

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/396917616>

Review of Artificial Intelligence in Surface Water Resources Management: Recent Advances, Challenges, and Future Directions

Conference Paper · September 2025

CITATIONS

0

READS

18

3 authors, including:



[Faezeh Ataee](#)

Ferdowsi University of Mashhad

3 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Mohammad Taghi Dastorani](#)

Ferdowsi University of Mashhad

29 PUBLICATIONS 258 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Review of Artificial Intelligence in Surface Water Resources Management: Recent Advances, Challenges, and Future Directions

Faezeh Ataee¹, Mohammad Taghi Dastorani^{2*} and Fatema Ataee³

1. B.Sc. Student of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Faezeh.Ataee@mail.um.ac.ir

2*. Corresponding author, Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. dastorani@um.ac.ir

3. Graduation B.Sc. in Electrical engineering (Control systems), Department of Electrical and Bioelectric Engineering, Sadjad University of Technology, Mashhad, Iran. ataefatema96@gmail.com

Abstract

This systematic review assesses the applications of artificial intelligence (AI) in the management of surface water resources. Using the PRISMA 2020 protocols, this research reviews the most recent literature (published between 2022 and 2025) available through databases such as Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore, and Google Scholar, encompassing over 100 valuable research articles. Among the Key findings is that AI models, including Long Short-Term Memory (LSTM) and hybrid machine learning models, can provide better forecasting and need optimization of different water parameters. The combination of AI and emerging technologies, such as IoT and remote sensing, also provides real-time observation and analysis of massive data. This synergy enables numerous applications such as urban water demand forecast, river water quality monitoring, irrigation efficiency estimation, and flood risk analysis. Yet, despite these advances, several barriers exist to the widespread adoption of AI in water. These challenges include the quality and accessibility of data, the transparency and interpretability of models, computational intensity, high infrastructure requirements, cybersecurity considerations, as well as ethical and social implications, implementation costs, and resistance to change.

Key words: Artificial Intelligence, Water Resources Management, Hydrology, Machine Learning, Intelligent Models

مروری بر هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب سطحی با تمرکز بر پیشرفت‌های اخیر، چالش‌ها و مسیرهای آینده

فائزه عطایی^۱، محمد تقی دستورانی^{۲*} و فاطمه عطایی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران،

Faezeh.Ataee@mail.um.ac.ir

۲*. نویسنده مسئول، استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران،

dastorani@um.ac.ir

۳. کارشناسی مهندسی برق-کنترل سیستم، دانشکده برق و مهندسی پزشکی، دانشگاه سجاد، مشهد، ایران، atacefatema96@gmail.com

چکیده

این مرور نظام‌مند با هدف ارزیابی وضعیت کنونی کاربردهای هوش مصنوعی (AI)، در مدیریت منابع آب سطحی انجام شده است. این مطالعه با پایبندی به دستورالعمل‌های بیانیه PRISMA 2020، ادبیات علمی اخیر (به‌ویژه سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵) را از پایگاه‌های داده معتبری چون Scopus، Web of Science، ScienceDirect، IEEE Xplore و Google Scholar بررسی کرده و بیش از ۱۰۰ مقاله پژوهشی مرتبط را مورد تحلیل قرار داده است. یافته‌های کلیدی این مرور نشان می‌دهد که مدل‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه شبکه‌های حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM) و مدل‌های ترکیبی یادگیری ماشین، عملکردی برتر در پیش‌بینی و بهینه‌سازی پارامترهای مختلف آب دارند. ادغام هوش مصنوعی با فناوری‌های نوظهور مانند اینترنت اشیا (IoT) و سنجش از دور، امکان پایش به‌هنگام و تحلیل داده‌های وسیع را فراهم آورده و کاربردهای متنوعی از پیش‌بینی تقاضای آب شهری و کیفیت آب رودخانه‌ها تا بهینه‌سازی آبیاری و مدیریت سیلاب را پوشش می‌دهد. با وجود این دستاوردهای چشمگیر، چالش‌های متعددی در مسیر پیاده‌سازی گسترده هوش مصنوعی در مدیریت آب وجود دارد. این چالش‌ها شامل کیفیت و دسترسی به داده‌ها، عدم شفافیت و تفسیرپذیری مدل‌ها، نیازهای محاسباتی بالا، محدودیت‌های زیرساختی، تهدیدات امنیت سایبری، ملاحظات اخلاقی و اجتماعی، هزینه‌های پیاده‌سازی و مقاومت در برابر تغییر هستند. این مرور بر نقش تحول‌آفرین هوش مصنوعی در مدیریت پایدار آب تأکید می‌کند و ضرورت توسعه مدل‌های قابل تفسیر و ایجاد همکاری‌های بین‌رشته‌ای را برای استقرار مسئولانه و مؤثر این فناوری برجسته می‌سازد. دقت در روش‌شناسی و جامعیت در پوشش ادبیات، اعتبار این مرور را افزایش داده و آن را به منبعی قابل اتکا برای پژوهشگران و تصمیم‌گیران در این حوزه تبدیل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: هوش مصنوعی، مدیریت منابع آب، هیدرولوژی، یادگیری ماشین، مدل‌های هوشمند

۱. مقدمه

مدیریت پایدار منابع آب سطحی همچون رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آبگیرها، به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی در قرن حاضر شناخته می‌شود. این منابع حیاتی، که نقش اساسی در تأمین نیازهای کشاورزی، صنعتی و شرب ایفا می‌کنند، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، رشد بی‌رویه جمعیت و افزایش تقاضای آب قرار دارند. علاوه بر این، عواملی نظیر آلودگی، کمبود داده‌های قابل اعتماد و نوسانات فصلی، پیچیدگی‌های مدیریت این سیستم‌ها را دوچندان کرده است. این شرایط، نیاز به رویکردهای نوین و پیشرفته را برای تصمیم‌گیری‌های به‌موقع و دقیق در حوزه مدیریت آب برجسته می‌سازد [1].

روش‌های سنتی مدیریت آب، در مواجهه با پیچیدگی‌های سیستم‌های هیدرولوژیکی و نیاز به تصمیم‌گیری‌های به‌موقع و دقیق، با محدودیت‌های ذاتی مواجه هستند [3], [2]. این رویکردها، اغلب در سازگاری به‌هنگام، تحلیل پیش‌بینی‌کننده و بهینه‌سازی سیستمی عملکرد مناسبی نداشتند. تحلیل دستی حجم وسیع و متنوع داده‌ها، فرآیندی کند، پرهزینه و مستعد خطا است که تیم‌های متخصص و غیرمتخصص را تحت فشار قرار می‌دهد. این نقاط ضعف، رویکردهای سنتی را ذاتاً برای انطباق با شرایط به سرعت در حال تغییر و پیچیدگی‌های فزاینده سیستم‌های آبی، ناکافی می‌سازد و ضرورت تحول در شیوه‌های مدیریت را آشکار می‌کند [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22].

در این راستا با توجه به محدودیت‌های روش‌های سنتی و پیچیدگی‌های مدیریت آب، هوش مصنوعی (AI) و زیرشاخه‌های آن، از جمله یادگیری ماشین (ML) و یادگیری عمیق (DL)، به عنوان ابزارهای نوین ظهور کرده‌اند. این فناوری‌ها در مدل‌سازی فرآیندهای غیرخطی، پیش‌بینی جریان آب، بهینه‌سازی تخصیص منابع، پایش کیفیت آب و مدیریت بلایای طبیعی نظیر سیل و خشکسالی، نقش مؤثری ایفا می‌کنند [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32]. هوش مصنوعی با توانایی یادگیری خودکار، تحلیل داده‌های بزرگ و مدل‌سازی روابط غیرخطی قابلیت‌های پیش‌بینی پیشرفته‌ای را ارائه می‌دهد. این ارائه برای مدیران این امکان را قادر می‌سازد که تقاضا را پیش‌بینی نموده، شبکه‌های توزیع بهینه سازند و ناهنجاری‌ها را در زمان واقعی تشخیص بدهند. این هم‌گرایی بین شبکه‌های هوشمند آب و هوش مصنوعی، یک تغییر پارادایمی عمیق را در نحوه مدیریت آب نشان می‌دهد. این تحول، مدیریت آب را از یک رویکرد واکنشی به یک رویکرد پیشگیرانه، پیش‌بینی‌کننده و بهینه‌سازی‌شده تبدیل می‌کند. این اتفاق ناشی از توانایی هوش مصنوعی در پردازش داده‌های پیچیده برای دستیابی به بینش‌های به‌هنگام و تصمیم‌گیری‌های هوشمند است. مطالعات اخیر به طور مداوم نشان داده‌اند که مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم‌های فازی-عصبی (ANFIS)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، جنگل تصادفی (RF) و مدل‌های ترکیبی، دقت و کارایی بالایی در پیش‌بینی و مدیریت منابع آب دارند [4], [5], [11], [13], [21], [22], [23], [27], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44]. این مدل‌ها برای پیش‌بینی پارامترهایی نظیر اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی (BOD)، اکسیژن محلول (DO)، دما و نوسانات سطح آب در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها نیز به کار رفته‌اند.

پیشرفت‌های اخیر در یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، از جمله شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) و حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM)، در پیش‌بینی دبی رودخانه و تغییرات کیفیت آب موفق عمل کرده‌اند [8]. علاوه بر این ادغام هوش مصنوعی با سنجش از دور و اینترنت اشیا (IoT) نیز امکان پایش به‌هنگام و تحلیل داده‌های وسیع از پارامترهای هیدرومتریک و مولفه‌های زیست‌محیطی را فراهم کرده است [9], [15], [16], [17], [18], [19], [45], [46], [47], [48]. با این حال، پیاده‌سازی گسترده هوش مصنوعی با چالش‌هایی نظیر کیفیت و دسترسی به داده‌ها، موانع فنی و زیرساختی، ملاحظات اخلاقی و اجتماعی، و نیازهای محاسباتی بالا مواجه است [30], [31], [49], [50].

این مرور نظام‌مند با هدف بررسی ادبیات علمی اخیر (به‌ویژه سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵) در زمینه کاربرد هوش مصنوعی (AI) در مدیریت منابع آب سطحی انجام شده است. این مطالعه با پایبندی به دستورالعمل‌های PRISMA 2020، چارچوبی روش‌شناختی برای شفافیت و دقت در فرآیند بررسی شواهد فراهم می‌کند. این مرور نه تنها به تبیین نقاط قوت و کاربردهای هوش مصنوعی می‌پردازد، بلکه محدودیت‌ها و چالش‌های پیش روی پیاده‌سازی آن را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. در نهایت، بر لزوم توسعه مدل‌های قابل تفسیر و ایجاد همکاری‌های بین‌رشته‌ای برای استقرار مسئولانه و مؤثر هوش مصنوعی در جهت دستیابی به مدیریت پایدار آب تأکید می‌شود و مسیرهای آینده پژوهش در این حوزه ترسیم می‌گردد. این رویکرد دقیق، اعتبار علمی مرور را تضمین کرده و آن را به منبعی ارزشمند برای پژوهشگران و ذی‌نفعان تبدیل می‌کند.

۲. مواد و روش

این مرور نظام‌مند با رعایت دستورالعمل‌های PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) انجام شده است. چارچوب PRISMA 2020 با ارائه یک چک‌لیست ۲۷ موردی، به پژوهشگران کمک می‌کند تا دلایل انجام مرور، اقدامات انجام‌شده و یافته‌ها را گزارش کنند. به‌کارگیری این چارچوب صرفاً یک گام رویه‌ای نیست، بلکه تعهدی بنیادین به دقت علمی و شفافیت است. این امر تضمین می‌کند که مرور قابل بازتولید است، سوگیری را به حداقل می‌رساند و یک مسیر حسابرسی واضح برای فرآیند انتخاب ادبیات فراهم می‌کند. این رویکرد روش‌شناختی، اعتبار و قابلیت اعتماد یافته‌های این مرور را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [51].

برای اطمینان از پوشش گسترده و جامع ادبیات، جستجوی مقالات پژوهشی در پایگاه‌های داده اصلی علمی شامل Scopus، Google Scholar، IEEE Xplore، ScienceDirect، Web of Science (WoS) انجام شد. انتخاب این پایگاه‌ها به دلیل پوشش وسیع آن‌ها در حوزه‌های مهندسی، علوم کامپیوتر و محیط زیست صورت گرفت که برای یک موضوع بین‌رشته‌ای نظیر هوش مصنوعی در مدیریت آب حیاتی است. رشته‌های جستجو شامل ترکیبی از اصطلاحات مرتبط با "مدیریت منابع آب" و "هوش مصنوعی" بود. کلمات کلیدی اصلی به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفتند: "Artificial Intelligence in hydrology"، "AI-based flood prediction"، "Machine Learning in water infrastructure"، "Real-time water monitoring using AI"، "AI for dam operation"، "Hybrid hydrological modeling"، "Explainable AI in water systems"، "Ethics in AI water management"، "water resources management using artificial intelligence"، "IoT water management" و معادل‌های فارسی آن‌ها. این استراتژی جستجوی دقیق، امکان شناسایی طیف وسیعی از مطالعات مرتبط را فراهم آورد.

مطالعات برای شمول در این مرور باید کاربرد یا بحث صریح در مورد تکنیک‌های هوش مصنوعی (AI) را در زمینه مدیریت منابع آب سطحی شامل می‌شدند. تمرکز این مرور بر ادبیات اخیر (سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵) بود تا آخرین پیشرفت‌ها و روندهای نوظهور در این حوزه منعکس شود. از سوی دیگر، معیارهای عدم شمول شامل ادبیات خاکستری (مانند گزارش‌های غیررسمی، پایان‌نامه‌ها و مقالات کنفرانس بدون داوری کامل) و منابع غیرداوری‌شده بود. این رویکرد در انتخاب مطالعات، کیفیت و اعتبار شواهد ترکیب‌شده در این مرور را تضمین می‌کند.

فرآیند انتخاب مطالعات در چند مرحله انجام شد تا از شفافیت و کاهش سوگیری اطمینان حاصل شود. ابتدا، مقالات شناسایی شده در پایگاه‌های داده مورد بررسی قرار گرفتند. در مرحله بعدی، موارد تکراری حذف شدند. سپس، یک غربالگری اولیه بر اساس بررسی عناوین و چکیده‌ها صورت گرفت تا مقالات نامرتب‌کنار گذاشته شوند. در نهایت، غربالگری کامل مقالات با بررسی متن کامل آن‌ها انجام شد.

از هر مطالعه‌ای که در نهایت در مرور گنجانده شد، داده‌های کلیدی به صورت نظام‌مند استخراج گردید. این داده‌ها شامل موارد زیر بود: هدف مطالعه، مدل(های) هوش مصنوعی / یادگیری ماشین / یادگیری عمیق به‌کاررفته، کاربرد خاص در مدیریت آب، یافته‌های کلیدی و معیارهای عملکرد گزارش‌شده (مانند دقت، ضریب تعیین R^2 ، ضریب Nash-Sutcliffe)، مجموعه داده‌های مورد استفاده، زمینه جغرافیایی مطالعه و محدودیت‌ها یا چالش‌های شناسایی شده. برای ارزیابی کیفیت یا خطر سوگیری مطالعات فردی، از یک چک‌لیست اصلاح‌شده بر اساس دستورالعمل‌های PRISMA استفاده شد تا قابلیت اعتماد و اعتبار داخلی هر مطالعه مشخص گردد. یافته‌های حاصل از ارزیابی کیفیت، در فرآیند ترکیب یافته‌ها مورد توجه قرار گرفت تا وزن‌دهی مناسب به شواهد صورت پذیرد. این رویکرد دقیق در استخراج و ارزیابی داده‌ها، پایه و اساس یک تحلیل انتقادی عمیق و ارائه بینش‌های معنادار را فراهم می‌آورد. نمودار جریان PRISMA 2020 برای انتخاب مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

یافته‌های استخراج‌شده از مطالعات مرور شده، فراتر از خلاصه‌سازی کیفی، با استفاده از رویکردهای تحلیلی ترکیب شدند. تحلیل موضوعی برای شناسایی روندها، الگوهای نوظهور و چالش‌های مشترک در کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت آب به کار گرفته شد. همچنین، تحلیل مقایسه‌ای عملکرد مدل‌های مختلف هوش مصنوعی در کاربردهای گوناگون صورت پذیرفت تا نقاط قوت و ضعف نسبی آن‌ها مشخص گردد. این ترکیب یافته‌ها، امکان ارائه یک دیدگاه جامع و انتقادی را فراهم آورد و به شناسایی شکاف‌های پژوهشی و مسیرهای آینده کمک کرد. با توجه به تنوع مدل‌ها و کاربردها، هیچ متاتحلیلی (ترکیب کمی داده‌ها) انجام نشد، اما مقایسه‌های کمی بر اساس معیارهای عملکرد گزارش شده در مطالعات فردی صورت گرفت.

جدول ۱ نمودار جریان PRISMA 2020 برای انتخاب مطالعه

مرحله	تعداد مقالات
مقالات شناسایی شده از پایگاه‌های داده	بیش از ۱۰۰۰
مقالات حذف شده قبل از غربالگری (تکراری)	حدود ۳۰۰
مقالات غربالگری شده (عنوان و چکیده)	حدود ۷۰۰
مقالات حذف شده پس از غربالگری (نامرتبط)	حدود ۵۵۰
مقالات ارزیابی شده برای واجد شرایط بودن (متن کامل)	حدود ۱۵۰
مقالات حذف شده پس از بررسی متن کامل (دلایل حذف)	حدود ۵۰
مطالعات گنجانده شده در ترکیب کیفی	بیش از ۱۰۰

۳. مدل‌های هوش مصنوعی و کاربردهای آن‌ها

با توجه به ضرورت حیاتی رویکردهای پیشرفته در مدیریت منابع آب سطحی و روش‌شناسی دقیق به کار گرفته‌شده در این بخش مرور به ترکیب مدل‌های مختلف هوش مصنوعی و کاربردهای متنوع آن‌ها در حوزه هیدرولوژی آب‌های سطحی پرداخته می‌شود. این بخش، مدل‌های کلیدی و قابلیت‌های آن‌ها را معرفی می‌کند، همچنین به مقایسه آن‌ها، بحث در مورد مبادلات و کاربردپذیری زمینه‌ای خاص نیز می‌پردازد. همچنین جدول ۲ مروری بر انواع مدل‌ها و کاربرد آن را نشان می‌دهد.

۱.۳ نقش تحولی هوش مصنوعی در سیستم‌های آبی و هیدرولوژی

هوش مصنوعی و فناوری‌های مرتبط با آن، رویکردی نوین در مدیریت منابع آب سطحی ارائه می‌دهند که قابلیت‌های بی‌نظیری برای پردازش حجم عظیم داده‌ها، تشخیص الگوها و پیش‌بینی رفتار سیستم‌های پیچیده آبی فراهم می‌کند. این قابلیت‌ها، هوش مصنوعی را به ابزاری حیاتی برای غلبه بر محدودیت‌های مدل‌سازی سنتی تبدیل کرده‌اند. مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، از جمله شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) و شبکه‌های حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM)، در پیش‌بینی کیفیت آب، پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها و مدیریت منابع آبی عملکرد قابل‌قبولی نشان داده‌اند [52], [53], [54], [55], [56], [57]. شبکه‌های عصبی عمیق، با قابلیت یادگیری خودکار ویژگی‌ها و مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده، نسل جدیدی از مدل‌های همه‌منظوره و کارآمد در زمینه هیدرولوژی محسوب می‌شوند [60], [59], [58]. این مدل‌ها به دلیل توانایی‌شان در استخراج الگوهای پنهان از داده‌های بزرگ، امکان پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و جامع‌تر را فراهم می‌آورند که در گذشته به دلیل پیچیدگی‌های محاسباتی و عدم توانایی روش‌های سنتی در درک روابط غیرخطی، دست‌نیافتنی بود.

مطالعات اخیر نشان می‌دهند که مدل‌های ترکیبی CNN-LSTM نسبت به مدل‌های تک‌جانبه عملکرد بهتری در پیش‌بینی پارامترهای کیفیت آب از جمله اکسیژن محلول و نیتروژن کل دارند. به عنوان نمونه در مطالعه‌ای بر روی رودخانه‌های استرالیا، مدل CNN-LSTM موفق شد جریان آب ساعتی را با دقت بالایی پیش‌بینی کند و در مقایسه با مدل‌های جداگانه

CNN و LSTM، بهبود چشمگیری در ضریب کارایی Nash-Sutcliffe نشان داد. همچنین، در تحقیق دیگری مدل HydroDeep که ترکیبی از مدل‌های هیدرو-اکولوژیکی و CNN-LSTM است، با افزایش بیش از ۱۰ درصدی در کارایی نسبت به الگوریتم‌های CNN و LSTM به تنهایی، اثربخشی خود را در تحلیل داده‌های جغرافیایی و زمانی کیفیت آب چند منطقه‌ای به خوبی نشان داده است [61], [62], [63]. این پیشرفت‌ها حاکی از توانمندی بالای مدل‌های ترکیبی CNN-LSTM در ارتقاء دقت پیش‌بینی و بهینه‌سازی مدیریت آب‌های سطحی، به ویژه در مواجهه با داده‌های متعدد و پیچیده مکان-زمانی می‌باشد که می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری‌های آب و کنترل کیفیت آب منجر شود. ضریب Nash-Sutcliffe ۰/۹۳۳ برای پیش‌بینی سطح آب در مدل CNN و ضریب ۰/۷۵ برای مدل LSTM در پیش‌بینی کیفیت آب که در محدوده "عملکرد بسیار خوب" قرار دارد، نیز شاهد دیگری بر این موضوع است. این عملکرد برتر مدل‌های ترکیبی، ناشی از توانایی آن‌ها در بهره‌برداری هم‌زمان از ویژگی‌های فضایی (توسط CNN) و وابستگی‌های زمانی (توسط LSTM) در داده‌های هیدرولوژیکی است [64], [65], [56].

۲.۳. تکامل و معماری سیستم‌های هوشمند مدیریت آب

این پیشرفت‌های بنیادی در مدل‌سازی هوش مصنوعی، به‌ویژه در دقت پیش‌بینی، زمینه‌ساز توسعه و کارایی بیشتر سیستم‌های هوشمند مدیریت آب شده‌اند. این سیستم‌ها چارچوبی جامع برای یکپارچه‌سازی این فناوری‌ها ارائه می‌دهند. سیستم‌های هوشمند مدیریت آب (Smart Water Management) که بر پایه یکپارچگی هوش مصنوعی، اینترنت اشیا و تحلیل داده‌های بزرگ استوار هستند، رویکردی نوین را در مدیریت منابع آب ارائه می‌دهند. این سیستم‌ها قابلیت پایش به‌هنگام، پیش‌بینی پیشرفته و تصمیم‌گیری انطباقی را فراهم می‌کنند که امکان واکنش سریع به تغییرات محیطی و بحران‌های آبی را میسر می‌سازد [66], [65], [52], [2]. معماری پنج‌لایه سیستم‌های هوشمند آب شامل سنجش داده‌ها، انتقال، پردازش، تحلیل هوشمند و پشتیبانی تصمیم‌گیری است که امکان تعامل مؤثر اجزای مختلف تکنولوژیکی را در سطوح عملیاتی متنوع فراهم می‌کند. این ساختار لایه‌ای، امکان مدیریت پیچیدگی‌ها و مقیاس‌پذیری سیستم را فراهم می‌آورد. مطالعات موردی در سنگاپور و شهرهای منتخب چین نشان می‌دهند که گذار از مدیریت سنتی به حکمرانی هوشمند، عملکرد سیستم و مقاومت آن در برابر اختلالات ناشی از اقلیم را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. این نمونه‌ها تأکید می‌کنند که هوش مصنوعی نه تنها به بهبود کارایی کمک می‌کند، بلکه انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری سیستم‌های آبی را در مواجهه با چالش‌های محیطی افزایش می‌دهد [67].

۳.۳. بهره‌گیری از سنجش از دور و اینترنت اشیا برای جمع‌آوری داده

اثربخشی این سیستم‌های هوشمند مدیریت آب تا حد زیادی به قابلیت‌های قوی جمع‌آوری داده متکی است، جایی که فناوری‌های سنجش از دور و اینترنت اشیا نقش محوری در ارائه اطلاعات گسترده مکانی ایفا می‌کنند. سنجش از دور و فناوری‌های ماهواره‌ای نقش محوری در نظارت بر کیفیت آب و مدیریت منابع آبی ایفا می‌کنند. داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-2، با رزولوشن مکانی ۱۰ متر و بازدید ۱ تا ۲ روزه از کل سطح زمین، امکان پایش گسترده و دوره‌ای پارامترهای کیفیت آب شامل کلروفیل-a، مواد معلق و شفافیت آب را فراهم می‌کنند. این فناوری‌ها قابلیت شناسایی زودهنگام آلودگی‌ها و تشکیل سیستم‌های هشدار اولیه را امکان‌پذیر می‌سازند [69], [68]. این قابلیت برای مدیریت پیشگیرانه آلودگی و واکنش سریع به حوادث زیست‌محیطی بسیار ارزشمند است.

سیستم‌های اینترنت اشیا (IoT) با استقرار شبکه‌ای از سنسورهای متصل در نقاط مختلف سیستم‌های آبی، جمع‌آوری داده‌ها از پارامترهای مهم آبی شامل دبی، فشار، دما، pH، اکسیژن محلول و کدورت را انجام می‌دهند. این داده‌ها از طریق شبکه‌های کم‌مصرف مانند LoRaWAN یا CAT-M1/NB-IoT به پلتفرم‌های ابری منتقل شده و با الگوریتم‌های هوش مصنوعی تحلیل می‌شوند [70], [71], [72]. این هم‌افزایی بین سنسورها، شبکه‌های ارتباطی و هوش مصنوعی، ستون فقرات

سیستم‌های مدیریت آب هوشمند را تشکیل می‌دهد و امکان نظارت پیوسته و جامع بر وضعیت منابع آبی را فراهم می‌آورد. بدون این زیرساخت‌های جمع‌آوری داده، پتانسیل کامل هوش مصنوعی در این حوزه دست‌نیافتنی خواهد ماند.

۴.۳. الگوریتم‌های پیشرفته برای تحلیل و پیش‌بینی داده

در این بخش، مجموعه‌ای متنوع از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای استخراج بینش‌های معنادار در مدیریت منابع آب به کار گرفته شده‌اند.

الگوریتم‌های یادگیری ماشین متنوعی در مدیریت منابع آب کاربرد یافته‌اند. مدل‌های جنگل تصادفی (Random Forest) و درخت تصمیم (Decision Tree) برای طبقه‌بندی کیفیت آب عملکرد مطلوبی با دقت بیش از ۹۷٪ نشان داده‌اند. این مدل‌ها به دلیل توانایی‌شان در مدیریت روابط غیرخطی و ابعاد بالا، و همچنین کاهش بیش‌برازش (overfitting) از طریق میانگین‌گیری درختان تصمیم متعدد، در بسیاری از کاربردها قوی عمل می‌کنند. مدل‌های رگرسیونی مانند پرسپترون چندلایه (MLP) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) در پیش‌بینی شاخص کیفیت آب (WQI) با ضریب تعیین ۹۹/۸٪ موفق عمل کرده‌اند. SVM/SVR به دلیل قدرت تعمیم‌دهی بالا از طریق توابع کرنل، عملکرد عالی در پیش‌بینی نشان می‌دهند [74], [73]. در مقایسه، در حالی که مدل‌هایی مانند جنگل تصادفی و درخت تصمیم اغلب تفسیرپذیری بالاتری دارند و برای کاربردهایی که نیاز به درک مکانیزم تصمیم‌گیری مدل است، مناسب‌ترند، مدل‌های یادگیری عمیق در مدیریت داده‌های پیچیده، حجیم و با ابعاد بالا، به ویژه در استخراج ویژگی‌های خودکار از داده‌های خام، برتری نشان می‌دهند. با این حال، این برتری اغلب با هزینه افزایش پیچیدگی محاسباتی و کاهش تفسیرپذیری همراه است که انتخاب مدل را به یک مبادله بین دقت، کارایی و شفافیت تبدیل می‌کند. انتخاب مدل مناسب به ماهیت داده، نیازهای محاسباتی و اهمیت تفسیرپذیری در زمینه کاربردی خاص بستگی دارد.

۵.۳. مدل‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی برای فرآیندهای هیدرولوژیکی خاص

بر پایه تکنیک‌های پیشرفته تحلیل داده که مورد بحث قرار گرفتند، کاربرد هوش مصنوعی به فرآیندهای هیدرولوژیکی خاص گسترش می‌یابد، به طوری که مدل‌سازی رواناب و مدیریت آب‌های شهری و کنترل رواناب سطحی به عنوان حوزه‌های پژوهشی کلیدی با پیشرفت‌های قابل توجهی در سال‌های اخیر ظاهر شده است.

- مدل‌سازی رواناب

مدل‌سازی رواناب یکی از حوزه‌های مهم در تحلیل هیدرولوژیکی است که به دلیل تأثیر عوامل تأخیری مانند ذوب برف، نیازمند مدل‌هایی با توانایی یادگیری وابستگی‌های بلندمدت می‌باشد. در این زمینه، شبکه‌های LSTM به دلیل قابلیت مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده و حافظه طولانی‌مدت، عملکرد بسیار مناسبی نشان داده‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌های LSTM می‌توانند عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های فیزیکی سنتی مانند SAC-SMA در پیش‌بینی جریان رودخانه داشته باشند [60]. همچنین کاربرد شبکه‌های CNN در ترکیب با LSTM (معماری CNN-LSTM) پیشرفت‌های چشمگیری در مدل‌سازی رواناب داشته است؛ این معماری ترکیبی با بهره‌گیری از داده‌های فضایی مانند بارندگی شبکه‌ای، توانایی بالایی در پیش‌بینی جریان رودخانه ارائه می‌دهد و امکان استخراج ویژگی‌های فضایی توسط CNN و تحلیل وابستگی‌های زمانی توسط LSTM را در یک چارچوب یکپارچه فراهم می‌کند [75], [76]. علاوه بر این، شبکه‌های عصبی ترکیبی مانند ConvLSTM کاربرد گسترده‌ای در مدل‌سازی سیلاب داشته و توانایی بالایی در پیش‌بینی سیلاب‌های آفریقا با ضرایب تعیین R^2 حدود ۰/۹۶ و کارایی Nash-Sutcliffe حدود ۰/۹۵ در شبیه‌سازی رواناب از خود نشان داده‌اند [77].

در همین راستا، مدل‌های Transformer که نخست در پردازش زبان طبیعی مورد استفاده قرار گرفتند، اخیراً توجه زیادی در پیش‌بینی هیدرولوژیکی به خود جلب کرده‌اند. این مدل‌ها با مکانیزم توجه (attention mechanism) قادر به تشخیص وابستگی‌های دوربرد در سری‌های زمانی هستند [80], [79], [78]. مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌های ترانسفورمر عملکرد برتری نسبت به LSTM و سایر مدل‌های بازگشتی در پیش‌بینی جریان رودخانه دارند. به عنوان مثال، مدل BS-Former که ترکیبی از Transformer و تکنیک جداسازی جریان پایه است، نتایج بهتری نسبت به مدل‌های سنتی در پیش‌بینی رواناب بلندمدت ارائه داده و علاوه بر دقت پیش‌بینی، کارایی محاسباتی بالاتری نیز دارد [80].

- مدیریت آب‌های شهری و کنترل رواناب سطحی

در حوزه مدیریت آب‌های شهری و کنترل رواناب سطحی، هوش مصنوعی نقش مهمی ایفا می‌کند. سیستم‌های کنترل به‌هنگام (Real-Time Control) بر پایه الگوریتم‌های یادگیری تقویتی، قادر به بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های زهکشی شهری هستند. این سیستم‌ها با تحلیل داده‌های لحظه‌ای سنسورها و پیش‌بینی شرایط آب‌وهوایی، به‌طور خودکار عملیات دریچه‌ها و پمپ‌ها را تنظیم می‌کنند. پلتفرم InflowGo نمونه برجسته‌ای از کاربرد هوش مصنوعی در این زمینه است که با بهره‌گیری از مدل‌های U-Net توانسته است رفتار هیدرودینامیکی رواناب سطحی و سیستم‌های زهکشی شهری را پیش‌بینی نماید. این روش زمان شبیه‌سازی را نسبت به مدل‌های شبکه‌ای سنتی بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ برابر کاهش می‌دهد [81], [82], [83].

- حل مسائل پیچیده هیدرولوژیکی

توسعه مدل‌های هیبرید که تکنیک‌های یادگیری ماشین را با مدل‌های فیزیکی ترکیب می‌کنند، یکی از روندهای نوین در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است. مدل‌های (PINN) (Physics-Informed Neural Networks) نمونه‌ای از این رویکرد هیبرید هستند که معادلات فیزیکی را در ساختار شبکه‌های عصبی ادغام می‌کنند. این مدل‌ها قادر به حل مسائل پیچیده هیدرولوژیکی مانند جریان آب در خاک‌های غیراشباع با دقت قابل قبولی هستند [86], [85], [84]. این رویکرد ترکیبی، محدودیت‌های مدل‌های صرفاً داده‌محور را در مناطقی با داده‌های محدود یا در سناریوهای خارج از محدوده داده‌های آموزشی برطرف می‌کند و به افزایش قابلیت اطمینان و تفسیرپذیری مدل‌ها کمک شایانی می‌نماید.

جدول ۲ مروری بر مدل‌های هوش مصنوعی/یادگیری ماشین/یادگیری عمیق و کاربردهای آن‌ها در مدیریت آب سطحی

منبع	محدودیت‌های کلیدی/ملاحظات	نقاط قوت کلیدی/عملکرد	مورد استفاده خاص	حوزه کاربرد اصلی	نوع مدل AI/ML/DL
[87]	نیاز به داده‌های زیاد، تفسیرپذیری پایین	دقت بالا، عملکرد برتر پس از تطبیق با داده‌های خاص، نیاز کم به دانش قبلی	پیش‌بینی تقاضای آب شهری، پیش‌بینی ساعتی	پیش‌بینی کمیت آب	Artificial Neural Networks (ANN)
[1]	نیاز به داده‌های طولانی سری زمانی، پیچیدگی محاسباتی	عملکرد برتر در داده‌های سری زمانی، R^2 بالا (تا ۰/۹۹)، دقت بالا (تا ۰/۹۹/۸۳٪)، مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی	پیش‌بینی WQI/WQC، پیش‌بینی جریان رودخانه، پیش‌بینی اوج و زمان سیل	پیش‌بینی کیفیت آب، پیش‌بینی کمیت آب (جریان رودخانه)	Long Short-Term Memory (LSTM)
[88]	حساسیت به پارامترهای تنظیم، نیاز به تنظیم دقیق	عملکرد برتر، دقت بالا (تا ۹۹٪/۸۳٪)، مدیریت مؤثر داده‌های پیچیده و چندمتغیره	پیش‌بینی WQI/WQC	پیش‌بینی کیفیت آب	XGBoost

[89]	عملکرد ضعیف تر در برون یابی، ممکن است برای داده های بسیار نویزی مناسب نباشد	قوی در مدیریت روابط غیر خطی و ابعاد بالا، کاهش بیش برآزش با میانگین گیری درختان تصمیم متعدد، تفسیر پذیری نسبتاً خوب	پیش بینی WQI/WQC، کاهش بیش برآزش در آبیاری، بهینه سازی قطر لوله	پیش بینی کیفیت آب، بهینه سازی شبکه های هوشمند آب	Random Forest (RF)
[87]	حساسیت به انتخاب کرنل و پارامترها، مقیاس پذیری پایین برای داده های بسیار بزرگ	قدرت تعمیم دهی بالا از طریق توابع کرنل، عملکرد عالی در پیش بینی	پیش بینی تقاضای آب، طبقه بندی کیفیت آب	پیش بینی کمیت آب (تقاضا)، پیش بینی کیفیت آب	Support Vector Machines (SVM/SVR)
[1], [87]	نیاز به داده های سری زمانی، تفسیر پذیری محدود	کاهش پیچیدگی مدل با حفظ دقت، مناسب برای تحلیل داده های توالی، عملکرد برتر در پیش بینی تقاضای ساعتی	پیش بینی ساعتی تقاضای آب، بهبود برنامه ریزی آبیاری، پیش بینی جریان رودخانه	پیش بینی کمیت آب (تقاضا)، بهینه سازی آبیاری، پیش بینی جریان رودخانه	Gated Recurrent Unit (GRU)
[90]	نیاز به محیط شبیه سازی دقیق، پیچیدگی بالای آموزش	پتانسیل بالا برای بهبود برنامه ریزی آبیاری، کشف قوانین تصمیم گیری هوشمند در محیط های پویا	برنامه ریزی تطبیقی آبیاری بر اساس بازخورد حسگرها	بهینه سازی آبیاری	Deep Reinforcement Learning (DRL)
[54]	پیچیدگی محاسباتی بالا، نیاز به داده های زیاد برای آموزش	توانایی تشخیص وابستگی های دوربرد با مکانیزم توجه، عملکرد برتر نسبت به LSTM	پیش بینی جریان رودخانه، تحلیل سری های زمانی	پیش بینی هیدرولوژیکی	Transformer Models
[84], [85], [86]	پیچیدگی در فرمول بندی معادلات فیزیکی، نیاز به دانش عمیق دامنه	ادغام دانش فیزیکی با شبکه های عصبی، بهبود دقت در داده های محدود، تفسیر پذیری بالاتر	حل معادلات فیزیکی جریان آب در خاک های غیر اشباع	مدل سازی جریان آب در خاک، مسائل هیدرولوژیکی پیچیده	Physics Informed Neural Networks (PINN)

۴. مطالعات موردی

این بخش چهار مطالعه موردی برجسته و به روز را ارائه می دهد که تأثیر ملموس فناوری های هوش مصنوعی را در سناریوهای مختلف مدیریت آب های سطحی نشان می دهد. این مطالعات از جدیدترین تحقیقات علمی سال های ۲۰۲۳-۲۰۲۵ انتخاب شده اند.

۱.۴ سیستم پیش بینی دقیق سیلاب رودخانه ووپر - آلمان

تحقیقی در سال ۲۰۲۴ منتشر گشت که بر افزایش فراوانی و شدت سیلاب ها به دلیل تغییر اقلیم تأکید می کند و ضرورت سیستم های دقیق پیش بینی سیلاب را برجسته می سازد. اهداف اصلی این پژوهش دوگانه بودند: اول، ایجاد مجموعه داده ای قابل اعتماد از حوزه آبخیز رودخانه ووپر شامل بیش از ۱۹ سال داده سری زمانی از سه نوع سنسور (سطح آب، دبی و بارندگی) در چندین موقعیت؛ دوم، ارزیابی عملکرد پیش بینی نه الگوریتم یادگیری ماشین پیشرفته شامل TimesNet, Pyraformer و SegRNN در ارائه هشدارهای قابل اعتماد سیلاب ۶ تا ۴۸ ساعت قبل از وقوع بر اساس ۴۸ ساعت داده ورودی. مدل های تحقیق که با استفاده از اعتبارسنجی متقابل k-fold آموزش و اعتبارسنجی شده اند، معیارهای عملکرد کمی بالایی کسب کرده اند، با دقتی که به ۹۹/۷٪ می رسد. این یافته ها توازن های حیاتی بین پوشش سنسور و قابلیت اعتماد پیش بینی را برجسته می کند و نشان می دهد که دقت بالا در پیش بینی سیلاب تا حد زیادی به کیفیت و حجم داده های ورودی بستگی دارد [91].

انتشار این مجموعه داده جامع در کنار معیارهای عملکرد، نوآوری بیشتر در مدیریت خطر سیلاب و استراتژی‌های تاب‌آوری را هدف قرار می‌دهد و نیازهای فوری در انطباق با اقلیم را پاسخ می‌دهد.

۲.۴. پیش‌بینی سیلاب رودخانه چناب با استفاده از LSTM - پاکستان

مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۴ انجام شده، رویکردی یکپارچه برای پیش‌بینی سیلاب‌های آینده در رودخانه چناب، پاکستان ارائه می‌دهد. این پژوهش با تحلیل هیدرولوژیکی همراه با مدل‌سازی سری زمانی، رویکرد یکپارچه‌ای را برای پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه به کار می‌گیرد. رواناب روزانه حوزه آبخیز با استفاده از مدل‌سازی Curve Number و با ترکیب آمار مکانی ایستا و داده‌های بارندگی زمانی محاسبه شده است. کاربرد مدل‌سازی سری زمانی از طریق دو الگوریتم یادگیری عمیق LSTM و Handling (ML-GMDH) Multilayer Group Method of Data بررسی شده است.

این رویکرد یکپارچه مجموعه بهینه‌ای از ویژگی‌ها برای پیش‌بینی جریان رودخانه به دست آورده است. این مطالعه اهمیت هوش مصنوعی را در محیط‌هایی با داده کمتر، جایی که فقدان مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق متناسب با پیش‌بینی سیلاب، نیاز فوری به ابزارهای نوآورانه را برجسته می‌کند، نشان می‌دهد. مدل LSTM بهترین نتایج را کسب کرده و مدل ML-GMDH نیز عملکرد امیدوارکننده‌ای از خود نشان داده است [92]. این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب شرایط هیدرولوژیکی محیط (تحلیل هیدرولوژیکی) با هوش مصنوعی می‌تواند بر چالش‌های کمبود داده غلبه کند و راه‌حل‌های قابل اعتمادی برای حوضه‌هایی با داده‌های هیدرولوژیکی بالادست محدود ارائه دهد.

۳.۴. پیش‌بینی ۲۰ ساله جریان آب رودخانه نسا، ایران با LSTM

مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۵ منتشر شده، هدف پیش‌بینی جریان آب با رویکرد LSTM برای ۲۰ سال آینده را دنبال می‌کند. سیلاب‌ها از جمله مخاطرات طبیعی‌اند که تهدیدات مهمی برای زیرساخت‌های شهری و روستایی محسوب می‌شوند. شبکه LSTM به دلیل معماری تکراری و Gatekeeping system متمایز خود، به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود و پتانسیل قابل توجهی در پیش‌بینی هیدرولوژیکی شامل هشدار سیلاب و پیش‌بینی سطح رودخانه نشان داده است. نتایج این مطالعه عملکرد برتر مجموعه تست برای پیش‌بینی جریان روزانه با استفاده از روش LSTM توسعه‌یافته را برجسته می‌کند.

این مطالعه نشان داد که مدل پیشنهادی LSTM نه تنها در تحلیل داده‌های جریان یکنواخت در فصل خشک برتری قابل توجهی نشان می‌دهد، بلکه مهارت قابل ستایشی در تشخیص ویژگی‌های داده در جریان بسیار متغیر فصل مرطوب نیز دارد. پیک جریان استخراج شده از مدل LSTM سپس به نرم‌افزار HEC-RAS وارد شده تا نقشه‌های منطقه سیلاب و نقشه‌های خطر تولید شود [93]. این یکپارچگی هوش مصنوعی با ابزارهای مدل‌سازی هیدرولوژیکی سنتی (HEC-RAS) نشان می‌دهد که هوش مصنوعی می‌تواند به عنوان یک ابزار قدرتمند برای افزایش دقت و کارایی فرآیندهای موجود عمل کند و پیش‌بینی‌های بلندمدت را به ابزارهای عملی مدیریت خطر تبدیل کند.

۴.۴. مدیریت مخازن با سنجش از دور و هوش مصنوعی

تحقیقی که در سال ۲۰۲۵ توسعه یافته، جریان کار منبع باز (Open Source Workflow) را برای نظارت ذخیره آب فعال در مخازن و دریاچه‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و ارتفاع‌سنجی لیزری ارائه می‌دهد. این روش که در آسیای مرکزی، ساحل آفریقا و هند اعمال شده، برآوردهای ماهانه سطح آب و حجم را ارائه می‌دهد و ارزیابی‌های بیلان آب و برنامه‌ریزی آبیاری را در مناطق وسیع بدون تکیه بر داده‌های میدانی پشتیبانی می‌کند. روش پیشرفته مبتنی بر تحلیل تغییرات خط ساحلی است که در تصاویر نوری ماهواره‌ای مشاهده شده‌اند و آنها را با داده‌های ارتفاع ترکیب می‌کند تا بازسازی کند که چقدر آب در طول زمان ذخیره شده است. محققان ابتدا این رویکرد را در سال ۲۰۲۲ معرفی کردند و از مدل ارتفاع دیجیتال مشتق شده از پهپاد

برای مطالعه یک دریاچه بدون ایستگاه اندازه‌گیری در مالی، غرب آفریقا استفاده کردند. در آخرین تحقیق منتشر شده در ۲۰۲۵، روش را یک گام جلوتر برده‌اند. با استفاده از داده‌های ارتفاع از ماهواره ICESat-2، نیاز به هرگونه بررسی میدانی را حذف می‌کند. این پیشرفت، جریان کار آن‌ها را کاملاً مقیاس‌پذیر و انطباق‌پذیر می‌کند و آماده اعمال در مناطق وسیع و شرایط متفاوت است. این سیستم هیچ اندازه‌گیری زمینی نیاز ندارد و رکوردهای ماهانه سطح آب و حجم را فراهم می‌کند. این قابلیت "بدون نیاز به اندازه‌گیری زمینی" به طور قابل توجهی هزینه‌ها و زمان مورد نیاز برای نظارت را کاهش می‌دهد و امکان مدیریت منابع آب را در مناطق دورافتاده یا با زیرساخت‌های محدود فراهم می‌آورد [94].

تنوع جغرافیایی این مطالعات موردی (آلمان، پاکستان، آسیای مرکزی/ساحل/هند، و محیط‌های شهری) نشان‌دهنده کاربرد جهانی هوش مصنوعی در مدیریت آب است. با این حال، این تنوع همچنین به این نکته اشاره دارد که اگرچه تکنیک‌های هوش مصنوعی قابل انتقال هستند، پیاده‌سازی موفق آن‌ها نیازمند انطباق با بستر خاص و در نظر گرفتن دسترسی به داده‌های محلی و زیرساخت‌ها است.

۵. چالش‌ها و چشم‌انداز آینده هوش مصنوعی در مدیریت آب

در حالی که مطالعات موردی پیشین به وضوح قابلیت‌های چشمگیر و پتانسیل تحول‌آفرین هوش مصنوعی را در سناریوهای مختلف مدیریت آب در دنیای واقعی به تصویر می‌کشند، پیاده‌سازی گسترده و مسئولانه آن بدون موانع قابل توجهی نیست. این بخش به بررسی انتقادی چالش‌های چندوجهی می‌پردازد که برای یکپارچه‌سازی موفق هوش مصنوعی در مدیریت پایدار منابع آب باید مورد توجه قرار گیرند.

۱.۵. کیفیت و دسترسی به داده‌ها

یکی از اساسی‌ترین چالش‌های پیش روی کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب سطحی، مسئله کیفیت و دسترسی به داده‌ها است. مطالعات نشان می‌دهند که بیش از ۶۰٪ از مشکلات عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین در زمینه آب ناشی از کیفیت نامناسب داده‌های ورودی است. داده‌های سنسورها اغلب دارای نقص‌های متعدد شامل مقادیر گم‌شده، نویز، عدم تطبیق زمانی و خطاهای سیستماتیک ناشی از نقص سنسورها هستند. در سیستم‌های پایش آب سطحی، ناهمگونی داده‌ها نیز چالش بزرگی محسوب می‌شود، زیرا داده‌ها از منابع متنوعی با فرمت‌ها و رزولوشن‌های مختلف جمع‌آوری می‌شوند [7], [95], [96], [97].

این وضعیت، نیاز به فرآیندهای پیش‌پردازش پیچیده و زمان‌بر را افزایش می‌دهد. تحقیقات نشان می‌دهند که روش‌های پیش‌پردازش می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی داشته باشند، به طوری که انتخاب الگوریتم پیش‌پردازش مناسب می‌تواند دقت تخمین کیفیت آب را تا ۱۵٪ بهبود دهد. این امر نشان می‌دهد که داده‌ها، به عنوان شریان حیاتی هوش مصنوعی، یک گلوگاه اساسی برای اثربخشی آن در مدیریت آب هستند و بدون حکمرانی داده‌ای قوی و زیرساخت‌های مناسب، پتانسیل کامل هوش مصنوعی محقق نخواهد شد [98], [99].

۲.۵. عدم قطعیت و تفسیرپذیری مدل‌ها

مسئله عدم شفافیت در مدل‌های یادگیری عمیق یکی از موانع مهم کاربرد گسترده این تکنولوژی در مدیریت آب سطحی است. مدیران آب نیاز به درک علت پیشنهادات مدل دارند تا بتوانند اعتماد کافی برای اتخاذ تصمیمات مهم داشته باشند. این نیاز به شفافیت، به دلیل ماهیت "جعبه سیاه" بسیاری از مدل‌های پیچیده یادگیری عمیق، به چالش کشیده می‌شود. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی کیفیت آب در مقیاس قاره‌ای با چالش‌های جدی عدم اطمینان،

تفسیرپذیری و مقاومت مواجه هستند که استقرار قابل اعتماد آن‌ها در دنیای واقعی را دشوار می‌سازد [100]. عدم قطعیت مدل نه تنها از عدم کفایت داده‌های آموزشی بلکه از پیچیدگی ذاتی سیستم‌های آبی نیز ناشی می‌شود. سیستم‌های آب سطحی تحت تأثیر فاکتورهای متنوعی از جمله تغییرات اقلیمی، فعالیت‌های انسانی و پدیده‌های هیدرولوژیکی پیچیده قرار دارند که مدل‌سازی دقیق و قابل تفسیر آن‌ها را دشوار می‌سازد [101], [8]. این چالش نه تنها یک مسئله فنی، بلکه یک مانع اجتماعی-فنی برای اعتماد و پذیرش گسترده است؛ زیرا اگر تصمیم‌گیرندگان نتوانند دلیل یک پیش‌بینی هوش مصنوعی را درک کنند، بعید است که برای مدیریت زیرساخت‌های حیاتی به آن تکیه کنند، حتی اگر دقت بالایی داشته باشد. این وضعیت، نیاز مبرم به توسعه هوش مصنوعی قابل تفسیر (XAI) را برجسته می‌سازد.

۳.۵. سایر محدودیت‌های پیاده‌سازی

پیاده‌سازی گسترده هوش مصنوعی در مدیریت آب با چندین محدودیت دیگر نیز مواجه است:

- نیازهای محاسباتی بالا: مدل‌های یادگیری عمیق نیاز به قدرت پردازشی قابل توجه و حافظه زیاد دارند. این نیازها، به‌ویژه برای مدل‌های پیچیده و داده‌های حجیم، می‌تواند هزینه‌بر و از نظر زیرساختی چالش‌برانگیز باشد. علاوه بر این، مصرف آب مجازی خود هوش مصنوعی نیز به یک نگرانی زیست‌محیطی تبدیل شده است، به‌طوری که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۷، مدل‌های هوش مصنوعی بین ۴.۲ تا ۶.۶ میلیارد مترمکعب آب مصرف کنند [102], [7]. این یک چالش متناقض است؛ در حالی که هوش مصنوعی به دنبال افزایش پایداری آب است، ردپای عملیاتی خود آن (مصرف انرژی و آب) یک معضل پایداری جدید ایجاد می‌کند که نیازمند ارزیابی چرخه حیات جامع راه‌حل‌های هوش مصنوعی است.
- محدودیت‌های زیرساختی: در بسیاری از نقاط جهان، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، عدم دسترسی به اینترنت پرسرعت، کمبود سیستم‌های ذخیره‌سازی داده و نبود متخصصان فنی، موانع جدی برای پیاده‌سازی سیستم‌های هوشمند آب محسوب می‌شوند [103].

- تهدیدات امنیت سایبری: با گسترش اینترنت اشیا و سیستم‌های هوشمند آب، تهدیدات امنیت سایبری به یکی از نگرانی‌های اصلی مدیران آب تبدیل شده‌اند. سیستم‌های هوشمند آب در برابر حملات سایبری، نفوذ فیزیکی و مصرف انرژی بالا آسیب‌پذیر هستند [106], [105], [104].

- ملاحظات اخلاقی و اجتماعی: حفاظت از داده‌های شخصی کاربران و اطمینان از اخلاقی بودن استفاده از هوش مصنوعی چالش‌های مهمی محسوب می‌شوند. تحقیقات نشان می‌دهند که چارچوب‌های نظارتی نقش محوری در استقرار مسئولانه هوش مصنوعی و اینترنت اشیا دارند و تضمین حریم خصوصی داده‌ها و استفاده اخلاقی آن‌ها را فراهم می‌کنند [107].

- هزینه‌های بالای پیاده‌سازی و مقاومت در برابر تغییر: هزینه‌های بالای پیاده‌سازی و مقاومت در برابر تغییر: هزینه‌های بالای پیاده‌سازی یکی از موانع اصلی گسترش سیستم‌های هوشمند آب است. بسیاری از سازمان‌های مدیریت آب با محدودیت‌های بودجه‌ای مواجه هستند. همچنین، مقاومت در برابر تغییر و عدم آگاهی ذی‌نفعان از مزایای این تکنولوژی‌ها، موانع اجتماعی مهمی محسوب می‌شوند [108], [7]. مطالعات نشان می‌دهند که آموزش ذی‌نفعان و افزایش آگاهی عمومی از عوامل حیاتی برای موفقیت پروژه‌های هوشمند آب هستند. علاوه بر این، نگرانی‌های اشتغال و تأثیر اتوماسیون بر نیروی کار نیز باید در نظر گرفته شود [104].

این چالش‌های متنوع (فنی، محاسباتی، زیرساختی، اخلاقی، اجتماعی و اقتصادی) مسائل جداگانه‌ای نیستند، بلکه به شدت به هم مرتبط‌اند. برای مثال، محدودیت‌های زیرساختی، چالش‌های محاسباتی را تشدید می‌کنند و ملاحظات اخلاقی بر پذیرش اجتماعی و چارچوب‌های نظارتی تأثیر می‌گذارند. این وضعیت، لزوم اتخاذ یک رویکرد جامع و چندذی‌نفعی را برای پیاده‌سازی هوش مصنوعی ایجاب می‌کند.

۶. نتیجه گیری

با توجه به چالش‌های چندوجهی که مورد بحث قرار گرفتند، درک جامع از وضعیت کنونی و مسیر آینده هوش مصنوعی در مدیریت آب از اهمیت بالایی برخوردار است. این مرور نظام‌مند، با رعایت دقیق دستورالعمل‌های PRISMA 2020 و ترکیب یافته‌های بیش از ۱۰۰ مقاله علمی اخیر، خلاصه‌ای فشرده از پیشرفت‌های کلیدی، چالش‌های پایدار، و مسیرهای حیاتی برای پژوهش‌های آینده ارائه می‌دهد.

۱.۶. خلاصه یافته‌های کلیدی

این مرور نظام‌مند نشان می‌دهد که فناوری‌های هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و یادگیری عمیق نقش محوری در تحول مدیریت منابع آب سطحی ایفا می‌کنند. در مقایسه با روش‌های سنتی که دارای محدودیت‌های ذاتی در سازگاری به‌هنگام، تحلیل پیش‌بینی‌کننده و بهینه‌سازی سیستمی هستند، مدل‌های هوش مصنوعی قابلیت یادگیری خودکار، مدل‌سازی روابط غیرخطی و تحلیل داده‌های بزرگ را ارائه می‌دهند. یافته‌های کلیدی حاکی از آن است که مدل‌های LSTM و Hybrid ML عملکرد برتری در پیش‌بینی و بهینه‌سازی منابع آب دارند، به‌طوری که مدل‌های LSTM توانایی دستیابی به ضریب تبیین بالا (R^2 تا ۰/۹۹) و دقت فوق‌العاده (تا ۰/۹۹/۸٪) را در پیش‌بینی کیفیت آب، جریان رودخانه و شاخص‌های کیفی آب نشان داده‌اند. همچنین، مدل‌های XGBoost، Random Forest و SVM در مدیریت داده‌های پیچیده و چندمتغیره عملکرد مطلوبی داشته‌اند. ادغام فناوری‌های نوظهور مانند اینترنت اشیا (IoT) و سنسج از دور با الگوریتم‌های هوش مصنوعی امکان پایش به‌هنگام و تحلیل داده‌های وسیع از پارامترهای هیدرومتریک و زیست‌محیطی را فراهم کرده است. کاربردهای متنوع این فناوری‌ها از پیش‌بینی تقاضای آب شهری، کیفیت آب رودخانه‌ها تا بهینه‌سازی آبیاری و مدیریت سیلاب گسترش یافته است. با وجود دستاوردهای قابل توجه، چالش‌هایی نظیر کیفیت و دسترسی به داده‌ها، عدم شفافیت و تفسیرپذیری مدل‌ها، موانع فنی و زیرساختی، ملاحظات اخلاقی و اجتماعی، و نیازهای محاسباتی بالا همچنان پابرجا هستند. این مرور یک دیدگاه متعادل ارائه می‌دهد و هم دستاوردهای چشمگیر هوش مصنوعی و هم موانع قابل توجه باقی‌مانده را به رسمیت می‌شناسد.

۲.۶. توصیه‌ها برای پژوهش‌های آینده

بر اساس تحلیل جامع چالش‌ها و روندهای نوظهور، مسیرهای پژوهشی آینده برای استقرار موفق و مسئولانه هوش مصنوعی در مدیریت آب به شرح زیر توصیه می‌شود:

- توسعه هوش مصنوعی قابل تفسیر (XAI): نیاز حیاتی به پژوهش در زمینه روش‌های XAI برای افزایش شفافیت مدل، ایجاد اعتماد در میان ذی‌نفعان و تسهیل تصمیم‌گیری مسئولانه وجود دارد. این امر شامل توسعه روش‌هایی برای کمی‌سازی و انتقال عدم قطعیت مدل نیز می‌شود.
- زیرساخت داده‌ای قوی و حکمرانی داده: سرمایه‌گذاری در جمع‌آوری داده‌های با کیفیت بالا و استاندارد، توسعه تکنیک‌های پیش‌پردازش داده قوی و ایجاد پلتفرم‌های امن برای اشتراک‌گذاری داده‌ها برای غلبه بر چالش‌های کیفیت و دسترسی به داده‌ها ضروری است.
- رویکردهای مدل‌سازی ترکیبی: پژوهش بیشتر در زمینه مدل‌های هوش مصنوعی مبتنی بر فیزیک (PINN) و سایر رویکردهای ترکیبی که نقاط قوت هوش مصنوعی داده‌محور را با اصول فیزیکی هیدرولوژیکی ترکیب می‌کنند، به‌ویژه برای مناطق دارای کمبود داده و فرآیندهای پیچیده، توصیه می‌شود. این رویکردها می‌توانند به افزایش قابلیت اطمینان و تفسیرپذیری مدل‌ها کمک کنند.

- مقیاس‌پذیری و کارایی محاسباتی: پژوهش‌ها باید بر توسعه مدل‌های هوش مصنوعی با کارایی محاسباتی بالاتر و بهینه‌سازی استقرار آن‌ها بر روی زیرساخت‌های متنوع، از جمله بهره‌گیری از محاسبات لبه (Edge computing) یا الگوریتم‌های کم‌مصرف انرژی، متمرکز شوند تا ردپای آب و انرژی هوش مصنوعی کاهش یابد.

- همکاری‌های بین‌رشته‌ای: تقویت همکاری‌های میان متخصصان هوش مصنوعی، هیدرولوژیست‌ها، دانشمندان محیط زیست، دانشمندان اجتماعی، اخلاق‌گرایان و سیاست‌گذاران برای توسعه راه‌حل‌های هوش مصنوعی جامع، اخلاقی و قابل قبول اجتماعی برای مدیریت آب بسیار مهم است. این همکاری‌ها برای درک پیچیدگی‌های فنی و اجتماعی پیاده‌سازی هوش مصنوعی ضروری است.

- چارچوب‌های سیاستی و نظارتی: پژوهش در زمینه توسعه چارچوب‌های نظارتی تطبیقی و دستورالعمل‌های اخلاقی برای استقرار هوش مصنوعی در مدیریت آب، تضمین حریم خصوصی، امنیت و دسترسی عادلانه، حائز اهمیت است.

- ارزیابی تأثیرات اجتماعی-اقتصادی: انجام مطالعات جامع برای ارزیابی تأثیرات اجتماعی-اقتصادی پذیرش هوش مصنوعی، از جمله تغییرات در اشتغال و استراتژی‌های مشارکت جامعه، برای اطمینان از یک انتقال عادلانه توصیه می‌شود.

این مسیرهای پژوهشی، یک برنامه استراتژیک را برای هدایت تحقیقات آینده و پیاده‌سازی عملی هوش مصنوعی در مدیریت پایدار منابع آب ارائه می‌دهند، با این هدف که غلبه بر چالش‌های موجود و بهره‌برداری کامل از پتانسیل تحول‌آفرین این فناوری صورت گیرد.

مراجع

- [1] J. G. Gacu, C. E. F. Monjardin, R. G. T. Mangulabnan, G. C. E. Pugat, and J. G. Solmerin, "Artificial Intelligence (AI) in Surface Water Management: A Comprehensive Review of Methods, Applications, and Challenges," 2025. doi: 10.3390/w17111707.
- [2] E. K. Nti, G. Kranjac-Berisavljevic, and D. A. Doke, "Water security and sustainability issues in Ghana's Pra River Basin: an introduction – projected usefulness of artificial intelligence," *Technol. Sustain.*, vol. 4, no. 1, pp. 77–97, Sep. 2024, doi: 10.1108/TECHS-05-2024-0050.
- [3] I. Krtolica and M. Medojević, "Enhancing Precision in Artificial Intelligence – Based Water Quality Prediction: The Advantages of Hybrid Modeling Approaches– Review*," in *2024 9th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, 2024, pp. 1–5. doi: 10.23919/SpliTech61897.2024.10612379.
- [4] M. H. Al-Adhaileh and F. W. Alsaade, "Modelling and Prediction of Water Quality by Using Artificial Intelligence," *Sustainability*, vol. 13, p. 4259, 2021, doi: 10.3390/SU13084259.
- [5] H. Lu and Xin, "Hybrid decision tree-based machine learning models for short-term water quality prediction.," *Chemosphere*, vol. 249, p. 126169, 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126169.
- [6] X. Xiang, Q. Li, S. Khan, and O. Khalaf, "Urban water resource management for sustainable environment planning using artificial intelligence techniques," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 86, p. 106515, 2021, doi: 10.1016/j.eiar.2020.106515.
- [7] M. Drogkoula, K. Kokkinos, and N. Samaras, "A Comprehensive Survey of Machine Learning Methodologies with Emphasis in Water Resources Management," *Appl. Sci.*, 2023, doi: 10.3390/app132212147.
- [8] S. Biazar, G. Golmohammadi, R. Nedhunuri, S. Shaghaghi, and K. Mohammadi, "Artificial Intelligence in Hydrology: Advancements in Soil, Water Resource Management, and Sustainable Development," *Sustainability*, 2025, doi: 10.3390/su17052250.
- [9] L. Yang, J. Driscoll, S. Sarigai, Q. Wu, C. Lippitt, and M. Morgan, "Towards Synoptic Water Monitoring Systems: A Review of AI Methods for Automating Water Body Detection and Water Quality Monitoring Using Remote Sensing," *Sensors (Basel)*, vol. 22, 2022, doi: 10.3390/s22062416.
- [10] M. Kavya, A. Mathew, P. R. Shekar, and S. P, "Short Term Water Demand Forecast Modelling Using Artificial Intelligence for Smart Water Management," *Sustain. Cities Soc.*, 2023, doi: 10.1016/j.scs.2023.104610.
- [11] N. F. C. Nordin, N. Mohd, S. Koting, Z. Ismail, M. Sherif, and A. El-Shafie, "Groundwater quality forecasting modelling using artificial intelligence: A review," *Groundw. Sustain. Dev.*, 2021, doi: 10.1016/j.gsd.2021.100643.
- [12] Z. Liu, J. Zhou, X. Yang, Z. Zhao, and Y. Lv, "Research on Water Resource Modeling Based on Machine Learning Technologies," *Water*, 2024, doi: 10.3390/w16030472.
- [13] K. P. Wai, M. Y. Chia, C. H. Koo, Y. F. Huang, and W. C. Chong, "Applications of Deep Learning in Water Quality Management: A State-of-the-Art Review," *J. Hydrol.*, 2022, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128332.

The First National Conference on Hydroinformatics and Artificial Intelligence in Water Engineering



- [14] A. Aani, T. Bonny, S. Hasan, and N. Hilal, "Can machine language and artificial intelligence revolutionize process automation for water treatment and desalination?," *Desalination*, 2019, doi: 10.1016/J.DESAL.2019.02.005.
- [15] S. Chakravarthy, N. Bharanidharan, and H. Rajaguru, "A systematic review on machine learning algorithms used for forecasting lake-water level fluctuations," *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, vol. 34, 2022, doi: 10.1002/cpe.7231.
- [16] S. Ozdemir, M. Yaqub, and S. Özkan, "A systematic literature review on lake water level prediction models," *Environ. Model. Softw.*, vol. 163, p. 105684, 2023, doi: 10.1016/j.envsoft.2023.105684.
- [17] T. Rajaei, S. Khani, and M. Ravansalar, "Artificial intelligence-based single and hybrid models for prediction of water quality in rivers: A review," *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 200, p. 103978, 2020, doi: 10.1016/j.chemolab.2020.103978.
- [18] S. Zhu, H. Lu, M. Ptak, J. Dai, and Q. Ji, "Lake water-level fluctuation forecasting using machine learning models: a systematic review," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 27, pp. 44807–44819, 2020, doi: 10.1007/s11356-020-10917-7.
- [19] J. Ighalo, A. Adeniyi, and G. Marques, "Artificial intelligence for surface water quality monitoring and assessment: a systematic literature analysis," *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 7, pp. 669–681, 2020, doi: 10.1007/s40808-020-01041-z.
- [20] L. Pal, S. Saksena, S. Dey, V. Merwade, and C. S. P. Ojha, "An Integrative Framework for Assessment of Urban Flood Response to Changing Climate," *Water Resour. Res.*, vol. 59, no. 8, p. e2023WR034466, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.1029/2023WR034466>.
- [21] A. Ahmed *et al.*, "Machine learning methods for better water quality prediction," *J. Hydrol.*, 2019, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124084.
- [22] W.-J. Niu and Z.-K. Feng, "Evaluating the performances of several artificial intelligence methods in forecasting daily streamflow time series for sustainable water resources management," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 64, p. 102562, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102562.
- [23] A. Ahmed, S. Sayed, A. Abdoulhalik, S. Moutari, and L. Oyedele, "Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities," *J. Clean. Prod.*, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.140715.
- [24] H. Kamyab *et al.*, "The latest innovative avenues for the utilization of artificial Intelligence and big data analytics in water resource management," *Results Eng.*, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101566.
- [25] F. Chang, L.-C. Chang, and J.-F. Chen, "Artificial Intelligence Techniques in Hydrology and Water Resources Management," *Water*, 2023, doi: 10.3390/w15101846.
- [26] Tiyyasha, T. M. Tung, and Z. Yaseen, "A survey on river water quality modelling using artificial intelligence models: 2000–2020," *J. Hydrol.*, vol. 585, p. 124670, 2020, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124670.
- [27] K. Tripathy and A. Mishra, "Deep Learning in Hydrology and Water Resources Disciplines: Concepts, Methods, Applications, and Research Directions," *J. Hydrol.*, 2023, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130458.
- [28] R. Huang, Chengxue, Jun, X. Huangfu, and Q. He, "Machine learning in natural and engineered

The First Natinal Conference on Hydroinformatics and Aritificial Inteligence in Water Engineering



- water systems.,” *Water Res.*, vol. 205, p. 117666, 2021, doi: 10.1016/j.watres.2021.117666.
- [29] V. Kumar, K. V Sharma, T. Caloiero, D. J. Mehta, and K. Singh, “Comprehensive Overview of Flood Modeling Approaches: A Review of Recent Advances,” 2023. doi: 10.3390/hydrology10070141.
- [30] M. Lowe, R. Qin, and X. Mao, “A Review on Machine Learning, Artificial Intelligence, and Smart Technology in Water Treatment and Monitoring,” *Water*, 2022, doi: 10.3390/w14091384.
- [31] S. Rong, R. Wang, and S. Yu, “Recent advances in artificial intelligence and machine learning for nonlinear relationship analysis and process control in drinking water treatment: A review,” *Chem. Eng. J.*, 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.126673.
- [32] S. Safeer *et al.*, “A review of artificial intelligence in water purification and wastewater treatment: Recent advancements,” *J. Water Process Eng.*, 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.102974.
- [33] Z. Ye, S. Yin, Y. Cao, and Y. Wang, “AI-driven optimization of agricultural water management for enhanced sustainability,” *Sci. Rep.*, vol. 14, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-76915-8.
- [34] S. Yang, D. Yang, J. Chen, J. Santisirisomboon, W. Lu, and B. Zhao, “A physical process and machine learning combined hydrological model for daily streamflow simulations of large watersheds with limited observation data,” *J. Hydrol.*, vol. 590, p. 125206, 2020, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125206.
- [35] R. Barzegar, M. Aalami, and J. Adamowski, “Short-term water quality variable prediction using a hybrid CNN–LSTM deep learning model,” *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, vol. 34, pp. 415–433, 2020, doi: 10.1007/s00477-020-01776-2.
- [36] D. Bui, K. Khosravi, J. Tiefenbacher, H. Nguyen, and N. Kazakis, “Improving prediction of water quality indices using novel hybrid machine-learning algorithms,” *Sci. Total Environ.*, vol. 721, p. 137612, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137612.
- [37] K. B. W. Boo, A. El-Shafie, F. Othman, M. Khan, A. Birima, and A. N. Ahmed, “Groundwater level forecasting with machine learning models: A review.,” *Water Res.*, vol. 252, p. 121249, 2024, doi: 10.1016/j.watres.2024.121249.
- [38] A. Wunsch, T. Liesch, and S. Broda, “Groundwater level forecasting with artificial neural networks: a comparison of long short-term memory (LSTM), convolutional neural networks (CNNs), and non-linear autoregressive networks with exogenous input (NARX),” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 25, pp. 1671–1687, 2021, doi: 10.5194/HESS-25-1671-2021.
- [39] S. Khullar and N. Singh, “Water quality assessment of a river using deep learning Bi-LSTM methodology: forecasting and validation,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, pp. 12875–12889, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-13875-w.
- [40] S. Akbarifard, M. R. Madadi, and M. Zounemat-Kermani, “An artificial intelligence-based model for optimal conjunctive operation of surface and groundwater resources,” *Nat. Commun.*, vol. 15, 2024, doi: 10.1038/s41467-024-44758-6.
- [41] G. Fu, Y. Jin, S. Sun, Z. Yuan, and D. Butler, “The role of deep learning in urban water management: A critical review,” *Water Res.*, vol. 223, p. 118973, 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.118973.
- [42] L. Preite and G. Vignali, “Artificial intelligence to optimize water consumption in agriculture:

The First Natinal Conference on Hydroinformatics and Aritificial Inteligence in Water Engineering



- A predictive algorithm-based irrigation management system,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 223, p. 109126, 2024, doi: 10.1016/j.compag.2024.109126.
- [43] Q. Zhang and X.-Y. You, “Recent Advances in Surface Water Quality Prediction Using Artificial Intelligence Models,” *Water Resour. Manag.*, 2023, doi: 10.1007/s11269-023-03666-y.
- [44] T. Aldhyani, M. Al-Yaari, H. Alkahtani, and M. Maashi, “Water Quality Prediction Using Artificial Intelligence Algorithms,” *Appl. Bionics Biomech.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/6659314.
- [45] S. Zhu and A. Piotrowski, “River/stream water temperature forecasting using artificial intelligence models: a systematic review,” *Acta Geophys.*, vol. 68, pp. 1433–1442, 2020, doi: 10.1007/s11600-020-00480-7.
- [46] N. Hassan and C. Woo, “Machine Learning Application in Water Quality Using Satellite Data,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 842, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/842/1/012018.
- [47] T. Miller *et al.*, “Integrating Artificial Intelligence Agents with the Internet of Things for Enhanced Environmental Monitoring: Applications in Water Quality and Climate Data,” *Electronics*, 2025, doi: 10.3390/electronics14040696.
- [48] M. Singh and S. Ahmed, “IoT based smart water management systems: A systematic review,” *Mater. Today Proc.*, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.588.
- [49] A. Egbemhenghe *et al.*, “Revolutionizing Water Treatment, Conservation, and Management: Harnessing the Power of AI-Driven ChatGPT Solutions,” *Environ. Challenges*, 2023, doi: 10.1016/j.envc.2023.100782.
- [50] L. Abdulameer, N. M. L. Maimuri, A. Nama, F. Rashid, H. Mohammed, and A. Al-Dujaili, “Review of Artificial Intelligence Applications in Dams and Water Resources: Current Trends and Future Directions,” *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, 2025, doi: 10.37934/arfmts.128.2.205225.
- [51] M. J. Page *et al.*, “The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews,” *BMJ*, vol. 372, p. n71, Mar. 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [52] R. M. Ikram, R. R. Mostafa, Z. Chen, K. S. Parmar, O. Kisi, and M. Zounemat-Kermani, “Water Temperature Prediction Using Improved Deep Learning Methods through Reptile Search Algorithm and Weighted Mean of Vectors Optimizer,” 2023. doi: 10.3390/jmse11020259.
- [53] G. Hayder, M. Iwan Solihin, and M. R. N. Najwa, “Multi-step-ahead prediction of river flow using NARX neural networks and deep learning LSTM,” *H2Open J.*, vol. 5, no. 1, pp. 43–60, Jan. 2022, doi: 10.2166/h2oj.2022.134.
- [54] D. Karimanzira, J. Weis, A. Wunsch, L. Ritzau, T. Liesch, and M. Ohmer, “Application of machine learning and deep neural networks for spatial prediction of groundwater nitrate concentration to improve land use management practices,” *Front. Water*, vol. Volume 5-, 2023, [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/water/articles/10.3389/frwa.2023.1193142>
- [55] S.-S. Lin, K.-Y. Zhu, and H.-Y. Huang, “Integration of Deep Learning Neural Networks and Feature-Extracted Approach for Estimating Future Regional Precipitation,” 2025. doi: 10.3390/atmos16020165.

The First Natinal Conference on Hydroinformatics and Aritificial Inteligence in Water Engineering



- [56] J. Sha, X. Li, M. Zhang, and Z.-L. Wang, "Comparison of Forecasting Models for Real-Time Monitoring of Water Quality Parameters Based on Hybrid Deep Learning Neural Networks," 2021. doi: 10.3390/w13111547.
- [57] W. Almikaeel, A. Šoltész, L. Čubánová, and D. Baroková, "Hydro-informer: a deep learning model for accurate water level and flood predictions," *Nat. Hazards*, vol. 121, no. 4, pp. 3959–3979, 2025, doi: 10.1007/s11069-024-06949-8.
- [58] G. V Ayzel, "Deep neural networks in hydrology: the new generation of universal and efficient models," *Vestn. Saint Petersburg. Univ. Earth Sci.*, vol. 66, no. 1 SE-, Jan. 2021, doi: 10.21638/spbu07.2021.101.
- [59] M. Sit, B. Z. Demiray, Z. Xiang, G. J. Ewing, Y. Sermet, and I. Demir, "A comprehensive review of deep learning applications in hydrology and water resources," *Water Sci. Technol.*, vol. 82, no. 12, pp. 2635–2670, Aug. 2020, doi: 10.2166/wst.2020.369.
- [60] F. Kratzert, D. Klotz, C. Brenner, K. Schulz, and M. Herrnegger, "Rainfall–runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 22, no. 11, pp. 6005–6022, Nov. 2018, doi: 10.5194/hess-22-6005-2018.
- [61] S. Ghimire, Z. M. Yaseen, A. A. Farooque, R. C. Deo, J. Zhang, and X. Tao, "Streamflow prediction using an integrated methodology based on convolutional neural network and long short-term memory networks.," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 17497, Sep. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-96751-4.
- [62] S.-S. Baek, J. Pyo, and J. A. Chun, "Prediction of Water Level and Water Quality Using a CNN-LSTM Combined Deep Learning Approach," 2020. doi: 10.3390/w12123399.
- [63] A. Sarkar, J. Zhang, C. Lu, and A. Jannesari, "HydroDeep - A Knowledge Guided Deep Neural Network for Geo-Spatiotemporal Data Analysis," 2021. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2010.04328>
- [64] H. Namdari, S. M. Ashrafi, and A. Haghighi, "Deep learning–based short-term water demand forecasting in urban areas: A hybrid multichannel model," *AQUA - Water Infrastructure, Ecosyst. Soc.*, vol. 73, no. 3, pp. 380–395, Feb. 2024, doi: 10.2166/aqua.2024.200.
- [65] S. Krishnan *et al.*, "Smart Water Resource Management Using Artificial Intelligence—A Review," *Sustainability*, 2022, doi: 10.3390/su142013384.
- [66] W. Ismail, N. Niknejad, M. Bahari, R. Hendradi, N. Zaizi, and M. Z. Zulkifli, "Water treatment and artificial intelligence techniques: a systematic literature review research," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, pp. 71794–71812, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-16471-0.
- [67] Y. Dai, Z. Huang, N. Khan, and M. S. Labbo, "Smart Water Management: Governance Innovation, Technological Integration, and Policy Pathways Toward Economic and Ecological Sustainability," 2025. doi: 10.3390/w17131932.
- [68] H. Muhoyi, W. Gumindoga, A. Mhizha, S. N. Misi, and N. Nondo, "Water quality monitoring using remote sensing, Lower Manyame Sub-catchment, Zimbabwe," *Water Pract. Technol.*, vol. 17, no. 6, pp. 1347–1357, Jun. 2022, doi: 10.2166/wpt.2022.061.
- [69] K. J., "Enhancing Urban Water Quality Monitoring with Remote Sensing and Deep Learning: A Scalable Approach for Real-Time Chlorophyll Prediction in Urban Lakes," in *2024 4th International Conference on Mobile Networks and Wireless Communications (ICMNWC)*, 2024, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICMNWC63764.2024.10872278.

The First Natinal Conference on Hydroinformatics and Aritificial Inteligence in Water Engineering



- [70] C. Z. Zulkifli *et al.*, “IoT-Based Water Monitoring Systems: A Systematic Review,” 2022. doi: 10.3390/w14223621.
- [71] V. Lakshmikantha, A. Hiriyanagowda, A. Manjunath, A. Patted, J. Basavaiah, and A. A. Anthony, “IoT based smart water quality monitoring system,” *Glob. Transitions Proc.*, vol. 2, no. 2, pp. 181–186, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gltp.2021.08.062>.
- [72] N. Li, Y. Qi, R. Xin, and Z. Zhao, “Ocean Data Quality Assessment through Outlier Detection-enhanced Active Learning,” in *2023 IEEE International Conference on Big Data (BigData)*, IEEE, Dec. 2023, pp. 102–107. doi: 10.1109/BigData59044.2023.10386969.
- [73] M. Y. Shams, A. M. Elshewey, E.-S. M. El-kenawy, A. Ibrahim, F. M. Talaat, and Z. Tarek, “Water quality prediction using machine learning models based on grid search method,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 83, no. 12, pp. 35307–35334, 2024, doi: 10.1007/s11042-023-16737-4.
- [74] A. T. Ansari, N. Nigar, H. M. Faisal, and M. K. Shahzad, “AI for clean water: efficient water quality prediction leveraging machine learning,” *Water Pract. Technol.*, vol. 19, no. 5, pp. 1986–1996, May 2024, doi: 10.2166/wpt.2024.120.
- [75] S. Pokharel and T. Roy, “A parsimonious setup for streamflow forecasting using CNN-LSTM,” *J. Hydroinformatics*, vol. 26, no. 11, pp. 2751–2761, Oct. 2024, doi: 10.2166/hydro.2024.114.
- [76] K. Ishida, A. Ercan, T. Nagasato, M. Kiyama, and M. Amagasaki, “Use of one-dimensional CNN for input data size reduction in LSTM for improved computational efficiency and accuracy in hourly rainfall-runoff modeling,” *J. Environ. Manage.*, vol. 359, p. 120931, May 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120931.
- [77] E. Obada, E. I. Biao, P. J. Zohou, H. Yarou, F. Z. Hounnondaho, and E. A. Alamous, “Using machine learning and satellite data to improve flood forecasting: the case of the Ouémé basin at the Bétérou outlet,” *Hydrol. Res.*, vol. 56, no. 2, pp. 153–166, Feb. 2025, doi: 10.2166/nh.2025.133.
- [78] B. Z. Demiray, M. Sit, O. Mermer, and I. Demir, “Enhancing hydrological modeling with transformers: a case study for 24-h streamflow prediction,” *Water Sci. Technol.*, vol. 89, no. 9, pp. 2326–2341, Apr. 2024, doi: 10.2166/wst.2024.110.
- [79] B. Z. Demiray and I. Demir, “Towards Generalized Hydrological Forecasting using Transformer Models for 120-Hour Streamflow Prediction,” *arXiv Prepr. arXiv*, 2024.
- [80] S. Wang, W. Wang, and G. Zhao, “A novel deep learning rainfall-runoff model based on Transformer combined with base flow separation,” *Hydrol. Res.*, vol. 55, no. 5, pp. 576–594, May 2024, doi: 10.2166/nh.2024.035.
- [81] N. Ramovha, M. Chadyiwa, F. Ntuli, and T. Sithole, “The Potential of Stormwater Management Strategies and Artificial Intelligence Modeling Tools to Improve Water Quality: A Review,” *Water Resour. Manag.*, vol. 38, no. 10, pp. 3527–3560, 2024, doi: 10.1007/s11269-024-03841-9.
- [82] M. Maiolo *et al.*, “On the Use of a Real-Time Control Approach for Urban Stormwater Management,” 2020. doi: 10.3390/w12102842.
- [83] J. Su, M. Wang, M. A. Razi, N. M. Dom, N. Sulaiman, and L.-W. Tan, “A Bibliometric Review of Nature-Based Solutions on Urban Stormwater Management,” 2023. doi: 10.3390/su15097281.

The First Natinal Conference on Hydroinformatics and Aritificial Inteligence in Water Engineering



- [84] T. Bandai and T. A. Ghezzehei, "Forward and inverse modeling of water flow in unsaturated soils with discontinuous hydraulic conductivities using physics-informed neural networks with domain decomposition," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 26, no. 16, pp. 4469–4495, Aug. 2022, doi: 10.5194/hess-26-4469-2022.
- [85] S. Cedillo, A.-G. Núñez, E. Sánchez-Cordero, L. Timbe, E. Samaniego, and A. Alvarado, "Physics-Informed Neural Network water surface predictability for 1D steady-state open channel cases with different flow types and complex bed profile shapes," *Adv. Model. Simul. Eng. Sci.*, vol. 9, no. 1, p. 10, 2022, doi: 10.1186/s40323-022-00226-8.
- [86] S. Chen *et al.*, "Enhancing runoff predictions in data-sparse regions through hybrid deep learning and hydrologic modeling," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 26450, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-77678-y.
- [87] A. Niknam, H. K. Zare, H. Hosseinasab, A. Mostafaeipour, and M. Herrera, "A Critical Review of Short-Term Water Demand Forecasting Tools—What Method Should I Use?," 2022. doi: 10.3390/su14095412.
- [88] A. Elmotawakkil, N. Enneya, S. K. Bhagat, M. M. Ouda, and V. Kumar, "Advanced machine learning models for robust prediction of water quality index and classification," *J. Hydroinformatics*, vol. 27, no. 2, pp. 299–319, Jan. 2025, doi: 10.2166/hydro.2025.290.
- [89] J. F. Pons-Ausina, S. N. Hosseini, and J. S. Olivares, "AI for Smart Water Solutions in Developing Areas: Case Study in Khelvachauri (Georgia)," *Water*, 2025, doi: 10.3390/w17081119.
- [90] Y. Saikai, A. Peake, and K. Chenu, "Deep reinforcement learning for irrigation scheduling using high-dimensional sensor feedback," *PLOS Water*, vol. 2, no. 9, p. e0000169, Sep. 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000169>
- [91] Y. Hahn, P. Kienitz, M. Wönkhaus, R. Meyes, and T. Meisen, "Towards Accurate Flood Predictions: A Deep Learning Approach Using Wupper River Data," 2024. doi: 10.3390/w16233368.
- [92] K. Aatif, M. A. Fahiem, and F. Tahir, "Forecasting Floods Using Deep Learning Models: A Longitudinal Case Study of Chenab River, Pakistan," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 115802–115819, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3445586.
- [93] F. Kordi-Karimabadi, E. Fadaei-Kermani, M. Ghaeini-Hessaroeiyeh, and H. Farhadi, "Integrating numerical models with deep learning techniques for flood risk assessment," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 8913, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-93465-9.
- [94] C. Madumalsha, I. Nawoda, P. Neluwala, and M. Revel, "Estimation of Water Elevation Using ICESat-2 Satellite," *Eng. J. Inst. Eng. Sri Lanka*, vol. 58, pp. 15–25, Mar. 2025, doi: 10.4038/engineer.v58i1.7674.
- [95] S. Movva, "Analysis of Intelligent Water Management: Integration of IoT and AI in Water and Wastewater Treatment," *Int. J. Sci. Res.*, vol. 13, pp. 1444–1448, Mar. 2024, doi: 10.21275/SR24322073844.
- [96] F. Li *et al.*, "AI-Enhanced SERS with Probe Combinations for Concurrent Identification and Quantification of Coexisting Metal Ions in Water," *Environ. Sci. Technol.*, Aug. 2025, doi: 10.1021/acs.est.5c07025.
- [97] N. Li, Y. Qi, R. Xin, and Z. Zhao, "Ocean Data Quality Assessment through Outlier Detection-

The First Natinal Conference on Hydroinformatics and Aritificial Inteligence in Water Engineering



- enhanced Active Learning,” in *2023 IEEE International Conference on Big Data (BigData)*, IEEE, Dec. 2023, pp. 102–107. doi: 10.1109/BigData59044.2023.10386969.
- [98] J. Panahi, R. Mastouri, and S. Shabanlou, “Influence of Pre-Processing Algorithms on Surface Water TDS Estimation Using Artificial Intelligence Models: A Case Study of the Karoon River,” *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, vol. 47, no. 1, pp. 585–598, 2023, doi: 10.1007/s40996-022-00928-4.
- [99] J. Wu, F. Gao, H. Xu, B. He, and K. Liu, “Dynamic monitoring of open-surface water bodies in the middle reaches of the Tarim River based on the GEE cloud platform,” *AQUA - Water Infrastructure, Ecosyst. Soc.*, vol. 73, no. 10, pp. 2093–2112, Sep. 2024, doi: 10.2166/aqua.2024.233.
- [100] T. Liu *et al.*, “Identifying Trustworthiness Challenges in Deep Learning Models for Continental-Scale Water Quality Prediction,” Mar. 25, 2025. doi: 10.21203/rs.3.rs-6248689/v1.
- [101] X. Yan, T. Zhang, W. Du, Q. Meng, X. Xu, and X. Zhao, “A Comprehensive Review of Machine Learning for Water Quality Prediction over the Past Five Years,” 2024. doi: 10.3390/jmse12010159.
- [102] P. Li, J. Yang, M. Islam, and S. Ren, “Making AI Less ‘Thirsty’: Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models,” Apr. 2023, doi: 10.48550/arXiv.2304.03271.
- [103] Michael Ayorinde Dada, Michael Tega Majemite, Alexander Obaigbena, Onyeka Henry Daraojimba, Johnson Sunday Oliha, and Zamathula Queen Sikhakhane Nwokediegwu, “Review of smart water management: IoT and AI in water and wastewater treatment,” *World J. Adv. Res. Rev.*, vol. 21, no. 1, pp. 1373–1382, Jan. 2024, doi: 10.30574/wjarr.2024.21.1.0171.
- [104] P. Ashoka *et al.*, “Artificial Intelligence in Water Management for Sustainable Farming: A Review,” *J. Sci. Res. Reports*, vol. 30, no. 6 SE-Review Article, pp. 511–525, May 2024, doi: 10.9734/jsrr/2024/v30i62068.
- [105] A. Artelt, M. S. Kyriakou, S. G. Vrachimis, D. G. Eliades, B. Hammer, and M. M. Polycarpou, “A toolbox for supporting research on ai in water distribution networks,” *arXiv Prepr. arXiv2406.02078*, 2024.
- [106] F. Batarseh, A. Kulkarni, C. Sreng, J. Lin, and S. Maksud, “ACWA: an AI-driven cyber-physical testbed for intelligent water systems,” *Water Pract. Technol.*, vol. 18, pp. 3399–3418, Nov. 2023, doi: 10.2166/wpt.2023.197.
- [107] G. Ewing and I. Demir, “An ethical decision-making framework with serious gaming: a smart water case study on flooding,” *J. Hydroinformatics*, vol. 23, no. 3, pp. 466–482, Mar. 2021, doi: 10.2166/hydro.2021.097.
- [108] Mustaq Shaikh and Farjana Birajdar, “Harmony in Hydroinformatics: Integrating AI and IEC for sustainable groundwater conservation in Solapur,” *Int. J. Sci. Res. Arch.*, vol. 11, no. 1, pp. 2163–2175, Feb. 2024, doi: 10.30574/ijsra.2024.11.1.0294.

بسمه تعالی

نخستین کنفرانس ملی هیدروانفورماتیک و هوش مصنوعی در مهندسی آب (۲۶ و ۲۷ شهریور ۱۴۰۴ - دانشگاه فردوسی مشهد)



گواهی ارائه مقاله شفاهی

شماره: ۴۶۲۱
تاریخ: ۱۴۰۴/۰۶/۲۷

بدین وسیله گواهی می‌شود جناب آقای / سرکار خانم

فائزه عطایی، محمدتقی دستورانی، فاطمه عطایی

در نخستین کنفرانس ملی هیدروانفورماتیک و هوش مصنوعی در مهندسی آب، که در تاریخ‌های ۲۶ و ۲۷ شهریور ۱۴۰۴ در دانشگاه فردوسی مشهد برگزار گردید، مقاله‌ای با عنوان

مروری بر هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب سطحی با تمرکز بر پیشرفت‌های اخیر، چالش‌ها و مسیرهای آینده

را به صورت **شفاهی** ارائه نموده‌اند. بدین وسیله مشارکت ارزنده ایشان در ارائه یافته‌های علمی و پژوهشی مورد تأیید قرار گرفته و تلاش‌های ایشان در ارتقای دانش و تبادل تجارب در فناوری‌های داده‌محور و هوشمند در مهندسی آب ارج نهاده می‌شود.

دکتر سعیدرضا خداشناس
دبیر علمی کنفرانس



فراسان

سازمان آب برق خوزستان

