

Document Type

Review Article

مروری

نوع مقاله

A Review of Artificial Intelligence Applications in Smart Irrigation Management

Z. Ayyab Koushk Gozar¹, S.M.R. Naghedifar², A.N. Ziaei^{3*}

1, 2, 3 – M.Sc. Student, Assistant Professor, and Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*Corresponding Author Email: an.ziaei@birjand.ac.ir

Received 16-06-2025
Revised 03-08-2025
Accepted 16-08-2025
Available online 16-12-2025

مروری بر کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت هوشمند آبیاری

زهرا ایاب کوشک گذر^۱، سید محمدرضا ناقدی فر^۲، علی نقی ضیایی^{۳*}

۱، ۲، ۳ – به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

*رایانامه نویسنده مسئول: an.ziaei@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۳/۲۶
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۵/۱۲
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۵/۲۵
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۹/۲۵

Abstract

In light of the increasing challenges posed by water scarcity, population growth, climate change, and the urgent need to enhance agricultural productivity, the adoption of advanced technologies such as Artificial Intelligence (AI) in irrigation management is regarded as a transformative approach. This study aims to investigate the role of AI in optimizing irrigation and managing water resources in agriculture by analyzing various dimensions, including the background of irrigation, modern methodologies, data collection and analysis, water allocation algorithms, performance monitoring, challenges, opportunities, and the provision of strategic solutions. Through a systematic review of credible scientific articles, the present research examines technologies such as environmental sensors, the Internet of Things (IoT), machine learning, deep learning, and decision support systems, and evaluates their effectiveness in improving water use efficiency and increasing crop yield. The results indicate that intelligent irrigation systems can reduce water consumption by 20 to 40 percent while enhancing crop performance. Furthermore, the findings reveal that key challenges to the application of AI in smart irrigation management include lack of infrastructure, high initial costs, and insufficient accurate data. Finally, the study proposes recommendations for the localized development of these systems, emphasizing supportive policies, technology localization, and farmer empowerment.

Keywords: Artificial Intelligence, Precision Irrigation, Smart Agriculture, Machine Learning, Water Resource Management

چکیده

باتوجه به چالش‌های فزاینده ناشی از کمبود منابع آب، رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی و ضرورت افزایش بهره‌وری در کشاورزی، به‌کارگیری فناوری‌های نوین همچون هوش مصنوعی (AI) در مدیریت آبیاری به عنوان رویکردی تحول‌آفرین در نظر گرفته می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی نقش هوش مصنوعی در بهینه‌سازی آبیاری و مدیریت منابع آب در کشاورزی، به تحلیل ابعاد مختلف از جمله پیشینه آبیاری، روش‌شناسی‌های نوین، گردآوری و تحلیل داده‌ها، الگوریتم‌های تخصیص آب، پایش عملکرد، چالش‌ها، فرصت‌ها و ارائه راهکارهای راهبردی پرداخته است. مطالعه حاضر با بهره‌گیری از بررسی نظام‌مند مقاله علمی معتبر، به بررسی فناوری‌هایی نظیر حسگرهای محیطی، اینترنت اشیا، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و سامانه‌های تصمیم‌یار پرداخته و عملکرد آن‌ها را در بهبود کارایی مصرف آب و افزایش بازده محصولات ارزیابی نموده است. نتایج نشان می‌دهد که سامانه‌های هوشمند آبیاری می‌توانند مصرف آب را بین ۲۰ تا ۴۰ درصد کاهش داده و عملکرد محصولات را بهبود دهند. همچنین بررسی‌ها نشان داد موانعی نظیر نبود زیرساخت، هزینه اولیه بالا و کمبود داده‌های دقیق، از جمله چالش‌های کلیدی در استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت هوشمند آبیاری به شمار می‌روند. در نهایت، پیشنهاداتی جهت توسعه بومی این سامانه‌ها با تأکید بر سیاست‌های حمایتی، بومی‌سازی فناوری و توانمندسازی کشاورزان ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: هوش مصنوعی، آبیاری دقیق، کشاورزی هوشمند، یادگیری ماشین، مدیریت منابع آب

How to cite this article:

Ayyab Koushk Gozar, Z., Naghdi Far, S.M.R., & Ziaei, A.N. (2025). A Review of Artificial Intelligence Applications in Smart Irrigation Management. Journal of Water and Sustainable Development, 12(3), 156-163. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i3.2506-1432>

یادگیری ماشین، فرآیند تصمیم‌گیری را به‌صورت بلادرنگ و با دقت بالا انجام داده و امکان پایش لحظه‌ای شرایط اقلیمی، خاک و نیاز گیاه را فراهم می‌کنند (Jena و Chakravarty، ۲۰۲۴). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از این فناوری‌ها می‌تواند با تخصیص بهینه منابع و کاهش هزینه‌های عملیاتی، بهره‌وری آب را به‌طور چشمگیری افزایش دهد (Touil و همکاران، ۲۰۲۲).

در همین راستا، مطالعات میدانی در نقاط مختلف جهان اثربخشی آبیاری هوشمند را به‌طور مستند نشان داده‌اند. به‌عنوان نمونه (Anjum و همکاران، ۲۰۲۳) با طراحی سامانه‌ای مبتنی بر یادگیری عمیق توانستند مصرف آب را تا ۲۸ درصد کاهش دهند. (Mabrouki و Elshaikh، ۲۰۲۴) نیز با ترکیب الگوریتم‌های پیش‌بینی اقلیمی، سامانه‌ای طراحی کردند که راندمان مصرف آب را تا ۳۵ درصد افزایش داده و بیماری‌های ناشی از رطوبت بیش از حد را کاهش داده است. (Saikai و همکاران، ۲۰۲۳) نشان دادند که استفاده از یادگیری تقویتی می‌تواند بهره‌وری آب و عملکرد محصول را به‌طور هم‌زمان بهبود دهد. همچنین، استفاده ترکیبی از یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی و اینترنت اشیا در مزارع هوشمند، منجر به کاهش مصرف آب تا ۳۰ درصد و افزایش عملکرد محصول تا ۲۰ درصد شده است (Abuzanouneh و همکاران، ۲۰۲۲؛ Elshaikh و Mabrouki، ۲۰۲۴).

Colizzi و همکاران (۲۰۲۵) در یک بررسی سیستماتیک نشان دادند که ادغام هوش مصنوعی و اینترنت اشیا می‌تواند در مدیریت هوشمند آبیاری، صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف آب ایجاد کرده و کارایی آبیاری را افزایش دهد.

با وجود این پیشرفت‌ها، ایران همچنان با چالش‌هایی نظیر کمبود الگوریتم‌های بومی، ضعف زیرساخت‌های داده محور و نبود آموزش‌های کافی برای کشاورزان روبه‌رو است (Miller و همکاران، ۲۰۲۵). این موانع توسعه فناوری‌های هوشمند آبیاری را با کندی مواجه ساخته و لزوم انجام پژوهش‌های کاربردی، تحلیل چالش‌ها و ارائه راهکارهای بومی را دوچندان کرده است.

در نهایت، حرکت به‌سوی کشاورزی هوشمند و آبیاری دقیق، نه تنها پاسخی راهبردی به بحران‌های آبی و اقلیمی است، بلکه ضامن حفظ امنیت غذایی، بهره‌وری پایدار و صیانت از محیط‌زیست نیز خواهد بود.

مواد و روش‌ها

کشاورزی هوشمند (Smart Agriculture) به‌کارگیری فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و تحلیل داده‌ها برای بهبود بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و مدیریت منابع در تولیدات کشاورزی است (Wolfert و همکاران، ۲۰۱۷).

در دهه‌های اخیر، مدیریت منابع آب در کشاورزی به یکی از چالش برانگیزترین مسائل حوزه امنیت غذایی و پایداری محیط‌زیستی تبدیل شده است (Fader و همکاران، ۲۰۱۳). با افزایش جمعیت جهانی، توسعه شهرنشینی و نیاز روزافزون به تولید محصولات کشاورزی، فشار بر منابع آبی جهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، به‌شدت افزایش یافته است. در کنار این روند، تغییرات اقلیمی، نوسانات بارش و بروز خشکسالی‌های مکرر، چالش‌های جدیدی را در تأمین پایدار آب برای بخش کشاورزی به وجود آورده‌اند (Jaiswal و همکاران، ۲۰۲۵؛ Oğuztürk، ۲۰۲۵). در چنین شرایطی، استفاده از فناوری‌های هوشمند و ابزارهای دیجیتال، به‌ویژه در حوزه آبیاری، نه تنها یک انتخاب، بلکه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تلقی می‌شود.

یکی از مؤلفه‌های کلیدی در بهینه‌سازی مصرف منابع آب، آبیاری دقیق است که جایگاه ویژه‌ای در راهبردهای نوین مدیریت کشاورزی یافته است. تحول چشمگیری که در این حوزه رخ داده، به‌کارگیری سامانه‌های تحلیل‌گر، پیش‌بینی‌کننده و تصمیم‌یار مبتنی بر داده‌های محیطی است. این سامانه‌ها با قابلیت درک الگوهای پنهان و پردازش داده‌های لحظه‌ای از جمله رطوبت خاک، دمای محیط، مرحله رشد گیاه و تغییرات اقلیمی، می‌توانند نظام تصمیم‌گیری در آبیاری را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشند (Mehedi و همکاران، ۲۰۲۴؛ Sevedzadeh و Khazaei، ۲۰۲۲). فناوری‌هایی همچون هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های محیطی و اطلاعات زراعی، امکان پیش‌بینی دقیق نیاز آبی هر محصول را بر اساس نوع گیاه، شرایط خاک و اقلیم منطقه فراهم می‌سازند. این بهینه‌سازی علاوه بر صرفه‌جویی قابل توجه در منابع آب، باعث ارتقای عملکرد و کیفیت محصول نیز می‌شود.

در ادبیات علمی نیز بر اهمیت رویکردهای نوین در بهینه‌سازی مصرف آب تأکید شده است. به‌عنوان مثال (Sui، ۲۰۱۷) مطرح می‌کنند که پایش دقیق رطوبت خاک و نیاز آبی گیاه، نقش کلیدی در افزایش کارایی سامانه‌های آبیاری دارد. همچنین، (Pereira و همکاران، ۲۰۱۲) با بررسی چالش‌های مناطق خشک، راهکارهایی چون زمان‌بندی مبتنی بر نیاز گیاه و استفاده از ابزارهای تصمیم‌یار را برای مدیریت پایدار منابع آب توصیه کرده‌اند. این دیدگاه‌ها نشان می‌دهند که گذار از روش‌های سنتی به سامانه‌های داده محور و هوشمند، ضرورتی علمی و راهبردی در مواجهه با بحران آب محسوب می‌شود.

درحال حاضر، روش‌های سنتی آبیاری نه تنها ناکارآمد هستند، بلکه منجر به هدررفت گسترده آب و کاهش کیفیت محصولات می‌شوند. در مقابل، سامانه‌های هوشمند مبتنی بر حسگرهای بی‌سیم و الگوریتم‌های

آبیاری دقیق (Precision Irrigation) نیز یکی از زیرشاخه‌های کشاورزی دقیق بوده و به معنای اعمال دقیق میزان و زمان آبیاری بر اساس نیاز واقعی گیاه، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های خاک است (Liakos و همکاران، ۲۰۱۸).

به‌عنوان نمونه، یک سیستم آبیاری دقیق می‌تواند از حسگرهای رطوبت خاک، ایستگاه هواشناسی محلی، کنترل مرکزی و شیرهای برقی تشکیل شده باشد. اطلاعات جمع‌آوری شده از حسگرها و داده‌های آب‌وهوایی در یک پلتفرم پردازش شده و سپس برنامه آبیاری متناسب با شرایط واقعی هر قطعه زمین، به‌صورت خودکار اجرا می‌شود. این سامانه‌ها عموماً از الگوریتم‌های پیش‌بینی مانند شبکه‌های عصبی یا درخت تصمیم برای تنظیم حجم و زمان آبیاری استفاده می‌کنند (Mohyuddin و همکاران، ۲۰۲۴).

پیشینه آبیاری و فناوری در کشاورزی ایران و جهان

آبیاری همواره یکی از ارکان بنیادی کشاورزی بوده است. در تمدن‌های کهن مانند بین‌النهرین، مصر و مناطق فلات ایران، سامانه‌های ابتدایی آبیاری شامل شبکه‌های کانال و سیستم‌های مدیریت آب زمینه را برای کشاورزی در نواحی خشک فراهم کردند (Angelakis و همکاران، ۲۰۲۰). در ایران، شبکه‌های سنتی مانند قنوات و آبیاری کرتی، هر چند در تأمین امنیت غذایی نقش داشتند، اما با راندمان پایین و تلفات آب بالا همراه بودند و در برخی مناطق بازدهی کمتر از ۳۰ درصد گزارش شده است (Ghahroodi و همکاران، ۲۰۱۵).

با افزایش جمعیت، تقاضای بیشتر برای محصولات کشاورزی، رقابت بر منابع آب و اثرات تغییرات اقلیمی، نیاز به فناوری‌های نوین آبیاری همچون سیستم‌های تحت فشار، سیستم‌های هوشمند با به‌کارگیری اینترنت اشیا و سنسورها و مدل‌سازی مصرف آب برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب در کشاورزی پدید آمد. با این حال، موانعی مانند هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا، نیاز به آموزش فنی و ضعف زیرساخت‌های اجرایی، مانع از گسترش این فناوری‌ها در بسیاری از مناطق از جمله ایران شده است (Ali و همکاران، ۲۰۲۵).

تحول اساسی با ورود فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی مانند اینترنت اشیا، حسگرهای هوشمند و هوش مصنوعی به کشاورزی آغاز شد که امکان گردآوری و تحلیل لحظه‌ای داده‌های محیطی و زراعی را فراهم کرد (Jaiswal و همکاران، ۲۰۲۵؛ Miller و همکاران، ۲۰۲۵). این فناوری‌ها برنامه‌ریزی آبیاری را از حالت سنتی به داده‌محور و هوشمند تبدیل نمودند.

مطالعات میدانی نشان داده‌اند که به‌کارگیری الگوریتم‌های پیش‌بینی رطوبت خاک و کنترل هوشمند آبیاری می‌تواند مصرف آب را به‌طور قابل توجهی کاهش داده و عملکرد

محصول را بهبود بخشد (Togneri و همکاران، ۲۰۲۲). در سطح جهانی، فناوری‌های مشابه در مزارع نیشکر پاکستان و باغات سیب چین، به کاهش قابل توجه مصرف آب و افزایش راندمان کمک کردند (Menezes و همکاران، ۲۰۲۴؛ Tace و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین بر اساس پژوهش Liakos و همکاران (۲۰۱۸) استفاده از مدل‌هایی که آینده را پیش‌بینی می‌کنند (مثل پیش‌بینی بارش، دما یا نیاز آبی گیاه) و همچنین داده‌هایی که از وضعیت هوا به دست می‌آید، کمک بزرگی به تصمیم‌گیری دقیق‌تر در آبیاری و مصرف بهینه آب می‌کند.

این تجربیات نشان می‌دهد به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند در آبیاری، کلید مقابله با بحران جهانی آب و تحقق امنیت غذایی است. رسیدن به آبیاری هوشمند نیازمند سیاست‌گذاری یکپارچه، سرمایه‌گذاری هدفمند، آموزش بهره‌برداران، توسعه زیرساخت‌های فناورانه و بومی‌سازی سامانه‌ها مطابق اقلیم و ویژگی‌های منطقه‌ای است.

روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با هدف بررسی کاربردهای هوش مصنوعی در آبیاری دقیق، بر مبنای مرور و تحلیل منابع علمی مرتبط انجام شده است. ابتدا مقالات و گزارش‌های معتبر در زمینه هوش مصنوعی و سامانه‌های آبیاری هوشمند از سال‌های اخیر جمع‌آوری شد. جستجوها بر اساس کلیدواژه‌هایی مثل «هوش مصنوعی»، «آبیاری دقیق»، «اینترنت اشیا» و «یادگیری ماشین» در پایگاه‌های علمی مختلف انجام گرفت (Singh و همکاران، ۲۰۲۵).

پس از جمع‌آوری منابع، روش‌های مختلف هوش مصنوعی مانند الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی بررسی شدند که چگونه می‌توانند مصرف آب را بهینه کرده و آبیاری را دقیق‌تر و هوشمندتر کنند (Chakravarty و Jena، ۲۰۲۴). همچنین نقش حسگرهای اینترنت اشیا در جمع‌آوری اطلاعات خاک و شرایط محیطی برای تصمیم‌گیری‌های به موقع در سامانه‌های آبیاری ارزیابی شد (Touil و همکاران، ۲۰۲۲).

با تحلیل این اطلاعات، نقاط قوت و ضعف روش‌های مختلف هوش مصنوعی شناسایی و راهکارهایی برای بهبود عملکرد سامانه‌های آبیاری دقیق ارائه می‌شود. این روش‌شناسی امکان بررسی جامع کاربرد هوش مصنوعی را در بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش بازدهی کشاورزی فراهم می‌کند.

مدیریت تأمین داده در سیستم‌های هوشمند آبیاری

یکی از بخش‌های کلیدی در سامانه‌های آبیاری هوشمند، جمع‌آوری و مدیریت دقیق داده‌های مربوط به شرایط محیط، خاک و گیاه است. این داده‌ها پایه تصمیم‌گیری در الگوریتم‌های هوشمند را تشکیل می‌دهند. برای انتقال این

داده‌ها، از شبکه‌های بی‌سیم کم‌مصرف مانند LoRa و NB-IoT استفاده می‌شود که حتی در مناطق دورافتاده و بدون اینترنت نیز کارایی دارند (Mousavi و Khademzadeh، ۲۰۲۲). علاوه بر جمع‌آوری داده، این سیستم‌ها امکان کنترل از راه دور تجهیزات آبیاری را نیز فراهم می‌سازند.

داده‌های ثبت شده در پایگاه‌های اطلاعاتی ذخیره شده و با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، برای پیش‌بینی نیاز آبی و رفتار گیاه و خاک تحلیل می‌شود. این فرایند باعث بهینه‌سازی مصرف آب می‌شود (Miller و همکاران، ۲۰۲۵).

در نهایت، مدیریت داده در سامانه‌های هوشمند آبیاری شامل سه لایه حسگر، ارتباطات و پردازش است که با فناوری‌های نوین و الگوریتم‌های پیشرفته، پایه‌گذار کشاورزی داده‌محور و پایدار خواهد بود.

مدیریت توزیع و تخصیص آب با کمک هوش مصنوعی

مدیریت توزیع و تخصیص آب در کشاورزی نقش کلیدی در تحقق کشاورزی پایدار دارد. فشارهای فزاینده بر منابع آب، استفاده از فناوری‌های نوین به‌ویژه هوش مصنوعی را برای افزایش بهره‌وری آبی ضروری کرده است (Martelli و همکاران، ۲۰۲۵). الگوریتم‌های یادگیری ماشین، با تحلیل داده‌های حسگرها و اطلاعات اقلیمی، قادر به پیش‌بینی دقیق نیاز آبی خاک و بهینه‌سازی زمان و میزان آبیاری هستند، که این رویکرد می‌تواند کارایی سیستم‌های آبیاری هوشمند را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد (Del-Coco و همکاران، ۲۰۲۴).

ترکیب داده‌های هواشناسی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، نقش مهمی در تسهیل مدیریت هوشمند منابع آب ایفا کرده و به کشاورزان در برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت کمک می‌کند. همچنین، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی نظیر الگوریتم ژنتیک^۱ و الگوریتم ازدحام ذرات در طراحی شبکه‌های توزیع آب و مدیریت فشار سامانه‌های تحت فشار، موجب کاهش تلفات، افزایش کارایی و بهینه‌سازی مصرف آب شده است. با این حال، نتایج مطالعه زارع و همکاران (۱۴۰۰) نشان می‌دهد که بهره‌برداری گسترده و مؤثر از این فناوری‌ها مستلزم فراهم بودن زیرساخت‌های فنی مناسب، دسترسی به داده‌های محلی دقیق، و نیز تعامل و همکاری بین بهره‌برداران، نهادهای دولتی و توسعه‌دهندگان فناوری است. در نهایت، رسیدن به کشاورزی پایدار و تخصیص هوشمند منابع آب تنها با اجرای سیاست‌گذاری‌های هوشمندانه و ارتقای سطح آموزش کشاورزان امکان‌پذیر خواهد بود.

مدیریت بهره‌برداری و پایش عملکرد آبیاری دقیق

الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی به سامانه‌ها امکان تحلیل روند مصرف، شناسایی ناهنجاری‌ها و اصلاح خودکار خطاها را می‌دهند که باعث افزایش پایداری و

کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود. این سامانه‌ها با استفاده از حسگرهای خاک و هوا، داده‌هایی مانند رطوبت، دما و تعرق را به‌صورت لحظه‌ای جمع‌آوری و پردازش می‌کنند تا مصرف آب به‌صورت خودکار و دقیق تنظیم شود و از آبیاری بیش‌ازحد یا کم‌آبی جلوگیری شود (Martelli و همکاران، ۲۰۲۵).

Zhao و همکاران (۲۰۲۳) نشان داده‌اند ادغام داده‌های تاریخی و لحظه‌ای با مدل‌های شبیه‌سازی رطوبت خاک و تبخیر و تعرق می‌تواند الگوهای مصرف آب را استخراج کرده و زمان‌بندی بهینه آبیاری را پیشنهاد دهد. این رویکرد ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، می‌تواند کیفیت و کمیت محصول را ارتقا دهد و در شرایط بحرانی مانند خشکسالی یا بارش ناگهانی، سامانه‌های هوشمند با ارائه بازخورد سریع و تحلیل ریسک به کشاورزان و مدیران در اتخاذ تصمیمات به‌موقع کمک کنند.

در نهایت، استفاده از سامانه‌های هوشمند و داده‌محور آبیاری موجب افزایش رضایت بهره‌برداران، کاهش خطاهای انسانی و ارتقای دانش کشاورزان در بهره‌برداری از فناوری‌های نوین شده و به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کشاورزی هوشمند و حفظ منابع آبی به شمار می‌رود. همچنین، مدیریت بهره‌برداری و پایش مستمر در سامانه‌های آبیاری دقیق از عوامل مهم در افزایش کارایی مصرف آب و بازده محصولات است (Zhao و همکاران، ۲۰۲۳).

چالش‌ها و موانع توسعه آبیاری هوشمند

با وجود ظرفیت بالای فناوری‌های هوشمند آبیاری برای بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش بهره‌وری کشاورزی، توسعه و پذیرش گسترده این سامانه‌ها با چالش‌ها و موانع متعددی روبه‌رو است که می‌توان آنها را در ابعاد اقتصادی، فنی، فرهنگی و مدیریتی دسته‌بندی کرد. از مهمترین چالش‌های اقتصادی، هزینه‌های اولیه بالای تجهیزات، نصب و زیرساخت‌های فناوری است که برای بسیاری از کشاورزان به‌ویژه در مناطق روستایی و کم‌درآمد، مانع بزرگی محسوب می‌شود و سرمایه‌گذاری در این حوزه را با ریسک همراه می‌سازد (Martelli و همکاران، ۲۰۲۵). در کنار این، نبود سازوکارهای حمایتی مانند تسهیلات اعتباری و یارانه‌های دولتی، روند توسعه و به‌کارگیری این فناوری‌ها را با کندی مواجه کرده است.

در حوزه فنی، کمبود دانش فنی و مهارت‌های لازم برای نصب، بهره‌برداری و نگهداری سامانه‌ها، یکی از موانع اصلی است. فقدان آموزش تخصصی و مشاوره فنی کافی، کشاورزان را از استفاده بهینه از این فناوری‌ها باز می‌دارد و عملکرد سیستم‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و همچنین، کمبود داده‌های دقیق و به‌روز، به ویژه داده‌های اقلیمی و خاک‌شناسی، باعث کاهش دقت مدل‌های هوشمند و

الگوریتم‌های تخصیص آب می‌شود (Giaffreda و همکاران، ۲۰۱۹).

ضعف و ناپایداری زیرساخت‌های ارتباطی و اینترنتی، خصوصاً در مناطق دورافتاده و روستایی، دسترسی به داده‌های لحظه‌ای و کنترل از راه دور سیستم‌های آبیاری را محدود می‌کند و به‌عنوان یکی از موانع فنی مهم شناخته می‌شود. افزون بر این، پیچیدگی‌های فنی الگوریتم‌های هوش مصنوعی و نیاز به سخت‌افزار و نرم‌افزارهای پیشرفته برای پردازش داده‌های حجیم، هزینه و دشواری‌های پیاده‌سازی را افزایش می‌دهد (Bayar و همکاران، ۲۰۲۵).

از لحاظ فرهنگی، مقاومت کشاورزان نسبت به پذیرش فناوری‌های نوین و تمایل به استفاده از روش‌های سنتی آبیاری، روند گسترش و توسعه سیستم‌های هوشمند را با چالش مواجه کرده است. به همین دلیل، آموزش مستمر و فرهنگ‌سازی برای افزایش دانش و پذیرش فناوری‌های نوین، از مهمترین راهکارها برای عبور از این موانع است. در حوزه مدیریت نیز، فقدان سیاست‌های هماهنگ، حمایت‌های دولتی و انسجام میان نهادهای مرتبط، باعث پراکندگی فعالیت‌ها و کاهش اثربخشی برنامه‌های توسعه فناوری شده است (Kashyap و همکاران، ۲۰۲۱). نبود چارچوب‌های قانونی و استراتژی‌های بلندمدت توسعه نیز از موانع عمده پیش‌رو به شمار می‌آید. در مجموع، رفع این موانع نیازمند همکاری چند جانبه میان دولت، بخش خصوصی، مراکز آموزشی و کشاورزان است. تلاش‌های مستمر در زمینه آموزش، توسعه زیرساخت‌های فناورانه و ارتباطی، سیاست‌گذاری حمایتی و فرهنگ‌سازی می‌تواند زمینه را برای گسترش پایدار و فراگیر آبیاری هوشمند فراهم آورد و به حفظ منابع آب و افزایش امنیت غذایی کمک نماید.

فرصت‌ها و توانمندی‌ها برای توسعه بومی سیستم‌های هوشمند

زارع و همکاران (۱۴۰۰) اشاره دارند به اینکه علاوه بر چالش‌ها، توسعه سیستم‌های هوشمند آبیاری در ایران با فرصت‌ها و ظرفیت‌های قابل توجهی همراه است که می‌تواند زمینه بومی‌سازی و توسعه پایدار این فناوری‌ها را فراهم آورد. یکی از مهمترین این ظرفیت‌ها، رشد سریع زیرساخت‌های دیجیتال و ارتباطی در کشور است. طی سال‌های اخیر، دسترسی به اینترنت حتی در مناطق روستایی افزایش چشمگیری داشته و زیرساخت‌های لازم برای بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیا فراهم شده است. این توسعه زیرساختی، بستر مناسبی برای پیاده‌سازی سامانه‌های هوشمند آبیاری و جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای و کنترل از راه دور فراهم می‌کند.

از سوی دیگر، افزایش آگاهی عمومی و سیاست‌گذاران نسبت به بحران آب و اهمیت بهره‌برداری هوشمندانه از منابع آبی، زمینه مناسبی برای استقبال از فناوری‌های نوین فراهم آورده است. این رویکرد می‌تواند با سیاست‌های تشویقی، آموزش‌های هدفمند و حمایت‌های مالی به

نهادهای شدن سامانه‌های هوشمند کمک کند (Ögüztürk، ۲۰۲۵).

دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی ایران نقش به‌سزایی در توسعه دانش و فناوری‌های بومی در حوزه کشاورزی هوشمند ایفا می‌کنند. در کنار آن‌ها، استارت‌آپ‌های فعال در زمینه کشاورزی دیجیتال نیز با طراحی اپلیکیشن‌ها و تولید سخت‌افزارهای متناسب با شرایط بومی، ابزارهایی کاربردی و قابل دسترس برای کشاورزان فراهم کرده‌اند. این اقدامات موجب افزایش پذیرش فناوری‌های نوین در میان بهره‌برداران شده و اجرای پروژه‌های متعدد در زمینه آبیاری هوشمند و کاربرد هوش مصنوعی در کشاورزی، به تولید دانش بومی و توسعه راه‌حل‌هایی متناسب با اقلیم‌های متنوع کشور انجامیده است (Bayar و همکاران، ۲۰۲۵).

در همین راستا، زارع و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند توسعه ظرفیت‌های انسانی و افزایش آگاهی کشاورزان از طریق آموزش و ترویج علمی در زمینه‌های هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و سامانه‌های نوین آبیاری نقش مهمی در پذیرش و بهره‌برداری موفق از این فناوری‌ها دارد. افزایش تعداد بهره‌برداران آموزش‌دیده و متخصص، زمینه تربیت نیروی ماهر در تمام مراحل زنجیره ارزش فناوری‌های نوین آبیاری را فراهم می‌کند و تنوع اقلیمی قابل توجه ایران فرصت ارزشمندی برای آزمون، واسنجی (کالیبراسیون) و بهینه‌سازی سامانه‌های هوشمند آبیاری ایجاد می‌کند.

در نهایت، با استفاده هوشمندانه از این ظرفیت‌های زیرساختی، انسانی و پژوهشی و همچنین هدایت سیاست‌گذاری‌ها به سمت حمایت از نوآوری و توسعه فناوری‌های بومی، ایران می‌تواند در مسیر توسعه سامانه‌های هوشمند آبیاری گام‌های موثری برداشته و سهم قابل توجهی در افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی ایفا کند.

نتایج و تحلیل نهایی

آبیاری هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی، تحولی بنیادین در مدیریت منابع آب در کشاورزی به وجود آورده است. مرور گسترده مطالعات نشان می‌دهد که به‌کارگیری الگوریتم‌های پیش‌بینی‌گر، منجر به کاهش چشمگیر مصرف آب، افزایش بهره‌وری محصولات و کاهش هزینه‌های عملیاتی شده است. تحلیل مقایسه‌ای میان روش‌های سنتی و نوین نشان می‌دهد که در سیستم‌های سنتی، تصمیم‌گیری درباره زمان و میزان آبیاری عمدتاً بر اساس تجربه‌های شخصی و بدون داده‌های دقیق صورت می‌گیرد؛ اما در روش‌های هوشمند، تصمیم‌سازی بر پایه تحلیل آبی داده‌های محیطی مانند وضعیت خاک، رطوبت و شرایط آب‌وهوایی انجام می‌شود که این امر دقت و بهینه‌سازی مصرف آب را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Jena و Chakravarty، ۲۰۲۴).

در سطح جهانی، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که سامانه‌های هوشمند آبیاری با به‌کارگیری فناوری‌های نوین مانند سنسورها، اینترنت اشیا و تحلیل داده‌ها، می‌توانند مصرف آب را بهینه کرده، بهره‌وری محصولات را افزایش دهند و نقش مؤثری در تقویت امنیت غذایی و مقابله با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی ایفا کنند. این موفقیت‌ها در کشورهای مختلف با حمایت‌های دولتی، آموزش بهره‌برداران و فراهم کردن تسهیلات مالی برای توسعه فناوری‌ها تقویت می‌شود (Vallejo و همکاران، ۲۰۲۳).

در داخل کشور نیز پژوهش‌هایی مانند مطالعه حسینی و مرادی (۱۴۰۰) در منطقه فسا نشان داد بهره‌گیری از سیستم آبیاری قطره‌ای مبتنی بر داده‌های هوشمند، نسبت به روش‌های سنتی، منجر به صرفه‌جویی ۲۵٪ در مصرف آب و افزایش ۱۲٪ در کیفیت محصول شده است و همچنین مطالعات میدانی مانند پژوهش انجام شده توسط Touil و همکاران (۲۰۲۲) بر روی کشت گوجه‌فرنگی نشان داد استفاده از سیستم‌های مبتنی بر یادگیری عمیق توانسته مصرف آب را تا ۳۰٪ کاهش و عملکرد محصول را تا ۱۸٪ افزایش دهد؛ این امر نقش حیاتی الگوریتم‌های هوشمند در زمان‌بندی دقیق و تخصیص بهینه منابع آبی را برجسته می‌سازد. این نتایج نقش کلیدی هوش مصنوعی در بهینه‌سازی عملکرد زراعی و مدیریت بهینه منابع آب را تایید می‌کند.

تحلیل کلی نتایج حاکی از آن است که کارایی مصرف آب، دقت در تصمیم‌گیری و پایداری محیط‌زیستی، از مهمترین مزایای سیستم‌های هوشمند آبیاری محسوب می‌شوند، درحالی‌که سیستم‌های سنتی توانایی واکنش سریع به تغییرات محیطی را ندارند. با این وجود، موفقیت بلندمدت این فناوری‌ها به توسعه زیرساخت‌های فناورانه، آموزش مستمر بهره‌برداران و بومی‌سازی کامل فناوری‌ها وابسته است (Ali و همکاران، ۲۰۲۵).

پیشنهادات راهبردی

برای حفظ منابع آبی و ارتقای بهره‌وری در کشاورزی پایدار، اتخاذ راهبردهای موثر و جامع در توسعه سامانه‌های آبیاری هوشمند ضروری است. بر اساس نتایج مطالعات و تحلیل‌های موجود، راهکارهای زیر می‌تواند مسیر موفقیت در این حوزه را هموار کند:

۱. توسعه زیرساخت‌های داده‌ای و فناوری: ایجاد شبکه‌های گسترده حسگر، پهپادها و ایستگاه‌های هواشناسی هوشمند برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های محیطی، زیربنای حیاتی موفقیت سامانه‌های آبیاری دقیق است. تجارب کشورهای برزیل و چین نشان‌دهنده نقش کلیدی این زیرساخت‌ها در بهبود عملکرد است (Hammouch و همکاران، ۲۰۲۴).

۲. تدوین سیاست‌های حمایتی و مشوق‌های اقتصادی: ارائه یارانه، کاهش تعرفه‌های واردات و تسهیلات مالی کم بهره،

انگیزه لازم برای توسعه فناوری‌های هوشمند را فراهم می‌کند. این اقدامات باید در چارچوب سیاست‌های کلان کشاورزی پایدار طراحی شوند (Giaffreda و همکاران، ۲۰۱۹). ۳. ایجاد همکاری میان دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و بخش خصوصی و بومی‌سازی الگوریتم‌های هوش مصنوعی: سازگاری الگوریتم‌ها با شرایط اقلیمی و زراعی بومی، دقت پیش‌بینی و عملکرد سامانه‌ها را بهبود می‌بخشد و تقویت مراکز رشد و حمایت از استارت‌آپ‌ها، فضای نوآوری و توسعه فناوری‌های هوشمند را تسهیل می‌کند (Oğuztürk، ۲۰۲۵).

۴. یکپارچه‌سازی آبیاری هوشمند با سایر فناوری‌های کشاورزی: تلفیق سیستم‌های آبیاری با پایش تغذیه گیاه، مدیریت آفات و انرژی، رویکردی جامع برای افزایش بهره‌وری کل مزرعه فراهم می‌کند (Bayar و همکاران، ۲۰۲۵). اجرای این راهبردها ضمن افزایش بهره‌وری و صرفه‌جویی در مصرف آب، زمینه‌ساز کشاورزی پایدار و امنیت غذایی خواهد بود.

نتیجه‌گیری

کشاورزی هوشمند و مبتنی بر داده، امروزه به عنوان یکی از مهمترین راهکارهای مقابله با چالش‌های جدی منابع آبی محدود در کشاورزی مطرح است. این رویکرد نوین با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، امکان مدیریت دقیق و بهینه مصرف آب را در سطوح مختلف کشاورزی فراهم می‌کند. اهمیت این فناوری‌ها در کشورهایی مانند ایران که با محدودیت‌های شدید منابع آب و تغییرات اقلیمی مواجه هستند، بسیار برجسته است و می‌تواند راهگشای بسیاری از مشکلات فعلی باشد.

برای موفقیت در به‌کارگیری این فناوری‌ها، نیاز است زیرساخت‌های مناسب، سرمایه‌گذاری در آموزش کشاورزان و همچنین سیاست‌های حمایتی از سوی دولت ایجاد شود. این اقدامات باید به گونه‌ای طراحی شوند که موانع فرهنگی و اقتصادی نیز برطرف شوند، چرا که هزینه‌های اولیه بالا، کمبود دانش فنی و مقاومت در برابر تغییر، از جمله چالش‌هایی است که ممکن است روند توسعه کشاورزی هوشمند را کند نماید. در این راستا، آموزش مستمر کشاورزان و ایجاد انگیزه در آنها برای پذیرش فناوری‌های نوین اهمیت زیادی دارد و می‌تواند نقش کلیدی در موفقیت این طرح‌ها ایفا کند.

همچنین همکاری بین‌بخشی میان نهادهای علمی، فناوری، دولتی و بخش خصوصی ضروری است تا بتوان به توسعه پایدار کشاورزی هوشمند دست یافت. چنین همگرایی و مشارکتی، علاوه بر افزایش راندمان مصرف آب، می‌تواند به ارتقای کیفیت محصولات کشاورزی، کاهش هدررفت منابع و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی کمک کند.

Fader, M., Gerten, D., Krause, M., Lucht, W., & Cramer, W. (2013). Spatial decoupling of agricultural production and consumption: Quantifying dependences of countries on food imports due to domestic land and water constraints. *Environmental Research Letters*, 8(1), 014046. https://iopscience.iop.org/1748-9326/8/1/014046/pdf/1748-9326_8_1_014046.pdf

Ghahroodi, E. M., Noory, H., & Liaghat, A. M. (2015). Performance evaluation study and hydrologic and productive analysis of irrigation systems at the Qazvin irrigation network (Iran). *Agricultural Water Management*, 148, 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.10.003>

Giaffreda, R., Antonelli, F., & Spada, P. (2019). Promoting sustainable agricultural practices through incentives. In 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor), 1–6. IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8909281/>

Hammouch, H., El-Yacoubi, M., Qin, H., & Berbia, H. (2024). A systematic review and meta-analysis of intelligent irrigation systems. *IEEE Access*, 12, 10577970. <https://ieeexplore.ieee.org/iel8/6287639/10380310/10577970.pdf>

Jaiswal, N., Kumar, T. V., & Shukla, C. (2025). Smart drip irrigation systems using IoT: a review of architectures, machine learning models, and emerging trends. *Discover Agriculture*, 3, 253. <https://link.springer.com/article/10.1007/s44279-025-00430-1>

Jena, S. P., & Chakravarty, S. (2024). Internet of things-based remote monitoring and classification of Spinacia oleracea leaf disease using deep learning approach. *International Journal of Web and Grid Services*, 20(2), 138597. <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJWGGS.2024.138597>

Kashyap, P. K., Kumar, S., Jaiswal, A., Prasad, M., & Gandomi, A. H. (2021). Towards precision agriculture: IoT-enabled intelligent irrigation systems using deep learning neural network. *IEEE Sensors Journal*, 21(16), 17479–17491. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9388691/>

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Tsouros, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/8/2674>

Martelli, A., Rapinesi, D., Verdi, L., Donati, I. I. M., Dalla Marta, A., & Altobelli, F. (2025). Smart irrigation for management of processing tomato: a machine learning approach. *Irrigation Science*, 43(11), 1407–1424. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-024-00993-9>

Mehedi, I. M., Hanif, M. S., Bilal, M., & Vellingiri, M. T. (2024). Remote sensing and decision support system applications in precision agriculture: Challenges and possibilities. *IEEE Access*, 12, 10477982. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10477982/>

Menezes, S. M., da Silva, G. F., & da Silva, M. M. (2024). Pulse drip irrigation improves yield, physiological responses, and water-use efficiency of sugarcane. *Environmental and Sustainability Conservation Science*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s41101-024-00258-8>

Miller, T., Mikiciuk, G., Durlik, I., Mikiciuk, M., Łobodzińska, A., & Śnieg, M. (2025). The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now—A Systematic

در نهایت، حرکت به سمت کشاورزی هوشمند، نه تنها به حفظ و بهینه‌سازی منابع آب محدود کمک می‌کند، بلکه با افزایش بهره‌وری و کاهش ضایعات، امنیت غذایی پایدار را برای نسل‌های آینده تضمین خواهد کرد. این مسیر، هم فرصت بزرگی برای توسعه اقتصادی و فناوری کشور فراهم می‌آورد و هم پاسخی موثر به چالش‌های محیط‌زیستی و اجتماعی مرتبط با کشاورزی در جهان امروز است. لذا برنامه‌ریزی دقیق، سیاست‌گذاری هوشمندانه و همراهی همه ذی‌نفعان، کلید موفقیت در انجام این هدف حیاتی خواهد بود.

منابع

زارع، قدسیه، داورپناه، مجتبی، و سالارپور، ماشاله. (۱۴۰۰). بررسی عوامل مؤثر بر پذیرش فناوری‌های نوین آبیاری در بین کشاورزان منطقه سیستان. *مجله اقتصاد کشاورزی ایران*، ۸(۴)، ۲۳–۳۲. <https://www.sid.ir/paper/1053406/fa>

Abuzanounch, K. I. M., Al-Wesabi, F. N., Albraikan, A. A. R., Al Duhayyim, M., & Hamza, M. A. (2022). Design of Machine Learning Based Smart Irrigation System for Precision Agriculture. *Computers, Materials & Continua*, 72(1). <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.022648>

Ali, A., Hussain, T., & Zahid, A. (2025). Smart irrigation technologies and prospects for enhancing water use efficiency for sustainable agriculture. *AgriEngineering*, 7(4), 106. <https://www.mdpi.com/2624-7402/7/4/106>

Anjum, M. N., Cheema, M. J. M., Hussain, F., & Wu, R. S. (2023). Precision irrigation: Challenges and opportunities. In *Precision Agriculture: Evolution, Insights and Emerging Trends* (pp. 85–101). Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780443189531000076>

Angelakis, A. N., Zaccaria, D., Krasilnikoff, J., Salgot, M., Bazza, M., Roccaro, P., ... & Fereres, E. (2020). Irrigation of World Agricultural Lands: Evolution through the Millennia. *Water*, 12(5), 1285. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/5/1285>

Bayar, J., Ali, N., Cao, Z., Ren, Y., & Dong, Y. (2025). Artificial intelligence of things (AIoT) for precision agriculture: Applications in smart irrigation, nutrient and pest management. *Smart Agricultural Technology*, 5, 100860. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375525008603>

Colizzi, L., Dimauro, G., Guerriero, E., & Lomonte, N. (2025). Artificial intelligence and IoT for water saving in agriculture: A systematic review. *Smart Agricultural Technology*, 11, 101008. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375525002412>

Del-Coco, M., Leo, M., & Carcagni, P. (2024). Machine learning for smart irrigation in agriculture: How far along are we? *Information*, 15(6), 306. <https://www.mdpi.com/2078-2489/15/6/306>

Elshaikh, A., Elsiddig Elsheikh, & Mabrouki, J. (2024). Applications of Artificial Intelligence in Precision Irrigation. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, 6(2), 176–186. <https://nchr.elsevierpure.com/en/publications/applications-of-artificial-intelligence-in-precision-irrigation/>

- Sui, R. (2017). Irrigation scheduling using soil moisture sensors. *Journal of Agricultural Science*, 10(1), 1–11. U.S. Department of Agriculture. https://www.ars.usda.gov/ARSPUserFiles/60663500/Publications/Sui/2018/Sui_2018_JAS_10-1-1-11.pdf
- Tace, Y., Elfilali, S., Tabaa, M., & Leghris, C. (2023). Implementation of smart irrigation using IoT and artificial intelligence. *Mathematical Modeling and Computing*, 10(2), 575–589. <https://doi.org/10.23939/mmc2023.02.575>
- Togneri, R., Dos Santos, D. F., Camponogara, G., Nagano, H., Custodio, G., Prati, R., & Fernandes, S. (2022). Soil moisture forecast for smart irrigation: The primetime for machine learning. *Expert Systems with Applications*, 208, 118229. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417422009563>
- Touil, S., Richa, A., & Fizir, M. (2022). A review on smart irrigation management strategies and their effect on water savings and crop yield. *Irrigation and Drainage*, 71(4), 1234–1250. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ird.2735>
- Vallejo-Gómez, D., Osorio, M., & Hincapié, C. A. (2023). Smart irrigation systems in agriculture: A systematic review. *Agronomy*, 13(2), 342. <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/2/342>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X16303754>
- Zhao, H., Di, L., Guo, L., Zhang, C., & Lin, L. (2023). An automated data-driven irrigation scheduling approach using model simulated soil moisture and evapotranspiration. *Sustainability*, 15(17), 12908. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/17/12908>
- Review of Smart Sensing Technologies. *Sensors*, 25(12). <http://www.turjaf.com/index.php/TURSTEP/article/view/551>
- Mohyuddin, G., Khan, M. A., Haseeb, A., & Mahpara, S. (2024). Evaluation of machine learning approaches for precision farming in smart agriculture system: a comprehensive review. *IEEE Access*, 12, 10504121. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10504121/>
- Mousavi, S. M., & Khademzadeh, A. (2022). The role of low-power wide-area network technologies in Internet of Things: A systematic and comprehensive review. *Digital Communications and Networks*, 8(4), 503–522. <https://doi.org/10.1002/dac.5036>
- Oğuztürk, G. E. (2025). AI-driven irrigation systems for sustainable water management: A systematic review and meta-analytical insights. *Smart Agricultural Technology*, 11, 100982. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S272375525002151>
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management*, 108, 39–51. <https://ideas.repec.org/a/eee/agiwat/v108y2012icp39-51.html>
- Saikai, Y., Peake, A., & Chenu, K. (2023). Deep reinforcement learning for irrigation scheduling using high-dimensional sensor feedback. *PLOS Water*, 2(9), e0000169. <https://journals.plos.org/water/article?id=10.1371/journal.pwat.0000169>
- Seyedzadeh, A., & Khazaei, P. (2022). Irrigation management evaluation of multiple irrigation methods using performance indicators. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(4), 345–356. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09715010.2021.1891470>
- Singh, A., Kumar, R., & Sharma, P. (2025). A comprehensive review of recent advances in intelligent controller development for smart irrigation systems. *Discover Computing*, 28, Article 239. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10791-025-09762-4>

پی‌نوشت‌ها

- 1- Genetic Algorithm (GA)
- 2- Particle Swarm Optimization (PSO)