا و محدودیت‌های روش‌های مبتنی بر گیاه برای برنامه‌ریزی آبیاری پرداخت. او از اندازه‌گیری شاخص‌های گیاهی (مانند پتانسیل آب برگ و تعرق)، حسگرهای رطوبت خاک و داده‌های هواشناسی استفاده کرد و نتیجه گرفت ترکیب این داده‌ها دقت پیش‌بینی نیاز آبی را افزایش می‌دهد و به بهینه‌سازی مصرف آب کمک می‌کند (Jones, 2004). برخی از محققان کاربرد فناوری اینترنت اشیا (IoT) را در کشاورزی بررسی کردند و نشان دادند که داده‌های بلادرنگ هواشناسی و خاک می‌توانند برای بهبود مدیریت آبیاری استفاده شوند. با استفاده از حسگرهای IoT، کشاورزان می‌توانند شرایط خاک و هوا را به طور مداوم رصد و تصمیمات آبیاری را بر اساس داده‌های واقعی اتخاذ کنند (Liakos et al., 2018). برخی از محققان نتیجه گرفتند که فناوری‌هایی مانند IoT و هوش مصنوعی می‌توانند دقت برآورد نیاز آبی را

را از طریق حسگرهای کار گذاشته شده و پیش‌بینی داده‌های اقلیمی دریافت و بعد از تحلیل بهنگام توسط سامانه هوشمند، اقدام به آبیاری کردند. نتایج تحقیق نشان داد که سامانه هوشمند قادر است در حین آبیاری مقدار آب مورد نیاز گیاه را تشخیص دهد و قطع آبیاری را به کاربر اعلام کند (Navarro-Hellín *et al.*, 2016). نتایج مطالعات در ایتالیا نشان داد که سامانه هوشمند آبیاری مزرعه برنج، اگرچه مصرف آب (۲۰۰۰-۳۷۰۰ میلی‌متر) و عملکرد (۸ تن در هکتار) را بهبود نداد، اما زمان کار کارگران را کاهش داد و بدون نقص مکانیکی عمل کرد. با توجه به قیمت مناسب (۶۳۸-۶۸۹ یورو در هکتار)، این سامانه گزینه مناسبی برای توسعه است (Masseroni *et al.*, 2018). در یک سامانه آبیاری خودکار به منظور استفاده بهینه از آب، از شبکه حسگرهای رطوبت و دمای خاک در عمق توسعه ریشه گیاه بهره‌برداری شد. با استفاده از قابلیت سامانه خودکار در مزرعه مریم‌گلی به مدت ۱۳۶ روز، در مقایسه با آبیاری سنتی رایج منطقه، صرفه‌جویی آب تا ۹۰ درصد به دست آمد (Gutiérrez *et al.*, 2015). نتایج به‌کارگیری یک شبکه از حسگرهای بدون سیم برای اندازه‌گیری رطوبت خاک و تراز آب در مدیریت آبیاری مزرعه برنج در چین نشان داد برنامه‌ریزی آبیاری بر اساس این سامانه می‌تواند، در مقایسه با تیمار آبیاری معمول منطقه، موجب ۶۵/۲ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب شود (Kehui *et al.*, 2010). در تحقیقی دو ساله در عربستان، تاثیر روش برنامه‌ریزی آبیاری خودکار بر عملکرد و بهره‌وری آب گوجه‌فرنگی در سامانه آبیاری قطره زیرسطحی در منطقه بسیار خشک این کشور ارزیابی شد. سه روش برنامه‌ریزی آبیاری شامل (۱) دستگاه کنترلر تبخیر-تعرق^۱ (۲) حسگر رطوبت خاک^۲ و (۳) تیمار شاهد با استفاده از داده‌های هواشناسی، برای تعیین زمان و مقدار آب به‌کارگرفته شد.

استفاده از هوشمندسازی آبیاری می‌تواند یک راه حل مطمئن و مطلوب برای برون رفت از بحران آب و مدیریت مناسب آن باشد. در تحقیقی، نتایج برنامه‌ریزی آبیاری گیاهان با استفاده از ابزارهای مختلف مانند تانسومتر، رطوبت‌سنج و برآورد تبخیر-تعرق در شرایط سامانه آبیاری قطره‌ای نشان داد با استفاده از این ابزارها بین ۲۱ تا ۴۰ درصد در مصرف آب، نسبت به آبیاری معمول، صرفه‌جویی می‌شود و میزان مصرف کود نیز ۳۹ تا ۷۴ درصد کاهش می‌یابد. در این تحقیق، کاهش معنی‌داری در رشد گیاه و کیفیت محصول مشاهده نشد (Incrocci *et al.*, 2014). در منطقه دیاربکر ترکیه از داده‌های هواشناسی بهنگام در برنامه‌ریزی آبیاری پنبه با سه سطح آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی استفاده شد و نتایج نشان داد آبیاری با تامین ۱۰۰ درصد نیاز آبی، بیشترین بهره‌وری آب پنبه (۰/۸۴ کیلوگرم بر مترمکعب) را در پی دارد. برنامه‌ریزی آبیاری بر مبنای تامین ۱۲۵ درصد نیاز آبی، عملکرد پنبه دانه را به میزان ۷ درصد افزایش داد اما مقدار بهره‌وری آب به ۰/۶۸ کیلوگرم بر مترمکعب کاهش یافت. تیمار تامین ۷۵ درصد نیاز آبی به لحاظ بهره‌وری آب تفاوتی با تیمار تامین ۱۰۰ درصد (۰/۸۳ کیلوگرم بر مترمکعب) نداشت اما عملکرد محصول ۳۸ درصد کاهش نشان داد (Çetin *et al.*, 2021). در دو باغ پرتقال در شهرستان فسا در استان فارس کاربرد چند ابزار برنامه‌ریزی آبیاری شامل تانسومتر، دماسنج فروسرخ، رطوبت‌سنج، بلوک گچی و سند ملی آب با تیمار مدیریت سنتی باغدار مقایسه گردید. در این تحقیق مصرف آب نسبت به مدیریت سنتی در دو باغ به ترتیب ۵۶ و ۴۶ درصد کاهش و بهره‌وری آب آبیاری ۱۱۰ و ۵۴ درصد افزایش نشان داد (Shahrokhnia *et al.*, 2015). محققان یک سامانه آبیاری هوشمند و خودکار را معرفی کردند که در باغ مرکبات در اسپانیا به‌کار گرفته شده بود. آنها داده‌های خود

¹Hunter ET controller

² water mark

مدیریت هوشمند و مبتنی بر فناوری‌های دیجیتال است که با هدف بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی، افزایش بهره‌وری آبیاری و کاهش اتلاف منابع آب طراحی شده است. این سامانه با استفاده از داده‌های لحظه‌ای (مانند رطوبت خاک، شرایط اقلیمی و نیاز آبی گیاه) و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، تصمیم‌های دقیقی برای زمانبندی و مقدار آبیاری اتخاذ می‌کند. این تحقیق با هدف ارزیابی سامانه هوشاب در سطوح مختلف تأمین نیاز آبی و در دو روش آبیاری قطره‌ای و سطحی در مزرعه اجرا شده است. از هدف‌های دیگر این تحقیق، تحلیل بهره‌وری فیزیکی آب در روش‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای با استفاده از سامانه هوشاب و بررسی دقت برآورد نیاز آبی توسط این سامانه نسبت به داده‌های استاندارد ایستگاه هواشناسی است.

مواد و روش‌ها

با توجه به شرایط بحرانی آب زیرزمینی در استان خراسان رضوی، دشت بحرانی مشهد-چناران برای اجرای این تحقیق انتخاب شد. پژوهش در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی طرق، واقع در شهرستان مشهد، اجرا گردید. ارتفاع ایستگاه طرق از سطح آب‌های آزاد ۹۹۹ متر است و اقلیم منطقه خشک بیابانی سرد با میانگین بارندگی سالانه ۲۳۵ میلی‌متر، متوسط حداکثر دمای ۲۲/۹ درجه سانتی‌گراد و متوسط حداقل دمای ۹/۷ درجه سانتی‌گراد است. سطح زیر کشت گندم آبی در شهرستان مشهد در سال زراعی ۹۸-۹۹ برابر ۱۲۶۰۴۵ هکتار با میانگین عملکرد ۴۱۹۶ کیلوگرم در هکتار بود. قطعه‌ای به مساحت حدود نیم هکتار برای ارزیابی سامانه هوشمند برنامه‌ریزی آبیاری با نام تجاری سامانه هوشاب انتخاب شد. عملیات آماده‌سازی زمین برای کشت گندم در آبان‌ماه شامل شخم‌زدن، دیسک‌زدن و و تسطیح به اجرا در آمد. کودهای اصلی (نیترژن، فسفر و پتاسیم) بر اساس توصیه کارشناسی قبل از کاشت توسط دستگاه سانتریفوژ در زمین پخش و با عملیات دیسک‌زنی با خاک مخلوط شدند. در این

نتایج تحقیق نشان داد استفاده از تیمار کنترل‌کننده ET در مقایسه با دو روش حسگر رطوبت و شاهد، به ترتیب مقدار آب آبیاری را ۵/۸ و ۲۰/۸ درصد صرفه‌جویی کرد. استفاده از کنترلر ET، نسبت به حسگر رطوبت و تیمار شاهد به ترتیب ۷/۹ و ۱۱/۳ درصد افزایش عملکرد گوجه‌فرنگی را موجب شد (Al-Ghobari, 2014). برنامه‌ریزی آبیاری، تصمیم‌گیری در مورد زمان و میزان مصرف آب در مزرعه است و بنابراین تأثیر مستقیم بر بهره‌وری مصرف آب دارد (Bwambale et al., 2022). نتایج بررسی منابع نشان می‌دهد که در مجموع استفاده از روش‌ها و ابزارهای برنامه‌ریزی آبیاری در اغلب موارد می‌تواند در مقایسه با روش‌های سنتی آبیاری، باعث کاهش مصرف آب یا افزایش بهره‌وری آب شود؛ اما لازم است کاربرد این ابزار و روش‌ها در سطح مزارع و باغ‌ها با تحقیقات بیشتر در محصولات و مناطق مختلف توسعه باید و در شرایط واقعی آزمایش شود. با وجود توسعه سامانه‌های هوشمند آبیاری مبتنی بر داده‌های هواشناسی و فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، هنوز فاصله قابل توجهی میان عملکرد این سامانه‌ها در شرایط آزمایشگاهی و کارایی واقعی آنها در مزرعه وجود دارد. بیشتر پژوهش‌های پیشین یا در محیط‌های کنترل‌شده بوده‌اند یا تمرکز آن‌ها صرفاً بر عملکرد الگوریتم‌های پیش‌بینی نیاز آبی بوده است، بی‌آنکه به‌طور جامع تأثیر این سامانه‌ها بر عملکرد زراعی، مصرف آب و بهره‌وری آب در شرایط واقعی مزرعه بررسی شود. از سوی دیگر، بسیاری از این سامانه‌ها در کشورهای توسعه‌یافته طراحی شده‌اند و کارایی آن‌ها در شرایط اقلیمی و مدیریتی ایران، به‌ویژه در منطقه نیمه‌خشک مانند مشهد، به‌خوبی ارزیابی نشده است. از این رو سامانه «هوشاب» به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌یار ایرانی برای مدیریت آبیاری با استفاده از داده‌های هواشناسی به‌نگام توسعه یافته است، اما تاکنون بررسی علمی و میدانی دقیقی در مورد دقت پیش‌بینی آن صورت نگرفته است. سامانه هوشاب سامانه

توسط سامانه هوشاب. در سال دوم، برای بررسی اثر سطوح شدید کم آبیاری، یک تیمار اضافی نیز در نظر گرفته شد: ۴- آبیاری بر اساس ۶۰ درصد نیاز آبی تعیین شده توسط سامانه هوشاب.

این تیمارها با دو روش آبیاری سطحی (جویچه‌ای) و قطره‌ای (تیپ) اجرا شدند. کرت‌های هر تیمار به عرض ۱۶ متر (۲۶ ردیف کشت) و طول ۸۰ متر در نظر گرفته شدند. در سال دوم اجرای پروژه، عرض هر کرت به ۱۰ متر (۱۶ ردیف کشت) با همان طول ۸۰ متر کاهش یافت.

برای محاسبه نیاز آبی، از اطلاعات بهنگام هواشناسی ایستگاه مستقر در قطعه آزمایشی استفاده شد. این ایستگاه پارامترهای سرعت باد در ارتفاع دومتری سطح زمین، دمای حداقل و حداکثر روزانه، رطوبت نسبی و مقدار بارش را اندازه‌گیری و ثبت می‌کرد و داده‌ها را از طریق اینترنت به سرور مستقر در سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی می‌فرستاد شکل (۱).

راستا، ۵۰ کیلوگرم کود اوره، ۱۵۰ کیلوگرم پتاس (در سال دوم ۵۰ کیلوگرم پتاس) و ۲۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات (در سال دوم ۱۵۰ کیلوگرم سوپرفسفات) استفاده شد. نوع و مقدار بذر مورد استفاده بر اساس نظر کارشناس زراعی پروژه، رقم سیروان (در سال دوم رقم حیدری) تعیین گردید. میزان بذر مصرفی ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار بود که با ماشین کارنده خطی کار همدانی با فاصله ردیف ۶۰ سانتی‌متر (چهار ردیف با فاصله ۱۲ سانتی‌متر روی پشته) در تاریخ‌های ۲۶ آبان ۱۳۹۸ و ۲۱ آبان ۱۳۹۹ کشت شد. تیمارهای طرح آزمایشی اجرا شده شامل روش آبیاری در دو سطح: ۱- آبیاری سطحی، ۲- آبیاری قطره‌ای و سطوح مختلف تأمین نیاز آبی گیاه گندم بر اساس خروجی سامانه هوشاب در سال اول شامل سه سطح: ۱- آبیاری بر اساس ۸۰ درصد نیاز آبی تعیین شده توسط سامانه هوشاب. ۲- آبیاری بر اساس ۱۰۰ درصد نیاز آبی تعیین شده توسط سامانه هوشاب. ۳- آبیاری بر اساس ۱۲۰ درصد نیاز آبی تعیین شده



شکل ۱- ایستگاه هواشناسی برای جمع‌آوری داده‌های بهنگام هواشناسی

Fig. 1- The meteorological station used for collecting real-time meteorological data

ایستگاه طرق، با استفاده از یک برنامه رایانه‌ای کاربردی (اپلیکیشن) و پایگاه داده شرکت سازنده (شرکت فناور آوند میراب) در دسترس مجریان تحقیق قرار گرفت. پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل این موارد بود: تعیین بافت و جرم

داده‌های هواشناسی پس از تجزیه و تحلیل و محاسبه نیاز آبی با روش پنمن-مانتیت و قرار گرفتن در بیلان آبی محتوای خاک مزرعه، به برنامه آبیاری (دور و عمق آبیاری) تبدیل شدند. برنامه آبیاری گندم برای قطعه هوشاب در

داده‌های بهنگام ایستگاه مستقر در قطعه آزمایشی مقایسه شد.

ارزیابی آماری

با استفاده از چند شاخص آماری، اعتبار و دقت فایل‌های خروجی نرم‌افزار سامانه هوشمند برنامه‌ریزی آبیاری با داده‌های اندازه‌گیری‌شده عملکرد از مزرعه مقایسه شد. شاخص‌های آماری مورد استفاده شامل ضریب تبیین^۲ (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا^۳ (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده^۴ (NRMSE)، ضریب کارایی نش‌سات‌کلیف^۵ (EF) و شاخص توافق ویلموت^۶ (d) بودند. مقادیر NRMSE کمتر از ۱۰ به عنوان عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ متوسط و بیشتر از ۳۰ ضعیف ارزیابی شدند (Moriassi et al., 2010).

محاسبه بهره‌وری فیزیکی آب

پس از برداشت محصول و مشخص شدن حجم آب مصرفی و میزان بارش در دوره رشد گیاه، بهره‌وری فیزیکی آب از دو روش (بر مبنای حجم آب مصرفی و حجم آب به علاوه بارش مؤثر) محاسبه شد. برای محاسبه باران مؤثر، از روش سرویس حفاظت خاک آمریکا (SCS) استفاده شد که برای مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب است (Khaleghi, 2015).

نتایج و بحث

عملکرد دانه گندم

عملکرد دانه گندم در روش‌های آبیاری سطحی و قطره‌ای در تیمارهای مختلف تحقیق با آزمون تی جفت شده طی دو سال تحقیق با هم مقایسه شدند و نتایج در جدول (۱) ارائه شده است. در سال اول تحقیق، در روش

مخصوص ظاهری خاک، تعیین شوری عصارة اشباع خاک و آب آبیاری، گردآوری اطلاعات هواشناسی و محاسبه بهنگام نیاز آبی گندم، تعیین دبی ورودی به جویچه‌های آبیاری و دبی خروجی قطره‌چکان‌ها، تعیین رطوبت خاک به روش وزنی قبل و بعد از تعدادی از نوبت‌های آبیاری.

برای تعیین وزن دانه و عملکرد زیست‌توده در هر تیمار، ۱۰ نمونه در ابعاد یک مترمربع از تیمارها به صورت دستی جمع‌آوری و وزن شدند. نمونه‌ها به طور جداگانه با کمباین آزمایشی غلات پردازش شدند و کاه از دانه تفکیک گردید. دانه‌های گندم هر تیمار در کیسه‌های کتان جمع‌آوری و در محل مزرعه با ترازوی با دقت ۰/۱ گرم وزن شدند.

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد. برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون t مستقل استفاده شد. به منظور بررسی اثر سال، داده‌های مربوط به دو سال به صورت جداگانه تحلیل شدند و برای مقایسه عملکرد تیمارها در سال‌های مختلف از آزمون t زوجی استفاده گردید. در تمامی تحلیل‌ها، سطح احتمال ۵ درصد به عنوان سطح معنی‌داری در نظر گرفته شد. بهره‌وری آب آبیاری بر حسب کیلو گرم به‌ازای هر مترمکعب آب از نسبت عملکرد گندم (کیلوگرم بر هکتار) به مجموع آب مصرفی (آبیاری + بارندگی مؤثر) (مترمکعب بر هکتار) محاسبه شد.

صحت‌سنجی داده‌های سامانه هوشمند برنامه‌ریزی آبیاری

برای صحت‌سنجی داده‌های سامانه هوشمند برنامه‌ریزی آبیاری، نیاز آبی گیاه با استفاده از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی منطقه (ایستگاه سینوپتیک فرودگاه مشهد) در دوره رشد گندم و با استفاده از نرم‌افزار ET_o Calculator (نسخه ۳/۲) (FAO, 2012) محاسبه و با

⁴ Normalized Root Mean Square Error

⁵ Nash-Sutcliffe Efficiency

⁶ Willmott's index of agreement

¹ Paired t-test

² Coefficient of determination

³ Root Mean Square Error

آبیاری سطحی میانگین عملکرد دانه در تیمار آبیاری ۸۰ درصد با ۴۸۹۰ کیلوگرم در هکتار نسبت به تیمار سامانه هوشمند با مقدار ۶۶۰۰ کیلوگرم در هکتار کمتر و این کاهش از نظر آماری معنی‌دار است؛ اما مقدار عملکرد دانه در تیمار آبیاری ۱۲۰ درصد با ۶۲۸۵ کیلوگرم بر هکتار تفاوت معنی‌دار با مقدار تیمار سامانه هوشمند ندارد. در روش آبیاری قطره‌ای، تیمار آبیاری ۱۲۰ درصد بیشترین عملکرد دانه در تیمار آبیاری ۸۰ درصد با مقدار ۶۳۴۵ کیلوگرم در هکتار داشته است اما از لحاظ آماری با مقدار عملکرد دانه در تیمار سامانه هوشمند (برابر با ۶۱۷۰ کیلوگرم بر هکتار) اختلاف معنی‌داری ندارد. بین عملکرد دانه در تیمار آبیاری ۸۰ درصد (۴۶۲۰ کیلوگرم بر هکتار) با تیمار سامانه هوشمند اختلاف معنی‌دار وجود دارد.

جدول ۱- آزمون T جفتی برای عملکرد دانه گندم در تیمارهای مختلف آبیاری سطحی و قطره‌ای

Table 1- Paired T-test for grain yield of wheat under different surface and drip irrigation treatments

روش آبیاری سطحی		روش آبیاری قطره‌ای		تیمار آبیاری Irrigation Treatment	متغیر Variable
Surface Irrigation Method		Drip Irrigation Method			
مقدار P P-value	میانگین Mean	مقدار P P-value	میانگین Mean		
۰/۰۰۳	۴۶۲۰	۰/۰۰۱	۴۸۹۰	تیمار ۸۰٪	عملکرد دانه در سال اول (کیلوگرم بر هکتار)
	۶۱۷۰		۶۶۰۰	سامانه هوشمند	
۰/۳۵۷	۶۳۴۵	۰/۱۴۹	۶۲۸۵	تیمار ۱۲۰٪	
	۶۱۷۰		۶۶۰۰	سامانه هوشمند	
۰/۱۶۱	۵۲۶۰	۰/۸۲۰	۴۶۰۰	تیمار ۶۰٪	عملکرد دانه در سال دوم (کیلوگرم بر هکتار)
	۴۶۷۰		۴۶۸۰	سامانه هوشمند	
۰/۱۹۳	۴۰۹۰	۰/۰۰۱	۳۵۵۰	تیمار ۸۰٪	
	۴۶۷۰		۴۶۸۰	سامانه هوشمند	
۰/۲۹۵	۵۰۲۵	۰/۰۰۴	۶۰۰۰	تیمار ۱۲۰٪	
	۴۶۷۰		۴۶۸۰	سامانه هوشمند	

کاهش از نظر آماری معنی‌دار است. مقدار عملکرد دانه در تیمار آبیاری ۶۰ درصد برابر ۴۶۰۰ کیلوگرم بر هکتار است که تفاوت معنی‌دار با مقدار تیمار سامانه هوشمند ندارد. در تیمار آبیاری ۱۲۰ درصد عملکرد دانه به میزان ۶۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار اختلاف معنی‌دار با تیمار سامانه هوشمند دارد. در روش آبیاری قطره‌ای، عملکرد دانه در تیمار آبیاری قطره‌ای ۶۰ درصد برابر با ۵۲۶۰ کیلوگرم در هکتار و در تیمار سامانه هوشمند برابر ۴۶۷۰ کیلوگرم در هکتار است

در سال دوم اجرای تحقیق، علاوه بر تیمارهای آبیاری تامین ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی، تیمار آبیاری تامین ۶۰ درصد نیاز آبی نیز به اجرا درآمد. در تیمار ۶۰ درصد دیدگاه‌های کارشناسی و عرف منطقه نیز مدنظر قرار گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان داد در روش آبیاری سطحی، میانگین عملکرد دانه در تیمار آبیاری ۸۰ درصد با ۳۵۵۰ کیلوگرم بر هکتار نسبت به میانگین عملکرد دانه در تیمار سامانه هوشمند با مقدار ۴۶۸۰ کیلوگرم بر هکتار کمتر است و این

که از نظر آماری بین این دو تیمار تفاوت معنی‌دار وجود ندارد. در تیمار آبیاری ۸۰ درصد عملکرد دانه برابر ۴۰۹۰ و در تیمار ۱۲۰ درصد برابر با ۵۰۲۵ کیلوگرم در هکتار بوده است، اما بین این تیمارها نیز از لحاظ آماری با تیمار سامانه هوشمند تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که آبیاری قطره‌ای عملکرد گندم را نسبت به آبیاری سطحی افزایش می‌دهد. این یافته با نتایج مطالعات ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2019) همسوست که گزارش کردند آبیاری قطره‌ای عملکرد گندم را تا ۲۰ درصد افزایش می‌دهد. سطوح کمتر آبیاری (مانند ۸۰ درصد) می‌تواند عملکرد گندم را کاهش دهد، اما این کاهش در روش‌های کارآمدتر آبیاری کمتر است که این موضوع توسط زوارت و باستینسن (Zwart & Bastiaanssen, 2004) تأیید شده است. استفاده از سامانه‌های پیشنهادی مبتنی بر داده‌های هواشناسی نیز می‌تواند عملکرد گندم را افزایش دهد. این یافته با یافته مطالعات اسمیت و همکاران (Smith et al., 2010) همخوانی دارد. برخی مطالعات مانند مطالعات کیچنه و همکاران (Kijne et al., 2003) نشان داده‌اند که در شرایط خاص، تفاوت معنی‌داری در عملکرد گندم بین سطوح مختلف آبیاری وجود ندارد. در مناطق بسیار خشک، آبیاری قطره‌ای ممکن است مزیت چندانی نداشته باشد (Evans & Sadler, 2008) و سطوح بسیار کم آبیاری (مانند ۶۰ درصد) می‌تواند عملکرد گندم را به طور معنی‌داری کاهش دهد (Raes., 2011).

تعیین حجم آبیاری

مقدار آب آبیاری در تیمارهای مختلف تحقیق در جدول (۲) ارائه شده است. در سال اول تحقیق، در روش آبیاری سطحی تیمار ۱۰۰ درصد مطابق با برنامه سامانه هوشمند بر اساس داده‌های بهنگام هواشناسی آبیاری شده است. مقدار آبیاری در تیمارهای ۸۰ و ۱۲۰ درصد در هر نوبت (به غیر از خاکاب) به اندازه ۲۰ درصد کمتر و بیشتر از تیمار

۱۰۰ درصد است. در تیمارهای ۸۰ و ۱۲۰ درصد در تاریخ ۹ دی ۱۳۹۸ بنا به تشخیص مجری و همکار زراعی پروژه به دلیل رطوبت پایین خاک عملیات آبیاری صورت گرفت و در تاریخ ۱۶ اردیبهشت و ۲۳ خرداد سال ۱۳۹۹ به دلیل رطوبت مناسب خاک آبیاری انجام نشد. به همین دلیل مقدار آب آبیاری در تیمارهای ۸۰ و ۱۲۰ درصد در عمل معادل ۶۷ و ۹۰ درصد تیمار سامانه هوشمند (۱۰۰ درصد) شده است. در روش آبیاری قطره‌ای، آبیاری تاریخ ۸ دی ۱۳۹۸ با توجه به نظر کارشناس همکار زراعی پروژه و کمبود رطوبت خاک برای تیمارهای ۸۰ درصد و ۱۲۰ درصد به اجرا در آمد اما برای تیمار هوشمند این آبیاری پیش بینی نشده بود و اعمال نگردید. آبیاری تاریخ ۲۲ خرداد ۱۳۹۹ که توسط سامانه هوشمند اعلام گردیده بود، فقط برای تیمار سامانه هوشمند اعمال گردید اما با نظر کارشناس زراعی پروژه مبنی بر رسیدگی محصول، این آبیاری برای تیمارهای ۸۰ و ۱۲۰ درصد صورت نپذیرفت. بدین ترتیب تیمار ۱۰۰ درصد بیشترین مقدار آب مصرفی را معادل ۴۵۶۰ مترمکعب در هکتار داشته است. تیمارهای آبیاری ۸۰ و ۱۲۰ درصد به ترتیب ۲۸۴۰ و ۴۱۸۰ مترمکعب در هکتار معادل ۶۲ و ۹۲ درصد میزان آبیاری تیمار هوشمند آبیاری شدند.

در سال دوم تحقیق، در روش آبیاری سطحی تیمار ۱۰۰ درصد مطابق با برنامه سامانه هوشمند براساس داده‌های بهنگام هواشناسی آبیاری شده است. مقدار آبیاری در تیمارهای ۶۰ و ۸۰ درصد در هر نوبت (به غیر از خاکاب) به اندازه ۴۰ و ۲۰ درصد کمتر و در تیمار ۱۲۰ درصد، به اندازه ۲۰ درصد بیشتر از تیمار سامانه هوشمند بوده است. در تیمار ۶۰ درصد در تاریخ ۲۴ دی ۱۳۹۹ بنا به تشخیص مجری و همکار زراعی پروژه، به دلیل رطوبت پایین خاک آبیاری اجرا شد. در روش آبیاری قطره‌ای، در تاریخ ۲۴ دی ۱۳۹۹ یک نوبت آب برای تیمار ۶۰ درصد با توجه به شرایط خاک و نظر کارشناس زراعی به اجرا درآمد اما برای دیگر تیمارها اعمال نگردید.

جدول ۲- مقادیر آب آبیاری مورد استفاده در تیمارهای مختلف

Table 2- Irrigation water amounts used in different treatments

روش آبیاری قطره‌ای Drip Irrigation Method		روش آبیاری سطحی Surface Irrigation Method		تیمار آبیاری Irrigation Treatment	متغیر Variable
میانگین Mean	تعداد Number	میانگین Mean	تعداد Number		
۲۸۴۰	۵	۵۱۴۰	۵	تیمار ۸۰٪	حجم آب آبیاری
۴۵۶۰	۶	۷۶۷۰	۶	سامانه هوشمند	سال اول
۴۱۸۰	۵	۶۹۲۰	۵	تیمار ۱۲۰٪	(مترمکعب در هکتار)
۷۲۶۰	۱۰	۵۹۱۰	۱۱	تیمار ۶۰٪	حجم آب آبیاری
۶۰۷۰	۹	۷۷۳۰	۱۰	تیمار ۸۰٪	سال دوم
۷۵۶۰	۹	۹۹۵۰	۱۰	سامانه هوشمند	(مترمکعب در هکتار)
۹۰۸۰	۹	۱۱۵۹۰	۱۰	تیمار ۱۲۰٪	

بهره‌وری آب

بهره‌وری آب آبیاری بین تیمار ۸۰ و ۱۰۰ درصد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد مشاهده شد اما بین تیمارهای ۱۲۰ و ۱۰۰ درصد اختلاف معنی‌دار وجود ندارد. بهره‌وری آب کاربردی در روش قطره‌ای بین هیچ یک از تیمارها اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. مقادیر بهره‌وری آب کاربردی برابر با ۱، ۰/۹۷۳ و ۱/۰۶۴ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب به‌ترتیب برای تیمارهای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد به دست آمده است.

در سال دوم تحقیق، مقدار بارش ۷۷ میلی‌متر و میزان باران موثر در دوره رشد در این سال ۵۶ میلی‌متر محاسبه شد. در روش آبیاری سطحی در این سال، مطابق جدول (۳) بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب کاربردی (آب آبیاری + باران موثر) در بین تیمارهای ۶۰ و ۱۰۰ درصد آبیاری تفاوت معنی‌داری دیده می‌شود اما تفاوت بین تیمارهای ۸۰ و ۱۲۰ درصد با تیمار ۱۰۰ درصد معنی‌دار نیست. بهره‌وری آب آبیاری در تیمار آبیاری ۶۰ درصد با ۰/۷۸ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب بیشترین مقدار را در بین تیمارها دارد.

بهره‌وری آب بر مبنای آب آبیاری و بر مبنای آب آبیاری به اضافه باران موثر محاسبه و در جدول (۳) نشان داده شده است. در سال اول تحقیق، مقدار بارش ۲۷۵ میلی‌متر و میزان باران موثر در دوره رشد در این سال ۱۷۸ میلی‌متر محاسبه شد. در سال اول تحقیق، در روش آبیاری سطحی بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب کاربردی (آب آبیاری + باران موثر) در بین تیمارهای مختلف آبیاری تفاوت معنی‌داری ندارد. بهره‌وری آب آبیاری در تیمارهای ۸۰، ۱۲۰ و ۱۰۰ درصد به‌ترتیب ۰/۹۵، ۰/۹۱ و ۰/۸۶ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب محاسبه شده است؛ اما بهره‌وری آب کاربردی در تیمار آبیاری ۱۲۰ درصد با ۰/۷۲۳ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب بیشترین مقدار است و بعد از آن تیمارهای ۸۰ و ۱۰۰ درصد به ترتیب با ۰/۷۰۷ و ۰/۶۹۹ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب قرار دارند. در روش آبیاری قطره‌ای، بهره‌وری آب آبیاری برای تیمارهای ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد به‌ترتیب ۰/۶۳، ۱/۳۵ و ۱/۵۲ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب به دست آمد. در مقایسه آماری، مقادیر

جدول ۳- آزمون T جفتی برای بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) در تیمارهای مختلف

Table 3- Paired T-test for water productivity (kg per cubic meter) under different treatments

روش آبیاری قطره‌ای Drip Irrigation Method		روش آبیاری سطحی Surface Irrigation Method		تیمار آبیاری Surface Irrigation Method	سال Year	شاخص Index
مقدار P P-value	میانگین Mean	مقدار P P-value	میانگین Mean			
۰/۰۳۶	۱/۶۳	۰/۱۳۱	۰/۹۵	تیمار ۸۰٪	اول	بهره‌وری آب آبیاری (WP _{ir})
	۱/۳۵		۰/۸۶	سامانه هوشمند		
۰/۰۷۷	۱/۵۲	۰/۰۹۸	۰/۹۱	تیمار ۱۲۰٪		
	۱/۳۵		۰/۸۶	سامانه هوشمند		
۰/۰۹۶	۰/۷۲	۰/۰۰۰	۰/۷۸	تیمار ۶۰٪		
	۰/۶۲		۰/۴۷	سامانه هوشمند		
۰/۲۸۸	۰/۶۷	۰/۶۶۵	۰/۴۶	تیمار ۸۰٪	دوم	
	۰/۶۲		۰/۴۷	سامانه هوشمند		
۰/۲۱۶	۰/۵۵	۰/۱۶۴	۰/۵۲	تیمار ۱۲۰٪		
	۰/۶۲		۰/۴۷	سامانه هوشمند		
۰/۳۸۱	۱	۰/۸۴۵	۰/۷۰۷	تیمار ۸۰٪		اول
	۰/۹۷۳		۰/۶۹۹	سامانه هوشمند		
۰/۱۲۷	۱/۰۶۴	۰/۲۸۱	۰/۷۲۳	تیمار ۱۲۰٪		
	۰/۹۷۳		۰/۶۹۹	سامانه هوشمند		
۰/۱۰۰	۰/۶۷۳	۰/۰۰۰	۰/۷۱۱	تیمار ۶۰٪	دوم	
	۰/۵۷۵		۰/۴۴۵	سامانه هوشمند		
۰/۳۲۵	۰/۶۱۷	۰/۴۸۶	۰/۴۲۸	تیمار ۸۰٪		
	۰/۵۷۵		۰/۴۴۵	سامانه هوشمند		
۰/۲۴۰	۰/۵۲۱	۰/۱۳۶	۰/۴۹۴	تیمار ۱۲۰٪		
	۰/۵۷۵		۰/۴۴۵	سامانه هوشمند		

در مقایسه آماری مقادیر بهره‌وری آب آبیاری بین هیچ یک از تیمارها با تیمار سامانه هوشمند اختلاف معنی‌دار وجود ندارد. مقادیر به دست آمده بهره‌وری آب کاربردی برابر با ۰/۶۷۳، ۰/۵۷۵، ۰/۵۲۱ و ۰/۵۷۵ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب به‌ترتیب برای تیمارهای ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد به دست آمد. در مقایسه بهره‌وری آب کاربردی نیز بین تیمارهای سطح آبیاری با تیمار سامانه هوشمند اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد.

بهره‌وری آب آبیاری در تیمارهای آبیاری ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد به ترتیب برابر ۰/۴۶، ۰/۴۷ و ۰/۵۲ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب محاسبه شده است. بهره‌وری آب کاربردی در تیمار آبیاری ۶۰ درصد با ۰/۷۱ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب بیشترین مقدار و در تیمار ۸۰ درصد با ۰/۴۳ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب کمترین مقدار را است. در روش آبیاری قطره‌ای، بهره‌وری آب آبیاری برای تیمار آبیاری ۶۰ تا ۱۲۰ درصد به‌ترتیب برابر ۰/۷۲، ۰/۶۷، ۰/۶۲ و ۰/۵۵ کیلوگرم به‌ازای هر مترمکعب آب حاصل شد.

معنی داری در بهره‌وری آب بین سطوح مختلف آبیاری وجود ندارد.

نیاز آبی گیاه گندم

نیاز آبی گندم محاسبه شده با روش پنمن مانیتیت بر اساس داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل اجرای تحقیق (ایستگاه سینوپتیک فرودگاه مشهد) و براساس میزان تبخیر طشت همان ایستگاه، در جدول (۴) آورده شده و با اعداد نیاز آبی ارائه شده توسط سامانه هوشمند (هوشاب) مقایسه شده است. جدول (۴) نشان می‌دهد بین نیاز آبی برآورد شده در سند ملی آب و داده‌های ایستگاه فرودگاه مشهد اختلاف ناچیز است اما سامانه هوشاب، نیاز آبی گندم را در همان بازه زمانی در حدود دو برابر برآورد کرده است.

نتایج بررسی‌ها نشان داد که آبیاری قطره‌ای نسبت به آبیاری سطحی بهره‌وری آب را به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد. این یافته با یافته‌های اسمیت و همکاران (Smith et al., 2010) همسوست که گزارش کردند آبیاری قطره‌ای می‌تواند بهره‌وری آب را تا ۵۰ درصد افزایش دهد. سطوح کمتر آبیاری (مانند ۸۰ درصد) می‌تواند بهره‌وری آب را بهبود بخشد، به شرطی که عملکرد محصول کاهش نیابد که این موضوع توسط زوارت و باستینسن (Zwart & Bastiaanssen, 2004) نیز تأیید شده است. علاوه بر این، باران موثر می‌تواند بهره‌وری آب را افزایش دهد، به ویژه در مناطق با بارش متوسط که این یافته با مطالعات راس و همکاران (Raes et al., 2011) همخوانی دارد. با این حال، برخی مطالعات مانند مطالعات کیجنه و همکاران (Kijne et al., 2003) نشان داده‌اند که در شرایط خاص تفاوت

جدول ۴- مقایسه تبخیر و تعرق گیاه گندم در منطقه مشهد (میلی‌متر) در دوره رشد

Table 4- Comparison of wheat crop evapotranspiration in Mashhad region (in millimeters) during the growing season

ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند Intelligent System Meteorological Station		ایستگاه هواشناسی فرودگاه مشهد Mashhad Airport Meteorological Station		طشت تبخیر Evaporation Pan	سند ملی آب National Water Document
سال دوم Second Year	سال اول First Year	سال دوم Second Year	سال اول First Year		
۵۲۳	۶۵۴	۲۶۰	۳۰۱	۵۳۲	۳۱۳

است. به طوری که قدرمطلق اختلاف دمای حداقل روزانه بین ایستگاه مشهد و ایستگاه سامانه هوشمند ۵/۵ درجه سانتی‌گراد و برای دمای حداکثر روزانه ۲ درجه سانتی‌گراد است؛ بنابراین یکی از دلایل تبخیر- تعرق زیاد برآورد شده حاصل از داده‌های ایستگاه هوشمند را می‌توان برآورد بیشتر دما به‌ویژه دمای حداقل ذکر کرد. مقایسه رطوبت نسبی حداقل و حداکثر به‌دست آمده از ایستگاه مشهد با آنچه از ایستگاه سامانه هوشمند به‌دست آمده است نیز نشان

به منظور واکاوی دلیل اختلاف زیاد تبخیر- تعرق گندم برآورد شده از داده‌های ایستگاه هواشناسی مشهد با آنچه از ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند آبیاری به دست آمده است، به مقایسه داده‌های ورودی این دو منبع پرداخته شد. در سال اول تحقیق، داده‌های ایستگاه مشهد و داده‌های ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند از نظر دمای حداقل و حداکثر مقایسه و مشخص گردید که اختلاف بین دماهای روزانه حداقل بیشتر از اختلاف بین دماهای روزانه حداکثر

می‌دهد قدرمطلق اختلاف به ترتیب ۶/۷ و ۱۶/۸ درصد است. در هر دو پارامتر رطوبت نسبی، اعداد به دست آمده از ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند کمتر از داده‌های ایستگاه هواشناسی مشهد هستند. ورود داده‌های رطوبت نسبی کمتر، موجب شده تا بیش برآورد تبخیر- تعرق گندم براساس داده‌های ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند آبیاری باشد. در مورد ساعت آفتابی نیز همین مقایسه نشان می‌دهد در اینجا اختلاف بیشتر است و قدرمطلق اختلاف در ساعت آفتابی ۷/۷ ساعت است.

نتایج مقایسه داده‌های ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند آبیاری با داده‌های ایستگاه هواشناسی مشهد با پنج شاخص آماری نشان می‌دهد که عملکرد ایستگاه سامانه

هوشمند نسبت به ایستگاه سینوپتیک مشهد از نمره خوب (برای دمای حداکثر) تا ضعیف (دمای حداقل و ساعت آفتابی) ارزیابی می‌شود جدول (۵). مقادیر محاسبه شده برای NRMSE به ترتیب از ۱۶/۶ درصد برای دمای حداکثر تا ۱۱۲/۴ درصد برای ساعت آفتابی تغییر میکند. مقدار ضریب تبیین برای کلیه تیمارها بیش از ۰/۶۷ و قابل قبول به دست آمد. در مجموع می‌توان گفت حسگرهای ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند آبیاری داده‌های دمای حداکثر را با درجه خوب، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر را با درجه متوسط و داده‌های دمای حداقل و ساعت آفتابی را با درجه ضعیف ثبت و گزارش کرده‌اند.

جدول ۵- شاخص‌های آماری ارزیابی مقایسه داده‌های ایستگاه هواشناسی سامانه هوشمند با داده‌های ایستگاه هواشناسی مشهد

Table 5- Statistical evaluation indices for comparing data from the intelligent system with data from Mashhad meteorological station

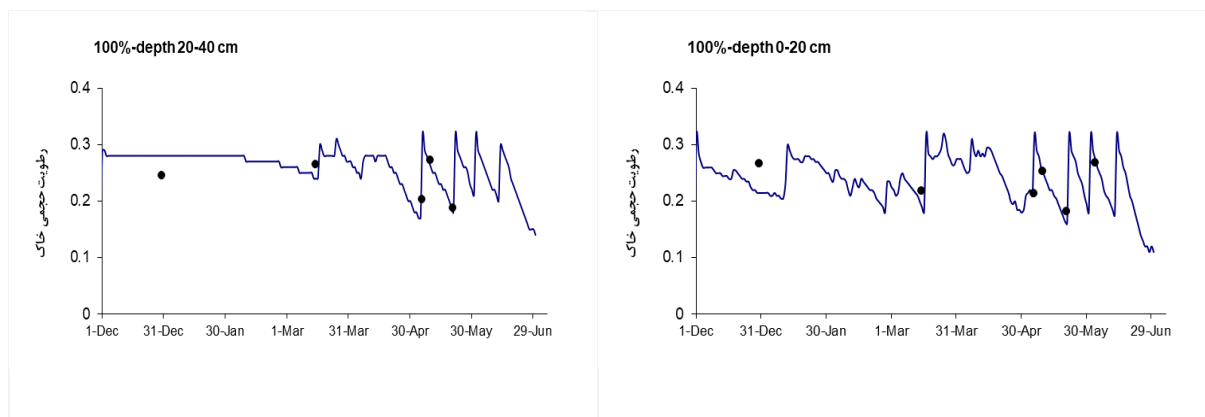
شاخص آماری					تیمار
Statistical Index					Treatment
d	EF	NRMSE	RMSE	R ²	
۰/۸۷۶	۰/۳۴۸	۷۴/۳	۶/۰۲	۰/۹۲۸	دمای حداقل
۰/۹۶۹	۰/۸۷۹	۱۶/۶	۳/۴۰	۰/۸۹۶	دمای حداکثر
۰/۹۵۳	۰/۸۴۷	۲۳/۸	۹/۷۱	۰/۹۱۱	رطوبت حداقل
۰/۸۳۸	۰/۳۸۹	۲۹/۶	۲۰/۱	۰/۷۵۳	رطوبت حداکثر
۰/۳۸۰	-۲/۷۱۴	۱۱۲/۴	۸/۶۸	۰/۶۷۴	ساعت آفتابی

رطوبت خاک

داده‌های شبیه‌سازی رطوبت خاک توسط مدل سامانه هوشمند ناچیز به نظر می‌رسد، شبیه‌سازی بر اساس بیلان رطوبت در خاک توسط سامانه صورت می‌گیرد.

نتایج صحت‌سنجی داده‌های شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار سامانه هوشمند با داده‌های اندازه‌گیری شده از مزرعه برای سال اول در روش آبیاری سطحی در جدول (۶) نشان داده شده است.

رطوبت خاک در دوره آبیاری در دو عمق ۲۰-۰ و ۴۰-۲۰ سانتی‌متر با روش نمونه‌گیری با مته و خشک کردن در آون اندازه‌گیری شد. برای نمونه، در شکل (۲)، نتایج رطوبت‌سنجی خاک در دو عمق ۲۰-۰ و ۴۰-۲۰ سانتی‌متر در تیمار سامانه هوشمند در سال اول تحقیق در روش آبیاری سطحی نشان داده شده است. مطابق شکل (۲)، اختلاف داده‌های اندازه‌گیری‌شده رطوبت خاک در مزرعه با



شکل ۲- مقایسه رطوبت خاک اندازه گیری شده با شبیه سازی شده توسط نرم افزار سامانه هوشمند

Fig. 2- Comparison of measured soil moisture with simulated soil moisture by the intelligent system software

جدول ۶- شاخص های آماری ارزیابی مقایسه داده های اندازه گیری و شبیه سازی شده رطوبت خاک

Table 6- Statistical evaluation indices for comparing measured and simulated soil moisture data

شاخص آماری					تیمار
Statistical Index					Treatment
d	EF	NRMSE	RMSE	R ²	
۰/۷۹۶	۰/۲۳۱	۲۶/۱	۰/۰۵۱	۰/۵۵	۰-۲۰ (۸۰٪)
۰/۸۶۳	۰/۵۰۸	۲۳/۰	۰/۰۴۶	۰/۶۶	۲۰-۴۰ (۸۰٪)
۰/۶۰۹	-۱/۵۳۶	۲۱/۷	۰/۰۵۱	۰/۱۵	۰-۲۰ (۱۰۰٪)
۰/۵۱۱	-۱/۷۹۱	۲۴/۰	۰/۰۵۶	۰/۰۳	۲۰-۴۰ (۱۰۰٪)
۰/۹۵۱	۰/۷۹۵	۱۲/۰	۰/۰۲۸	۰/۸۵	۰-۲۰ (۱۲۰٪)
۰/۷۷۵	-۰/۲۲۳	۲۷/۲	۰/۰۶۲	۰/۴۴	۲۰-۴۰ (۱۲۰٪)

نتیجه گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که بهره گیری از سامانه هوشمند مدیریت آبیاری «هوشاب» در کشت گندم در منطقه مشهد، اگرچه در مقایسه با برخی تیمارهای کاهش یافته آبیاری منجر به افزایش عملکرد دانه گردید، اما از منظر شاخص های بهره وری آب (شامل بهره وری فیزیکی و بهره وری کاربردی)، برتری معناداری نسبت به دیگر روش های مدیریت آبیاری نداشت. در برخی موارد، میزان آب مصرفی در تیمار مبتنی بر هوشاب به طور قابل توجهی بیش از مقدار مورد نیاز تخمین زده شده بود که این امر بیانگر ضرورت بازنگری و بهینه سازی الگوریتم های تخمین

نتایج جدول (۶) نشان می دهد که عملکرد سامانه براساس شاخص NRMSE از نمره خوب (۱۲ درصد در تیمار ۱۲۰ درصد در عمق ۰-۲۰) تا متوسط (بقیه تیمارها بین ۲۳ تا ۲۷/۲ درصد) ارزیابی می شود. مقادیر محاسبه شده برای RMSE به ترتیب از ۲/۸ تا ۶/۲ درصد حجمی در کلیه تیمارها تغییر می کند. مقدار ضریب تبیین، شاخص توافق ویلموت و ضریب کارایی نش ساتکلیف برای تیمار تامین ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ویژه در عمق ۲۰-۴۰ سانتی متر نمره ضعیف دارد. در مجموع می توان گفت سامانه هوشمند آبیاری (هوشاب)، مقدار رطوبت خاک را با درجه متوسط شبیه سازی می کند.

نیاز آبی گیاه در سامانه مذکور است. مقایسه برآوردهای هوشاب با داده‌های حاصل از ایستگاه هواشناسی محلی نیز نشان داد که در برخی موارد تخمین نیاز آبی توسط سامانه تا دو برابر مقدار واقعی است؛ این موضوع در شرایط بحرانی منابع آب می‌تواند منجر به برداشت و مصرف بی‌رویه آب و تشدید تنش آبی گردد.

از سوی دیگر، نتایج پژوهش به‌طور مشخص حاکی از آن بود که استفاده از سامانه آبیاری قطره‌ای، نسبت به روش آبیاری سطحی، در اغلب تیمارها منجر به افزایش معنادار شاخص بهره‌وری آب شده است. این امر، مؤید قابلیت بالای آبیاری قطره‌ای به‌عنوان راهکاری مؤثر در مدیریت بهینه منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور است. اعمال تیمارهایی با کاهش ۲۰ درصد در حجم آب آبیاری (مصرف معادل ۸۰ درصد نیاز آبی کامل)، در شرایط خاص اقلیمی و مدیریتی، بدون افت شدید عملکرد، موجب بهبود شاخص‌های بهره‌وری آب گردید؛ این اثر به‌ویژه در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای به شکلی بارزتر مشاهده شد.

بر این اساس، با وجود ظرفیت بالای سامانه هوشاب در مکانیزه‌سازی فرآیند مدیریت آبیاری و تصمیم‌سازی در سطح مزرعه، تحقق هدف‌های مرتبط با بهینه‌سازی مصرف آب مستلزم بازنگری اساسی در مدل‌سازی نیاز آبی گیاه است، به‌ویژه تطبیق بهتر مدل‌های سامانه با داده‌های محلی، شرایط اقلیمی خاص منطقه و بهره‌گیری از داده‌های دقیق‌تر اقلیمی.

در نهایت، توسعه رابط کاربری ساده، کاربردی و قابل فهم برای بهره‌برداران، همراه با ارائه آموزش‌های میدانی و

عملی، می‌تواند به افزایش استقبال و اثربخشی سامانه هوشاب در مزارع منجر شود و گامی مؤثر در راستای استقرار کشاورزی هوشمند، پایدار و سازگار با اقلیم در مناطق خشک کشور فراهم آورد.

پیشنهادهایی برای بهبود سامانه هوشاب و تحقیقات آتی

- ارزیابی عملکرد سامانه هوشاب در مناطق اقلیمی متفاوت و روی محصولات زراعی مختلف پیشنهاد می‌شود. در این زمینه، تأکید بر کاربرد سامانه در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب شمال و غرب کشور که تنش آبی کمتری دارند، مهم است. همچنین انتظار می‌رود که اثربخشی سامانه برای محصولات بهاره با دوره رشد طولانی بیشتر باشد.
- توصیه می‌شود توسعه‌دهندگان سامانه هوشاب در طراحی نسل‌های آتی، بازنگری در نوع حسگرهای مورد استفاده را مدنظر قرار دهند و از حسگرهایی با دقت اندازه‌گیری بالاتر استفاده کنند. پیشنهاد می‌شود به‌جای تکیه بر ایستگاه‌های هواشناسی قابل حمل، از داده‌های برخط شبکه جهانی هواشناسی استفاده شود. این کار نه تنها موجب کاهش هزینه‌های نصب و نگهداری خواهد شد، بلکه به دلیل سهولت بیشتر بهره‌برداری می‌تواند موجب استقبال گسترده‌تر بهره‌برداران و گسترش کاربرد سامانه در سطح کشور گردد.

مراجع

- Abbasi, N. & Abbasi, F. (2020). Overview of Water Resources and Consumption in Iran. Technical Report No. 57384, Agricultural Engineering Research Institute, Karaj, Iran. (in Persian).
- Al-Ghobari, H. M. (2014). The assessment of automatic irrigation scheduling techniques on tomato yield and water productivity under a subsurface drip irrigation system in a hyper arid region. WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol. 185.

- 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.
- Aydin, Ö., Kandemir, C. A., Kiraç, U., & Dalkiliç, F. (2021). Development of a smart irrigation system based on artificial intelligence and IoT. *Sustainability*, 13(14), 7805.
- Bwambale, E., Abagale, F.K. & Anornu, G.K. (2022). Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, Volume 260, 107324.
- Çetin, O., Üzen, N., Temiz, M.G. & Altunten, H. (2021). Improving Cotton Yield, Water Use and Net Income in Different Drip Irrigation Systems Using Real-Time Crop Evapotranspiration. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 30, No. 5, 4463-4474.
- Evans, R. G., & Sadler, E. J. (2008). Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water Resources Research*, 44(7). <https://doi.org/10.1029/2007WR006200>
- FAO. (2012). ETo calculator, Land and water digital media series N° 36. FAO, Rome, Italy.
- Gutiérrez, J., Villa-Medina, J.F., Nieto-Garibay, A. & Porta-Gándara, M.A. (2015). Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module. *Transaction on instrumentation and measurement*, Vol. 63, No. 1.
- Incrocci, L., Marzioletti, P., Incroccia, G., Di Vita, A., Balendonck, J., Bibbiani, C., Spagnole, S., & Pardossia, A. (2014). Substrate water status and evapotranspiration irrigation scheduling in heterogenous container nursery crops. *Agricultural Water Management*, 131, 30-40.
- Jensen, M. E., & Allen, R. G. (2016). Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. American Society of Civil Engineers.
- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427-2436. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>
- Karar, M. E., Al-Rasheed, M. F., Al-Rasheed, A. F., & Reyad, O. (2020). Smart water pumping system using IoT and artificial neural networks. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(5), 5017-5024.
- Kehui, X., Deqin, X. & Xiwen, L. (2010). Smart water-saving irrigation system in precision agriculture based on wireless sensor network. *Transactions of the CSAE*, Vol.26, No.11.
- Khaleghi, N. (2015). Comparison of Effective Rainfall Estimation Methods in Agriculture. *Journal of Water and Sustainable Development*, Vol. 2, No. 2, pp. 51-58. (in Persian).
- Kiani, A. & Abbasi, F. (2021). *Barresi-ye tasir-e fanavari-haye novin dar kahnash-e masraf-e ab-e keshavarzi* [Investigating the impact of modern technologies on reducing agricultural water consumption]. *Ab va Tose'e-ye Paydar*, 2(2), 77-84. (in Persian).
- Kijne, J. W., Barker, R., & Molden, D. (2003). Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement. CABI Publishing.
- Liakos, V., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 164, 31-48.
- 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, pp. 58-69.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Navarro-Hellin, H., Martinez-del-Rincon, J., Domingo-Miguel, R., Soto-Valles, F. & Torres-Sanchez, R. (2016). A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124 (1), pp. 121-131.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2011). FAO crop water productivity model to simulate yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66.
- Rogers, D. H., Alam, M., & Aguilar, J. (2015). Irrigation management for agricultural producers. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service.

- Shahrokhnia, M. A., Zare, A., & Dehghani Sanij, H. (2015). Comparison of Different Tools for Drip Irrigation Planning of Citrus in Medium and Heavy Soils. *Journal of Irrigation and Drainage of Iran*, 3(9): 448-458. (in Persian).
- Shekhar, Y., Dagur, E., & Mishra, S. (2017). Smart irrigation system using machine learning and IoT. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 6(7), 132-138.
- Smith, M., Muñoz, G., & van Wijk, M. T. (2010). *Water management for sustainable agriculture*. FAO Water Reports, 36.
- Vallejo-Gómez, D., Osorio, M., & Hincapié, C. A. (2023). A review of intelligent irrigation systems in agriculture: Technologies and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107616.
- Zhang, X., Chen, S., Sun, H., Wang, Y., & Shao, L. (2019). Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors. *Field Crops Research*, 234, 1-10.
- 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>
- Zwart, S. J., & Bastiaanssen, W. G. M. (2004). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton, and maize. *Agricultural Water Management*, 69(2), 115-133.