



Optimizing Water Productivity in the Face of Climate Change: The Central Role of Machine Learning Approaches

Iman Hajirad¹✉  | Paria Pourmohamma²  | Masoud Pourgholam Amiji³ 

1. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: i.hajirad@ut.ac.ir

2. Department of reclamation of arid and mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Paria.pormohamad7@ut.ac.ir

3 Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: mpourgholam6@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Review

Article history:

Received: Oct. 7, 2025

Revised: Dec, 3, 2025

Accepted: Dec. 9, 2025

Published online: Jan. 2026

Keywords:

Deep learning,

Prediction,

Resilience.

Smart irrigation,

ABSTRACT

Climate change, by inducing severe fluctuations in precipitation patterns, temperature, and evapotranspiration, has increasingly challenged water resource management, particularly in arid and semi-arid regions. Under these critical conditions, enhancing water use efficiency (WUE) in agriculture is recognized as one of the most effective strategies for adapting to water scarcity and ensuring food security. However, assessing and optimizing WUE exceeds the capabilities of traditional models due to the nonlinear and dynamic relationships among climatic, soil, and crop variables. Recent advances in data science and artificial intelligence—particularly the development of machine learning (ML) and deep learning (DL) models—have enabled the analysis of vast volumes of climatic, hydrological, and agricultural data. This comprehensive review explores the role of data-driven approaches in optimizing water use efficiency under climatic uncertainty. By reviewing existing studies, we analyze the application of various models—including Random Forest, Support Vector Machine, and Neural Networks—in key domains such as water demand prediction, accurate evapotranspiration estimation, and irrigation system performance assessment. The literature reveals that the use of hybrid models integrating multi-source data (remote sensing, IoT sensors, and ground observations) significantly enhances decision-making accuracy in water management. This approach not only addresses the challenges posed by climate instability but also paves the way for the development of intelligent and adaptive irrigation systems essential for strengthening water resource resilience.

Cite this article: Hajirad, I., Pourmohammad, P., Pourgholam Amiji, M., (2026) Optimizing Water Productivity in the Face of Climate Change: The Central Role of Machine Learning Approaches, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (11), 2929-2949. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403943.670022>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403943.670022>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Climate change, by causing severe fluctuations in precipitation, temperature, and evapotranspiration patterns, has imposed increasing and unpredictable challenges on global water resource management, particularly in arid and semi-arid regions. Under conditions where access to fresh water is severely reduced and food security is threatened, enhancing Water Use Efficiency (WUE) is considered the most effective strategy for adapting to water scarcity and maintaining global food security, serving as the most vital index for evaluating the efficiency of water resource utilization. However, assessing and optimizing WUE under a changing climate is a complex and multi-dimensional problem, as the relationships between climatic variables, soil properties, vegetation cover, and management activities possess a non-linear and dynamic nature. These complexities severely restrict the efficacy of traditional physical and linear statistical models, which rely on stability assumptions, thus highlighting the necessity for advanced analytical tools.

Methodology

This comprehensive review article aims to fill the existing gap in the research literature by systematically analyzing the role of Data-Driven Approaches (DDA), including Machine Learning (ML), Deep Learning (DL), and hybrid models, in optimizing water use efficiency under climatic uncertainty. Relying on big data analytics and the capability to understand hidden and non-linear relationships, DDA emerges as an efficient and forward-looking approach, serving as a suitable alternative to models based on predefined assumptions. The literature review focuses on the application of these models in predicting crop water requirements, estimating evapotranspiration, and evaluating the performance of irrigation systems.

Mechanisms and Key Applications

Data-Driven Approaches operate by extracting knowledge from large and diverse sets of information, encompassing climatic, hydrological, agricultural, remote sensing, and Internet of Things (IoT) sensor data. These models are capable of reducing high uncertainties in water management processes and providing more accurate predictions of vital variables such as soil moisture and actual Evapotranspiration (ET). The role of DDA in optimizing WUE is concentrated in four key areas: 1. Forecasting crop water demand, 2. Estimating and optimizing actual Evapotranspiration (ET), 3. Analyzing the performance of irrigation systems, and 4. Assessing the impacts of climate change on water productivity. These approaches cover three main analytical levels: Descriptive (understanding the current status and historical trends), Predictive (modeling the future behavior of systems), and most importantly, Prescriptive or Decision-Making (providing optimal and automated recommendations for the amount, timing, and method of irrigation in AI-based Smart Irrigation systems).

Model Comparison

Data-driven models are primarily categorized into three groups: Classical Machine Learning (e.g., Random Forest, SVM) which offer good interpretability and simplicity for medium-sized data; Deep Learning (e.g., CNN, RNN) which excel in processing massive data and modeling complex temporal and spatial relationships, yet require extensive computational resources and data, and suffer from interpretation challenges; and Hybrid Models (integrating physical models with ML/DL) which achieve the highest prediction accuracy, generalizability, and efficiency, even under data limitations, by leveraging the strengths of both approaches. The final conclusion emphasizes that combining multi-source data with intelligent algorithms significantly enhances decision-making accuracy in water management, paving the way for the development of smart irrigation systems and integrated water resource management. Data-Driven Approaches, despite challenges like data quality and the low interpretability of deep models, represent an unprecedented opportunity to elevate water resource management from a descriptive level to an intelligent and adaptive level, increasing resilience in the era of climate change.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Not applicable.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

بهینه‌سازی بهره‌وری آب در مواجهه با تغییرات اقلیمی: نقش محوری رویکردهای یادگیری ماشین

ایمان حاجی‌راد^۱ | پریا پورمحمد^۲ | مسعود پورغلام آمیجی^۳۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: i.hajirad@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده مناطق طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران: رایانامه:

Paria.pormohamad7@ut.ac.ir۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mpourgholam6@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله مروری	تغییرات اقلیمی با ایجاد نوسانات شدید در الگوهای بارش، دما و تبخیر- تعرق، مدیریت منابع آب را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با چالش‌های فزاینده‌ای مواجه ساخته است. در این شرایط بحرانی، ارتقاء بهره‌وری مصرف آب (WUE) در بخش کشاورزی به عنوان مؤثرترین راهکار برای سازگاری با کم‌آبی و حفظ امنیت غذایی مطرح می‌شود. ارزیابی و بهینه‌سازی WUE، به‌دلیل طبیعت غیرخطی و پیوسته روابط میان متغیرهای اقلیمی، خاکی و زراعی، از توان مدل‌های سنتی فراتر رفته است. پیشرفت‌های اخیر در حوزه علم داده و هوش مصنوعی، و به‌طور خاص توسعه مدل‌های یادگیری ماشین (ML) و یادگیری عمیق (DL)، امکان تحلیل حجم عظیمی از داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و زراعی را فراهم کرده است. این مقاله مروری جامع، به بررسی نقش رویکردهای داده‌محور در بهینه‌سازی بهره‌وری مصرف آب در شرایط عدم قطعیت اقلیمی می‌پردازد. در این پژوهش، با مرور مطالعات انجام شده، کاربرد انواع مدل‌ها از جمله جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، و شبکه‌های عصبی در حوزه‌های کلیدی مانند پیش‌بینی نیاز آبی، برآورد دقیق تبخیر- تعرق و ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری تحلیل می‌شود. مرور ادبیات نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های ترکیبی با ترکیب داده‌های چندمنبعی (سنجش از دور، سنسورهای IoT و داده‌های زمینی) دقت تصمیم‌گیری در مدیریت آب را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. این رویکرد، نه تنها چالش‌های ناشی از ناپایداری اقلیمی را مدیریت می‌کند، بلکه زمینه را برای توسعه سامانه‌های آبیاری هوشمند و تطبیقی فراهم می‌سازد که برای افزایش تاب‌آوری منابع آب ضروری هستند.
واژه‌های کلیدی: یادگیری عمیق، آبیاری هوشمند، پیش‌بینی، تاب‌آوری	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱۶	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۱۲	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۱۸	
تاریخ انتشار: بهمن ۱۴۰۴	
استناد: حاجی راد؛ ایمان، پورمحمد؛ پریا، پورغلام آمیجی؛ مسعود، (۱۴۰۴) بهینه‌سازی بهره‌وری آب در مواجهه با تغییرات اقلیمی: نقش محوری رویکردهای یادگیری ماشین، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶، (۱۱)، ۲۹۴۹-۲۹۲۹. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403943.670022	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403943.670022	



مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی در حوزه مدیریت منابع طبیعی تبدیل شده است. این پدیده با تغییر در الگوهای بارش، افزایش دما و وقوع خشکسالی‌های طولانی‌مدت، سبب کاهش دسترسی به منابع آب شیرین شده و فشار فزاینده‌ای بر بخش‌های کشاورزی، صنعتی و شهری وارد کرده است. در این میان، بهره‌وری مصرف آب به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی کارایی استفاده از منابع آبی، جایگاه ویژه‌ای در سیاست‌گذاری‌ها و پژوهش‌های علمی پیدا کرده است. بهره‌وری مصرف آب، بیانگر میزان تولید اقتصادی یا زیستی در قبال هر واحد آب مصرفی است و ارتقای آن می‌تواند نقش مؤثری در کاهش فشار بر منابع آبی، افزایش تاب‌آوری سامانه‌های کشاورزی و بهبود امنیت غذایی ایفا کند. با این حال، ارزیابی و بهینه‌سازی بهره‌وری آب تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، پیچیده و چندبعدی است، زیرا روابط بین متغیرهای اقلیمی، خاک، پوشش گیاهی و فعالیت‌های انسانی، غیرخطی و پویا هستند (Gerten et al., 2013; Hajirad, 2025). در مواجهه با این پیچیدگی‌ها و محدودیت مدل‌های کلاسیک، پژوهشگران به دنبال ابزارهایی نوین برای تحلیل رفتار سامانه‌های آبی در شرایط اقلیمی متغیر بوده‌اند. در سال‌های اخیر، رویکردهای داده‌محور^۱ به عنوان ابزاری نوین برای تحلیل این پیچیدگی‌ها و استخراج الگوهای پنهان از میان داده‌های بزرگ و ناهمگن مطرح شده‌اند. این رویکردها شامل الگوریتم‌های یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و داده‌کاوی هستند که می‌توانند از داده‌های تاریخی و لحظه‌ای برای پیش‌بینی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بهره‌وری مصرف آب در مقیاس‌های مختلف استفاده کنند (Lee et al., 2023). هدف این مقاله، مرور و تحلیل جامع پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه به‌کارگیری رویکردهای داده‌محور برای بهینه‌سازی بهره‌وری مصرف آب در شرایط تغییرات اقلیمی است. در این راستا، ابتدا مفهوم بهره‌وری آب و تأثیر تغییرات اقلیمی بر آن تبیین می‌شود، سپس انواع رویکردهای داده‌محور و کاربرد آن‌ها در مدیریت آب معرفی و مقایسه می‌گردند. با وجود مطالعات گسترده در زمینه مدیریت منابع آب، بیشتر پژوهش‌های پیشین بر مدل‌های فیزیکی و آماری متکی بوده‌اند که توانایی محدودی در تحلیل روابط غیرخطی و پویای میان متغیرهای اقلیمی دارند. از این رو، هنوز خلأیی در بهره‌گیری از روش‌های داده‌محور برای درک رفتار پیچیده سامانه‌های آبی در شرایط تغییر اقلیم وجود دارد. این مطالعه با هدف پرکردن این شکاف، به مرور نظام‌مند پژوهش‌های اخیر و استخراج نقاط قوت و ضعف این رویکردها می‌پردازد.

چارچوب مفهومی

بهره‌وری مصرف آب در شرایط تغییر اقلیم

بهره‌وری آب مصرفی^۲ (WUE) مفهومی چندبعدی است که از تعامل میان فرایندهای زیستی، فیزیکی، اقتصادی و مدیریتی شکل می‌گیرد و هدف آن، دستیابی به بیشترین بازدهی از هر واحد آب مصرفی است. این مفهوم از سطح سلولی تا مقیاس حوضه آبریز قابل بررسی است و بسته به هدف مطالعه، می‌تواند به صورت زیستی (نسبت فتوسنتز به تعرق)، زراعی (نسبت عملکرد محصول به مقدار آب مصرفی)، یا اقتصادی (نسبت ارزش اقتصادی تولید به حجم آب مصرفی) تعریف شود. بدین ترتیب، بهره‌وری آب نه تنها شاخصی برای سنجش کارایی مصرف منابع آبی است، بلکه معیاری کلیدی در جهت تحقق توسعه پایدار و امنیت غذایی نیز به شمار می‌رود (Zhang et al., 2001). از دیدگاه نظری، بهره‌وری مصرف آب حاصل تعامل میان عرضه و تقاضای آب، وضعیت اقلیمی، ویژگی‌های خاک، نوع گیاه، و الگوهای مدیریتی و فناورانه است. در سیستم‌های کشاورزی، مقدار آب مصرفی تابعی از بارش مؤثر، تبخیر-تعرق بالقوه، و کارایی سامانه‌های آبیاری است. در مقابل، عملکرد گیاه متأثر از عواملی چون خصوصیات ژنتیکی، حاصلخیزی خاک، و استراتژی‌های مدیریت زراعی است. بنابراین، WUE یک متغیر ایستا نیست بلکه در بستر زمانی و مکانی دچار نوسان می‌شود و پاسخ آن به تغییر شرایط اقلیمی یا مدیریتی می‌تواند غیرخطی و پیچیده باشد (Sinclair et al., 2012).

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی با تغییر الگوهای دما، بارش و رطوبت، بر اجزای مؤثر بر بهره‌وری آب اثرات عمیقی بر جای گذاشته است. افزایش دما سبب افزایش تبخیر و تعرق، تسریع رشد گیاه و در نتیجه کوتاه‌تر شدن دوره رشد می‌شود، که می‌تواند به کاهش عملکرد یا تغییر زمان نیاز آبی منجر گردد. شایان ذکر است که این کاهش عملکرد عمدتاً زمانی رخ می‌دهد که افزایش دما از محدوده بهینه گیاه فراتر رود (مانند دماهای بسیار بالا در فازهای حساس رشد) یا هنگامی که تبخیر-تعرق افزایش یافته، به تنش آبی شدید منجر شود. در

1 Data-Driven Approaches

2 Water Use Efficiency

محدوده بهینه، افزایش دما می‌تواند رشد را تسریع و عملکرد را بهبود بخشد. کاهش یا نوسان بارش، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، موجب افت آب در دسترس خاک و کاهش کارایی سامانه‌های آبیاری می‌شود. هم‌زمان، افزایش احتمال وقوع خشکسالی‌های متوالی و رخداد‌های حدی، ناپایداری در منابع آب سطحی و زیرزمینی را تشدید کرده و پیش‌بینی رفتار سامانه‌های آبی را دشوارتر ساخته است (Howell, 2001). در چنین شرایطی، ارتقای بهره‌وری آب مستلزم شناخت دقیق پویایی‌های اقلیمی و روابط پیچیده بین اجزای مختلف سامانه است. اما روش‌های کلاسیک که عمدتاً بر معادلات فیزیکی، مدل‌های آماری خطی یا رویکردهای تجربی متکی‌اند، در مواجهه با روابط غیرخطی، داده‌های ناقص و تغییرات زمانی شدید، با محدودیت روبه‌رو هستند. از سوی دیگر، مدل‌های فیزیکی هرچند ساختارمندی علمی دارند، اما پارامترسازی آن‌ها نیازمند داده‌های پرشمار و دقیق است که در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، در دسترس نیست (Huang et al., 2025).

در پاسخ به این محدودیت‌ها، مطالعات اخیر پیشنهاد کرده‌اند که بهره‌گیری از رویکردهای داده‌محور می‌تواند به درک بهتر الگوهای حاکم بر تغییرات WUE در شرایط اقلیمی متغیر کمک کند. این رویکردها قادرند از داده‌های بلندمدت اقلیمی، زراعی، هیدرولوژیکی و حتی ماهواره‌ای برای شناسایی روابط پنهان، مدل‌سازی رفتار غیرخطی و پیش‌بینی روندهای آینده استفاده کنند. در این چارچوب، داده به‌عنوان منبع اصلی شناخت جایگزین مدل‌های مبتنی بر فرضیات از پیش تعیین‌شده می‌شود و الگوریتم‌ها می‌کوشند تا الگوهای واقعی موجود در داده را آشکار سازند (Hoover et al., 2023; Zhang et al., 2015; Parra-López et al., 2025).

از منظر مفهومی، بهره‌وری مصرف آب در شرایط تغییر اقلیم را می‌توان در قالب یک سامانه پویا در نظر گرفت که در آن متغیرهای اقلیمی (مانند دما، بارش، تابش خورشیدی و تبخیر-تعرق)، ویژگی‌های فیزیکی (مانند بافت و رطوبت خاک)، و متغیرهای مدیریتی (مانند الگوی کشت، زمان آبیاری و نوع سامانه آبیاری) در تعامل مداوم‌اند. هرگونه تغییر در یکی از این اجزا می‌تواند کل سامانه را تحت تأثیر قرار دهد. در نتیجه، تحلیل و بهینه‌سازی این سامانه‌ها نیازمند ابزارهایی است که بتوانند پویایی‌ها و برهم‌کنش‌های چندمتغیره را درک کنند؛ و در این زمینه، روش‌های داده‌محور نقش مهمی ایفا می‌کنند (Bwambale et al., 2023). بدین ترتیب می‌توان بیان کرد که بهره‌وری مصرف آب تحت تأثیر مستقیم و غیرمستقیم تغییرات اقلیمی قرار دارد و این اثرات را می‌توان از طریق مدل‌های داده‌محور شناسایی، تبیین و پیش‌بینی کرد. در این راستا، رویکردهای داده‌محور نه تنها ابزاری برای تحلیل روابط غیرخطی هستند، بلکه بستری برای تلفیق داده‌های چندمنبعی و ارائه بینش‌های جدید برای مدیریت پایدار منابع آب به شمار می‌آیند. در بخش بعد، به‌طور دقیق‌تر به معرفی و تحلیل نقش رویکردهای داده‌محور در مدیریت منابع آب پرداخته می‌شود. درک درست از پویایی بهره‌وری مصرف آب، نیازمند بهره‌گیری از ابزارهایی است که بتوانند تعاملات غیرخطی و چندبعدی میان متغیرهای اقلیمی، خاک و پوشش گیاهی را به‌صورت دقیق تحلیل کنند. در این راستا، رویکردهای داده‌محور نقش بسزایی در بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی دارند (Zeynoddin et al., 2023).

در شرایط اقلیم پایدار، تخمین WUE عمدتاً بر اساس میانگین‌های بلندمدت داده‌های اقلیمی صورت می‌گرفت. اما تغییرات اقلیمی این فرض پایداری را باطل کرده است. نوسانات لحظه‌ای و افزایش رویدادهای حدی (مانند موج‌های گرما یا بارش‌های سیل‌آسا) موجب شده که تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) به شدت از مقادیر پیش‌بینی‌شده منحرف شود. این عدم قطعیت بالا در پارامترهای اصلی، کارایی مدل‌های فیزیکی و سنتی را به شدت کاهش داده و نشان‌دهنده ضرورت حیاتی استفاده از ابزارهای داده‌محور و تطبیق‌پذیر برای پایش و مدیریت بلادرنگ WUE است (Wang et al., 2023).

نقش رویکردهای داده‌محور در مدیریت منابع آب (تمرکز بر اهمیت عمومی و سه‌سطح تحلیل)

تحولات فناورانه در حوزه علم داده، سنجش از دور، و پردازش رایانه‌ای، زمینه‌ساز ظهور نسل جدیدی از ابزارها برای تحلیل و مدیریت منابع آب شده‌اند. رویکردهای داده‌محور با تکیه بر تحلیل حجم عظیمی از داده‌های تاریخی، اقلیمی، هیدرولوژیکی و کشاورزی، این امکان را فراهم کرده‌اند که رفتار سامانه‌های پیچیده آب و خاک بدون اتکا کامل به مدل‌های فیزیکی، شناسایی و پیش‌بینی شود. در این رویکرد، داده‌ها نه تنها ورودی مدل بلکه محور اصلی شناخت هستند و الگوهای پنهان میان متغیرها از دل داده‌ها استخراج می‌شود (Shortridge et al., 2016).

در مقایسه با روش‌های کلاسیک مبتنی بر معادلات فیزیکی یا مدل‌های مفهومی، روش‌های داده‌محور چند ویژگی اساسی دارند. نخست، توانایی در شناسایی روابط غیرخطی میان متغیرهاست؛ روابطی که در سامانه‌های هیدرولوژیکی و اقلیمی به‌صورت ذاتی وجود دارند و اغلب



از طریق مدل‌های آماری خطی قابل‌نمایش نیستند. دوم، انعطاف‌پذیری بالا در مواجهه با داده‌های ناقص، نویزی یا ناهمگن است که در دنیای واقعی بسیار رایج‌اند. سوم، این روش‌ها می‌توانند به‌صورت خودکار، الگوهای زمانی و مکانی پیچیده را بیاموزند و بدون نیاز به فرضیات سخت‌گیرانه درباره ساختار سامانه، پیش‌بینی‌های قابل‌اعتمادی ارائه دهند (Mosavi et al., 2018).

در حوزه مدیریت منابع آب، کاربرد رویکردهای داده‌محور گستره وسیعی را شامل می‌شود؛ از پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها و ذخیره سدها، برآورد تبخیر-تعرق و رطوبت خاک، پایش خشکسالی و تحلیل کیفیت آب گرفته تا بهینه‌سازی آبیاری و پیش‌بینی عملکرد محصولات زراعی. الگوریتم‌هایی چون شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM)، درخت‌های تصمیم (DT)، جنگل تصادفی (RF)، شبکه‌های یادگیری عمیق (DL)، و مدل‌های ترکیبی به‌طور گسترده در این زمینه‌ها به کار رفته‌اند (Zhao et al., 2024). در ارتباط با بهره‌وری مصرف آب، رویکردهای داده‌محور عمدتاً برای چهار هدف کلیدی استفاده شده‌اند:

(۱) پیش‌بینی نیاز آبی گیاه بر اساس داده‌های اقلیمی، خاک و پوشش گیاهی؛

(۲) برآورد و بهینه‌سازی تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی؛

(۳) تحلیل عملکرد و کارایی سامانه‌های آبیاری؛

(۴) ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر بهره‌وری آب در مقیاس‌های زمانی مختلف.

یکی از مزایای این رویکردها، قابلیت ادغام داده‌های چندمنبعی است. ترکیب داده‌های سنجش از دور، داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، داده‌های زراعی و داده‌های مدیریت مزرعه، تصویری جامع از وضعیت مصرف آب فراهم می‌کند. این رویکرد چندمنظوره باعث می‌شود که تصمیم‌گیری‌ها در سطح مزرعه یا حوضه آبریز، بر پایه شواهد داده‌محور و نه صرفاً بر اساس میانگین‌های اقلیمی یا تجربیات گذشته انجام شود (Al Naggar et al., 2025).

به‌عنوان مثال، در سامانه‌های آبیاری هوشمند، مدل‌های یادگیری ماشین با تحلیل داده‌های دما، تابش خورشیدی، رطوبت خاک و رشد گیاه، می‌توانند زمان و میزان بهینه آبیاری را تعیین کنند و از هدررفت آب جلوگیری نمایند. همچنین، در مقیاس منطقه‌ای، مدل‌های داده‌محور با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، نقشه‌های مکانی بهره‌وری آب را ترسیم کرده و مناطق بحرانی یا کم‌بازده را شناسایی می‌کنند. این اطلاعات می‌تواند برای تخصیص بهینه منابع آبی و برنامه‌ریزی کشاورزی پایدار مورد استفاده قرار گیرد. در عین حال، باید توجه داشت که استفاده از رویکردهای داده‌محور بدون درک علمی از فرایندهای فیزیکی می‌تواند منجر به تفسیر نادرست نتایج شود. به همین دلیل، امروزه رویکردهای ترکیبی که در آن‌ها مدل‌های داده‌محور با مدل‌های فیزیکی یا فرآیندی تلفیق می‌شوند، اهمیت فزاینده‌ای یافته‌اند. این رویکردها با بهره‌گیری از توان محاسباتی مدل‌های داده‌محور در کنار بنیان علمی مدل‌های فیزیکی، امکان تحلیل دقیق‌تر، تبیین‌پذیرتر و قابل اعتمادتر را فراهم می‌سازند (Hammouch et al., 2024).

به‌طور کلی، نقش رویکردهای داده‌محور در مدیریت منابع آب را می‌توان در سه سطح اصلی خلاصه کرد:

(۱) سطح توصیفی - استخراج الگوهای موجود از داده‌ها برای شناخت وضعیت فعلی سامانه‌های آبی.

(۲) سطح پیش‌بینی - استفاده از مدل‌ها برای پیش‌بینی متغیرهایی مانند تبخیر-تعرق، رطوبت خاک یا بهره‌وری آب تحت سناریوهای اقلیمی مختلف.

(۳) سطح تصمیم‌سازی و بهینه‌سازی - ارائه پیشنهادی کمی برای تخصیص منابع، طراحی آبیاری یا سیاست‌گذاری سازگار با اقلیم.

در راستای تبادل و بسط دانش داخلی در زمینه کاربرد فناوری‌های نوین داده‌محور در مدیریت آب، مطالعه مروری دلباز و ابراهیمیان (۱۴۰۳) نیز حائز اهمیت است. این پژوهش با هدف ارائه تعریفی جامع از علم داده و بررسی مطالعات انجام‌شده، به کاربرد علم داده و یادگیری ماشین در علوم و مهندسی آب در بستر کشاورزی پرداخته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدیریت آب در کشاورزی، حدود ۱۰ درصد از کل مطالعات انجام شده در حوزه علم داده در بخش کشاورزی را به خود اختصاص داده است. از لحاظ سهم ملی، در بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰، ایران سهم قابل توجه ۵/۶۲ درصدی از کل مطالعات انجام شده در این حوزه را دارا بوده است، که نشان‌دهنده فعالیت بالای پژوهشگران داخلی است. تمرکز پژوهشگران داخلی نیز عمدتاً بر موضوعاتی نظیر تعیین تبخیر-تعرق گیاه، پیش‌بینی عملکرد

محصولات و تعیین کیفیت آب متمرکز بوده است. با این حال، نویسندگان بر نوظهور بودن این فناوری، وجود خلاءهای مطالعاتی و چالش‌های اجرایی و پیاده‌سازی آن تأکید کرده‌اند و ضرورت همکاری میان سیاستمداران، محققین و کشاورزان را برای استفاده بهینه از مزایای علم داده مطرح ساخته‌اند. بنابراین، رویکردهای داده‌محور نه تنها ابزار تحلیلی جدیدی برای درک روابط پیچیده میان اقلیم و بهره‌وری آب هستند، بلکه به‌عنوان پل ارتباطی میان علم، فناوری و سیاست‌گذاری عمل می‌کنند. در بخش بعد، انواع این مدل‌ها و الگوریتم‌های داده‌محور، به تفکیک رویکرد و حوزه کاربرد، به‌صورت نظام‌مند طبقه‌بندی و مقایسه خواهند شد. آنچنان که بیان شد، رویکردهای داده‌محور زمینه‌ساز تحولات بنیادین در درک و مدیریت منابع آب هستند. با این حال، در چارچوب مقاله حاضر، تمرکز اصلی بر روی قابلیت‌های این ابزارها در ارتقاء شاخص حیاتی بهره‌وری مصرف آب است. از این رو، بخش آتی به طور عمیق‌تر به مکانیسم‌های عملیاتی (مانند انواع الگوریتم‌ها و نحوه ادغام داده‌ها) که منجر به بهینه‌سازی تخصیص آب در شرایط ناپایدار اقلیمی می‌شوند، خواهد پرداخت.

رویکردهای داده‌محور: سازوکارها و مزایای متمرکز بر بهینه‌سازی بهره‌وری مصرف آب

تحولات سریع اقلیمی و افزایش پیچیدگی در سامانه‌های هیدرولوژیکی، ضرورت استفاده از ابزارهای نوین و هوشمند را در مدیریت منابع آب دوچندان کرده است. در گذشته، تصمیم‌گیری‌ها عمدتاً بر پایه مدل‌های فیزیکی یا آماری کلاسیک انجام می‌شد که نیازمند داده‌های محدود و ساختارهای ساده بودند. با این حال، پویایی‌های اقلیمی، ناهمگنی فضایی و زمانی داده‌ها و تأثیر متقابل عوامل انسانی و طبیعی، باعث شدند که این مدل‌های سنتی در تبیین رفتار واقعی سامانه‌های آبی با محدودیت مواجه باشند. در این میان، رویکردهای داده‌محور با تکیه بر قدرت تحلیل کلان‌داده‌ها و توانایی درک روابط غیرخطی میان متغیرهای گوناگون، به عنوان رویکردی کارآمد و آینده‌نگر در مدیریت منابع آب مطرح شده‌اند (Sharma et al., 2023). رویکردهای داده‌محور بر مبنای استخراج دانش از داده‌ها و یادگیری الگوهای پنهان از میان مجموعه‌های بزرگ و متنوع اطلاعات عمل می‌کنند. این اطلاعات می‌توانند شامل داده‌های اقلیمی (دما، بارش، رطوبت، تبخیر-تعرق)، داده‌های خاک و پوشش گیاهی، داده‌های سنجش‌ازدور (ماهواره‌ای)، و حتی داده‌های حاصل از حسگرهای اینترنت اشیا (IoT) باشند. در واقع، ظهور فناوری‌های نوین جمع‌آوری و انتقال داده موجب شده است که پژوهشگران و مدیران آب بتوانند در مقیاس‌های زمانی و مکانی بسیار دقیق‌تر، به تحلیل رفتار سامانه‌های آبی بپردازند (Zhao et al., 2023). در مدیریت منابع آب، یکی از چالش‌های اساسی، وجود عدم قطعیت بالا در داده‌ها و فرآیندهای تصمیم‌گیری است. تغییرات اقلیمی، نوسانات بارش، خطاهای اندازه‌گیری، و تأثیر متغیرهای انسانی بر مصرف و تخصیص آب، همگی موجب می‌شوند که پیش‌بینی و برنامه‌ریزی در این حوزه با دشواری همراه باشد. رویکردهای داده‌محور با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، می‌توانند این عدم قطعیت‌ها را کاهش داده و با شناسایی الگوهای رفتاری در داده‌های تاریخی، پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از متغیرهایی مانند تبخیر و تعرق، رطوبت خاک، یا بهره‌وری آب ارائه دهند (Ahmed et al., 2024).

به طور کلی، رویکردهای داده‌محور سه سطح اصلی از تحلیل را در مدیریت منابع آب پوشش می‌دهند:

توصیفی^۱

در این مرحله، داده‌های موجود گردآوری، پاک‌سازی و تحلیل می‌شوند تا الگوها و روندهای تاریخی در رفتار منابع آب شناسایی گردد. این نوع تحلیل، به درک وضعیت موجود، شناخت مناطق بحرانی از نظر مصرف آب، و بررسی اثرات گذشته تغییرات اقلیمی بر منابع آبی کمک می‌کند. به عنوان مثال، تحلیل سری‌های زمانی بلندمدت دما و بارش می‌تواند روند خشکسالی‌های منطقه‌ای را آشکار سازد (Kazemi, Garajeh et al., 2024).

پیش‌بینی^۲

این مرحله با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم، یا جنگل تصادفی انجام می‌شود. هدف، پیش‌بینی رفتار آینده سامانه‌ها بر اساس داده‌های گذشته است. به عنوان نمونه، مدل‌های پیش‌بینی تبخیر و تعرق یا نیاز آبی گیاه، می‌توانند در برنامه‌ریزی آبیاری و تخصیص بهینه آب نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشند (Amani et al., 2023).

1 Descriptive Analytics

2 Predictive Analytics

تحلیل تجویزی^۱

پیشرفته‌ترین سطح تحلیل داده‌محور است که هدف آن نه تنها پیش‌بینی، بلکه ارائه راهکارهای بهینه برای تصمیم‌گیری است. در این مرحله، مدل‌های هوشمند می‌توانند بر اساس داده‌های لحظه‌ای از خاک، اقلیم و گیاه، تصمیم‌هایی چون میزان، زمان و شیوه آبیاری را به‌طور خودکار پیشنهاد دهند. به عنوان مثال، سامانه‌های آبیاری هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی قادرند مصرف آب را در مزارع تا حد قابل توجهی کاهش داده و در عین حال عملکرد محصول را حفظ کنند (Wei et al., 2024).

ترکیب داده‌های اقلیمی با مدل‌های داده‌محور، امکان شبیه‌سازی دقیق اثرات تغییرات اقلیم بر بهره‌وری مصرف آب را در مقیاس‌های مختلف فراهم کرده است. مدل‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی کانولوشنی^۲ (CNN) و شبکه‌های بازگشتی^۳ (RNN) در شناسایی الگوهای زمانی و مکانی پدیده‌هایی چون خشکسالی، جریان سطحی یا تغییرات رطوبت خاک بسیار موفق عمل کرده‌اند. همچنین، مدل‌های ترکیبی که از تلفیق الگوریتم‌های یادگیری ماشین با مدل‌های فیزیکی به‌وجود آمده‌اند، با بهره‌گیری از مزایای هر دو رویکرد، توانسته‌اند دقت پیش‌بینی و قابلیت تصمیم‌پذیری مدل‌ها را به‌طور چشمگیری افزایش دهند (Shen et al., 2021).

به‌کارگیری این رویکردها در سامانه‌های مدیریتی آب، مزایای متعددی به همراه دارد. از جمله می‌توان به افزایش کارایی در تخصیص منابع آبی، کاهش هدررفت و نشت، بهینه‌سازی برنامه‌های آبیاری، پیش‌بینی و مدیریت خشکسالی‌ها، و ارتقای تاب‌آوری اکوسیستم‌های کشاورزی و شهری اشاره کرد. افزون بر این، رویکردهای داده‌محور می‌توانند با ترکیب داده‌های چندمنبعی و ایجاد چارچوب‌های تصمیم‌گیری هوشمند، امکان ارزیابی سناریوهای مختلف اقلیمی و مدیریتی را برای آینده فراهم کنند. با این وجود، چالش‌هایی همچنان وجود دارند. کیفیت پایین داده‌ها، عدم دسترسی به داده‌های بلندمدت، ناهمگنی در قالب‌های داده‌ای، و کمبود زیرساخت‌های محاسباتی، از مهم‌ترین موانع در پیاده‌سازی گسترده این رویکردها به شمار می‌روند. همچنین، تفسیرپذیری مدل‌های پیچیده یادگیری عمیق هنوز یکی از دغدغه‌های اصلی محققان است، چرا که در تصمیم‌گیری‌های کلان مرتبط با منابع آب، شفافیت در منطق مدل اهمیت زیادی دارد (Eggimann et al., 2017). علاوه بر چالش‌های فنی نظیر کیفیت داده و تفسیرپذیری، موانع حیاتی دیگری نیز در مسیر پیاده‌سازی گسترده‌ی این رویکردهای هوشمند وجود دارد. از جمله این موانع می‌توان به هزینه‌های اولیه بالا برای نصب و نگهداری زیرساخت‌های لازم (حسگرها و سخت‌افزارهای محاسباتی) اشاره کرد که برای کشاورزان خرد و متوسط ممکن است مقرون‌به‌صرفه نباشد. همچنین، نیاز به تربیت نیروی انسانی متخصص در زمینه علم داده کشاورزی و مهندسی آب، یک چالش اساسی دیگر است که موفقیت سامانه‌های آبیاری هوشمند را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نهایت، ملاحظات اخلاقی و حاکمیتی مرتبط با مالکیت داده‌های کشاورزی، شفافیت الگوریتم‌های تصمیم‌گیرنده، و تأثیرات اجتماعی اتوماسیون بر اشتغال، موضوعاتی هستند که باید در سطح سیاست‌گذاری مورد توجه جدی قرار گیرند تا اطمینان حاصل شود که فناوری‌های داده‌محور، منجر به افزایش عدالت در دسترسی به منابع آب و تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی برای همه‌ی ذینفعان شوند (Jaiswal et al., 2025).

در مجموع، رویکردهای داده‌محور فرصتی بی‌سابقه برای تحول در مدیریت منابع آب فراهم کرده‌اند. این رویکردها با بهره‌گیری از داده‌های گسترده و متنوع، می‌توانند تصمیم‌گیری‌ها را از سطح توصیفی به سطح هوشمند و تطبیقی ارتقا دهند و راه را برای دستیابی به مدیریت یکپارچه، کارآمد و تاب‌آور منابع آب در عصر تغییرات اقلیمی هموار سازند (Ahmed et al., 2023). با توجه به کاربردهای گسترده رویکردهای داده‌محور در تحلیل و مدیریت منابع آب، لازم است مدل‌های مورد استفاده در این حوزه به‌صورت نظام‌مند معرفی و مقایسه شوند. بخش بعد به این موضوع می‌پردازد.

مزایای کاربردی یادگیری ماشین نسبت به روش‌های کلاسیک

گرچه روش‌های کلاسیک مبتنی بر مدل‌های فیزیکی یا آماری نقش مهمی در تحلیل سامانه‌های آب و خاک داشته‌اند، اما در شرایط متغیر اقلیمی با چندین محدودیت بنیادین مواجه‌اند. این مدل‌ها غالباً توان بازنمایی روابط غیرخطی، سازگاری با داده‌های نویزی و ناهمگون، و تحلیل تغییرات زمانی-مکانی سریع را ندارند. در مقابل، رویکردهای یادگیری ماشین مجموعه‌ای از مزایای عملی و قابل اندازه‌گیری ارائه می‌دهند که نتایج حاصل از آن‌ها به شکل چشمگیری با خروجی روش‌های سنتی تفاوت دارد (Mosavi et al., 2019; Amani & Shafizadeh-Moghadam, 2023; Fu et al., 2024). جدول (۱)، جمع‌بندی دقیق این تفاوت‌ها را ارائه می‌کند.

جدول ۱- مقایسه مزایای کاربردی رویکردهای یادگیری ماشین نسبت به روش‌های کلاسیک

شماره	مزیت	کاربرد و تفاوت با روش‌های کلاسیک	مرجع
۱	شناسایی روابط غیرخطی و پیچیده	مدل‌های ML قادرند ارتباطات چندبعدی و غیرخطی بین اقلیم، خاک، پوشش گیاهی و مدیریت را استخراج کنند؛ امری که مدل‌های کلاسیک معمولاً از طریق روابط خطی یا فرضیات ساده‌کننده قادر به نمایش آن نیستند.	Mosavi et al., (2019); Sharma et al., (2023)
۲	افزایش دقت پیش‌بینی تحت تغییر اقلیم	ML با استفاده از داده‌های بزرگ و لحظه‌ای (IoT)، سنجش‌ازدور) دقت برآورد تبخیر-تعرق، رطوبت خاک و WUE را افزایش می‌دهد؛ در حالی که مدل‌های سنتی در شرایط ناپایدار اقلیمی دچار کاهش دقت می‌شوند.	Amani & Shafizadeh-Moghadam (2023); Workneh et al., (2025)
۳	قابلیت ادغام داده‌های چندمنبعی (Multi-source Fusion)	ML می‌تواند داده‌های اقلیمی، خاکی، مدیریتی، ماهواره‌ای و سنسوری را به‌صورت یکپارچه پردازش کند؛ درحالی که مدل‌های فیزیکی معمولاً محدود به ورودی‌های مشخص و ساده‌سازی‌شده‌اند.	Jiang et al., (2021); Fu et al., (2024)
۴	تصمیم‌گیری لحظه‌ای و کاربرد در آبیاری هوشمند	ML قادر است میزان و زمان بهینه آبیاری را در لحظه پیشنهاد دهد؛ چیزی که در مدل‌های کلاسیک که خروجی‌های ثابت و مبتنی بر سناریو دارند، ممکن نیست.	Del-Coco et al., (2024); Goap et al., (2018)
۵	سازگاری و یادگیری مستمر با داده‌های جدید	مدل‌های سنتی پس از کالیبراسیون ثابت می‌مانند، اما ML با ورود داده‌های جدید به‌روزرسانی شده و با تغییرات اقلیمی سازگار می‌شود.	Duan et al., (2023); Li et al., (2024)
۶	کاهش عدم قطعیت و بهبود پایداری پیش‌بینی	ML با تحلیل الگوهای واقعی داده و حذف نویز، عدم قطعیت ناشی از نوسانات آب‌وهوا را کاهش داده و پیش‌بینی‌های قوی‌تری ارائه می‌دهد.	Zhao et al., (2025); Kazemi Garajeh et al., (2024)
۷	کاربردپذیری بالا در محیط‌های فاقد داده کامل	مدل‌های ترکیبی یا سبک ML/Fusion حتی با داده‌های ناقص نیز قابل کاربردند؛ درحالی که مدل‌های کلاسیک به‌شدت به داده‌های کامل و دقیق نیاز دارند.	Dehghanisanij et al., (2022); Sami et al., (2022)
۸	توان شبیه‌سازی فرآیندها بدون نیاز به معادلات پیچیده	در ML، رفتار سیستم از دل داده استخراج می‌شود و نیاز به مدل‌سازی پیچیده فیزیکی (که زمان‌بر و داده‌محور است) کاهش می‌یابد.	Hammouch et al., (2024); Eggmann et al., (2017)

دسته‌بندی و مقایسه مدل‌های داده‌محور در مدیریت بهره‌وری مصرف آب

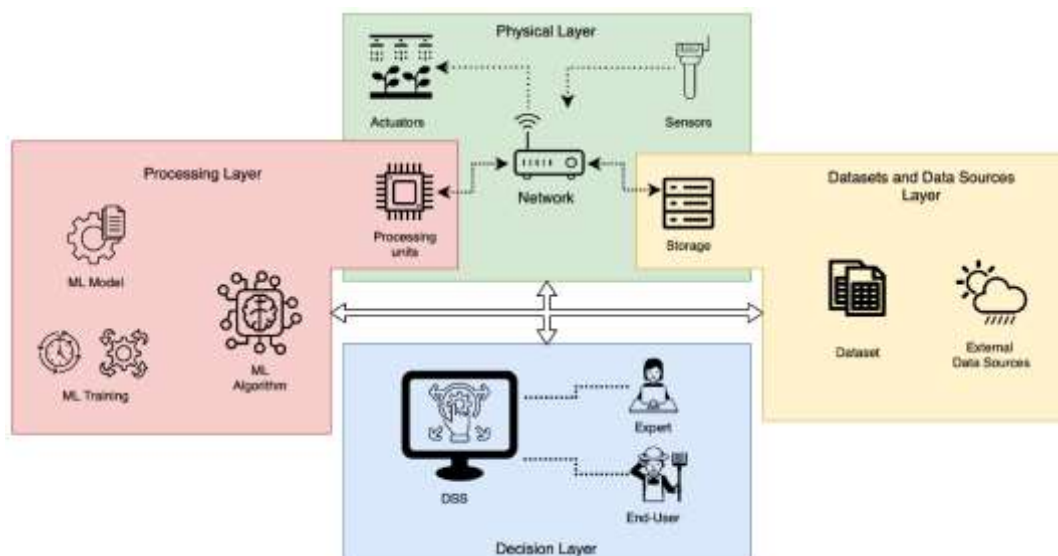
با توجه به پیچیدگی فزاینده سامانه‌های هیدرولوژیکی و تأثیرات گسترده تغییرات اقلیمی بر منابع آب، استفاده از مدل‌های داده‌محور به یک رویکرد کلیدی در تحلیل و مدیریت بهره‌وری مصرف آب تبدیل شده است. این مدل‌ها بر اساس ساختار الگوریتمی و توانایی پردازشی، به سه دسته اصلی مدل‌های یادگیری ماشین کلاسیک، مدل‌های یادگیری عمیق و مدل‌های ترکیبی تقسیم می‌شوند. هر یک از این دسته‌ها با توجه به حجم داده‌ها، هدف پژوهش، پیچیدگی سامانه و منابع محاسباتی، دارای کاربردها، مزایا و محدودیت‌های متفاوتی هستند. در ادامه، هر یک به تفصیل توضیح داده شده است.

مدل‌های یادگیری ماشین کلاسیک

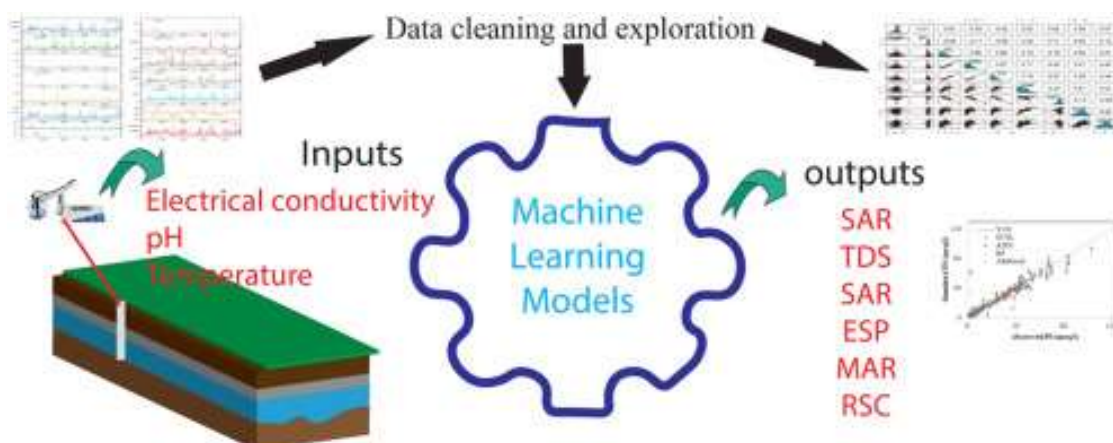
مدل‌های یادگیری ماشین کلاسیک مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها و روش‌های تحلیلی هستند که بر پایه اصول آماری و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده طراحی شده‌اند و قادرند روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرها را شناسایی و تحلیل کنند. این مدل‌ها شامل الگوریتم‌هایی همچون درخت تصمیم، جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، انواع رگرسیون‌های پیشرفته و برخی روش‌های مبتنی بر خوشه‌بندی می‌شوند و کاربرد گسترده‌ای در حوزه‌های مختلف علمی و مهندسی، به‌ویژه در مدیریت منابع آب، پیش‌بینی بهره‌وری مصرف آب و تحلیل اثر عوامل محیطی و مدیریتی دارند (شکل ۱). قابلیت اصلی این مدل‌ها، توانایی استخراج الگوها و روابط میان متغیرهای متعدد و همزمان است که تحلیل‌های سنتی آماری قادر به ارائه آن‌ها نیستند. برای نمونه، الگوریتم جنگل تصادفی می‌تواند همزمان اثر متغیرهایی همچون دما، رطوبت، نوع خاک و الگوی کشت را بر بهره‌وری آب مورد بررسی قرار دهد و سهم هر یک از این عوامل را در تغییرات بهره‌وری تعیین کند، امری که در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی برای تخصیص بهینه منابع آب اهمیت بالایی دارد (Manny et al. 2023).

یکی از مزایای مهم این مدل‌ها تحلیل اهمیت ویژگی‌ها است که امکان تعیین مؤثرترین عوامل بر یک متغیر هدف را فراهم می‌کند. این ویژگی به‌ویژه در زمینه مدیریت منابع محدود، مانند آب در مناطق کشاورزی و شهری، اهمیت فراوانی دارد، زیرا مدیران می‌توانند منابع و تلاش‌های خود را بر شاخص‌ترین عوامل متمرکز کنند و تصمیمات بهینه‌تری اتخاذ نمایند. علاوه بر این، مدل‌های یادگیری ماشین کلاسیک به لحاظ اجرایی نیز مزیت دارند؛ آن‌ها برای داده‌های متوسط تا بزرگ به منابع محاسباتی نسبتاً کمی نیاز دارند و زمان آموزش

آن‌ها نسبت به مدل‌های پیچیده‌تر، مانند شبکه‌های عصبی عمیق، کوتاه‌تر است. این ویژگی موجب می‌شود که این مدل‌ها علاوه بر قابل قبول، از نظر عملیاتی نیز قابل دسترس و اقتصادی باشند (Li et al., 2022). مقایسه‌ای کامل از مزایا، معایب و الزامات اجرایی این مدل‌ها نسبت به رویکردهای یادگیری عمیق و ترکیبی در شکل (۲) ارائه شده است. با این حال، این مدل‌ها محدودیت‌هایی نیز دارند که باید در تحلیل و تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به کاهش دقت در مواجهه با داده‌های بسیار حجیم یا سری‌های زمانی بلندمدت اشاره کرد؛ در چنین شرایطی، توانایی مدل در شناسایی روابط پیچیده مکانی و زمانی کاهش می‌یابد و پیش‌بینی‌ها ممکن است کمتر قابل اعتماد باشند. علاوه بر این، عملکرد مدل‌های کلاسیک به شدت وابسته به فرآیند پیش‌پردازش داده‌ها، انتخاب ویژگی‌ها و تنظیم پارامترها است و هرگونه خطا یا بی‌دقتی در این مراحل می‌تواند نتایج تحلیلی را تحت تأثیر قرار دهد و دقت پیش‌بینی‌ها را کاهش دهد. همچنین، اگرچه تحلیل اهمیت ویژگی‌ها امکان تفسیر نسبی مدل را فراهم می‌کند، روابط دقیق و چندبعدی میان متغیرها همیشه به‌سادگی قابل تبیین نیستند، به‌ویژه زمانی که داده‌ها پیچیده و غیرخطی باشند (Shen et al., 2021). این محدودیت باعث می‌شود که تفسیر دقیق نتایج برای کاربران غیرمتخصص دشوار شده و نیازمند تجربه و دانش کافی در زمینه یادگیری ماشین و تحلیل داده‌ها باشد. به طور کلی، مدل‌های یادگیری ماشین کلاسیک ابزارهایی قدرتمند برای تحلیل داده‌های پیچیده و پیش‌بینی روندهای آتی هستند و با وجود محدودیت‌های ذکر شده، به دلیل سادگی نسبی، سرعت اجرا، قابلیت تحلیل اهمیت ویژگی‌ها و توانایی شناسایی روابط غیرخطی، همچنان یکی از گزینه‌های مناسب و پرکاربرد در مطالعات علمی و کاربردی به‌ویژه در مدیریت منابع آب محسوب می‌شوند. به‌ویژه در شرایطی که داده‌ها با حجم متوسط و پیچیدگی قابل کنترل هستند، این مدل‌ها می‌توانند نتایج دقیق و قابل اعتمادی ارائه دهند و به تصمیم‌گیری‌های بهینه در حوزه‌های محیطی و مدیریتی کمک کنند.



شکل ۱. استفاده از یادگیری ماشین برای آبیاری هوشمند (Del-Coco et al., 2024)



شکل ۲. پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای آبیاری

مدل‌های یادگیری عمیق

مدل‌های یادگیری عمیق شامل مجموعه‌ای از شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشرفته هستند که معماری آن‌ها بر پایه چندین لایه پنهان طراحی شده است. این شبکه‌ها، مانند شبکه‌های عصبی چندلایه^۱ (MLP)، شبکه‌های عصبی کانولوشنی، شبکه‌های عصبی بازگشتی از جمله RNN و LSTM و سایر ساختارهای پیشرفته، توانایی شناسایی و استخراج ویژگی‌های پنهان و روابط غیرخطی پیچیده موجود در داده‌ها را دارند. برخلاف مدل‌های کلاسیک یادگیری ماشین، مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند بدون نیاز به انتخاب دقیق ویژگی‌ها توسط کاربر، الگوهای رفتاری سیستم‌ها و روابط پیچیده بین متغیرها را خودکار یاد بگیرند. این قابلیت باعث می‌شود که مدل‌های یادگیری عمیق به ویژه در تحلیل داده‌های بزرگ، متنوع و پیچیده بسیار مؤثر باشند (LeCun et al., 2015). برای درک بهتر قابلیت‌های این مدل‌ها، بررسی نمونه‌هایی از شبکه‌های مختلف و کاربردهای آن‌ها در مسائل واقعی مفید است. یکی از ویژگی‌های برجسته مدل‌های یادگیری عمیق، توانایی یادگیری خودکار ویژگی‌ها از داده‌هاست؛ به این معنا که این مدل‌ها بدون نیاز به پیش‌پردازش پیچیده یا انتخاب دستی متغیرهای مؤثر، قادر به استخراج مهم‌ترین ویژگی‌ها و الگوهای رفتاری سیستم‌ها هستند. این ویژگی امکان کاهش خطاهای انسانی در مرحله آماده‌سازی داده‌ها را فراهم می‌کند و دقت مدل را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، مدل‌های یادگیری عمیق توانایی بالایی در مدل‌سازی روابط زمانی و مکانی پیچیده دارند. به عنوان مثال، شبکه‌های RNN و LSTM برای تحلیل سری‌های زمانی بلندمدت و پیش‌بینی روندهای آتی در داده‌های محیطی و اقلیمی عملکرد قابل توجهی دارند، در حالی که شبکه‌های CNN برای تحلیل داده‌های مکانی و تصاویر ماهواره‌ای کاربرد گسترده‌ای دارند و قادرند الگوهای فضایی و ساختارهای پنهان در تصاویر را با دقت بالا شناسایی کنند (Hochreiter et al., 1997). با توجه به توانایی این شبکه‌ها در شناسایی الگوهای پیچیده، کاربرد آن‌ها در مدیریت منابع طبیعی، به ویژه منابع آب، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند.

در حوزه مدیریت منابع آب نیز، مدل‌های یادگیری عمیق مانند RNN، LSTM و CNN به دلیل ساختار چندلایه و توانایی بی‌نظیر در استخراج ویژگی‌های پنهان، ابزارهایی قدرتمند برای مدل‌سازی پدیده‌های غیرخطی و پویا محسوب می‌شوند و می‌توانند محدودیت مدل‌های سنتی را در مواجهه با تغییرات شدید اقلیمی، نوسانات تبخیر-تعرق و روندهای بلندمدت خشکسالی جبران کنند (Shah et al., 2024). کاربردهای مهم این مدل‌ها در مدیریت منابع آب (شامل پیش‌بینی جریان رودخانه، شاخص‌های خشکسالی و تولید نقشه‌های بهره‌وری آب) در شکل (۳) نشان داده شده است. برای افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و بهره‌گیری کامل از این قابلیت‌ها، ادغام و تحلیل داده‌های چندمنبعی یک ضرورت محسوب می‌شود.

مزیت دیگر مدل‌های یادگیری عمیق، امکان ادغام و تحلیل داده‌های چندمنبعی است. این قابلیت اجازه می‌دهد تا اطلاعات اقلیمی، ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی و داده‌های ماهواره‌ای به صورت همزمان مورد پردازش قرار گیرند و پیش‌بینی‌های دقیق و سطح‌بندی‌شده در مقیاس مزرعه یا حوضه آبریز ارائه شود. به بیان دیگر، مدل‌های DL قادرند پیچیدگی‌های چندبعدی داده‌ها را به شکل یکپارچه تحلیل کنند و خروجی‌هایی ارائه دهند که در مدل‌های کلاسیک با محدودیت مواجه هستند. کاربردهای مهم این مدل‌ها در مدیریت منابع آب شامل استفاده از LSTM برای تحلیل سری‌های زمانی بلندمدت و پیش‌بینی جریان رودخانه، ذخیره سد و شاخص‌های خشکسالی، و به‌کارگیری CNN برای تحلیل تصاویر سنجش‌ازدور و تولید نقشه‌های مکانی بهره‌وری آب است. همچنین این مدل‌ها زمینه‌ساز توسعه سامانه‌های آبیاری هوشمند هستند که با ادغام داده‌های لحظه‌ای حسگرهای زمینی، تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات هواشناسی، زمان و مقدار بهینه آبیاری را به صورت بلادرنگ تعیین کرده و کارایی مدیریت آب را در مقیاس مزرعه به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند (Ahmed et al., 2021). با وجود این مزایا، لازم است محدودیت‌ها و چالش‌های عملی استفاده از این مدل‌ها نیز مورد توجه قرار گیرد.

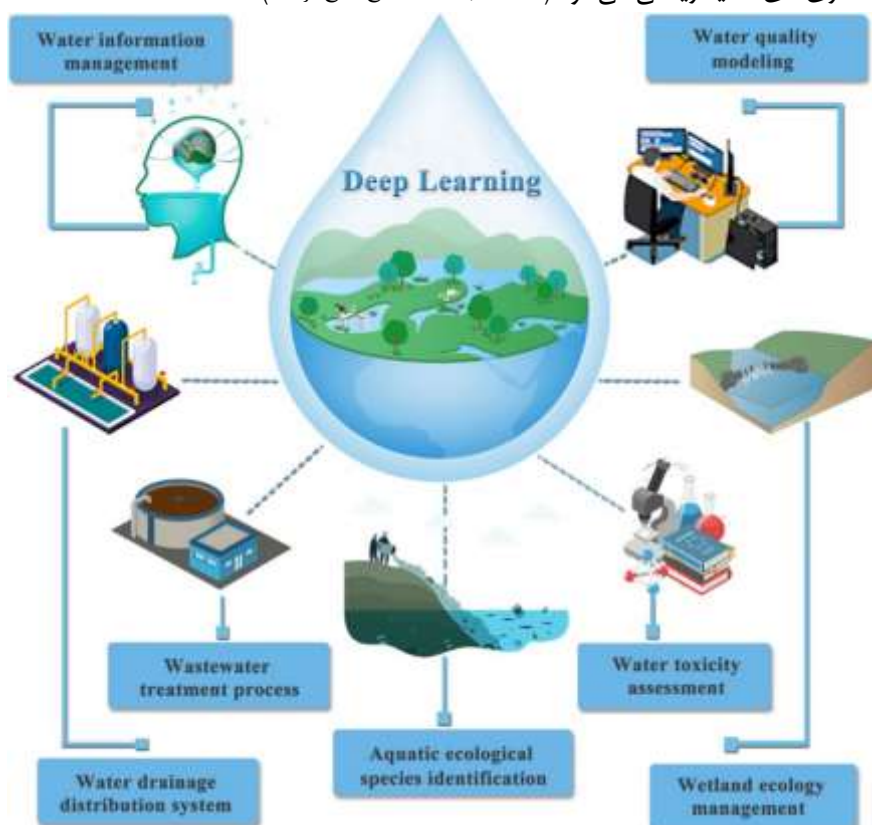
با وجود این مزایا، مدل‌های یادگیری عمیق محدودیت‌هایی نیز دارند که توجه به آن‌ها ضروری است. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، نیاز به حجم بسیار زیاد داده‌های آموزشی است؛ برای اینکه شبکه‌های عمیق بتوانند عملکرد قابل اعتماد و پایدار داشته باشند، باید با مجموعه داده‌های گسترده و متنوع آموزش داده شوند، در غیر این صورت مدل دچار Overfitting یا کاهش دقت می‌شود (Jiang et al., 2021). همچنین، فرآیند آموزش این شبکه‌ها به منابع محاسباتی قدرتمند و زمان طولانی نیاز دارد، زیرا هر لایه پنهان نیازمند محاسبات پیچیده برای بهینه‌سازی وزن‌ها و پارامترهاست. علاوه بر این، تفسیرپذیری مدل‌های یادگیری عمیق محدود است و اغلب به صورت یک جعبه سیاه^۲ عمل می‌کنند؛ به این معنا که تحلیل و توضیح دقیق دلیل پیش‌بینی‌ها و شناسایی رابطه علت و معلولی میان متغیرها دشوار

1 Multilayer Perceptron

2 Black Box

است و نیازمند ابزارهای جانبی و تکنیک‌های پیچیده برای تبیین نتایج می‌باشد. در زمینه مدیریت منابع آب، این محدودیت‌ها با چالش‌های عملی مشخصی همراه هستند که بر پذیرش و استفاده از مدل‌ها اثر می‌گذارند.

در زمینه مدیریت منابع آب، سه چالش اساسی شامل کمبود داده‌های بلندمدت و یکپارچه، نیاز به زیرساخت محاسباتی قدرتمند (مانند GPU) و مشکل تفسیرپذیری پایین وجود دارد که می‌تواند مانع پذیرش و اعتماد تصمیم‌گیرندگان به این مدل‌ها شود. از این رو، توسعه و استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی تفسیرپذیر (XAI) اهمیت فراوانی دارد. این ابزارها با ارائه توضیحاتی روشن از منطق مدل، شفافیت و اعتمادپذیری سامانه‌های هوشمند را افزایش داده و زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر در مدیریت منابع آب، تخصیص بهینه آب و سیاست‌گذاری‌های محیط‌زیستی می‌شوند (Başagaoglu et al., 2022). بنابراین، با ترکیب مدل‌های یادگیری عمیق و ابزارهای تفسیرپذیر، می‌توان هم دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش داد و هم اعتماد تصمیم‌گیرندگان را جلب کرد. به طور کلی، مدل‌های یادگیری عمیق ابزارهایی بسیار قدرتمند برای تحلیل داده‌های پیچیده، پیش‌بینی روندهای آبی و شناسایی الگوهای نهفته در سیستم‌های محیطی و مدیریتی هستند. با وجود مزایای متعدد، مدل‌های یادگیری عمیق محدودیت‌هایی نیز دارند که در حوزه مدیریت منابع آب نمود مشخصی پیدا می‌کنند؛ نیاز به داده‌های گسترده و متنوع برای پیش‌بینی دقیق جریان رودخانه، شاخص خشکسالی یا بهره‌وری آب، آموزش مدل‌های پیچیده بر روی داده‌های چندمنبعی شامل تصاویر سنجنده‌های دور، اطلاعات هواشناسی و داده‌های خاک که مستلزم منابع محاسباتی قدرتمند و هزینه‌بر است و تفسیرپذیری پایین مدل‌ها که توضیح روابط علت و معلولی بین متغیرها را دشوار می‌سازد. این محدودیت‌ها می‌توانند دقت مدل‌ها را کاهش دهند، هزینه پیاده‌سازی سامانه‌های هوشمند مدیریت آب را افزایش دهند و اعتماد تصمیم‌گیرندگان و سیاست‌گذاران را تحت تأثیر قرار دهند. در این زمینه، استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی تفسیرپذیر (XAI) اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا با ارائه توضیحاتی روشن از منطق مدل، شفافیت و اعتمادپذیری سامانه‌های هوشمند را افزایش داده و زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تر و قابل توجیه در تخصیص آب و سیاست‌گذاری‌های محیط‌زیستی می‌شود (Başagaoglu et al., 2022).



شکل ۳. استفاده از یادگیری عمیق در منابع آب (Fu et al., 2024)

مدل‌های ترکیبی

مدل‌های ترکیبی، که اغلب به‌عنوان ترکیبی از مدل‌های فیزیکی یا فرآیندی با مدل‌های داده‌محور یادگیری ماشین و یادگیری عمیق تعریف می‌شوند، امروزه نقش مهمی در بهبود دقت پیش‌بینی و قابلیت تعمیم‌پذیری مدل‌ها ایفا می‌کنند. این مدل‌ها با ادغام دو رویکرد

متمايز، يعنى دانش پایه‌ای و فیزیکی سیستم‌ها و توانایی مدل‌های داده‌محور در شناسایی الگوها و روابط پیچیده، امکان ارائه نتایج قابل تفسیر و دقیق را فراهم می‌آورند. به بیان دیگر، مدل‌های ترکیبی نه تنها قادرند رفتار پایه سامانه را شبیه‌سازی کنند، بلکه می‌توانند خطاها و عدم قطعیت‌های مرتبط با داده‌ها و محدودیت‌های مدل‌های فیزیکی را نیز تصحیح نمایند (Zhao et al., 2025). یکی از مزایای اصلی مدل‌های ترکیبی، توانایی آن‌ها در اصلاح خطاها و کاهش عدم قطعیت‌هاست. مدل‌های فیزیکی به‌خوبی می‌توانند فرآیندها و مکانیزم‌های پایه سامانه را شبیه‌سازی کنند، اما به دلیل پیچیدگی ذاتی سیستم‌ها و محدودیت داده‌ها، دقت پیش‌بینی آن‌ها ممکن است محدود باشد. مدل‌های داده‌محور مانند یادگیری ماشین و یادگیری عمیق قادرند این محدودیت‌ها را جبران کنند و با تحلیل داده‌ها، خطاهای پیش‌بینی مدل فیزیکی را اصلاح نمایند. به این ترتیب، مدل‌های ترکیبی می‌توانند دقت و قابلیت اعتماد پیش‌بینی‌ها را به شکل قابل توجهی افزایش دهند. علاوه بر این، مدل‌های ترکیبی در شرایطی که داده‌های آموزشی محدود هستند نیز عملکرد قابل قبولی ارائه می‌دهند (Li et al., 2024). در حالی که مدل‌های یادگیری عمیق برای عملکرد مطلوب به حجم بالایی از داده نیاز دارند، مدل‌های ترکیبی با بهره‌گیری از ساختار فیزیکی سامانه قادرند حتی با داده‌های کم، پیش‌بینی‌های معنادار و قابل اعتماد ارائه دهند. این ویژگی به ویژه در مطالعات محیطی و منابع طبیعی که جمع‌آوری داده‌ها دشوار و هزینه‌بر است، اهمیت فراوانی دارد. به عنوان مثال، در مدیریت منابع آب، مدل‌های ترکیبی که شبکه‌های یادگیری عمیق را با مدل‌های هیدرولوژیکی تلفیق می‌کنند، قادر به پیش‌بینی دقیق جریان رودخانه‌ها و سطح ذخیره سدها حتی در شرایط داده محدود هستند. همچنین در کشاورزی، ترکیب مدل‌های فیزیکی رشد گیاه با مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند پیش‌بینی عملکرد محصولات و نیاز آبی مزرعه را با دقت بالاتر انجام دهد، که این امر در برنامه‌ریزی آبیاری هوشمند و بهینه‌سازی مصرف آب اهمیت زیادی دارد (Li et al., 2024; Workneh et al., 2025).

مزیت دیگر مدل‌های ترکیبی، قابلیت انتقال و تعمیم‌پذیری بالای آن‌هاست. ادغام دانش علمی و داده‌محوری موجب می‌شود که این مدل‌ها بتوانند در شرایط جدید، مناطق جغرافیایی متفاوت یا شرایط اقلیمی متغیر نیز عملکرد مناسبی داشته باشند. به عبارت دیگر، این مدل‌ها نه تنها دقت پیش‌بینی بالایی دارند، بلکه انعطاف‌پذیری و قابلیت کاربرد در شرایط داده محدود را نیز فراهم می‌آورند، که آن‌ها را به انتخابی مناسب برای کاربردهای علمی و عملی در حوزه‌های محیطی و مدیریتی تبدیل می‌کند (Workneh et al., 2025). به طور کلی، مدل‌های ترکیبی با تلفیق توانایی‌های مدل‌های فیزیکی و داده‌محور، ابزارهایی بسیار قدرتمند و منعطف در پیش‌بینی و مدیریت سیستم‌های پیچیده هستند. این مدل‌ها نه تنها می‌توانند دقت پیش‌بینی را افزایش دهند، بلکه قابلیت تعمیم‌پذیری، تفسیرپذیری و کارایی در شرایط داده محدود را نیز فراهم می‌آورند، که آن‌ها را به انتخابی مناسب برای کاربردهای علمی و عملی در حوزه‌های محیطی و مدیریتی تبدیل کرده است.

با توجه به جدول (۲) و بررسی مطالعات اخیر، انتخاب مدل مناسب بستگی به هدف پژوهش، حجم و کیفیت داده‌ها، منابع محاسباتی و نیاز به تفسیرپذیری دارد. اغلب پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده ترکیبی از مدل‌ها، بالاترین دقت و قابلیت تعمیم‌پذیری را فراهم می‌کند و می‌تواند ضمن کاهش ریسک پیش‌بینی‌های نادرست، تصمیم‌گیری مدیریتی را تسهیل کند (Zhao et al., 2024; Farfán-Durán et al., 2024).

جدول ۲. مقایسه مدل‌ها

ویژگی	ML	DL	ترکیبی
دقت پیش‌بینی	متوسط تا خوب	بسیار بالا	بسیار بالا
تفسیرپذیری	خوب	پایین	متوسط تا خوب
حجم داده مورد نیاز	کم تا متوسط	زیاد	متوسط
توانایی پردازش روابط غیرخطی	خوب	بسیار بالا	بسیار بالا
هزینه محاسباتی	پایین	بالا	متوسط تا بالا
کاربرد عملیاتی	مزرعه، تحلیل ویژگی‌ها	پیش‌بینی بلندمدت، سری‌های زمانی و مکانی	بهینه‌سازی عملیاتی، پیش‌بینی و مدیریت دقیق

برای ارائه یک دید جامع و نظام‌مند از عملکرد و نتایج عملیاتی رویکردهای داده‌محور در این حوزه، جدول (۳) مروری دقیق بر مطالعات تجربی اخیر صورت گرفته در سطوح بین‌المللی و داخلی را ارائه می‌دهد. این جدول، خلاصه‌ای از مدل‌های به کار رفته، هدف کاربردی و نتایج کمی به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد تا اثربخشی این رویکردها را در مدیریت بهره‌وری آب اثبات کند.



جدول ۳. مروری بر تحقیقات صورت گرفته

شماره	منطقه / کشور	نوع مدل	کاربرد / هدف	نتایج	مرجع
۱	آمریکا	مدل ترکیبی یادگیری عمیق (CNN-GRU-BiLSTM)	پیش بینی روزانه دبی رودخانه	$NSE = 0.994$, $MAE = 8.7 \text{ m}^3/\text{s}$, $RMSE = 11.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ؛ عملکرد بهتر نسبت به ۷ مدل دیگر؛ پایداری، مقاومت و قابلیت انتقال بالا.	Workneh et al., 2025
۲		الگوریتم یادگیری ماشینی XGBoost	پیش بینی میزان بهینه آبیاری بر اساس رشد رویشی و تولید گوجه فرنگی گیلاسی	افزایش ۱۷/۸٪ وزن میوه، افزایش محتویات لیکوپن ۲۳٪/۱، پروتئین محلول ۸/۹٪ و قند محلول ۸/۵٪؛ بهبود بهره وری آب ۲۰/۷٪؛ بالاترین دقت پیش بینی با ضریب تعیین معادل ۰/۸۲ و عملکرد بهتر نسبت به روش های سنتی آبیاری.	Wang et al., 2025
۳	حوضه دریاچه ارومیه (LUB)، ایران	تحلیل داده های سنجنش از دور در Google Earth Engine (GEE) و آزمون روند ناپارامتری Mann-Kendall (MK)	ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت های انسانی بر منابع آب سطحی	همبستگی منفی بین دمای هوا (۰/۵۶-)، زمین های کشاورزی (۰/۸۹)، پوشش برفی (۰/۰۹-)، مناطق ساخته شده (۰/۹۹-) و شوری آب زیرزمینی (۰/۷۹-) با منابع آب سطحی؛ همبستگی مثبت ضعیف با بارش (۰/۰۷) و تبخیر-تعرق بالقوه (۰/۱۲)؛ حدود ۴۰٪ منابع آب سطحی دائمی باقی مانده، اما ۳۰٪ از آن ها به منابع فصلی تبدیل شده اند؛ بیشترین آب در ماه های دسامبر و ژانویه و کمترین در اوت، سپتامبر و اکتبر مشاهده شد؛ تأثیر فعالیت های انسانی بیش از عوامل اقلیمی بر کاهش منابع آب سطحی است.	Kazemi Garajeh et al., 2024
۴	مرور نظام مند مطالعات جهانی	مدل های مختلف یادگیری ماشینی (۹ مدل بر کاربرد در سامانه های آبیاری هوشمند)	مرور نظام مند پژوهش های تجربی بین سال های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ برای تحلیل عملکرد و چالش های مدل های یادگیری ماشینی در سامانه های آبیاری هوشمند.	مدل های یادگیری ماشینی عملکرد بهتری نسبت به روش های کلاسیک نشان دادند، اما کاربرد آن ها هنوز محدود است؛ نیاز به مطالعات بیشتر برای دستیابی به نتایج قابل تعمیم وجود دارد.	Younes et al., 2024
۵	جهانی	تکنیک ها و الگوریتم های یادگیری عمیق	مرور کاربردهای DL در مدیریت آب شهری شامل پیش بینی تقاضا، تشخیص نشتی، مدیریت فاضلاب، بازیافت آب، پیش بینی ایمنی آب، تنظیم آبیاری و سایر چالش های مرتبط با آب	کاربرد DL در مراحل اولیه است؛ بیشتر مطالعات شامل شبیه سازی و محیط های آزمایشی بوده اند؛ تنها تشخیص نشتی به صورت عملی در عملیات روزمره اجرا شده است؛ چالش های عملی شامل توسعه الگوریتم، پل فرم های چندعامله، کیفیت داده، امنیت و تحلیل داده های زمینه ای است؛ این پژوهش مسیرهای آینده برای توسعه و دیجیتال سازی مدیریت منابع آب را مشخص می کند.	Tipon Tanchangya et al., 2024
۶	هند	مدل ترکیبی CNN-LSTM	پایش کیفیت آب رودخانه به صورت جامع و بلادرنگ، شامل پارامترهای مختلف آب مانند آلودگی، کدورت، pH، دما و جامدات محلول کل	مدل CNN-LSTM دقت اعتبارسنجی ۹۸/۴۰ درصد را به دست آورد و عملکرد بهتری نسبت به سایر روش های پیشرفته نشان داد؛ سامانه امکان ارسال هشدارهای بلادرنگ و تصمیم گیری آگاهانه در مدیریت منابع آب را فراهم می کند.	Chellaiah et al., 2024
۷		مدل های شبکه تصادفی نمایی با رویکرد شبکه های اجتماعی-فنی	بررسی نقش وابستگی های فنی-اجتماعی در تبادل اطلاعات میان بازیگران در مدیریت داده محور و یکپارچه آب شهری	وابستگی بازیگران به عناصر زیرساختی بر الگوهای تبادل اطلاعات تأثیر دارد؛ چالش هایی مانند تکه تکه بودن سازمانی، دسترسی به داده و تفاوت در ادراک میان موارد مشاهده شد؛ شدت این چالش ها بسته به اندازه سیستم، ساختار سازمانی و میزان پیشرفت مدیریت داده محور متفاوت است؛ نتایج نشان داد رویکرد اجتماعی-فنی می تواند به بهبود طراحی و اجرای سیاست های پایداری شهری کمک کند.	Manny, 2023
۸	آمریکا	ترکیب سیستم داده کاوی HRLDAS	توسعه و ارزیابی یک سامانه	روش مبتنی بر تراز آبی تبخیر-تعرق (ET-WB)	Zhao et al., 2023

شماره	منطقه / کشور	نوع مدل	کاربرد / هدف	نتایج	مرجع
		و مدل رشد محصول AquaCrop	خودکار داده‌محور برای زمان‌بندی آبیاری با استفاده از داده‌های رطوبت خاک و تبخیر-تعرق	موجب صرفه‌جویی ۱۰/۶ تا ۳۳/۵٪ در مصرف آب شد؛ روش مبتنی بر رطوبت خاک ۷/۲ تا ۳۷/۴٪ صرفه‌جویی بدون کاهش عملکرد محصول حاصل شد؛ افزودن پیش‌بینی بارش باعث صرفه‌جویی اضافی حدود ۱۰٪ (در مجموع ۲۰ تا ۵۰٪) شد؛ مدل توانایی بالایی در تصمیم‌گیری خودکار و صرفه‌جویی در مصرف آب دارد.	
۹		رویکردهای داده‌محور و هوش مصنوعی، یادگیری ماشین،	بهبود ژنتیکی محصول برای افزایش بهره‌وری آب، مقاومت به خشکی و عملکرد بالای محصول؛ شناسایی هپلوتا‌یپ‌ها و ارتباطات مارکر-صفت جهت سرعت‌بخشی به برنامه‌های اصلاح نباتات	رویکردهای داده‌محور امکان شناسایی ژن‌ها و مسیرهای مرتبط با صفت، بهبود فرآیندهای اصلاح نباتات، ژنومیک برودینگ، اسپید برودینگ و ویرایش ژنی را فراهم می‌کنند؛ استفاده از داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی امکان توسعه گونه‌های مقاوم به خشکی و با بهره‌وری آب بالا و عملکرد زیاد را فراهم می‌کند.	Sharma et al., 2023
۱۰	جنوب‌شرق دریاچه ارومیه، ایران	مدل ترکیبی یادگیری ماشینی (SO-ANFIS)	برآورد بهره‌وری آب و عملکرد محصول در باغ‌های سیب تحت آبیاری نواری باریک	افزایش WUE به میزان ۱/۹۰ و ۳/۱۳ kg/m ³ و افزایش عملکرد به میزان ۸/۵۷٪ و ۱۴/۳۰٪ نسبت به روش‌های TSFI و BI؛ ضریب تعیین معادل ۰/۹۸ برای WUE و عملکرد بهتر نسبت به روش‌های دیگر.	Dehghanisanij et al., 2022
۱۱	پاکستان	شبکه عصبی یادگیری عمیق (LSTM)	جایگزینی سنسور فیزیکی با «سنسور عصبی» برای افزایش قابلیت اعتماد در سیستم آبیاری هوشمند	پیش‌بینی مقادیر واقعی دما با دقت بالا؛ رطوبت و رطوبت خاک در محدوده قابل قبول؛ امکان استفاده از شبکه عصبی برای پشتیبانی از سنسورهای فیزیکی و بهبود قابلیت اطمینان سیستم آبیاری هوشمند.	Sami et al., 2022
۱۲	کرمان، ایران	مدل‌های هوش مصنوعی (GMDH, ANFIS, ANN)، SVR، MLR و نسخه‌های ترکیبی با الگوریتم Firefly (FA)	پیش‌بینی آب نفوذی در سیستم آبیاری شیاری	مدل‌های SVR-FA و MLPNN-FA بهترین تطابق را با داده‌های مشاهده شده داشتند؛ بهبود RMSE با استفاده از FA تا ۵٪ (ANFIS)، ۱٪ (GMDH)، ۴٪ (MLPNN) و ۴۷٪ (SVR)؛ ترکیب SVR-FA عملکرد مدل SVR استاندارد را تا ۹۷٪ افزایش داد.	Sayari et al., 2021
۱۳	چین	مدل یادگیری عمیق مبتنی بر همجوسازی داده‌های چندمنبع (GRU, LSTM, RNN) و مقایسه با مدل‌های آماری (MLR) و یادگیری ماشین کلاسیک (MLP)	پیش‌بینی شاخص‌های کیفی آب در شبکه‌های فاضلاب شهری با استفاده از داده‌های محیطی، اجتماعی، کمی و کیفی (مانند pH، دما، رسانایی)	مدل GRU بالاترین دقت را در پیش‌بینی شاخص‌های شیمیایی کیفیت آب داشت؛ مقدار ضریب تعیین آن ۸۲٪/۰ تا ۵۰/۰۷٪ بیشتر از RNN و LSTM، ۹٪/۱۳ تا ۱۵/۰۳٪ بیشتر از الگوریتم‌های یادگیری ماشین سنتی، و ۳۷/۲۶٪ تا ۴۳/۳۸٪ بیشتر از روش‌های خطی بود؛ همچنین منحنی یادگیری سریع‌تر و عملکرد پیش‌بینی بهتر نشان داد.	Jiang et al., 2021
۱۴		مدل‌های یادگیری ماشین (ML) همراه با اینترنت اشیاء (IoT) و شبکه حسگر بی‌سیم (WSN)	توسعه سامانه خودکار آبیاری مبتنی بر IoT برای پایش و مدیریت بهینه آبیاری، جلوگیری از آبیاری بیش‌ازحد، فرسایش خاک، و آبیاری متناسب با نوع محصول و شرایط آب‌وهوایی	سامانه پیشنهادی با ترکیب حسگرهای هوشمند و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، رویکردی پایدار و دقیق و برای مدیریت آبیاری ارائه می‌دهد که منجر به کاهش هدررفت آب و بهبود بهره‌وری مزرعه می‌شود.	Vij et al., 2020
۱۵		مدل‌های یادگیری ماشین (انواع) الگوریتم‌ها و مدل‌های تحلیلی (داده)	به‌کارگیری یادگیری ماشین در سامانه‌های آبیاری هوشمند برای بهینه‌سازی مصرف آب، کاهش دخالت انسانی، و افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی	یادگیری ماشین موجب بهبود کارایی آبیاری، افزایش عملکرد محصول، کاهش بیماری‌های گیاهی و کمک به انتخاب سامانه مناسب بر اساس نیاز کشاورزان می‌شود.	Janani et al., 2019

شماره	منطقه / کشور	نوع مدل	کاربرد / هدف	نتایج	مرجع
۱۶		الگوریتم هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT)	پیش‌بینی نیاز آبیاری مزرعه با استفاده از داده‌های حسگرهای خاک و شرایط محیطی به همراه داده‌های پیش‌بینی هواشناسی، و کنترل خودکار تأمین آب	سیستم به‌صورت پایلوت پیاده‌سازی و اجرا شد؛ داده‌ها به‌صورت بی‌سیم جمع‌آوری و در فضای ابری تحلیل شدند؛ الگوریتم پیشنهادی نتایج پیش‌بینی بسیار امیدبخشی ارائه داد و امکان مدیریت هوشمند و خودکار آبیاری را فراهم کرد.	Goap et al., 2018

به منظور تقویت انسجام مقاله و تبیین روشن‌تر ارتباط بین مفاهیم نظری و شواهد عملی، در این بخش، تلفیق نتایج جدول (۲) و جدول (۳) مورد تحلیل قرار می‌گیرد. جدول (۲) به صورت کلی، مزایا و محدودیت‌های رویکردهای یادگیری ماشین را در مقایسه با یکدیگر (مانند سادگی مدل‌های کلاسیک در مقابل دقت بالای مدل‌های عمیق) معرفی می‌کند. در مقابل، جدول (۳) به منزله شواهد تجربی و مصداق‌های عینی این مزایا و محدودیت‌ها عمل می‌نماید. نتایج کمی و عملکردی گزارش شده در مطالعات جدول (۳)، تأییدی مستقیم بر مزایای اصلی ذکر شده در جدول (۲) هستند؛ برای مثال: مطالعاتی که در جدول (۳) از مدل‌های یادگیری عمیق (DL) استفاده کرده‌اند، به وضوح بهبود قابل ملاحظه‌ای در شاخص‌های عملکرد را نشان می‌دهند که مزیت دقت پیش‌بینی بالاتر مدل‌های DL نسبت به ML کلاسیک در جدول (۲) را تأیید می‌کند. همچنین، محدودیت‌های مطرح شده در جدول (۲)، نظیر چالش تفسیرپذیری در مدل‌های عمیق، در جدول (۳) به صورت نتایج تحقیقاتی که به دنبال استفاده از روش‌های توضیحی (مانند LIME یا SHAP) برای رفع این مشکل بوده‌اند، تکمیل و ملموس می‌شوند. این تلفیق نشان می‌دهد که انتخاب نهایی مدل برای ارتقای بهره‌وری مصرف آب، باید بر مبنای توازن میان مزایای نظری (جدول ۲) و عملکرد اثبات‌شده تجربی در شرایط واقعی (جدول ۳) صورت پذیرد.

چالش‌ها، محدودیت‌ها و جهت‌گیری‌های آینده در به‌کارگیری رویکردهای داده‌محور

علی‌رغم پتانسیل چشمگیر رویکردهای داده‌محور در بهینه‌سازی بهره‌وری آب در شرایط متغیر اقلیمی، اجرای مؤثر و فراگیر این سیستم‌ها با موانع متعددی روبه‌رو است که باید به صورت انتقادی مورد بررسی قرار گیرد. مهم‌ترین چالش، به حوزه داده‌ها بازمی‌گردد. موفقیت الگوریتم‌های هوشمند وابستگی شدیدی به حجم، کیفیت و یکپارچگی داده‌های ورودی دارد. در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، کمبود شدید داده‌های زمینی و مشاهداتی دقیق برای متغیرهایی همچون رطوبت واقعی خاک یا تبخیر و تعرق لحظه‌ای، کالیبراسیون و آموزش صحیح مدل‌های پیچیده را با مشکل مواجه می‌سازد. علاوه بر این، ناهمگونی داده‌های چندمنبعی (ترکیب داده‌های ماهواره‌ای، سنسورهای محلی و ایستگاه‌های هواشناسی) نیازمند روش‌های پیچیده پیش‌پردازش است که خود، یک گلوگاه محاسباتی و زمانی ایجاد می‌کند (Duan et al., 2023).

محدودیت دوم، ماهیت فنی و الگوریتمی مدل‌ها را در بر می‌گیرد. بسیاری از مدل‌های پیشرفته یادگیری عمیق به دلیل پیچیدگی ساختاری، به عنوان یک جعبه سیاه عمل می‌کنند؛ به این معنا که فرآیند تصمیم‌گیری آن‌ها فاقد تفسیرپذیری^۳ شفاف برای کارشناسان هیدرولوژی و کشاورزی است. این مسئله اعتماد به سیستم‌های خودکار را کاهش داده و پذیرش آن‌ها در سطح سیاست‌گذاری را دشوار می‌سازد. همچنین، کنار گذاشتن دانش فیزیکی حاکم بر سیستم‌های هیدرولوژیکی به نفع وابستگی صرف به داده‌ها می‌تواند منجر به تولید پیش‌بینی‌های غیرمنطقی در شرایط نادیده‌اشود (Slater et al., 2025).

سرانجام، چالش‌های اقتصادی و زیرساختی مانع بزرگی بر سر راه فراگیری این فناوری‌ها هستند. هزینه اولیه نصب شبکه‌های سنسوری دقیق، تجهیزات IoT و زیرساخت‌های محاسباتی لازم برای پردازش داده‌های حجیم در زمان واقعی، برای کشاورزان خرد و مناطق روستایی با درآمد پایین، قابل ملاحظه است. همچنین، محدودیت‌های مربوط به پهنای باند اینترنت و کیفیت پایین خدمات در مناطق دورافتاده، مانع از انتقال پایدار و بلادرنگ داده‌ها به سرورهای پردازشی می‌گردد (Vaquet et al., 2024).

با در نظر گرفتن این چالش‌ها، جهت‌گیری‌های آینده پژوهشی باید بر سه محور اصلی متمرکز شوند: (۱) توسعه مدل‌های هیبریدی^۵

1 Ground Truth

2 Black Box

3 Interpretability

4 Out-of-Distribution

5 Hybrid Models

که دانش فیزیکی (معادلات تعادل آبی) را با توانایی داده‌محور (شبکه‌های عصبی) ترکیب کنند تا دقت و تفسیرپذیری را همزمان افزایش دهند. (۲) ابداع راه‌حل‌های هوش مصنوعی سبک و کم‌مصرف^۱ که قابلیت اجرای تحلیل‌های اولیه را مستقیماً در محل (مانند سنسورهای مزرعه) داشته باشند تا وابستگی به زیرساخت‌های ابری و پهنای باند کاهش یابد. (۴) توسعه تکنیک‌های انتقال یادگیری^۲ برای غلبه بر مشکل کمبود داده در مناطق جدید، با استفاده از دانش مدل‌های آموزش‌دیده در مناطق دارای داده کافی (Duan et al., 2023; Zhu et al., 2025).

چشم‌انداز آینده، خلاءهای تحقیقاتی و توصیه‌های سیاستی

بررسی جامع ادبیات نشان داد که رویکردهای یادگیری ماشین پتانسیل بالایی در ارتقاء بهره‌وری آب دارند، با این حال، دستیابی به تحول سیستمی در این حوزه مستلزم غلبه بر خلاءهای تحقیقاتی و اتخاذ سیاست‌های حمایتی مشخص است (Ghobadi & Kang, 2023; Ashoka et al., 2024). برای آینده، تحقیقات باید بر توسعه‌ی مدل‌های تفسیرپذیر (Explainable AI - XAI) تمرکز کنند تا اعتماد ذینفعان (از کشاورزان تا سیاست‌گذاران) به سامانه‌های تصمیم‌گیرنده هوشمند افزایش یابد. نمونه‌هایی از تکنیک‌های XAI شامل SHAP برای تبیین اهمیت ویژگی‌ها،^۳ LIME برای توضیح تصمیم‌های محلی مدل‌ها، و مدل‌های مبتنی بر درخت تصمیم قابل تفسیر است که امکان فهم و اعتماد بیشتر کاربران را فراهم می‌کند. همچنین، نیاز مبرمی به توسعه مدل‌های ترکیبی و سازگار شونده وجود دارد که بتوانند در برابر تغییرات سریع و شدید اقلیمی، از جمله نوسانات دما، بارش و الگوهای رطوبتی، بدون نیاز به بازآموزی مداوم، عملکرد پیش‌بینی پایدار و قابل اعتماد خود را حفظ کنند. در بعد زیرساختی، پیاده‌سازی محاسبات لبه^۴ برای پردازش داده‌های سنسورها در زمان واقعی و کاهش تأخیر در اتخاذ تصمیمات آبیاری، یک مسیر تحقیقاتی کلیدی است. از منظر سیاست‌گذاری، ضروری است که: (۱) استراتژی ملی داده برای جمع‌آوری، استانداردسازی و به‌اشتراک‌گذاری امن داده‌های آب‌وهوایی و کشاورزی تدوین شود؛ (۲) سرمایه‌گذاری‌های هدفمند دولتی برای کاهش هزینه اولیه فناوری‌های هوشمند، به‌ویژه برای کشاورزان کوچک، در نظر گرفته شود؛ و (۳) برنامه‌های آموزشی تخصصی برای ایجاد ظرفیت انسانی لازم جهت بهره‌برداری و نگهداری از این سامانه‌های پیچیده ترویج یابد. این اقدامات توأمان فنی و سیاستی، گذار از پروژه‌های آزمایشی موفق به پیاده‌سازی در مقیاس وسیع و تضمین تاب‌آوری بلندمدت منابع آب را تسهیل خواهند کرد (Otamendi et al., 2024).

یافته‌های گردآوری‌شده از مطالعات مختلف نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم‌های داده‌محور در سطوح مختلف مدیریتی می‌تواند به‌طور قابل توجهی کارایی تصمیم‌گیری را بهبود دهد. در بخش نتیجه‌گیری، جمع‌بندی کلی از این دستاوردها و مسیرهای آینده پژوهش ارائه می‌شود (Ghobadi & Kang, 2023; Ashoka et al., 2024; Otamendi et al., 2024).

نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، بررسی جامع ظرفیت‌های رویکردهای داده‌محور در بهینه‌سازی بهره‌وری مصرف آب تحت تأثیر تغییرات اقلیمی بود. یافته‌ها به‌روشنی نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی با اثرگذاری بر دما، بارش، تبخیر-تعرق و رطوبت خاک، موجب نوسان و پیچیدگی رفتار سامانه‌های آب و خاک می‌شوند و مدیریت منابع آب را با چالش‌های جدی مواجه می‌سازند. در این راستا، بهره‌وری مصرف آب به‌عنوان شاخصی کلیدی برای سنجش کارایی استفاده از منابع آبی و تضمین امنیت غذایی و توسعه پایدار اهمیت روزافزونی یافته است. رویکردهای سنتی مبتنی بر مدل‌های فیزیکی یا آماری کلاسیک، به دلیل محدودیت در پردازش روابط غیرخطی، نیاز به داده‌های دقیق و حساسیت به تغییرات زمانی و مکانی، در مواجهه با پیچیدگی‌های ناشی از تغییرات اقلیمی ناکارآمد هستند. از این‌رو، توجه به رویکردهای داده‌محور اهمیت پیدا می‌کند، چرا که این رویکردها با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و مدل‌های ترکیبی، توانایی شناسایی روابط پیچیده و غیرخطی میان متغیرهای اقلیمی، خاک، پوشش گیاهی و مدیریت آب را دارند و می‌توانند از داده‌های تاریخی، زمینی و ماهواره‌ای برای پیش‌بینی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بهره‌وری آب در مقیاس‌های مختلف بهره‌برداری کنند. نوآوری کلیدی این پژوهش،

1 Edge AI

2 Transfer Learning

3 SHapley Additive exPlanations

4 Local Interpretable Model-agnostic Explanations

5 Edge Computing



ارائه یک چارچوب تحلیلی سه سطحی یکپارچه است که مسیر تحول مدیریت منابع آب را از سطح توصیفی (شناخت الگوها)، به سطح پیش‌بینانه (برآورد نیازهای آبی) و در نهایت به سطح تجویزی و هوشمند (ارائه توصیه‌های عملیاتی و بهینه) تبیین می‌کند. به بیان دیگر، این چارچوب نشان می‌دهد که هدف نهایی از استقرار مدل‌های داده‌محور، عبور از پیش‌بینی صرف و رسیدن به قابلیت تصمیم‌گیری خودکار و سازگار با شرایط عدم قطعیت اقلیمی است. افزون بر این، ادغام داده‌های چندمنبعی و استفاده از مدل‌های ترکیبی، امکان افزایش دقت پیش‌بینی، بهبود قابلیت تعمیم و ارائه نتایج قابل تفسیر را فراهم می‌کند و می‌تواند در مدیریت هوشمند و پایدار منابع آب نقش کلیدی ایفا کند. هر دسته از مدل‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند؛ مدل‌های یادگیری ماشین کلاسیک در پردازش داده‌های متوسط و تحلیل اهمیت ویژگی‌ها عملکرد خوبی دارند، مدل‌های یادگیری عمیق در استخراج الگوهای پیچیده و پیش‌بینی بلندمدت توانمند هستند و مدل‌های ترکیبی، با بهره‌گیری همزمان از دانش علمی و قدرت پردازش داده‌ها، بالاترین دقت و قابلیت تعمیم‌پذیری را ارائه می‌کنند. بنابراین، انتخاب مدل مناسب باید بر اساس هدف پژوهش، حجم و کیفیت داده‌ها و نیاز به تفسیرپذیری انجام شود.

یافته‌های مقاله پیامدهای مستقیمی برای سیاست‌گذاری و مدیریت عملیاتی منابع آب در پی دارند. در سطح کلان، توصیه می‌شود تمرکز سیاست‌ها بر استانداردسازی و تلفیق داده‌های چندمنبعی (از جمله سنجش از دور و سنسورهای IoT) به عنوان پیش‌شرط استقرار موفق مدل‌های پیشرفته قرار گیرد. در سطح عملیاتی، مدیران و کشاورزان باید به استفاده از مدل‌های ترکیبی و تجویزی ترغیب شوند؛ زیرا این مدل‌ها علاوه بر دقت بالا، توانایی ارائه توصیه‌های آبیاری بهینه و بلادرنگ را دارند که به شکل مستقیم منجر به ارتقاء بهره‌وری مصرف آب و افزایش تاب‌آوری در برابر خشکسالی می‌شود. به‌طور کلی، یافته‌های این مقاله نشان می‌دهند که رویکردهای داده‌محور، فرصتی بی‌سابقه برای ارتقای بهره‌وری مصرف آب در شرایط تغییرات اقلیمی فراهم می‌آورند و می‌توانند پایه‌ای برای توسعه سامانه‌های مدیریتی هوشمند، تطبیقی و تاب‌آور در مدیریت منابع آب ایجاد کنند. با این حال، استقرار کامل این رویکردها با محدودیت‌های دسته‌بندی شده‌ای مواجه است که شناخت و مدیریت آن‌ها برای تحقق پتانسیل کامل این رویکردها ضروری است؛ این چالش‌ها شامل محدودیت‌های داده‌ای (مانند کمبود داده‌های بلندمدت و باکیفیت)، محدودیت‌های مدل‌سازی (به خصوص چالش تفسیرپذیری پایین در مدل‌های عمیق و نیاز به توان محاسباتی بالا) و محدودیت‌های پیاده‌سازی و مدیریتی (از جمله موانع زیرساختی و شکاف مهارتی) می‌شوند. بر این اساس، مسیرهای آبی پژوهش باید به‌طور مشخص بر توسعه هوش مصنوعی تبیین‌پذیر (XAI) برای افزایش اعتمادپذیری مدل‌های عمیق، توسعه مدل‌های ترکیبی بلادرنگ با قابلیت سازگاری سریع با نوسانات اقلیمی، و نیز انجام مطالعاتی در زمینه ارزیابی اثرات اجتماعی-اقتصادی و عوامل پذیرش تکنولوژی‌های داده‌محور متمرکز شوند.

منابع

فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۱۱(۲)، دلباز، رضا و ابراهیمیان، حامد (۱۴۰۳). مروری بر کاربرد علم داده و یادگیری ماشین در مدیریت آب کشاورزی. ۵۶-۳۹.

REFERENCES

- Ahmed, A. A., Sayed, S., Abdoulhalik, A., Moutari, S., & Oyedele, L. (2024). Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 441, 140715.
- Ahmed, A. M., Deo, R. C., Feng, Q., Ghahramani, A., Raj, N., Yin, Z., & Yang, L. (2021). Deep learning hybrid model with Boruta-Random forest optimiser algorithm for streamflow forecasting with climate mode indices, rainfall, and periodicity. *Journal of Hydrology*, 599, 126350.
- Ahmed, Z., Gui, D., Murtaza, G., Yunfei, L., & Ali, S. (2023). An overview of smart irrigation management for improving water productivity under climate change in drylands. *Agronomy*, 13(8), 2113.
- Al Nagggar, Y., Fahmy, N. M., Alkhaibari, A. M., Al-Akeel, R. K., Alharbi, H. M., Mohamed, A., ... & Alharbi, H. A. (2025). Mechanisms and Genetic Drivers of Resistance of Insect Pests to Insecticides and Approaches to Its Control. *Toxics*, 13(8), 681.
- Amani, S., & Shafizadeh-Moghadam, H. (2023). A review of machine learning models and influential factors for estimating evapotranspiration using remote sensing and ground-based data. *Agricultural water management*, 284, 108324.
- Ashoka, P., Devi, B. R., Sharma, N., Behera, M., Gautam, A., Jha, A., & Sinha, G. (2024). Artificial intelligence in water management for sustainable farming: a review. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(6), 511-525.

- Başığaoğlu, H., Chakraborty, D., Lago, C. D., Gutierrez, L., Şahinli, M. A., Giacomoni, M., ... & Şengör, S. S. (2022). A review on interpretable and explainable artificial intelligence in hydroclimatic applications. *Water*, 14(8), 1230.
- Bwambale, E., Abagale, F. K., & Anornu, G. K. (2023). Data-driven modelling of soil moisture dynamics for smart irrigation scheduling. *Smart Agricultural Technology*, 5, 100251.
- Chellaiah, C., Anbalagan, S., Swaminathan, D., Chowdhury, S., Kadhila, T., Shopati, A. K., ... & Amesho, K. T. (2024). Integrating deep learning techniques for effective river water quality monitoring and management. *Journal of Environmental Management*, 370, 122477.
- Dehghanisani, H., Emami, H., Emami, S., & Rezaverdinejad, V. (2022). A hybrid machine learning approach for estimating the water-use efficiency and yield in agriculture. *Scientific Reports*, 12(1), 6728.
- Del-Coco, M., Leo, M., & Carcagnì, P. (2024). Machine learning for smart irrigation in agriculture: How far along are we?. *Information*, 15(6), 306.
- Duan, Y., Akula, S., Kumar, S., Lee, W., & Khajehei, S. (2023). A hybrid physics–AI model to improve hydrological forecasts. *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, 2(1), e220023.
- Eggimann, S., Mutzner, L., Wani, O., Schneider, M. Y., Spuhler, D., Moy de Vitry, M., ... & Maurer, M. (2017). The potential of knowing more: A review of data-driven urban water management. *Environmental science & technology*, 51(5), 2538-2553.
- El Bilali, A., Taleb, A., & Brouziyne, Y. (2021). Groundwater quality forecasting using machine learning algorithms for irrigation purposes. *Agricultural Water Management*, 245, 106625.
- Farfán-Durán, J. F., & Cea, L. (2024). Streamflow forecasting with deep learning models: A side-by-side comparison in Northwest Spain. *Earth Science Informatics*, 17(6), 5289-5315.
- Fu, X., Jiang, J., Wu, X., Huang, L., Han, R., Li, K., ... & Wang, Z. (2024). Deep learning in water protection of resources, environment, and ecology: Achievement and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(10), 14503-14536.
- Gerten, D., Lucht, W., Ostberg, S., Heinke, J., Kowarsch, M., Kreft, H., ... & Schellnhuber, H. J. (2013). Asynchronous exposure to global warming: freshwater resources and terrestrial ecosystems. *Environmental Research Letters*, 8(3), 034032.
- Ghobadi, F., & Kang, D. (2023). Application of machine learning in water resources management: a systematic literature review. *Water*, 15(4), 620.
- Goap, A., Sharma, D., Shukla, A. K., & Krishna, C. R. (2018). An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. *Computers and electronics in agriculture*, 155, 41-49.
- Hajirad, I. (2025). Optimizing pulsed and continuous drip irrigation strategies to enhance yield and water productivity of silage maize in semi-arid regions. *Cogent Food & Agriculture*, 11(1), 2583753.
- Hammouch, H., El-Yacoubi, M., Qin, H., & Berbia, H. (2024). A systematic review and meta-analysis of intelligent irrigation systems. *IEEE Access*.
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780.
- Hoover, D. L., Abendroth, L. J., Browning, D. M., Saha, A., Snyder, K., Wagle, P., ... & Scott, R. L. (2023). Indicators of water use efficiency across diverse agroecosystems and spatiotemporal scales. *Science of the Total Environment*, 864, 160992.
- Howell, T. A. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy journal*, 93(2), 281-289.
- Huang, Q., Du, Y., & Yi, C. (2025). Assessing the role of artificial intelligence in improving urban climate resilience: theoretical framework based on technological innovation systems. *Journal of Asian Public Policy*, 1-23.
- Jaiswal, N., Kumar, T. V., & Shukla, C. (2025). Smart drip irrigation systems using IoT: a review of architectures, machine learning models, and emerging trends. *Discover Agriculture*, 3(1), 253.
- Janani, M., & Jebakumar, R. (2019). A study on smart irrigation using machine learning. *Cell & Cellular Life Sciences Journal*, 4(1), 1-8.
- Jiang, Y., Li, C., Sun, L., Guo, D., Zhang, Y., & Wang, W. (2021). A deep learning algorithm for multi-source data fusion to predict water quality of urban sewer networks. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128533.
- Kazemi Garajeh, M., Akbari, R., Aghaei Chaleshtori, S., Shenavaei Abbasi, M., Tramutoli, V., Lim, S., & Sadeqi, A. (2024). A comprehensive assessment of climate change and anthropogenic effects on surface Water resources in the Lake Urmia Basin, Iran. *Remote Sensing*, 16(11), 1960.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444.



- Lee, D. Y., Lee, D. S., Cha, Y., Min, J. H., & Park, Y. S. (2023). Data-driven models for predicting community changes in freshwater ecosystems: a review. *Ecological Informatics*, 77, 102163.
- Li, X., Li, J., & Yang, K. (2022). Feature importance analysis and machine learning applications in water resources management: Opportunities and challenges. *Journal of Hydrology*, 609, 127731.
- Li, X., Xue, F., Ding, J., Xu, T., Song, L., Pang, Z., ... & Zhang, Y. (2024). A hybrid model coupling physical constraints and machine learning to estimate daily evapotranspiration in the heihe River Basin. *Remote Sensing*, 16(12), 2143.
- Manny, L. (2023). Socio-technical challenges towards data-driven and integrated urban water management: A socio-technical network approach. *Sustainable Cities and Society*, 90, 104360.
- Manny, L. (2023). Socio-technical challenges towards data-driven and integrated urban water management: A socio-technical network approach. *Sustainable Cities and Society*, 90, 104360.
- Mosavi, A., Ozturk, P., & Chau, K. W. (2018). Flood prediction using machine learning models: Literature review. *Water*, 10(11), 1536.
- Mosavi, A., Ozturk, P., & Chau, K.-W. (2019). *Flood prediction using machine learning models: Literature review*. *Water*, 11(12), 2510.
- Otamendi, U., Maiza, M., Olaizola, I. G., Sierra, B., Florez, M., & Quartulli, M. (2024). Integrated water resource management in the Segura Hydrographic Basin: An artificial intelligence approach. *Journal of Environmental Management*, 370, 122526.
- Parra-López, C., Abdallah, S. B., Garcia-Garcia, G., Hassoun, A., Trollman, H., Jagtap, S., ... & Carmona-Torres, C. (2025). Digital technologies for water use and management in agriculture: Recent applications and future outlook. *Agricultural Water Management*, 309, 109347.
- Sami, M., Khan, S. Q., Khurram, M., Farooq, M. U., Anjum, R., Aziz, S., ... & Sadak, F. (2022). A deep learning-based sensor modeling for smart irrigation system. *Agronomy*, 12(1), 212.
- Sami, S., Khan, A., & Ahmad, M. (2022). *Deep learning-based virtual sensing for improving smart irrigation system reliability*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107012.
- Sayari, S., Mahdavi-Meymand, A., & Zounemat-Kermani, M. (2021). Irrigation water infiltration modeling using machine learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180, 105921.
- Shah, W., Chen, J., Ullah, I., & Shah, M. H. (2024). Application of RNN-LSTM in predicting drought patterns in pakistan: A pathway to sustainable water resource management. *Water*, 16(11), 1492.
- Sharma, A., et al. (2023). AI-driven selection of drought-tolerant and water-efficient crop varieties. *Plant Science*, 328, 111537.
- Sharma, N., Raman, H., Wheeler, D., Kalenahalli, Y., & Sharma, R. (2023). Data-driven approaches to improve water-use efficiency and drought resistance in crop plants. *Plant Science*, 336, 111852.
- Shen, C., Wang, H., & Chen, Y. (2021). Limitations and interpretability challenges of classical machine learning models in hydrological predictions. *Environmental Modelling & Software*, 144, 105137.
- Shen, C., Wang, L., & Li, X. (2021). Hybrid deep learning models for simulating climate change impacts on agricultural water use efficiency.
- Shortridge, J. E., Guikema, S. D., & Zaitchik, B. F. (2016). Machine learning methods for empirical streamflow simulation: a comparison of model accuracy, interpretability, and uncertainty in seasonal watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7), 2611-2628.
- Sinclair, T. R., & Rufty, T. W. (2012). Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. *Global Food Security*, 1(2), 94-98.
- Slater, L., Blougouras, G., Deng, L., Deng, Q., Ford, E., Hoek van Dijke, A., ... & Zhang, B. (2025). Challenges and opportunities of ML and explainable AI in large-sample hydrology. *Philosophical Transactions A*, 383(2302), 20240287.
- Tipon Tanchangya, A. R., Rahman, J., & Ridwan, M. (2024). A review of deep learning applications for sustainable water resource management. *Global sustainability research*, 3(4), 48-73.
- Vaquet, V., Hinder, F., Artelt, A., Ashraf, I., Strother, J., Vaquet, J., ... & Hammer, B. (2024, September). Challenges, methods, data—a survey of machine learning in water distribution networks. In *International Conference on Artificial Neural Networks* (pp. 155-170). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Vij, A., Vijendra, S., Jain, A., Bajaj, S., Bassi, A., & Sharma, A. (2020). IoT and machine learning approaches for automation of farm irrigation system. *Procedia Computer Science*, 167, 1250-1257.
- Wang, X., Feng, Y., Cui, Y., & Guo, B. (2023). Spatiotemporal Variation of Vegetation Water Use Efficiency and Its Response to Extreme Climate in Northwestern Sichuan Plateau. *Sustainability*, 15(15), 11786.
- Wang, Z., Liu, Z., Yuan, M., Yin, W., Zhang, C., Zhang, Z., & Hu, X. (2025). A machine learning-based irrigation prediction model for cherry tomatoes in greenhouses: Leveraging optimal growth data for precision

irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 237, 110558.

Wei, H., Xu, W., Kang, B., Eisner, R., Muleke, A., Rodriguez, D., ... & Harrison, M. T. (2024). Irrigation with artificial intelligence: problems, premises, promises. *Human-Centric Intelligent Systems*, 4(2), 187-205.

Workneh, A., et al. (2025). *Hybrid deep learning models for river discharge prediction*. *Journal of Hydrology*, 632, 129220.

Workneh, H., & Jha, M. (2025). Utilizing Hybrid Deep Learning Models for Streamflow Prediction. *Water*, 17(13), 1913.

Younes, A., Abou El Assad, Z. E., El Meslouhi, O., Abou El Assad, D. E., & Majid, E. D. A. (2024). The application of machine learning techniques for smart irrigation systems: A systematic literature review. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100425.

Zeynoddin, M., Gumiere, S. J., & Bonakdari, H. (2023). Enhancing water use efficiency in precision irrigation: data-driven approaches for addressing data gaps in time series. *Frontiers in Water*, 5, 1237592.

Zhang, J., Ren, W., An, P., Pan, Z., Wang, L., Dong, Z., ... & Tian, H. (2015). Responses of crop water use efficiency to climate change and agronomic measures in the semiarid area of northern China. *PloS one*, 10(9), e0137409.

Zhang, L., Dawes, W. R., & Walker, G. R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water resources research*, 37(3), 701-708.

Zhao, H., Di, L., Guo, L., Zhang, C., & Lin, L. (2023). An automated data-driven irrigation scheduling approach using model simulated soil moisture and evapotranspiration. *Sustainability*, 15(17), 12908.

Zhao, L., et al. (2025). *Optimizing irrigation scheduling using machine learning and multi-source data*. *Agricultural Systems*, 224, 103123.

Zhao, W., Duan, L., Ma, B., Meng, X., Ren, L., Ye, D., & Rui, S. (2025). Applications of Optimization Methods in Automotive and Agricultural Engineering: A Review. *Mathematics*, 13(18), 3018.

Zhao, X., Wang, H., Bai, M., Xu, Y., Dong, S., Rao, H., & Ming, W. (2024). A comprehensive review of methods for hydrological forecasting based on deep learning. *Water*, 16(10), 1407.

Zhao, X., Wang, H., Bai, M., Xu, Y., Dong, S., Rao, H., & Ming, W. (2024). A comprehensive review of methods for hydrological forecasting based on deep learning. *Water*, 16(10), 1407.

Zhu, F., Zhu, O., Han, M., Liu, W., Guo, X., Hou, T., ... & Zhong, P. A. (2025). A hybrid process-data driven framework for real-time hydrological forecasting with interpretable deep learning. *Journal of Hydrology*, 134082.