The University of Tehran Press

Natural Resources Governance
Home Page: https://jnrg.ut.ac.ir/

Online ISSN: 3060-7183

Investigating a Smart Hybrid Model and Metaverse Based on Artificial Intelligence-Augmented Reality to Improve Water Governance Components in Iran

Haniyeh Mohammadi[1], Mohammad Ansari ghojghar[2*]

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Corresponding Author, Department of reclamation of arid and mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: ansari.ghojghar@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received 22 November, 2024
Revised 20 December, 2024
Accepted 29 January, 2025
Published online 10 March 2025

Keywords:
Metaheuristic Algorithms,
Metaverse,
Smart Decision-Making,
Stakeholder Participation,
Virtual Reality,
Water Governance.

ABSTRACT

Given the existing challenges in water governance, such as a lack of transparency, insufficient public participation, weak accountability, and low effectiveness, there is an increasing need to leverage innovative technological tools. Artificial Intelligence (AI) has the potential to enhance decision-making within water governance systems by analyzing complex data, forecasting phenomena such as drought, and optimizing resource allocation. Additionally, the Metaverse creates immersive, interactive, and multisensory environments that offer new opportunities for education, simulation, and enhanced stakeholder engagement. This study employs a descriptive-analytical methodology and conducts a systematic review of over 100 scientific sources published between 2010 and 2025 in the fields of AI, the Metaverse, and water governance. The findings indicate that the combined use of AI and Metaverse technologies can significantly improve efficiency, transparency, and accountability in water governance processes. For instance, simulating phenomena such as drought in virtual environments can make their consequences more tangible to citizens, thereby encouraging responsible behaviors such as water conservation. Moreover, in critical situations like water scarcity, these technologies facilitate participatory decision-making and support the development of more intelligent and sustainable strategies. Furthermore, the integration of AI and the Metaverse can help bridge the gap between different levels of policymaking and implementation, paving the way for a transition toward smart and integrated governance models. A limitation of this study is the lack of localized data for practical assessment of the proposed framework, which should be addressed in future research.

Cite this article: Mohammadi, H, Ansari ghojghar, M. (2025). Investigating a Smart Hybrid Model and Metaverse Based on Artificial Intelligence-Augmented Reality to Improve Water Governance Components in Iran. *Natural Resources Governance*. 1 (4), 371-388.

© Haniyeh Mohammadi, Mohammad Ansari ghojghar
Publisher: University of Tehran Press. DOI: http//doi.org/10.22059/jnrg.2025.393575.1031

نشریهٔ حکمرانی منابع طبیعی
سایت نشریه: https://jnrg.ut.ac.ir/
شاپا الکترونیکی: ۷۱۸۳- ۳۰۶۰
انتشارات دانشگاه تهران

بررسی مدل هیبریدیِ هوشمند و متاورس پایه AI-AR به منظور بهبود مؤلفه‌های حکمرانی آب در ایران

هانیه محمدی[۱]، محمد انصاری قوجقار[۲*]

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۲. نویسنده مسئول گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ansari.ghojghar@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰

کلیدواژه:
الگوریتم‌های فراکاوشی،
تصمیم‌گیری هوشمند،
حکمرانی آب،
متاورس،
مشارکت ذینفعان،
واقعیت مجازی.

چکیده

با توجه به چالش‌های موجود در حکمرانی آب از جمله ضعف در شفافیت، مشارکت عمومی، پاسخ‌گویی و اثربخشی، ضرورت بهره‌گیری از ابزارهای فناورانه جدید احساس می‌شود. هوش مصنوعی از طریق تحلیل داده‌های پیچیده، پیش‌بینی پدیده‌هایی مانند خشکسالی و بهینه‌سازی تخصیص منابع، ظرفیت تقویت تصمیم‌سازی در سیستم حکمرانی آب را دارد. همچنین، متاورس با ایجاد محیط‌های تعاملی و چندحسی، امکان آموزش، شبیه‌سازی و افزایش مشارکت ذی‌نفعان را در سطحی نوین فراهم می‌سازد. مطالعه حاضر به‌روش توصیفی-تحلیلی و با مرور نظام‌مند بیش از ۱۰۰ منبع علمی در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ در حوزه‌های هوش مصنوعی، متاورس و حکمرانی آب انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بهره‌گیری هم‌زمان از هوش مصنوعی و متاورس می‌تواند نقشی کلیدی در ارتقای کارایی، شفافیت و پاسخ‌گویی در فرآیند حکمرانی منابع آب ایفاء کند. برای نمونه، از طریق شبیه‌سازی پدیده‌هایی مانند خشکسالی در محیط‌های مجازی، می‌توان پیامدهای آن را برای شهروندان ملموس‌تر ساخت و انگیزه آن‌ها برای رفتارهای مسئولانه‌تر مانند صرفه‌جویی در مصرف آب را افزایش داد. همچنین، این فناوری‌ها در شرایط بحرانی مانند کم‌آبی، با فراهم‌سازی امکان تصمیم‌سازی مشارکتی، می‌توانند راهبردهای هوشمندانه‌تر و پایدارتر ارائه دهند. افزون بر این، تلفیق این دو فناوری می‌تواند شکاف بین سطوح مختلف سیاست‌گذاری و اجرا را کاهش داده و و مسیر حرکت به‌سوی الگوهای حکمرانی هوشمند را هموار کند. از جمله محدودیت‌های پژوهش، کمبود داده‌های بومی برای ارزیابی عملی چارچوب پیشنهادی است که در پژوهش‌های آتی باید مورد توجه قرار گیرد.

استناد: محمدی، هانیه؛ انصاری قوجقار، محمد (۱۴۰۳). بررسی مدل هیبریدیِ هوشمند و متاورس پایه AI-AR به منظور بهبود مؤلفه‌های حکمرانی آب در ایران، ۱(۴) ۳۸۸-۳۷۱.

© هانیه محمدی، محمد انصاری قوجقار
DOI: http//doi.org/10.22059/jnrg.2025.393575.1031
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

جهان مدرن با مسائل زیست‌محیطی متعددی مواجه است (Brauch et al., 2008; Crompton & Kasser, 2009; Dabelko & Conca, 2019) که مخاطرات جدی برای اکوسیستم‌ها (Arthington et al., 2006; Palomino et al., 2017)، سلامت عمومی (Hu et al., 2017; Mwangi et al., 2016) و اقتصاد جهانی (Mellor, 1988; Mabogunje, 2002; Masron & Subramaniam, 2019) به همراه دارند. مسائلی مانند تغییرات اقلیمی (Patz et al., 2014; Solecki, 2012; Roberts & Donoghue, 2013)، آلودگی آب (Zhou et al., 2014; Han et al., 2016; Tang et al., 2022)، جنگل‌زدایی (Carr et al., 2005; Haigh et al., 2004; Kumar et al., 2022) و کاهش تنوع زیستی (Rands et al., 2010; Arora et al., 2018) با سرعتی بی‌سابقه در حال تشدید هستند که این امر ناشی از صنعتی‌شدن (Kim, 2006; Perreault et al., 2015; Patnaik et al., 2018)، شهرنشینی (Keiner, 2016; Dodman, 2016; Akash et al., 2018) و بهره‌برداری ناپایدار از منابع طبیعی (Iyiola et al., 2023; Numbere & Maduike, 2022) است.

برای مثال، افزایش دمای جهانی الگوهای آب‌وهوایی را تغییر داده و به وقوع پدیده‌های شدید جوی مانند طوفان‌ها، خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها منجر شده است که در نتیجه، تولید محصولات کشاورزی را مختل کرده و امنیت آبی را به خطر انداخته‌اند (Nukusheva et al., 2021; Xiong & Yang, 2024; Sulistiawati, 2024; Malik & Ford, 2024). به همین ترتیب، آلودگی منابع آبی ناشی از رواناب‌های کشاورزی، تخلیه‌های صنعتی و فاضلاب تصفیه‌نشده، نه‌تنها اکوسیستم‌های آبی را تهدید می‌کند، بلکه برای جوامعی که به این منابع وابسته‌اند، مخاطرات جدی سلامتی به همراه دارد (du Plessis & du Plessis, 2019; Singh et al., 2022). برای مقابله با این چالش‌های پیچیده و به‌هم‌پیوسته، تصمیم‌گیری به‌موقع و دقیق در علوم زیست‌محیطی از اهمیت حیاتی برخوردار است.

در چهار دهه گذشته، پژوهشگران توجه فزاینده‌ای به مسائل توسعه پایدار در خدمات آبی، به‌ویژه حکمرانی، مدیریت و راهکارهای فنی معطوف کرده‌اند (de Silva et al., 2020; Lawson et al., 2020; Schiedek, 2020; Tosun & Scherer, 2020; Glass & Newig, 2019). سازمان همکاری و توسعه اقتصادی[1] (2011; 2015) و برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد[2] (2020) نقش حیاتی حکمرانی آب در مسائل پایداری را مورد تأکید قرار داده‌اند. OECD (2011; 2015) شیوه‌های حکمرانی مطلوب را برای مقابله با بحران‌های آبی معرفی کرده است، زیرا شکاف‌های موجود در حکمرانی، طراحی و اجرای راهکارهای فنی و غیرفنی تعیین‌شده در سیاست‌های آبی را با چالش مواجه می‌کند. در همین راستا، مسائل مربوط به پایداری آب در دستور کار ۲۰۳۰ سازمان ملل[3] و ۱۷ هدف توسعه پایدار[4] آن گنجانده شده است. این دستور کار، چارچوب مشترکی برای سنجش توسعه پایدار از منظر اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه می‌دهد (Glass & Newig, 2019; Woodhouse & Muller, 2017).

بخش قابل‌توجهی از مطالعات مرتبط با حکمرانی آب بر دستیابی به اهداف مدیریت یکپارچه منابع آب[5] متمرکز است (Benson et al., 2020; Nshimbi, 2019; Bertule et al., 2018; Hussein et al., 2018). بااین‌حال، حکمرانی آب مترادف با مدیریت آب نیست. مدیریت آب به فعالیت‌های عملیاتی مانند تأمین، مدیریت فاضلاب و بازیافت اشاره دارد (Romano & Akhmouch, 2019)، درحالی‌که حکمرانی آب شامل تعیین اولویت‌ها، شناسایی مناسب‌ترین ساختار نهادی برای تأمین این اولویت‌ها و تقسیم مسئولیت‌ها میان ذی‌نفعان مختلف در فرآیندها است (Homsy & Warner, 2020; Gupta & Pahl-Wostl, 2013).

اگرچه هدف اسناد مهم بین‌المللی، مانند توافق پاریس، مجمع جهانی آب و اهداف توسعه هزاره، همواره تعیین اهداف، شاخص‌ها و ضرب‌الاجل‌های مشخص بوده است، اما رشد مداوم جمعیت، شهرنشینی، آلودگی و همچنین وقوع بلایای اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی، ازجمله خشکسالی، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و افزایش خطر سیلاب‌ها، یافتن مدل‌هایی مسئولانه، پایدار و تاب‌آور

---

[1]. Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)
[2]. United Nations Environment Programme (UNEP)
[3]. For more details on SDGs, please see https://www.un.org/sustainabledevelopment/development-agenda.
[4]. Sustainable Development Goals (SDGs)
[5]. IWRM

برای مصرف آب را به یک چالش همیشگی تبدیل کرده است. در این چالش، حکمرانی نقش حیاتی ایفاء می‌کند (OECD, 2015; UNEP, 2011; Global Water Partnership, 2002). همان‌طور که سازمان آموزشی، علمی و فرهنگی ملل متحد (یونسکو) در سال ۲۰۰۶ بیان کرده است: «بحران آب، تا حد زیادی یک بحران حکمرانی است» و حکمرانی مطلوب برای مدیریت مؤثر و بلندمدت منابع آب ضروری است.

بااین‌حال، حکمرانی آب هنوز تعریف واحد و مشخصی ندارد. در سال ۱۹۹۷، بخش تأمین ملل متحد[1] (UNPD) حکمرانی را این‌گونه تعریف کرد: «اعمال قدرت سیاسی، اقتصادی و اداری در مدیریت امور یک کشور در تمامی سطوح. حکمرانی شامل سازوکارها، فرآیندها و نهادهای پیچیده‌ای است که از طریق آن‌ها، شهروندان و گروه‌ها منافع خود را بیان می‌کنند، اختلافات را حل‌وفصل می‌کنند و حقوق و تعهدات قانونی خود را اعمال می‌کنند».

به گفته بسیاری از پژوهشگران، پیچیدگی حکمرانی مستلزم رویکردی چندسطحی است که باید از مدل‌های سلسله‌مراتبی و دولت‌محور یا راهکارهای مبتنی بر بازار فاصله گرفته و به سمت حکمرانی توزیع‌شده حرکت کنیم، جایی که دولت، حکومت‌های محلی، کسب‌وکارهای خصوصی، جامعه مدنی و سایر نهادها نقش‌ها و مسئولیت‌ها را به‌صورت مشترک بر عهده می‌گیرند. بنابراین، بیش از هر زمان دیگری مشخص شده است که ایجاد یک نظام حکمرانی آبِ مؤثر و پایدار، چالشی است که یک بازیگر واحد نمی‌تواند به‌تنهایی از عهده آن برآید (Homsy & Warner, 2020; Jiménez et al., 2020; Romano & Akhmouch, 2019; Gupta & Pahl-Wostl, 2013).

ازاین‌رو، چالش اصلی همچنان این است که «چه چیزی باید در چه سطحی حکمرانی شود و چه نوع هماهنگی میان سطوح مختلف برای دستیابی به مدیریت پایدار موردنیاز است» (Gupta & Pahl-Wostl, 2013). محققان و متخصصان بر این باورند که این امر مستلزم مشارکت طیف گسترده‌ای از بازیگران، ازجمله دولت و جامعه تحت حکمرانی آن، است و به‌شدت به عوامل زمینه‌ای، مانند هنجارهای اقتصادی، فرهنگی و سیاسی و همچنین رفتار قانون‌گذاران و دولت‌ها در هر کشور بستگی دارد.

در ایران حکمرانی مؤثر در منابع آب به‌دلیل محدودیت‌های طبیعی آب، توزیع نامتوازن جغرافیایی و فشارهای ناشی از رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی اهمیت ویژه‌ای دارد. کشور ایران با اقلیم خشک و نیمه‌خشک خود، با بحران‌های مزمن کم‌آبی و خشکسالی مواجه است که نیاز به مدیریت دقیق و پایدار منابع آب را ضروری می‌سازد. مدیریت ناصحیح می‌تواند به افزایش آلودگی منابع آب، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و تخریب اکوسیستم‌های آبی منجر شود. علاوه بر این، با توجه به وابستگی کشاورزی و صنایع به منابع آب، حکمرانی مؤثر به تأمین امنیت غذایی و توسعه اقتصادی کشور کمک می‌کند. بنابراین اتخاذ سیاست‌های جامع مبتنی بر داده‌های علمی برای مدیریت بهینه منابع آب و پیشگیری از بحران‌های آبی، به حفظ منابع طبیعی، ارتقای کیفیت زندگی و تحقق اهداف توسعه پایدار در ایران کمک خواهد کرد (رهبرقاضی و طالعی حور، ۲۰۲۴).

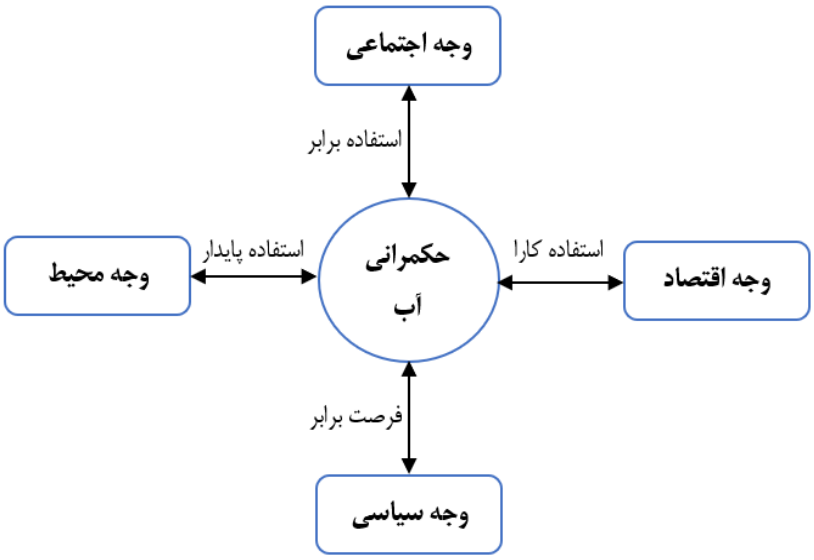
حکمرانی مطلوب آب رویکردی است چندبعدی با ماهیتی شبکه‌ای که هدفش ارائه چارچوبی برای ارتقاء و بهبود مدیریت مشکلات، معضلات و خطرات پیش روی حوزه آب است. هدف غایی آن تشکیل و پرورش مدیریتی به‌هم پیوسته، جامع و یکپارچه در حوزه آب می‌باشد. در واقع حکمرانی آب در یک جامعه و کشور، منبعث و تربیت‌یافته حکمرانی عمومی آن جامعه است. از طرفی حکمرانی آب به‌عنوان زیرشاخه‌ای از حکمرانی توسعه نیز محسوب می‌شود. از اهداف حکمرانی خوبِ آب، تولید گفتمانِ توسعهِ آب‌محور از طریق تأکید بر توسعه مبتنی بر آمایش آب‌محور با به کارگیری و تقویت فرآیندهای اجتماعی و شایسته در این حوزه است. افزایش کارآمدی حکمرانی آب از طریق اصطلاح فرآیندها و افزایش هماهنگی در سطوح لایه‌های مختلف و سازگار نمودن مدیریت آب با چالش‌های نوظهور اقتصادی، اجتماعی و حاکمیتی صورت خواهد پذیرفت. از طرفی مدیریت در حوزه آب موفق نخواهد بود مگر اینکه حرکت خود را بر مدار افزایش مشروعیت مبتنی بر اعتماد عمومی و افزایش مشارکت اجتماعی قرار دهد.

[1]. United Nations Procurement Division

بدیهی است پاسخ‌گویی شفاف در مقابل نهادهای قانونی و همه ذی‌نفعان موجب ارتقاء کارآیی حکمرانی آب خواهد شد (Rogers & Hall, 2003).

پیام یک حکمرانی خوب دخالت و مشارکت شهروندان در فرآیند توسعه است. مشارکت، دخالت و تعامل کلیه شهروندان در کلیه سیاست‌گذاری‌ها و تصمیم‌گیری‌های اجتماعی، اقتصادی، سیاسی و عمرانی، تدوین فرآیندها، قوانین و مدیریت نهادهای مرتبط با راهبری سیستم‌های منابع و خدمات آب، منافع درازمدت کلیه بازیگران و ذی‌نفعان این عرصه را تضمین خواهد نمود. انتظار افزایش مطلوبیت حکمرانی آب در کشور بدون افزایش آگاهی و دانش کنش‌گران اصلی این عرصه امری سخت و دست‌نیافتنی خواهد بود (Allan, 2005). شناخت صحیح و ارزیابی اصولی ساختار حکمرانی آب در کشور، کمک زیادی به شناسایی مشکلات و حل معضلات و چالش‌های آب خواهد کرد. افزون بر این، ساختار حکمرانی آب در ایران با چالش‌هایی همچون تمرکزگرایی نهادهای تصمیم‌گیر، تداخل وظایف، ضعف هماهنگی میان نهادها، و ناکارآمدی سازوکارهای پاسخ‌گویی مواجه است؛ مسائلی که موجب کندی واکنش به بحران‌های آبی و کاهش اثربخشی تصمیمات می‌شوند (Ketabchy, 2021).

مردم باید بدانند در نهایت هزینه اداره امور فعالیت‌ها و نهادهای مدیریت آب کشور از جیب آن‌ها پرداخت خواهد شد. حالا چه به صورت صریح مانند پرداخت آب‌بها و هزینه‌های خرید خدمات آب و چه به صورت ضمنی مانند هزینه‌های سرمایه‌گذاری در قالب اعتبارات عمرانی دولتی و یا حتی غیرضمنی مانند بار مالی ناشی از سوءمدیریت‌ها در این عرصه. بنابراین مردم باید خود را دارای نقش محوری و کارفرمای حقیقی حوزه آب کشور تلقی کنند. ساختار گزارش‌دهی ادارات و نهادها در ایران یک ساختار خودگزارشی[1] است. این امر باید با راه‌اندازی نهادهای مستقل که وظیفه آن‌ها تهیه اطلاعات و گزارش‌های فنی است، اصلاح شود. به نظر می‌رسد ایده حکمرانی خوب آب در خیلی از کشورها هنوز آغاز نشده است. در شکل ۱ وجوه مختلف حکمرانی آب به صورت مختصر ارائه شده است (Allan, 2005).



شکل ۱. وجوه حکمرانی آب (Tropp, 2006)

تکنولوژی امروزی هوش مصنوعی کمتر از ۱۰۰ سال قدمت دارد، اما ظهور آن منجر به ایجاد کاربردهایی شده است که تأثیرات عمیقی بر زندگی ما دارند. این فناوری بر تکرار و اصلاح هوش انسانی از طریق فناوری‌های مصنوعی تمرکز دارد تا ماشین‌های

[1]. Self-reported

هوشمند اختراع کند (Mohasses, 2019). تعریف هوش مصنوعی[1] (AI) بسته به سازمان و زمینه‌ای که در آن از این عبارت استفاده می‌شود، متفاوت است. طبق تعریف سازمان همکاری و توسعه اقتصادی که در سال ۲۰۱۹ ارائه کرده است: «سیستم هوش مصنوعی یک سیستم مبتنی بر ماشین است که برای مجموعه‌ای از اهداف تعریف‌شده توسط انسان، می‌تواند پیش‌بینی‌ها، توصیه‌ها یا تصمیمات تاثیرگذار بر محیط‌های واقعی یا مجازی اتخاذ کند. سیستم‌های هوش مصنوعی برای فعالیت با سطوح مختلفی از خودمختاری طراحی شده‌اند» (OECD, 2019).

هوش مصنوعی در طول ۶۰ سال گذشته مورد تحقیق قرار گرفته است و مبنای آن در رشته‌های دیرینه‌ای همچون علوم، ریاضیات، فلسفه، روانشناسی، زبان‌شناسی و علوم کامپیوتر است (Darlingtom, 2017). نقطه عطف مهم در این حوزه زمانی بود که آلن تورینگ[2] (۱۹۵۴-۱۹۱۲) ماشین تورینگ (۱۹۳۷) را معرفی کرد، مدلی ایده‌آل از کامپیوتر هوشمند که نظریه اتوماتا[3] را توسعه داد و به‌تبع آن، سایر محققان علاقه‌مند به ساخت «ماشین‌های تفکر» شدند که قابلیت تفکر مانند انسان‌ها را داشتند (Russell & Norvig, 2021). هوش مصنوعی سه دوره تحقیقاتی را تجربه کرده است؛ اولین دوره با محدودیت‌های ظرفیت محاسباتی و قدرت پردازشی کامپیوترها مواجه بود؛ دوره دوم شاهد توسعه شبکه‌های عصبی مصنوعی بود که مشابه مغز انسان عمل می‌کردند و کامپیوترها با ظرفیت محاسباتی بهتری تولید شدند؛ دوره سوم تحقیقاتی که اکنون غالب است، توسط یادگیری عمیق[4] (DL) هدایت می‌شود که منجر به کاربرد بیشتر آن در دنیای واقعی شده است (Darlingtom, 2017). وقتی صحبت از کاربرد آن می‌شود، هوش مصنوعی هنوز در برخی زمینه‌ها کمبود دارد چرا که به دلایل مختلفی مورد تحقیق قرار نگرفته است؛ از منابع محدود گرفته تا ترس از ریسک در قابلیت اجرایی آن. اگر تعامل با اشیاء مختلف مانند دستگاه‌های پوشیدنی، وسایل نقلیه، حسگرهای صنعتی، گوشی‌های هوشمند، دوربین‌های نظارتی فعال شود، هوش مصنوعی می‌تواند به‌عنوان یک کاتالیزور در توسعه بسیاری از خدمات نوآورانه برای شهروندان، دولت‌ها و کسب‌وکارها عمل کند (Kankanhalli et al., 2019).

با تغییرات سریع فناوری دیجیتال، برای دولت‌ها اجتناب‌ناپذیر است که روش‌های سنتی خود را نوآوری کنند تا به مشارکت بهتر شهروندان، مسئولیت‌پذیری و تعامل‌پذیری دست یابند؛ و این امر با مقابله با محیط پیچیده و در حال تغییر و تبدیل شدن به یک سازمان مقاوم از طریق استفاده از فناوری‌های هوشمند که می‌توانند به‌عنوان تسهیل‌کنندگان نوآوری، پایداری، رقابت‌پذیری و قابلیت زندگی عمل کنند، قابل انجام است (Kankanhalli et al., 2019).

متاورس، واژه‌ای است که برای توصیف یک دنیای دیجیتال وسیع و به هم پیوسته استفاده می‌شود، به‌سرعت در حال تحول چشم‌انداز فناوری است. این فضای دیجیتال، واقعیت افزوده (AR)[5] و واقعیت مجازی (VR)[6] را ادغام می‌کند تا تجربیات غوطه‌ورکننده‌ای فراهم کند که می‌توانند تعاملات دنیای فیزیکی را شبیه‌سازی، تقویت یا حتی فراتر از آن ببرند (Aidonojie et al., 2023a). متاورس، با قابلیت‌های غوطه‌ورکننده و دسترسی وسیع خود، پلتفرم جدیدی برای پیشبرد مسائل حیاتی ارائه می‌دهد. کاربران می‌توانند با محیط‌های مجازی که اکوسیستم‌های دنیای واقعی را شبیه‌سازی می‌کنند، تعامل داشته باشند، اثرات تخریب محیط‌زیست را به‌طور مستقیم تجربه کنند و درک عمیق‌تری از چالش‌های اکولوژیکی پیدا کنند (Aidonojie et al., 2023b). علاوه بر این، از طریق شبیه‌سازی‌های واقعیت مجازی، ابزارهای واقعیت افزوده و برنامه‌های آموزشی غوطه‌ورکننده، کاربران می‌توانند راه‌حل‌های پایدار را کشف و آزمایش کنند و به این ترتیب از پذیرش رفتارهای دوستدار محیط‌زیست در زندگی روزمره حمایت کنند (Aidonojie et al., 2020).

---

1. Artificial Intelligence
2. Alan Turing
3. Automata Theory
4. Deep Learning
5. Augmented Reality
6. Virtual Reality

واقعیت مجازی یک تجربه شبیه‌سازی‌شده است که از طریق ترکیب سخت‌افزار و نرم‌افزار می‌تواند مشابه یا کاملاً متفاوت از دنیای واقعی باشد. این فناوری به کاربران اجازه می‌دهد تا در داخل یک محیط شبیه‌سازی‌شدهِ ساخته شده، توسط برنامه‌های کامپیوتری تعامل داشته باشند. فناوری VR می‌تواند یک منطقه خاص ایجاد کند که مشابه دنیای واقعی باشد و ویژگی‌هایی همچون دید استریوسکوپی، شنوایی، لامسه و تجربه را فراهم کند (Mandal, 2013; Zhou & Deng, 2009). فناوری VR در حال رشد است و با ظهور متاورس، یک دوران جدید از اتصال دیجیتال را به ارمغان می‌آورد. این فناوری می‌تواند در موضوعات مختلفی مانند آموزش، کسب‌وکار، بازی، پزشکی، آموزش کارکنان جدید، سرگرمی، شبکه‌سازی اجتماعی، راهنمایی گردشگری و غیره به‌طور مؤثر استفاده شود (Kamińska et al., 2019; Kaviyaraj & Uma, 2022; Sargsyan & Seals, 2022). نویسندگان شبیه‌سازهایِ VRغوطه‌ور را ارائه دادند که به بازیکنان اجازه می‌دهد محیط‌های کاری خطرناک را تجربه کنند تا از وقوع حوادث در این محیط‌ها جلوگیری کرده و آن‌ها را کاهش دهند (Nedel et al., 2016). همچنین، در یک پژوهش، طراحی یک شبیه‌سازی واقعیت مجازی برای سناریوی تخلیه اضطراری در هنگام آتش‌سوزی با امکان وجود مسیرهای خروج متعدد پیشنهاد شده است. این شبیه‌سازی به بازیکنان این امکان را می‌دهد که محیط آتش را برای حضور آتش و دود مشاهده کنند و همچنین به آن‌ها اجازه می‌دهد مسیرهای خروجی صحیح را انتخاب کنند (Tucker et al., 2018).

یکی از کاربردهای مهم متاورس در حکمرانی آب، ایجاد پلتفرم‌های تعاملی چندجانبه است که امکان همکاری زنده میان نهادهای مختلف را فراهم می‌کند و داده‌های لحظه‌ای منابع آبی را در قالب شبیه‌سازی‌های واقعیت مجازی به نمایش می‌گذارد. این رویکرد که با فناوری دیجیتال توین[1] همراه است، به تصمیم‌گیرندگان اجازه می‌دهد تا سناریوهای مختلف مدیریت منابع آب را پیش از اجرای واقعی آزمایش و بهینه‌سازی کنند (Li et al., 2024). همچنین، متاورس می‌تواند با ایجاد محیط‌های تعاملی و آواتارهای نماینده شهروندان، مشارکت عمومی در فرآیند حکمرانی آب را تسهیل نماید و آموزش‌های لازم درباره مصرف بهینه و سیاست‌های آبی را در دسترس عموم قرار دهد (Tanweer Alam, 2023). شکل ۲ مزایای استفاده از صنعت متاورس در حکمرانی آب را نشان می‌دهد.

شکل ۲. مزایای استفاده از متاورس در حکمرانی منابع آب.

[1]. Digital Twin

با توجه به چالش‌های فزاینده در مدیریت منابع آب، مطالعات مختلفی به بررسی ظرفیت فناوری‌های نوین در ارتقای مؤلفه‌های حکمرانی آب پرداخته‌اند. در ادامه، مروری بر برخی از این پژوهش‌ها ارائه می‌شود. در یکی از مطالعات اخیر، با تأکید بر چالش‌های حکمرانی سنتی، بر ضرورت بهره‌گیری از فناوری‌های نوینی همچون هوش مصنوعی، متاورس و واقعیت افزوده در ارتقای حکمرانی تأکید شده است. این پژوهش، مدل‌های هوشمند و مشارکتی را جایگزینی مناسب برای ساختارهای سنتی می‌داند و بر نقش آن‌ها در افزایش شفافیت، مشارکت اجتماعی و تصمیم‌سازی بهینه تأکید دارد. همچنین، مؤلفه‌هایی مانند ژئوپلیتیک زیست‌محیطی و حکمرانی متاورسی در چارچوبی تلفیقی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. این مطالعه مسیر تحول حکمرانی آب را به سمت الگوهای نوین، تعاملی و فناورانه ترسیم می‌کند (انصاری قوجقار، ۲۰۲۳).

همچنین در یکی از مطالعات انجام‌شده، نقش هوش مصنوعی در مدیریت پیشرفته منابع آب مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق نشان می‌دهد که ترکیب هوش مصنوعی با فناوری‌هایی مانند اینترنت اشیاء[1] (IoT) و سنجش از دور می‌تواند مدیریت لحظه‌ای منابع آب را از طریق پیش‌بینی تقاضا، بهینه‌سازی تخصیص منابع و شناسایی بحران‌هایی مانند خشکسالی و سیلاب بهبود بخشد. همچنین، کاربردهای عملی آن در کاهش هدررفت آب، ارتقای بهره‌وری آبیاری و مدیریت روان‌آب‌های شهری، اثربخشی این فناوری را در ارتقای حکمرانی آب اثبات کرده است. این یافته‌ها بر اهمیت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین برای مدیریت هوشمند منابع آب تأکید دارند (Deshvena & Deshpande, 2024).

در راستای بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آب، مطالعه‌ای به بررسی معماری و اجزای سیستم‌های مدیریت آب مبتنی بر اینترنت اشیاء پرداخته و با مرور جامع بر مطالعات موجود، پارامترهایی نظیر سطح آب، pH، کدورت و شوری را در این سیستم‌ها تحلیل کرده است. این مطالعه با هدف افزایش کارایی و کاهش هزینه و انرژی مصرفی، معماری آینده‌نگرانه‌ای مبتنی بر IoT و یادگیری ماشین پیشنهاد می‌دهد که با پیش‌بینی هوشمندانه، به بهبود اثربخشی سیستم‌های مدیریت آب کمک می‌کند. این رویکرد می‌تواند الگویی ارزشمند برای توسعه سامانه‌های هوشمند در حکمرانی آب باشد (Singh & Ahmed, 2021). همچنین در مقاله‌ی آشوکا و همکاران (۲۰۲۴)، به کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت آب برای کشاورزی پایدار پرداخته شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که فناوری‌های هوش مصنوعی از جمله سیستم‌های آبیاری خودکار و دقیق، مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر هوش مصنوعی و نظارت بر کیفیت آب می‌توانند کارآیی آب را بهبود بخشیده و تولیدات کشاورزی را افزایش دهند. با این حال، چالش‌هایی مانند مشکلات فنی، نگرانی‌های حریم خصوصی داده‌ها و موانع پذیرش این فناوری‌ها در میان کشاورزان کوچک مقیاس باید مورد توجه قرار گیرند (Ashoka et al., 2024).

بررسی پیشینه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که با وجود پیشرفت‌های صورت‌گرفته در زمینه کاربرد فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آب، هنوز چارچوبی یکپارچه که تلفیق الگوریتم‌های هوش مصنوعی با ظرفیت‌های تعاملی متاورس را در راستای ارتقاء حکمرانی آب بررسی کند، به‌صورت نظام‌مند ارائه نشده است. این در حالی است که ترکیب این دو فناوری می‌تواند بستر مناسبی برای تحلیل داده‌های پیچیده، شبیه‌سازی سناریوها و ارتقای مشارکت ذی‌نفعان فراهم آورد. ازاین‌رو، ضرورت دارد چارچوبی نوین مبتنی بر هم‌افزایی هوش مصنوعی و متاورس به منظور دستیابی به حکمرانی یکپارچه و هوشمند منابع آب در کشور توسعه یابد.

بنابراین هدف این مقاله ارائه چارچوب تلفیقی و متاورسی مبتنی بر هوش مصنوعی و واقعیت افزوده (AI-AR) به منظور بهبود مؤلفه‌های حکمرانی آب در ایران است. با توجه به چالش‌های فزاینده‌ای که کشور در زمینه‌های بحران‌های آبی، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آب با آن مواجه است، این تحقیق قصد دارد تا با استفاده از تکنولوژی‌های نوین، به ویژه متاورس و هوش مصنوعی، راهکارهایی برای بهبود مدیریت منابع آب و ارتقاء حکمرانی آن در سطح ملی و محلی ارائه دهد. انتخاب این دو فناوری به دلیل توانمندی AI در تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی پدیده‌های اقلیمی و قابلیت متاورس در شبیه‌سازی تعاملی و آموزشِ مشارکتی صورت گرفته است. در این چارچوب، تأکید اصلی بر توسعه و پیاده‌سازی مدل‌هایی است که با ترکیب داده‌های محیطی، مدل‌های پیش‌بینی

[1]. Internet of Things

و شبیه‌سازی‌های مجازی، امکان تصمیم‌گیری دقیق‌تر، مشارکت بیشتر ذی‌نفعان و ارتقاء پایداری منابع آب را فراهم آورند. این تحقیق همچنین به بررسی چگونگی استفاده از پتانسیل‌های متاورس و واقعیت افزوده برای ایجاد فضاهای تعاملی و آموزشی با هدف افزایش آگاهی عمومی و تسهیل همکاری در زمینه حکمرانی آب، می‌پردازد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد توصیفی-تحلیلی و مبتنی بر مرور نظام‌مند متون علمی انجام شده است. هدف از این رویکرد، گردآوری، طبقه‌بندی و تحلیل انتقادی پژوهش‌های پیشین در حوزه‌های هوش مصنوعی، متاورس، واقعیت افزوده، الگوریتم‌های فراکاوشی و حکمرانی منابع آب بوده است تا بتوان چارچوبی یکپارچه و بومی‌سازی‌شده برای ارتقاء حکمرانی آب در ایران ارائه کرد. در گام نخست، با استفاده از کلیدواژه‌هایی "Metaverse"، "Artificial Intelligence in Water Governance"، " Augmented and Virtual Reality in Climate Simulation"، "Applications in Environmental Management"، " Metaheuristic Algorithms in Resource Allocation" و "IoT for Water Monitoring and Prediction" بیش از ۱۰۰ مقاله منتشرشده در فاصله سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ از پایگاه‌های علمی معتبر بین‌المللی شامل Web of Science، Scopus، ScienceDirect، Springer و Google Scholar جستجو و گردآوری شد.

پس از انتخاب نهایی منابع، فرآیند کدگذاری محتوایی و تحلیل موضوعی به‌منظور استخراج مؤلفه‌های کلیدی، روندهای رایج و شکاف‌های مطالعاتی انجام گرفت. تحلیل‌ها نشان داد که گرچه استفاده از فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء در مدیریت آب و محیط‌زیست در حال گسترش است، اما کاربرد صنعت متاورس (VR/AR) و به‌ویژه تلفیق این فناوری‌ها در چارچوبی مشترک برای حکمرانی آب، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه‌ای نظیر ایران، بسیار محدود و در برخی حوزه‌ها مغفول مانده است.

در نهایت، با تحلیل تطبیقی این مطالعات و ترکیب آن‌ها با شرایط خاص ایران از نظر اقلیمی، زیرساختی و نهادی، چارچوب مفهومی مقاله حاضر تدوین گردید. این فرآیند امکان طراحی مدلی بومی‌شده را فراهم ساخت که ضمن اتکا به شواهد علمی، قابلیت پیاده‌سازی در بستر حکمرانی آب کشور را دارا باشد.

۳. یافته‌های پژوهش

۳-۱. کاربرد فناوری‌های نوین در تحلیل و پیش‌بینی پدیده‌های مخرب محیطی

ادغام فناوری‌های هوش مصنوعی (AI) و متاورس (VR) تأثیرات گسترده‌ای بر مدلسازی، پیش‌بینی و حکمرانی پدیده‌های هیدرولوژیکی دارد. هوش مصنوعی، به‌ویژه با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی، قابلیت تحلیل داده‌های پیچیده را دارد و می‌تواند به‌طور دقیق پدیده‌هایی مانند سیلاب، خشکسالی، گرد و غبار و ... را پیش‌بینی کند. از سوی دیگر، واقعیت مجازی و واقعیت افزوده امکان شبیه‌سازی این پدیده‌ها را در محیط‌های کنترل‌شده فراهم می‌کنند که به تصمیم‌گیری بهینه و مدیریت مؤثر کمک می‌کند.

در زمینه حکمرانی، تلفیق AI و VR به سیاست‌گذاران و مدیران کمک می‌کند تا سناریوهای مختلف را پیش از وقوع واقعی آن‌ها بررسی کرده و راهکارهای مناسبی برای کاهش خسارات اتخاذ کنند. در واقع، این فناوری‌ها یک محیط ایمن و کنترل‌شده را برای ارزیابی اقدامات مدیریتی فراهم می‌کنند، به‌طوری که مسئولان می‌توانند سیاست‌های خود را پیش از اجرای واقعی آن‌ها به‌صورت مجازی مورد آزمایش قرار دهند. این امر موجب افزایش دقت در تصمیم‌گیری‌ها و کاهش ریسک‌های مرتبط با اقدامات مدیریتی می‌شود.

شواهد کمی و مطالعات تجربی نیز از اثربخشی فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی و واقعیت افزوده در مدیریت پدیده‌های محیطی پشتیبانی می‌کنند. برای نمونه، ژو[1] و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که مدل یادگیری عمیق مبتنی بر CNN-RNN می‌تواند

[1]. Zhou

پیش‌بینی عمق سیلاب را با خطای نسبی ۰/۷۶ درصد و با سرعتی ۱۹۵۸۵ برابر سریع‌تر از مدل‌های فیزیکی انجام دهد. همچنین، مدل Hydro-Informer توانست ضریب تعیین ۰/۸۸ را برای پیش‌بینی سطح آب تا ۱۲ ساعت آینده به دست آورد (Almikaeel et al., 2024). در زمینه واقعیت افزوده، مطالعه میرائودا[1] و همکاران (۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) نشان داده‌اند که استفاده از پلتفرم‌های موبایلی ARدر مدیریت منابع آب و بحران سیلاب می‌تواند زمان بازدیدهای میدانی و هزینه‌های پایش را کاهش دهد. همچنین، این فناوری امکان نمایش بلادرنگ داده‌های محیطی را فراهم کرده و با تسهیل ارزیابی میدانی، به تصمیم‌گیری سریع‌تر و مؤثرتر در شرایط اضطراری کمک می‌کند. این یافته‌ها بیانگر ظرفیت بالای فناوری‌های نوین در بهبود مدل‌سازی و تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت پدیده‌های محیطی هستند.

برای درک بهتر قابلیت‌های این فناوری‌ها، در ادامه به نمونه‌هایی از کاربردهای عملی آن‌ها در مواجهه با پدیده‌هایی مانند سیلاب، خشکسالی و گرد و غبار اشاره می‌شود. به عنوان مثال در حوزه سیلاب، شبیه‌سازی‌های VR می‌توانند به‌صورت سه‌بعدی، جریان سیلاب در یک منطقه شهری یا کشاورزی را بازسازی کنند. کاربران شامل مسئولان و مردم، می‌توانند مشاهده کنند که چگونه بالا آمدن سطح آب خیابان‌ها یا رودخانه‌ها زیرساخت‌های حیاتی را تهدید می‌کند. این محیط تعاملی به سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا تأثیر احداث سد، تغییر مسیر آب، یا نصب پمپ‌های تخلیه را پیش از اجراء، به‌صورت واقع‌گرایانه ارزیابی کنند. در مورد خشکسالی، فناوری AR می‌تواند با ترکیب اطلاعات واقعی از سطح پوشش گیاهی، رطوبت خاک و داده‌های سنجش از دور، تصویری بصری از پیامدهای تداوم خشکسالی برای مردم و تصمیم‌گیرندگان ایجاد کند. به‌طور مثال، کشاورزان می‌توانند در مزرعه خود با استفاده از عینک AR، سطح خطر خشکسالی را مشاهده کرده و تغییرات لازم در الگوی کشت را در محیط شبیه‌سازی شده ارزیابی کنند.

برای پدیده گرد و غبار، فناوری متاورس امکان شبیه‌سازی مسیر حرکت توده‌های گرد و غبار را با استفاده از داده‌های هواشناسی فراهم می‌کند. این اطلاعات می‌تواند به شهروندان اطلاع دهد که در چه مناطقی باید از تردد خودداری کنند و یا سیستم‌های تهویه را در چه زمان‌هایی فعال نمایند. در سطوح مدیریتی نیز امکان بررسی اثرگذاری طرح‌هایی مثل مالچ‌پاشی یا کاشت پوشش گیاهی مقاوم فراهم می‌شود. همچنین در سطح کلان، ترکیب VR و AR می‌تواند اثرات تدریجی تغییر اقلیم را در بازه‌های زمانی مختلف (مثلاً ۵۰ یا ۱۰۰ سال آینده) بازنمایی کند. این بازنمایی‌ها به مسئولان امکان می‌دهد که اثرگذاری سناریوهای مختلف سیاست‌گذاری زیست‌محیطی، مانند کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای یا تغییر الگوی مصرف انرژی را در طول زمان ببینند و مقایسه کنند.

با وجود ظرفیت‌های قابل توجه، پیاده‌سازی این فناوری‌ها در ایران با چالش‌های متعددی همراه است. مطالعات انجام‌شده در کشورهایی با شرایط مشابه، مانند امارات متحده عربی، نشان می‌دهد که عواملی نظیر کمبود مهارت‌های فنی، نبود راهکارهای بومی‌سازی‌شده و ضعف زیرساخت‌های دیجیتال از موانع اصلی در مسیر استقرار این فناوری‌ها هستند. همچنین، کیفیت پایین داده‌ها، پیچیدگی فرآیند پاک‌سازی و پیش‌پردازش آن‌ها، هزینه بالای تجهیزات VR/AR و کمبود متخصصان در حوزه تحلیل داده‌های محیطی، از جمله چالش‌های کلیدی مطرح‌شده در پژوهش‌ها به شمار می‌روند (Almheiri et al., 2024).

۳-۲. نقش فناوری‌های تعاملی در ارتقاء مشارکت و آگاهی عمومی

این فناوری‌ها می‌توانند مردم را نیز در فرآیند حکمرانی دخیل کنند. به‌عنوان مثال، با استفاده از AR، می‌توان سناریوهای خشکسالی آینده را برای شهروندان شبیه‌سازی کرد و تأثیرات آن را بر منابع آب نشان داد. این امر موجب تغییر رفتار مردم نسبت به مصرف آب و منابع طبیعی شده و در نهایت به مدیریت بهینه منابع آب منجر می‌شود. وقتی شهروندان به‌صورت بصری و تعاملی با این پدیده‌ها مواجه شوند، آگاهی آن‌ها افزایش یافته و مسئولیت‌پذیری آن‌ها در قبال منابع طبیعی بیشتر خواهد شد. از این طریق،

[1]. Mirauda

می‌توان یک ارتباط دوطرفه میان مردم و مسئولان ایجاد کرد که در آن، هم سیاست‌های دولتی کارآمدتر خواهد شد و هم همکاری مردم در اجرای این سیاست‌ها افزایش می‌یابد.

علاوه بر این، مدلسازی با استفاده از هوش مصنوعی و شبیه‌سازی با VR و AR می‌تواند به بهبود همزادپنداری افراد با مسائل زیست‌محیطی کمک کند. وقتی افراد بتوانند تأثیر پدیده‌های جوی را در محیط‌های مجازی مشاهده و درک کنند، مسئولیت‌پذیری آن‌ها نسبت به محیط‌زیست افزایش خواهد یافت. این امر نه‌تنها در سطح فردی تأثیرگذار است، بلکه می‌تواند به یک تغییر فرهنگی در نحوه مواجهه جوامع با چالش‌های زیست‌محیطی منجر شود. به‌طور مثال، شبیه‌سازی شرایط بحرانی مانند وقوع یک سیلاب شدید می‌تواند به مردم و مسئولان نشان دهد که چه اقداماتی باید برای مدیریت بحران انجام شود. این فرآیند باعث خواهد شد که مردم انتظار مدیریت کارآمدتری از مسئولان داشته باشند و در عین حال خود نیز رفتارهای پیشگیرانه‌ای را در پیش بگیرند.

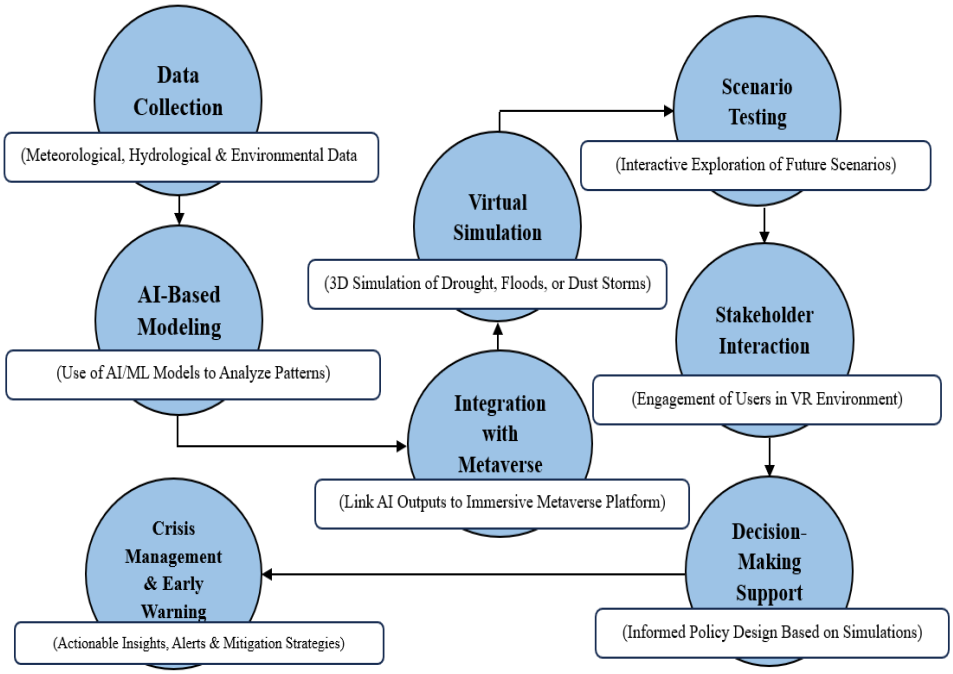
۳-۳. بستر تلفیقی برای تحلیل و تصمیم‌گیری در حکمرانی

این فناوری‌ها امکان تحلیل داده‌های تاریخی و ترکیب آن‌ها با داده‌های آنی را فراهم می‌کنند. به این ترتیب، نه‌تنها می‌توان شرایط کنونی را بهتر درک کرد، بلکه می‌توان آینده را با دقت بیشتری پیش‌بینی نمود. ترکیب هوش مصنوعی با یادگیری ماشین و الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌تواند مدل‌هایی ارائه دهد که به‌صورت خودکار در طول زمان بهبود می‌یابند و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه می‌دهند. در کنار آن، واقعیت افزوده می‌تواند ابعاد بصری و تجربی این پیش‌بینی‌ها را تقویت کند تا تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و واکنش‌های اجتماعی نسبت به این پدیده‌ها هدفمندتر شوند.

بنابراین، تلفیق فناوری‌های AI و VR نه‌تنها در مدلسازی و پیش‌بینی دقیق پدیده‌های اقلیمی مؤثر است، بلکه از طریق ایجاد سناریوهای شبیه‌سازی‌شده، به بهبود تصمیم‌گیری در سطوح مدیریتی و تغییر رفتار اجتماعی کمک می‌کند. این ابزارهای نوین می‌توانند نقش کلیدی در حکمرانی هوشمند و کاهش خسارات ناشی از تغییرات اقلیمی ایفاء کنند. با توسعه و به‌کارگیری این فناوری‌ها، می‌توان از مرحله پیش‌بینی صرف، فراتر رفت و به سمت مدیریت فعال و مشارکتیِ پدیده‌های اقلیمی حرکت کرد که نتیجه آن افزایش تاب‌آوری جوامع در برابر مخاطرات محیطی خواهد بود. برای نمایش نزدیکی این چارچوب به اجرا، توجه به نمونه‌های واقعی زیر ضروری است:

در گرجستان، اپلیکیشن MACS Water Smart با پردازش خودکار اطلاعات تاریخی و مدل‌سازی هیدرولیکی توانست با ترکیب AI و GIS، فشار خطوط آبرسانی را بیش از ۲۵ متر افزایش دهد، کارایی پمپاژ را تا ۱۵ درصد ارتقاء دهد و نشت آب را ۸ درصد کاهش دهد. این تجربه نشان‌دهنده قابلیت عملیاتی و کاهش نیاز به تخصص فنی است (Pons-Ausina et al., 2025). در اروپا (برلین و پاریس) نیز اپلیکیشن موبایلی واقعیت افزوده برای آموزش عمومی و افزایش آگاهی درباره آب زیرزمینی و کیفیت منابع به کار گرفته شد و مشارکت فعال شهروندان را ارتقاء داد (Stein et al., 2023). همچنین در شهر تورنتو، سیستم AR مبتنی بر HoloLens و vGIS، اپراتورهای میدانی را قادر ساخت تا در محیط واقعی، داده‌های زیرسطحی را با دقت بالا شناسایی و مدیریت کنند (vGIS, 2021).

فرآیند مدلسازی، پیش‌بینی و حکمرانی پدیده‌های هیدرولوژیکی با استفاده از AI و VR/AR را می‌توان در قالب یک جریان مفهومی مشاهده کرد که در شکل ۳ نمایش داده شده است. این فلوچارت نشان می‌دهد که چگونه داده‌های محیطی پردازش شده، پدیده‌های هیدرولوژیکی مدلسازی و سپس با کمک VR/AR شبیه‌سازی می‌شوند تا تصمیم‌گیری‌های بهینه صورت گیرد.



شکل ۳. فلوچارت مفهومی فرآیند مدلسازی، پیش‌بینی و شبیه‌سازی در بستر حکمرانی آب با استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی و واقعیت مجازی/افزوده.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

ترکیب فناوری‌های متاورس با فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء، الگوریتم‌های فراکاوشی و ...، بستری نوین و چندمرحله‌ای برای مدیریت بهینه پدیده‌های زیست‌محیطی فراهم می‌آورد. این بستر به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که چهار مرحله کلیدی را در بر می‌گیرد: ورود داده، مدلسازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی و عینیت‌بخشی در محیط پایلوت.

در این چارچوب، نخست داده‌های تاریخی، سنجش از دور و آنی از طریق حسگرها یا پایگاه‌های اطلاعاتی گردآوری شده و سپس با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، مدل‌های پیش‌بینی‌گرِ دقیق ساخته می‌شوند. این مدل‌ها در مرحله بعد، با بهره‌گیری از واقعیت مجازی و افزوده، در محیطی شبیه‌سازی‌شده پیاده‌سازی می‌شوند. نتیجه این شبیه‌سازی‌ها، شناخت دقیق‌تری از تأثیرات سناریوهای مختلف مدیریتی در مقابله با پدیده‌هایی مانند خشکسالی، سیلاب، گرد و غبار و ... است.

با کمک این بستر می‌توان سناریوهای مختلف را پیش از اجراء مورد آزمون قرار داد و از طریق تحلیل حساسیت، میزان ریسک و عدم قطعیت هر سناریو را سنجید. این ارزیابی پیشینی، تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد تا مؤثرترین و واقع‌گرایانه‌ترین گزینه‌ها را برای مدیریت بحران انتخاب کنند.

نکته حائز اهمیت آن است که هیچ‌یک از این فناوری‌ها به‌تنهایی قادر به تحقق چنین سطحی از تحلیل و تصمیم‌سازی نیستند. متاورس بدون تحلیل دقیق داده‌ها از سوی هوش مصنوعی، توان عینیت‌بخشی هدفمند ندارد و هوش مصنوعی نیز بدون بستر تعاملی متاورس نمی‌تواند خروجی‌های خود را به شکل ملموس به سیاست‌گذاران و جامعه منتقل کند.

شایان ذکر است که نتایج این مطالعه با یافته‌های پژوهش‌های از جمله انصاری قوجقار (۲۰۲۳) و دشونا و دشپاندی (۲۰۲۴) که بر نقش فناوری‌های هوش مصنوعی، متاورس و اینترنت اشیاء در تحول حکمرانی منابع طبیعی تأکید داشته‌اند، هم‌راستا بوده و حرکت به‌سوی الگوهای هوشمند و مشارکتی را تأیید می‌کند.

در مواجهه با چالش‌های فزاینده در مدیریت منابع آب ایران، از جمله تغییرات اقلیمی، بهره‌برداری ناپایدار و ضعف در حکمرانی، استفاده از فناوری‌های نوین همچون هوش مصنوعی و متاورس، می‌تواند فرصتی راهبردی برای تحول در ساختار تصمیم‌گیری و مشارکت ذی‌نفعان فراهم سازد. هوش مصنوعی با توانایی تحلیل داده‌های پیچیده، پیش‌بینی الگوهای خشکسالی، بهینه‌سازی تخصیص منابع آب و ارتقای سامانه‌های هشدار سریع، می‌تواند به عنوان ابزاری حیاتی در ارتقای حکمرانی علمی و مبتنی بر داده مورد استفاده قرار گیرد. از سوی دیگر، متاورس به عنوان بستری نوین برای تعاملات چندسویه، آموزش‌های تعاملی، شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی و تسهیل مشارکت ذی‌نفعان در محیط‌های مجازی، ظرفیت ایجاد یک فضای یادگیری و گفت‌وگوی مؤثر در تصمیم‌گیری‌های کلان را فراهم می‌آورد. ترکیب این دو فناوری می‌تواند ساختار حکمرانی آب را از رویکردهای سنتی، سلسله‌مراتبی و بسته، به سوی حکمرانی باز، مشارکتی، پیش‌بینی‌پذیر و تطبیقی سوق دهد.

بنابراین، عبور از وضعیت بحرانی کنونی، مستلزم نوسازی زیرساخت‌های فناورانه، سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت‌های انسانی، طراحی سیاست‌های نوآورانه و ایجاد بسترهای هماهنگی بین‌نهادی با تکیه بر قابلیت‌های AI و Metaverse است. در صورت تحقق این مهم، می‌توان به آینده‌ای پایدارتر برای مدیریت منابع آب و ارتقای امنیت آبی کشور امیدوار بود.

رویکرد ترکیبی قادر است با تحلیل داده‌های حجیم و بلادرنگ، سامانه‌هایِ هشدارِ هوشمند طراحی کند که نه‌تنها پدیده‌ها را پیش‌بینی می‌کنند، بلکه شدت، دامنه و احتمال وقوع سناریوهای مختلف را نیز به‌صورت بصری و تعاملی شبیه‌سازی کرده و در اختیار تصمیم‌گیران و شهروندان قرار می‌دهد. بهره‌گیری از این مدل‌ها در آینده می‌تواند به بهبود تاب‌آوری شهری، ارتقاء نظام حکمرانی اقلیمی و کاهش ریسک‌های ناشی از تغییرات محیطی کمک شایانی نماید.

ازاین‌رو، با توجه به ماهیت اقلیمی ایران که در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهانی قرار دارد و وقوع مکرر پدیده‌های مخرب زیست‌محیطی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، مدل‌های ترکیبی پیشرفته بر پایه فناوری‌های نوین توسعه یابد. به‌ویژه، ترکیب فناوری‌های متاورس با اینترنت اشیاء، الگوریتم‌های فراکاوشی، یادگیری عمیق و دیگر روش‌های هوش مصنوعی، می‌تواند بستر مناسبی برای مدلسازی و عینیت‌بخشیِ دقیقِ پدیده‌های مخرب زیست‌محیطی فراهم آورد. همچنین پیشنهاد می‌شود در آینده، توسعه نرم‌افزارها و اپلیکیشن‌های تحت وب که مبتنی بر تلفیق الگوریتم‌های فراکاوشی، فناوری متاورس و اینترنت اشیاء هستند، در حوزه‌هایی مانند کشاورزی، منابع طبیعی، محیط‌زیست و منابع آب مورد توجه بیشتری قرار گیرد. این ترکیب فناورانه به دلیل کاهش چشمگیر هزینه‌ها، کاهش حجم محاسبات، و همچنین حداقل‌سازی عدم قطعیت و ریسک در تصمیم‌گیری‌ها، از ظرفیت بالایی برای بهبود مدیریت منابع برخوردار است. همچنین، این سیستم‌ها با ارتقای دقت پیش‌بینی و مدلسازی، امکان کالیبراسیون دقیق متناسب با شرایط اقلیمی و بوم‌شناختی کشور و منطقه را فراهم می‌کنند. افزون بر این، وجود نیروی انسانی متخصص در این حوزه‌ها در ایران، زمینه را برای پیاده‌سازی و بومی‌سازی این فناوری‌ها بیش از پیش مهیا کرده است.

با این حال، این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز مواجه بوده است؛ از جمله عدم دسترسی به داده‌های گسترده میدانی برای آزمون عملی چارچوب پیشنهادی و نبود زیرساخت‌های فنی و حقوقی لازم برای پیاده‌سازی متاورس در ساختارهای حکمرانی. رفع این محدودیت‌ها مستلزم اجرای پروژه‌های آزمایشی (Pilot) با مشارکت بین‌بخشی است.

تأثیر چارچوب پیشنهادی را می‌توان در دو بازه زمانی بررسی کرد: در کوتاه‌مدت، می‌تواند موجب بهبود سامانه‌های هشدار، ارتقای مشارکت و شفاف‌سازی تصمیم‌گیری‌ها شود؛ و در بلندمدت، با نهادینه‌سازی فناوری در سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی، ساختار حکمرانی منابع آب را به سوی شفافیت، پیش‌بینی‌پذیری و پایداری سوق دهد.

References

Aidonojie, P. A., Anani, O. A., Agbale, O. P., Olomukoro, J. O., & Adetunji, O. C. (2020). Environmental law in Nigeria: A review on its antecedence, application, judicial unfairness and prospects. *Archive of Science & Technology, 1*(2), 211–221.

Aidonojie, P. A., Nwazi, J., & Ugiomo, E. (2023a). Illegality of income tax evasion in Edo State: Adopting an automated income tax system as a panacea. *Jurnal Legalitas, 16*(1), 56–86. https://doi.org/10.33756/jelta.v16i1.19422

Aidonojie, P. A., Okuonghae, N., Moses-Oke, R. O., & Majekodunmi, T. A. (2023b). A facile review on the legal issues and challenges concerning the conservation and preservation of biodiversity. *Global Sustainability Research, 2*(2), 34–46. https://doi.org/10.56556/gssr.v2i2.461

Akash, M., Akter, J., Tamanna, T., & Kabir, M. R. (2018). The urbanization and environmental challenges in Dhaka city. In *7th International RAIS Conference on Social Sciences*. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3152116

Alam, T. (2024). Metaverse of Things (MoT) applications for revolutionizing urban living in smart cities. *Smart Cities, 7*(5), 2466-2494. https://doi.org/10.3390/smartcities7050096

Allan, J. A. (2005). Water in the environment/socio-economic development discourse: Sustainability, changing management paradigms and policy responses in a global system. *Government and Opposition, 40*(2), 181-199. https://doi.org/10.1111/j.1477-7053.2005.00149.x

Almheiri, M. S., Bashir, H., Ojiako, U., Haridy, S., & Shamsuzzaman, M. (2024). Examining the challenges of implementing artificial intelligence in the water supply sector: a case study. *Water, 16*(23), 3539. https://doi.org/10.3390/w16233539

Almikaeel, W., Šoltész, A., Čubanová, L., & Baroková, D. (2024). Hydro-informer: A deep learning model for accurate water level and flood predictions. *Natural Hazards*, 1-21. https://doi.org/10.1007/s11069-024-06949-8

Ansari ghojghar, M. (2023). Presenting an analytical framework of the concept of metaverse governance in order to apply participatory management in the field of environmental geopolitics. *Iranian Journal of Soil and Water Research, 54*(2), 369-388. https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.355659.669455

Arora, N. K., Fatima, T., Mishra, I., Verma, M., Mishra, J., & Mishra, V. (2018). Environmental sustainability: challenges and viable solutions. *Environmental Sustainability, 1*, 309-340. https://doi.org/10.1007/s42398-018-00038-w

Arthington, A. H., Bunn, S. E., Poff, N. L., & Naiman, R. J. (2006). The challenge of providing environmental flow rules to sustain river ecosystems. *Ecological Applications, 16*(4), 1311-1318. https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[1311:TCOPEF]2.0.CO;2

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. https://dx.doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i62068

Benson, D., Gain, A. K., & Giupponi, C. (2020). Moving beyond water centricity? Conceptualizing integrated water resources management for implementing sustainable development goals. *Sustainability Science, 15*(2), 671-681. https://doi.org/10.1007/s11625-019-00733-5

Bertule, M., Glennie, P., Koefoed Bjørnsen, P., James Lloyd, G., Kjellen, M., Dalton, J., ... & Harlin, J. (2018). Monitoring water resources governance progress globally: Experiences from monitoring SDG indicator 6.5. 1 on integrated water resources management implementation. *Water, 10*(12), 1744. https://doi.org/10.3390/w10121744

Brauch, H. G. (2008). Introduction: globalization and environmental challenges: reconceptualizing security in the 21st century. In *Globalization and Environmental Challenges: Reconceptualizing Security in the 21st Century* (pp. 27-43). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75977-5_1

Carr, D. L., Suter, L., & Barbieri, A. (2005). Population dynamics and tropical deforestation: state of the debate and conceptual challenges. *Population and Environment, 27*, 89-113. https://doi.org/10.1007/s11111-005-0014-x

Crompton, T., & Kasser, T. (2009). *Meeting environmental challenges: The role of human identity* (Vol. 29). Godalming, UK: WWF-UK.

Dabelko, G., & Conca, K. (Eds.). (2019). *Green planet blues: Critical perspectives on global environmental politics*. Routledge.
Darlingtom, K. (2020). The emergence of the age of AI. OpenMind. https://www.bbvaopenmind.com/en/technology/artificial-intelligence/the-emergence-of-the-age-of-ai/
De Silva, K., Yapa, P. W. S., & Vesty, G. (2020). The impact of accountability mechanisms on public sector environmental sustainability performance: A case study of Sri Lanka. *Australasian Accounting, Business and Finance Journal, 14*(3), 38-55. https://doi.org/10.14453/aabfj.v14i3.4
Deshvena, Y. N., & Deshpande, S. M. (2024). Artificial intelligence for real-time water management. *Journal of Water Resource Engineering and Management, 11*(2), 13–20. Available from: https://journals.stmjournals.com/jowrem/article=2024/view=170547
Dodman, D. (2016). Environment and urbanization. *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology: People, the Earth, Environment and Technology*, 1-9. https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0623
du Plessis, A., & du Plessis, A. (2019). Primary water quality challenges, contaminants and the world's dirtiest places. In *Water as an Inescapable Risk: Current Global Water Availability, Quality and Risks with a Specific Focus on South Africa* (pp. 79-114). https://doi.org/10.1007/978-3-030-03186-2_5
Glass, L. M., & Newig, J. (2019). Governance for achieving the Sustainable Development Goals: How important are participation, policy coherence, reflexivity, adaptation and democratic institutions? *Earth System Governance, 2*, 100031. https://doi.org/10.1016/j.esg.2019.100031
Global Water Partnership. (2002). GWP in Action.
Gupta, J., & Pahl-Wostl, C. (2013). Global water governance in the context of global and multilevel governance: its need, form, and challenges. *Ecology and Society, 18*(4). http://dx.doi.org/10.5751/ES-05952-180453
Haigh, M. J., Jansky, L., & Hellin, J. (2004). Headwater deforestation: a challenge for environmental management. *Global Environmental Change, 14*, 51-61. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2003.11.004
Han, D., Currell, M. J., & Cao, G. (2016). Deep challenges for China's war on water pollution. *Environmental Pollution, 218*, 1222-1233. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.078
Homsy, G. C., & Warner, M. E. (2020). Does public ownership of utilities matter for local government water policies? *Utilities Policy, 64*, 101057. https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101057
Hu, Y., Cheng, H., & Tao, S. (2017). Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation. *Environment International, 107*, 111-130. https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.07.003
Hussein, H., Menga, F., & Greco, F. (2018). Monitoring transboundary water cooperation in SDG 6.5. 2: How a critical hydropolitics approach can spot inequitable outcomes. *Sustainability, 10*(10), 3640. https://doi.org/10.3390/su10103640
Iyiola, A. O., Akinsorotan, O. A., Ojeleye, A. E., & Fajimolu, A. O. (2023). An overview of environmental resources in Africa: emerging issues and sustainable exploitation. In *Sustainable utilization and conservation of Africa's biological resources and environment* (pp. 543-570). https://doi.org/10.1007/978-981-19-6974-4_20
Jiménez, A., Saikia, P., Giné, R., Avello, P., Leten, J., Liss Lymer, B., ... & Ward, R. (2020). Unpacking water governance: A framework for practitioners. *Water, 12*(3), 827. https://doi.org/10.3390/w12030827
Kamińska, D., Sapiński, T., Wiak, S., Tikk, T., Haamer, R. E., Avots, E., ... & Anbarjafari, G. (2019). Virtual reality and its applications in education: Survey. *Information, 10*(10), 318. https://doi.org/10.3390/info10100318
Kankanhalli, A., Charalabidis, Y., & Mellouli, S. (2019). IoT and AI for smart government: A research agenda. *Government Information Quarterly, 36*(2), 304–309. https://doi.org/10.1016/j.giq.2019.02.003
Kaviyaraj, R., & Uma, M. (2022, January). Augmented reality application in classroom: an immersive taxonomy. In *2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)* (pp. 1221-1226). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSSIT53264.2022.9716325
Keiner, M. (2016). Managing urban futures: Sustainability and urban growth in developing countries. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315249827

Ketabchy, M. (2021). Investigating the impacts of the political system components in Iran on the existing water bankruptcy. *Sustainability, 13*(24), 13657. https://doi.org/10.3390/su132413657
Kim, J. W. (2006). The environmental impact of industrialization in East Asia and strategies toward sustainable development. *Sustainability Science, 1*, 107-114. https://doi.org/10.1007/s11625-006-0006-5
Kumar, R., Kumar, A., & Saikia, P. (2022). Deforestation and forests degradation impacts on the environment. In *Environmental degradation: Challenges and strategies for mitigation* (pp. 19-46). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95542-7_2
Lawson, E., Farmani, R., Woodley, E., & Butler, D. (2020). A resilient and sustainable water sector: barriers to the operationalisation of resilience. *Sustainability, 12*(5), 1797. https://doi.org/10.3390/su12051797
Li, W., Ma, Z., Li, J., Li, Q., Li, Y., & Yang, J. (2024). Digital twin smart water conservancy: Status, challenges, and prospects. *Water, 16*(14), 2038. https://doi.org/10.3390/w16142038
Mabogunje, A. L. (2002). Poverty and environmental degradation: challenges within the global economy. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 44*(1), 8-19. https://doi.org/10.1080/00139150209605588
Malik, I. H., & Ford, J. D. (2024). Monitoring climate change vulnerability in the Himalayas. *Ambio*, 1-19. https://doi.org/10.1007/s13280-024-02066-9
Mandal, S. (2013). Brief introduction of virtual reality & its challenges. *International Journal of Scientific & Engineering Research, 4*(4), 304-309.
Masron, T. A., & Subramaniam, Y. (2019). Does poverty cause environmental degradation? Evidence from developing countries. *Journal of Poverty, 23*(1), 44-64. https://doi.org/10.1080/10875549.2018.1500969
Mellor, J. W. (1988). The intertwining of environmental problems poverty. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 30*(9), 6-30. PMID: 12315935.
Mirauda, D., Erra, U., Agatiello, R., & Cerverizzo, M. (2017). Applications of mobile augmented reality to water resources management. *Water, 9*(9), 699. https://doi.org/10.3390/w9090699
Mirauda, D., Erra, U., Agatiello, R., & Cerverizzo, M. (2018). Mobile augmented reality for flood events management. *Water Studies, 47*, 418-424. https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N3-418-424
Mohasses, M. (2019, February). How AI-Chatbots can make Dubai smarter? In *2019 Amity international conference on artificial intelligence (AICAI)* (pp. 439-446). IEEE. https://doi.org/10.1109/AICAI.2019.8701413
Mwangi, W., de Figueiredo, P., & Criscitiello, M. F. (2016). One health: addressing global challenges at the nexus of human, animal, and environmental health. *PLOS Pathogens, 12*(9), e1005731. https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1005731
Nedel, L., De Souza, V. C., Menin, A., Sebben, L., Oliveira, J., Faria, F., & Maciel, A. (2016). Using immersive virtual reality to reduce work accidents in developing countries. *IEEE Computer Graphics and Applications, 36*(2), 36-46. https://doi.org/10.1109/MCG.2016.19
Nshimbi, C. C. (2019). SDGs and decentralizing water management for transformation: Normative policy coherence for water security in SADC river basin organizations. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 111*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.02.010
Nukusheva, A., Ilyassova, G., Rustembekova, D., Zhamiyeva, R., & Arenova, L. (2021). Global warming problem faced by the international community: international legal aspect. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics, 21*, 219-233. https://doi.org/10.1007/s10784-020-09500-9
Numbere, A. O., & Maduike, E. M. (2022). The impact of unsustainable exploitation of forest and aquatic resources of the Niger Delta, Nigeria. In *Biodiversity in Africa: potentials, threats and conservation* (pp. 239-265). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3326-4_9
OECD. (2011). Water Governance in OECD: A Multi-Level Approach. OECD Publishing, Paris.
OECD. (2015). The OECD Principles on Water Governance. OECD Publishing, Paris.
OECD. (2019). Measuring the Digital Transformation; OECD Publishing, Paris, France.

Palomino, J., Muellerklein, O. C., & Kelly, M. (2017). A review of the emergent ecosystem of collaborative geospatial tools for addressing environmental challenges. *Computers, Environment and Urban Systems, 65*, 79-92. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys 2017.05.003
Patnaik, R. (2018, March). Impact of industrialization on environment and sustainable solutions–reflections from a south Indian region. In *2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET)* (pp. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSCET.2018.8537294
Peacock, A., & Newell, J. P. (2011). Sustainable cities: Governing urban development. *International Journal of Urban and Regional Research, 35*(3), 462-466. https://doi.org/10.1111/j.1468-2427.2011.01073.x
Perera, C., Ruiz, A., & Vieira, F. (2023). The application of AI, IoT and digital twins in smart water systems: a review. *Journal of Water Resources Planning and Management, 149*(2), 04023001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001783
Petersen-Perlman, J. D., Veilleux, J. C., & Wolf, A. T. (2017). International water conflict and cooperation: challenges and opportunities. *Water International, 42*(2), 105-120. https://doi.org/10.1080/02508060.2017.1288691
Reckien, D., Flacke, J., Olazabal, M., Heidrich, O., De Gregorio Hurtado, S., Orru, H., ... & Dawson, R. J. (2018). Climate change response in Europe: What's the reality? *Sustainability, 10*(2), 447. https://doi.org/10.3390/su10020447
Ren, G., Long, Y., Yu, W., Li, D., Zhang, T., & Li, Z. (2023). Augmented reality for smart water system visualization: A review. *Sustainability, 15*(8), 6383. https://doi.org/10.3390/su15086383
Rhyne, R. (2015). *Urban sustainability: Theory and practice*. Routledge.
Richardson, T., & Cass, N. (2015). Governing sustainable cities. In *The Routledge handbook of planning theory* (pp. 268-283). Routledge.
Rojo, J. A., & El Moujabber, M. (2022). A review of the applications of digital twins and AI for water infrastructure monitoring and management. *Urban Water Journal, 19*(6), 505-519. https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2100241
Rogers, P., & Hall, A. W. (2003). Effective water governance. Global Water Partnership Technical Committee (TEC) Background Paper No. 7.
Rouf, S., Sultana, S., & Rahman, M. (2022). Sustainable water governance and management in Bangladesh. In *Water security in Bangladesh* (pp. 1-17). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91770-8_1
Sánchez, J. A., Arce, M. E., Hernández, J. P., & Santiesteban, N. A. (2020). Water governance and institutions in Latin America and the Caribbean. *Water, 12*(11), 3082. https://doi.org/10.3390/w12113082
Santoso, H., Yuliana, M., Sari, M., Kusuma, R., & Utoyo, A. B. (2023). Policy challenges of urban water governance in Indonesia. *Water, 15*(1), 76. https://doi.org/10.3390/w15010076
Schiavone, A., & Bilotta, P. (2022). Water quality assessment: a review of analytical methods for contaminants. *Environmental Chemistry Letters, 20*(5), 2683-2695. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01440-4
Scott, C. A., Pierce, S. A., Pasqualetti, M. J., Jones, A. L., Montz, B. E., & Hoover, J. H. (2011). Policy and institutional dimensions of water resources: perspectives and challenges. *Water Resources Research, 47*(5). https://doi.org/10.1029/2010WR009606
Sekulic, G., & Kocic, G. (2020). Water governance: a conceptual framework for empirical analysis. *Water, 12*(9), 2492. https://doi.org/10.3390/w12092492
Srinivasan, V., Konar, M., & Sivapalan, M. (2017). Water governance in a comparative perspective: From local to global. *Water Resources Research, 53*(11), 9580-9595. https://doi.org/10.1002/2017WR020839
Steenbergen, F., & Hajer, M. (2011). Institutional incentives for integrated water resources management: a case study of the Zambezi basin. *Environmental Science & Policy, 14*(3), 304-316. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2010.11.002
Stevens, L. (2022). Smart water networks: IoT and AI-driven water management solutions. *Sensors, 22*(10), 3745. https://doi.org/10.3390/s22103745
Suárez, E., & Caro, J. (2023). Digital transformation in water sector: Applications, challenges and future perspectives. *Water, 15*(5), 905. https://doi.org/10.3390/w15050905

Sutton, S., & Kemp, D. (2020). Transboundary water governance in the Nile basin: Challenges and opportunities. *Water Policy, 22*(1), 23-38. https://doi.org/10.2166/wp.2019.123
Swyngedouw, E. (2009). The political economy and political ecology of the hydro-social cycle. *Journal of Contemporary Water Research & Education, 142*(1), 56-60. https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2009.00031.x
Tang, X., Jiang, Y., & Xu, J. (2024). AI-enhanced water quality monitoring systems: A review. *Environmental Monitoring and Assessment, 196*(3), 186. https://doi.org/10.1007/s10661-024-11417-7
UN-Water. (2022). UN World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible. UNESCO Publishing.
UNDP. (2017). Governance for Sustainable Development Goals: Integrating governance in the SDG framework. UNDP.
Uprety, L., & Asselin, H. (2018). Indigenous water governance and climate change in Canada. *Ecology and Society, 23*(1). https://doi.org/10.5751/ES-09861-230131
Van Koppen, B., & Schreiner, B. (2014). Turning governance upside down: A new approach to water governance. *Water Alternatives, 7*(1), 182-199.
Wilder, M., & Snavely, K. (2017). Mapping transboundary water cooperation: data, methods, and applications. *Water International, 42*(2), 156-177. https://doi.org/10.1080/02508060.2017.1283163
Wilson, E., & Thomas, A. (2023). AI in water resource management: Opportunities and ethical considerations. *Water, 15*(9), 1299. https://doi.org/10.3390/w15091299
Wong, S. L., & Brown, R. R. (2009). The water sensitive city: Principles for practice. *Water Science and Technology, 60*(3), 673-682. https://doi.org/10.2166/wst.2009.403
World Bank. (2018). The World Bank Annual Report 2018.
Yusuf, A. A., & Resosudarmo, B. P. (2009). Does environmental degradation affect poverty? Evidence from Indonesia. *Ecological Economics, 68*(6), 1691-1705. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.12.005
Zaragoza, S., & Remoaldo, P. (2020). Urban water management challenges in a changing climate. *Water, 12*(8), 2210. https://doi.org/10.3390/w12082210