



Smart technologies in agriculture: water and resource management in the Era of climate change

Hossein Zahedpour Yeganeh¹, Afshin Khorsand^{2✉}, Omid Raja³, and Elahe Kanani⁴

1. Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), East Azerbaijan, Maragheh, Iran. E-mail: zahedpour.hossein@gmail.com
2. Corresponding author, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: af.kh67@gmail.com
3. Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: omid.raja@ut.ac.ir
4. Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin., Iran. E-mail: el.kanani92@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 10 February 2025
Received in revised form 12 April 2024
Accepted 29 June 2025
Available online 23 September 2025

Keywords:

climate adaptation,
data-driven decision-making,
precision agriculture,
remote monitoring,
sensors technology.

ABSTRACT

Objective: Driven by the motivation to find innovative and efficient solutions for irrigation management, this research delves into the precise examination of indirect methods for measuring soil moisture and advanced techniques in automated and smart irrigation. Its ultimate goal is to explore current knowledge and evaluate new approaches that can, while optimizing water consumption and increasing productivity, effectively address the complex technical challenges in this field. With a focus on practical and sustainable solutions, this study strives to establish a foundation for the development of smart and environmentally friendly agriculture.

Method: The study reviews sensors used in smart agriculture (rainfall, temperature, etc.) and equipment for irrigation, frost monitoring, plant protection, and crop monitoring. It analyzes their features to optimize farming and reduce resource use, improving efficiency and sustainability.

Results: Smart technologies can boost agricultural efficiency and productivity, especially for water management in water-scarce countries like Iran, making smart agriculture essential. While proven in developed countries, Iran needs specific infrastructure for success. Intelligent systems improve plant performance, cut water waste, and reduce pollution. With internet access in rural areas, smart irrigation, using sensors like TDR and PR2, can automate irrigation via the Internet of Things. Important factors include sensor accuracy, power, cost, and salinity effects. Two-way wireless networks (WSAN) enable monitoring and control of irrigation. Future planning should combine soil, water, and climate monitoring with predictive control, focusing on dynamic processes and the impact of intelligent monitoring on irrigation efficiency, given the uncertainties in agricultural-irrigation systems.

Conclusions: With the power to prevent diseases, protect crops from frost, and eliminate storage losses, these technologies revolutionize the efficiency and performance of agricultural processes. Ultimately, implementing smart agriculture and using soil moisture sensors goes beyond just saving water; it's an unparalleled strategy for overcoming climate challenges and the overwhelming pressures on agricultural systems.

Cite this article: Zahedpour Yeganeh, H., Khorsand, A., Raja, O., & Kanani, E. (2025). Smart technologies in agriculture: water and resource management in the Era of climate change. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (3), 20-43. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11765.1155>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11765.1155>

Publisher: Razi University.

Introduction

Smart agriculture, the third Green Revolution, uses information technology (like big data, AI, and IoT) to increase agricultural product quality and quantity while reducing resource consumption (Chidambaranathan et al., 2018). Climate-Smart Agriculture (CSA) helps farmers adapt to climate change and ensure food security. These systems enable quick, effective decision-making through data collection and analysis, using satellites, drones, and sensors to monitor soil moisture, crop health, and environmental conditions in real-time (De Pinto et al., 2020). As a result, farmers can optimize water use, reduce costs, and increase efficiency, contributing to sustainable agricultural practices. Remote monitoring and integrating knowledge with new technologies boosts productivity and resilience, ultimately supporting the overall sustainability of the farming industry.

Methodology

This research takes a comprehensive approach, conducting an in-depth review of commonly used sensors in smart agriculture and optimal irrigation management. This review covers a wide range of sensors (rainfall, temperature, leaf, light, wind, air pressure, soil temperature, soil moisture, water, snow, and plant sensors), as well as strategic equipment (irrigation management tools, frost monitoring systems, plant protection equipment, growth and nutrition equipment, agricultural machinery performance tracking, and crop monitoring devices). This study not only analyzes the features and capabilities of this equipment in detail but also explains their roles in optimizing agricultural processes and reducing resource consumption using a scientific and precise method. The aim of this approach is to provide a deeper understanding of how to improve efficiency and sustainability in modern agricultural systems, as well as to offer practical solutions for enhancing agricultural performance through the use of advanced technologies.

Results and discussion

In this context, leveraging modern tools and smart technologies plays a crucial role in enhancing the efficiency and productivity of agricultural processes. Optimal water resource management, particularly in countries like Iran facing decreased rainfall, is a primary goal of smart agriculture. Implementing smart technologies can lead to more effective water resource utilization, making smart agriculture an unavoidable necessity in the agricultural production sector. Although the benefits of this technology have been proven in developed countries, its success in Iran requires specific considerations and the establishment of appropriate infrastructure. Research indicates that using intelligent systems can improve plant performance, reduce water losses, and minimize environmental pollution from agricultural activities. Today, access to the internet and smartphones is possible in most rural areas, providing opportunities for young people to widely utilize available facilities. Employing smart irrigation methods is recognized as an effective solution for managing crises and conserving water resources. Capacitive and impedance sensors, as well as sensors like TDR, FDR, and PR2, are used to facilitate automated irrigation within the Internet of Things framework. For implementing automated irrigation systems, the PR2 sensor, along with software like Datalink Logger, is used, enabling the recording of soil moisture at different depths and determining the volume of water and timing for switching irrigation on and off. When using these sensors, factors such as installation accuracy, scaling, calibration issues, power supply, costs, and salinity effects on soil moisture must be considered. A two-way wireless sensor network (WSAN) offers the opportunity to monitor sensor performance and activate electric valves for initiating irrigation based on real-time feedback and performance data. In summary, the combination of soil, water,

and climate-based monitoring methods, along with a discrete predictive control approach, should be considered in planning. Given that agricultural irrigation systems face uncertainties, future studies should focus on developing dynamic process approaches for irrigation systems and the impact of intelligent monitoring and control methods on irrigation efficiency.

Conclusions

This research demonstrates that implementing smart technologies and advanced sensors optimizes irrigation management and enhances agricultural productivity. Given current challenges like climate change and reduced rainfall, smart agriculture is an undeniable necessity. Diverse sensors (such as PR2, TDR, and FDR) enable automated irrigation and optimal water resource management. Internet and mobile technology access in rural areas offers new opportunities for youth. Ultimately, addressing Iran's specific cultural and infrastructural requirements is crucial for the success of these technologies. By adopting data-driven approaches and real-time monitoring, improvements in plant performance and reductions in environmental pollution can be achieved. Smart agriculture adapts to climate change and varying climates by using smart monitoring for risk management, selecting resilient crop varieties with plant sensors, and employing supplemental irrigation guided by soil moisture sensors in dry regions. It also uses specific tools like FDR/TDR sensors for precise irrigation in arid climates, temperature/humidity sensors for disease prediction in temperate zones, and drainage sensors against waterlogging in humid climates. This approach optimizes resources and builds resilience.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data and links available on request from the authors.

Conflict of Interest

The authors declared no conflict of interest.



تکنولوژی های هوشمند در کشاورزی: مدیریت آب و منابع در عصر تغییرات اقلیمی

حسین زاهدپوریگانه^۱، افشین خورسند^۲، امید رجا^۳، و الهه کنعانی^۴

۱. موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران. رایانامه: zahedpoor.hossein@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: af.kh67@gmail.com

۳. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: omid.raja@ut.ac.ir

۴. دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: el.kanani92@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: این پژوهش با انگیزه یافتن راهکارهایی نوین و کارآمد در عرصه مدیریت آبیاری، به بررسی عمیق روش های غیرمستقیم اندازه گیری رطوبت خاک و فنون پیشرفته اتوماسیون آبیاری و آبیاری هوشمند می پردازد. هدف غایی، کاهش در دانش روز و ارزیابی رویکردهای نوآورانه و مؤثری است که بتوانند ضمن بهینه سازی مصرف آب و ارتقای بهره وری، پاسخی شایسته به چالش های فنی پیچیده در این حوزه باشند. این مطالعه، با تمرکز بر یافتن راه حل های عملی و پایدار، می کوشد تا زمینه ای را برای توسعه کشاورزی هوشمند و سازگار با محیط زیست فراهم آورد.

روش پژوهش: این مطالعه به بررسی حسگرهای مورد استفاده در کشاورزی هوشمند (بارندگی، دما و غیره) و تجهیزات آبیاری، پایش سرمازدگی، حفاظت از گیاهان و پایش محصولات می پردازد و ویژگی های آن ها را برای بهینه سازی کشاورزی، کاهش مصرف منابع و بهبود کارایی و پایداری تجزیه و تحلیل می کند.

یافته ها: فناوری های هوشمند می توانند بهره وری و بازدهی کشاورزی را افزایش دهند، به ویژه در مدیریت آب در کشورهای کم آب مانند ایران که کشاورزی هوشمند را ضروری می سازد. در حالی که کارایی آنها در کشورهای توسعه یافته ثابت شده است، موفقیت در ایران نیازمند زیرساخت های خاص است. سیستم های هوشمند عملکرد گیاه را بهبود می بخشد، اتلاف آب را کاهش می دهند و آلودگی را به حداقل می رسانند. با دسترسی گسترده به اینترنت در مناطق روستایی، آبیاری هوشمند با استفاده از حسگرهایی مانند TDR و PR2 می تواند فرآیندها را از طریق اینترنت اشیا خودکار کند. ملاحظات مهم شامل دقت حسگر، منبع تغذیه، هزینه و اثرات شوری است. شبکه های حسگر بی سیم دوطرفه (WSAN) امکان پایش و کنترل آبیاری را فراهم می کنند. برنامه ریزی آینده باید پایش خاک، آب و هوا را با کنترل پیش بینی کننده ادغام کند و بر فرآیندهای پویا و تأثیر پایش هوشمند بر کارایی آبیاری، باتوجه به عدم قطعیت های موجود در سیستم های آبیاری کشاورزی، تمرکز کند.

نتیجه گیری: با توانایی جلوگیری از بیماری ها، محافظت از محصولات در برابر سرمازدگی و از بین بردن ضایعات ذخیره سازی، این فناوری ها انقلابی در کارایی و عملکرد فرآیندهای کشاورزی ایجاد می کنند. در نهایت، پیاده سازی کشاورزی هوشمند و استفاده از حسگرهای رطوبت خاک، فراتر از صرفه جویی در آب، راهبردی بی نظیر برای غلبه بر چالش های آب و هوایی و فشارهای طاقت فرسا بر سیستم های کشاورزی ارائه می دهد.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

کلیدواژه ها:

تصمیم گیری مبتنی بر داده، سازگاری با اقلیم، فناوری حسگرها، کشاورزی دقیق، نظارت از راه دور.

استناد: زاهدپوریگانه، حسین؛ خورسند، افشین؛ رجا، امید؛ و کنعانی، الهه. (۱۴۰۴). تکنولوژی های هوشمند در کشاورزی: مدیریت آب و منابع در عصر تغییرات اقلیمی.

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۵ (۳)، ۴۳-۲۰.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11765.1155>



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه رازی.

مقدمه

کشاورزی به عنوان صنعت نخست جهان، نقش محوری در شکل گیری جامعه بشری ایفا می کند و اساس توسعه پایدار و اقتصادی جوامع را تشکیل می دهد. این صنعت با تغییرات عظیمی مواجه است و تکامل آن در آینده به عوامل مختلفی وابسته است. تغییرات آب و هوایی، رشد جمعیت و افزایش درآمد از جمله عواملی هستند که می توانند بر این صنعت تأثیر بگذارند. بر اساس پژوهش های انجام شده توسط سازمان جهانی غذا و کشاورزی^۱، فعالیت های انسانی منجر به تخریب یک چهارم از سطح خاکی کره زمین شده است (سولاو^۲، ۲۰۲۱). این تخریب زمین ها به شدت بر امنیت غذایی تأثیر دارد، زیرا سلامت خاک یکی از ارکان مهم تأمین غذای جوامع به شمار می آید. نرخ رشد جمعیت جهانی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، فشار بیشتری بر سیستم های تولید غذا وارد کرده و بر اساس گزارش های سازمان کشاورزی و غذای ملل متحد، نیاز به مواد غذایی تا سال ۲۰۵۰ نسبت به سال ۲۰۰۶ حدود ۶۰ درصد افزایش خواهد یافت (کلیا و کرن^۳، ۲۰۰۶). همچنین، گزارش ها نشان می دهند که در آینده، تعداد افرادی که با کمبود آب مواجه خواهند شد، از ۹۳۳ میلیون نفر در سال ۲۰۱۶ به حدود ۲ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰ افزایش می یابد (هی و همکاران^۴، ۲۰۲۱). این تهدیدات به ویژه در نواحی با منابع آبی محدود، در صورت عدم مدیریت صحیح، مشکل ساز خواهند شد. با وجود این چالش ها، کشاورزی هنوز هم پتانسیل های بزرگی برای ایجاد جامعه ای شاد و سالم دارد. این حوزه به عنوان یکی از مشاغل سخت و پرچالش دنیا، به صبر، دقت و کارایی بالا نیاز دارد. در عین حال، کشاورزی با چالش های مختلفی مواجه است که شامل عدم تعادل در استفاده از سفره های آب زیرزمینی، ناهماهنگی بین برنامه های آب و کشاورزی، کمبود حمایت از خصوصی سازی و پایین بودن بهره وری زمین، آب و انرژی است. همچنین، پایین بودن سرانه اراضی کشاورزی، عدم وجود نظام بهره برداری مناسب، و هزینه های بالای تولید از جمله مسائل دیگر به شمار می آیند. لازم به ذکر است که کارشناسان و متخصصان کشاورزی در سرتاسر جهان در حال کار برای مدیریت این محدودیت ها و چالش ها هستند. آن ها به دنبال افزایش کارایی و عملکرد این صنعت با بهره برداری از فناوری های نوین و بهبود روش های کشاورزی هستند. در نهایت، تلاش برای برقراری سیاست های مستمر و کارآمد در این حوزه، می تواند به تثبیت زنجیره تأمین و بهبود شرایط امنیت غذایی در سطح جهانی کمک کند (کشاورز و همکاران، ۱۴۰۰).

کشاورزی هوشمند که به انقلاب سبز سوم شهرت دارد، به مجموعه ای از روش های نوین مدیریتی اشاره می کند که هدف آن افزایش کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی، بهبود کارایی و کاهش مصرف منابع با استفاده از فناوری های اطلاعاتی و ارتباطی است (ثابت و محمدپور، ۱۴۰۰). این رویکرد به تدریج به یک ضرورت برای آینده کشاورزی تبدیل شده است. در اجلاس لاهه^۵ ۲۰۱۰ تحت عنوان کشاورزی، امنیت غذایی و تغییرات اقلیمی، FAO مفهوم کشاورزی هوشمند اقلیم^۶ (CSA) را معرفی کرد. در این اجلاس تأکید شد که عدم تغییر در سیاست گذاری های کنونی کشاورزی می تواند منجر به افزایش خطرات انسانی و مالی و تبدیل کشاورزی به نظامی ناتوان در تأمین امنیت غذایی شود (لیپر^۷، ۲۰۱۸). CSA به عنوان یک رویکرد کارآمد، به کشاورزان کمک می کند تا خود را با تغییرات آب و هوایی سازگار کنند و سیستم های کشاورزی را به منظور حفظ امنیت غذایی و بهبود انعطاف پذیری در برابر چالش ها بهینه سازی کنند (کاظم علیلو و جمشیدی، ۱۴۰۱). همچنین، خود کارسازی عملیات کشاورزی به طور کلی به بهبود عملکرد محصولات، کاهش مصرف آب و اثرات زیست محیطی منجر می شود (توسن و همکاران، ۱۴۰۳). نتایج به کارگیری فناوری های اطلاعات در کشاورزی شامل مصرف بهینه نهاده ها، کاهش هزینه های تولید، کاهش سختی کار، بهبود سلامتی محصول و افزایش بهره وری هستند که در نهایت به حفظ کشاورزی پایدار کمک می کند (باقری، ۱۳۹۸). شیوه های کشاورزی پایدار می تواند به صرفه جویی در مصرف آب، حفظ خاک، مدیریت پایدار زمین، حفاظت از منابع طبیعی، حفظ اکوسیستم ها و ارائه مزایای تغییرات اقلیمی کمک کند. برای دستیابی به این اهداف، نیاز به اطلاعات دقیق و تغییری بزرگ در نحوه مدیریت این منابع وجود دارد (فائو^۷، ۲۰۲۲).

1. Food and Agriculture Organization
2. SOLAW
3. Kaya and Curran
4. He et al
5. Climate Smart Agriculture
6. Lipper
7. FAO

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

کشاورزی هوشمند بر مبنای جمع‌آوری، انتقال و ذخیره‌سازی داده‌ها در سیستم‌های ذخیره‌سازی از راه دور استوار است و با تجزیه و تحلیل اطلاعات، امکان تصمیم‌گیری سریع و مؤثر را فراهم می‌آورد (چیدامباراناتان و همکاران^۱، ۲۰۱۸). در آینده، صنعت کشاورزی برای جمع‌آوری اطلاعات لحظه‌ای درباره وضعیت محصولات به فناوری‌هایی نظیر ماهواره‌ها، پهپادها، حسگرها و سیستم‌های هوشمند وابسته خواهد شد. این اطلاعات، به همراه پایگاه داده‌های هواشناسی و کشت محصول، به کشاورزان در اتخاذ تصمیمات روزانه کمک می‌کند و ابعاد فنی، اقتصادی و بازار محصول را در برخواهند گرفت (گرامی طیبی، ۱۳۹۶). نتایج موفقیت‌آمیز طرح‌های موجود نشان می‌دهد که کشاورزان، سیاست‌گذاران و سازمان‌های بین‌المللی به استفاده از شیوه‌های CSA در توسعه کشاورزی علاقمند هستند که در مناطق جغرافیایی مختلفی از جمله آفریقا، آسیا، اروپا و آمریکای لاتین انجام شده است (دی‌پینتو و همکاران^۲، ۲۰۲۰). از مهم‌ترین راهکارهای مدیریت بهینه مصرف آب و افزایش راندمان آبیاری در بخش کشاورزی، تغییر شیوه‌های سنتی آبیاری و استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری است. این روش‌ها نه تنها به بهبود زراعت کمک می‌کنند؛ بلکه از فرسایش خاک نیز جلوگیری می‌کنند (پورکریمی و همکاران، ۱۳۹۳). زمان آبیاری در هر روش آبیاری از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا بیش آبیاری یا کم آبیاری ناشی از غفلت و ناآگاهی کشاورزان از نیاز رطوبتی گیاهان باعث هدررفت سالانه محصولات می‌شود مشکلاتی نظیر کاهش رطوبت خاک و آبیاری نادرست موجب این چالش‌ها می‌گردند (بیابی و همکاران^۳، ۲۰۲۰).

پیاده‌سازی سامانه‌های هوشمند با هشدارهای قطع و وصل آبیاری و استفاده بهینه از اطلاعات این سامانه‌ها می‌تواند به‌طور قابل توجهی از مصرف بی‌رویه آب جلوگیری کند (آذر و همکاران^۴، ۲۰۲۰). افزایش بهره‌وری در تولید نیازمند به‌کارگیری دانش و فناوری‌های نوین است، و لذا باید از آخرین پیشرفت‌ها در حوزه‌های مختلف مانند الکترونیک، رایانه و هوش مصنوعی استفاده کرد. آینده تولید پایدار کشاورزی وابسته به این فناوری‌هاست که می‌توانند مقیاس، کارایی و اثربخشی تولید را در زنجیره تأمین کالا افزایش دهند (نهامو و همکاران^۵، ۲۰۱۷). کشاورزی هوشمند، یکی از این فناوری‌ها است که می‌تواند اثرات منفی تولید را کاهش دهد (چیدامباراناتان و همکاران، ۲۰۱۸). از آنجاکه کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب است، کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری در این بخش ضروری است (حسنی و همکاران، ۱۳۹۹). سیستم آبیاری هوشمند یکی از راهکارهای مؤثر برای جلوگیری از هدررفت آب در مقیاس‌های مختلف، از باغچه‌های کوچک تا مزارع بزرگ است. باتوجه به شرایط گرم و خشک ایران و هدررفت ۸۰ تا ۹۰ درصد آب کشور در بخش کشاورزی، نیاز به اصلاح روش‌های آبیاری فوری به چشم می‌خورد. در مقایسه با کنترلرهای قدیمی که بر اساس برنامه‌های ثابت عمل می‌کنند، کنترلرهای آبیاری هوشمند وضعیت آب‌وهوا، شرایط خاک و میزان تبخیر را اندازه‌گیری کرده و به‌طور خودکار زمان‌بندی آبیاری را باتوجه به نیاز واقعی زمین انجام می‌دهد. این قابلیت‌ها باعث بهینه‌سازی مصرف آب و افزایش کارایی آبیاری می‌شود (بشارت و خورسند، ۱۴۰۲). این سیستم‌ها، با نظارت دقیق بر مصرف آب، به مدیریت بهتر در جوامع هوشمند کمک می‌کنند (طباطبایی و همکاران^۶، ۲۰۲۲). مطالعه گنارو و همکاران^۷ (۲۰۲۴) نشان داد که چگونه اتخاذ یک سیستم آبیاری هوشمند مشکل از شبکه‌های حسگر بی‌سیم و الگوریتم‌های کنترل پیشرفته مبتنی بر مدل‌های تبخیر و تعرق می‌تواند به استفاده پایدارتر از آب در کشاورزی کمک کند. در تحقیق ایشان، اجرای تدریجی سیستم از یک راه‌اندازی معمولی در سال ۲۰۲۱ به یک راه‌حل کاملاً خودکار تا سال ۲۰۲۳، کاهش مصرف آب را تا ۵۰ درصد در مقایسه با روش‌های آبیاری سنتی امکان‌پذیر کرد.

در سامانه‌های آبیاری هوشمند، آب تنها به میزان نیاز واقعی گیاه و خاک تأمین می‌شود که این یکی از بزرگ‌ترین مزایای هوشمندسازی است. مدیریت دقیق زمان آبیاری نیز باعث کاهش خسارت‌ها و افزایش کارایی می‌شود. از فواید دیگر این سیستم می‌توان به صرفه‌جویی در هزینه‌ها، کاهش هدررفت آب، کاهش رواناب و فرسایش خاک، اشغال فضای کمتر با نصب تجهیزات

1. Chidambaranathan et al

2. De Pinto et al

3. Biabi et al

4. Azar et al

5. Nhamo et al

6. Tabatabaei et al

7. Gennaro et al

زیرزمینی و امکان نظارت از راه دور بر آبیاری باتوجهبه شرایط محیطی اشاره کرد (ثابت و محمدپور، ۱۴۰۰). ادغام سیستم‌های آبیاری هوشمند در کشاورزی، مزایای قابل توجهی را ارائه کرده و مصرف کارآمد و منطقی آب را تضمین می‌کند؛ همچنین به کاهش بحران جهانی آب کمک می‌نماید. ترکیب هوشمند اینترنت اشیا، سنسور از راه دور و هوش مصنوعی روند رو به رشدی را در زمینه آبیاری هوشمند در سال‌های آینده ایجاد خواهد کرد (هاموچ و همکاران^۱، ۲۰۲۴). برنامه‌ریزی دقیق آبیاری با استفاده از حسگرها این پتانسیل را دارد که بازده مصرف آب را افزایش دهد و درعین حال استفاده از منابع را به حداکثر برساند. در تحقیقی در راستای کاهش تلاش‌های یک کشاورز، یک سیستم آبیاری قطره‌ای مبتنی بر اینترنت اشیا توسعه داده شد و عملکرد سیستم مورد آزمایش قرار گرفت. سیستم توسعه یافته، متشکل از حسگرها و میکروکنترلرها، پارامترهای ذهنی محیطی، یعنی میزان رطوبت خاک، دمای خاک، رطوبت نسبی و دما را ثبت می‌کند. برنامه‌ریزی آبیاری با استفاده از آستانه‌های بالا (ظرفیت زراعی) و آستانه پایین (۵۰ درصد آب در دسترس گیاه) برنامه‌ریزی شد. اطلاعات گرفته شده توسط حسگرها با استفاده از فناوری اینترنت اشیا به صورت بی‌سیم در سرور ابری آپلود می‌شود که از هر نقطه جهان قابل دسترسی است. در طی یک دوره ۳۱ روزه، صرفه‌جویی ۳۵ درصدی در مصرف آب در مقایسه با آبیاری قطره‌ای مبتنی بر تبخیر- تعرق (روش سنتی) مشاهده شد (سینگ و همکاران^۲، ۲۰۲۳).

تحقیق در زمینه "کاربرد حسگرها و تجهیزات هوشمند در کشاورزی مدرن" از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا تغییرات اقلیمی و چالش‌های ناشی از آن به طور فزاینده‌ای امنیت غذایی و تولیدات کشاورزی را تهدید می‌کند. باتوجهبه افزایش جمعیت و نیاز مبرم به منابع غذایی، بهره‌گیری از تکنولوژی‌های نوین، به‌ویژه حسگرها، می‌تواند به مدیریت بهینه آب، خاک و سایر منابع کشاورزی کمک شایانی کند. این فناوری‌ها علاوه بر افزایش کیفیت و کمیت تولیدات، امکان پیشگیری از خساراتی نظیر بیماری‌ها و یخبندان را فراهم می‌آورند و در نهایت به کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری منتهی می‌شوند. همچنین، داده‌های حاصل از این حسگرها می‌توانند به کشاورزان در تصمیم‌گیری‌های بهینه و مبتنی بر شواهد یاری رسانند که این امر در راستای تحقق کشاورزی پایدار و کارآمد ضروری است؛ بنابراین، تحقیق در این حوزه نه تنها پاسخ‌گوی نیازهای امروز است، بلکه راه را برای آینده‌ای بهتر در کشاورزی نوین هموار می‌سازد. این پژوهش بانگیزه یافتن راهکارهایی نوین و کارآمد در عرصه مدیریت آبیاری، به بررسی عمیق روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک و فنون پیشرفته اتوماسیون آبیاری و آبیاری هوشمند می‌پردازد. هدف غایی، کاوش در دانش روز و ارزیابی رویکردهای نوآورانه و مؤثری است که بتوانند ضمن بهینه‌سازی مصرف آب و ارتقای بهره‌وری، پاسخی شایسته به چالش‌های فنی پیچیده در این حوزه باشند. این مطالعه، با تمرکز بر یافتن راه‌حل‌های عملی و پایدار، می‌کوشد تا زمینه‌ای را برای توسعه کشاورزی هوشمند و سازگار با محیط‌زیست فراهم آورد.

روش پژوهش

در این بخش، یک مرور جامع بر انواع حسگرهای پرکاربرد در زمینه هوشمندسازی کشاورزی و مدیریت بهینه آبیاری ارائه می‌شود. این مرور شامل حسگرهای مختلفی است، از جمله حسگرهای بارش، دما، برگ، نور، باد، فشار هوا (بارومتر)، دمای خاک، رطوبت خاک، آب، برف و گیاه. مشخصات این حسگرها به طور مبسوط در جدول (۱) آورده شده است. علاوه بر این، تجهیزات راه‌حل‌گرا که شامل ابزارهای مدیریت آبیاری، سیستم‌های مانیتورینگ سرمازدگی، حفاظت از گیاهان، تجهیزات رشد و تغذیه، ردیابی عملکرد ماشین‌آلات کشاورزی و دستگاه‌های پایش محصولات می‌شود، به صورت کامل موردبررسی قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، ویژگی‌ها و قابلیت‌های این تجهیزات نیز به تفصیل بررسی و تحلیل شده‌اند تا نقش آن‌ها در بهینه‌سازی فرآیندهای کشاورزی و کاهش مصرف منابع به روشی علمی و دقیق تبیین شود. این رویکرد به ما امکان می‌دهد تا به درک بهتری از چگونگی ارتقاء کارایی و پایداری در سیستم‌های کشاورزی مدرن دست یابیم.

1. Hammouch et al

2. Sing et al

یافته‌های پژوهش

۱. حسگرها

حسگرها یا سنسور^۱ ابزاری است که به محرک‌های فیزیکی خاص واکنش نشان می‌دهند و سیگنال‌های الکتریکی قابل‌اندازه‌گیری تولید می‌کنند. این حسگرها می‌توانند از انواع مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی یا نوری باشند. در جدول (۱)، حسگرهای پرکاربرد در راستای هوشمند سازی کشاورزی و آبیاری ذکر شده‌اند. تولید حسگرهای ارزان و کم‌مصرف در چند سال گذشته، تحولی نوین در کشاورزی ایجاد کرده است. همچنین، دیجیتالی‌سازی عملیات کشاورزی نیازمند تعداد زیادی حسگر است. این حسگرها نقش حیاتی در جمع‌آوری داده‌های زمین کشاورزی ایفا می‌کنند که این داده‌ها برای تجزیه و تحلیل و اتخاذ تصمیمات به کار می‌روند. انواع حسگرها شامل حسگرهای اندازه‌گیری برداشت محصول، موجودی انبار، میزان آب و مواد مغذی موجود در خاک و دماسنج‌های مخصوص ریشه گیاه یا خاک هستند. استفاده از حسگرها امکان نظارت لحظه‌ای بر داده‌های هیدرولیکی، خودکارسازی نظارت و ارائه هشدار توسط پلتفرم‌های مربوطه را در صورت وقوع مسائل مانند نشتی یا مصرف بیش از حد آب فراهم می‌کند (توسن و همکاران، ۱۴۰۳). ممکن است تکنیک‌های گیاهی به نظارت حرفه‌ای نیاز داشته باشند، زیرا درک داده‌های ردیابی شده برای کشاورزان دشوار بوده و این امر قابلیت اطمینان آبیاری را کاهش می‌دهد؛ هنگامی که یک نرم‌افزار و یا یک رویه مبتنی بر یک مدل خوب کالیبره شده باشد، استفاده از آن‌ها برای کاربران ساده‌تر می‌شود. لذا با تغییر روش برنامه‌ریزی آبیاری سنتی (عمل کشاورز) به روش برنامه‌ریزی آبیاری بر پایه‌ی صرفه‌جویی در مصرف آب و پذیرش فناوری‌های نوین، نشان از پتانسیل فوق‌العاده‌ی دوبرابر کردن سطح زیر کشت و بهره‌وری با استفاده از آب آبیاری موجود را دارد (آسفا و تادس^۲، ۲۰۲۴). فوتیس و همکاران^۳ (۲۰۲۴) از سنسور MLX90614 برای اندازه‌گیری دمای پوشش تاج و در نتیجه محاسبه شاخص تنش آبی محصول استفاده کردند. نتایج نشان داد که دماسنج مادون قرمز MLX90614 در شرایط آزمایشگاهی و تاکستان با میانگین مربعات خطای ریشه و میانگین خطای مطلق کمتر از یک درجه سانتی‌گراد، عملکرد خوبی را داشته است.

جدول ۱. مشخصات انواع حسگرهای موجود جهت هوشمندسازی کشاورزی (خورسند و همکاران، ۱۳۹۸a؛ خورسند و همکاران، ۱۳۹۸b؛ خورسند و همکاران^۴، ۲۰۱۹؛ خورسند و همکاران، ۲۰۲۰؛ و خورسند و همکاران، ۲۰۲۱)

و	اسم	توضیحات	شکل
بارش	باران سنج هوشمند	متشکل از یک آهنربا و سوئیچ نی است که با مکانیک سوئیچینگ سریع، آب از دست نمی‌رود. دقت دستگاه با سطح ۲۰۰ سانتی‌متر مربع، ۰/۲ میلی‌متر و با سطح ۸۰ سانتی‌متر مربع، ۰/۵ میلی‌متر است. جهت جلوگیری از ورود پرندگان و افزایش دقت دستگاه، می‌توان از تاج سبز رنگ استفاده کرد.	
دما	هیگروکلیپ ^۵	رطوبت نسبی و دما را با دقت و تکرارپذیری فوق‌العاده اندازه‌گیری کرده و یک تاریخچه جمع‌آوری داده و کالیبراسیون یکپارچه دارد. همچنین نقطه شبنم، کمبود فشار بخار ^۶ (VPD) و محاسبات دلتا T موجود است.	
	سنسج دمای هوا و رطوبت نسبی	دمای هوا و رطوبت نسبی را با از طریق آنالیز داده‌های دریافتی از حسگرهای مجازی مانند نقطه شبنم، VPD و دلتا T اندازه‌گیری می‌کند.	
	دمای جاب خشک و مرطوب	دو سنسور بسیار قابل اعتماد و آزمایش شده در یک محفظه ضد آب وجود دارد که یکی از آن‌ها با دستمال پنبه‌ای پوشیده شده و با آب خیس می‌شود.	

1. Sensor
2. Asefa and Tadesse
3. Fuentes et al
4. Khorsand et al
5. Hygroclip
6. Vapour Pressure Deficit

ادامه جدول ۱. مشخصات انواع حسگرهای موجود جهت هوشمندسازی کشاورزی

و	اسم	توضیحات	شکل
برگ	حسگر رطوبت برگ	سنسور رطوبت برگ با اندازه گیری رسانایی روی یک کاغذ صافی که بین دو الکترود فولاد ضدزنگ در یک محفظه شفاف نگه داشته می شود، کار می کند. استفاده از پلاستیک شفاف لوسیت به عنوان نگهدارنده، باعث کاهش گرم شدن سنسور در مواجهه با نور مستقیم خورشید می شود.	
	حسگر دمای برگ	یک سنسور دمای برگ بسیار دقیق است که دمای تابش شده در اطراف سطح برگ یا سایبان را اندازه گیری می کند.	
	حسگر دمای برگ از طریق مادون قرمز	با اندازه گیری مقدار انرژی مادون قرمز ساطع شده از جسم و میزان انتشار آن (بدون تماس)، می توان دمای جسم را تعیین کرد.	
نور	حسگر تابش فعال فتوسنتزی	تابش فعال فتوسنتزی ^۱ (PAR) معمولاً به عنوان چگالی شار فوتون فتوسنتزی ^۲ (PPFD) اندازه گیری می شود. دانشمندان گیاه شناسی، باغبانان، بوم شناسان و سایر دانشمندان محیط زیست از حسگرهای کوانتومی برای اندازه گیری دقیق این متغیر استفاده می کنند.	
	پیرانومتر ^۳	برای اندازه گیری میدانی تشعشعات خورشیدی در مطالعات کشاورزی، هواشناسی و انرژی خورشیدی طراحی شده است. در روز روشن و بدون مانع، این نسل جدید پیرانومترها نتایج مطلوبی در مقایسه با پیرانومترهای معمول دارند.	
باد	حسگر باد التراسونیک ^۴	یک سنسور باد صوتی دوبعدی است که به طور خاص برای کاربردهای کشاورزی، جنگل داری و تحقیقات زیست محیطی ساخته شده است. میانگین و حداکثر سرعت و جهت باد را در فاصله زمانی ۵ دقیقه محاسبه می کند.	
	سرعت سنج باد	یک بادسنج کم هزینه، طولانی مدت و دقیق برای هر نوع استفاده بوده که میانگین سرعت باد را در دوره زمانی مشخص محاسبه می کند.	
	مانیتورینگ ^۵ باد	برای اندازه گیری دقیق سرعت باد و سنسور یکپارچه جهت باد ساخته شده است که سرعت باد و جهت باد را به صورت هم زمان و ترکیبی از هر دو ثبت می کند.	
بارومتر	حسگر بارومتر ^۶	این حسگر فشار مطلق هوا را در محل اندازه گیری می کند. این برای کاربرد در زمینه حفاظت از محیط زیست طراحی شده است، جایی که دقت بالا، پاسخ سریع، پایداری طولانی مدت و قابلیت اطمینان مورد نیاز است.	

1. Photosynthetically Active Radiation
2. Photosynthetic Photon Flux Density
3. Pyranometer
4. Ultrasonic
5. Monitoring
6. Barometer

ادامه جدول ۱. مشخصات انواع حسگرهای موجود جهت هوشمندسازی کشاورزی

و	اسم	توضیحات	شکل
رطوبت خاک	حسگر رطوبت سنج خاک	طول این حسگر ۱۰ سانتی متر بوده و دارای نفوذ بیشتری است. محتوای حجمی آب را با اندازه گیری ثابت دی الکتریک خاک با استفاده از فناوری خازن و دمای خاک تعیین می کند.	
	پراب پروفیل ^۱	برای محصولات ردیفی مانند ذرت، پنبه، یونجه و سویا و همچنین تمام محصولات دائمی گزینه بهتری است. سنسور و کابل در زیر سطح ترانشه جای گذاری شده و نیازی به نصب سالانه سنسورهای خاک در مزرعه نیست. این سنسور میزان حجمی آب و دمای خاک را در پروفیل اندازه گیری می کند.	
	حسگر Drill and Drop	انعطاف پذیری زیادی را برای نظارت دقیق دما، میزان آب و شوری خاک در اعماق چندگانه در پروفایل خاک به کاربر ارائه می دهد.	
	حسگر رطوبت خاک واترمارک ^۲	شامل دو الکتروود متحدالمرکز است که در یک ماده ماتریس ویژه کارگذاری شده و توسط یک غشای مصنوعی در جای خود نگه داشته می شود. ماده ماتریس برای منعکس کردن حداکثر تغییر مقاومت الکتریکی در محدوده رشد محصول و همچنین خنثی کردن اثر شوری خاک انتخاب شده است. در عملیات، رطوبت خاک به طور مداوم جذب یا آزاد می شود و مقاومت الکتریکی بین الکتروودها تغییر می کند. این مقاومت توسط ایستگاه هواشناسی خوانده و ثبت می شود.	
	تانسیومتر ^۳	مکش آب خاک را اندازه گیری می کند. این مقدار نشان دهنده انرژی است که سیستم ریشه گیاه برای برداشت آب از خاک استفاده می کند. به کاربر کمک می کند تا تصمیمات برنامه ریزی آبیاری را آگاهانه اتخاذ کند و در نتیجه کمیت و کیفیت عملکرد را بهبود بخشد و درعین حال هزینه های آب، کود، نیروی کار و انرژی را کاهش دهد.	
دمای خاک	حسگر دمای خاک	یک سنسور دقیق در محفظه فولادی ضد آب است.	
	حسگر دمای خاک چندگانه	اندازه گیری دمای خاک را از چند سانتی متر تا عمق ۱۵ متر را فراهم می کند. فاصله بین سنسورها را می توان باتوجه به کاربرد انتخاب کرد (حداکثر ۱۰ سنسور).	

1. Probe Profile
2. Watermark
3. Tensiometer

ادامه جدول ۱. مشخصات انواع حسگرهای موجود جهت هوشمندسازی کشاورزی

و	اسم	توضیحات	شکل
آب	pH و EC	یک دستگاه اندازه گیری با صفحه نمایش در جعبه ضد آب است که می تواند برای اندازه گیری مداوم pH و EC استفاده شود. با استفاده از حالت کالیبراسیون داخلی، تمام قرائت های سنسور را می توان هر از گاهی کالیبره و بررسی کرد.	
	حسگر EC	از یک سنسور قابل اعتماد و قوی برای اندازه گیری رسانایی و یک ترمومتر برای اندازه گیری دما استفاده می کند. این سنسور برای نظارت بر آب و محیط زیست، در کشاورزی و صنعتی ایده آل است.	
	حسگر pH	برای اندازه گیری مقدار pH محلول های مختلف آبی است.	
	حسگر تغییر فشار	سوئیچ فشار برای استفاده با هوای فشرده، روغن هیدرولیک، امولسیون روغن و آب مناسب است. آستانه تشخیص یک بار و خاموشی ۰/۵ بار است. هدف اصلی این سنسور کنترل و یا بررسی عملکرد سیستم آبیاری است.	
	رابط کنتور آب	این رابط ها که در اکثر کنتور های آبی مورد استفاده قرار می گیرند در مدیریت آبیاری، مشاوره آبیاری، آبیاری هوشمند، کنترل پذیری آبیاری، حسابداری آب و به طور کلی و گسترده در محصولات زراعی باز، هیدروپونیک و گلخانه استفاده می شود.	
	فشارسنج لوله	امکان نظارت مداوم بر فشار در لوله های آبیاری را فراهم می کند، بنابراین می توان از آن در انواع سیستم های آبیاری مدرن استفاده کرد.	
برف	حسگر سطح آب	یک سنسور سطح آب دقیق و مقرون به صرفه دارای یک ماژول حسگر بارومتریک یکپارچه برای افزایش دقت است که برای اندازه گیری عمق یا سطح در چاه ها و آب های آزاد (رودخانه ها و دریاچه ها) مورد استفاده قرار می گیرد.	
	حسگر التراسونیک	برای اندازه گیری بدون تماس عمق برف و سطح رودخانه (عمق آب) در شرایط آب و هوایی بسیار سرد استفاده می شود.	
گیاه	دندرومتر ^۱	ابزاری مقرون به صرفه و مفید برای مطالعات اکوفیزیولوژیکی بوده و برای اندازه گیری مداوم رشد گیاه (تغییر قطر گیاه) به کار می روند و به کاربر اجازه می دهد تا پارامترهای گیاه را با استفاده از فاصله زمانی مشابه ثبت کند.	

۲. تجهیزات راه حل گرا

تجهیزات مدیریت آبیاری

حسگر نامرئی برای مدیریت آبیاری و تنش آبی: این حسگر قادر است همه مسائل بالقوه و رویدادهای استرسزا را پیش از وقوع یا قابل مشاهده شدن شناسایی کند. این دستگاه که شامل ضروری ترین حسگرها برای مدیریت آبیاری و تنش آبی است، دمای خاک و محتوای حجمی آب را تقریباً در زمان واقعی اندازه گیری می کند. مطابق با شکل (۱)، نصب این دستگاه می تواند به طور کامل در زیر زمین (نامرئی) باشد که آن را به گزینه ای ایده آل برای زمین های گلف، پارک ها، خانه ها، باغ ها و مزارع تبدیل می کند. این دستگاه با یک باتری که بین ۶ تا ۱۲ ماه عمر می کند، تغذیه می شود و می تواند در برنامه ریزی آبیاری و شناسایی نقاط استرس احتمالی کمک کند. این سیستم با بهره گیری از حسگرهایی که به طور مداوم رطوبت و دمای خاک را در هر مکان اندازه گیری می کنند، راهکاری

1. Dendrometer

نوین در مدیریت منابع ارائه می دهد. طراحی نامرئی این حسگرها، ضمن حفظ زیبایی محیط (مانند زمین های گلف و پارک ها)، هیچ گونه مزاحمتی برای کارگران ایجاد نمی کند. باتوجه به استفاده از باتری با عمر طولانی (۶ تا ۱۲ ماه)، نیاز به پیل خورشیدی مرتفع شده و سیستم به طور قابل توجهی مقرون به صرفه و بادوام خواهد بود. این ویژگی ها در کنار کاهش خطر خرابکاری و سرقت احتمالی، این سیستم را به گزینه ای ایده آل برای کاربردهای مختلف تبدیل می کند.



شکل ۱. نمونه هایی از حسگرهای نامرئی دفن شده در زیر زمین

دستگاه مدیریت آب برای آینده ی پایدار کشاورزی: این دستگاه اینترنت اشیا (IoT) برای نظارت بر عمق سطح آب در مزارع برنج و بسیاری از کاربردهای دیگر در زمان واقعی طراحی شده است. مطابق شکل (۲) این دستگاه به کشاورزان کمک می کند تا با استفاده از روش های مرطوب و خشک کردن و سایر تکنیک های صرفه جویی در آب، در زمان و هزینه صرفه جویی کنند و استفاده از آب را بهینه کنند. این امر می تواند به کاهش پتانسیل گرمایش جهانی از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه ای (متان) و درعین حال حفظ ریشه های سالم تر کمک کند. این دستگاه همچنین دارای قابلیت ذخیره سازی و اشتراک گذاری خودکار داده ها است که مدیریت دانش بهتر را در سطح جامعه تسهیل می کند.



شکل ۲. نمونه ای از دستگاه مدیریت آب در مزارع پر آب بر مانند شالیزارها

دستگاه اندازه گیری ارتفاع برف یا سطح آب: این دستگاه با استفاده از یک حسگر سطح اولتراسونیک، یک راه حل مقرون به صرفه و دارای سیستم هشدار اولیه برای اندازه گیری غیرتماسی ارتفاع برف یا سطح آب در شرایط سخت ارائه می دهد. شکل (۳) نمایی از این دستگاه است. با قابلیت اطمینان بالا، مصرف انرژی کم، نصب سریع و هزینه نگهداری پایین، این دستگاه امکان نظارت و جمع آوری داده ها در مناطق حساس را فراهم می کند که می تواند به محافظت از مردم و جلوگیری از آسیب های جدی کمک کند و درعین حال سهولت استفاده را نیز تضمین می کند.



شکل ۳. نمونه‌ای از دستگاه نصب شده در بالای سطح رودخانه و ایستگاه هواشناسی

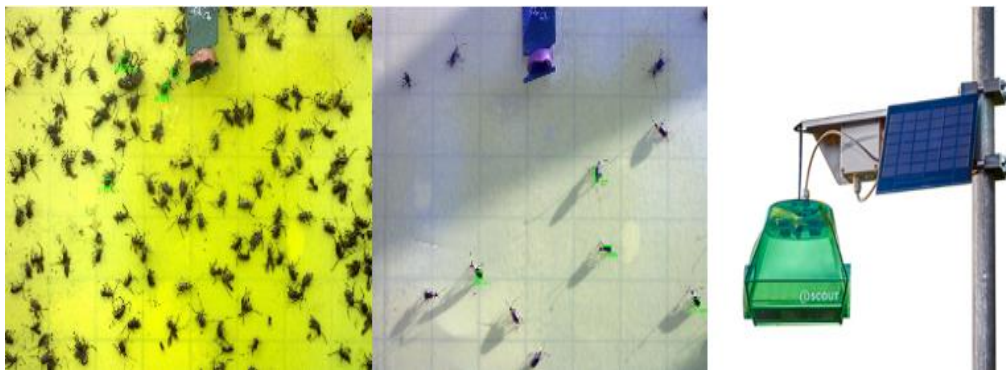
دستگاه مانیتورینگ سرمازدگی: تغییر اقلیم به وقوع یخ‌بندان بهاره که هم‌زمان با گلدهی گیاهان اتفاق می‌افتد، تأکید دارد و هر ساله خسارات زیادی در تولید محصولات کشاورزی ایجاد می‌کند. سرمازدگی بهاره می‌تواند تجربه‌ای ویرانگر برای کشاورزان باشد؛ چرا که نه تنها به گیاهان و محصولات آسیب می‌زند، بلکه امکان دارد آن‌ها را کاملاً از بین ببرد. این مسئله منجر به اتلاف بسیاری از کارها، زمان و تلاش کشاورزان در کاشت و پرورش مزارع می‌شود و در بدترین حالت ممکن، ضرر مالی شدیدی به آن‌ها وارد می‌آورد. دستگاهی که در شکل (۴) نمایش داده شده، امکان دسترسی مداوم از راه دور را به کشاورزان می‌دهد تا بتوانند مزرعه خود را در زمان واقعی تحت کنترل قرار دهند. دستگاه مانیتورینگ سرمازدگی با استفاده از سنسورهای خاص، امکان اندازه‌گیری دقیق دمای حباب مرطوب و خشک را فراهم می‌کند. این دستگاه در صورت وقوع یخ‌بندان، از طریق پیامک، صدا و ایمیل هشدارهای لازم را به کشاورزان ارسال می‌کند و زمان دقیق در معرض خطر قرار گرفتن محصولات را نیز اطلاع‌رسانی می‌کند. همچنین، این دستگاه قابلیت تعیین میزان تاثیرگذاری ابزارهای کاهش یخ‌بندان را دارد و در صورت نیاز، تنظیمات لازم برای بهبود کارایی را پیشنهاد می‌دهد.



شکل ۴. نمونه‌ای از دستگاه مانیتورینگ سرمازدگی

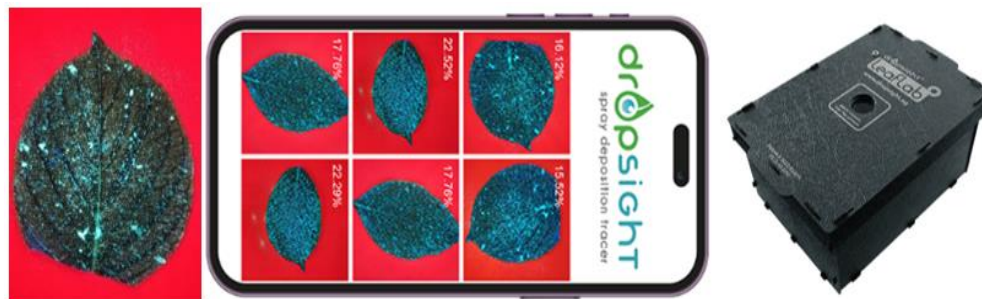
۳. حفاظت از گیاهان، رشد و تغذیه

کنترل کامل ساکنان مزرعه: مهندسان باهدف کمک به کشاورزان در رشد محصولات به بهینه‌ترین و سالم‌ترین شکل، یک سیستم دوربین اپتیکال با وضوح بالا به همراه نرم‌افزار بینایی کامپیوتری طراحی کرده‌اند که قادر به شناسایی حشرات از روی تصاویر است. این سیستم شامل یک تله حشرات با تجهیزات الکترونیکی یکپارچه، شامل دوربین، مودم، منبع تغذیه با پنل خورشیدی و صفحه چسبنده است. دوربین نوری با وضوح بالا درون این تله نصب شده است تا بتواند وجود حشرات را از راه دور در مزارع نظارت کند. لازم به ذکر هست که انواع مختلفی از تله‌ها برای پوشش طیف وسیعی از گونه‌های حشرات، توسعه داده شده است. شکل (۵) نمونه‌ای از این دستگاه است.



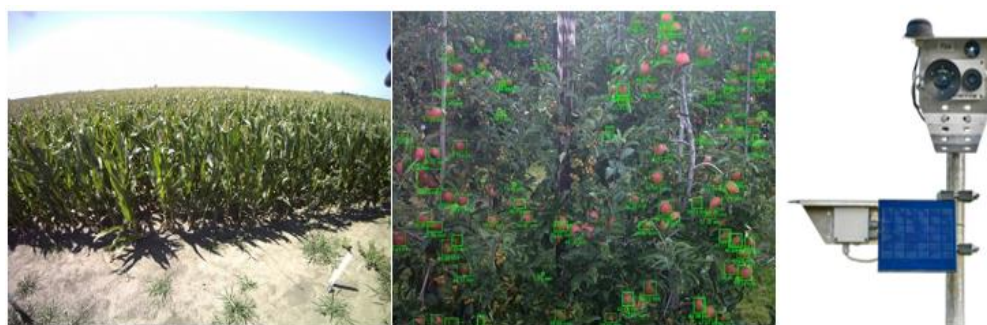
شکل ۵. نمونه‌ای از دستگاه پایش و شناسایی حشرات

واسنجی سم‌پاش و مدیریت پاشش: این ابزار با کاربری آسان، به کشاورزان کمک می‌کند تا راندمان پاشش را بر روی سطوح طبیعی گیاه اندازه‌گیری کنند. این ابزار با استفاده از جعبه مخصوص (LeafLab)، مایع (UV (UView) و نرم‌افزار DropSight، امکان اتخاذ تصمیمات آگاهانه‌تر بر اساس اندازه‌گیری‌های کمی مواد اسپری شده را فراهم می‌کند. این امر منجر به کاهش خطراتی مانند نتایج ضعیف کنترل بیولوژیکی به دلیل راه‌اندازی ضعیف سم‌پاش و نشست مواد اسپری شده، سطوح باقیمانده غیرقابل قبول ناشی از تجمع و روان‌شدن حجم زیاد یا قطرات بزرگ، تلفات شیمیایی ناشی از ترشحات پاشش بیش از حد و آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی به دلیل حجم زیاد پاشش می‌شود. در نهایت، استفاده از این ابزار به بهینه‌سازی مقدار استفاده از فرمولاسیون‌های شیمیایی، به حداقل رساندن از دست دادن محصول، توسعه مقاومت بالقوه، بهینه‌سازی انتخاب و استفاده از مواد کمکی و افزودنی‌ها برای بهبود کارایی پاشش و طراحی مناسب برای بهینه‌سازی عملکرد سم‌پاش کمک می‌کند. شکل (۶) تصاویری از این دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۶. دستگاه، نرم‌افزار و نمونه‌ی پایش شده‌ی میزان محلول پاششی

کنترل از راه دور: شرایط مزرعه، شرایط محصول و رشد میوه به وسیله یک سیستم دوربین نوری پیشرفته که توسط نرم‌افزار هوش مصنوعی پشتیبانی می‌شود، به طور کامل از راه دور تحت کنترل قرار می‌گیرد که در شکل (۷) نشان داده شده است. جهت کمک به کشاورزان برای رشد محصولات به بهینه‌ترین و سالم‌ترین روش، یک سیستم دوربین اپتیکال با وضوح بالا به همراه نرم‌افزار بینایی کامپیوتری طراحی شده است که قادر به تشخیص اشیاء از روی تصاویر است. این سیستم به کشاورزان این امکان را می‌دهد تا به طور دقیق و مؤثری بر وضعیت محصولات و شرایط محیطی نظارت کنند. استفاده از این فناوری می‌تواند به کشاورزان در شناسایی مشکلات زود هنگام، مدیریت کارآمدتر منابع و بهبود عملکرد کلی مزرعه کمک کند.



شکل ۷. نمونه ای از دستگاه پایش محصول و کاربرد آن در باغات و مزارع

پیشبرد نظارت بر سلامت و تغذیه گیاهی: این فناوری یک حسگر گیره برگ است که قادر به اندازه گیری نیتروژن و کلروفیل به طور غیرمخرب است. شکل (۸) نمونه ای از این حسگر است. این حسگر محتوای کلروفیل و شاخص های پلی فنلی برگ های گیاه را نیز تحت بررسی قرار می دهد. این حسگر نوری امکان اندازه گیری آسان، سریع و غیرمخرب کلروفیل، فلاونول ها و آنتوسیانین ها را در برگ ها فراهم می کند. فلاونول ها به ویژه پس از قرارگیری در معرض نور، فرآیند سنتز را آغاز می کنند و به این ترتیب نشان دهنده خوبی از تعامل گیاه با نور هستند. فلاونول ها و آنتوسیانین ها به گروه پلی فنول ها تعلق دارند که برای سلامت انسان شناخته شده اند. این ترکیبات دارای خواص آنتی اکسیدانی هستند و به کاهش آسیب های سلولی و التهاب ها کمک می کنند. از سوی دیگر، آنتوسیانین ها نیز در سلامت قلب و عروق مؤثرند، اثرات ضدالتهابی دارند و به واسطه ی مزایای آنتی اکسیدانی بیشتر، در تقویت سیستم ایمنی بدن نقش ایفا می کنند. این دستگاه با تجزیه و تحلیل و غربالگری فلاونول ها و آنتوسیانین ها بر اساس فلورسانس کلروفیل اقدام به اندازه گیری این ترکیبات می کند. سیستم اندازه گیری هوشمند این دستگاه با بهره گیری از طول موج های مختلف نور، به تحریک کلروفیل پرداخته و فلورسانس آن را اندازه گیری کرده و در نهایت نتایج را محاسبه می نماید.



شکل ۸. نمونه ای از دستگاه پایش سلامت و تغذیه گیاه

تعیین نیازهای کودی با استفاده یک بازتاب سنج قابل حمل: تأمین نیتروژن بهینه برای محصولات زراعی، یکی از حیاتی ترین تصمیمات در کشاورزی است. این دستگاه یک حسگر دستی و قابل حمل است که به تسهیل تصمیم گیری در خصوص کودی کمک می کند. شکل (۹) یک نمونه از این حسگر است. این حسگر وضعیت تغذیه نیتروژن محصولات را با ارزیابی محتوای کلروفیل گیاهان و مقدار زیست توده آن ها اندازه گیری می کند. اندازه گیری ها در حین حرکت در مزرعه طی ۲۰ ثانیه انجام می شود. علاوه بر این، اندازه گیری شاخص پوشش گیاهی اطلاعاتی درباره توسعه محصول و جذب نیتروژن فراهم می آورد. در فرآیند توصیه کودی، این دستگاه به پارامترهایی نظیر تنوع محصول، بازده مورد انتظار، مرحله رشد محصولات و محتوای پروتئین دانه توجه می کند. ویژگی های این دستگاه عبارتند از تشخیص سریع، قابل اعتماد و مقرون به صرفه، ارائه توصیه های مستقیم و کاربردی در زمینه کاربرد نیتروژن، امکان کنترل و بهینه سازی عملکرد و محتوای پروتئین.



شکل ۹. نمونه‌ای از دستگاه بازتاب‌سنج و نحوه عملکرد آن

۴. ردیابی کار ماشین‌آلات

این سیستم قابلیت ردیابی و کنترل کامل ماشین‌آلات و تجهیزات کشاورزی، از جمله تراکتورها، دروگرها، سم‌پاش‌ها و ماشین‌های چمن‌زنی را به صورت راه دور فراهم می‌آورد. این ویژگی‌ها به حداکثر رساندن کارایی نیروی کار کمک کرده و شفافیت کاملی در زمینه ردیابی ماشین‌آلات ایجاد می‌کند. این دستگاه که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، به راحتی بر روی تراکتور یا هر وسیله نقلیه دیگری نصب می‌شود و فرایندهایی را به صورت خودکار انجام می‌دهد. به عنوان مثال، با اطلاع از اینکه سم‌پاشی با سرعت مناسب انجام شده یا تعمیر و نگهداری به موقع صورت گرفته است، می‌توان بهره‌وری عملیات زراعی را افزایش داد. ماشین‌آلات کشاورزی به خودی خود پیچیده هستند و این دستگاه مواردی نظیر سطوح بهره‌وری، قابلیت ردیابی، ایمنی عملیات، استفاده روزانه کارآمد از دستگاه و هزینه سوخت را در نظر می‌گیرد و به مدیران کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری اتخاذ کنند.



شکل ۱۰. نمونه ردیاب ماشین‌آلات

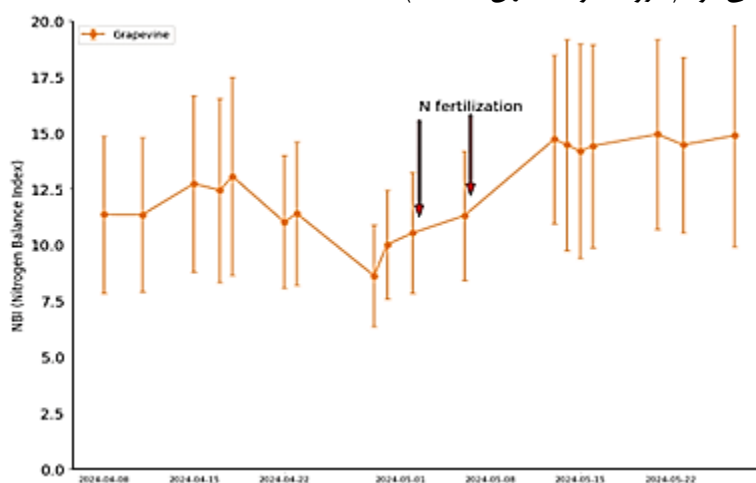
۵. دستگاه پایش محصولات

این دستگاه که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، به طور مداوم دما، رطوبت و سطوح CO₂ را در زمان واقعی در محل نگهداری محصولات ردیابی می‌کند. با پایش داده‌های ذخیره شده، این دستگاه به جلوگیری از تلفات محصولات موجود در انبار در هر فصل کمک می‌کند. به طور معمول، برای جمع‌آوری داده‌ها، دستگاه به مدت ۳ الی ۵ بار در میان محصولات انبار قرار داده می‌شود. داده‌ها و گزارش‌ها به صورت آنی و با اتصال به سایر دستگاه‌ها قابل دسترسی هستند. این دستگاه به عنوان یک ابزار اساسی در مدیریت ذخیره‌سازی محصولات استفاده می‌شود. این دستگاه مزایای متعددی دارد. اولاً، با شناسایی شرایط موجود به کاربر این امکان را می‌دهد که قبل از وقوع آسیب یا پوسیدگی، اقدامات لازم را انجام دهد. دوماً، به تنظیم دقیق شرایط محیطی داخل واحد ذخیره‌سازی کمک می‌کند که در نتیجه نگهداری، تحویل بهتری از محصول حاصل گردد. سوماً، در صورت شناسایی محصولی با شرایط نامناسب، هشدار صادر کرده و به جلوگیری از تلفات کمک می‌کند. در نهایت، با جلوگیری از تلفات محصولات، از ضرر مالی ناشی از کاهش کیفیت و مقدار محصول جلوگیری می‌نماید و در نتیجه هزینه‌ها را کاهش می‌دهد.



شکل ۱۱. نمونه‌ای از دستگاه پایش محصول

در ادامه به چند نمونه از کارکرد برخی از تجهیزات فوق پرداخته می‌شود (وبسایت متوس^۱): دستگاه پایش سلامت و تغذیه گیاه، یک سنسور غیرمخرب گیره مانند برگ است که سنجش‌های ارزشمندی را از طریق اندازه‌گیری شاخص تعادل نیتروژن (NBI)^۲ ارائه می‌دهد. NBI به کشاورزان کمک می‌کند تا تصمیمات آگاهانه‌ای در مورد استفاده از نیتروژن بگیرند، به‌ویژه در سایبان‌های عمودی مانند تاکستان‌ها، باغ‌ها، محصولات فشرده؛ مانند سبزی‌ها و توت‌ها و همچنین می‌تواند در محصولات زراعی مانند گندم، سیب‌زمینی و یا سویا استفاده شود. با استفاده از NBI، کشاورزان می‌توانند از کوددهی بیشتر یا کمتر جلوگیری کنند که این امر منجر به کاهش آلودگی و تبخیر نیتروژن، صرفه‌جویی در هزینه و تغذیه بهینه محصول برای بهبود عملکرد و کیفیت می‌شود. دستگاه پایش سلامت و تغذیه گیاه می‌تواند توسط هر شخصی که با گیاهان سروکار دارد، در داخل یا خارج از خانه مورد استفاده قرار گیرد. به‌عنوان یک مثال در یک آزمایش انگور گلدانی در اتریش، سطح نیتروژن انگور نزدیک به دو ماه، از آوریل تا اوایل ژوئن ۲۰۲۴ اندازه‌گیری شد و میزان اثربخشی نظارت NBI به وضوح نمایان گردید که در شکل (۱۲) آورده شده است. شاخص NBI از حدود ۱۱ شروع شد و به تدریج به دلیل حرکت طبیعی نیتروژن از خاک با افزایش دما افزایش یافت. با این حال، در عرض دو هفته، NBI به طور قابل توجه کاهش یافت و به مقدار ۸ رسید؛ زیرا تقاضای نیتروژن گیاه در طول فاز رشد افزایش یافته آن در بهار، بیش از عرضه بود. در این مرحله، انگور به مرحله گلدهی خود نزدیک می‌شد، جایی که مقدار NBI حداقل ۱۱ برای رشد بهینه توصیه می‌شود (سرویک و همکاران^۳، ۲۰۱۵).



شکل ۱۲. پایش شاخص تعادل نیتروژن (NBI) در یک تاک گلدانی با استفاده از دستگاه پایش سلامت و تغذیه گیاه

دمای نقطه شبنم دمایی است که در آن بخار آب موجود در هوا متراکم می‌شود و قطرات مایعی را تشکیل می‌دهد و هوا در آن لحظه خنک می‌شود؛ بنابراین، هنگامی که دمای نقطه شبنم برابر با دمای هوا باشد، رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد است. با ادامه افزایش دمای هوا از دمای نقطه شبنم، مقادیر رطوبت نسبی کمتر می‌شود؛ درحالی که وقتی دمای هوا به سمت نقطه شبنم سرد می‌شود،

رطوبت نسبی افزایش می‌یابد. دمای نقطه شبنم می‌تواند برای پیش‌بینی زمان وقوع یخبندان تابشی استفاده شود. به‌عنوان مثال، اگر آسمان صاف باشد، بادها ملایم باشند و دمای هوا در ساعت ۶ بعد از ظهر، ۸ درجه سانتی‌گراد باشد، اما نقطه شبنم ۲- درجه سانتی‌گراد باشد، در این صورت احتمال یخبندان در شب یا اوایل صبح روز بعد وجود دارد. نقاط شبنم بالا را می‌توان به‌عنوان پیش‌بینی آب و هوای شدید استفاده کرد. هر چه نقطه شبنم بالاتر باشد، رطوبت هوا برای توسعه شدید آب‌وهوا بیشتر است. اگر نقاط شبنم زیر ۱۳ درجه سانتی‌گراد باشد، شرایط عموماً پایدار است، دما بین ۱۳ درجه سانتی‌گراد تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد آنگاه نیمه مرطوب و نیمه ناپایدار، ۱۸ درجه سانتی‌گراد تا ۲۳/۵ درجه سانتی‌گراد آنگاه غیرمرطوب و بالاتر از ۲۳/۵ درجه سانتی‌گراد آنگاه بسیار مرطوب و بسیار ناپایدار می‌شود. چندین عامل دیگر برای آب و هوای شدید مورد نیاز است، اما دمای نقطه شبنم یک عامل مهم است. دانستن سطح رطوبت خاک از منظر هزینه و عملکرد در محصولات دیم و آبی بسیار مهم است؛ زیرا مقدار مواد مغذی مصرفی نیازمند برآورده کردن سطوح رطوبتی خاک دارد. به‌عنوان مثال اگر ۲۵۰ میلی‌متر کوددهی کنید، درحالی‌که ۳۰۰ میلی‌متر کمبود رطوبت خاک وجود دارد، پتانسیل عملکرد را از دست خواهید داد.

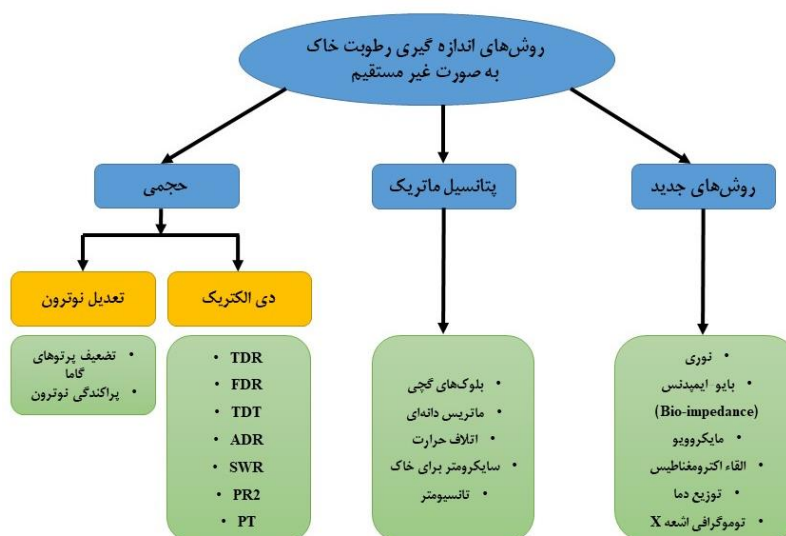
تنوع آب‌وهوا همچنان یک چالش بزرگ برای کشاورزی مدرن است و همه چیز از جوانه‌زنی بذر تا برداشت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از طریق این مجموعه چهارقسمتی، روابط پیچیده بین پارامترهای آب‌وهوا و موفقیت کشاورزی موردبررسی قرار می‌گیرد. درک تنوع بارندگی به کشاورزان کمک می‌کند تا پتانسیل عملکرد را پیش‌بینی کنند و تصمیمات آگاهانه‌ای در مورد آبیاری و کاربردهای مواد مغذی بگیرند. نظارت بر دما امکان کنترل دقیق تبخیر و تعرق، خطر یخبندان و راندمان سم‌پاشی را فراهم می‌کند که منجر به بهبود اثربخشی آفت‌کش‌ها و حفاظت از محصولات می‌گردد. شرایط رطوبت و باد نقش مهمی در توسعه بیماری، خطرات اسکان و فرآیندهای خشک کردن ایفا می‌کند و نیاز به داده‌های میدانی فوری را برجسته می‌کند. در نهایت، تابش خورشیدی و رطوبت خاک مستقیماً بر رشد محصول و جذب مواد مغذی تأثیر گذاشته و نشان می‌دهند که تعادل مناسب میان آب و نور خورشید برای به حداکثر رساندن پتانسیل عملکرد ضروری است.

۶. مدیریت آب (سنجش رطوبت خاک)

آگاهی از زمان مناسب برای شروع و توقف آبیاری، به حفاظت از یکی از بزرگ‌ترین منابع کره زمین، یعنی آب، کمک می‌کند. سنجش دقیق رطوبت خاک موجب می‌گردد سیستم آبیاری در زمان درست اجرا شود تا از اتلاف آب و شستشوی کود جلوگیری شود. این مدیریت نه‌تنها منجر به استفاده بهینه از آب و کود می‌شود بلکه می‌تواند بازده تولید را افزایش دهد. مدیریت صحیح آبیاری مزایای متعددی دارد. این مدیریت منجر به ذخیره آب از طریق استفاده بهینه و کاهش هدررفت آن می‌شود. همچنین، با استفاده کمتر از منابع، عملکرد و میزان تولید افزایش می‌یابد. علاوه بر این، کیفیت محصولات به واسطه تأمین نیازهای واقعی گیاه بهبود می‌یابد. فرایند شستشوی کود کاهش یافته و مصرف آن بهینه می‌شود. در نهایت، با تأمین رطوبت مناسب، سلامت و رشد گیاهان افزایش می‌یابد. یکی از راه‌های افزایش کارایی مدیریت آبیاری، تعیین رطوبت خاک^۱ است که معمولاً به‌صورت نسبت بین جرم آب در نمونه خاک و جرم خشک آن یعنی رطوبت وزنی خاک^۲ یا بر حسب حجم آب در خاک به حجم معینی از خاک خشک یعنی رطوبت حجمی خاک^۳ بیان می‌شود؛ با این حال، روش‌های وزنی برای تعیین رطوبت خاک معمولاً مخرب، غیرقابل تکرار و زمان‌بر هستند. به همین دلیل، روش‌های غیرمستقیم مبتنی بر ویژگی‌های فیزیکی یا شیمیایی خاک مانند نفوذپذیری یا گذردهی دی‌الکتریک خاک^۴، ظرفیت حرارتی یا محتوای H⁺ به‌عنوان جایگزین‌هایی مناسب در نظر گرفته می‌شوند (کلارک تاپ و فری^۵، ۲۰۱۸). در این راستا، هاردی^۶ (۲۰۲۰) بررسی جدیدی درباره حسگرهای رطوبت خاک برای استفاده در کشاورزی انجام داده است. در سه دهه گذشته، حسگرهای متنوعی با استفاده از اصول فیزیکی مختلف، طراحی‌های الکترونیکی و ساختارهای متنوع توسعه یافته و در دسترس بخش آبیاری قرار گرفته است. این حسگرها به کشاورزان کمک می‌کنند تا رطوبت خاک را به‌طور دقیق و کارآمد برای بهینه‌سازی آبیاری مدیریت کنند و به

1. Soil water content
2. Gravimetric water content
3. Volumetric soil water content
4. Soil dielectric permittivity
5. Clarke Topp and Ferré
6. Hardie

این ترتیب، منابع آب را بهتر حفظ کنند (لکشمی و همکاران^۱، ۲۰۱۴؛ ورا و همکاران^۲، ۲۰۱۷). درک مقادیر رطوبت خاک در منطقه‌ی پویای ریشه، امکان تعریف یک الگوی فصل رشد محصول و خاک را فراهم می‌کند، اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای در زمین، همراه با داده‌های پیش‌بینی شده درباره تبخیر و تعرق، بینشی به مصرف آب در آینده ارائه می‌دهند. رطوبت خاک نقش بسزایی در تشخیص تنش آبی و مدیریت آبیاری دارد. با این حال، تخمین دقیق رطوبت خاک از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی می‌تواند بسیار گران باشد، زیرا نیاز به فرآیند نمونه‌برداری تکراری برای ارزیابی تغییرات دوره‌ای در رطوبت خاک دارد. باتوجه‌به اینکه رطوبت خاک از نظر زمانی و مکانی بسیار پویا است، ضروری است که به‌طور مستمر نظارت و پایش شود. روش‌های مختلفی برای تعیین وضعیت رطوبت خاک وجود دارد که می‌توان آن‌ها را در شکل (۱۳) خلاصه کرد. این روش‌ها مزایا و معایب خاص خود را دارند و باید با احتیاط و متناسب با نیاز و تقاضای پروژه انتخاب شوند (شارما و همکاران^۳، ۲۰۱۸). روش وزنی یا حجمی دقت بالایی دارند، اما سطح دقت به دقت توزین بستگی دارد، اگرچه این خطاها در مقایسه با تنوع خاک در مزرعه ناچیز است، این تکنیک بسیار دقیق است، اما نکاتی وجود دارد. این روش‌ها بیشتر به‌عنوان یک ابزار راهنما مورد استفاده قرار می‌گیرند (لی و همکاران^۴، ۲۰۱۸). در جدول ۲، حسگرهای اندازه‌گیری غیرمستقیم رطوبت حجمی و مزایا و معایب هر یک معرفی شده‌اند. این حسگرها می‌توانند به‌طور هم‌زمان به پایش مداوم و دقیق رطوبت خاک کمک کنند و با ارائه داده‌های به‌روز، مدیریت آبیاری را تسهیل نمایند.



شکل ۱۳. روش‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک به صورت غیرمستقیم

جدول ۲. مزایا و معایب حسگرهای اندازه گیری غیرمستقیم رطوبت حجمی (خورسند و همکاران، ۲۰۱۹، خورسند و همکاران، ۲۰۲۰، خورسند و همکاران، ۲۰۲۱، ورا و همکاران^۱، جمال و همکاران^۲، ۲۰۲۴)

نوع حسگرها	مزایا	معایب
TDR	• مستقل از دما و محتوای نمک بافت خاک • تکرارپذیری، سرعت و دقت نسبتاً زیاد • اندازه گیری رطوبت در اعماق مختلف خاک	• حجم حسگر کوچک • نیاز به واسنجی خاص خاک • هزینه بالا
FDR	• قابلیت تعیین رطوبت خاک در هر عمق ارائه رطوبت دقیق خاک	• اندازه حسگر کوچک • برای نتایج دقیق نیاز به تماس کامل با خاک دارد
TDT	• دقت بالا با دامنه بزرگ • قیمت مناسب به دلیل مدارهای استاندارد	• نیاز به نصب دائمی به دلیل دست خوردگی خاک در حین نصب
ADR	• قیمت مناسب به دلیل مدارهای استاندارد • دقت بالا با واسنجی مناسب	• حجم حسگر کوچک • نیاز به واسنجی خاص خاک • اندازه گیری ها تحت تأثیر خلأ هوا و سنگ ها قرار می گیرد.
SWR	• هزینه پایین تر نسبت به حسگرهای دیگر • قابلیت فنی بالا	• دقت اندازه گیری کمتری دارد • قابلیت تعویض حسگر محدود است • تحت تأثیر تغییرات در امپدانس پروب و ثابت دی الکتریک خاک
PT	• هزینه پایین • دقیق با مقیاس بزرگ • دقت بالا با واسنجی خاص خاک	• نیاز به نصب دائم • نیاز به واسنجی خاص خاک
PR2	• دقت اندازه گیری ۴ درصد • حمل و نقل آسان • مناسب برای انواع خاک ها قابل استفاده در انواع خاک ها • قابلیت اندازه گیری و قرائت سریع و هم زمان رطوبت در اعماق مختلف خاک • تکرار سریع قرائت ها و امکان برنامه ریزی آبیاری • قابلیت نصب به عنوان بخشی از سیستم آبیاری خودکار	• قیمت بالا • نصب لوله های شفاف پلاستیکی دشوار است • عدم امکان اندازه گیری رطوبت در عمق های دلخواه خاک
• حسگر مقاوم	• قابلیت اندازه گیری محتوای دقیق رطوبت خاک دارای دقت بالا • زمانی که غلظت یونی خاک تغییر نمی کند.	• نیاز به واسنجی • تحت تأثیر تغییرات غلظت یونی قرار می گیرد
• تعدیل نوترونی	• امکان اندازه گیری آب در هر فازی • دقت بالا در دامنه وسیع در هر عمق	• هزینه بالا • تشعشعات خطرناک • عدم حساسیت به تغییرات کوچک
• تضعیف پرتو گاما	• قابلیت اندازه گیری میانگین رطوبت خاک و تغییرات آن در طول زمان	• هزینه بالا و پیچیدگی در استفاده • خطا در اندازه گیری در خاک های طبقه بندی شده • تحت تأثیر تغییرات چگالی ظاهری خاک قرار می گیرد.

۷. دستگاه TDR و PR2

در میان روش های متداول اندازه گیری رطوبت خاک از جمله روش وزنی، تانسومتر، بلوک های گچی و روش پخش نوترون، استفاده از فناوری دستگاه بازتاب زمانی امواج (انعکاس سنجی زمانی)، روشی نسبتاً جدید، ساده و کاربردی در اندازه گیری رطوبت خاک است. استفاده از TDR، مبتنی بر خصوصیات غیرعادی آب از نظر ثابت دی الکتریک استوار است. ضریب دی الکتریک خاک زراعی با نوسان مقدار آب در خاک، به مقدار زیادی تغییر می کند. اگر ضریب دی الکتریک خاک زراعی بیشتر از ۸ باشد؛ نشانگر وجود آب در خاک است، از آنجا که در خاک زراعی بین مقدار آب و ضریب دی الکتریک رابطه ای مستقیم وجود دارد؛ بنابراین می توان از رابطه بین آن ها، مقدار

1. Vera et al

2. Gamal et al

رطوبت خاک را استخراج کرد. به دلیل سهولت کار با روش دی الکتریک و امکان اتوماتیک کردن آن، امروزه استقبال زیادی از آن شده است (بشارت و خورسند، ۱۴۰۲). با عبور یافتن یک موج الکترومغناطیس با سرعت نور در خاک، به دلیل وجود خاصیت دی الکتریک در خاک که ناشی از آب، خاک و هوای خاک است، این موج ضعیف گشته و در رفت و بازگشت آن به اندازه t زمان لازم خواهد داشت. باتوجه به مسیر رفت و برگشت به اندازه L ، مقدار ضریب دی الکتریک (D) از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$D = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{c \times t}{2L}\right)^2 \quad (۱)$$

که در آن، L : طول میله یا پروب بر حسب متر، t : زمان حرکت موج در رفت و برگشت بر حسب ثانیه، c : سرعت موج یا نور برابر با 3×10^8 متر بر ثانیه است. تاپ و دیویس^۱ (۱۹۸۵) رابطه زیر را برای تعیین رطوبت خاک از مقدار ضریب دی الکتریک ارائه کردند:

$$\theta_v = -0.053 + 0.029(D) - 5.5 \times 10^{-4}(D^2) + 4.3 \times 10^{-6}(D^3) \quad (۲)$$

که در آن، θ_v و D به ترتیب رطوبت خاک و ضریب دی الکتریک خاک است. رابطه فوق تقریباً برای تمام خاک‌ها به همین شکل قابل استفاده است. دقت دستگاه تا ۲ درصد و تغییرات رطوبت در اندازه گیری‌های مختلف تا یک درصد است. رابطه مذکور مستقل از ساختمان و بافت خاک برای همه خاک‌های معمول زراعی قابل استفاده است؛ اما در خاک‌های آلی، خاک‌های خاص با منشاء آتشفشانی نیازمند واسنجی می‌باشد. بهتر است فرکانس امواج ارسالی به داخل خاک کمتر از ۱۰۰ مگاهرتز باشد تا مواد تشکیل دهنده خاک در مقدار ثابت دی الکتریک تأثیر مستقیم نگذارد. نکته قابل توجه در مورد این دستگاه که غالباً باعث اشتباه در اندازه گیری‌ها می‌گردد، عدم تماس کامل میله‌های حسگر با خاک و فاصله افتادن بین آن‌ها و خاک است. این حالت به خصوص در زمانی که خاک خشک و منقبض می‌شود، زیاد اتفاق می‌افتد. برای رفع این مشکل توصیه می‌شود، میله‌های حسگر به صورت مایل در خاک فرو برده شوند. در نوع پیشرفته‌تر که دارای پروب (حسگر لوله‌ای) هستند، بایستی مانند دستگاه نوترون متر ابتدا در خاک، لوله شفاف مخصوص دستگاه را نصب کرد و سپس با ارسال حسگر لوله‌ای به درون آن رطوبت در اعماق دلخواه تعیین کرد (بشارت و خورسند، ۱۴۰۲).

دستگاه PR2 در دو مدل PR2/4 (چهار عمق) و PR2/6 (در شش عمق) برای اندازه گیری رطوبت در مقطع عمودی خاک کاربرد دارد. با دستگاه PR2 می‌توان رطوبت خاک را تا عمق یک متری اندازه گیری کرد. این دستگاه برای داشتن بهترین عملکرد در تمام انواع خاک و عملکرد خوب در خاک‌های سخت (رس سنگین) و خاک‌های شور طراحی شده است. در مدل PR2/6 بر روی میله یک متری که وارد خاک می‌شود، شش سنسور تعبیه شده است که هم‌زمان رطوبت خاک را در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی متری اندازه گیری می‌کند (خورسند و همکاران، ۲۰۱۹؛ خورسند و همکاران، ۲۰۲۱). مقدار کسری رطوبت خاک نسبت به ظرفیت زراعی و درصد رطوبت خاک می‌تواند در صفحه نمایشگر دستگاه (HH2) نشان داده شود. این دستگاه می‌تواند ۱۸۰۰ قرائت را در خود ضبط کند. تنظیم این دستگاه برای خاک‌های مختلف از نظر خصوصیات فیزیکی امکان پذیر می‌باشد. این دستگاه ساخت شرکت دلتا-تی انگلستان است. به طور کلی حسگر دستگاه‌های رطوبت سنج تولیدی شرکت دلتا-تی همگی رطوبت را براساس ضریب دی الکتریک خاک (D) با رابطه زیر تعیین می‌کنند:

$$\theta = \frac{\sqrt{D} - a_0}{a_1} \quad (۳)$$

مقادیر ثابت a_0 برای خاک‌های معدنی و آلی به ترتیب برابر ۱/۶ و ۱/۳ و مقادیر a_1 به ترتیب برابر ۸/۴ و ۷/۷ پیشنهاد شده است، البته جهت بالا بردن دقت اندازه گیری برای خاک‌های مختلف این ضرایب قابل واسنجی هستند. در صورت عدم واسنجی ممکن است، دستگاه خطای ۴ درصدی را در قرائت رطوبت موجب شود. لازم به ذکر است از دستگاه‌های رطوبت سنج از جمله TDR و PR2/6 در تحقیقات محمدی و همکاران^۲ (۲۰۱۹) با عنوان اثرات مدیریت آبیاری و کود بر کاهش تلفات نیتروژن و افزایش عملکرد ذرت تحت آبیاری فارو و باریده و همکاران^۳ (۲۰۱۸) با عنوان اثرات آبیاری موضعی ریشه بر کارایی مصرف آب، آب ریشه و جذب نیترات ذرت، استفاده گردید. در راستای انجام آبیاری‌های اتوماتیک، دستگاه PR2 همراه با نرم افزارهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد که با ثبت رطوبت خاک در اعماق مختلف، می‌توان حجم آب، زمان قطع و وصل آبیاری را مشخص کرد.

بحث

روش های اندازه گیری غیرمستقیم رطوبت خاک پرداخته و تکنیک های مرتبط با اتوماسیون و آبیاری هوشمند را بررسی کرده است. هدف این پژوهش، تجزیه و تحلیل تجهیزات و دانش روز در خصوص هوشمندسازی کشاورزی و شیوه های غیرمستقیم سنجش رطوبت حجمی خاک با استفاده از حسگرهای مختلف به منظور مدیریت بهینه آبیاری است. همچنین چالش های فنی موجود با رویکرد بررسی نقاط قوت، ضعف، فرصت ها و تهدیدها تحلیل شده است. در شرایط کنونی، کشاورزان با چالش های ناشی از تغییرات اقلیمی و آب و هوایی روبرو هستند و برای تصمیم گیری مؤثر در مورد زمان و مکان کاشت به روش های بهینه نیاز دارند. استفاده از ابزارهای نوین می تواند نقش بسیار مؤثری در بهبود این فرآیند ایفا کند، چراکه سودمندی این روش ها هر دو جنبه زیست محیطی و اقتصادی را تحت الشعاع قرار می دهد. مدیریت بهینه منابع آب یکی از اصلی ترین اهداف کشاورزی هوشمند است، امری که به ویژه در ایران، به دلیل کاهش بارندگی های اخیر، اهمیت بیشتری پیدا کرده است. پیاده سازی این فناوری می تواند به استفاده مؤثر از منابع آب کشور منجر شود و کشاورزی هوشمند، همراه با فناوری های نوین، به ضرورتی اجتناب ناپذیر در حوزه تولیدات کشاورزی تبدیل خواهد شد. گرچه مزایای توسعه کشاورزی هوشمند در کشورهای پیشرفته به اثبات رسیده است، اما در ایران، لازمه موفقیت این فناوری، بسترسازی و توجه به ملاحظات خاص است. شاید بتوان مشکل اینترنت و برق را به عنوان موانع اصلی استفاده از تجهیزات هوشمند دانست که با گسترده شدن اینترنت و استفاده از فیبرهای خورشیدی، می توان بخش عمده ای از این مشکلات را مرتفع نمود. از طرف دیگر هزینه ی بالای اجرا و عدم دانش کافی از دلایلی است که کشاورزان رغبت چندانی به استفاده از این تجهیزات ندارند؛ لذا لازم است دولت و نهادهای ذی ربط چه از لحاظ مالی و چه از لحاظ ترویجی - آموزشی، زمینه ی استفاده از این تجهیزات را فراهم نمایند.

نتیجه گیری

تحقیقات نشان می دهد که بهره گیری از سامانه های هوشمند می تواند عملکرد گیاهان را بهبود بخشد، تلفات آب را کاهش دهد و آلودگی های زیست محیطی مرتبط با فعالیت های کشاورزی را کم کند. امروزه، دسترسی به اینترنت و گوشی های هوشمند در اکثر روستاها امکان پذیر شده و قشر جوان می تواند به طور گسترده به این امکانات دسترسی پیدا کند. بهره گیری از روش های هوشمند آبیاری به عنوان راه حلی مقبول و مؤثر برای مدیریت بحران و صرفه جویی در منابع آبی مطرح است. سامانه های آبیاری هوشمند در مصرف بهینه آب نقش اساسی ایفا کرده و در شرایط مختلف خاک، نوع سامانه آبیاری و میزان آب مصرفی باید قابل تغییر باشند. حسگرهای خازنی، امپدانس و حسگرهای TDR، FDR، TDT و PR2 به عنوان ابزارهایی برای تسهیل آبیاری خودکار در بستر اینترنت اشیا مورد استفاده قرار می گیرند. برای اجرای آبیاری های خودکار، حسگر PR2 در کنار نرم افزارهایی مانند Datalink Logger به کار می رود که توانایی ثبت رطوبت خاک در اعماق مختلف و تعیین حجم آب و زمان قطع و وصل آبیاری را فراهم می کند. در هنگام استفاده از این حسگرها، دقت نصب، مقیاس، مسائل واسنجی، منبع تغذیه و مصرف، هزینه و تأثیرات شوری بر رطوبت خاک باید مدنظر قرار گیرد. یک شبکه حسگر بی سیم دوطرفه^۱ (WSAN) امکان نظارت بر عملکرد حسگرها و فعال سازی شیرهای برقی برای شروع آبیاری را با استفاده از اطلاعات بازخورد و عملکرد در زمان واقعی فراهم می کند. در مجموع، ترکیبی از روش های پایش مبتنی بر خاک، آب و هوا، و همچنین بر اساس گیاه، در کنار یک روش کنترل پیش بینی گسسته، باید مورد توجه قرار گیرد؛ درحالی که سیستم های کشاورزی - آبیاری فضای باز با عدم قطعیت هایی روبرو هستند، مطالعات آینده باید به توسعه رویکردهای دینامیک فرآیند برای سیستم های آبیاری و تأثیر روش های کنترل و نظارت هوشمند بر بهره وری آبیاری متمرکز شوند. در بین تجهیزات معرفی شده، اغلب وابسته به شرایط اقلیمی نبوده و می توان در هر شرایطی از آن ها بهره جست؛ برخی از تجهیزات نیز دارای دامنه ی کاربرد بوده و چون این دامنه ها به صورت هوشمندانه طراحی شده اند، می توان از آن ها در اغلب شرایط اقلیمی استفاده نمود. به عنوان مثال بارومتر می تواند در دمای ۴۰- الی ۱۲۵+ درجه سانتی گراد مورد استفاده قرار گیرد که این بازه در اغلب مناطقی که کشاورزی در آنجا صورت می گیرد، جوابگو است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور یکسان در مفهوم‌سازی مقاله و نوشتن پیش‌نویس‌های اصلی و بعدی مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- الهدادی، حمید، لطیف منش، حجت‌اله، و مرادی، علی. (۱۴۰۲). اثر رویکرد کشاورزی پایدار از منظر بوم‌شناختی در تأمین امنیت غذایی. نشریه آماد و فناوری دفاعی، ۶ (۴)، ۱۶۴-۱۳۳. https://amfad.sndu.ac.ir/article_2706.html
- باقری، نیکروز. (۱۳۹۸). فناوری اطلاعات بستر ساز توسعه کشاورزی هوشمند. مجله علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی، ۲(۱)، ۴۹-۳۵. <https://doi.org/10.22092/aistj.2019.125170.1024>
- بشارت، سینا، و خورسند، افشین. (۱۴۰۲). موضوعات پیشرفته در آب، خاک و گیاه (دستگاه‌های اندازه‌گیری و نرم‌افزارهای کاربردی). انتشارات دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. <https://cl.urmia.ac.ir/node/4438>
- پور کریمی، بهاره، نیکنامی، مهرداد، و جورابلو، مهدی. (۱۳۹۳). نیازمندی‌های ترویجی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای در استان تهران. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۲۸ (۲)، ۳۲۸-۳۱۵. <https://doi.org/10.22092/jwra.2014.100033>
- توسن، معین، خاشعی سیوکی، عباس، ماروسی، علی، و قریب، محمدرضا. (۱۴۰۳). مروری بر مدیریت هوشمند آب در استقرار کشاورزی پایدار مبتنی بر اینترنت اشیا. مجله مدیریت آب در کشاورزی، ۱۱ (۱)، ۱۶۶-۱۴۵. https://wmaj.iaid.ir/article_185939.html
- ثابت، فرید، و محمدپور، مسلم. (۱۴۰۰). کشاورزی هوشمند. مجله علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی، ۴ (۱)، ۵۸-۴۹. <https://doi.org/10.22092/aistj.2022.359077.1067>
- حسینی، یوسف، هاشمی، مهدی، و زهرائی، بنفشه. (۱۳۹۳). توسعه ساختار جدید بهره‌برداری اقتصادی در شبکه‌های آبیاری فاقد بازار آب. علوم آب و خاک، ۲۴ (۱)، ۴۳-۲۷. <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.24.1.39232>
- خورسند، افشین، رضاردی‌نژاد، وحید، عسگرزاده، حسین، مجنونی هریس، ابوالفضل، رحیمی، امیر، و بشارت، سینا. (۱۳۹۸a). برنامه‌ریزی آبیاری ماش سیاه براساس شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) تحت روش آبیاری قطره‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰ (۹)، ۲۱۳۸-۲۱۲۵. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.280132.668179>
- خورسند، افشین، رضاردی‌نژاد، وحید، عسگرزاده، حسین، مجنونی هریس، ابوالفضل، رحیمی، امیر، بشارت، سینا، و صدرالدینی، علی اشرف. (۱۳۹۸b). تعیین شاخص تنش آبی (CWSI) جهت تشخیص تنش آب محصول ذرت در منطقه ارومیه. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰ (۴)، ۸۸۴-۸۷۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.261912.667967>
- کاظم علیلو، وحید، و جمشیدی، بهاره. (۱۴۰۱). کاربرد هوش مصنوعی در کشاورزی هوشمند اقلیم. نشریه علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی، ۵ (۲)، ۵۱-۶۰. <https://doi.org/10.22092/jaist.2023.362065.1090>
- کشاورز، عباس، فکاری سردهایی، بهزاد، بیکی، اعظم، خسروی، عبدالرحیم، فارسی، محمد مهدی، ملکیان، راحله، و نژندعلی، عاطفه. (۱۴۰۰). مجموعه اسناد مرتبط با سند ملی و راهبردی تحول امنیت غذایی؛ چالش‌های بخش کشاورزی کشور. نشر آموزش کشاورزی، تهران، ایران. https://agrilib.arceo.ac.ir/book_9920.html
- گرامی طیبی، م. (۱۳۹۶). مزارع و کشاورزی آینده: کوچک و هوشمند. <https://ayandehpajoohi.com/articlesfuturesstudies>

References

- Asefa, A., & Tadesse, M. (2024). Pros and Cons of Different Irrigation Scheduling Approaches: A Review. *American Journal of Bioscience and Bioengineering*, 12(6), 91-96. <https://doi.org/10.11648/j.bio.20241206.11>
- Azar, A. T., Ammar, H. H., de Brito Silva, G., & Razali, M. S. A. B. (2019). Optimal proportional integral derivative (PID) controller design for smart irrigation mobile robot with soil moisture sensor. In *International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications*, Springer, Cham, New York Sity, United states. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14118-9_35
- Bagheri, N. (2019). Information Technology an infrastructure for development of intelligent agriculture. *Agricultural Information Sciences and Technology*, 2(1), 35-49. <https://doi.org/10.22092/aistj.2019.125170.1024> (In Persian)
- Barideh, R., Besharat, S., Morteza, M., & Rezaverdinejad, V. (2018). Effects of Partial Root-Zone Irrigation on the Water Use Efficiency and Root Water and Nitrate Uptake of Corn. *Water*, 10, 526. <https://doi.org/10.3390/w10040526>
- Besharat, S., & Khorsand, A. (2023). Advanced subjects in the water, soil and plant (Measurement Devices and Practical Software). *Urmia University Press*, Urmia, Iran. <https://cl.urmia.ac.ir/node/4438> (In Persian)
- Biabi, H., Mehdizadeh, S. A., & Salmi, M. S. (2019). Design and implementation of a smart system for water management of lilium flower using image processing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 160, 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.019>
- Cerovic, Z. G., Ghozlen, N. B., Milhade, C., Obert, M., Debuissson, S., & Moigne, M. L. (2015). Nondestructive diagnostic test for nitrogen nutrition of grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on duallex leaf-clip measurements in the field. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(14), 3669-3680. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b00304>
- Chidambaranathan, C. M., Hand, S. S., & Ramanamurthy, M. V. (2018). Development of smart farming—a detailed study. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(2.4), 56-58. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.4.10042>
- Clarke Topp, G., & Ferré, P. A. T. (2018). 3.1 Water Content. *Methods of Soil Analysis*, 417–545. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c19>
- De Pinto, A., Cenacchi, N., Kwon, H. Y., Koo, J., & Dunston, S. (2020). Climate smart agriculture and global food-crop production. *PLOS ONE*, 15(4), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231764>
- Di Gennaro, S.F., Cini, D., Berton, A., & Matese, A. (2024). Development of a low-cost smart irrigation system for sustainable water management in the Mediterranean region. *Smart Agricultural Technology*. 9,100629. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100629>
- Elahdadi, H., Latifmanesh, H., & Moradi, A. (2024). The effect of sustainable agriculture approach from an ecological perspective on ensuring food security. *Defense readiness and technology*, (4)6, 133-164. https://amfad.sndu.ac.ir/article_2706.html (In Persian)
- FAO. (2022). AQUASTAT - FAO's global information system on water and agriculture. *FAO*, Quebec City, Canada. <https://www.fao.org/aquastat/en>
- Fuentes-Peñailillo, F., Ortega-Farías, S., Acevedo-Opazo, C., Rivera, M., & Araya-Alman, M. (2024). A Smart Crop Water Stress Index-Based IoT Solution for Precision Irrigation of Wine Grape. *Sensors*, 24(1), 25. <https://doi.org/10.3390/s24010025>
- Gamal, Y., Soltan, A., Said, L. A., Madian, A. H., & Radwan, A. G. (2024). Smart Irrigation Systems: Overview. *IEEE Access*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3251655>

- Gerami Tayyibi, M. (2017). Farms and Future Agriculture: Small and Smart. <http://ayandehpajoohi.com/articles/futurestudies/> (In Persian)
- Hammouch, H., A.El-Yacoubi, M., Qin, H. & Berbia, H. (2024). A Systematic Review and Meta-Analysis of Intelligent Irrigation Systems. *IEEE Access*, 12, 128285-128304. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3421322>
- Hardie, M. (2020). Review of novel and emerging proximal soil moisture sensors for use in agriculture. *Sensors*, 20(23), 6934. <https://doi.org/10.3390/s20236934>
- Hassani, Y., Hashemy Shahdany, S. M., & Zahraei, B. (2020). Developing A New Operation-Economic Framework for Irrigation Networks without Water Market. *Journal of Water and Soil Science*, 24(1), 27-43. <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.24.1.39232> (In Persian)
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications*, 12(1), 4667. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>
- Kaya, S., & Curran, P. J. (2006). Monitoring urban growth on the European side of the Istanbul metropolitan area: A case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(1), 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.05.002>
- Kazem Alilou, V., & Jamshidi, B. (2023). Application of artificial intelligence in climate smart agriculture. *Agricultural Information Sciences and Technology*, 5(2), 51-60. <https://doi.org/10.22092/jaist.2023.362065.1090> (In Persian)
- Keshavarz, A., Fakari Sardhaei, B., Beiki, A., Khosravi, A., Farsi, M. M., Malekian, R., & Najandali, A. (2021). Collection of documents related to the national and strategic document for food security development; Challenges of the country's agricultural sector. *Agricultural Education Publication*, Tehran, Iran. https://agrilib.areeo.ac.ir/book_9920.html (In Persian)
- Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Heris, A. M., Rahimi, A., & Besharat, S. (2020). Response of maize and black gram yield and water productivity to variations in canopy temperature and crop water stress index. *International Agrophysics*, 34(3), 381-390. <https://doi.org/10.31545/intagr/126439>
- Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni Heris, A., Rahimi, A., Besharat, S., & Sadraddini, A. A. (2019). Determination of A Crop Water Stress Index (CWSI) For Detecting Water Stress time of Maize Crop in the Urmia Region. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4), 873-884. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.261912.667967> (In Persian)
- Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni Heris, A., Rahimi, A., & Besharat, S. (2020). Irrigation scheduling of Black Gram based on Crop Water Stress Index (CWSI) under drip irrigation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(9), 2125-2138. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.280132.668179> (In Persian)
- Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni-Heris, A., Rahimi, A., & Besharat, S. (2019). Irrigation scheduling of maize based on plant and soil indices with surface drip irrigation subjected to different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 224, 105740. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105740>
- Khorsand, A., Rezaverdinejad, V., Asgarzadeh, H., Majnooni-Heris, A., Rahimi, A., Besharat, S., & Sadraddini, A. A. (2021). Linking plant and soil indices for water stress management in black gram. *Scientific Reports*, 11, 869. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79516-3>
- Lekshmi, S. U., Singh, D. N., & Baghini, M. S. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, 54, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
- Lipper, L., McCarthy, N., Zilberman, D., Asfaw, S., & Branca, G. (2018). Climate smart agriculture: Building resilience to climate change. *Natural Resource Management and*

- Policy*, Springer International Publishing, 52, Springer, New York Sity, United states. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-61194-5>
- Mohammadi, A., Besharat, S., & Abbasi, F. (2019). Effects of irrigation and fertilization management on reducing nitrogen losses and increasing corn yield under furrow irrigation. *Agricultural Water Management*, 213, 1116-1129. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.007>
- Nhamo, N., Chikoye, D., & Gondwe, T. (2017). Preface. Smart Technologies for Sustainable Smallholder Agriculture, xv-xvi. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-810521-4.05001-5>
- Pourkarimi, B., Niknami, M., & Jourabloo, M. (2014). Extension Requirements of Drip Irrigation Systems in Tehran Province. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28(2), 315-328. <https://doi.org/10.22092/jwra.2014.100033> (In Persian)
- Sabet, F., & Mohammadpour, M. (2021). Smart farming. *Agricultural Information Sciences and Technology*, 4(1), 49-58. <https://doi.org/10.22092/aistj.2022.359077.1067> (In Persian)
- Singh, C. D., Rao, K. V., Kumar, M., & Rajwade, Y. A. (2023). Development of a smart IoT-based drip irrigation system for precision farming. *Irrigation and Drainage*, 72(1), 21-37. <https://doi.org/10.1002/ird.2757>
- SOLAW. (2021). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point. FAO, Quebec City, Canada. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>
- Tabatabaei, S. M., Dastourani, M., Eslamian, S., & Nazeri Tahroudi, M. (2022). Ranking and optimizing the rain-gauge networks using the entropy-copula approach (Case study of the Siminehrood Basin, Iran). *Applied Water Science*, 12(9), 214. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01735-y>
- Topp, G. C., & Davis, J. L. (1985). Measurement of soil water content using time-domain reflectrometry (TDR): a field evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 49(1), 19-24. <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900010003x>
- Tosan, M., Khashei-Siuki, A., Maroosi, A., & Gharib, M. R. (2024). A Review of Smart Water Management for Sustainable Agriculture Based on the Internet of Things. *Water Management in Agriculture*, 11(1), 145-166. https://wmaj.iaid.ir/article_185939.html (In Persian)
- Vera, J., Abrisqueta, I., Conejero, W., & Ruiz-Sanchez, M. C. (2017). Precise sustainable irrigation: A review of soil-plant-atmosphere monitoring. *Acta Horticulturae*, 1150, 195-200. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1150.28>
- Vera, J., Conejero, W., Mira-Garcia, A. B., Conesa, M. R., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2021). Towards irrigation, automation based on dielectric soil sensors. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 96(6), 696-707. <https://doi.org/10.1080/14620316.2021.1906761>