

Article Type

Review Article / Technical paper

مروری. ترویجی

نوع مقاله

Identification of Smart Irrigation Management Methods and Tools and Their Impact on Optimizing Irrigation Water Consumption

شناخت روش‌ها و ابزارهای مدیریت هوشمند آبیاری و تأثیر آن‌ها در بهینه‌سازی مصرف آب آبیاری

I. Hajirad 

ایمان حاجی راد

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

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

Email: i.hajirad@ut.ac.ir

رایانامه: i.hajirad@ut.ac.ir

Received ➤ 22-12-2024
Revised ➤ 11-02-2025
Accepted ➤ 14-02-2025
Available Online ➤ 15-08-2025

تاریخ دریافت ➤ ۱۴۰۳/۱۰/۰۲
تاریخ بازنگری ➤ ۱۴۰۳/۱۱/۲۳
تاریخ پذیرش ➤ ۱۴۰۳/۱۱/۲۶
تاریخ انتشار ➤ ۱۴۰۴/۰۵/۲۴

Abstract

Integrating Internet of Things (IoT) technology with traditional irrigation systems is an effective step toward advancing smart irrigation. Due to its critical role in ensuring food security and preserving global water resources, optimal water management has become a major challenge. Traditional irrigation methods in many regions lead to the waste of both water and human resources. Smart irrigation systems are designed to optimize water use and enhance agricultural productivity. In addition to reducing water consumption, these systems improve efficiency and overall agricultural performance. Various techniques have been developed to assess soil moisture and plant water stress, helping to prevent unnecessary irrigation. This study first examines different smart irrigation management methods and the tools utilized in these systems. It then compares these technologies with traditional irrigation methods and evaluates their impact on water conservation. Research findings indicate that smart irrigation systems based on soil moisture sensors, evapotranspiration, and rainfall have achieved water savings of 20% to 41.5%, 20% to 48%, and 7% to 50%, respectively, compared to traditional irrigation. Additionally, sensor-based optical systems have proven to be more effective than conventional experimental and laboratory methods in assessing plant and soil variations. Therefore, implementing smart irrigation systems in agriculture is recommended as an efficient strategy for optimizing water consumption.

Keywords: Evapotranspiration Controllers, Internet of Things (IoT), Smart Irrigation, Soil Moisture Sensors.

چکیده

یکپارچه‌سازی فناوری اینترنت اشیا (IoT) با سیستم‌های آبیاری سنتی، گامی مؤثر در پیشرفت آبیاری هوشمند است. مدیریت بهینه آب به دلیل اهمیت آن در تأمین امنیت غذایی و منابع آبی جهانی، به یکی از چالش‌های اساسی تبدیل شده است. روش‌های سنتی آبیاری در بسیاری از مناطق موجب هدررفت منابع آبی و انسانی می‌شوند. سامانه‌های آبیاری هوشمند با هدف استفاده بهینه از منابع آب و افزایش تولید محصولات طراحی شده‌اند که علاوه بر کاهش مصرف آب، کارایی و بهره‌وری کشاورزی را نیز افزایش می‌دهند. برای جلوگیری از آبیاری غیرضروری، تکنیک‌های مختلفی برای ارزیابی رطوبت خاک و تنش آبی گیاهان توسعه یافته است. در این مطالعه ابتدا به شناخت روش‌های مختلف مدیریت آبیاری هوشمند و ابزارهای مورد کاربرد اشاره شده و سپس مقایسه فناوری‌ها با روش‌های سنتی و تأثیر آن‌ها بر صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری بررسی شد. نتایج سوابق تحقیقات نشان داد سامانه‌های آبیاری هوشمند مبتنی بر حس‌گرهای رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و باران، به‌ترتیب ۲۰٪ تا ۴۱/۵٪، ۲۰٪ تا ۴۸٪ و ۷٪ تا ۵۰٪ در مصرف آب آبیاری نسبت به آبیاری سنتی صرفه‌جویی کرده‌اند. همچنین، سامانه‌های مبتنی بر حس‌گرهای نوری در ارزیابی تغییرات گیاه و خاک موفق‌تر از روش‌های تجربی و آزمایشگاهی عمل کرده‌اند. بنابراین، استفاده از سامانه‌های آبیاری هوشمند در کشاورزی به‌عنوان راهکاری کارآمد برای بهینه‌سازی مصرف آب پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کنترل‌کننده‌های تبخیر - تعرق، اینترنت اشیا، آبیاری هوشمند، حس‌گرهای رطوبت خاک.

How to cite this article:

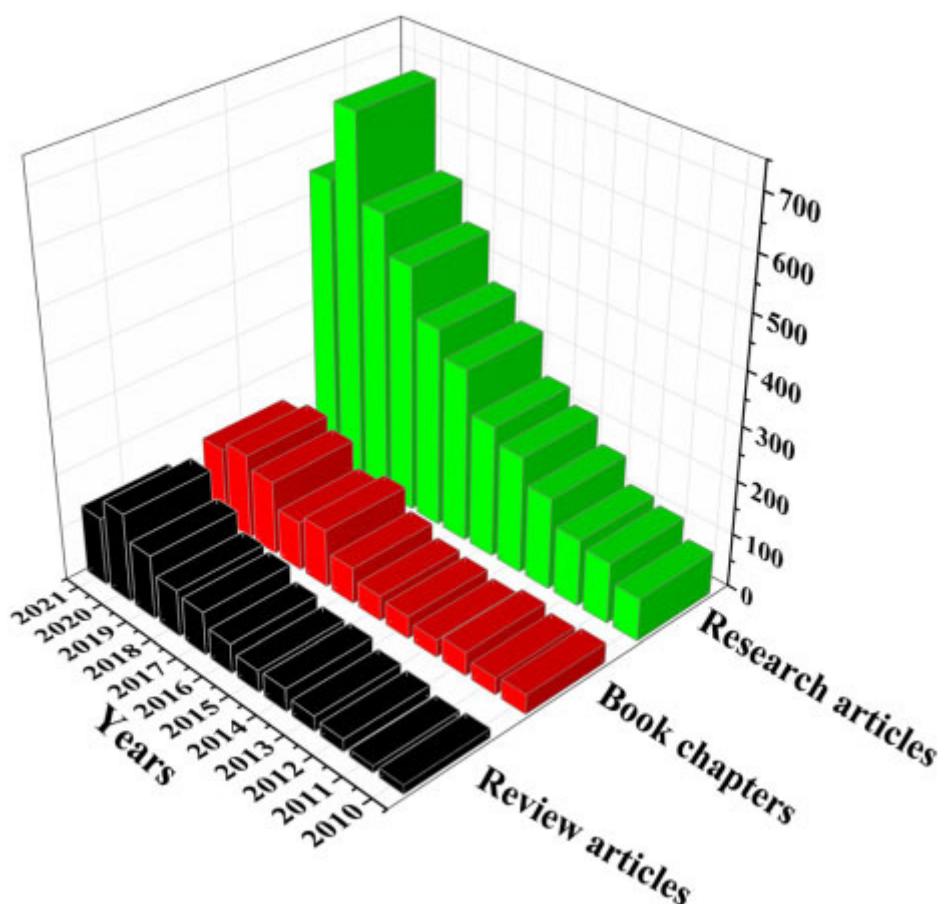
Hajirad, I. (2025). Identification of Smart Irrigation Management Methods and Tools and Their Impact on Optimizing Irrigation Water Consumption. Journal of Water and Sustainable Development, 12(2), 159-176. <http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v12i2.2412-1389>

شکل (۱) نشان‌دهنده تعداد مقاله‌های پژوهشی و منابع مرتبط با سامانه‌های آبیاری هوشمند طی ۱۲ سال اخیر است. به این ترتیب، استفاده از حس‌گرهای نوری مانند آن‌هایی که روی پهپادها و وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV)^۵ به‌عنوان مدیریت آبیاری مبتنی بر گیاه برای دستیابی به آبیاری دقیق در کشاورزی نصب شده‌اند، اخیراً توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. اصل این تکنیک بر این است که داده‌های پوشش گیاهی که از اطلاعات UAV به دست می‌آیند، برای پیش‌بینی شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)^۶ استفاده می‌شوند (Gao و همکاران، ۲۰۲۱).

حس‌گرها در اینترنت اشیا

در سامانه‌های اینترنت اشیا کشاورزی، حس‌گرها نقش اساسی در جمع‌آوری داده‌ها ایفا می‌کنند. این دستگاه‌های هوشمند به‌صورت هوشمندانه داده‌های جمع‌آوری شده را به محل‌های ذخیره‌سازی مشخص منتقل می‌کنند. حس‌گرها کمیت‌های دنیای واقعی را به سیگنال‌های الکتریکی قابل‌فهم برای کنترل‌کننده تبدیل می‌کنند. یکی از مهم‌ترین انواع حس‌گرها در کشاورزی، حس‌گر دما است (Hare و همکاران،

تقاضای جهانی برای غذا به دلیل رشد سریع جمعیت افزایش یافته و این موضوع فشار بیشتری بر منابع آبی وارد می‌کند. حدود ۷۰ درصد از برداشت‌های جهانی آب برای آبیاری مصرف می‌شود (Simionesei و همکاران، ۲۰۲۰). در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، بحران آب یکی از چالش‌های اصلی کشاورزی است که عمدتاً به دلیل آبیاری نادرست و بدون در نظر گرفتن نیاز آبی گیاهان ایجاد می‌شود و می‌تواند منجر به تنش آبی در گیاهان شود (Abioye و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، مدیریت بهینه آب آبیاری ضروری است. سامانه‌های آبیاری هوشمند با هدف صرفه‌جویی در مصرف آب و کاهش اثرات محیط زیستی طراحی شده‌اند. چندین روش برنامه‌ریزی آبیاری شامل حس‌گرهای رطوبت خاک (SMS)^۷، تبخیر-تعرق (ET)^۸ و حس‌گرهای باران (RS)^۹ برای بهینه‌سازی مصرف آب استفاده شده است. حس‌گرهای SMS میزان رطوبت خاک (SMC)^۴ را تخمین زده و رویدادهای آبیاری را بر اساس آستانه تعیین‌شده متوقف می‌کنند. همچنین، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر داده‌های تاریخی و سیگنال‌محور در دهه‌های اخیر برای مدیریت آبیاری استفاده شده‌اند (Touil و همکاران، ۲۰۲۲).



شکل ۱- تعداد مقالات در مورد سیستم‌های آبیاری هوشمند (Touil و همکاران، ۲۰۲۲)

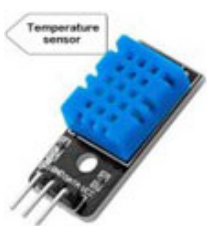
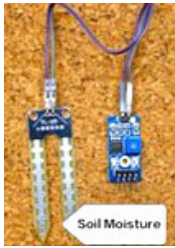
۲۰۱۵). در جدول (۱)، انواع حسگرهای مورد استفاده در آبیاری هوشمند بررسی شده است.

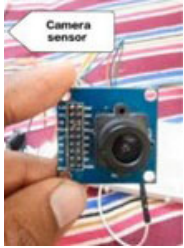
اینترنت اشیا (IoT)^۷، مفهومی است که ابزارهای بی سیم و موبایل را از طریق اینترنت به هم متصل می کند و نقش حیاتی در بسیاری از زمینه ها، به ویژه در بخش کشاورزی ایفا می کند (Richa و همکاران، ۲۰۲۱).

ترکیب IoT با حسگرهای بیان شده برای اتصال به پلتفرم های داده به منظور ارائه داده های لحظه ای و اتخاذ تصمیمات

آگاهانه تر، راه حل های هوشمندانه را برای آبیاری فراهم می سازد. همچنین، مدیریت آبیاری و بهبود بهره وری آب محصولات زراعی با استفاده از تکنیک های کم آبیاری (DI)^۸ در دهه های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. اصل این روش بر پایه استفاده از حجم آبی کمتر از نیازهای گیاه استوار است (Kovalenko و همکاران، ۲۰۲۱). به این ترتیب، کارایی استفاده از آب افزایش یافته، با این وجود عملکرد محصول می تواند بالاتر از حد قابل قبول حفظ شود.

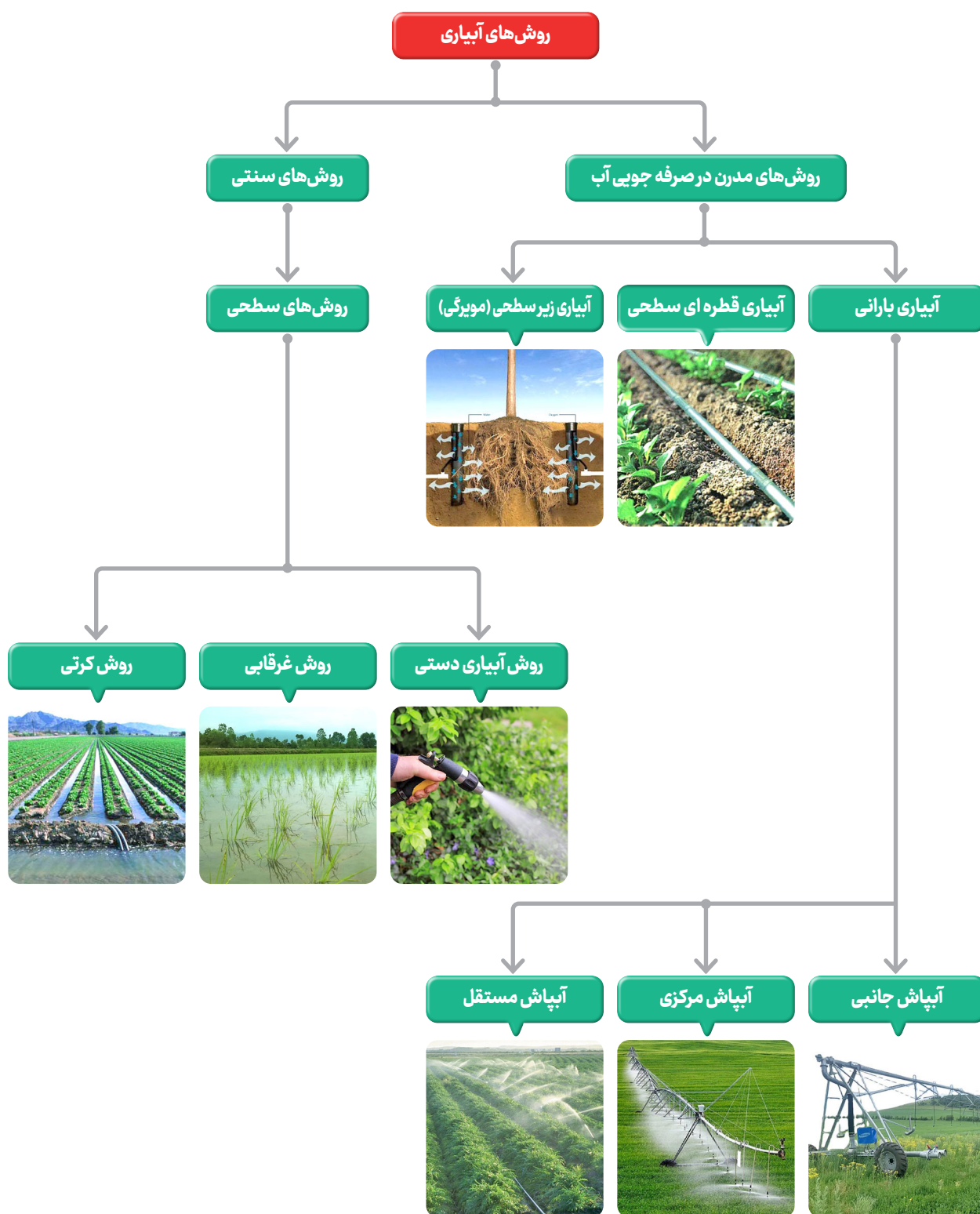
جدول ۱- انواع حسگرهای مورد استفاده در سامانه آبیاری هوشمند

حسگر	مزایا و کاربردها	شکل
حسگر دما	حسگرهای دما در سامانه های کشاورزی مبتنی بر اینترنت اشیا، با پایش لحظه ای دمای خاک و هوا، به کشاورزان امکان می دهند تا شرایط جوی را برای رشد بهینه محصولات مدیریت کنند و از آسیب های ناشی از ناهنجاری های دمایی پیشگیری نمایند (Kumar و همکاران، ۲۰۲۴). این حسگرها همچنین در تنظیم برنامه های آبیاری، مدیریت آفات و ایجاد شرایط مطلوب در گلخانه ها کاربرد دارند و به ارتقاء بازدهی کشاورزی کمک می کنند (Munir و همکاران، ۲۰۱۹).	
حسگر PH	حسگرهای pH با اندازه گیری میزان اسیدی یا قلیایی بودن خاک، به کشاورزان کمک می کنند تا از مناسب بودن شرایط خاک برای رشد گیاهان اطمینان حاصل کرده و از تأثیرات منفی کمبود مواد مغذی یا کوددهی بیش از حد جلوگیری کنند و همچنین در کشاورزی هیدروپونیک، این حسگرها نقش کلیدی در پایش و تنظیم محیط رشد گیاهان دارند (Kumar و همکاران، ۲۰۲۴).	
حسگر رطوبت هوا	مانیتورهای رطوبت با اندازه گیری رطوبت هوا، به کشاورزان امکان می دهند تا برنامه های آبیاری را بر اساس شرایط محیطی تنظیم کرده و مصرف آب را بهینه کنند. ادغام این حسگرها در سامانه های کشاورزی مبتنی بر اینترنت اشیا، ضمن کاهش احتمال بیماری ها و آفات، بازدهی محصولات و پایداری کشاورزی را افزایش می دهد (Juroszek و Tiedemann، ۲۰۱۱).	
حسگر رطوبت خاک	حسگرهای رطوبت خاک با اندازه گیری میزان آب موجود در خاک، کشاورزان را در تصمیم گیری دقیق درباره زمان بندی آبیاری و مدیریت مصرف آب یاری می دهند، که منجر به بهبود کارایی آبیاری و جلوگیری از هدررفت آب می شود. این حسگرها به دو نوع تماسی و غیرتماسی تقسیم می شوند و اطلاعاتی دقیق و به موقع برای رشد بهینه محصولات ارائه می کنند (Lloret و همکاران، ۲۰۲۱).	
حسگر باران	باران سنج با اندازه گیری میزان بارش و نرخ بارندگی، کشاورزان را در مدیریت آب و جلوگیری از آبیاری بیش از حد یاری می دهد و از تخریب مزارع در اثر سیلاب پیشگیری می کند. این ابزار که بخشی از سیستم های پیشرفته مدیریت آب است، به حفظ منابع آبی و بهبود سلامت محصولات کمک می کند (Prakasam و همکاران، ۲۰۲۱).	

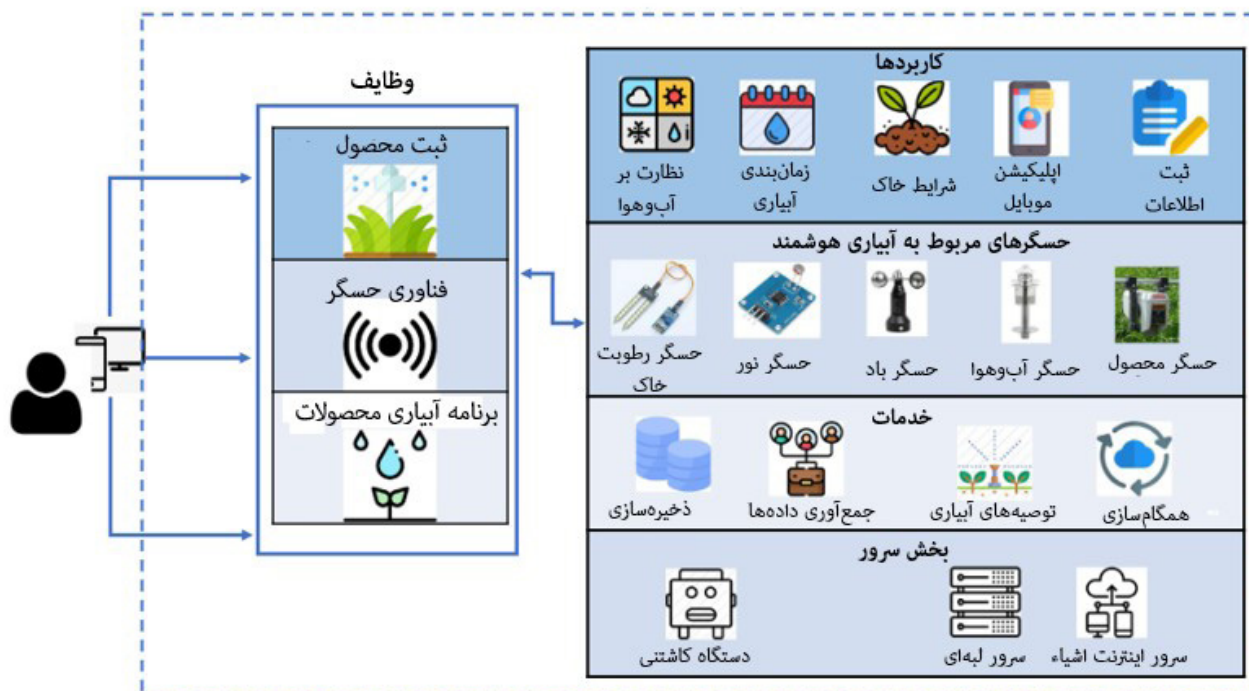
	نمایشگر سرعت باد با اندازه‌گیری جهت و سرعت باد، به کشاورزان در زمان‌بندی بهینه برداشت محصول و سم‌پاشی کمک کرده و خطرات ناشی از شرایط نامساعد باد را کاهش می‌دهد (Wang و همکاران، ۲۰۲۰). این ابزار با بهبود روش‌های کشاورزی و افزایش ایمنی، نقش مهمی در مدیریت مزارع ایفا می‌کند (Talaviya و همکاران، ۲۰۲۰).	ردیاب سرعت باد^۹
	حسگر NPK با اندازه‌گیری نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک، به کشاورزان در ارزیابی حاصلخیزی خاک و تعیین مقدار و نوع بهینه کود کمک می‌کند. این ابزار با حفظ تعادل تغذیه‌ای خاک، بازدهی محصولات را افزایش داده و از زیان‌های ناشی از کمبود مواد مغذی جلوگیری می‌کند (Potdar و همکاران، ۲۰۲۱).	نیتروژن، فسفر و پتاسیم (NPK)
	حسگرهای دوربین RGB با ثبت تصاویر بصری، در ارزیابی سلامت محصولات، افزایش امنیت و تعیین زمان بهینه برداشت نقش دارند. این داده‌ها با پردازش تصویر، کشاورزان را در پایش رنگ برگ‌ها، الگوهای رشد و سلامت کلی محصولات یاری داده و به مدیریت مؤثر مزارع و افزایش بازده کشاورزی کمک می‌کنند (Condotta و همکاران، ۲۰۲۰).	حسگر دوربین^{۱۰}
	حسگر LDR با سنجش شدت نور، در گلخانه‌ها برای تنظیم خودکار سایبان‌ها به کار می‌رود و از آسیب نور بیش‌ازحد به گیاهان جلوگیری می‌کند. این حسگر با ایجاد شرایط نوردهی بهینه، رشد سالم گیاهان در مراحل مختلف را تضمین می‌کند (Román-Raya و همکاران، ۲۰۲۰). کاربرد آن در افزایش بهره‌وری و سلامت محصولات کشاورزی اهمیت دارد.	حسگر مقاومت وابسته به نور (LDR)^{۱۱}

(Abioye و همکاران، ۲۰۲۰؛ Rathore و همکاران، ۲۰۲۱). یکی از مهم‌ترین مزایای آبیاری بر پایه IoT صرفه‌جویی در مصرف آب است. به‌طور مثال، با ارسال اطلاعات دقیق از وضعیت خاک و گیاه، آبیاری فقط زمانی انجام می‌شود که نیاز واقعی وجود دارد و از هدررفت آب در اثر تبخیر یا نفوذ اضافی جلوگیری می‌شود. علاوه‌براین، این فناوری منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی، بهبود کیفیت محصولات کشاورزی و کاهش اثرات محیط زیستی مرتبط با مصرف بی‌رویه آب می‌شود. در نتیجه، آبیاری مبتنی بر IoT راه‌حلی مؤثر برای مقابله با چالش‌های مربوط به مدیریت آب و افزایش بهره‌وری کشاورزی در آینده است (Abioye و همکاران، ۲۰۲۰). شکل (۳) نمونه‌ای از یک سیستم آبیاری هوشمند را نشان می‌دهد.

شکل (۲) انواع روش‌های آبیاری را نشان می‌دهد. از طرفی، آبیاری مبتنی بر اینترنت اشیاء (IoT) به عنوان یک رویکرد هوشمند و پیشرفته در مدیریت منابع آبی، مزایای قابل توجهی در مقایسه با روش‌های سنتی آبیاری ارائه می‌دهد. این سیستم‌ها با استفاده از حسگرهای هوشمند، اطلاعات دقیقی از رطوبت خاک، دما، شرایط جوی و نیازهای گیاهان جمع‌آوری می‌کنند و این داده‌ها را به‌صورت بلادرنگ به یک سامانه مرکزی ارسال می‌نمایند. با تحلیل این اطلاعات از طریق الگوریتم‌های پیشرفته، تصمیم‌گیری بهینه برای زمان و میزان آبیاری صورت می‌گیرد. در مقایسه با روش‌های دستی یا سامانه‌های آبیاری اتوماتیک ساده، این فناوری، امکان کاهش هدررفت آب، افزایش بهره‌وری و جلوگیری از بیش آبیاری یا کم آبیاری را فراهم می‌کند.



شکل ۲- انواع روش‌های آبیاری (Abioye و همکاران، ۲۰۲۰)



شکل ۳- ساختار کلی سیستم آبیاری هوشمند (Obaideen و همکاران، ۲۰۲۲)

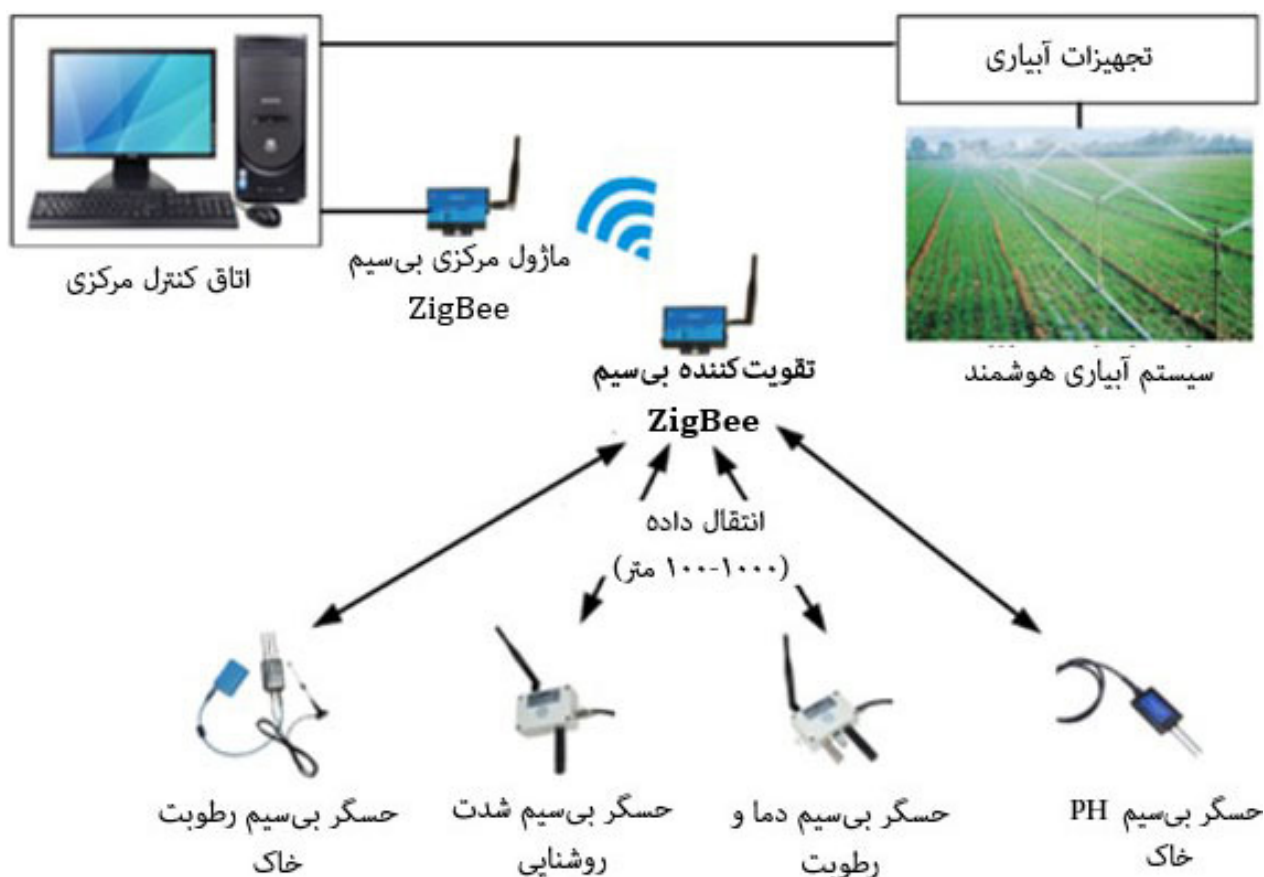
استراتژی‌های هوشمند برای آبیاری دقیق

آبیاری دقیق^{۱۳} یک روش پیشرفته مدیریت آبیاری است که با به‌کارگیری استراتژی‌های هوشمند، هدف آن تامین آب به مقدار مناسب، در زمان مناسب و در مکان مناسب، البته با توجه به نیازهای خاص هر بخش از مزرعه یا زمین کشاورزی است (Abioye و همکاران، ۲۰۲۰؛ Lakhia و همکاران، ۲۰۲۴). به‌طور کلی، چهار استراتژی آبیاری هوشمند شامل حسگرهای باران، حسگرهای رطوبت خاک، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر تبخیر-تعرق و حسگرهای نوری (OS)^{۱۴} در بازار موجود هستند. در این بخش، تأثیر این تکنیک‌ها بر صرفه‌جویی در آب و کیفیت محصول بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که این فناوری‌ها با تنظیم دقیق میزان و زمان آبیاری بر اساس نیاز واقعی گیاهان، از آبیاری بیش از حد یا کمتر از نیاز جلوگیری می‌کنند. این بهینه‌سازی در آبیاری باعث می‌شود که گیاهان به صورت متعادل و مناسب رشد کنند، از تنش آبی و آسیب به ریشه‌ها دور بمانند و در نتیجه محصولاتی با کیفیت بهتر، اندازه یک‌نواخت‌تر و طعم مطلوب‌تر تولید شود.

۱. مدیریت آبیاری مبتنی بر رطوبت خاک

مدیریت آبیاری براساس رطوبت خاک، یک روش علمی و کارآمد است که میزان و زمان آبیاری را بر اساس اندازه‌گیری

دقیق رطوبت خاک تعیین می‌کند. در این روش، حسگرهای رطوبت در عمق‌های مختلف خاک نصب می‌شوند و داده‌های بلادرنگی از وضعیت رطوبت خاک ارائه می‌دهند. این داده‌ها تحلیل شده و مشخص می‌شود که آیا خاک به آبیاری نیاز دارد یا خیر؟ به‌طور معمول، در خاک‌های شنی باید حسگرها در عمق کمتری نصب شوند (حدود ۱۵ تا ۳۰ سانتیمتر)، درحالی‌که در خاک‌های لومی یا رسی این عمق ممکن است بیشتر باشد (حدود ۳۰ تا ۶۰ سانتیمتر) (Zeitoun و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، برای به دست آوردن داده‌های دقیق‌تر در سطح مزرعه، لازم است که برای هر هکتار از زمین کشاورزی حداقل ۳ تا ۵ حسگر نصب شود، زیرا توزیع رطوبت خاک می‌تواند در نقاط مختلف مزرعه متفاوت باشد (Marek و همکاران، ۲۰۲۳). با این سامانه، آبیاری تنها زمانی انجام می‌شود که سطح رطوبت خاک به زیر آستانه بحرانی تعریف شده برسد، که این امر به کاهش هدررفت آب و جلوگیری از آبیاری بیش از حد کمک می‌کند. استفاده از این فناوری، که اغلب در بستر اینترنت اشیا اجرا می‌شود، نه تنها منابع آبی را بهینه مدیریت می‌کند، بلکه باعث افزایش کیفیت محصولات کشاورزی و کاهش هزینه‌های عملیاتی نیز می‌شود. از طرفی دیگر، بیلان آب خاک و نیاز آبی محصولات مختلف معمولاً با اندازه‌گیری رطوبت خاک تخمین زده می‌شود (Qin و همکاران،



شکل ۴- نمودار شماتیک کاربرد تکنولوژی ZigBee در آبیاری هوشمند (Tang و همکاران، ۲۰۲۴)

پیشنهاد شد که پارامترهای ورودی مانند دما، رطوبت خاک و رطوبت هوا را محاسبه کرده و خروجی‌های وضعیت موتور را تولید می‌کند. این سیستم در مقایسه با آبیاری قطره‌ای و آبیاری غرقابی از نظر کارایی مصرف آب، در مدت ۷ ساعت عمل پمپاژ را انجام داد، درحالی‌که دو روش دیگر بین ۱۲ تا ۲۰ ساعت به طول می‌انجامیدند (Krishnan و همکاران، ۲۰۲۰).
 باین حال، محدودیت اصلی این سامانه این است نیاز به تنظیمات جزئی در مقادیر منطق فازی دارد، زیرا مقدار آب مورد نیاز برای گیاهان مختلف متفاوت است (Sudharshan و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه‌برآن در پژوهش دیگری، برای بررسی وضعیت سلامت گیاهان و مصرف آب برگ خردل در گلخانه، ایستگاه هواشناسی مبتنی بر اینترنت اشیا نصب شد تا میزان تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) را محاسبه کند و دوربین به Raspberry Pi متصل شد. داده‌های رطوبت حجمی خاک و ET_0 برای تنظیم آبیاری قطره‌ای با استفاده از ESPresso Lite V2 (Shenzhen Jeking Electronic Corp. China) و Raspberry Pi 3 به‌عنوان واحد کنترل و پردازش استفاده شد. برای تعیین زمان آبیاری سامانه، داده‌های رطوبت حجمی

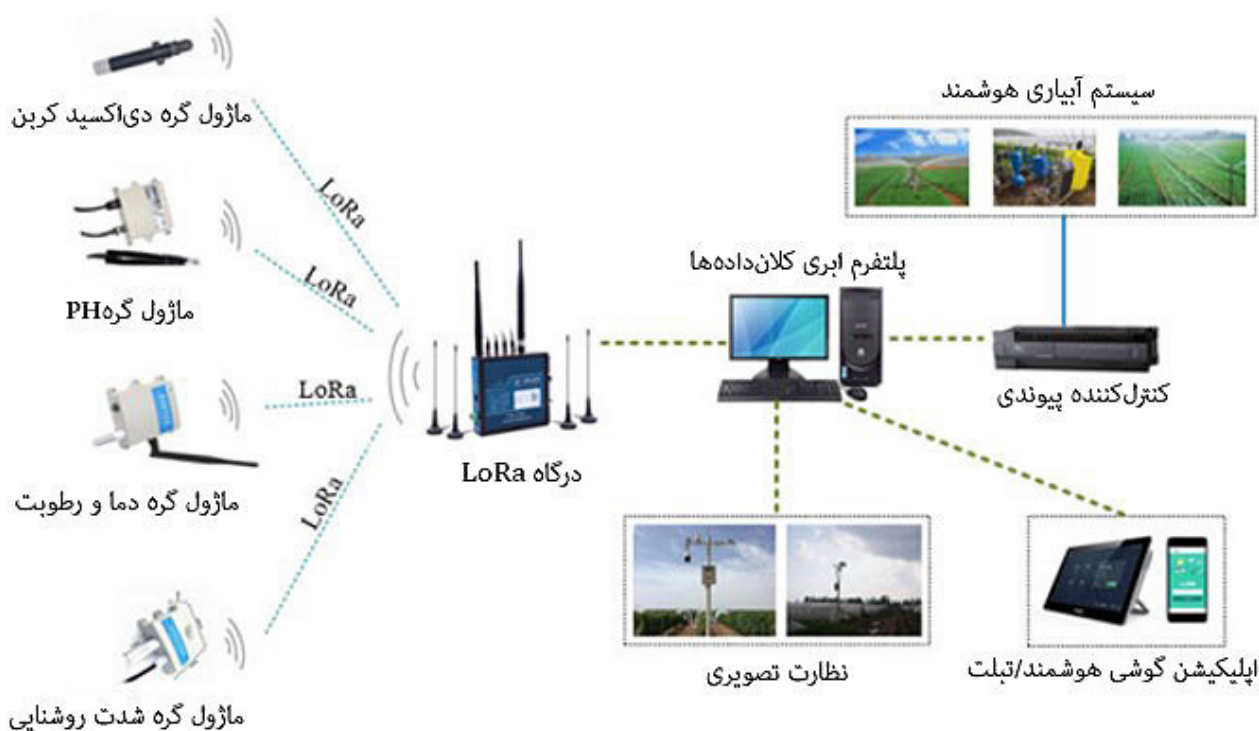
Wang و همکاران، (۲۰۲۱) به بررسی نظارت بر آبیاری با استفاده از حسگرهای رطوبت خاک پرداختند. در این روش‌ها، داده‌های حسگر برای برنامه‌ریزی آبیاری استفاده می‌شود، به‌طوری‌که اگر رطوبت خاک از حد آستانه قابل تنظیم بیشتر شود، آبیاری متوقف می‌شود.

از سوی دیگر، استفاده از فناوری شبکه بی‌سیم ZigBee در آبیاری هوشمند (شکل ۴) برای نظارت بر رطوبت خاک، توجه بسیاری از پژوهشگران را جلب کرده است (Saraf و Gawali، ۲۰۱۷). در این سیستم، گره‌ای با حسگرهایی وجود داشت که دما، رطوبت و محتوای رطوبت خاک را اندازه‌گیری کرده و این مقادیر را با مقادیر از پیش تعیین‌شده مقایسه می‌کرد. سیستم بی‌سیم برای نظارت مستمر بر وضعیت شیرهای پمپ آب با استفاده از فناوری ZigBee طراحی و پیاده‌سازی شد (Rasin و همکاران، ۲۰۰۹).

سامانه‌های منطق فازی در مطالعات مختلف برای کمک به کشاورزان در گرفتن تصمیمات هوشمندانه در مورد نیازهای آبیاری استفاده شده‌اند. در یکی از این مطالعات، یک سامانه کنترل مبتنی بر منطق فازی با استفاده از اینترنت اشیا

دیگر، فناوری LoRa، یک فناوری نوآورانه ارتباطات بی‌سیم است که یک طرح انتقال بی‌سیم با برد طولانی را بر اساس فناوری طیف گسترده ارائه می‌دهد. این فناوری توسط شرکت Semtech در ایالات متحده پذیرفته و ترویج شده است. LoRa امکان ایجاد سیستم‌های با برد بلند و ظرفیت بالا را درحالی‌که مصرف انرژی پایین و عمر باتری طولانی را حفظ می‌کند، فراهم می‌آورد، که این ویژگی پیش از این چالشی برای روش‌های انتقال بی‌سیم سنتی بود. لایه فیزیکی فناوری انتقال بی‌سیم LoRa بر اساس فناوری CSS استوار است که به آن اجازه می‌دهد موانع را بهتر پشت سر بگذارد (Aldhaheiri و همکاران، ۲۰۲۴). LoRa پتانسیل بالایی برای مدیریت آبیاری هوشمند کشاورزی دارد. دیاگرام شماتیک فناوری LoRa در آبیاری کشاورزی در شکل (۵) نشان داده شده است. فناوری LoRa برای جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل بلادرنگ و آبیاری خودکار استفاده می‌شود و قابلیت ارتباط در مسافت‌های تا ۱۵ کیلومتر را دارد. با استفاده از دروازه LoRa، می‌توان ده‌ها هزار گره را به هم متصل کرد و پوشش شبکه بی‌سیم وسیعی ایجاد کرد. این فناوری مشکلات آبیاری در مناطق وسیع، موقعیت‌های جغرافیایی دورافتاده و سیگنال‌های ضعیف موبایل را حل می‌کند و امکان جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ و نظارت از راه دور بر رطوبت خاک و اطلاعات هواشناسی را فراهم می‌آورد (Aldhaheiri و همکاران، ۲۰۲۴).

و ET_0 به‌صورت آنی ترکیب شدند تا الگوریتم تصمیم‌گیری آبیاری که بر روی Raspberry Pi تعبیه شده بود، توسعه یابد (Abioye و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین، ابزارهای بلاک‌چین نقش حیاتی را با ارائه مقیاس‌پذیری، حریم خصوصی و قابلیت اطمینان در سامانه‌های آبیاری هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا ایفا کردند (Bodkhe و همکاران، ۲۰۲۰). یک سامانه آبیاری پیشرفته با امنیت بلاک‌چین و سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری فازی طراحی شده است که ارتباط میان ابزارهای هوشمند، حسگرهای رطوبت خاک، دما و رطوبت، عملگرها، فضای ذخیره‌سازی ابری و کاربران شبکه را تسهیل می‌سازد (Munir و همکاران، ۲۰۱۹). ابزارهای بلاک‌چین به سامانه‌های آبیاری هوشمند کمک می‌کنند تا هم امن‌تر و هم کارآمدتر شوند. این ابزارها اطلاعاتی مانند میزان رطوبت خاک، دمای هوا و مقدار آبی که مصرف شده را در فضایی امن و به‌صورت غیرقابل تغییر ذخیره می‌کنند، طوری که فقط افراد مجاز به آن دسترسی داشته باشند. همچنین، بلاک‌چین می‌تواند فرآیند آبیاری را خودکار کند؛ یعنی به کمک قراردادهای هوشمند، وقتی داده‌های حسگرها نشان دهند که خاک نیاز به آب دارد، سامانه به‌طور خودکار آبیاری را فعال می‌کند. این کار باعث می‌شود که بدون نیاز به دخالت مداوم انسان، آب به‌صورت بهینه مصرف شود و درعین حال، امنیت و اطمینان از صحت داده‌ها نیز حفظ شود (Munir و همکاران، ۲۰۱۹). از طرفی



شکل ۵- کاربرد فناوری LoRa در آبیاری (Tang و همکاران، ۲۰۲۴)

۲. مدیریت آبیاری مبتنی بر کنترلر ET

مدیریت آبیاری بر اساس کنترلر تبخیر-تعرق، یک فناوری پیشرفته است که با محاسبه دقیق میزان آب از دست رفته از سطح خاک و گیاهان به واسطه تبخیر-تعرق، فرآیند آبیاری را بهینه‌سازی می‌کند. این حس‌گرها از داده‌های هواشناسی مانند دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی استفاده می‌کنند تا میزان آب مورد نیاز گیاهان را تخمین بزنند. بر اساس این اطلاعات، سیستم به صورت خودکار زمان و مقدار آبیاری را تنظیم می‌کند. این روش با تطبیق آبیاری با شرایط واقعی محیط و نیاز گیاه، به کاهش هدررفت آب، افزایش بهره‌وری و حفظ سلامت خاک و گیاه کمک می‌کند. کنترلر ET به ویژه در مناطقی با محدودیت منابع آبی، نقش مهمی در پایداری کشاورزی و مدیریت هوشمندانه آب ایفا می‌کند. علاوه بر استفاده از SMS برای نظارت و پایش آبیاری، برآوردهای ET نیز برای برنامه‌ریزی آبیاری در پژوهش‌های مختلف استفاده شدند و به عنوان یک فناوری بالقوه صرفه‌جویی در آب در نظر گرفته شدند (Seagraves و همکاران، ۲۰۱۰). این استراتژی، به طور ایده‌آل آبیاری را بر اساس نیازهای ET محصول انجام می‌دهد. تبخیر-تعرق گیاه (ET_g) شامل تبخیر از سطح خاک و تعرق از طریق تاج‌های گیاهان است. ET_c می‌تواند به عنوان حاصل ضرب ET_0 و ضریب گیاهی (K_p) اندازه‌گیری شود که وابسته به محصول، محیط تولید و مرحله توسعه است (Davis و همکاران، ۲۰۰۷). نیاز آبی محصول (CWR) مقدار آبی است که برای جایگزینی ET مورد نیاز است. پارامترهای جوی (یعنی دما، رطوبت نسبی و سرعت باد)، عوامل محصول (یعنی نوع محصول) و عوامل مدیریتی و محیطی (یعنی حاصلخیزی خاک) می‌توانند بر نیاز آبی محصول خاص (ET_c) تأثیر بگذارند. کنترلرهایی که از اطلاعات جوی برای برآورد ET استفاده می‌کنند، به عنوان کنترلرهای ET شناخته می‌شوند (Isaya و همکاران، ۲۰۰۹). بر اساس روش‌های دریافت اطلاعات ET، کنترلرهای ET به سه کلاس اصلی دسته‌بندی شده‌اند:

۱. کنترلرهای مستقل که متغیرهای جوی را از حس‌گرهای در محل، تعیین کرده و سپس ET را برآورد می‌نمایند.
۲. کنترلرهای سیگنال‌محور که داده‌های ET و اطلاعات بارش را از طریق ارتباط بی‌سیم از ایستگاه‌های هواشناسی (سیگنال‌های ماهواره‌ای) جمع‌آوری می‌کنند.
۳. کنترلرهای مبتنی بر تاریخچه که به اطلاعات تاریخی ET ماهانه برای منطقه تکیه دارند (Touil و همکاران، ۲۰۲۲). در سامانه‌های آبیاری هوشمند مبتنی بر تبخیر-تعرق، سه کنترلر اصلی برای بهینه‌سازی مصرف آب استفاده می‌شود که عبارتند از:



شکل ۶- دسته‌های کنترل کننده تبخیر-تعرق (ET) مورد استفاده در آبیاری هوشمند (Touil و همکاران، ۲۰۲۲)

1. Weathermatic (Weathermatic, Inc., Dallas, TX)
2. Toro (Toro Company, Inc., Riverside, CA)
3. ETwater (ETwater Systems LLC, Corte Madera, CA)

لازم به ذکر است کنترلر Weathermatic یک سیستم مستقل است که با استفاده از حس‌گرها و تحلیل داده‌های محیطی مانند رطوبت خاک و دما، آبیاری را بر اساس شرایط آب و هوایی انجام می‌دهد. از طرفی کنترلر Toro از داده‌های محیطی و پیش‌بینی‌های جوی برای تنظیم زمان و مقدار آبیاری به طور خودکار بهره می‌برد (شکل ۶). در نهایت کنترلر ETwater از اطلاعات بی‌سیم ایستگاه‌های هواشناسی و حس‌گرها برای محاسبه تبخیر-تعرق (ET_0) استفاده کرده و تصمیمات آبیاری را بر اساس آن اتخاذ می‌کند. کنترلرهای ET در آبیاری هوشمند با کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری، راهکاری مؤثر و کاربردی هستند به عنوان مثال، در یک مطالعه شبیه‌سازی که با استفاده از نرم‌افزار مدل کیفیت آب منطقه ریشه^{۱۹} انجام شد (Gu و همکاران، ۲۰۱۷)، کمبودهای تأمین آب شناسایی شدند و داده‌های پیش‌بینی آب و هوای ۴ روزه (بارش، دمای هوا، رطوبت، سرعت باد و تابش) برای مدیریت آبیاری سويا و ذرت توسعه یافتند. با شبیه‌سازی ظهور تنش آبی و سپس تعیین حجم آب آبیاری لازم برای بازگرداندن محتوای آب خاک فعلی به محتوای آب خاک در عمق کامل ریشه گیاه، ظرفیت صرفه‌جویی در آب این مدل تا ۳۵٪ بود بدون اینکه بر عملکرد محصول تأثیر بگذارد.

۳. مدیریت آبیاری مبتنی بر حس گر باران (RS)

حس گر باران، به عنوان یکی از ساده ترین استراتژی های حس گر آبیاری در نظر گرفته می شود که قیمتی نسبتاً پایین دارد. حس گر باران می تواند دور آبیاری برنامه ریزی شده را تا زمانی که مقدار معین باران دریافت شده، که موجب غیرفعال شدن شیرهای برقی می شود، به تعویق بیندازد یا متوقف سازد (Dobbs و همکاران، ۲۰۱۳). معمولاً حس گر باران باید در نواحی باز که بدون مانع بوده و در معرض باران قرار دارند نصب شوند. با استفاده از حس گر باران، می توان از رواناب یا نفوذ عمقی آب به خاک کاهش داد و از رشد علف های هرز و شیوع بیماری ها جلوگیری نمود و همچنین رویدادهای آبیاری غیر ضروری را حذف کرد. علاوه بر این، حس گر باران دارای عمر طولانی، بیش از ۱۰ سال طبق گفته تولید کنندگان و دارای ضمانت ۵ ساله است (Cardenas-Lailhacar و Dukes، ۲۰۰۸). در پژوهشی، دو نوع حس گر باران با مدل های Mini-Clik و Rain-Clik از نوع بی سیم، از نظر پتانسیل صرفه جویی در مصرف آب ارزیابی شدند، که مدل Rain-Clik از نوع بی سیم، بالاترین پتانسیل صرفه جویی در مصرف آب معادل ۴۴٪ را به خود اختصاص داد (Cardenas-Lailhacar و Dukes، ۲۰۰۸). به این ترتیب، صرفه جویی در آب سیستم های آبیاری Bahía grass مبتنی بر حس گر باران در مقایسه با آبیاری سنتی تا ۴۹٪ در عمق آبیاری، معادل ۳۲ میلی متر و دور آبیاری ۲ روز در هفته رسید. علاوه بر این، میزان $\text{NH}_4\text{-N}$ و $\text{NO}_3\text{-N}$ موجود زهاب خروجی نیز با استفاده از حس گر باران مدیریت شدند (Dobbs و همکاران، ۲۰۱۴). در پژوهشی دیگر، برای تعیین مدت زمان وقوع بارش در زمان واقعی، حس گر باران به یک میکروکنترلر مدل ARM7

(Shenzhen Leadwon Electronic Technology Co., Ltd.

China) متصل شد و مقدار آب موجود در خاک بر اساس حس گر رطوبت خاک تعیین شد. از طرفی، الکتروموتور پمپ آبیاری با استفاده از داده های حس گر رطوبتی، ارزیابی شد و در نهایت این اطلاعات از طریق فناوری های GSM^{۲۰} به گوشی هوشمند کاربر (کشاورز) منتقل شد. نتایج این بررسی ها نشان داد صرفه جویی در مصرف آب سامانه آزمایش شده بر روی کشت گوجه فرنگی تا ۵۰٪ در مرحله جوانه زنی و بیش از ۳۰٪ در دوره های رسیدن میوه نسبت به آبیاری قطره ای بود (Barkunan و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین، در پژوهشی دیگر، همان سامانه آبیاری هوشمند برای نظارت بر آبیاری شالی مورد استفاده قرار گرفت و مشخص شد که استفاده از این روش می تواند منجر به صرفه جویی در مصرف آب به میزان ۴۱/۵٪ و ۱۳٪ از آب نسبت به روش های آبیاری سنتی و قطره ای شود (Barkunan و همکاران، ۲۰۱۹).

نمونه های از سامانه های آبیاری هوشمند که با استفاده از روش های مذکور بررسی شد، در جدول (۱) به طور خلاصه آورده شده است. می توان نتیجه گیری کرد که حس گر رطوبتی خاک (SMS) و کنترلرهای ET استراتژی های امیدوارکننده ای برای افزایش کارایی مصرف آب هستند و به دلیل دقت و پتانسیل بالای صرفه جویی در آب بدون تأثیر بر کیفیت محصول، نسبت به RS، بیشتر برای مدیریت آبیاری به کار می روند. همان طور که در جدول (۲) نشان داده شده است، مدیریت آبیاری با دستگاه های بیان شده، مقدار صرفه جویی های متفاوتی در آب را نشان داد، زیرا این موضوع بستگی به کاربرد، تکنیک های استفاده شده و شرایط اقلیمی دارد.

جدول ۲- نمونه هایی از سوابق تحقیقاتی در خصوص کاربرد سامانه های آبیاری هوشمند و تأثیر آن ها در صرفه جویی مصرف آب

گیاه	کشور	استراتژی (سایر پارامترهای ورودی)	حس گر ها	روش آبیاری	اینترنت اشیاء (IoT)	درصد صرفه جویی در مصرف آب	منابع
سیب زمینی	اندونزی	حس گر رطوبت خاک	Capacitive Soil Moisture Sensor	آبیاری قطره ای	✓	۴۵ درصد	Inayah و همکاران (۲۰۲۵)
موز	هند	حس گر رطوبت خاک	-	آبیاری قطره ای	×	۲۰ درصد	Panigrahi و همکاران (۲۰۱۹)
سیب زمینی	چین	حس گر رطوبت خاک	TMH-2000	آبیاری قطره ای	✓	۳ درصد	Liao et و همکاران (۲۰۲۱)
-	هند	حس گر رطوبت خاک و باران	DHT11	آبیاری قطره ای	✓	۱۳ - ۴۱/۵ درصد	Krishnan و همکاران (۲۰۲۰)

مركبات (باغ)	چين	حس گر رطوبت خاك	HA2001	آبياري قطره‌اي	✓	۲۰ درصد	Zhang و همكاران (۲۰۱۷)
سيب (باغ)	استراليا	حس گر رطوبت خاك	Eight Sentek's EnviroSCAN probes	آبياري سنتي	×	۳۳ درصد	Ooi و همكاران (۲۰۱۰)
علف برمودا	فلوريداي آمرিকা	حس گر باران	-	آبياري باراني	×	۳۴ درصد	Cardenas- و Lailhacar همكاران (۲۰۰۸)
چمن سنت آگوستين	فلوريداي آمریکا	حس گر باران	Mini-Click rain sensor	آبياري باراني	×	۷-۳۰ درصد	McCreedy و همكاران (۲۰۰۹)
		حس گر رطوبت خاك	Time domain reflectometry probes			۱۱ درصد	
چمن باهيا	فلوريداي آمریکا	حس گر باران	Mini-Click rain sensor	آبياري باراني	×	۱۷-۴۹ درصد	Dobbs و همكاران (۲۰۱۴)
گوجه‌فرنگي	هند	حس گر باران/حس گر رطوبت خاك	-	آبياري قطره‌اي	✓	۱۵-۵۰ درصد	Barkunan و همكاران (۲۰۲۰)
برنج	هند	حس گر	PRD180	آبياري قطره‌اي	✓	۴۱ درصد	Barkunan و همكاران (۲۰۱۹)
ميوه (باغ)	فلوريداي آمریکا	کنترلرهای ET/ حس گر باران	Rain Bird ESP- 12-LX-plus his- toric controle	آبياري باراني	×	۴۸ درصد	Isaya و همكاران (۲۰۰۹)
چمن	كارولينای شمالی،	کنترلرهای ET	Toro Intelli- Sense TIS-240	آبياري باراني	×	بیش آبياري به میزان ۱۱ درصد	Grabow و همكاران (۲۰۱۳)
۶۵٪ علف سنت آگوستين و ۳۵٪ گياهان زينتي مخلوط	فلوريداي آمریکا	کنترلرهای ET (حس گرهای رطوبت خاك و باران)	Weathermatic standalone con- troller	آبياري باراني	×	۱۱-۱۴ درصد	Davis و همكاران (۲۰۰۷)
			Toro Intelli- Sense signal- based controller			۴۰ درصد	
۶۵٪ علف سنت آگوستين و ۳۵٪ گياهان زينتي مخلوط	فلوريداي آمریکا	کنترلرهای ET (حس گرهای باران)	Weathermatic, SL1600 control- ler with SLW15 weather monitor	آبياري باراني	×	۳-۲۶ درصد	Işık و همكاران (۲۰۱۷)
چمن سنت آگوستين و گياهان زينتي مخلوط	فلوريداي آمریکا	کنترلرهای ET (حس گر باران)	Toro Intelli- Sense controller	آبياري باراني	×	۴۱ درصد	Rutland و (۲۰۱۲) Dukes
گوجه‌فرنگي	رياض، عربستان سعودی	کنترلرهای ET (رطوبت خاك)	Hunter Pro-C2	آبياري قطره‌اي		۱۸ درصد	Al-Ghobari و همكاران (۲۰۱۶)

۴. حس‌گرهای نوری در مدیریت آبیاری مبتنی بر گیاه

حس‌گرهای نوری به دلیل توانایی در ارائه داده‌های دقیق و به‌هنگام درباره وضعیت سلامت گیاه، نیازهای آبی و میزان تنش، به طور فزاینده‌ای در مدیریت آبیاری مبتنی بر گیاه استفاده می‌شوند. این حس‌گرها با اندازه‌گیری طول موج‌های خاصی از نور، معمولاً در طیف مرئی و مادون قرمز نزدیک، که از برگ‌های گیاه منعکس می‌شوند، کار می‌کنند. با تحلیل نور بازتابی، حس‌گرهای نوری می‌توانند وضعیت فیزیولوژیکی گیاه، از جمله سطح آب، فعالیت فتوسنتزی و سلامت کلی گیاه را ارزیابی کنند. حس‌گرهای آبیاری دقیق نیاز به سخت‌افزار مخصوصی برای اتصال سیمی و بی‌سیم به حس‌گرهای دفن شده دارند که ممکن است به دلیل قطع سیگنال، اطلاعات را از دست بدهند (AI-Naji و همکاران، ۲۰۲۱). برای جلوگیری از استفاده از حس‌گرهای دفن شده در خاک، تکنیک‌های نوینی مانند پهپادها، UAV و دوربین‌های قرمز/سبز/آبی (RGB) برای مدیریت آبیاری با حس‌گرهای نوری به‌کار گرفته شده‌اند (Ajith و همکاران، ۲۰۱۸).

حس‌گرهای از راه دور مبتنی بر پهپاد (UAV)^۷ یک فناوری پیشرفته هستند (شکل ۷) که به‌طور گسترده‌ای در آبیاری هوشمند در مقیاس بزرگ استفاده می‌شوند، که دلیل آن هزینه‌های مقرون‌به‌صرفه، روش‌های ساخت آسان، حمل‌ونقل راحت، انعطاف‌پذیری بالا، دوره عملیاتی کوتاه و وضوح نسبتاً

بالا است (Boursianis و همکاران، ۲۰۲۲). در مقایسه با تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های پوشش گیاهی از تصاویر UAV ارتباط بیشتری با ارزیابی‌های درون مزرعه‌ای دارند (Khaliq و همکاران، ۲۰۱۹). به‌طور معمول، هیستوگرام دمای پوشش گیاهی که از تصاویر حرارتی مادون‌قرمز UAV تأمین می‌شود، برای برآورد CWSI استفاده می‌شود و به این ترتیب کارایی مصرف آب آبیاری بهبود می‌یابد (Bian و همکاران، ۲۰۱۹).

از طرفی، پهپادها می‌توانند حس‌گرهای مختلفی همانند حس‌گرهای بصری، حرارتی و چندطیفی را حمل کنند (Mwinuka و همکاران، ۲۰۲۱). به‌عنوان مثال، برای صرفه‌جویی در مصرف آب، یک پهپاد با دوربین RGB توانست با دقت بالایی ارتفاع گیاهان برنج را از روی تصاویر ثبت‌شده تخمین بزند (Yang و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین در مزارع چای، تصاویر برگ‌ها و خاک توسط دوربین‌های با وضوح بالا بر روی پهپاد جمع‌آوری شد و به کمک آن کمبود آب ارزیابی و هدررفت آب به میزان قابل توجهی کاهش یافت (Jia و همکاران، ۲۰۱۹). شناسایی دقیق گیاهان توسط پهپادها ارتباط مستقیم و مهمی با مدیریت بهینه آبیاری دارد. با استفاده از پهپادهای چندحس‌گری، می‌توان به‌طور دقیق وضعیت رشد گیاهان، نیاز آبی آن‌ها و شرایط محیطی را شناسایی کرد.

برای مثال، حس‌گرهای حرارتی و چندطیفی قادرند مناطق خشک یا آسیب‌دیده را شناسایی کنند که نیاز به آبیاری



شکل ۷- چهارچوب پهپاد بدون سرنشین برای مدیریت آبیاری در کشاورزی هوشمند

بیشتری دارند. همچنین، از طریق شناسایی نوع و وضعیت گیاهان، می‌توان آبیاری را به‌صورت هدفمند و دقیق‌تر بر اساس نیازهای واقعی گیاهان تنظیم کرد.

این فناوری به کشاورزان کمک می‌کند تا مصرف آب را کاهش دهند و بهره‌وری تولید را افزایش دهند. بنابراین، شناسایی گیاهان توسط پهپادها، بخشی از فرآیند مدیریت دقیق آبیاری است که به بهبود عملکرد آبیاری و کاهش هدررفت آب کمک می‌کند (Dong و همکاران، ۲۰۲۴).

برآورد رطوبت خاک از طریق سنجش از دور

در سنجش از دور، تابش‌های الکترومغناطیسی در طول موج‌های نوری، مادون قرمز و به‌ویژه میکروویو برای برآورد میزان رطوبت خاک بدون تماس فیزیکی با خاک استفاده می‌شود. به‌طور کلی، راديو مترها، اسکترومترها و رادارهای سنتی که بر روی پلتفرم‌های هوایی یا مکانی نصب شده‌اند و در باند میکروویو کار می‌کنند، برای استخراج میزان رطوبت خاک استفاده می‌شوند. بااین حال، در برخی شرایط یا به‌عنوان مکمل داده‌های میکروویو، از باندهای نوری و مادون قرمز نیز استفاده می‌شود. علاوه بر سنجش از دور ماهواره‌ای، وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین و حس‌گرهای زمینی نیز برای استخراج رطوبت خاک به‌کار می‌روند. از طریق سنجش از دور، می‌توان میزان رطوبت خاک در سطح منطقه‌ای را برآورد کرده و الگوهای تغییرات مکانی و زمانی آن را مطالعه کرد. وضعیت رطوبت خاک استخراج شده از داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند برای برنامه‌ریزی در سطح منطقه‌ای استفاده شود، درحالی‌که داده‌های پهپادها و حس‌گرهای زمینی برای مقیاس مزرعه‌ای قابل استفاده هستند.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین (ML) به دلیل توانایی آن‌ها در یکپارچه‌سازی داده‌ها با توزیع‌های احتمال ناشناخته، به‌طور گسترده‌ای برای برآورد رطوبت خاک از داده‌های سنجش از دور استفاده می‌شوند (Ali و همکاران، ۲۰۱۵). بااین حال، برای اعمال الگوریتم‌های ML و تولید نتایج دقیق، به حجم زیادی از داده‌های آموزشی نیاز است. تصاویر سنجش از دور و داده‌های جانبی مانند استفاده از اراضی، خصوصیات خاک و غیره به‌عنوان متغیرهای توضیحی یا مستقل استفاده می‌شوند و رطوبت خاک به‌عنوان متغیر پاسخ یا وابسته در نظر گرفته می‌شود. پس از پیش‌پردازش، داده‌ها به دو مجموعه آموزشی و آزمایشی تقسیم می‌شوند. حدود ۷۰٪-۸۰٪ از داده‌ها برای آموزش و ۲۰٪-۳۰٪ باقی‌مانده برای آزمایش استفاده می‌شود. الگوریتم ML بر روی مجموعه داده آموزشی اعمال می‌شود و

رطوبت خاک به‌عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته می‌شود. مدل ML با بهینه‌سازی پارامترهای آن آموزش داده می‌شود تا دقت خوبی بر روی داده‌های آموزشی و آزمایشی حاصل شود. سپس این مدل ML آموزش‌دیده و اعتبارسنجی شده برای برآورد رطوبت خاک با استفاده از متغیرهای مستقل به‌عنوان ورودی برای تولید رطوبت خاک به‌عنوان خروجی به‌کار می‌رود. پژوهش‌های زیادی توسط پژوهشگران گزارش شده است که استفاده گسترده از الگوریتم‌های ML را برای برآورد رطوبت خاک از داده‌های سنجش از دور نشان می‌دهند (Rani و همکاران، ۲۰۲۲).

الگوریتم‌های ML همچنین می‌توانند برای استخراج توابع کالیبراسیون خاص سایت از داده‌های رادار سنتی به‌کار روند تا اندازه‌گیری‌های طیفی را به ویژگی‌های توپوگرافی شبکه‌بندی شده مرتبط کنند و الگوهای رطوبت خاک نزدیک سطح را برآورد کنند (Nasta و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین گزارش شده است که الگوریتم‌های ML می‌توانند رطوبت خاک را از داده‌های رادار زمینی استخراج کنند.

برنامه‌ریزی آبیاری

برنامه‌ریزی آبیاری به معنای تصمیم‌گیری در مورد زمان و مقدار آبی است که باید از طریق آبیاری برای تأمین نیاز آبی گیاه اعمال شود. برنامه‌ریزی بهینه آبیاری برای صرفه‌جویی در مصرف آب و انرژی بسیار حیاتی است. در این راستا، داده‌های رطوبت خاک برای اتخاذ تصمیم مناسب ضروری است. این داده‌های رطوبت خاک می‌توانند از طریق حس‌گرهای رطوبت خاک نصب شده در مزرعه جمع‌آوری شوند یا از طریق سنجش از دور یا داده‌های عوامل دیگر برآورد شوند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی رطوبت خاک از مجموعه داده‌های مختلف موجود استفاده می‌شوند که می‌توانند در برنامه‌ریزی آبیاری کمک کنند (Rani و همکاران، ۲۰۲۲). با توجه به پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های اینترنت اشیا و شبکه‌های حس‌گر بی‌سیم، تلاش‌هایی برای توسعه سیستم‌های آبیاری هوشمند و خودکار انجام شده است که می‌توانند آبیاری در مزارع را بدون دخالت انسان برنامه‌ریزی کنند. تعدادی از پژوهشگران تلاش کرده‌اند تا چنین سیستم‌های آبیاری خودکاری را با جمع‌آوری داده‌ها از انواع حس‌گرهای نصب شده در مزرعه توسعه دهند.

این سیستم‌ها به‌طور معمول از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی رطوبت خاک در روزهای آینده استفاده می‌کنند تا تصمیم‌گیری در مورد زمان‌بندی آبیاری از طریق یک

سیستم پشتیبانی تصمیم گرفته شود. پمپ آب برای آبیاری مزارع به طور خودکار بر اساس دستور سیستم پشتیبانی تصمیم برای مدت زمان لازم روشن یا خاموش می شود (Rani و همکاران، ۲۰۲۲).

نتیجه گیری

با توجه به محدودیت منابع آبی، بهینه سازی مصرف آب در بخش کشاورزی اهمیت زیادی دارد. استفاده از تکنیک های نوین آبیاری هوشمند نظیر کنترلرهای SMS، کنترلرهای ET، حسگرهای نوری، سامانه RS و استراتژی های کم آبیاری تاثیر زیادی در صرفه جویی در مصرف آب و حفظ عملکرد محصولات کشاورزی دارد. این سامانه ها به طور ویژه در کاهش بیش آبیاری موثر هستند و این امر از طریق اندازه گیری یا تخمین شاخص های مختلف نظیر SMC و CWSI انجام می شود. مطالعات موجود نشان می دهد که سیستم های آبیاری هوشمند، به ویژه کنترلرهای مبتنی بر داده های آب و هوا (ET) و حسگرهای SMS، در مقایسه با روش های آبیاری سنتی، قادر به صرفه جویی قابل توجهی در مصرف آب هستند. مهم ترین نتایج این پژوهش عبارتند از:

۱. بهره وری آبیاری با استفاده از سامانه های SMS به حد آستانه رطوبتی تنظیم شده توسط کشاورزان بستگی دارد. این سیستم ها می توانند در مقایسه با روش های سنتی مصرف آب را به میزان ۲۰٪ تا ۴۱/۵٪ کاهش دهند.
۲. کنترلرهای ET قادرند مصرف آب را در دامنه ای بین ۲۰٪ تا ۴۸٪ کاهش دهند، به ویژه دقت برآوردهای ET بر عملکرد این کنترلرها تاثیر زیادی دارد و می تواند به افزایش کارایی این سامانه ها کمک کند.
۳. روش های مبتنی بر حسگر باران در مقایسه با روش های آبیاری سنتی، بین ۷٪ تا ۵۰٪ صرفه جویی در مصرف آب را به همراه دارند. همچنین، سیستم های مبتنی بر حسگر نوری توانایی بیشتری در ارزیابی تغییرات میدانی محصولات و خاک نسبت به اندازه گیری های محلی دارند.
۴. استفاده از استراتژی های کم آبیاری مانند کم آبیاری تنظیم شده، به ویژه در مراحل خاص رشد گیاه، می تواند منجر به کاهش ۲۵٪ عملکرد محصول شود، اما همچنان باعث صرفه جویی ۱۳٪ در مصرف آب می شود.
۵. استفاده از این تکنیک ها برای محصولات مختلف کشاورزی، از جمله گوجه فرنگی و سیب زمینی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، نیاز به تحقیقات بیشتری

دارد تا بهره وری بیشتری حاصل شود.

۶. ارزیابی توجیه اقتصادی این روش های آبیاری همچنان ضروری است تا کشاورزان بتوانند بر اساس تحلیل هزینه و فایده، تصمیمات مناسبی برای پیاده سازی این سیستم ها در مزارع خود اتخاذ کنند.

در انتها پیشنهاد می شود که برای بهینه سازی مصرف آب و افزایش بهره وری محصولات کشاورزی، استفاده از سیستم های هوشمند مبتنی بر حسگرهای SMS، ET و حسگرهای نوری باید در مزارع به طور گسترده تر پیاده سازی شود. همچنین، تحقیقات بیشتر برای به کارگیری این فناوری ها در محصولات مختلف و ارزیابی دقیق تر تاثیرات اقتصادی آن ها توصیه می شود. توسعه و گسترش این فناوری ها، به ویژه در مناطق با منابع آبی محدود، می تواند به مدیریت پایدار منابع آب و ارتقای امنیت غذایی در سطح جهانی کمک شایانی نماید.

پی نوشت ها

1. Soil Moisture Sensor (SMS)
2. Evapotranspiration (ET) Controllers
3. Rain Sensors (RS)
4. Soil Moisture Content (SMC)
5. Unmanned Aerial Vehicles (UAV)
6. Crop Water Stress Index (CWSI)
7. Internet of Things (IOT)
8. Deficit Irrigation (DI)
9. Wind Speed Tracker
10. Camera Sensors
11. Light Dependent Resistor
12. Precision Irrigation
13. Optical Sensors (OS)
14. ZigBee wireless network technology
15. Reference evapotranspiration
16. Crop evapotranspiration
17. Crop coefficient
18. Crop Water Requirement
19. Root Zone Water Quality Model
20. Global System for Mobile Communications
21. Unmanned Aerial Vehicles
22. Machine Learning

- Abioye, E. A., Abidin, M. S. Z., Mahmud, M. S. A., Buyamin, S., Ishak, M. H. I., Abd Rahman, M. K. I., & Ramli, M. S. A. (2020). A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 105441. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105441>
- Abioye, E. A., Abidin, M. S. Z., Mahmud, M. S. A., Buyamin, S., AbdRahman, M. K. I., Otuoze, A. O., & Ijike, O. D. (2021). IoT-based monitoring and data-driven modelling of drip irrigation system for mustard leaf cultivation experiment. *Information Processing in Agriculture*, 8(2), 270-283. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.05.004>
- Ajith, G., Bharadwaj, C. N., Nag, T. S., & Gururaj, C. (2018). Uav aided irrigation using object detection through wireless communication technology. 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI).IEEE. Tirunelveli, India.
- Aldhaheri, L., Alshehhi, N., Manzil, I. I. J., Khalil, R. A., Javaid, S., Saeed, N., & Alouini, M. S. (2024). LoRa Communication for Agriculture 4.0: Opportunities, Challenges, and Future Directions. *IEEE Internet of Things Journal*, 12(2), 1380-1407. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3486369>
- Al-Ghobari, H. M., Mohammad, F. S., & El Marazky, M. S. (2016). Evaluating two irrigation controllers under subsurface drip irrigated tomato crop. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(4), e1206-e1206. <https://doi.org/10.5424/sjar/2016144-8615>
- Ali, I., Greifeneder, F., Stamenkovic, J., Neumann, M., & Notarnicola, C. (2015). Review of machine learning approaches for biomass and soil moisture retrievals from remote sensing data. *Remote Sensing*, 7(12), 16398-16421. <https://doi.org/10.3390/rs71215841>
- Al-Naji, A., Fakhri, A. B., Gharghan, S. K., & Chahl, J. (2021). Soil color analysis based on a RGB camera and an artificial neural network towards smart irrigation: A pilot study. *Heliyon*, 7(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06078>
- Barkunan, S. R., Bhanumathi, V., & Sethuram, J. (2019). Smart sensor for automatic drip irrigation system for paddy cultivation. *Computers & Electrical Engineering*, 73, 180-193. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2018.11.013>
- Barkunan, S. R., Bhanumathi, V., & Balakrishnan, V. (2020). Automatic irrigation system with rain fall detection in agricultural field. *Measurement*, 156, 107552. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107552>
- Bian, J., Zhang, Z., Chen, J., Chen, H., Cui, C., Li, X., & Fu, Q. (2019). Simplified evaluation of cotton water stress using high resolution unmanned aerial vehicle thermal imagery. *Remote Sensing*, 11(3), 267. <https://doi.org/10.3390/rs11030267>
- Bodkhe, U., Tanwar, S., Parekh, K., Khanpara, P., Tyagi, S., Kumar, N., & Alazab, M. (2020). Blockchain for industry 4.0: A comprehensive review. *Ieee Access*, 8, 79764-79800. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2988579
- Boursianis, A. D., Papadopoulou, M. S., Diamantoulakis, P., Liopa-Tsakalidi, A., Barouchas, P., Salahas, G., & Goudos, S. K. (2022). Internet of things (IoT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review. *Internet of Things*, 18, 100187. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187>
- Cardenas-Lailhacar, B., & Dukes, M. D. (2008). Expanding disk rain sensor performance and potential irrigation water savings. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(1), 67-73. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:1\(67\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:1(67))
- Condotta, I. C., Brown-Brandl, T. M., Pitla, S. K., Stinn, J. P., & Silva-Miranda, K. O. (2020). Evaluation of low-cost depth cameras for agricultural applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 105394. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105394>
- Davis, S., Dukes, M. D., Vyapari, S., & Miller, G. L. (2007). Evaluation and demonstration of evapotranspiration-based irrigation controllers. In *World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat*. 1-18. Florida, USA. [https://doi.org/10.1061/40927\(243\)237](https://doi.org/10.1061/40927(243)237)
- Dobbs, N. A., Migliaccio, K. W., Dukes, M. D., Morgan, K. T., & Li, Y. C. (2013). Interactive irrigation tool for simulating smart irrigation technologies in lawn turf. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 139(9), 747-754. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000612](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000612)
- Dobbs, N. A., Migliaccio, K. W., Li, Y., Dukes, M. D., & Morgan, K. T. (2014). Evaluating irrigation applied and nitrogen leached using different smart irrigation technologies on bahiagrass (*Paspalum notatum*). *Irrigation science*, 32, 193-203. <https://doi.org/10.1007/s00271-013-0421-1>
- Dong, H., Dong, J., Sun, S., Bai, T., Zhao, D., Yin, Y., & Wang, Y. (2024). Crop water stress detection based on UAV remote sensing systems. *Agricultural Water Management*, 303, 109059. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109059>
- Gao, Z., Zhu, J., Huang, H., Yang, Y., & Tan, X. (2021). Ant colony optimization for UAV-based intelligent pesticide irrigation system. In *2021 IEEE 24th international conference on computer supported cooperative work*

- in design (CSCWD) (pp. 720-726). IEEE. Dalian, China.
<https://doi.org/10.1109/CSCWD49262.2021.9437825>
- Grabow, G. L., Ghali, I. E., Huffman, R. L., Miller, G. L., Bowman, D., & Vasanth, A. (2013). Water application efficiency and adequacy of ET-based and soil moisture-based irrigation controllers for turfgrass irrigation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 139(2), 113-123.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000528](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000528)
 - Gu, Z., Qi, Z., Ma, L., & Yuan, S. (2017). Water stress based deficit irrigation scheduling using RZWQM2 model for maize in Colorado. In 2017 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan, USA.
 - Hare, D. K., Briggs, M. A., Rosenberry, D. O., Boutt, D. F., & Lane, J. W. (2015). A comparison of thermal infrared to fiber-optic distributed temperature sensing for evaluation of groundwater discharge to surface water. *Journal of Hydrology*, 530, 153-166.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.059>
 - Inayah, I., Agustirandi, B., Budiman, M., Djamal, M., & Faizal, A. (2025). Experimental design: Implementation of IoT-based drip irrigation to enhance the productivity of Cilembu sweet potato (*Ipomoea batatas*) cultivation. *Results in Engineering*, 25, 103600.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103600>
 - Isaya, N., Kisekka, A., Migliaccio, K. W., Schaffer, B., Crane, J. H., & Dukes, M. D. (2009). Evaluation of evapotranspiration-based irrigation controllers in a tropical fruit orchard in southern Florida. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, June 21-24. 2009. Reno, Nevada.
<https://doi.org/10.13031/2013.26939>
 - Işık, M. F., Sönmez, Y., Yılmaz, C., Özdemir, V., & Yılmaz, E. N. (2017). Precision irrigation system (PIS) using sensor network technology integrated with IOS/Android application. *Applied Sciences*, 7(9), 891.
<https://doi.org/10.3390/app7090891>
 - Jia, X., Huang, Y., Wang, Y., & Sun, D. (2019). Research on water and fertilizer irrigation system of tea plantation. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 15(3), 1550147719840182.
<https://doi.org/10.1177/1550147719840182>
 - Juroszek, P., & Von Tiedemann, A. (2011). Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. *Plant Pathology*, 60(1), 100-112.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02410.x>
 - Khaliq, A., Comba, L., Biglia, A., Ricauda Aimonino, D., Chiaberge, M., & Gay, P. (2019). Comparison of satellite and UAV-based multispectral imagery for vineyard variability assessment. *Remote Sensing*, 11(4), 436.
<https://doi.org/10.3390/rs11040436>
 - Kovalenko, Y., Tindjau, R., Madilao, L. L., & Castellarin, S. D. (2021). Regulated deficit irrigation strategies affect the terpene accumulation in *Gewürztraminer* (*Vitis vinifera* L.) grapes grown in the Okanagan Valley. *Food Chemistry*, 341, 128172.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128172>
 - Krishnan, R. S., Julie, E. G., Robinson, Y. H., Raja, S., Kumar, R., & Thong, P. H. (2020). Fuzzy logic based smart irrigation system using internet of things. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119902.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119902>
 - Kumar, V., Sharma, K. V., Kedam, N., Patel, A., Kate, T. R., & Rathnayake, U. (2024). A Comprehensive Review on Smart and Sustainable Agriculture Using IoT Technologies. *Smart Agricultural Technology*, 100487.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100487>
 - Lakhari, I. A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., & Rakibuzzaman, M. (2024). A review of precision irrigation water-saving technology under changing climate for enhancing water use efficiency, crop yield, and environmental footprints. *Agriculture*, 14(7), 1141.
<https://doi.org/10.3390/agriculture14071141>
 - Liao, R., Zhang, S., Zhang, X., Wang, M., Wu, H., & Zhangzhong, L. (2021). Development of smart irrigation systems based on real-time soil moisture data in a greenhouse: Proof of concept. *Agricultural Water Management*, 245, 106632.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106632>
 - Lloret, J., Sendra, S., Garcia, L., & Jimenez, J. M. (2021). A wireless sensor network deployment for soil moisture monitoring in precision agriculture. *Sensors*, 21(21), 7243.
<https://doi.org/10.3390/s21217243>
 - Marek, G. W., Evett, S., Marek, T. H., Porter, D., & Schwartz, R. C. (2023). Field evaluation of conventional and downhole TDR soil water sensors for irrigation scheduling in a clay loam soil. *Applied Engineering in Agriculture*, 39(5), 495-507.
<https://doi.org/10.13031/aea.15574>
 - McCready, M. S., Dukes, M. D., & Miller, G. L. (2009). Water conservation potential of smart irrigation controllers on St. Augustinegrass. *Agricultural water management*, 96(11), 1623-1632.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.007>
 - Munir, M. S., Bajwa, I. S., & Cheema, S. M. (2019). An intelligent and secure smart watering system using fuzzy logic and blockchain. *Computers & Electrical Engineering*, 77, 109-119.
<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.05.006>
 - Mwinuka, P. R., Mbilinyi, B. P., Mbungu, W. B., Mourice, S. K., Mahoo, H. F., & Schmitter, P. (2021). The feasibility of hand-held thermal and UAV-based multispec-

tral imaging for canopy water status assessment and yield prediction of irrigated African eggplant (*Solanum aethopicum* L). *Agricultural Water Management*, 245, 106584.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106584>

- Nasta, P., Schönbrodt-Stitt, S., Bogena, H., Kurtenbach, M., Ahmadian, N., Vereecken, H., & Romano, N. (2019). Integrating ground-based and remote sensing-based monitoring of near-surface soil moisture in a Mediterranean environment. In 2019 IEEE international workshop on metrology for agriculture and forestry (MetroAgriFor). 24-26 October. 2019. IEEE. Portici, Italy.
<https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor.2019.8909226>
- Obaideen, K., Yousef, B. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., & Ramadan, M. (2022). An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 7, 100124.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124>
- Ooi, S. K., Cooley, N., Mareels, I., Dunn, G., Dassanayake, K., & Saleem, K. (2010). Automation of on-farm irrigation: horticultural case study. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(26), 256-261.
<https://doi.org/10.3182/20101206-3-JP-3009.00045>
- Panigrahi, P., Raychaudhuri, S., Thakur, A. K., Nayak, A. K., Sahu, P., & Ambast, S. K. (2019). Automatic drip irrigation scheduling effects on yield and water productivity of banana. *Scientia Horticulturae*, 257, 108677.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108677> [Get rights and content](#)
- Potdar, R. P., Shirolkar, M. M., Verma, A. J., More, P. S., & Kulkarni, A. (2021). Determination of soil nutrients (NPK) using optical methods: a mini review. *Journal of plant nutrition*, 44(12), 1826-1839.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1884702>
- Prakasam, C., Aravinth, R., Kanwar, V. S., & Nagarajan, B. (2021). Design and Development of Real-time landslide early warning system through low cost soil and rainfall sensors. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5649-5654.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.456>
- Qin, A., Ning, D., Liu, Z., & Duan, A. (2021). Analysis of the accuracy of an FDR sensor in soil moisture measurement under laboratory and field conditions. *Journal of Sensors*, 2021(1), 6665829.
<https://doi.org/10.1155/2021/6665829>
- Rani, A., Kumar, N., Kumar, J., & Sinha, N. K. (2022). *Machine learning for soil moisture assessment*. Academic Press. Amsterdam, Netherlands.
- Rasin, Z., Hamzah, H., & Aras, M. S. M. (2009). Application and evaluation of high power zigbee based wireless sensor network in water irrigation control monitoring system. In 2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications. 04-06 October. 2009. IEEE. Kuala Lumpur, Malaysia.
<https://doi.org/10.1109/ISIEA.2009.5356380>
- Rathore, V. S., Nathawat, N. S., Bhardwaj, S., Yadav, B. M., Kumar, M., Santra, P., & Yadav, O. P. (2021). Optimization of deficit irrigation and nitrogen fertilizer management for peanut production in an arid region. *Scientific reports*, 11(1), 5456.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-82968-w>
- Richa, A., Fizir, M., & Touil, S. (2021). Advanced monitoring of hydroponic solutions using ion-selective electrodes and the internet of things: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 3445-3463.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2007.00373.x>
- Román-Raya, J., Ruiz-García, I., Escobedo, P., Palma, A. J., Guirado, D., & Carvajal, M. A. (2020). Light-dependent resistors as dosimetric sensors in radiotherapy. *Sensors*, 20(6), 1568.
<https://doi.org/10.3390/s20061568>
- Rutland, D. C., & Dukes, M. D. (2012). Performance of rain delay features on signal-based evapotranspiration irrigation controllers. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 138(11), 978-983.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000499](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000499)
- Saraf, S. B., & Gawali, D. H. (2017). IoT based smart irrigation monitoring and controlling system. In 2017 2nd IEEE international conference on recent trends in electronics, information & communication technology (RTEICT). 19-20 May. 2017. IEEE. Bangalore, India.
<https://doi.org/10.1109/RTEICT.2017.8256711>
- Seagraves, B., Trooien, T. P., Todey, D. P., Hay, C. H., Schleicher, L. C., & Persyn, R. A. (2010). Efficacy of Evapotranspiration-based Landscape Irrigation in Eastern South Dakota. In 5th National Decennial Irrigation Conference Proceedings. 5-8 December. 2010. Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona, USA.
- Simionesei, L., Ramos, T. B., Palma, J., Oliveira, A. R., & Neves, R. (2020). IrrigaSys: A web-based irrigation decision support system based on open source data and technology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105822.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105822>
- Sudharshan, N., Karthik, A. K., Kiran, J. S., & Geetha, S. (2019). Renewable energy based smart irrigation system. *Procedia Computer Science*, 165, 615-623.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.055>
- Talaviya, T., Shah, D., Patel, N., Yagnik, H., & Shah, M. (2020). Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 58-73.
<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.04.002>

- Tang, P., Liang, Q., Li, H., & Pang, Y. (2024). Application of Internet-of-Things Wireless Communication Technology in Agricultural Irrigation Management: A Review. *Sustainability*, 16(9), 3575.
<https://doi.org/10.3390/su16093575>
- Touil, S., Richa, A., Fizir, M., Argente García, J. E., & Skarmeta Gomez, A. F. (2022). A review on smart irrigation management strategies and their effect on water savings and crop yield. *Irrigation and Drainage*, 71(5), 1396-1416.
<https://doi.org/10.1002/ird.2735>
- Wang, J., Wang, Y., Li, Z., Li, H., & Yang, H. (2020). A combined framework based on data preprocessing, neural networks and multi-tracker optimizer for wind speed prediction. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100757.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100757>
- Wang, Z., Wang, L., Huang, C., Zhang, Z., & Luo, X. (2021). Soil-moisture-sensor-based automated soil water content cycle classification with a hybrid symbolic aggregate approximation algorithm. *IEEE internet of things journal*, 8(18), 14003-14012.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3068379>
- Yang, C. Y., Yang, M. D., Tseng, W. C., Hsu, Y. C., Li, G. S., Lai, M. H., & Lu, H. Y. (2020). Assessment of rice developmental stage using time series UAV imagery for variable irrigation management. *Sensors*, 20(18), 5354.
<https://doi.org/10.3390/s20185354>
- Zeitoun, R., Vandergeest, M., Vasava, H. B., Machado, P. V. F., Jordan, S., Parkin, G., & Biswas, A. (2021). In-situ estimation of soil water retention curve in silt loam and loamy sand soils at different soil depths. *Sensors*, 21(2), 447.
<https://doi.org/10.3390/s21020447>
- Zhang, X., Zhang, J., Li, L., Zhang, Y., & Yang, G. (2017). Monitoring citrus soil moisture and nutrients using an IoT based system. *Sensors*, 17(3), 447.
<https://doi.org/10.3390/s17030447>