



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
**Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)**

Web site:
<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:
iauwsrj@srbiau.ac.ir
iauwsrj@gmail.com

**Vol. 15
No. 3 (59)**

Received:
2025-07-27

Accepted:
2025-10-20

Pages: 29-44

Designing a Smart Irrigation System Based on the Cognitive Internet of Things with a Fuzzy Case-based Reasoning Approach for Optimizing Water Consumption in Agriculture

Seyyed Vahid Mousavi¹, Reza Radfar^{*2} and Saeed Setayishi³

1) Department of Information Technology Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2) Department of Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3) Department of Energy Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran.

*Corresponding author emails: radfar@gmail.com

Abstract:

The shortage of water resources and the increasing pressure on the agricultural sector have made the need to use new technologies to optimize water consumption more apparent than ever before. This research aimed to design a smart irrigation system based on the Internet of Things and a fuzzy case-based reasoning approach, in order to improve the productivity and management of water resources in modern agriculture. The proposed system determines irrigation decisions intelligently and dynamically by using data collected from sensors and processing them by a fuzzy case-based reasoning methodology. The efficiency of this system was compared with two conventional irrigation methods, including surface irrigation and drip irrigation (reactive), based on the criterion of optimization in water consumption, in real conditions of a date palm orchard. Analysis of the results showed that the proposed smart system provides better performance by significantly reducing water consumption and increasing productivity compared to the other two methods. This system also provides the ability to be flexible and adaptable to changing environmental conditions, allowing for precise and optimal management of resources. The use of a smart irrigation system based on the cognitive Internet of Things (IoT) can be used as a sustainable and efficient solution for managing water resources in agriculture.

Keywords: Smart irrigation, Cognitive Internet of Things, Fuzzy case-based reasoning, Optimizing water consumption, Water resources management



شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال پانزدهم

شماره ۳ (۵۹)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۷/۲۸

صفحات: ۴۴-۲۹

طراحی سیستم آبیاری هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا با رویکرد استدلال مبتنی بر مورد فازی برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی

سیدواحد موسوی^۱، رضا رادفر^{۲*} و سعید ستایشی^۳

(۱) گروه مدیریت فناوری اطلاعات، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۲) گروه مدیریت صنعتی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۳) گروه مهندسی انرژی، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: radfar@gmail.com

چکیده:

کمیود منابع آب و فشار روزافزون بر بخش کشاورزی، ضرورت به‌کارگیری فناوری‌های نوین برای بهینه‌سازی مصرف آب را بیش از پیش آشکار کرده است. این پژوهش با هدف طراحی یک سیستم آبیاری هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا با رویکرد استدلال مبتنی بر مورد فازی، به منظور بهبود بهره‌وری و مدیریت منابع آب در کشاورزی مدرن انجام شد. سیستم پیشنهادی با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از حسگرها و پردازش آن‌ها توسط متدولوژی استدلال مبتنی بر مورد فازی، تصمیمات آبیاری را به‌صورت هوشمند و پویا تعیین می‌کند. کارایی این سیستم با دو روش متداول آبیاری، شامل آبیاری سطحی و آبیاری قطره‌ای (واکنشی)، بر اساس معیار بهینه‌سازی در مصرف آب، در شرایط واقعی باغ نخل خرما مقایسه شد. تحلیل نتایج نشان داد که سیستم هوشمند پیشنهادی با کاهش قابل‌توجه مصرف آب و افزایش بهره‌وری نسبت به دو روش دیگر، عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. همچنین این سیستم با قابلیت انعطاف‌پذیری و سازگاری با شرایط محیطی متغیر، امکان مدیریت دقیق و بهینه منابع را فراهم می‌کند. به‌کارگیری سیستم آبیاری هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا با رویکرد استدلال مبتنی بر مورد فازی، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار و کارآمد برای مدیریت منابع آب در کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: آبیاری هوشمند، اینترنت اشیا، استدلال مبتنی بر مورد فازی، بهینه‌سازی مصرف آب، مدیریت منابع آب

مقدمه

سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) پیش‌بینی می‌کند که جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۹٫۱ میلیارد نفر خواهد رسید. این امر منجر به افزایش قابل توجهی در تقاضای جهانی برای غذا خواهد شد. در حال حاضر، هفتاد درصد از آب شیرین به‌دست‌آمده از سفره‌های زیرزمینی، جویبارها و دریاچه‌ها برای آبیاری محصولات کشاورزی استفاده می‌شود تا رشد مورد انتظار در تولید غذا را حفظ کند. برای پاسخگویی به تقاضا، لازم است این درصد افزایش یابد. شیوه‌های کشاورزی پایدار می‌تواند به صرفه‌جویی در مصرف آب، حفظ خاک، مدیریت پایدار زمین، حفاظت از منابع طبیعی، حفظ اکوسیستم‌ها و ارائه مزایای تغییرات اقلیمی کمک کند. برای دستیابی به این اهداف، نیاز به اطلاعات دقیق و تغییری بزرگ در نحوه مدیریت این منابع داریم (FAO, 2022). با این حال، برای تولید غذای روزانه یک فرد، به ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ لیتر آب نیاز است (FAO, 2014) (Schreier, 2014) (Statistics Canada, 2002) (2003). بارش‌های نامنظم و تفاوت‌های فصلی در دسترسی به آب می‌تواند موجب کمبود موقت غذا شود؛ سیل‌ها و خشکسالی‌ها می‌توانند برخی از شدیدترین موارد اضطرابی را ایجاد کنند. میزان دسترسی به آب به طور چشمگیری از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است. اما حتی در مناطقی که منابع آب محدود یا نامنظم دارند، استفاده بهینه از آن‌ها می‌تواند به طور چشمگیری بهره‌وری کشاورزی را افزایش دهد. این کلید بهبود امنیت غذایی و کاهش فقر است، به ویژه در مناطق روستایی که سه‌چهارم از گرسنگان جهان در آن‌ها زندگی می‌کنند (FAO, 2015). این مسائل نگرانی‌هایی را درباره ناکافی بودن تولیدات کشاورزی در آینده برای تامین تقاضای جهانی غذا ایجاد کرده است (FAO, 2021). عوامل مذکور و چندین عامل دیگر، بر ضرورت بهبود جنبه‌های خاصی از تولیدات کشاورزی و استفاده از فضاهای غیرسنتی کشاورزی، مانند مناطق شهری، تاکید می‌کنند. با پیشرفت این وضعیت، دسترسی بیشتر به گزینه‌های فنی پیشرفته به عنوان محرکی برای حرکت به سمت سیستم‌های کشاورزی پیشرفته‌تر عمل می‌کند (Zhang Q, 2015). اجرای این روش‌ها کارایی تولید غذا را با بهبود کیفیت و کمیت آن و بهینه‌سازی استفاده از منابع اساسی مانند آبیاری افزایش می‌دهد (Zhang Y, 2019). ترکیب این موضوع با رشد کشاورزی شهری، که محبوبیت قابل توجهی کسب کرده و توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است، ممکن است مؤثرترین روش برای کاهش بحران غذایی آینده باشد. این نظریه با مفهوم سیستم‌های آبیاری هوشمند که در این مطالعه به کار گرفته شده، مرتبط است. سیستم‌های آبیاری هوشمند با

ادغام هوش مصنوعی در سیستم‌های آبیاری خودکار تعریف می‌شوند. این کار می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته کنترل مانند منطق فازی یا شبکه‌های عصبی برای بهبود فرآیند تصمیم‌گیری در آبیاری انجام شود. هدف سیستم‌های آبیاری هوشمند، افزایش بهره‌وری کشاورزی در شرایطی است که به‌طور همزمان تأثیرات زیست‌محیطی کشت محصولات را کاهش می‌دهد (Ray & Majumder, 2024). این هدف با آبیاری دقیق محصول در زمان بهینه، به مقدار بهینه و در مکان بهینه محقق می‌شود. فناوری‌های مرتبط با هوش مصنوعی (AI)، بعنوان شاخه‌ای از علوم کامپیوتر و همچنین روش‌هایی برای توسعه راه‌حل‌های کامپیوتری که رفتار انسانی و حیوانی یا زیست‌شناختی را تقلید می‌کنند؛ و نیز فناوری‌هایی نظیر اینترنت اشیا، فرصت‌های امیدوارکننده‌ای برای خودکارسازی آبیاری فراهم می‌سازد. ضرورت و اهمیت انجام این مقاله در راستای بررسی سیستم‌های آبیاری هوشمند در کشاورزی نوین به دلیل چالش‌های فزاینده‌ای مانند افزایش جمعیت، کمبود منابع آبی و تغییرات اقلیمی است که بخش کشاورزی با آن مواجه است.

خاستگاه

کشاورزی به‌عنوان رکن اصلی امنیت غذایی و اقتصاد جهانی، وابستگی جدی به منابع آبی دارد. تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و بهره‌برداری ناپایدار از منابع، تهدیدی جدی برای پایداری تولیدات کشاورزی محسوب می‌شوند (FAO, 2024). در این میان، مدیریت بهینه منابع آب و تغذیه گیاهان از مهم‌ترین الزامات توسعه پایدار است. به‌کارگیری فناوری‌های نوین از جمله اینترنت اشیا، شناختی و هوش مصنوعی، امکان پایش لحظه‌ای، تصمیم‌گیری هوشمند و تخصیص بهینه منابع را فراهم می‌سازد. این رویکرد ضمن افزایش بهره‌وری و کیفیت محصولات، مصرف نهاده‌ها و هزینه‌ها را کاهش داده و قابلیت تصمیم به حوزه‌هایی مانند فضای سبز شهری و زیرساخت‌های هوشمند را نیز داراست.

مرور ادبیات

سیستم‌های آبیاری هوشمند

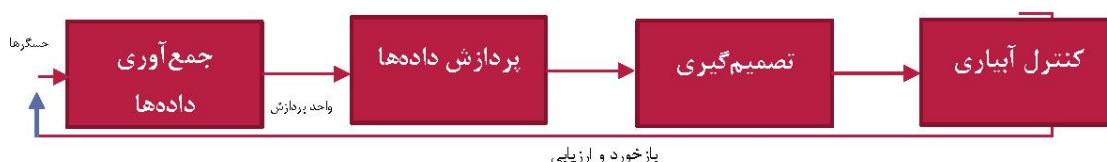
سیستم‌های آبیاری هوشمند با استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته مانند حسگرها، کنترلرها، نرم‌افزارها و ارتباطات بی‌سیم می‌توانند به بهبود کارایی مصرف آب در کشاورزی کمک کنند. این سیستم‌ها نه تنها منجر به کاهش مصرف آب و هزینه‌های مرتبط می‌شوند، بلکه می‌توانند عملکرد گیاهان را نیز بهبود بخشند و تأثیرات مثبتی بر محیط زیست داشته باشند (Devanand et al., 2020). در واقع، سیستم‌های آبیاری

آب به صورت کنترل شده و بهینه به بخش‌های مختلف زمین کشاورزی توزیع می‌شود. پس از آبیاری، داده‌های محیطی دوباره جمع‌آوری می‌شوند تا اثربخشی آبیاری ارزیابی شود. بر اساس داده‌های جدید، سیستم ممکن است تنظیمات خود را بهینه‌سازی کند تا در دفعات بعدی عملکرد بهتری داشته باشد (شکل ۱). سیستم‌های آبیاری هوشمند مانند کنترل‌کننده‌های مبتنی بر شرایط آب و هوایی و آبیاری با نرخ متغیر (VRI) به کشاورزان امکان می‌دهند تا مصرف آب را بهینه کرده و کارایی انرژی را افزایش دهند (Sui, 2017). این سیستم‌ها با استفاده از داده‌های دقیق و به‌روز، برنامه‌های آبیاری را متناسب با نیازهای واقعی گیاهان تنظیم می‌کنند و از هدررفت منابع جلوگیری می‌کنند. کنترل‌کننده‌های مبتنی بر شرایط آب و هوایی با استفاده از حسگرهای مختلف، داده‌هایی همچون دما، رطوبت، سرعت باد و تابش خورشید را جمع‌آوری کرده و بر اساس تبخیر و تعرق، میزان آبیاری مورد نیاز را محاسبه می‌کنند. این سیستم‌ها نه تنها باعث صرفه‌جویی در مصرف آب و انرژی می‌شوند، بلکه با بهبود سلامت گیاهان، افزایش بازدهی محصولات را نیز به دنبال دارند.

استدلال مبتنی بر مورد در کشاورزی

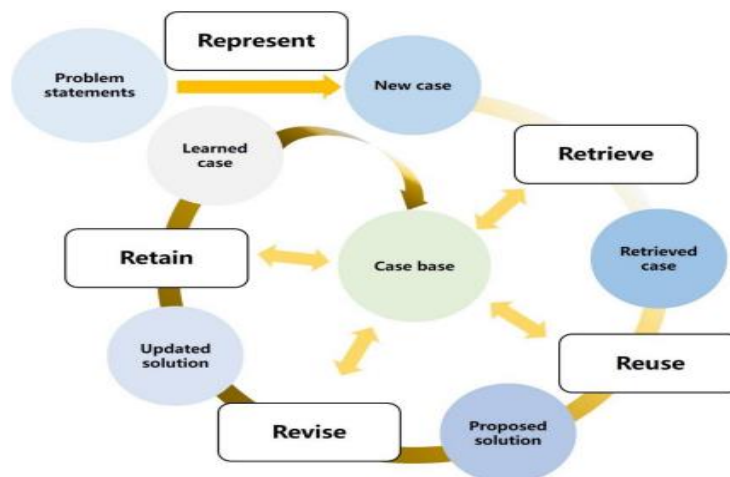
فرایند استفاده از دانش و حقایق موجود به همراه استراتژی اتخاذ شده برای حل مسائل جدید و دستیابی به یک نتیجه قابل قبول (منطقی)، استدلال نامیده می‌شود. عموماً روش‌های استدلال استفاده شده در سیستم‌های کامپیوتری از روش‌های استدلال استفاده شده توسط انسان الهام گرفته‌اند. استدلال مبتنی بر مورد (CBR) به عنوان فرآیند حل مسائل جدید با تطبیق مواردی که قبلاً با موفقیت اجرا شده‌اند تعریف می‌شود. روش CBR نحوه استدلال و یادگیری انسان‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. از این رو به نظر می‌رسد، این روش مدل روانشناختی معتبری از استدلال انسانی است (Watson & Marir, 1994). این ویژگی منحصر به فرد CBR را به یک رویکرد امیدوارکننده برای ساخت سیستم‌های هوشمند تبدیل می‌کند (Dutta et al, 1997).

هوشمند فناوری‌های پیشرفته‌ای هستند که به منظور بهبود کارایی و مدیریت منابع آبی در کشاورزی و باغبانی طراحی شده‌اند (Darshna et al., 2015). این سیستم‌ها با استفاده از تکنولوژی‌های مختلف، اطلاعات مربوط به وضعیت خاک، گیاهان و شرایط محیطی را جمع‌آوری و تحلیل می‌کنند تا نیازهای آبی گیاهان را به صورت دقیق‌تری تأمین کنند (Abdikadir et al., 2023). با سیستم آبیاری هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT)، حسگرها و کنترل‌کننده‌ها برای بررسی سطح رطوبت خاک استفاده می‌شوند. سطح رطوبت می‌تواند بالاتر از حد آستانه تشخیص داده شود و در صورت اتمام نیاز به آب، پمپ‌ها به صورت خودکار خاموش شوند (Gamal et al., 2023). سیستم‌های آبیاری هوشمند کاهش رطوبت موجود گیاه را برآورد و اندازه‌گیری می‌کنند تا سیستم آبیاری به گونه‌ای عمل کنند که آب مورد نیاز را تأمین کرده و در عین حال از استفاده بیش از حد آب جلوگیری کنند. تأثیرات مقدار آب آبیاری شده، دفعات آبیاری و مصرف آب به‌طور خاص حائز اهمیت هستند. الگوریتم زمان‌بندی کلید موفقیت یک سیستم آبیاری هوشمند است. الگوریتمی که نیاز به محاسبات کمتر و تعداد کمتری ورودی حسگر داشته باشد، بدون اینکه رشد سالم محصولات را به خطر بیندازد، الگوریتم انتخابی است. حسگرهای اینترنت اشیا (IoT) سطح رطوبت خاک را پایش می‌کنند و داده‌ها را به سیستم‌های آبیاری منتقل می‌کنند تا آب را به‌طور دقیق تحویل دهند و از هدررفت آن جلوگیری کنند. ایستگاه‌های هواشناسی اینترنت اشیا داده‌های هواشناسی لحظه‌ای را ارائه می‌دهند و به سیستم‌های آبیاری اجازه می‌دهند که برنامه‌های آبیاری را بر اساس شرایط فعلی تنظیم کنند (Monica et al., 2017). آبیاری مبتنی بر حسگر از حسگرها برای جمع‌آوری داده‌ها درباره رطوبت خاک، دما و سایر عواملی که می‌توانند بر رشد محصولات تأثیر بگذارند، استفاده می‌کند، سپس این داده‌ها توسط الگوریتم‌های هوش مصنوعی تجزیه و تحلیل می‌شوند تا میزان بهینه آب مورد نیاز برای آبیاری را تعیین کنند (Jain, 2023).



شکل ۱. جریان کلی آبیاری هوشمند

- جمع‌آوری داده‌ها (Data Collection): (سنسورها) جمع‌آوری داده‌ها
- پردازش داده‌ها (Data Processing): (واحد پردازش مرکزی) → الگوریتم‌های تصمیم‌گیری
- تصمیم‌گیری (Decision Making): (بررسی شرایط + اعلام نتیجه)
- کنترل آبیاری (Irrigation Control): (فعال‌سازی سیستم آبیاری + پخش آب)



شکل ۲. نحوه کارکرد سیستم CBR

بیماری‌های حیوانات، مدیریت آفات، برنامه‌ریزی آبیاری و سایر موارد به کار می‌رود (Zhai et al., 2020b). بنظر می‌رسد، مشکلات پیچیده کشاورزی به‌طور کارآمد و روان توسط این رویکرد قابل حل است. بنابراین، رویکرد CBR می‌تواند گزینه مناسبی برای حل مسائل مربوط به آبیاری هوشمند باشد.

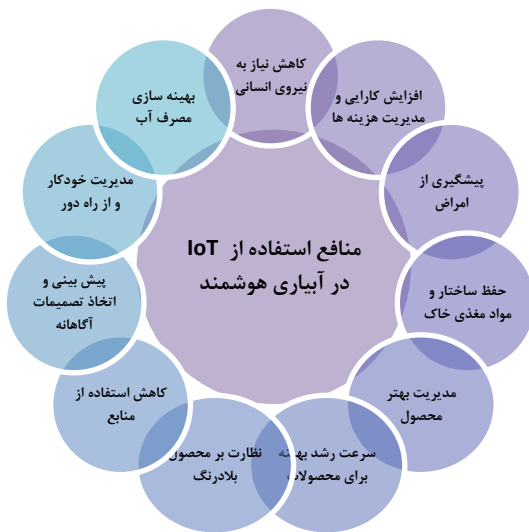
سیستم‌های پشتیبان تصمیم در سیستم‌های آبیاری هوشمند

اهمیت مدیریت صحیح آبیاری یک عامل اساسی برای تولید پایدار محسوب می‌شود، چراکه آب یک عامل تحدیدکننده در تولید کشاورزی است و این موضوع در مناطقی که آب کمیاب است، تشدید می‌شود (Torrecillas et al, 1996). در این مناطق، تکنیک‌های کشاورزی وجود دارند که امکان بهینه‌سازی مدیریت آبیاری را فراهم کرده‌اند، از استفاده از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای گرفته تا راهبردهای آبیاری با کاستی کنترل‌شده که قادر به حفظ عملکرد با حجم آبیاری کمتر هستند (Ghrab; Mohamed, 2013). در مواجهه با چالش‌های فزاینده مدیریت منابع آب در کشاورزی، استفاده از فناوری‌های نوین مانند سیستم‌های آبیاری هوشمند به‌عنوان یک راهکار پایدار مورد توجه قرار گرفته است. فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات به مدیریت پایدار آب در کشاورزی کمک کرده‌اند (Hashem et al, 2015). استفاده از شبکه‌های حسگر بی‌سیم در مزارع با استفاده از فناوری‌های اینترنت اشیا (IoT) و مدیریت از راه دور داده‌ها با رایانش ابری، امکان پایش گسترده متغیرهای کشاورزی را فراهم کرده است که حجم زیادی از اطلاعات را تولید می‌کنند (Navarro-Hellín, 2015). این اطلاعات به مهندس کشاورزی کمک می‌کند تا وضعیت آب در پیوستار خاک-گیاه-اتم‌سفر را تعیین کرده و درباره آبیاری و اینکه آیا باید راهبردهای مختلف آبیاری با کمبود که متناسب با

ایده اصلی در این روش استفاده از تجربیات قدیمی تر می‌باشد. بدین معنی که برای حل یک مسئله جدید از راه حل‌های موجود برای مسائل قدیمی مشابه با این مسئله استفاده می‌شود. استنتاج مبتنی بر مورد (CBR) می‌تواند به صورت سیکل R5 تدوین شود (Aamodt; Plaza, 1994)، که شامل مراحل بازنمایی (Represent)، بازیابی (Retrieve)، استفاده مجدد (Reuse)، بازنگری (Revise)، و نگهداری (Retain) می‌باشد. یک جریان گردش کار عمومی از CBR در شکل ۲ ارائه شده است.

استدلال مبتنی بر مورد (CBR) به‌عنوان یک روش مؤثر برای تطبیق و بهینه‌سازی تصمیمات، با استفاده از تجربیات گذشته، به‌ویژه در زمینه مدیریت منابع آب، توانایی‌های منحصر به‌فردی را ارائه می‌دهد (Zhai et al., 2020a). یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری کشاورزی (ADSS) می‌تواند به عنوان یک سیستم انسان-رایانه‌ای تعریف شود که توانایی استفاده از داده‌ها از منابع مختلف مانند آب و هوا، استفاده از زمین و نیروی کار انسانی را دارد. هدف آن تسهیل فرآیندهای تصمیم‌گیری و ارائه پیشنهادات مفید به کشاورزان در مورد فعالیت‌های کشاورزی مانند کوددهی، آبیاری و مدیریت آفات است. با کمک فناوری‌های حسگر و رویکردهای استدلالی، ADSSها قادر به جمع‌آوری داده‌های کافی (مانند اندازه‌گیری‌های حسگر، اطلاعات هواشناسی، تصاویر مادون قرمز) و تولید دانش مبتنی بر شواهد هستند CBR. به عنوان یکی از قدرتمندترین رویکردهای استدلالی، سال‌هاست که توسط پژوهشگران در زمینه کشاورزی به کار گرفته شده است. به دلیل توانایی استدلال قوی و کاربرد آسان، روش CBR به تدریج در کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش در زمینه‌های مختلفی از جمله طبقه‌بندی گیاهان، تشخیص

سیستم‌های آبیاری هوشمند می‌توانند به‌طور خودکار زمان و میزان آبیاری را تنظیم کنند. این کنترل خودکار نه تنها مصرف آب را بهینه می‌کند بلکه تضمین می‌کند که گیاهان دقیقاً در زمان مناسب و به میزان مناسب آبیاری شوند. IoT امکان یکپارچه‌سازی داده‌های مختلف از منابع متعدد را فراهم می‌کند. این داده‌ها می‌توانند از ایستگاه‌های هواشناسی، سنسورهای خاک، و سیستم‌های پیش‌بینی جمع‌آوری شوند و برای بهبود تصمیم‌گیری در مورد زمان و میزان آبیاری مورد استفاده قرار گیرند (Ragab et al, 2022).



شکل ۳. منافع IoT در سیستم آبیاری هوشمند

هوش مصنوعی (AI) در آبیاری هوشمند: هوش مصنوعی به سیستم این امکان را می‌دهد که از داده‌های جمع‌آوری شده توسط IoT استفاده کند و به بهینه‌سازی تصمیمات آبیاری بپردازد. استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین (ML) در کشاورزی بسیار سودمند است زیرا به رایانه‌ها اجازه می‌دهد تا از داده‌های موجود بینش‌هایی به دست آورند (Jha et al, 2019). این شامل عوامل مختلف هواشناسی که به‌طور مداوم توسط ایستگاه‌های هواشناسی ثبت می‌شوند و اندازه‌گیری‌های نظارت پیوسته بر محصولات می‌شود. یادگیری ماشین از این داده‌ها به عنوان ورودی برای الگوریتم‌های ریاضی استفاده می‌کند که هدف آنها پیش‌بینی یا طبقه‌بندی یک متغیر خاص است. به عنوان مثال، مقدار تبخیر و تعرق می‌تواند برای محاسبه مدت زمان آبیاری لازم برای محصولات استفاده شود. هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) نقش بسیار مهمی در بهبود و بهینه‌سازی سیستم‌های آبیاری هوشمند ایفا می‌کنند (Krishnan, 2020; Sinha & Gupta, 2024; Patil et al, 2021) و با استفاده از داده‌های مختلف و الگوریتم‌های پیشرفته، فرآیند آبیاری را دقیق‌تر، کارآمدتر و سازگارتر با

فنولوژی و فیزیولوژی محصول هستند، اجرا شود یا خیر، تصمیم‌گیری کند (Gubbi, 2013). علاوه بر این، دموکراتیزه شدن فناوری‌های IoT برای پایش متغیرهای خاک و هوا (گسترده شدن دسترسی و استفاده از فناوری‌های اینترنت اشیا برای نظارت و پایش متغیرهای خاک و هوا)، ابزارهای صرفه‌جویی در آب را در محیط‌های خانگی به طور گسترده‌ای وسعت بخشیده است (Zhang & Davis et al, 2009; Khachatryan, 2019).

با این حال، مدرن‌سازی مداوم سیستم‌های آبیاری نیازمند پیاده‌سازی تجهیزاتی است که امکان زمان‌بندی خودکار آبیاری را فراهم کند. این سیستم‌ها باید شامل حسگرهایی باشند که پارامترهای مختلفی را فراهم کنند (Davis & Dukes, 2010) به طور سنتی، این پارامترها به شرایط محیطی مربوط می‌شوند و اطلاعاتی درباره نیازهای کامل آب گیاه از طریق ایستگاه‌های هواشناسی و همچنین وضعیت آب یا محتوای حجمی خاک که نشان‌دهنده دسترسی آب برای گیاه است، ارائه می‌دهند (Gutiérrez et al, 2013). رایج‌ترین حسگرهای پارامترهای خاک، حسگرهایی هستند که از خواص دی‌الکتریک استفاده می‌کنند، زیرا ارزان و انعطاف‌پذیر هستند (Visconti et al, 2014). با این حال، عملکرد صحیح آنها نیاز به کالیبراسیون پیچیده‌ای دارد که عواملی مانند بافت و ساختار خاک، دما و شوری آب (González-Teruel, 2019) و همچنین تغییرپذیری مکانی شرایط خاک را در نظر می‌گیرد (Barker et al, 2017). حسگرهای دیگر مانند دوربین‌های حرارتی و چندطیفی، ماهواره‌ها یا رادیومترهای مادون قرمز برای تخمین نیازهای آبی گیاهان استفاده می‌شوند (García-Tejero, 2018; Blanco, V., 2023).

روش پژوهش

اینترنت اشیا (IoT) در آبیاری هوشمند: اینترنت اشیا (IoT) به معنای اتصال دستگاه‌های مختلف از طریق اینترنت و شبکه‌های بی‌سیم است. در سیستم‌های آبیاری هوشمند، IoT نقش اصلی در جمع‌آوری و انتقال داده‌ها ایفا می‌کند. مطابق شکل ۳، نقش IoT در سیستم‌های آبیاری هوشمند بسیار حیاتی است (Leh et al, 2019) و این فناوری چندین جنبه مهم از مدیریت آبیاری را بهبود می‌بخشد. IoT امکان پایش لحظه‌ای شرایط مزرعه را از طریق سنسورهایی که به صورت مستمر داده‌هایی مانند رطوبت خاک، دما، سطح نور، و کیفیت هوا را جمع‌آوری می‌کنند، فراهم می‌کند. این اطلاعات به‌طور پیوسته به سیستم مرکزی ارسال می‌شود که به کشاورزان امکان می‌دهد وضعیت مزرعه را در هر لحظه و از هر مکان بررسی کنند. با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده توسط سنسورها،

بهبود کارایی، کاهش هزینه‌ها و افزایش پایداری در کشاورزی کمک می‌کند. این فناوری‌ها باعث می‌شوند که منابع آبی بهینه‌تر استفاده شوند و عملکرد کشاورزی به شکل چشمگیری ارتقا یابد (Lowe et al, 2022).

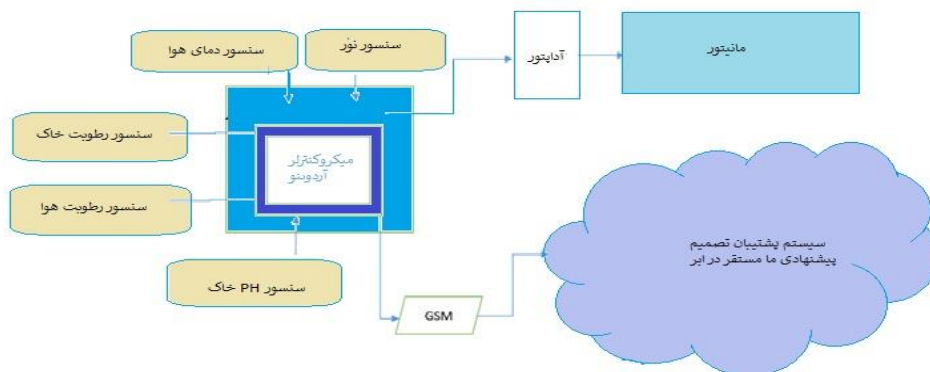
تعامل IoT و AI در سیستم آبیاری هوشمند: وقتی IoT و AI با هم ترکیب شوند، سیستم آبیاری هوشمند به یک اکوسیستم قدرتمند تبدیل می‌شود. در این سیستم IoT به‌عنوان چشمان و گوش‌های سیستم عمل می‌کند، داده‌های محیطی را جمع‌آوری کرده و شرایط مزرعه را نظارت می‌کند و AI به‌عنوان مغز سیستم عمل می‌کند، داده‌های دریافت‌شده از IoT را تحلیل کرده و تصمیمات هوشمندانه‌ای برای بهینه‌سازی آبیاری می‌گیرد. این تعامل پویا به معنای پاسخ‌دهی به شرایط واقعی و افزایش بهره‌وری در کشاورزی است. علاوه بر این، کشاورزان می‌توانند از هر کجای دنیا بر مزرعه خود نظارت داشته و تصمیم‌گیری‌های خود را به سیستم هوشمند واگذار کنند. در نهایت، ترکیب اینترنت اشیا و هوش مصنوعی در سیستم‌های آبیاری هوشمند باعث می‌شود که این سیستم‌ها نه تنها بتوانند داده‌های دقیق و لحظه‌ای را جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل کنند، بلکه به طور مداوم و تطبیقی تصمیم‌گیری کنند تا بهترین شرایط را برای رشد گیاهان و استفاده بهینه از منابع ایجاد کنند. این امر به کاهش هزینه‌ها، بهبود عملکرد محصولات، و مدیریت پایدار منابع آبی منجر می‌شود.

چارچوب مدل مفهومی سیستم پیشنهادی ما

شکل ۴ چارچوب سیستم پیشنهادی برای آبیاری هوشمند است که از حسگرها و میکروکنترلر آردوینو برای جمع‌آوری اطلاعات مختلف از محیط استفاده می‌کند. این سیستم اطلاعات را پردازش کرده و سپس به یک سیستم تصمیم‌گیری ارسال می‌کند.

شرایط محیطی می‌کند (Shaikh et al, 2022). با تحلیل داده‌های مربوط به نوع گیاه، شرایط خاک، دما، رطوبت و میزان بارندگی، هوش مصنوعی می‌تواند نیاز آبی دقیق گیاهان را پیش‌بینی کند. این کار باعث می‌شود که فقط به میزان لازم و در زمان مناسب به گیاهان آب داده شود و از هدررفت آب جلوگیری شود (پیش‌بینی نیاز آبی گیاهان). یادگیری ماشین می‌تواند الگوهای بهینه آبیاری را بر اساس داده‌های تاریخی و شرایط فعلی ایجاد کند. این سیستم‌ها قادرند زمان‌بندی‌های دقیق و مؤثری برای آبیاری تعیین کنند که علاوه بر صرفه‌جویی در آب، سلامت گیاهان را نیز تضمین کند (بهینه‌سازی زمان‌بندی آبیاری). با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، سیستم‌های آبیاری هوشمند می‌توانند الگوهایی را برای کاهش مصرف آب و انرژی شناسایی کنند. این امر به‌ویژه در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند، بسیار حائز اهمیت است (کاهش مصرف آب و انرژی). هوش مصنوعی می‌تواند سیستم‌های آبیاری را به‌صورت خودکار مدیریت و نظارت کند. این سیستم‌ها قادرند به تغییرات شرایط محیطی واکنش نشان دهند و آبیاری را به‌صورت خودکار تنظیم کنند. به عنوان مثال، در صورت بارندگی ناگهانی، سیستم می‌تواند آبیاری را متوقف کند (پایش و مدیریت خودکار سیستم‌های آبیاری). الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند مشکلاتی مانند نشت آب یا خرابی تجهیزات آبیاری را تشخیص داده و به‌موقع اقدامات لازم برای رفع آن‌ها را انجام دهند. این امر از اتلاف منابع جلوگیری کرده و عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد (تشخیص و رفع مشکلات).

سیستم‌های آبیاری هوشمند مجهز به سنسورهایی هستند که داده‌هایی مانند رطوبت خاک، دمای هوا و میزان نور خورشید را جمع‌آوری می‌کنند. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین می‌توانند این داده‌ها را تحلیل کرده و تصمیمات بهینه‌ای برای آبیاری بگیرند (تحلیل داده‌های سنسورها). در مجموع، استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در سیستم‌های آبیاری هوشمند به



شکل ۴ چارچوب مدل کلی سیستم پیشنهادی ما

مدلسازی روش پیشنهادی

مدل استدلال مبتنی بر مورد فازی (Fuzzy CBR) به سیستم اجازه می‌دهد تا از تجربیات گذشته و موارد مشابه برای حل مسائل جدید استفاده کند و از منطق فازی برای مدیریت عدم قطعیت و داده‌های نادقیق بهره‌مند شود. این روش به ویژه در مسائلی که داده‌ها نادقیق یا دارای پیچیدگی‌های غیرقطعی هستند، بسیار مفید است. بازیابی مورد در CBR بستگی به نوع مسئله، معیارهای شباهت، و ساختار پایگاه مورد دارد. بهینه‌سازی این مراحل و اعتبارسنجی موارد انتخاب شده، نقاط کلیدی در افزایش کارایی سیستم CBR می‌باشد. ساختار موردها مطابق جدول ۱ و ۲ در ساده‌ترین حالت رسماً بصورت یک دوتایی تعریف می‌شود (Case = (Problem, Action):

جدول ۱ ویژگی‌های مسئله - مورد

ویژگی‌های مسئله	رطوبت خاک	اسیدیته خاک	دمای هوا	فصل
کم، متوسط، زیاد	کم، متوسط، زیاد	کم، متوسط، زیاد	کم، متوسط، زیاد	اعداد ۴ تا ۱

جدول ۲ فعالیتهای بخش کنشها

a0	a1	a2	a3	کنشها
irrigOFF	irrigON	irrigDEC	irrigINC	

بخش توصیف مسأله متناظر با مجموعه ای از ویژگی‌هاست که حالت فعلی محیط را از دید عامل مرجع توصیف می‌کند. در حوزه ی کشاورزی هوشمند، مرتبط ترین ویژگی‌هایی که برای توصیف حالت محیط باید ملاحظه شود در جدول ۱ آورده شده است. در بخش توصیف راه حل، راه حل یک مورد با کنش یا سلسله کنش‌هایی که عامل CBR باید انجام دهند متناظر است مطابق جدول ۲. $A = (a_0, a_1, a_2, \dots)$

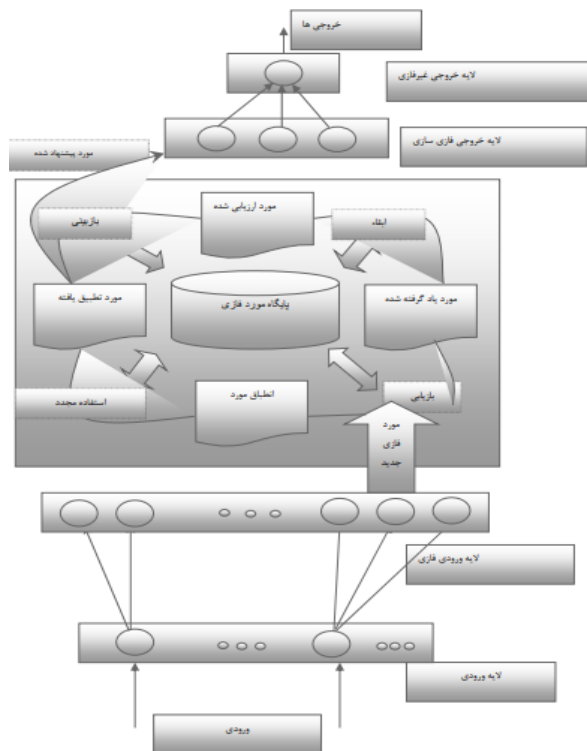
نمونه ای از کیس ساخته شده در ساختار فوق بصورت زیر است:

(['conditions': ['soil_moisture': 'low', 'temperature': 'high', 'light_intensity': 'medium', 'rainfall': 'low', 'wind_speed': 'high', 'soil_ph': 'acidic'], 'action': 'آبیاری'])

ویژگیهای فازی

در اینکار ویژگی‌ها را بصورت فازی در نظر گرفته شده است. این یک استراتژی برای مقاوم سازی سیستم در برخورد با داده های نویزی، عدم قطعیت، عدم صراحت و نادقیقی است. هر کدام از این ویژگی‌های که در واقع متغیرهای زبانی هستند از سه عبارت یا مجموعه ی "کم"، "متوسط"، "زیاد" تشکیل می‌شود. بنابراین سه تابع تعلق فازی وجود دارد. در این مطالعه، ما داده های خام را به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌کنیم. بنابراین معادلات زیر را برای دست یافتن به تبدیل داده ها بکار می‌بریم که همه پارامترها مثبت هستند. عبارت های فازی هر متغیر یعنی "کم" (L)، "متوسط" (M) زیاد (H) و توابع عضویت آنها بصورت زیر تعریف می‌شوند (شکل ۶)

مدل سیستم پشتیبان تصمیم (شناختی) پیشنهادی: شکل ۵ مدل رویکرد FCBR پیشنهادی را بصورت کلی نشان می‌دهد. پیش از بحث تفصیلی روی تمامی بخشهای مدل، تعاریف بکار رفته در این مدل را مورد بررسی قرار داده میشود. اولین مرحله در پیاده سازی مبتنی بر CBR بازنمایی و تعیین مدل موردها می باشد. در اینجا یک مورد، یک تصویر لحظه ای از محیط در یک زمان معین از نقطه نظر یک عامل (مجهز به CBR) است. از آنجائیکه اطلاعات موجود در یک مورد بر اساس ادراک حالت درونی (باورهای) این عامل است به این عامل، عامل مرجع می گوئیم. تعریف پایه ای مورد از دو بخش تشکیل می‌شود: توصیف مسأله؛ که متناظر با حالت و شرایط محیطی است، توصیف راه حل؛ که کنش یا سلسله کنشهایی که عامل باید برای حل مسأله انجام دهند را مشخص می‌کند. مدلی که در تصویر مشاهده می‌شود بر اساس استدلال مبتنی بر مورد فازی (Fuzzy Case-Based Reasoning) Fuzzy CBR - طراحی شده است. استدلال مبتنی بر مورد فازی ترکیبی از دو رویکرد اصلی است: استدلال مبتنی بر مورد (CBR) و منطق فازی. در این روش، سیستم با استفاده از تجربیات گذشته (موارد ذخیره شده) و قواعد فازی، برای تصمیم‌گیری در مسائل جدید اقدام می‌کند. در استدلال مبتنی بر مورد (CBR)، سیستم از موارد مشابه گذشته برای حل مسائل جدید استفاده می‌کند. منطق فازی نیز کمک می‌کند تا عدم قطعیت و نادقیق بودن داده‌ها مدیریت شود و سیستم بتواند با داده‌های نامشخص و مقادیر پیوسته کار کند.



شکل ۵. مدل پیشنهادی برای سیستم استدلال مبتنی بر مورد فازی

است محدودیت‌ها داشته باشد. ویژگی‌های فازی Fuzzy Distance Measures معمولاً با توزیع‌های احتمالاتی توصیف می‌شوند که در فضای اقلیدسی نمایش داده نمی‌شوند. بنابراین، استفاده از معیار فاصله اقلیدسی به صورت مستقیم ممکن است منجر به اشکال و مشکلاتی شود. برای محاسبه فاصله بین ویژگی‌های فازی، به جای معیار فاصله اقلیدسی، معیارهایی که مختص متغیرهای فازی هستند مانند معیارهای فاصله فازی (۱) یا تعامل مجموعه‌های فازی را می‌توان در نظر گرفت. این معیارها بهترین تطبیق را با مفاهیم فازی دارند. برخی از معیارهای فاصله فازی شامل معیار فاصله فازی چیدمان، معیار فاصله فازی زاده، و معیار فاصله فازی همینگ می‌باشند. این معیارها برای محاسبه فاصله بین مجموعه‌های فازی ویژگی‌ها به کار می‌روند و با مفاهیم فازی سازگار هستند.

تعیین شباهت ویژگی فصل

ما از شباهت بین ویژگی فصل مسأله و مورد در تابع تجمیع استفاده نمی‌کنیم بلکه خروجی این تابع شباهت فقط راهنمایی برای فیلتر کردن پایگاه مورد است تا از جستجوهای بی‌فایده در آن موردها پیشگیری شود.

$$Sim(S1, S2) = \begin{cases} 1 & \text{if } S1 = S2 \\ 0 & \text{if } S1 \neq S2 \end{cases} \quad \text{فرمول (۵)}$$

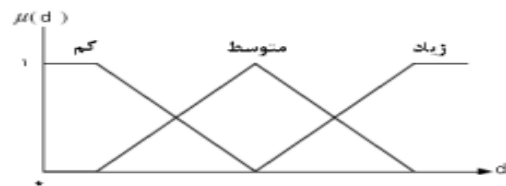
تابع تجمیع

پس از تشریح توابع شباهت برای ویژگی‌های مختلف باید یک تابع تجمیع تعریف کنیم تا شباهت کلی بین مسأله و مورد را محاسبه نماییم برای این منظور ما چهار تابع مختلف یعنی تابع میانگین وزن دار مینیمم و میانگین هارمونیک را مطالعه نمودیم و به بحث گذاشتیم بعد از ارزیابی رفتارشان نتیجه گرفتیم که تابع مینیمم منجر به یک تابع تجمیع خیلی محدود کننده می‌شود چون نتیجه ی کلی فقط بر مبنای کمترین مقدار است. لذا مقادیر پائین مقادیر بالا را به سرعت جریمه میکنند راجع به میانگین هارمونیک برای مقادیر مشابه رفتارش به تابع میانگین نزدیکتر است در حالیکه برای مقادیر ناهمسان مقادیر پائینتر شدیدتر لحاظ میشوند و خروجی چنانچه مقادیر پائینتر بیشتری در حساب آورده شود کاهش می یابد البته نه به اندازه ی تابع مینیمم بر عکس تابع میانگین به سرعت خروجی را برای مقادیر بالا افزایش میدهد و به اندازه ی کافی به مقادیر پائین اهمیت نمی دهد. بالاخره تابع میانگین وزن دار بین مقادیر بالا و پائین تمایز قائل نمی‌شود چون اهمیت هر مقدار بوسیله ی وزنهایشان تعیین می شود. اگر یک مقدار پائین یک وزن پائین داشته باشد و بقیه مقادیر همه بالا باشند خروجی اندکی تحت تاثیر واقع می شود و در هر صورت بالا نتیجه

$$\mu_L = \begin{cases} 1, & d \leq \min \\ \frac{\text{average} - d}{\text{average} - \min}, & \min < d < \text{average} \\ 0, & d \geq \text{average} \end{cases} \quad \text{فرمول (۱)}$$

$$\mu_M = \begin{cases} 0, & d \leq \min \\ \frac{d - \min}{\text{average} - \min}, & \min < d \leq \text{average} \\ \frac{\max - d}{\max - \text{average}}, & \text{average} < d < \max \\ 0, & d \geq \max \end{cases} \quad \text{فرمول (۲)}$$

$$\mu_H = \begin{cases} 0, & d \leq \text{average} \\ \frac{\max - d}{\max - \text{average}}, & \text{average} < d < \max \\ 1, & d \geq \max \end{cases} \quad \text{فرمول (۳)}$$

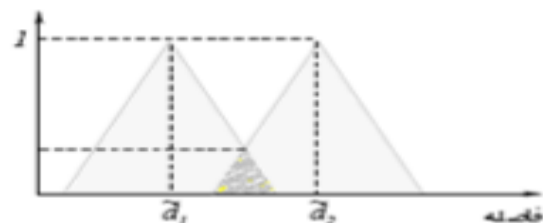


شکل ۶. مجموعه های فازی برای نمایش مقادیر متغیر های فازی

تعیین شباهت بین ویژگی‌های فازی

یکی از مهمترین توابع شباهت که نقش بسیار تعیین کننده ای در بازیابی موردهای مناسب و مفید دارد تابع تعیین شباهت بین ویژگی‌های فازی است برای تعیین شباهت بین دو ویژگی فازی در مقالات و نوشتجات مختلف توابع متفاوتی مطرح شده که هر کدام متناسب با حوزه کاری مربوطه مورد استفاده قرار گرفته است ما نیز برای کار خودمان در این حوزه ی خاص توابع متنوعی را آزمایش کرده ایم و برای انتخاب مناسب ترین تابع شباهت از بین آنها فاکتورهایی نظیر سرعت و دقت در بازیابی را مورد توجه قرار داده ایم ما شباهت دو مجموعه ی فازی را از رابطه ی اشتراک آنها تقسیم بر اجتماعشان بدست می آوریم (۷) .

$$Sim(\tilde{A}, \tilde{B}) = \frac{\tilde{A} \wedge \tilde{B}}{\tilde{A} \vee \tilde{B}} = \frac{Min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x))}{Max(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x))} \quad \text{فرمول (۴)}$$



شکل ۷. شباهت فازی

معیار فاصله اقلیدسی ابتدا برای داده‌های عددی طراحی شده است و معمولاً بر روی نقاط در یک فضای اقلیدسی (Euclidean space) اعمال می‌شود. این معیار، در صورتی که ویژگی‌ها دارای اطلاعات فازی یا عدم قطعیت باشند، ممکن

که f_i با مقادیر شباهت منحصر بفرد برای هر یک از ویژگی‌ها متناظر است.

بازیابی مورد

پایگاه موردهای اولیه شامل ۱۱۶ مورد می باشد که بصورت دستی و با کمک افراد خبره ساخته شده است و بازیابی مورد مشابه با مسئله جدید از آن با توجه به توابع شباهت فوق صورت می گیرد (شکل ۹). برای پیاده سازی الگوریتم هاز زبان برنامه نویسی پایتون استفاده شده است. این الگوریتم از کتابخانه FuzzyWuzzy برای محاسبه شباهت فازی استفاده می کند (شکل ۸).

می دهد. ما علاقه مند به تابعی هستیم که در بدست آوردن شباهت کلی همه ی مقادیر را تا حد امکان لحاظ کند اما مقادیر پائین را نیز بصورت برجسته تری بحساب آورد و نشان دهد. این یک خاصیت مهم و مطلوب است چراکه مقادیری که ملاحظه می گردد مقادیر شباهت ها است لذا اگر یکی از ویژگی ها شباهت پائینی داشته باشد شباهت کلی باید این حقیقت را با کاهش مقدارش منعکس نماید. بر مبنای این انگیزه ما تابع میانگین هارمونیک را به عنوان تابع تجميع برگزیدیم.

$$Sim(p, c) = sim(f_1, \dots, f_n) = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{f_i}} \quad (6) \text{ فرمول}$$

فرایند بازیابی (p,CB)
<pre> 1: For c in CB do 2: if IsCandidate (p,c) then 3: candidates = append(c, candidates) 4: end if 5: end For 6: Ordered_list = sort(candidates) 7: Best_retrieved = case first(orderd_list) 8: return Best_retrived Case </pre>

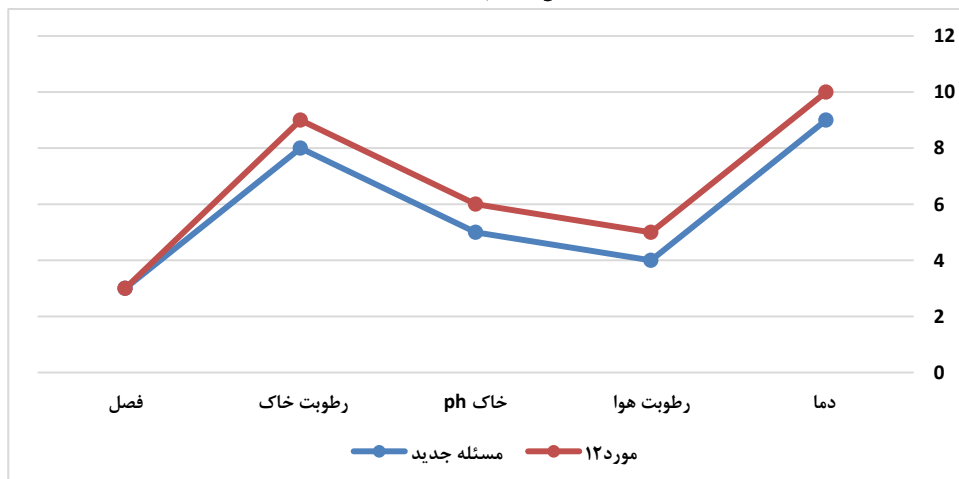
```
pip install fuzzywuzzy
```

```

def should_add_to_case_base(new_case, existing_cases, threshold):
    for existing_case in existing_cases:
        similarity = calculate_similarity(new_case, existing_case)
        if similarity > threshold:
            return True
    return False

```

شکل ۸. شبه کد



شکل ۹ مقایسه تصویری مورد بازیابی شده با مسئله جاری

نتایج و بحث

در این قسمت به طراحی و ارزیابی سه سناریوی متفاوت برای آبیاری باغ نخل خرما می‌پردازیم که هر یک از این روش‌ها نمایانگر سطوح مختلف بهره‌وری در مصرف آب و مدیریت منابع طبیعی هستند. هدف از تعریف این سناریوها، بررسی و مقایسه کارایی سیستم‌های آبیاری سنتی و هوشمند در بهینه‌سازی مصرف آب، بهره‌وری و هزینه‌های بهره‌برداری است. از آنجایی که نخل خرما گیاهی مقاوم به شرایط کم‌آبی است، انتخاب مناسب روش آبیاری نقشی اساسی در حفظ کیفیت خاک و افزایش بهره‌وری آن دارد. این بخش به تحلیل نتایج و پیاده‌سازی سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری برای آبیاری هوشمند مبتنی بر استدلال مبتنی بر مورد فازی پرداخته و با مقایسه آن با دو روش سنتی (آبیاری سطحی و آبیاری قطره‌ای معمولی) به ارزیابی کارایی این سیستم در باغ نخل خرما پرداخته شده است. هدف این فصل ارائه نتایج تجربی و ارزیابی روش پیشنهادی در بهینه‌سازی مصرف آب است.

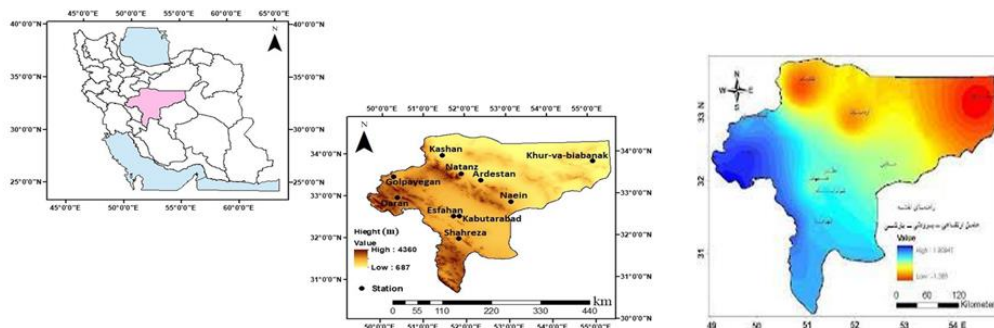
موقعیت جغرافیایی

موقعیت جغرافیایی تأثیر مستقیمی بر عوامل محیطی مانند میزان بارندگی، دما، رطوبت و نوع خاک دارد. این عوامل می‌توانند به‌طور قابل توجهی روی نتایج آبیاری و نیازهای آبی گیاهان تأثیر بگذارند. به‌ویژه در مورد نخل خرما، شرایط آب‌وهوایی و خاک منطقه اهمیت بسیاری دارد. برای درک بهتر خوانندگان امکان تعمیم یا مقایسه ما با ذکر دقیق مکان اجرای طرح، مشخص می‌کنیم که نتایج به دست آمده برای چه نوع مناطقی قابل تعمیم است. همانطور که در شکل ۱۰ مشخص است محل انجام پروژه شهرستان کویری خوروبابانک از توابع استان اصفهان با آب و هوایی گرم و خشک می‌باشد.

نتایج آزمایشی بر روی سناریوها:

میزان آب مصرفی:

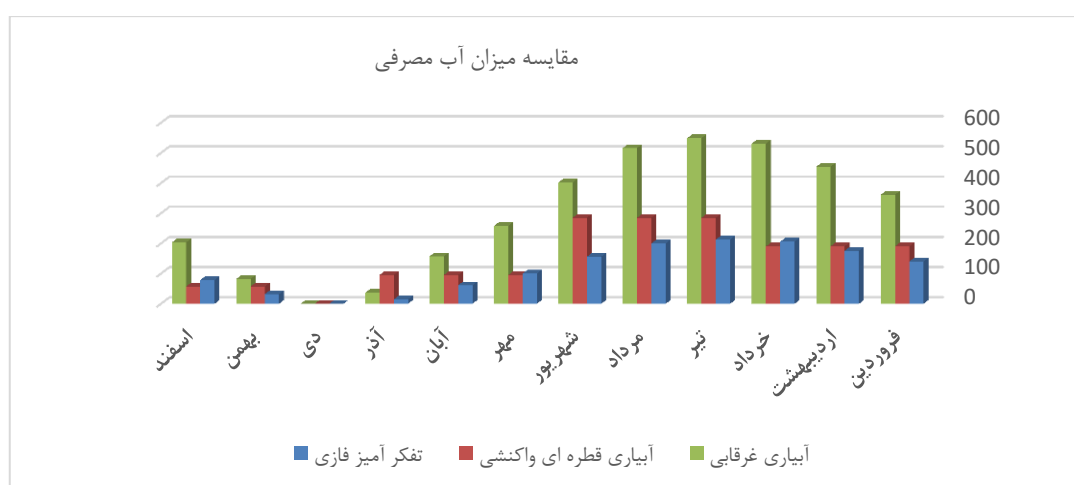
در سه سناریو با مشارکت ۱۲ نخل خرما هم سن با سه روش آبیاری شدند و داده‌های آنها از طریق حسگرهای محیطی، پلتفرم آردوینو جمع‌آوری شد به اینصورت که هر روش آبیاری به ۴ درخت مجزا اختصاص یافته است و شرایط برابر از نظر محیطی برای درختان وجود داشته است. سه مدل آبیاری در این تحقیق عبارتند از آبیاری غرقابی یا سطحی (هر ۱۰ روز در بهار و تابستان و هر ۲۰ روز در پاییز و زمستان)، آبیاری قطره‌ای واکنشی متداول (هر ۳ روز در بهار هر ۲ روز در تابستان هر ۱۰ روز در پاییز و هر ۳۰ روز در زمستان)، آبیاری تفکر آمیز مبتنی بر CBR فازی، که در اینجا منظور از تفکر آمیز، هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی CBR می‌باشد، و وابسته به شرایط انجام می‌شود. با یک مرور دقیق و در مجموع، با توجه به نتایج آبیاری قطره‌ای تفکر آمیز فازی، این روش نسبت به دیگر روش‌ها مصرف آب کمتری دارد. علاوه بر این با توجه به نیازهای آبی درختان و زمان مناسب آبیاری بصورت هوشمند و به میزان کافی صورت می‌گیرد. میانگین مصرف آب کمترین مقدار را دارد. انحراف از معیار کم است که نشانگر پراکندگی کمتری در مصرف آب است. تغییرات نسبتاً کمتری در مصرف آب در طول ماه‌ها دارد. آبیاری قطره‌ای واکنشی نیز میزان متوسط آب مصرفی کمتری نسبت به روش غرقابی دارد. اما از آنجا که بصورت از پیش زمانبندی شده و صرفاً خودکار آبیاری را انجام می‌دهد قادر به ارزیابی دقیق نیازهای آبی درختان و زمانبندی بهینه نخواهد بود. لذا علاوه بر مصرف کمی آب بیشتر نسبت به روش تفکر آمیز می‌تواند از نظر کیفیت آبیاری نیز دست پائینتر را داشته باشد چراکه زمانبندی آبیاری صرفاً بر اساس فصول سال بصورت از پیش برنامه‌ریزی شده تغییر یافته است.



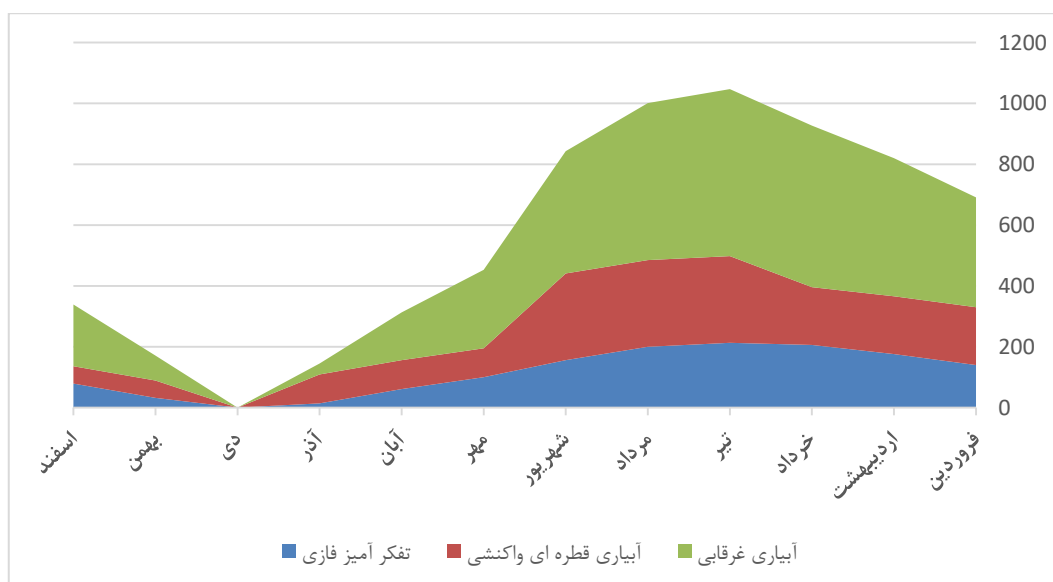
شکل ۱۰: نقشه جغرافیایی و دمایی محل اجرای پروژه

در این مدل آبیاری در تمام ماه‌های سال در مقایسه با سایر روشها است که تایید کننده اعتبار و کارامدی روش پیشنهادی می باشد (شکل ۱۳). شکل ۱۵ نمایانگر آنست که بطور کلی مصرف آب در فصول مختلف سال بطور محسوسی در روش پیشنهادی کمتر است و بویژه در فصول بهار و تابستان که نیازهای آبی باغات و درختان شدیدتر است این اختلاف معنادار از اهمیت بسیار بیشتری برخوردار است. در نهایت نمودار شکل ۱۶ بخوبی نشان میدهد که روش آبیاری هوشمند (FCBR) ما بشدت سایر روشهای آبیاری را از لحاظ بهینگی در مصرف سالانه آب پشت سر می‌گذارد.

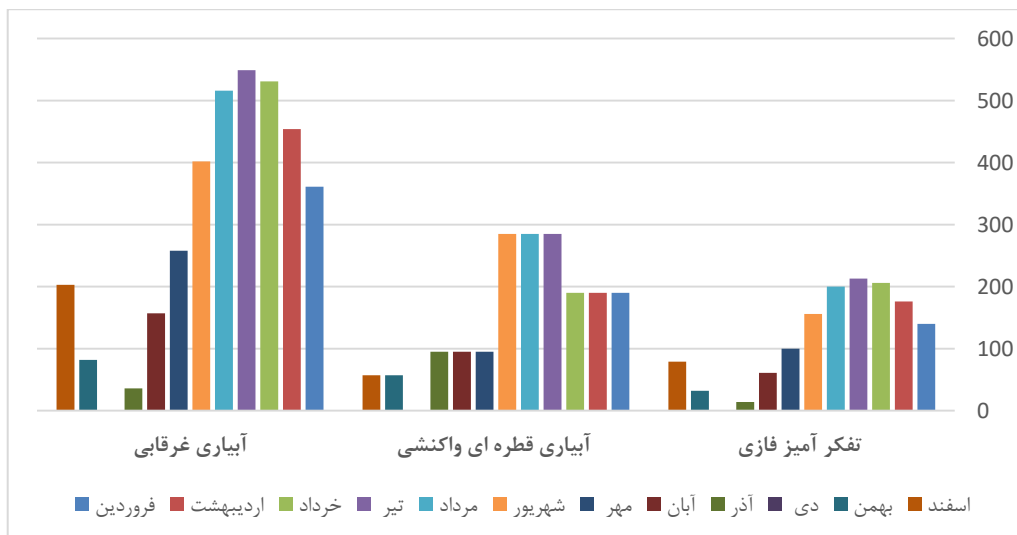
انحراف از معیار بیشتر است، نشانگر پراکندگی بیشتری در مصرف آب است (شکل ۱۱). نمودار سطحی آب مصرفی شکل ۱۲ بخوبی نشان می‌دهد چه میزان آب از سفره های زیرزمینی جهت آبیاری با استفاده از هریک از روشهای آبیاری لازم است برداشت شود تا یک سطح مشابه از اراضی کشاورزی زیر کشت برده شود و بصورت پایدار برای آبیاری یک نخلستان مورد استفاده قرار گیرد. در پایان نمودارهای روند شکل ۱۴ نشان میدهند که اگرچه با توجه به تغییر فصل از تابستان به زمستان در هر ۳ روش مصرف آب کاهشی بوده است لکن ارتفاع پایینتر روند مربوط به روش تفکر آمیز میشود. نمودار روش تفکر آمیز فازی (FCBR) پیشنهادی همچنان حاکی از مصرف کمتر آب



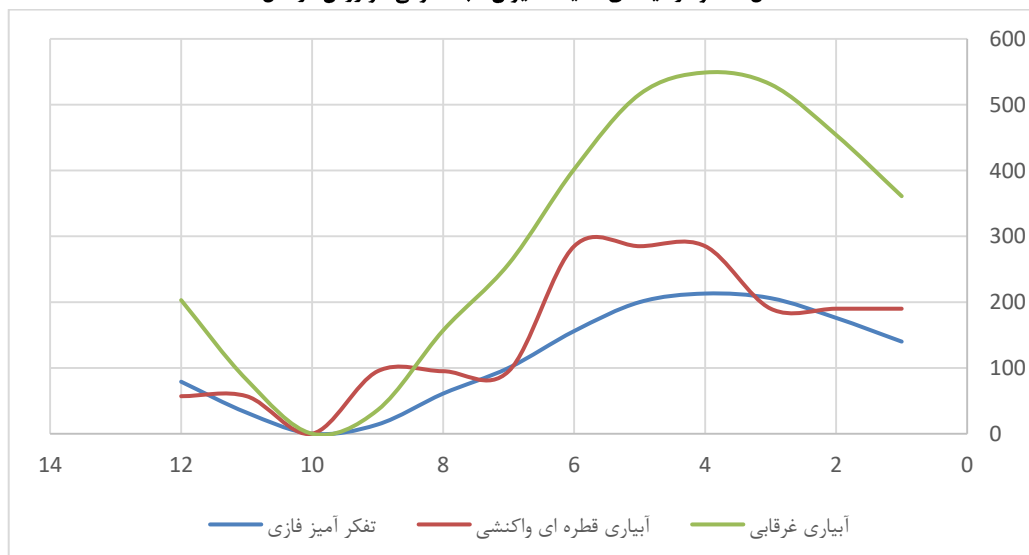
شکل ۱۱ مقایسه میزان آب مصرفی بر حسب لیتر در ماههای مختلف سال در سه روش آبیاری



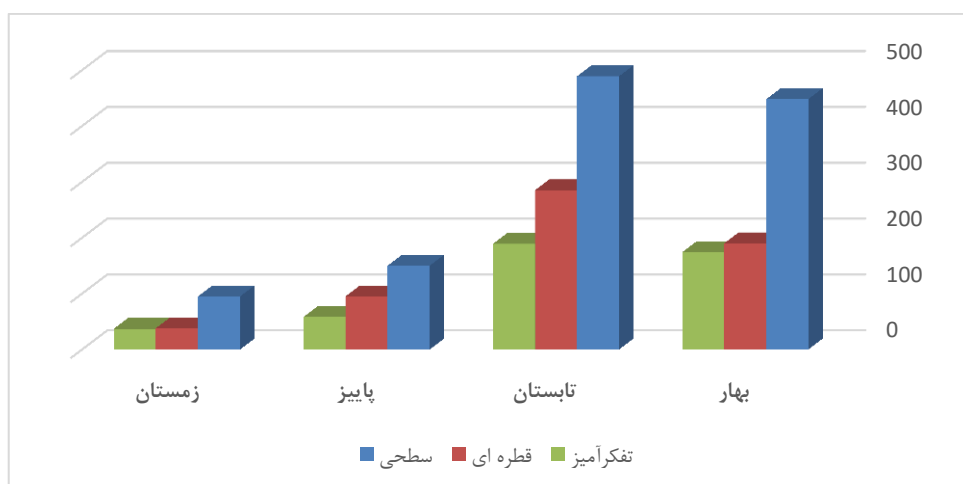
شکل ۱۲ مقایسه میزان آب مورد نیاز با نمودار سطحی در سه روش آبیاری



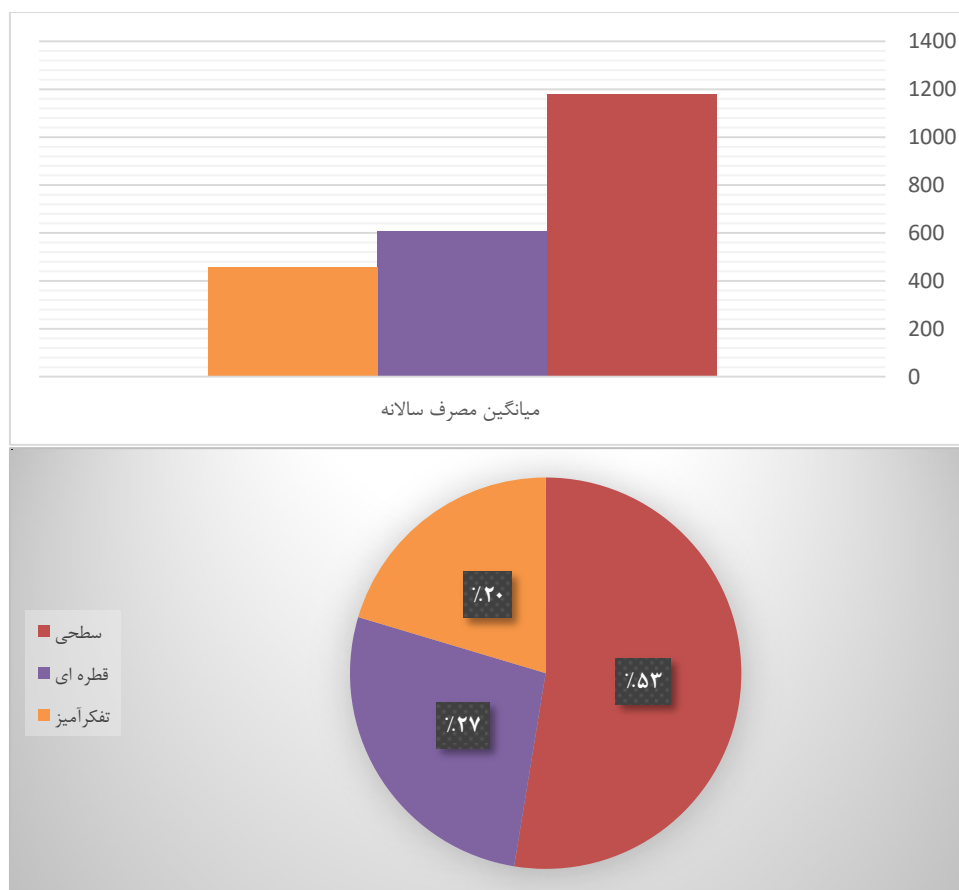
شکل ۱۳ نمودار میله ای مقایسه میزان آب مصرفی هر روش در سال



شکل ۱۴ نمودار روند سه روش آبیاری



شکل ۱۵ مصرف آب بصورت تفکیک شده در فصول مختلف



شکل ۱۶ میانگین مصرف سالانه در هر روش

مقایسه جامع سه روش آبیاری

در این پژوهش برای ارزیابی سه سناریوی تعریف شده آبیاری در باغ نخل خرما (آبیاری سطحی، آبیاری قطره‌ای و واکنشی متداول و آبیاری هوشمند مبتنی بر استدلال مبتنی بر مورد فازی) مجموعه‌ای از معیارهای منتخب از میان معیارهای مطرح شده در منابع علمی مختلف مورد بررسی قرار داده شد. با توجه به محدودیت‌های پژوهش و اهداف پروژه، معیار «صرفه‌جویی در مصرف آب» به‌طور مستقیم برای ارزیابی به کار گرفته شده‌اند. نتایج نشان داد روش هوشمند FCBR کمترین میانگین مصرف آب سالانه را داشته و تغییرات فصلی در آن کمتر از سایر روش‌ها بوده است. آبیاری قطره‌ای واکنشی نسبت به سطحی آب کمتری مصرف کرده ولی به دلیل زمان‌بندی ثابت، در انطباق با نیاز واقعی گیاه ضعف دارد. سایر معیارها نیز در تحلیل کیفی نتایج قابل استنباط هستند. برای جمع‌بندی، سه روش از نظر معیارهای اصلی در جدول ۳ مقایسه شده‌اند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد سه روش آبیاری سطحی، قطره‌ای واکنشی و سیستم هوشمند مبتنی بر استدلال مبتنی بر مورد فازی (FCBR) در باغ نخل خرما انجام شد. مدل آبیاری هوشمند پیشنهادی ما که از هوش مصنوعی و فناوری

اطلاعات بهره می‌برد می‌تواند یکی از بهترین روشهای آبیاری هوشمند باشد چراکه با عملکردی شبیه به یک کارشناس کشاورزی خبره می‌تواند منجر به استفاده بهینه از منابع آبی بعنوان مهمترین رکن در توسعه ی کشاورزی پایدار، حفاظت از خاک، توسعه باغات، کاهش نیاز به نیروی انسانی، افزایش کمی و کیفی محصول با منابع موجود، گردد. این سیستم هوشمند آبیاری با استفاده از سنسورها و داده‌های هوشمند می‌توانند میزان نیاز آب باغات را تحلیل و مدیریت کنند و این امکان بوجود می‌آید تا آب را بهینه و در زمان‌های مناسب به مصرف درختان برسد. نتایج نشان داد که سیستم هوشمند FCBR با بهره‌گیری از اینترنت اشیا، شناسایی و تحلیل فازی، کمترین میانگین مصرف آب سالانه را داشته و در مقایسه با آبیاری قطره‌ای واکنشی و سطحی صرفه‌جویی قابل توجهی ایجاد کرده است. مقایسه جامع سه روش بیانگر برتری مشهود سیستم هوشمند از نظر مصرف آب، انعطاف‌پذیری، هزینه عملیاتی و قابلیت مدیریت و کنترل است. در مقابل، آبیاری سطحی به دلیل اتلاف بالای آب و کارایی پایین، و آبیاری قطره‌ای به دلیل قابلیت انطباق پویا، کارایی محدودتری دارند. رویکرد کشاورزی ۵.۰ با توجه به چالش‌ها و فرصت‌های آینده، می‌تواند بهبود و بهینه‌سازی کشاورزی هوشمند را ترویج کند و به

جدول ۳ مقایسه جامع سه روش آبیاری

معیار	آبیاری سطحی	آبیاری قطره‌ای	سیستم هوشمند FCBR
مصرف آب	بالا	متوسط	پایین
بهره‌وری آب	پایین	متوسط	بالا
هزینه اولیه	پایین	متوسط	بالا
هزینه عملیاتی	بالا	متوسط	پایین
انعطاف‌پذیری	پایین	پایین	بالا
قابلیت هوشمندی	ندارد	محدود	کامل
مدیریت و کنترل	پایین	متوسط	بالا

کشاورزان کمک کنند تا با طرح و برنامه با چالش‌های مختلفی نظیر بحران آب مواجه شوند. بکارگیری روش قطره ای تفکرآمیز فازی (FCBR) پیشنهادی، حاکی از مصرف کمتر آب در مقایسه با سایر روش‌ها است که تایید کننده اعتبار و کارامدی روش پیشنهادی می باشد. این روش بویژه روشهای آبیاری سنتی غرقابی را بشدت پشت سر می گذارد و مصرف کمی بیش از ۵۰ درصد از آب را صرفه جویی می کند. در این راستا بعنوان کارهای آتی، مدل پیشنهادی ما می تواند با سایر متدهای هوش مصنوعی مثل یادگیری تقویتی، شبکه های عصبی و ... ترکیب شده و در فازهای مختلف مدل بهبود یابد.

Reference:

- Aamodt, A., & Plaza, E. (1994). Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches. *AI communications*, 7(1), 39-59.
- Abdikadir, N. M., Hassan, A. A., Abdullahi, H. O., & Rashid, R. A. (2023). Smart irrigation system. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 10(8), 224-234
- Barker, J.B.; Franz, T.E.; Heeren, D.M.; Neale, C.M.U.; Luck, J.D. (2017). Soil water content monitoring for irrigation management: A geostatistical analysis. *Agric. Water Manag.*, 188, 36–49
- Blanco, V., Willsea, N., Campbell, T., Howe, O., & Kalcsits, L. (2023). Combining thermal imaging and soil water content sensors to assess tree water status in pear trees. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1197437.
- Darshna, S., Sangavi, T., Mohan, S., Soundharya, A., & Desikan, S. (2015). Smart irrigation system. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, 10(3), 32-36.
- Davis, S. L., & Dukes, M. D. (2010). Irrigation scheduling performance by evapotranspiration-based controllers. *Agricultural water management*, 98(1), 19-28
- Davis, S. L., Dukes, M. D., & Miller, G. L. (2009). Landscape irrigation by evapotranspiration-based irrigation controllers under dry conditions in Southwest Florida. *Agricultural Water Management*, 96(12), 1828-1836.
- Devanand Kumar, G., Vidheya Raju, B., & Nandan, D. (2020). A review on the smart irrigation system. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 17(9-10), 4239-4243.
- Dutta, S., Rakshit, S., & Chatterjee, D. (2020). Use of artificial intelligence in Indian agriculture. *Food and Sci. Rep*, 1, 65-72.
- FAO (2003). Water at a Glance . Available Online At: <https://www.fao.org/4/ap505e/ap505e.pdf>
- FAO (2021) World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2021, <https://doi.org/10.4060/cb4477en>.
- FAO (2015) Water at a Glance: the relationship between water, agriculture, food security and poverty. Rome. 15 pp. <https://www.fao.org/3/ap505e/ap505e.pdf>
- FAO (2022) AQUASTAT - FAO's global information system on water and agriculture. Available at: <https://www.fao.org/aquastat/en/>. Accessed on 10 October, 2022
- FAO (2024). Water scarcity, Available (Online) At : <https://www.fao.org/land-water/water/water-scarcity/en/>
- Gamal, Yomna & Soltan, Ahmed & Said, Lobna & Madian, Hazem & Radwan, Ahmed. (2023). Smart Irrigation Systems: Overview. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2023.3251655.
- García-Tejero, I.F.; Ortega-Arévalo, C.J.; Iglesias-Contreras, M.; Moreno, J.M.; Souza, L.; Tavira, S.C.; Durán-Zuazo, V.H. (2018) Assessing the crop-water status in almond (*Prunus dulcis* mill.) trees via thermal imaging camera connected to smartphone. *Sensors*, 18, 1050.
- Ghrab, Mohamed, et al. "Water relations and yield of olive tree (cv. Chemlali) in response to partial root-zone drying (PRD) irrigation technique and salinity under arid climate." *Agricultural Water Management* 123 (2013): 1-11.
- González-Teruel, J.D.; Torres-Sánchez, R.; Blaya-Ros, P.J.; Toledo-Moreo, A.B.; Jiménez-Buendía, M.; Soto-Valles, F. (2019). Design and calibration of a low-cost SDI-12 soil moisture sensor. *Sensors*, 19, 491.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660.
- Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., & Porta-Gándara, M. Á. (2013). Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 63(1), 166-176.
- Hashem, I. A. T., Yaqoob, I., Anuar, N. B., Mokhtar, S., Gani, A., & Khan, S. U. (2015). The rise of “big

- data" on cloud computing: Review and open research issues. *Information systems*, 47, 98-115.
- Jain, R. K. (2023). Experimental performance of smart IoT-enabled drip irrigation system using and controlled through web-based applications. *Smart Agricultural Technology*, 4, 100215.
- Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2, 1-12.
- 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
- Leh, N. A. M., Kamaldin, M. S. A. M., Muhammad, Z., & Kamarzaman, N. A. (2019, October). Smart irrigation system using internet of things. In 2019 IEEE 9th international conference on system engineering and technology (ICSET) (pp. 96-101). IEEE.
- Lowe, M., Qin, R., & Mao, X. (2022). A review on machine learning, artificial intelligence, and smart technology in water treatment and monitoring. *Water*, 14(9), 1384.
- Monica, M., Yeshika, B., Abhishek, G. S., Sanjay, H. A., & Dasiga, S. (2017, October). IoT based control and automation of smart irrigation system: An automated irrigation system using sensors, GSM, Bluetooth and cloud technology. In 2017 International Conference on recent innovations in signal processing and embedded systems (RISE) (pp. 601-607). IEEE.
- Navarro-Hellín, H., Martínez-del-Rincon, J., Domingo-Miguel, R., Soto-Valles, F., & Torres-Sánchez, R. (2016). A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 121-131.
- Navarro-Hellín, H., Torres-Sánchez, R., Soto-Valles, F., Albaladejo-Pérez, C., López-Riquelme, J. A., & Domingo-Miguel, R. (2015). A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management. *Agricultural Water Management*, 151, 64-
- Patil, C., Aghav, S., Sangale, S., Patil, S., & Aher, J. (2021). Smart irrigation using decision tree. In *Proceedings of International Conference on Recent Trends in Machine Learning, IoT, Smart Cities and Applications: ICMISC 2020* (pp. 737-744). Springer Singapore.
- Ragab, Mohammed Ali, Mo'men M. Badreldeen, Abdelrahman Sedhom, and Wael M. Mamdouh. "IoT based smart irrigation system." *International Journal of Industry and Sustainable Development* 3, no. 1 (2022): 76-86.
- Ray, S., & Majumder, S. (2024). Water management in agriculture: Innovations for efficient irrigation. *Modern Agronomy*; Sil, P., Chhetri, P., Majumder, S., Santosh, DT, Eds, 169-185.
- Saraf, S. B., & Gawali, D. H. (2017, May). IoT based smart irrigation monitoring and controlling system. In 2017 2nd IEEE international conference on recent trends in electronics, information & communication technology (RTEICT) (pp. 815-819). IEEE.
- Schreier, H. (2014, May). Water and agriculture: harvesting water before harvesting the crop. Institute for Resources and Environment, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia book chapter 17, page 1-17
- Shaikh, T. A., Rasool, T., & Lone, F. R. (2022). Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107119.
- Sinha, C., & Gupta, P. (2024). Smart Irrigation System using Neural Network. *International Journal in Engineering Sciences*, 2(06), 1-1.
- Statistics Canada (2002). *Agricultural Census Data for 2001*, Statistics Canada, Ottawa
- Subramani, C., Usha, S., Patil, V., Mohanty, D., Gupta, P., Srivastava, A. K., & Dashetwar, Y. (2020). IoT-based smart irrigation system. In *Cognitive Informatics and Soft Computing: Proceeding of CISC 2019* (pp. 357-363). Springer Singapore
- Torrecillas, A., et al. "Strategies for drought resistance in leaves of two almond cultivars." *Plant Science* 118.2 (1996): 135-143.
- Visconti, F., de Paz, J. M., Martínez, D., & Molina, M. J. (2014). Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils. *Agricultural Water Management*, 132, 111-119.
- Watson, I., & Marir, F. (1994). Case-based reasoning: A review. *The knowledge engineering review*, 9(4), 327-354.
- Zhai, Z.Y., Ortega, J.-F.M (2020a) Applying case-based reasoning and a learning-based adaptation strategy to irrigation scheduling in grape farming, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 178 , 105741, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105741>.
- Zhai, Z.Y., Ortega, J.-F.M (2020b) contributions to Case-Based Reasoning Enabled Decision Support System for Smart Agriculture. Ph.D . Dissertation thesis.
- Zhang, Q. , (2015) *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*, 1st ed.; CRC Press and Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA; ISBN 978-1-4822-5107-4.
- Zhang, Y. (2019). The role of precision agriculture. *Resource Magazine*, 26(6), 9-9.